



НИИЭФА
РОСАТОМ



80 ЛЕТ
АТОМНОЙ
ПРОМЫШЛЕННОСТИ

RUPAC

'2025 XXIX

RUSSIAN PARTICLE
ACCELERATOR
CONFERENCE
SAINT-PETERSBURG



**СБОРНИК
ТЕЗИСОВ**



НИИЭФА
РОСАТОМ



ЛЕТ
АТОМНОЙ
ПРОМЫШЛЕННОСТИ



**XXIX Международная конференция
«Российская конференция
по ускорителям заряженных частиц
RuPAC'2025»
15-19 сентября 2025 года**

Организатор конференции
Научно-исследовательский институт
электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова

Санкт-Петербург 2025

*Сборник тезисов подготовлен
в Акционерном обществе «Научно-исследовательский институт электрофизической
аппаратуры им. Д.В. Ефремова»
в соответствии с оригиналами, представленными авторами тезисов*

Двадцать девятая международная конференция «Российская конференция по ускорителям заряженных частиц RuPAC'2025»: Сборник тезисов международной конференции (Санкт-Петербург, 15-19 сентября 2025 г.). — СПб.: АО «НИИЭФА», 2025. – 262 с.

Двадцать девятая международная конференция «Российская конференция по ускорителям заряженных частиц RuPAC'2025» проводится в Санкт-Петербурге с 15 по 19 сентября 2025 г.

Конференция посвящена 80-летию атомной отрасли и Акционерного общества «Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова».

В работе конференции примут участие более 350 российских и зарубежных специалистов в области проектирования и разработки ускорителей заряженных частиц и их практического применения. Программа конференции включает в себя обсуждение новых проектов ускорителей и их конструктивных особенностей, радиационно-технологических процессов на базе ускорителей. В программу также включена тематика модификации материалов под воздействием заряженных частиц.

УДК 621.384.6

Уважаемые коллеги!

В год 80-летия атомной отрасли России и 80-летия Научно-исследовательского института электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова в Санкт-Петербурге проходит XXIX Международная конференция «Российская конференция по ускорителям заряженных частиц RuPAC-2025».

Выбор Санкт-Петербурга для проведения мероприятия и НИИЭФА в качестве организатора конференции отнюдь не случаен. В далеком 1945 году при флагмане электротехнической промышленности СССР – Ленинградском заводе «Электросила» – решением Совета Министров было принято решение о создании специализированного ОКБ для проектирования специальных установок, необходимых для реализации Атомного проекта. После его успешной реализации наработанные компетенции трансформировались в создание целого направления по разработке ускорительной техники, нашедшей применение в решении широкого спектра задач от фундаментальных исследований в области ядерной физики до промышленного использования пучковых технологий в самых разнообразных сферах народного хозяйства и медицины.

Сегодня АО «НИИЭФА» – ведущий научный, проектно-конструкторский и производственный центр России по созданию электрофизических установок и комплексов для решения научных и прикладных задач в области физики плазмы, атомной и ядерной физики, здравоохранения, радиационных и энергетических технологий, интроскопии.

Цель конференции – обмен информацией и обсуждение вопросов ускорительной науки и техники, физики пучков заряженных частиц, разработки новых проектов лептонных и адронных коллайдеров, усовершенствования действующих установок, использования ускорителей для научных и прикладных целей, а также привлечение молодых учёных к развитию направления ускорительной техники.

Надеемся, что эта конференция благодаря широкому обмену мнениями и знаниями между ведущими специалистами ускорительных центров России пополнит багаж знаний каждого участника чем-то новым, даст импульс к развитию ускорительной науки, созданию перспективных ускорительных установок.

Желаем Вам успешной работы на конференции, налаживания новых научных связей, плодотворных дискуссий и принятия интересных решений для уверенного продвижения ускорительной науки Российской Федерации к новым свершениям!

С уважением

Председатель программного
комитета конференции **Ю. Гавриш**

Председатель организационного
комитета конференции **С. Герцог**

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ

Председатель

Гавриш Юрий Николаевич

АО «НИИЭФА» ГК «Росатом»

Сопредседатели

Мешков Игорь Николаевич

ОИЯИ

Иванов Сергей Владиславович

НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ

Заместитель председателя

Филатов Олег Геннадиевич

АО «НИИЭФА» ГК «Росатом».

Трубников Григорий Владимирович

ОИЯИ

Шарков Борис Юрьевич

ОИЯИ

Гикал Борис Николаевич

ОИЯИ

Ширков Григорий Дмитриевич

ОИЯИ

Логачев Павел Владимирович

ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН

Винокуров Николай Александрович

ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН

Левичев Евгений Борисович

ЦКП «СКИФ» СО РАН

Кулевой Тимур Вячеславович

НИЦ «Курчатовский институт»,

Корчуганов Владимир Николаевич

НИЦ «Курчатовский институт»

Кравчук Леонид Владимирович

ИЯИ РАН

Полозов Сергей Маркович

НИЯУ МИФИ

Ратахин Николай Александрович

ИСЭ СО РАН

Завьялов Николай Валентинович

РФЯЦ-ВНИИЭФ

Овсянников Дмитрий Александрович

СПбГУ

Станжевский Андрей Алексеевич

РНЦ РХТ им. Гранова

Сычевский Сергей Евгеньевич

АО «НИИЭФА» ГК «Росатом»

Секретари:

Крисанова Наталья Викторовна

АО «НИИЭФА» ГК «Росатом»

Султанова Юлия Анатольевна

АО «НИИЭФА» ГК «Росатом»

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ

Председатель:

Герцог Сергей Викторович

АО «НИИЭФА» ГК «Росатом»

Заместитель председателя

Гавриш Юрий Николаевич

АО «НИИЭФА» ГК «Росатом»

Еникеев Рустам Шамильевич

АО «НИИЭФА» ГК «Росатом»

Смирнов Кирилл Евгеньевич

АО «НИИЭФА» ГК «Росатом»

Николаев Александр Александрович

АО «НИИЭФА» ГК «Росатом»

Кустова Оксана Юрьевна

АО «НИИЭФА» ГК «Росатом»

Сливницын Антон Петрович

АО «НИИЭФА» ГК «Росатом»

Кузин Максим Витальевич

ИЯФ СО РАН

Секретари:

Самойлова Анна Александровна

АО «НИИЭФА» ГК «Росатом»

Авророва Валерия Валерьевна

АО «НИИЭФА» ГК «Росатом»

ПРОГРАММА КОНФЕРЕНЦИИ:

- Современные тенденции в ускорительных технологиях;
- Коллайдеры;
- Динамика пучка, новые подходы к ускорению частиц;
- Ускорители с высокой интенсивностью ускоряемого пучка;
- Ускорители тяжелых ионов;
- Установки синхротронного излучения и лазеров на свободных электронах;
- Основные системы ускорителей и ускорительных комплексов:
 - Магнитные и магнитооптические системы;
 - Ускоряющие системы;
 - Системы автоматизированного управления;
 - Системы диагностики параметров ускоряемого пучка;
 - Вакуумные системы, системы термостабилизации и т.д.
- Сверхпроводящие технологии в ускорительной технике;
- Ускоряющие СВЧ системы и приборы для их питания;
- Ионные, электронные и позитронные источники;
- Прикладные применения ускорителей:
 - Ускорители для фотонной терапии;
 - Ускорители для протонной, адронной и нейтронной терапии;
 - Ускорители для стерилизации и радиационной обработки материалов;
 - Ускорители для прикладных исследований

Содержание

	Ускорители НИИЭФА: от атомного проекта – до наших дней	9
1	Современные тенденции в ускорительных технологиях	11
2	Коллайдеры	21
3	Динамика пучка, новые подходы к ускорению частиц	39
4	Ускорители с высокой интенсивностью ускоряемого пучка	53
5	Ускорители тяжелых ионов	63
6	Установки синхротронного излучения и лазеров на свободных электронах	77
7	Основные системы ускорителей и ускорительных комплексов	99
8	Сверхпроводящие технологии в ускорительной технике	165
9	Ускоряющие СВЧ системы и приборы для их питания	173
10	Ионные, электронные и позитронные источники	191
11	Прикладные применения ускорителей	225

УСКОРИТЕЛИ НИИЭФА: ОТ АТОМНОГО ПРОЕКТА – ДО НАШИХ ДНЕЙ

Ю.Н. Гавриш

АО «НИИЭФА», Санкт-Петербург, Россия

2025 год – знаменательный в жизни атомной отрасли нашего государства. 80 лет назад в год Великой Победы Советского народа над фашистской Германией наша страна была поставлена перед жесткой необходимостью укрепления своей обороноспособности в связи с появлением нового оружия, основанного на использовании внутриатомной энергии урана. Советскому Союзу был брошен вызов, по существу началась первая гонка – гонка вооружений.

Постановлением Государственного комитета обороны СССР от 20 августа 1945 года был образован Специальный комитет при Совете Министров СССР, на который возлагалось руководство всеми работами по развитию научно-исследовательских работ для создания атомного оружия, способного обеспечить безопасность нашего государства. Практически одновременно с Распоряжением Государственного комитета обороны СССР для рассмотрения технических и научных вопросов, планов научно-исследовательских работ и создания установок по использованию внутриатомной энергии урана при Специальном комитете был создан Технический совет, в состав которого вошли известные советские ученые И. К. Кикоин, П.Л. Капица, И.В. Курчатов, Ю.Б. Харитон и В.Г. Хлопин.

Важнейшими проблемами, стоящими перед данным Советом, стали определение путей обогащения урана-235 и исследование альтернативного материала плутония-239 для применения его в изделии. К сожалению, в природе данного изотопа плутония практически нет, его надо было получить искусственно, исследовать его радиохимические свойства, определить его применимость, а далее предложить пути промышленного получения. Единственным вариантом решения этих проблем на тот период рассматривался масс-сепараторный способ разделения изотопов и получения плутония на ускорителе заряженных частиц. Наиболее приемлемым для этого считался циклотрон.

Все предложения и технические задания по разработке узлов, установок и изделий по теме электромагнитного разделения изотопов урана направлялись на Ленинградский завод «Электросила» главному инженеру Дмитрию Васильевичу Ефремову.

«Электросила» была выбрана не случайно, Санкт-Петербург – Ленинград является родиной отечественных циклотронов. В городе были сконцентрированы как передовые научные центры: Физико-технический и Радиевый институты, НПО «Коминтерн», так и производственные, располагающие квалифицированными кадрами и оборудованием, которое могло использоваться для изготовления узлов циклотронов – заводы «Электросила», «Ижорский», «Красный выборжец» и т.д.

К 1945 году на заводе «Электросила» уже имелся опыт проектирования и изготовления основных узлов первых в стране циклотронов для ленинградских институтов, изготовленных еще до войны.

Д.В. Ефремов обратился к Л.П. Берии, курировавшему от Правительства СССР Атомный проект с запиской, где, в частности, говорилось: «Опыт работы показал, что получаемые от научно-исследовательских организаций технические задания, идеи и эскизы, должны быть грамотно и квалифицированно переработаны на инженерный язык, поэтому необходимо немедленно организовать при заводе «Электросила» (как ведущем в этой части производства) особое конструкторское бюро, в задачи которого входит практическое инженерное осуществление научно-исследовательских разработок институтов, создание опытных и промышленных комплектов электромагнитных установок и циклотронов».

27 декабря 1945 года Л.П. Берия представил И.В. Сталину на рассмотрение проект Постановления Совета Народных Комиссаров (СНК) СССР «Об организации при заводе «Электросила» Особого конструкторского бюро по проектированию «специальных электромагнитных установок, требующихся для выделения урана 235 ионным (магнитным) методом из природной смеси урана 235 и 238, и циклотронов для исследовательских работ».

В этот же день за подписью Председателя Совета Народных Комиссаров СССР И.В. Сталина вышло постановление СНК СССР об организации Особого конструкторского бюро. Этот день считается Днём рождения нашего института. Начальником ОКБ был утверждён главный инженер завода «Электросила» товарищ Дмитрий Васильевич Ефремов. На ОКБ возлагалось

проектирование электромагнитов, разделительных камер, систем стабильного электропитания и управления, источников и приёмников ионов.

В состав ОКБ вошли сотрудники, активно принимавшие участие в проектировании первого циклотрона для Ленинградского физико-технического института Д.В. Ефремов, Е.Г. Комар, Н.А. Монозон, А.М. Столов. С учетом опыта первой разработки И.В. Курчатов рекомендовал именно Д.В. Ефремова руководителем данного конструкторского бюро. В последствии между И.В. Курчатовым и Д.В. Ефремовым сложились дружеские отношения, которые способствовали плодотворной работе по созданию ускорительной техники.

Первой задачей, которая была поставлена перед ОКБ, стало проектирование циклотрона по техническому заданию Лаборатории № 2 для наработки плутония-239, необходимого для реализации атомного проекта. Работа была выполнена в кратчайшие сроки: уже в 1946 году на циклотроне был получен пучок ускоренных дейтронов.

Далее последовали следующие проекты, по техническим параметрам, опережающие время, – создание синхроциклотрона для Дубны с энергией ускоренных протонов 680 МэВ, синхротрона на энергию 10 ГэВ с мягкой фокусировкой, крупнейшего в мире ускорителя на тот период, разработка первого синхрофазотрона с жесткой фокусировкой на 7 ГэВ и последующего за этим синхрофазотрона на энергию 70 ГэВ, который на протяжении ряда лет был крупнейшим в мире ускорителем протонов.

Параллельно с разработкой протонных машин началось проектирование и электронных ускорителей: линейного ускорителя на 2 ГэВ для Харьковского физико-технического института, синхротрона с жесткой магнитной фокусировкой для Ереванского физического института на энергию 6 ГэВ.

По мере становления ОКБ-НИИЭФА и расширения его штата с конца пятидесятих годов были развернуты работы по созданию серии ускорителей для прикладных исследований.

В короткие сроки была разработана и изготовлена серия классических циклотронов Р-7, У-120, У-150, У-300 для научно-исследовательских институтов СССР и исследовательских центров стран народной демократии. Затем последовали изохронные циклотроны, циклотроны тяжелых ионов, среди которых У-240 на период его создания и первых лет эксплуатации был одним из крупнейших в мире. В настоящее время институтом создана серия циклотронов СС для наработки практически всего спектра медицинских радиоизотопов, разрабатываются также специализированные ускорители данного типа для решения прикладных задач. Создана серия линейных резонансных ускорителей для неразрушающего радиационного контроля с энергией от 3 до 15 МэВ, которые в последствии с успехом использовались и для интроскопического контроля крупногабаритных изделий. На определенных этапах разработки были созданы модели линейных ускорителей, которые по своим техническим параметрам существенно превосходили зарубежные аналоги. Разработана серия ускорителей для радиационно-химических процессов на основе линейных ускорителей с энергией от 5 до 15 МэВ с выходной мощностью до 15- 20 кВт и высоковольтных ускорителей с энергией от 0,5 до 2,5 МэВ и выходной мощностью от 10 до нескольких сот киловатт.

Институт внес огромный вклад в создание импульсных сильноточных электронных ускорителей как для научных исследований (ускорительный комплекс «АНГАРА-5»), так и прикладного применения (серия ускорителей типа «ГЕЗА»)

Особо следует отметить успехи НИИЭФА в области создания мощных нейтронных генераторов, обеспечивающих получение потоков нейтронов с интенсивностью на уровне 10^{13} нейтрон/сек, что сравнимо с потоками нейтронов в каналах исследовательских реакторов большой мощности.

Институт обладает уникальными знаниями по разработке и опытом организации мелкосерийного производства линейных ускорителей для лучевой терапии, применяемой для лечения онкологических заболеваний. Более 100 ускорителей различных моделей было поставлено в клинические учреждения СССР и Российской Федерации.

В настоящее время в институте активно продолжают работы по созданию уникальных образцов ускорителей заряженных частиц, которые используются как в технологических процессах, так и при проведении прикладных исследований.

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ В УСКОРИТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ

СТАТУС У-70

*Калинин В.А., Брагин А.А., Васильев Д.А., Зайцев А.М., Игнашин Н.И., Иванов С.В.,
Лапыгин В.Г., Лебедев О.П., Максимов А.В., Маркин А.М., Миличенко Ю.В.,
Солдатов А.П., Стрекаловских С.А., Сытов С.Э., Тюрин Н.Е.*

«Курчатовский институт» – ИФВЭ, Протвино, Россия

В работе представлено текущее состояние Ускорительного комплекса У-70 «Курчатовский институт» – ИФВЭ. Акцент сделан на недавние работы и усовершенствования, осуществлённые со времени предыдущей конференции RUPAC-2023 в хронологическом порядке сеансов.

Ускорительный комплекс У-70 состоит из четырёх ускорителей – двух линейных (И-100, УРАЛ-30) и двух кольцевых (У-1.5, У-70). Со времени предыдущей конференции RuPAC 2023 на ускорительном комплексе У-70 проведено четыре сеанса работы. Даты проведения, количество дней и потребителей, работающих в сеансах представлены в таблице.

Четыре сеанса работы У-70 между RuPAC2023 и RuPAC2025

Сеанс	2023-2	2024-1	2024-2	2025-1
Последовательный запуск ускорителей УРАЛ-30, У-1.5 и У-70 (И-100 запускался параллельно с задержкой)	30 Октября	26 Февраля	23 Сентября	10 Марта
Пучок в У-70	20 Ноября	18 марта	14 Октября	04 Апреля
Программа экспериментальной физики (fixed-target) с выведенными пучками высоких энергий	23 Ноября ÷ 15 Декабря, 22 дня	21 Марта ÷ 04 Апреля 14 дней	28 Октября ÷ 06 Декабря 29 дней	04 ÷ 25 Апреля 21 день
Число потребителей пучка (Физические установки)	9	2	9	9
Исследования ускорителей, физики и техники пучков заряженных частиц, дней	15	13	34	15
Ионная программа, только промежуточная энергия.	15÷25 Декабря 10 дней	04 ÷ 14 Апреля 10 дней	09÷13 Декабря, 4 дня	28 ÷ 30 Апреля, 2 дня

ОПТИМИЗАЦИЯ ИСТОЧНИКА ЖЁСТКИХ ГАММА-КВАНТОВ НА БАЗЕ ЭЛЕКТРОННОГО НАКОПИТЕЛЯ

Никифоров Д.А.^{1,2,3}, Винокуров Н.А.^{1,3}

¹Институт ядерной физики имени Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

²Центр коллективного пользования «СКИФ», Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН, Кольцово, Россия

³Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

Метод обратного комптоновского рассеяния лазерных фотонов является эффективным методом для получения перестраиваемых по энергии квазимонохроматических гамма-квантов. Комптоновские гамма-кванты могут применяться для изучения фотоядерных реакций, таких как комптоновское рассеяние на ядрах, фотовозбуждение ядер, фоторазвал ядер, и многих других. Для получения таких фотонных пучков используются комптоновские источники на основе электронных накопительных колец. В мире функционируют несколько таких источников, среди которых можно выделить источник $\text{H}\gamma\text{S}$ находящийся в университете Дюка и источник NewSUBARU находящийся в университете Хьюго. В настоящее время в России проектируется источник комптоновских гамма-квантов на основе электронного накопительного кольца. В данной работе представлен проект накопительного кольца для генерации Комптоновских гамма-квантов, а также получены простые выражения для оптимизации параметров источника и приведены некоторые примеры их использования.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВОЗБУЖДЕНИЯ КИЛЬВАТЕРНОЙ ВОЛНЫ САМОМОДУЛИРОВАННЫМ ПУЧКОМ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

Ярыгова В.М.^{1,2}, Лотов К.В.^{1,2}

¹Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

²Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

Плазменное кильватерное ускорение — это новый метод ускорения заряженных частиц, основанный на возбуждении в плазме интенсивных продольных электрических полей. Эти поля возникают при прохождении через плазму так называемого драйвера — пучка заряженных частиц или мощного лазерного импульса. Драйвер расталкивает электроны плазмы, создавая за собой кильватерную волну, в которой ускоряющее поле может в сотни раз превышать поля в классических резонаторных ускорителях.

В данной работе рассматривается случай, когда драйвером служит длинный пучок заряженных частиц. Поскольку его длина значительно превышает длину плазменной волны, происходит процесс самомодуляции — пучок превращается в последовательность коротких микросгустков. Это происходит благодаря развитию пучково-плазменной неустойчивости. Процесс самомодуляции крайне нелинеен, но при определенных условиях становится воспроизводимым. Свойства микросгустков, формирующихся в плазме, разительно отличаются от свойств пучков, генерируемых в обычных ускорителях, поэтому их исследование представляет большой интерес.

Основное внимание в работе уделено влиянию свойств микросгустков на возбуждаемое кильватерное поле. Для этого проведено численное моделирование с помощью двумерного квазистатического кода LCODE, а также разработана аналитическая модель для описания микросгустков после завершения самомодуляции.

В процессе самомодуляции пучок эволюционирует, изменяя свою форму. После самомодуляции пучок формирует последовательность микросгустков с резко пикированным распределением плотности по радиусу, значительно отличающимся от исходного гауссовского профиля. Причем разные слои драйвера эволюционируют по-разному, что также описывается аналитическими моделями. Эти модели хорошо согласуются с результатами численных расчетов.

Изменение формы пучка также ведет к изменению эффективности в возбуждении им кильватерной волны. Слои пучка после самомодуляции дают гораздо больший вклад в волну, чем слои исходного пучка. Это изменение эффективности зависит от начальных параметров пучка, таких как радиус и эмиттанс.

Полученные результаты имеют важное значение для оптимизации параметров плазменных ускорителей. Разработанные модели позволяют предсказывать поведение пучка и кильватерного поля, что открывает новые возможности для повышения эффективности ускорения частиц.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-12-00028.

КВАЗИСТАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОПИСАНИЯ ЭВОЛЮЦИИ ЛАЗЕРНОГО ДРАЙВЕРА В ПЛАЗМЕННОМ КИЛЬВАТЕРНОМ УСКОРИТЕЛЕ

Кутергин Д.Д.^{1,2}, Дорожкина М.С.^{1,2}, Спицын Р.И.^{1,2}, Шалимова И.А.^{1,3}, Туев П.В.^{1,2}

¹Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

²Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

³Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск, Россия

В плазменных волнах продольные электрические поля могут достигать огромных значений вплоть до 100 ГэВ/м, что привлекательно использовать для ускорения заряженных частиц. В этом случае плазма выступает средой для передачи энергии от источника к ускоряемым частицам. Источником, называемым драйвером, может служить релятивистский пучок заряженных частиц или лазерный импульс, который возбуждает в плазме кильватерную волну с большой напряженностью электрического поля. За драйвером следует ускоряемый пучок заряженных частиц, который необходимо инжектировать в ускоряющую и фокусирующую фазу волны для эффективной передачи энергии.

Современные лазерные системы способны производить лазерные импульсы в широком диапазоне параметров. Большое разнообразие режимов лазерного кильватерного ускорения располагает к новым исследованиям в этой области.

Изучение плазменного кильватерного ускорения с лазерным драйвером требует учёта его трёхмерной эволюции, которая не поддаётся аналитическому описанию. Хотя моделирование из первых принципов обеспечивает детальное описание взаимодействия, его применение требует использования больших вычислительных мощностей. Квазистатическая модель плазмы в совокупности с описанием лазерного импульса через его огибающую позволяет на несколько порядков увеличить скорость расчетов. В работе реализована численная схема для согласованного моделирования эволюции лазерного драйвера и плазменной волны квазистатическим кодом в трёхмерной геометрии. Уравнение эволюции огибающей лазерного импульса решается при помощи продольно-поперечной прогонки, а влияние лазерного импульса на плазму описывается пондеромоторной силой. Разработанная схема обладает хорошей устойчивостью, а результаты моделирования демонстрируют согласие с известными аналитическими решениями. Однако, при лазер-плазменном взаимодействии частота лазерного излучения изменяется, что накладывает ограничение на использование уравнения на огибающую лазерного импульса, где частота считается постоянной. Для некоторых режимов взаимодействия это ограничение оказывается существенным, поэтому в работе также предложен новый подход к описанию лазерного импульса в рамках квазистатического описания кильватерного ускорения.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-12-00028, <https://rscf.ru/project/23-12-00028/>.

ИССЛЕДОВАНИЕ СПИН-ДЕКОГЕРЕНЦИИ В КОЛЬЦЕ ФОРМЫ 8 ДЛЯ ПОИСКА ИСТОЧНИКОВ СР-НАРУШЕНИЯ

Мельников А.А.^{1,2,3}, Колокольчиков С.Д.^{1,2}, Аксентьев А.Е.^{1,2,4}, Сеничев Ю.В.^{1,2}

¹Институт ядерных исследований РАН, Москва, Россия

²Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия

³Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау, Черноголовка, Россия

⁴Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

В данной работе рассмотрены особенности ускорителя формы 8 с точки зрения спиновой динамики. Одними из главных достоинств такой структуры являются: отсутствие пересечения спиновых резонансов при ускорении пучка и возможность управлять поляризацией в спин-прозрачном режиме. В работе численно проверена гипотеза, что кольцо формы 8 характеризуется временем когерентности несколько часов; рассмотрено влияние вторых порядков отклонений по фазовым координатам на декогеренцию. Представлены модификации ускорителя формы 8 для поиска сигнала аксионоподобных частиц и электрического дипольного момента лёгких ядер.

Ускоритель формы 8 интересен, в первую очередь, с точки зрения спиновой динамики. Благодаря свойству компенсации вращения спина в противоположных арках, частота спин-прецессии тождественно равна нулю для любой энергии. Данное свойство способствует сохранению поляризации при ускорении пучка из-за отсутствия пересечения спиновых резонансов. Также свойство компенсации вращения спина имеет важное следствие, как возможность управлять поляризацией в спин-прозрачном режиме [1] и долгое время спиновой когерентности в кольце формы 8 [2].

Существует предположение, что вторые порядки отклонений частиц по фазовым координатам, приводящие к удлинению орбит, будут способствовать уменьшению теоретически возможной величины времени когерентности несколько часов [2]. Данная гипотеза была численно верифицирована в рассматриваемой работе. Динамика частиц с отклонениями второго порядка по фазовым координатам сводилась к смещению среднего уровня энергии.

Долгое время спиновой когерентности является крайне положительным условием для набора статистических данных при проведении прецизионных экспериментов с поляризованными пучка-

ми. Например, это может быть поиск аксионоподобных частиц. Для этого в структуру ускорителя необходимо добавить фильтр Вина для задания спиновой частоты и поиска резонанса с полем аксиона. Также это может быть поиск электрического дипольного момента (ЭДМ) лёгких ядер. Для этого в структуру должны быть добавлены фильтры Вина на прямых секциях для компенсации угла поворота спина в арках и соленоиды-змейки, позволяющие накапливать вращение спина от ЭДМ в структуре. В работе представлены и проанализированы указанные варианты модификаций структуры формы 8 для поиска нарушений фундаментальных симметрий.

Список литературы

1. Y. Filatov et al., “Polarized Ion Beams in Figure-8 Rings of JLab’s MEIC”, in Proc. IPAC’14, Dresden, Germany, Jun. 2014, pp. 68-70. doi:10.18429/JACoW-IPAC2014-MOPRO004.
2. R. Suleiman, Y. Derbenev, M. Grau, and V. Morozov, “Particle accelerator spin-transparent storage rings for beyond state-of-the-art science”, in Proc. IPAC’24, Nashville, TN, USA, May 2024, pp. 1897-1900. doi:10.18429/JACoW-IPAC2024-WEAN2.

АДАПТАЦИЯ КВАЗИСТАТИЧЕСКОГО КОДА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗАХВАТА ПЛАЗМЕННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ В КИЛЬВАТЕРНОМ УСКОРИТЕЛЕ

Лотов И.К.^{1,2}, Лотов К.В.^{1,2}, Туев П.В.^{1,2}

¹Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

²Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

Плазменное кильватерное ускорение – одно из перспективных направлений ускорительной физики, которое активно развивается в течение последних десятилетий. В плазменной волне, возбуждаемой прохождением через плазму ведущего пучка, возникают ускоряющие поля большой напряженности ~ 100 ГВ/м [1]. Поэтому кильватерное ускорение – удачный метод для создания компактных ускорителей заряженных частиц. Кроме того, в некоторых схемах кильватерного ускорения можно отказаться от внешней инжекции ускоряемого пучка. В этом случае плазменные электроны захватываются кильватерной волной и ускоряются до высоких энергий. Такой механизм формирования ускоряемого пучка особенно интересен тем, что позволяет получать электронные пучки с малым эмиттансом ~ 0.1 мм мрад [2].

Процесс захвата плазменных электронов не поддается аналитическому описанию, поэтому теоретические исследования проводятся с помощью численного моделирования [3]. Моделирование из первых принципов требует использования большого количества вычислительных ресурсов, поэтому актуально развивать упрощенные модели описания кильватерного ускорения. Одной из популярных моделей является квазистатическое приближение [3], которое лежит в основе разрабатываемого в ИЯФ СО РАН программного комплекса LCODE [4]. Его использование дает выигрыш в быстродействии вплоть до 6 порядков [5] по сравнению с кодами без приближений. Однако, пока что в рамках этой модели удавалось получить только качественное представление о процессе захвата плазменных электронов.

В квазистатической модели движение плазменных частиц описывается в предположении их малой продольной скорости. В момент захвата для части частиц это предположение нарушается, и их траектории следует вычислять с помощью уравнений движения без приближений. Прямая реализация этой идеи приводит к развитию сильных численных неустойчивостей из-за значительной разницы в двух подходах. Для подавления неустойчивости шаг моделирования, на котором происходит захват, требуется вычислять несколько раз. При пересчете быстрые плазменные частицы заменяются частицами пучка, моделируемыми без приближений. В этот момент необходимо согласованно изменить токи системы, чтобы не возникало скачка производной в уравнениях на электрические и магнитные поля. В итоге, впервые в мире с помощью модифицированного квазистатического кода удалось получить количественное согласие заряда захваченного пучка с результатами расчета кодом без приближений, использовался код FBPIC [6]. Предложенный подход расширяет

границы применимости квазистатических кодов для моделирования конфигураций кильватерного ускорения, в которых происходит захват плазменных электронов.

Список литературы

1. 2020 roadmap on plasma accelerators / F. Albert, M. E. Couprie, A. Debus [et al.] // New Journal of Physics. 2021. Vol. 23. №. 3. P. 031101.
2. Low-Emittance Electron Bunches from a Laser-Plasma Accelerator Measured using Single-Shot X-Ray Spectroscopy / G.R. Plateau, C.G.R. Geddes, D.B. Thorn [et al.]. // Physical review letters. 2012. Vol. 109. №. 6. P. 064802.
3. Simulations for plasma and laser acceleration / Vay J. L. and Lehe R. // Reviews of Accelerator Science and Technology. 2016. Vol. 9. P. 165-186.
4. <https://lcode.info/>.
5. Лазерное кильватерное ускорение в плазменном канале / М. С. Дорожкина, К. В. Балусев, Д. Д. Кутергин [и др.] // Квантовая электроника. 2023. Т. 53. №. 2. С. 176-181.
6. A spectral, quasi-cylindrical and dispersion-free Particle-In-Cell algorithm / R. Lehe, M. Kirchen, I. A. Andriyash [et al.]. // Computer Physics Communications. 2016. Vol. 203. P. 66-82.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ИНТЕГРАТОРОВ ДВИЖЕНИЯ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПЛАЗМЕННОГО УСКОРЕНИЯ

Туев П.В.^{1,2}

¹Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

²Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

Компьютерное моделирование является важным инструментом во многих областях науки, и ускорительная физика не стала исключением. Использование моделирования приобретает особую важность при проектировании новых установок и исследовании процессов, прямое экспериментальное измерение которых сложно или невозможно. Чтобы этот инструмент работал правильно, важно учитывать границы применимости используемых подходов, иначе полученные результаты не будут соответствовать действительности.

При моделировании динамики заряженных частиц в электромагнитном поле большое значение имеет точность вычисления их импульса. Этот аспект важен как при анализе орбиты частицы в полях, определяемых ускоряющей структурой, так и при самосогласованном моделировании динамики системы методом частиц в ячейках. В последнем случае продолжительное время использовался метод Бориса, предложенный в 1970 году [1]. Этот метод до сих пор является популярным в силу простоты реализации, высокой скорости вычислений и свойству схемы сохранять фазовый объём. Однако, эта схема не является инвариантной относительно преобразования Лоренца, что приводит к заметным ошибкам в моделировании для некоторых конфигураций полей [2]. Это открытие подтолкнуло научное сообщество к разработке новых интеграторов, заметно отличающихся от ранее используемого алгоритма.

В работе представлен сравнительный анализ нескольких интеграторов траектории заряженной частицы. Наравне с классическим методом Бориса рассматриваются как его модификации с выбором другой средней скорости в силе Лоренца [2, 3], так и более сложные алгоритмы, где, например, напрямую применяется аналитическое решение в постоянных скрещенных полях [4]. Проведено сравнение точности предсказываемых траекторий в постоянных полях и моделирования динамики пучка. Последнее сделано на примере ускорения в плазменной волне. Также приведён сравнительный анализ скорости вычислений различными методами.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-12-00028, <https://rscf.ru/project/23-12-00028/>.

Список литературы

1. Relativistic plasma simulation-optimization of a hybrid code / J. P. Boris. // Proceeding of Fourth Conference on Numerical Simulations of Plasmas. – 1970. – P. 3–67.
2. Simulation of beams or plasmas crossing at relativistic velocity / J.-L. Vay. // Physics of plasmas. – 2008. – Vol. 15. – P. 056701.
3. Simulation of beams or plasmas crossing at relativistic velocity / A. V. Higuera and J. R. Cary. // Physics of plasmas. – 2017. – Vol. 24. – P. 052104.
4. A new integrator for relativistic E-cross-B motion of charged particles / T. Umeda. // Journal of Computational Physics. – 2023. – Vol. 472. – P. 111694.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ СПИНА ПРОТОНОВ В КВАЗИ-ЗАМОРОЖЕННОЙ СТРУКТУРЕ ДЛЯ ПОИСКА АКСИОНОВ

Аксентьев А.Е.^{1,2,3}, Мельников А.А.^{1,3,4}, Колокольчиков С.Д.^{1,3}, Сеничев Ю.В.^{1,3}, Николаев Н.Н.⁴

¹Институт ядерных исследований РАН, Москва, Россия

²Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

³Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия

⁴Институт теоретической физики им. Ландау, Черноголовка, Россия

В работе представлены результаты предварительного теоретического анализа и моделирования чувствительности спина протонов в квази-замороженной структуре, при её использовании как широкополосной аксионной антенны, с учётом времени когерентности локальной фазы аксионного поля и времени когеренции спина поляризованного пучка. Рассмотрены: резонанс действия аксионного поля на спин частицы; предложение проведения измерений в области низких частот $g-2$ прецессии; влияние секступольного подавления спиновой декогеренции пучка.

Детектирование аксионов и аксионоподобных частиц в лабораторных условиях сталкивается с проблемой их чрезвычайно слабого взаимодействия друг с другом и иными субатомными частицами. Однако, спин частиц оказывается чувствительным к их присутствию.

Два интересных, в контексте ускорителя с поляризованными пучками, механизма воздействия аксионного поля на спин частицы — это, во-первых, появление у неё осциллирующего электрического дипольного момента (ЭДМ) и, во-вторых, чувствительность спина к градиенту аксионного поля (который в ускорителе всегда направлен продольно движению пучка и действует подобно распределённому ВЧ-соленоиду с частотой колебаний аксионного поля), так называемый “псевдомагнитный” эффект. [1]

В обоих случаях, наблюдение аксионного поля основано на резонансе, возникающем при совпадении $g-2$ частоты спиновой прецессии вокруг ведущего магнитного поля ускорителя с частотой колебаний аксионного поля. Таким образом поиск аксиона и подобных частиц в накопителе с поляризованным пучком сводится к сканированию диапазона $g-2$ частот с целью пересечения момента совпадения $g-2$ и аксионной частот.

Список литературы

1. S. Karanth et al. (JEDI Collaboration), “First Search for Axion-Like Particles in a Storage Ring Using a Polarized Deuteron Beam,” Phys. Rev. X, vol. 13, p. 031004, 2023.

РАЗРАБОТКА ПРИНЦИПИАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ НАКОПИТЕЛЬНОГО КОЛЬЦА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДИПОЛЬНОГО МОМЕНТА ЛЕГКИХ ЯДЕР

Паламарчука П.И.^{1,2}, Колокольчиков С.Д.^{1,3}, Аксентьев А.Е.^{1,2,3}, Мельников А.А.^{1,3,4}, Сеничев Ю.В.^{1,3}

¹Институт ядерных исследований РАН, Москва, Россия

²Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

³Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия

⁴Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау, Черноголовка, Россия

В работе рассматривается общая концепция устройства структуры накопительного кольца, предназначенного для исследования электрического дипольного момента (ЭДМ) протона и дейтрона. Приведены основные особенности замороженной и квази-замороженной структур, предназначенных для подавления вращения спина под действием магнитного дипольного момента (МДМ). Для реализации приведенных методик определена зависимость полей в спин-компенсирующих элементах.

Предполагаемой причиной нарушения баланса вещества и антивещества в пределах обозримой Вселенной является наличие ЭДМ у элементарных частиц. В качестве инструмента для изучения ЭДМ заряженных частиц выступает циклический ускоритель в режиме накопительного кольца. Основной исследовательский интерес представляет определение общего вида структуры, совмещающей функцию исследования ЭДМ протона и дейтрона.

Для изучения ЭДМ частиц в режиме “замороженного” спина [1] предложено применение элементов с совмещенными электрическими и магнитными полями (E+B элементы), обладающих свойством независимой настройки напряженностей полей. Данное свойство позволяет осуществить переход от чисто электростатического кольца для исследования протонов к электромагнитному кольцу для исследования дейтронов путем включения магнитной составляющей в элементы и настройки напряженностей в соответствии с требованиями эксперимента.

Для изучения ЭДМ частиц в режиме “квази-замороженного” спина [2] рассматривается возможность применения компенсирующих элементов в чисто магнитном кольце. Показано, что их длина и минимальная периодичность структуры существенно зависят от сорта исследуемой частицы. При максимальной энергии эксперимента ($E = 270$ МэВ) протяженность компенсирующих элементов для протонов в несколько раз больше, чем для дейтронов, что приводит к значительному увеличению длины накопительного кольца. Таким образом, для проведения исследований был предложен как полномасштабный, так и более компактный вариант устройства установки с пониженной энергией для протонов.

В работе приводятся принципиальные структуры для изучения ЭДМ протона и дейтрона в режиме “замороженного” и “квази-замороженного” спина.

Список литературы

1. Anastassopoulos D., Anastassopoulos V., Babusci D. et al. AGS proposal: Search for a permanent electric dipole moment of the deuteron nucleus at the 10^{-29} e·cm level. – Tech. Rep. BNL, 2008.
2. Senichev Yu., Lehrach A., Lorentz B., Maier R., Andrianov S., Ivanov A., Chekmenev S., Berz M., Valetov E. Quasi-frozen spin method for EDM deuteron search // Proc. of IPAC 2015 (Richmond, VA, USA). – 2015. – P. 213.

МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ КОГЕРЕНТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ, ГЕНЕРИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ С ЭНЕРГИЕЙ 5.7 МэВ ОТ СПИРАЛЬНОЙ МИШЕНИ

Бердников Н.С., Лазаренко Г.Ю., Шкитов Д.А.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия

Развитие источников когерентного излучения на основе электронных пучков представляет актуальную задачу современной ускорительной техники. Особый интерес представляют источники вихревого излучения с орбитальным угловым моментом на основе релятивистских электронных

пучков. В настоящее время известно только применение спирального ондулятора для генерации вихревого излучения с помощью заряженных частиц [1]. Спиральные мишени открывают новые возможности для генерации такого излучения.

Гипотеза исследования состоит в возможности генерации излучения с орбитальным угловым моментом с помощью механизма дифракционного излучения от спиральной мишени. Целью данной работы является теоретическое исследование и численное моделирование характеристик когерентного дифракционного излучения, генерируемого электронным пучком при взаимодействии со спиральной мишенью (в виде геликоида). Электронный пучок с энергией 5.7 МэВ и длительностью сгустков 10-15 пс при нормальном падении на спиральную мишень с центральным отверстием генерирует когерентное дифракционное излучение в ГГц диапазоне частот.

Численное моделирование проводится с использованием обобщенного метода поверхностных токов для расчёта дифракционного излучения от идеально проводящей мишени сложной геометрии. Применяется разработанный скрипт на языке Wolfram Language для расчёта трёхмерных спектрально-угловых распределений интенсивности в дальней зоне [2]. Анализ поляризационных свойств излучения осуществляется через расчёт параметров Стокса. Дополнительно исследованы фазовые свойства поля вихревого излучения в плоскости наблюдения. Оптимизация параметров спиральной мишени проводится под будущую возможность проведения измерений на микротроне ТПУ.

Результаты численного моделирования показывают отличия излучения от спиральной мишени и классической плоской мишени с отверстием. Разработанная методика позволяет целенаправленно проектировать параметры спиральных структур для получения излучения с заданными характеристиками. Полученные результаты представляют практический интерес и могут найти применение в фундаментальных исследованиях свойств электромагнитного излучения с орбитальным угловым моментом.

Исследование выполнено при поддержке программы развития ТПУ «Приоритет 2030» (Приоритет-2030-НИП-061-198-2025).

Список литературы

1. Князев Б.А., Сербо В.Г. Пучки фотонов с ненулевой проекцией орбитального момента импульса: новые результаты // УФН. – 2018. – Т. 188., № 5. – С. 508–539.
2. Дышеков А. А. Верификация и совершенствование численного кода для расчёта характеристик дифракционного излучения / А. А. Дышеков, М. М. Токтаганова // Перспективы развития фундаментальных наук : Сборник научных трудов XVI Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 23–26 апреля 2019 года. Том 1. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2019. – С. 133-135.

МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ЛАЗЕРНОГО КИЛЬВАТЕРНОГО УСКОРИТЕЛЯ С БОЛЬШИМ ЭНЕРГОЗАПАСОМ ДРАЙВЕРА

Дорожкина М.С.^{1,2}, Лотов К.В.^{1,2}

¹ИЯФ СО РАН, Новосибирск, Россия, ²НГУ, Новосибирск, Россия

Кильватерное ускорение в плазме представляет собой перспективный метод, позволяющий достичь ускоряющих градиентов порядка 10–100 ГВ/м за счёт возбуждения плазменной волны мощным лазерным импульсом или пучком частиц. Такие характеристики позволяют значительно сократить длину ускоряющих секций по сравнению с традиционными структурами на основе высокочастотных резонаторов.

В данной работе рассматривается задача оптимизации параметров кильватерного ускорения электронов с использованием лазерного импульса, соответствующего проекту XCELS. Целью является нахождение таких значений базовой плотности плазмы, масштаба неоднородности плотности плазмы, радиуса и длины лазерного импульса, положения его фокуса и координаты инжекции электронов z_0 , при которых достигается максимальная энергия ускоренных электронов.

Численное моделирование проводится в квазистатическом приближении с помощью двумерного аксиально-симметричного кода LCODE. Описание лазерного импульса реализовано через его огибающую, а расчёт выполняется на сетке с шагами по продольной $\Delta z = 100k_p^{-1}$, радиальной $\Delta r = 0,04k_p^{-1}$ и сопутствующей $\Delta \xi = 0,0005k_p^{-1}$ координатам, обеспечивающими необходимую точность.

Максимальная энергия ускоренных электронов оценивается через интеграл продольного электрического поля E_z на оси

$$W_{\text{est}}(\xi, z) = -e \int_{z_0}^{z_f} E_z(\xi, z') dz'$$

длина ускорения ограничивается координатой z_f , когда рост энергии прекращается. Важным аспектом этого метода является использование байесовской оптимизации, которая позволяет эффективно исследовать многомерное пространство параметров. В отличие от прямого перебора или градиентных методов, байесовский подход строит суррогатную модель на основе гауссовских процессов и последовательно уточняет её, выбирая новые точки с учётом функции приобретения. Этот метод позволяет минимизировать число ресурсоёмких расчетов, устойчив к зашумлённым данным и коррелированным параметрам. Для повышения точности и устойчивости моделирования дополнительно применяются процедуры масштабирования плотности и проверка энергетического баланса.

В результате оптимизации было найдено, что максимальная энергия электронов $W_{\text{max}} = 29 \text{ ГэВ}$ достигается при базовой плотности плазмы $6,14 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$, масштабе неоднородности $5,33 \text{ м}$, длине распространения лазерного импульса 173 см и инжекции электронов в волну на расстоянии 17 см от начала взаимодействия.

КОЛЛАЙДЕРЫ

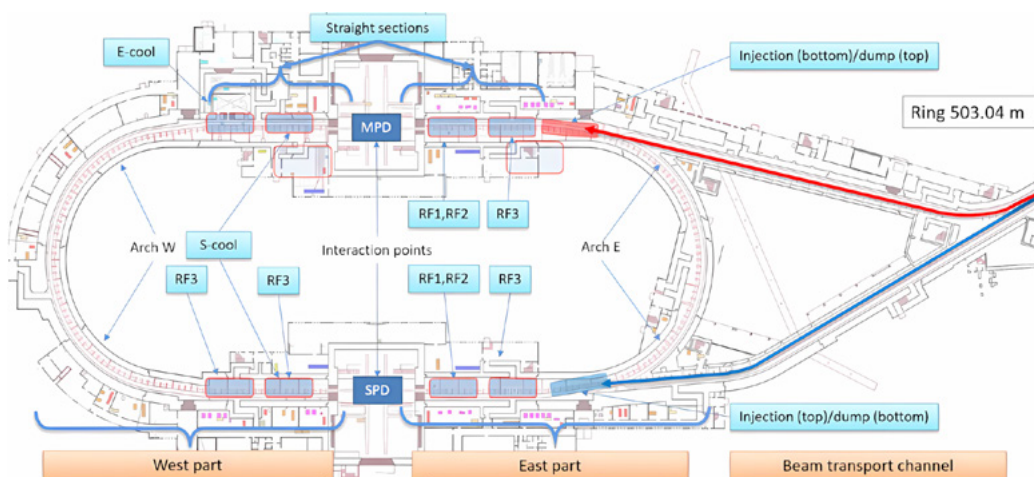
СТАТУС СБОРКИ И ИСПЫТАНИЙ КОЛЬЦА КОЛЛАЙДЕРА NICA

Галимов А.Р., Бутенко А.В., Сыресин Е.М., Коровкин С.А., Куликов Н.А., Лушин А.В., Михайлов Е.А., Никифоров Д.Н., Пельтихин А.В., Погодин А.А., Свидетелев А.Н., Тюлькин В.И.

Лаборатория физики высоких энергий им. В.И. Векслера и А.М. Балдина

Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна, Московская обл., Россия

Коллайдер NICA1 – это кольцевая сверхпроводящая ускорительно-накопительная машина периметром 503,04 м, состоящая из двух независимых полуколец – западного и восточного, между которыми располагаются участки с точками встреч пучков – MPD и SPD. Оба полукольца имеют независимую систему питания криогенными жидкостями. В составе каждого полукольца имеется арка с регулярной магнитной структурой и два прямолинейных участка. Каждый прямолинейный участок содержит два теплых промежутка. В данных промежутках размещается физическое оборудование, работающее при комнатной температуре: ВЧ станции, станции коллимации, электронное и стохастическое охлаждение, мониторы положения пучка, датчики тока, система обратной связи. В восточной арке Коллайдера находятся участки инжекции и сброса заряженных частиц.



Структура Коллайдера NICA

Рабочая температура обмоток магнитов – 4,2К. Охлаждение обмоток осуществляется жидким гелием. Рабочий вакуум в изоляционном объеме – $\approx 10^{-6}$ Па; Рабочий вакуум в пучковой камере – $\leq 2 \times 10^{-9}$ Па; Максимальное напряжение между обмотками и землей ≈ 700 В. Напряжения на высоковольтных устройствах (ВЧ станции, кикеры, септум магниты) – до 120 кВ. Расчётное время потери пучком половины интенсивности – не менее одного часа.

На данном этапе проведены технологически испытания и подготовка к началу охлаждения западного полукольца. Завершены работы по промежуточным вакуумным испытаниям отдельных участков восточного полукольца. Завершается сборка элементов инжекции и вывода пучка. Проводится монтаж теплых прямолинейных участков и подготовка их к прогреву и получению требуемого вакуума.

Список литературы

1. Technical Project of NICA Acceleration Complex (Dubna, 2015).

СИСТЕМА БЫСТРОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ ОРБИТЫ ПУЧКА ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ УСКОРИТЕЛЯ ВЭПП-4М

Коваленко А.А.², Баранов Г.Н.^{1,2,3}, Дергач П.А.^{4,5}, Дмитриев М.С.², Герасев А.В.²

¹Центр коллективного пользования «Сибирский кольцевой источник фотонов»
Института катализа им. Г.К. Борескова СО РАН, Кольцово, Россия

²Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия,

³Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

⁴Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Новосибирск, Россия

⁵Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

ВЭПП-4М – уникальный ускоритель заряженных частиц, предназначенный для проведения исследований в области физики высоких энергий, ядерной физики и экспериментов с использованием синхротронного излучения (СИ). Обеспечение стабильности орбиты пучка заряженных частиц в ускорителе ВЭПП-4М – важная задача, поскольку даже слабые внешние возмущения, такие как смещение магнитных элементов из-за микросейсмических вибраций или нестабильность работы оборудования, могут значительно снизить качество экспериментальных данных.

В работе представлены результаты исследований колебаний пучка, вызванных сетевыми пульсациями источников питания и микросейсмическими вибрациями магнитных элементов. Экспериментально показано, что данные возмущения оказывают значительное влияние на стабильность равновесной орбиты. На основании проведённых измерений была разработана и апробирована система быстрой коррекции замкнутой орбиты, обеспечивающая компенсацию влияния сетевых гармоник (50/100 Гц) и низкочастотных микросейсмических возмущений.

ВЭПП-2000: ПРЕОДОЛЕНИЕ ПРЕДЕЛОВ СВЕТИМОСТИ С КРУГЛЫМИ ПУЧКАМИ

Роговский Ю.^{1,2}, Актершев Ю.^{1,2}, Беликов О.¹, Бедарев Е.^{1,2}, Беркаев Д.¹, Чистяков Д.¹, Денисов В.¹,
Эминов Э.¹, Фомин Л.¹, Карпов Г.¹, Касаев А.¹, Кирпотин А.¹, Кооп И.^{1,2}, Краснов А.^{1,2}, Куркин Г.¹,
Лысенко А.¹, Мотыгин С.¹, Мурасев А.¹, Переведенцев Е.^{1,2}, Просветов В.¹, Растигеев С.¹, Семенов А.¹,
Сенченко А.¹, Шатунов Ю.¹, Шерстюк С.¹, Тимошенко М.¹, Землянский И.¹, Жаринов Ю.¹.

¹Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

²Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

Электрон-позитронный коллайдер ВЭПП-2000, единственная установка, специально разработанная для реализации концепции круглых пучков, демонстрирует выдающиеся параметры пучково-пучковых взаимодействий во всем рабочем диапазоне энергий 150-1000 МэВ. После завершения комплекса модернизаций и оптимизационных работ коллайдер возобновил работу, при этом светимость теперь ограничивается исключительно эффектами пучково-пучкового взаимодействия.

Благодаря прецизионной настройке пучков ВЭПП-2000 достиг рекордного значения светимости $L = 9 \times 10^{31} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ при энергии 900 МэВ, превысив проектные показатели. Выдающаяся стабильность работы установки обеспечивает устойчивый набор данных со скоростью 2-4 пб⁻¹/сутки в области максимальных энергий.

В 2024 году ВЭПП-2000 достиг важного рубежа: оба установленных детектора, СНД и КМД-3, независимо набрали интегральную светимость свыше 1 фб⁻¹, выполнив амбициозную задачу экспериментальной программы. Полученный массив данных открывает уникальные возможности для прецизионных исследований в физике легких кварков. Особого внимания заслуживают недавние измерения сечения процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$, выполненные коллаборацией КМД-3, которые существенно повлияли на понимание аномального магнитного момента мюона — возможного проявления новой физики за пределами Стандартной модели.

ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ И ВНЕДРЕНИЯ НОВЫХ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ КИКЕРОВ ВЭПП- 2000

Касаев А.С., Сенченко А.И., Rogovskiy Ю.А.

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

С момента ввода в эксплуатацию ВЭПП2000, для выпуска заряженных частиц, использовались полосковые кикеры с источниками питания на водородных тиратронах. В процессе модернизации системы питания высоковольтные источники питания были заменены на новый тип источников основанных на новом типе полупроводниковых ключей FID. Главное достоинство FID - время включения 0.1-10нс, максимальные рабочие напряжения ограничены электрической прочностью нагрузки. Базовое направление разработок FID-замена тиратронов и разрядников. Новые источники питания кикеров инжекции ВЭПП2000 задействованы в работе с сентября 2024 года.

В статье описан наш опыт эксплуатации нового оборудования и интеграции в общую систему комплекса. Для чего был проведен значительный объем работ по разработке программ управления, механической адаптации с существующей системой, и электромагнитной совместимостью с оборудованием, размещенным в зале коллайдера.

ТОМОГРАФИЯ ПРОДОЛЬНОГО ФАЗОВОГО ПРОСТРАНСТВА ПРИ МНОГОКРАТНОЙ ИНЖЕКЦИИ В БУСТЕР NICA

Уразов Э. Р.^{1,2}, Брызгунов М. И.^{1,2}, Лебедев В. А.³, Пархомчук В. В.¹, Рева В. Б.^{1,2}

¹Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

²Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

³Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

Алгоритмы томографии продольного фазового пространства активно используются в ускорительной физике для диагностики движения заряженных частиц [1, 2]. В ранее опубликованных работах на эту тему рассматриваются синхротронные колебания частиц внутри сепаратрисы, однако, в некоторых экспериментах практическую ценность имеет и знание распределения частиц в области за сепаратрисой.

В данной работе был разработан алгоритм томографии продольного фазового пространства для областей как внутри сепаратрисы, так и вне её. Так же, как и в работах [1, 2], разработанный алгоритм использует итерационную процедуру ART [3]; отличие заключается в том, что в новом алгоритме уравнение синхротронных колебаний численно решается на широком диапазоне энергий, заведомо шире размаха сепаратрисы, где движение частиц в продольном фазовом пространстве уже не представляет собой замкнутые кривые.

Разработанный алгоритм был применён для диагностики многократной инжекции в Бустер ускорительного комплекса NICA, где эволюция продольного распределения плотности частиц в пучке измерялась при помощи быстрого трансформатора тока (FCT).

Накопление пучка в Бустере осуществляется следующим образом: (1) сгусток длиной порядка половины периметра Бустера инжектируется в область кольца противоположную центру сепаратрисы. (2) За счёт электронного охлаждения ионы смещаются в потенциальную яму ВЧ. (3) Когда длина сгустка становится меньше половины периметра следующая инжекция производится в освободившееся продольное фазовое пространство.

В такой схеме эксперимента FCT регистрирует не только сгруппированные ионные сгустки внутри сепаратрисы, но и только что инжектированные частицы, большая часть которых находится снаружи сепаратрисы. Предложенный алгоритм томографии позволяет восстановить фазовую плотность пучка как внутри, так и снаружи сепаратрисы.

Список литературы

1. Hancock S. The development of longitudinal phase space tomography in the PS // Fifty years of the CERN Proton Synchrotron. Geneva, 2011, V. 1, P. 155-159.

2. Evans N. J. Longitudinal phase space tomography of charged particle beams. UT Austin dissertation. Austin TX, 2014. 204 p.
3. Gordon R. A tutorial on art (algebraic reconstruction techniques) // IEEE Trans Nucl Sci. 1974. V. NS-21, No. 3. P. 78-93.

АПРОБАЦИЯ РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ ПОДАВЛЕНИЯ СИНХРОТРОННЫХ КОЛЕБАНИЙ ПУЧКА ИОНОВ В БУСТЕРЕ НИКА

Ненеин А.Р.^{1,2}, Лебедев В.А.³, Стюф А.С.^{1,2}, Фаткин Г.А.^{1,2}, Яминов К.Р.^{1,2}

¹ООО «Бюро Ф», Новосибирск, Россия

²Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

³Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

Рассмотрен алгоритм работы и аппаратная реализация блока обратной связи для подавления синхротронных колебаний в Бустере ускорительного комплекса НИКА, апробация блока проведена в сеансе с пучком. Написана программа, строящая области устойчивости и сходимости предложенного регулятора для заданного значения частоты и проанализирована его работа в области частот синхротронных колебаний 0,1-10 КГц. Описана аппаратная реализация блока обратной связи, работающего по предложенному алгоритму. Апробация блока в ходе сеанса производилось с пучком Хе на энергии 90,7 МэВ. Синхротронные колебания пучка частотой около 350 Гц возбуждались краткосрочным повышением частоты ВЧ. Продемонстрировано демпфирование колебаний блоком обратной связи и уменьшение потерь интенсивности пучка. Обсуждаются выявленные в ходе апробации проблемы с долгосрочной устойчивостью и возможные пути их решения.

СИБИРСКИЕ ЗМЕЙКИ НА ПОПЕРЕЧНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ ДЛЯ СОХРАНЕНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ ПОЛЯРИЗАЦИЕЙ ПРОТОНОВ В КОЛЛАЙДЕРЕ NICA/OIЯИ

Цыплаков Е.Д.^{1,2}, Филатов Ю.Н.^{1,2}, Кондратенко А.М.^{1,3}, Кондратенко М.А.^{1,3}, Бутенко А.В.², Ладыгин В.П.², Лебедев В.А.², Сыресин Е.М.², Бутенко Е.А.^{1,2}

¹МФИ, Физтех, Долгопрудный, Россия, ²ОИЯИ, Дубна, Россия, ³НТЛ «Заряд», Новосибирск, Россия

Сибирские змейки исключают резонансную деполяризацию при ускорении протонов в синхротронах [1]. На низких энергиях эффективно использовать соленоидальные змейки, которые не искажают равновесную орбиту. Интеграл продольного поля растет пропорционально импульсу, что ограничивает их применение на больших энергиях, где предпочтительнее использовать поперечные поля, интеграл поля которых практически не зависит от энергии. Нижняя граница по энергии для змеек на поперечных полях связана с апертурными ограничениями из-за искажения замкнутой орбиты. Так, в действующем коллайдере RHIC суммарный интеграл поля спиральной змейки равен ≈ 25 Тлм, а искажение замкнутой орбиты составляет ≈ 3 см на 20 ГэВ [2].

Помимо сохранения поляризации в процессе ускорения протонов до 13.5 ГэВ/с в коллайдере NICA необходимо обеспечить управление ориентацией спинов в детекторах SPD и MPD [3]. Для этого планируется использовать режим спиновой прозрачности, который обеспечивается двумя соленоидальными змейками с интегралами поля до 50 Тл·м, расположенными в противоположных промежутках коллайдера NICA. Каждая змейка разбита на две части (на две 50%-змейки) симметрично расположенных вокруг SPD и MPD детекторов. Змейки компенсируют за оборот частицы действие на спин арочных диполей, что позволяет управлять поляризацией протонов с помощью малых магнитных полей. При использовании соленоидов с максимальным полем 5 Тл длина одной 50%-змейки составит ≈ 5 м.

Разработка компактных змеек на поперечных полях является актуальной задачей для NICA. Змейки на 4-х спиральных магнитах, используемые в RHIC, не подходят для NICA из-за апертурных ограничений. В работе [4] был предложен многооборотный спиральный магнит для уменьшения искажения замкнутой орбиты в змейке. На рис. 1 представлена схема 50%-змейки длиной 3.3 м на основе двухоборотного спирального магнита с величиной поля 4 Тл. Максимальное отклонение на

энергии 3.3 ГэВ составляет 3.7 см. Диполи с противоположным направлением вертикального поля, расположенные по краям спирального магнита, восстанавливают орбиту.

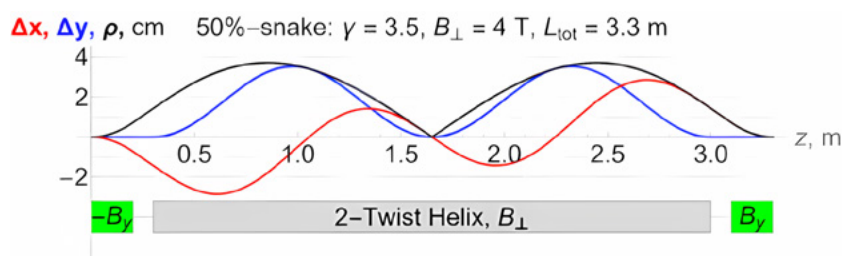


Рис. 1 Двухоборотная спиральная 50%-змейка. Искажение замкнутой орбиты: $\Delta x, \Delta y$ – радиальное и вертикальное отклонения орбиты, $\rho = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}$

В данной работе предлагается змейка на дипольных магнитах с постоянным полем, параметры которой аналогичны многооборотной спиральной змейке. На Рис.2 приведена схема дипольной 50%-змейки. В диполях, помеченных «V» и «H», поле направлено вдоль радиального и вертикального направлений. При использовании диполей с полем 4 Тл общая длина 50%-змейки составит 3.5 м, а максимальное отклонение на энергии 3.3 ГэВ не превысит 3.7 см.

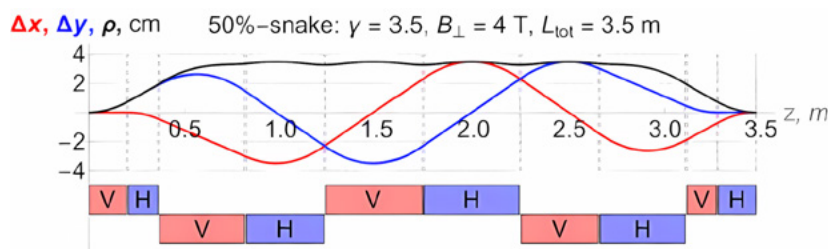


Рис.2 Искажение орбиты в 50%-змейке на дипольных магнитах

Параметры диполей для 100%-змейки получаются масштабированием их длин примерно в $\sqrt{2}$ раз при неизменном поле в диполях. Общая длина змейки при этом составит 5 м, а максимальное отклонение не превысит 3.7 см на энергии около 6.5 ГэВ

Предложенные змейки на дипольных полях оптимальны для частиц с большим G-фактором (p , ${}^3\text{He}$, и др.). Змейка вращает спины вокруг оси, направленной вдоль скорости, как и в случае соленоидальной змейки. Такие компактные дипольные змейки с постоянным интегралом поля являются эффективной заменой соленоидальной змейкам на высоких энергиях. Они решают проблему сохранения поляризации при ускорении пучков как до промежуточных энергий в таких ускорителях как Нуклотрон (ОИЯИ, до 13.5 ГэВ), так и до высоких энергий в таких ускорителях как У-70 (ИФВЭ, до 70 ГэВ). Применение нескольких пар дипольных змеек решает проблему ускорения и управления поляризацией протонов/гелий-3 на сверхвысоких энергиях в LHC (ЦЕРН).

Список литературы

1. Y.S. Derbenev et al, Symmetry, 13 (3), 398, pp. 1, 2021.
2. V.I.Ptitsyn, Yu.M.Shatunov, NIM A398, 126, 1997.
3. Yu.N. Filatov et al, EPJ Web Conf. 204, 10014, 2019.
4. F. Antoulinakis et al., Phys. Rev. Accel. Beams 20, 091003, 2017.

УПРАВЛЕНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИЕЙ ПРОТОНОВ И ДЕЙТРОНОВ В РЕЖИМЕ СПИНОВОЙ ПРОЗРАЧНОСТИ В УСКОРИТЕЛЬНОМ КОМПЛЕКСЕ NICA/ОИЯИ

Филатов Ю.Н.¹, Кондратенко А.М.^{1,3}, Кондратенко М.А.^{1,3}, Цыплаков Е.Д.¹, Бутенко А.В.²,
Ладыгин В.П.², Лебедев В.А.², Сыресин Е.М.², Бутенко Е.А.^{1,2}

¹Московский физико-технический институт, Физтех, Долгопрудный, Россия

²Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

³НТЛ «Заряд», Новосибирск, Россия

Управление поляризацией протонов и дейтронов, требуемое для реализации программы спинных исследований в ускорительном комплексе NICA, будет осуществляться в режиме спиновой прозрачности (ST режиме). В основе метода лежит выбор магнитных структур, в которых действие на спин за оборот частицы «сильных» магнитных полей элементов структуры скомпенсировано: любое направление спина повторяется через оборот [1]. Стабилизация требуемого направления поляризации осуществляется с помощью спиновых навигаторов (SN) – специальных магнитных вставок на базе «слабых» магнитных полей. В коллайдере NICA для компенсации действия арочных диполей в непрерывном диапазоне импульсов вводятся две соленоидальные змейки в противоположных промежутках коллайдера (см. Рис. 1а) [2]. Каждая змейка разбита на две части (50%-змейки), симметрично расположенных вокруг детекторов MPD и SPD. Детализация SN приведена на Рис. 1б, который состоит из двух «слабых» соленоидов, разделенных диполем с радиальным полем, обеспечивающим сведение пучков в месте встречи в детекторе. SN позволяет получать любое направление спинов в вертикальной плоскости детектора либо любое направление спинов в плоскости коллайдера в его арках.

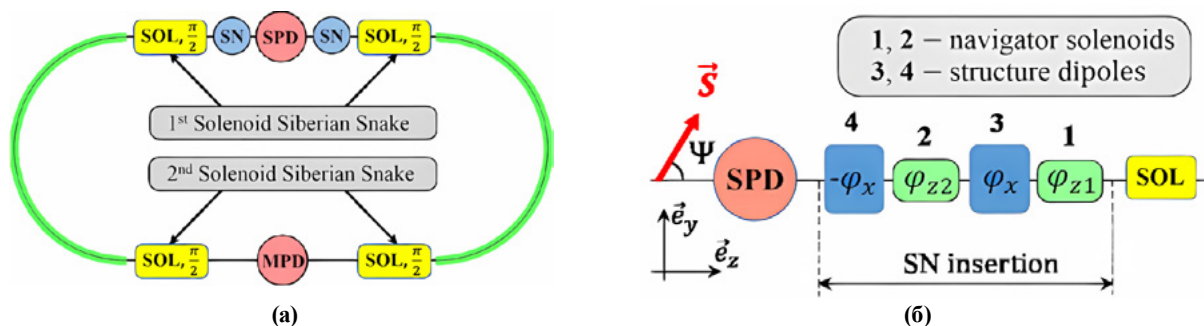


Рис. 1 ST режим в коллайдере NICA: (а) схема размещения соленоидальных змеек, (б) схема размещения слабых соленоидов в спиновом навигаторе

Интеграл продольного поля на одну 50%-змейку для работы во всем диапазоне импульсов до 13.5 ГэВ/с составляет 25 Тлм для протонов и 80 Тлм для дейтронов. На первом этапе планируется установить четыре однометровых 6 Тл соленоидов, которые позволят оперировать с протонами до 3.5 ГэВ/с и с дейтронами до 1 ГэВ/с. В остальном диапазоне планируется работать на дискретных энергиях, соответствующих целым спиновым резонансам (ST режим на целых резонансах), которые идут с шагом 523 МэВ для протонов. Для дейтронов в NICA существует единственный целый резонанс на импульсе 13 ГэВ/с. В этом случае соленоидальные змейки не требуются, так спин совершает целое число оборотов в арках коллайдера за оборот частицы. На следующих этапах необходимо расширять непрерывный диапазон импульсов для ST режима за счет увеличения интеграла продольного поля вводимых соленоидов. Актуальной является задача разработки змеек для протонов на поперечных полях, интеграл поля которых в отличие от соленоидальных змеек практически не зависит от энергии.

Пилотный эксперимент по верификации ST режима на целых резонансах может быть выполнен для пучка протонов на действующем синхротроне Нуклотрон, который является инжектором поляризованных протонов и дейтронов в коллайдер NICA. Предложенные SN на базе слабых соленоидов [3] и на базе штатных корректирующих диполей [4] позволят получать любое направление поляризации протонов на мишени в экспериментах на целых спиновых резонансах с выведенными пучками из Нуклотрона.

В настоящее время в ОИЯИ рассматриваются варианты модернизации или полной замены Нуклотрона. Исполнение кольца нового инжектора в форме-8 является элегантным решением для

управления поляризацией любого сорта частиц. В такой конфигурации ST режим выполняется автоматически для любой энергии и не требует дополнительного размещения змеек. На Рис. 2 приведена схема инжектора формы-8, арки которого расположены над арками коллайдера NICA.

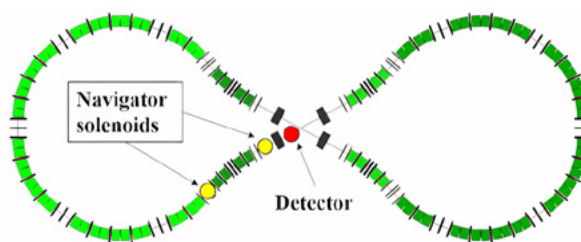


Рис. 2 Инжектор формы-8 для коллайдера NICA

ST режим открывает уникальные возможности для проведения экспериментов с поляризованными пучками в комплексе NICA. Навигаторы помимо стабилизации любого направления поляризации в детекторе, позволяют организовать систему спин-флипа, обеспечивающую многократные перевороты спинов в процессе проведения эксперимента, которая значительно уменьшает систематические ошибки. Кроме того, с помощью навигаторов можно скомпенсировать деполяризующее влияние ошибок выставки и изготовления магнитных элементов структуры, что позволит проводить эксперименты с поляризованными пучками на более высоком уровне точности.

Список литературы

1. Yu.N. Filatov et al, Physical Review Letters, 124 (19), 2020.
2. Yu.N. Filatov et al, EPJ Web Conf. 204, 10014, 2019.
3. Yu.N. Filatov et al, Journal of Instrumentation, 16 (12), P12039, 2021.
4. Yu.N. Filatov et al, JETP Letters, Vol. 116, No. 7, pp. 413–419, 2022.

ИССЛЕДОВАНИЕ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА КАЧЕСТВО ПОЛЯ В ЦЕНТРАЛЬНОМ СОЛЕНОИДЕ УСТАНОВКИ ЭЛЕКТРОННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ДЛЯ КОЛЛАЙДЕРА NICA

Турло В.С., Рева В.Б., Брызгунов М.И., Блинов М.Ф., Уразов Э.Р., Рева С.В.

Институт ядерной физики имени Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия
Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

В настоящий момент в ИЯФ СО РАН продолжается работа над системой электронного охлаждения (СЭО) для ионного коллайдера ускорительного комплекса NICA. СЭО позволит повысить светимость в экспериментах на коллайдере за счет уменьшения поперечного размера пучков и разброса импульсов частиц во встречных ионных пучках.

При создании СЭО особое внимание уделяется факторам, влияющим на качество поля, поскольку предельно достижимые температуры и декременты охлаждения существенно зависят от однородности магнитного поля. Особенности данной установки заключаются в близком расположении соленоидов в промежутке охлаждения, а также наличии у них общего магнитопровода. Одним из следствий такого взаимного расположения соленоидов является значительное взаимное влияние магнитных полей.

В данной работе представлены результаты магнитных измерений укороченного промежутка электронного охлаждения при различных конфигурациях токов питания. Результаты измерений сравниваются с результатами численного моделирования магнитной системы.

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ МАГНИТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ МАГНИТА ЛАМБЕРТСОНА УСКОРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА NICA

Золотых Е.В.¹, Золотых Д.А.^{1,2}

¹ Объединённый институт ядерных исследований, Дубна, Россия

² Государственный университет «Дубна», Дубна, Россия

Магнитные измерения магнита Ламбертсона ускорительного комплекса NICA [1] проводились в Научно-экспериментальном отделе сверхпроводящих магнитов и технологий в Лаборатории физики высоких энергий им. Векслера В.И. и Балдина А.М. Объединённого института ядерных исследований в 2025 году. Одним из ключевых этапов подготовки к испытаниям магнита при рабочей температуре (4.5 К) является разработка и отладка программного обеспечения (ПО) для проведения и обработки результатов магнитных измерений.

При разработке ПО учтены специфические требования, связанные с процессом магнитных измерений. Необходима постоянная запись 25 сигналов: с 15 датчиков Холла LakeShore HGST3020, 2 датчиков тока DS300ID и 8 датчиков температуры Pt1000. Важным аспектом разработки стало внедрение функции отображения получаемых сигналов на графиках в режиме реального времени для мониторинга процесса и диагностики данных пользователем.

Сформулирован перечень функциональных требований к ПО с учётом технических ресурсов. Разработана трёхуровневая архитектура, которая включает следующие компоненты: измерительные модули NI PXIe-4464 (5 шт.) и NI-9226 [2], PXI-шасси NI-1085, контроллер NI PXIe-8840 и cRIO-9031. Определена структура пользовательского интерфейса, реализованная в виде нескольких вкладок.

Установлен формат входных и выходных данных: в процессе измерений необходимо выполнять запись соответствующих каналов в TDMS-файл [3] и текстовый файл для температуры. В процессе обработки необходимо получить таблицу с результатами измерений для различных значений тока.

Выбран шаблон разработки – конечный автомат, представляющий собой набор состояний и функций перехода из одного состояния в другое. Для передачи сигналов с нижнего уровня на уровень пользовательского интерфейса использованы драйвер DAQmx, шина PXI express и надстройка FPGA [4] для модуля измерения температуры. Перед началом магнитных измерений проведено предварительное тестирование функциональности ПО, что дало возможность убедиться в корректности работы всех компонентов и своевременном реагировании ПО на действия пользователя.

Разработанное ПО успешно применено в процессе магнитных измерений. Выполнена предварительная обработка данных, определены шаги для доработки алгоритма с учётом особенностей датчиков Холла.

Список литературы

1. Technical Project of NICA Acceleration Complex (Dubna, 2015).
2. NI-9226 Getting Started Guide – [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/ni-9226-getting-started/page/overview.html>.
3. NI TDMS File Format - What is a TDMS File – [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.ni.com/en/support/documentation/supplemental/06/the-ni-tdms-file-format.html>.
4. Downloading and Running an FPGA VI – [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/labview-nxg-fpga-targets/page/downloading-running-fpga-vi.html>.

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПЕРИОДАМИ ВВОДА КРИОГЕННЫХ ЖИДКОСТЕЙ И ТОКА ДЛЯ ВОСТОЧНОГО И ЗАПАДНОГО ПОЛУКОЛЕЦ КОЛЛАЙДЕРА NICA – СТАТУС РАБОТ

Золотых Е.В., Беспалов Ю.Г., Никифоров Д.Н.

Объединённый институт ядерных исследований, Дубна, Россия

Создаваемый в Объединённом институте ядерных исследований (ОИЯИ) ускорительный комплекс NICA [1] включает в себя такие основные элементы как линейный ускоритель (LINAC), бустерный сверхпроводящий (СП) синхротрон, СП синхротрон Нуклотрон и два СП кольца коллайдера.

Коллайдер состоит из магнитно-криостатной системы, включающей в себя 290 СП магнитов и двух участков ввода криогенных жидкостей и тока, обеспечивающих охлаждение, криостатирование и питание током восточного и западного полуколец. Регулировка криогенной арматуры на периодах ввода, а также вывод, обработка и логирование показателей температур и давления являются критически важными для стабильной работы коллайдера на протяжении всего периода эксплуатации. Для решения этих задач необходима система управления, разработка которой включает следующие этапы: проектирование, реализация, внедрение и эксплуатация. В результате выполненной работы будет реализована комплексная система управления, считывания и логирования параметров азотной и гелиевой криогенных систем, а также системы криостатирования высокотемпературных сверхпроводящих тоководов коллайдера NICA.

На этапе проектирования сформулированы функциональные требования к системе, построены логическая и физическая модели данных, обозначен формат выходных отчётов. Разработана архитектура системы с учётом возможности масштабирования и модификации в будущем. Определён технологический стек, включающий прикладное программное обеспечение для различных этапов разработки системы, а также инструменты для реализации веб-приложения и серверной части. Интерфейс взаимодействия с системой представлен в виде веб-страницы с несколькими вкладками. На текущий момент внутренние функции системы реализованы и находятся на этапе тестирования.

В ближайшее время планируется реализовать интеграцию с системой азотного охлаждения тоководов и системой термометрии с целью получения реальных показаний давления и температуры. Также планируется осуществить внедрение системы на рабочий сервер, подготовить руководства пользователя и администратора, обучить персонал. Одной из ключевых задач является разработка подсистемы для управления криогенными вентилями, для которой будет использовано оборудование компании ОВЕН, включая набор сенсорных панельных контроллеров (СПК) [2]. Основой для дальнейшей модернизации системы является повышение доступности и адаптивности для различных групп пользователей.

Список литературы

1. Technical Project of NICA Acceleration Complex (Dubna, 2015).
2. СПК210 сенсорные панельные контроллеры – Документация – [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://owen.ru/product/spk210/documentation>.

АНАЛИЗ МАТРИЦЫ ОТКЛИКА ОРБИТЫ И ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОЙ СТРУКТУРЫ ВЭПП-3

Мамутов Р.З.^{1,2}, Баранов Г.Н.^{1,2}, Пиминов П.А.^{1,2}, Синяткин С.В.^{1,2}, Липовый Д.А.^{1,2}

¹Институт ядерной физики имени Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

²Центр коллективного пользования “СКИФ” Института катализа им. Г.К. Борескова СО РАН, Кольцово, Россия

В работе показано применение метода матрицы отклика орбиты для анализа магнитной структуры ВЭПП-3. С помощью этого метода были восстановлены оптические функции кольца и выявлены ошибки в фокусировке и других линейных элементах. Исследована возможность использования циркулянтной аппроксимации для упрощения анализа структуры с учётом её симметрии. Кроме того, изучен альтернативный подход к восстановлению матрицы отклика на основе исторических данных измерений орбиты из базы данных ВЭПП-3.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СВЕТИМОСТИ КОЛЛАЙДЕРА МЕТОДАМИ АНАЛИЗА ДАННЫХ

Мамутов Р.З.^{1,2}, Баранов Г.Н.^{1,2}

¹Институт ядерной физики имени Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

²Центр коллективного пользования “СКИФ” Института катализа им. Г.К. Борескова СО РАН, Кольцово, Россия

В данной работе изучается применение методов машинного обучения для предсказания светимости электрон-позитронного коллайдера ВЭПП-4М. Используются исторические данные, собранные в процессе эксплуатации установки, для обучения и оценки нескольких моделей машинного обучения. Проводится сравнительный анализ для оценки эффективности различных подходов к моделированию светимости. Цель исследования — выяснить, могут ли методы, в основе которых лежит анализ данных, эффективно выявлять сложные взаимосвязи между условиями работы коллайдера и его светимостью. Результаты показывают, что машинное обучение может служить дополнительным инструментом для анализа и мониторинга поведения коллайдера. Данный подход актуален в контексте растущего интереса к автоматизации, оперативной диагностике и анализу работы ускорительных комплексов с помощью машинного обучения.

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ БАРЬЕРНОЙ СТАНЦИЕЙ КОЛЛАЙДЕРА НИКА

Мурасев А.А.^{1,2,3}, Крутихин С.А.¹, Осипов В.Н.¹, Арбузов В.С.¹, Мотыгин С.В.¹, Куркин Г.Я.¹, Мартыновский А.Ю.¹, Запругаев И.А.^{1,2}, Трибендис А.Г.^{1,3}, Ротов Е.А.^{1,2}, Тарнецкий В.В.^{1,2}, Малышев А.М.⁴

¹Институт ядерной физики имени Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

²Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

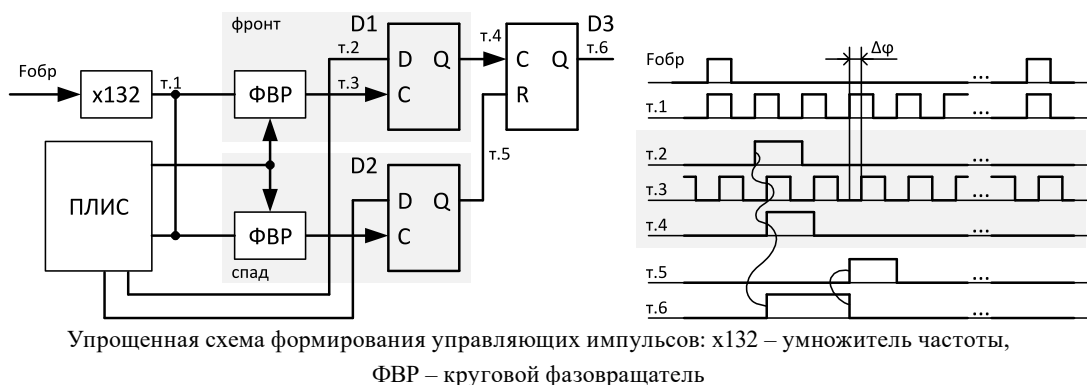
³Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

⁴Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

Барьерная система предназначена для накопления частиц в коллайдере НИКА и их последующего ускорения. Барьерная система вырабатывает две пары прямоугольных импульсов разной полярности, одна пара импульсов определяет область накопления, другая — область инжекции. Инжектируемые из Нуклотрона частицы попадают в область инжекции, а затем перемещаются к области накопления и объединяются с уже накопленными частицами, находящимися в области накопления. Процесс инжекции повторяется нужное количество раз. После того, как накоплен требуемый ток, может быть включен режим ускорения. По окончании ускорения все импульсы выключаются и частицы из-за диффузии равномерно заполняют весь периметр накопителя. Далее включаются гармонические системы для формирования 22 сгустков.

Барьерная станция представляет собой индукционный ускоритель, состоящий из 20 секций: 15 секций используются для формирования импульсов барьерного напряжения, 3 — для формирования ускоряющего меандра, 2 — предназначены для коррекции формы напряжения на зазоре. В состав секции входят кольцо из аморфного железа и два транзисторных формирователя. Формирователь представляет собой 4 транзисторных ключа, включенных по мостовой схеме. Амплитуда импульсов барьерного напряжения на зазоре — 5кВ, длительность фронта/спада — не более 20нс, длительность одного импульса $-\pi/12$ (~80нс), частота повторения — 522 – 587кГц.

Упрощенная схема формирования управляющих импульсов для формирователей представлена на рисунке ниже. Положение импульсов во времени формируется в два этапа: грубо — с помощью счетчика и плавно — внутри интервала счета. Частота обращения (Фобр) умножается в 132 раза (т.1) и используется в качестве тактовой частоты ПЛИС. Импульс с произвольным положением формируется в триггере D3: управляя положением импульсов на входах С (т.4) и R (т.5) триггера D3 можно формировать импульсы с необходимым положением и длительностью (т.6). Импульсы на входах С и R формируются с помощью триггеров D1 и D2 соответственно. Грубо положение импульсов задается с шагом $1/132$ частоты обращения (т.2), эти импульсы формируются внутри ПЛИС. Плавная подстройка осуществляется с помощью круговых фазовращателей (ФВР): устанавливается необходимая задержка ($\Delta\phi$) импульсов тактовой частоты на входах С триггеров D1 (т.3) и D2.



Система управления обеспечивает контроль медленно меняющихся параметров различных элементов станции: транзисторных формирователей (токи потребления, температуры силовых транзисторов, состояние защит..), мощных источников питания, а также управление источниками питания, и другими устройствами станции.

Управление барьерной станцией осуществляется по протоколам TANGO.

ОСОБЕННОСТИ МАГНИТООПТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОГО КОЛЬЦА В ФОРМЕ 8

Колокольчиков С.Д.^{1,2}, Аксентьев А.Е.^{1,2,3}, Мельников А.А.^{1,2,4}, Сеничев Ю.В.^{1,2}

¹Институт ядерных исследований РАН, Москва, Россия,

²Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия,

³Московский инженерно-физический институт, Москва, Россия,

⁴Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау, Черноголовка, Россия

В данной работе показан принципиальный подход при проектировании структуры кольца в форме восьмерки для выполнения нескольких физических программ. Во-первых, уникальная форма кольца позволяет решить проблему с пересечением спиновых резонансов при ускорении поляризованного пучка. Во-вторых, данная структура может быть использована для экспериментов по измерению ЭДМ и поиску аксиона. В-третьих, структура может быть адаптирована для ускорения тяжелоионного пучка.

Ускорение поляризованного пучка представляет большой интерес для коллайдерных экспериментов. При этом возникает проблема пересечения различного рода спиновых резонансов, приводящих к деполяризации пучка. При использовании кольца в форме восьмерки одна арка компенсирует прецессию спина под действием Магнитного Дипольного Моментa (МДМ), вызванную другой. Таким образом, частота вращения спина (spin tune) равна нулю и кольцо становится спин-прозрачным (Spin Transparency – ST) [1].

Для поляризованных протонных пучков возникает задача по преодолению критической энергии. Для решения этой проблемы применяется метод вариации дисперсионной функции [2]. Таким образом, критическая энергия поднимается выше энергии эксперимента или даже достигать комплексного значения.

Электрический дипольный момент (ЭДМ) дейтрона может быть измерен при низких энергиях с использованием метода квази-замороженного спина (QFS) в восьмиобразной структуре [3]. Для накопления ЭДМ-сигнала должны быть установлены как соленоиды, так и фильтры Вина на каждом прямом участке. Поворотные арки моделируются таким образом, чтобы реализовать 3 независимых семейства секступолей для достижения спиновой когерентности поляризованного пучка. Использование кольца в форме 8, в качестве широкополосной аксионной антенны, обладает преимуществом исследования в области низких частот g-2 прецессии [4].

Применение структуры также возможно для тяжелоионного пучка, при этом ключевым требованием является достижение высокого времени жизни пучка. Для этого влияние внутрипучкового рассеяния (ВПП) должно быть скомпенсировано электронным и стохастическим охлаждением, что эффективно может быть получено в структуре с минимально модулированными Твисс-функциями.

Список литературы

1. Ya. S. Derbenev et al. Polarization Preservation and Control in a Figure-8 Ring, Int.J.Mod.Phys. Conf.Ser. 40 (2016) 01, 166009 DOI: 10.1142/S2010194516600909.
2. Senichev, Y.V., Chechenin, A.N. Theory of “Resonant” lattices for synchrotrons with negative momentum compaction factor. J. Exp. Theor. Phys. 105, 988–997 (2007). DOI: 10.1134/S1063776107110118.
3. Yu.Senichev et al., in ICAP2015 Proceedings, Shanghai, 2016, ed. by C.Kwok, R.W.Volker, T.Chuanxiang, Y.Heping.
4. N.N.Nikolaev, Spin of protons in NICA and PTR storage rings as an axion antenna. Jetp Lett. 115, 639–643 (2022). DOI: 10.1134/S0021364022600653.

ПРЕЦИЗИОННОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ $\Upsilon(1S)$ -МЕЗОНА НА ЭЛЕКТРОН-ПОЗИТРОННОМ КОЛЛАЙДЕРЕ ВЭПП-4М

Пиминов П.А.

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера, Новосибирск, Россия

На электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-4М продолжают эксперименты по физике элементарных частиц в максимальном энергетическом диапазоне установки (выше 1.9 ГэВ). Выполнен первый пункт физической программы – измерение сечения рождения адронов от 2.3 до 3.5 ГэВ. Продолжается набор статистики для изучения процессов двухфотонного рождения адронов. Начат ключевой эксперимент – измерение массы покоя и лептонной ширины основного состояния боттомония или $\Upsilon(1S)$ -мезона. Для прямого измерения параметров $\Upsilon(1S)$ -мезона необходимо абсолютное измерение энергии сталкивающихся частиц. Для этого используется метод резонансной деполяризации, который был использован при измерении масс частиц на низкой энергии ВЭПП-4М (до 1.9 ГэВ). Измерение степени поляризации выше 3.5 ГэВ осуществляется с помощью лазерного поляриметра, разработанного ранее для проведения экспериментов по измерению параметров $\Upsilon(1S)$ -мезонов. Кроме того, продолжаются эксперименты с выведенными пучками синхротронного излучения и гамма-квантами.

УНИВЕРСАЛЬНЫЕ TANGO-МОДУЛИ, РАЗРАБОТАННЫЕ ДЛЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ УСКОРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА NICA

Седых Г.С., Горбачев Е.В., Елкин В.Г.

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

В докладе описываются универсальные Tango-классы, разработанные для системы управления ускорительного комплекса NICA, которые могут быть использованы в системах управления других установок:

1. RBAC – система контроля доступа, основанная на ролях;
2. RestDS2 – веб-сервис для организации взаимодействия по стандартному протоколу http(s);
3. WebSocketDS – веб-сервис для организации взаимодействия по стандартному протоколу WebSocket;
4. ModbusDS – класс для взаимодействия по промышленному протоколу Modbus;
5. OPCUADS – класс для взаимодействия по промышленному протоколу OPC Unified Architecture;
6. OPCDADS – класс для взаимодействия по промышленному протоколу OPC Data Access;
7. CollectorDS – класс для агрегации и кеширования данных Tango;
8. JsonStore – класс для сохранения и извлечения конфигурационных и архивных данных в виде бинарного JSON;
9. SaveRestore – система сохранения и восстановления режима работы элементов системы управления;
10. Классы для работы с оборудованием National Instruments.

ПРОГРЕСС В РАЗРАБОТКЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ УСКОРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА NICA

Седых Г.С., Горбачев Е.В., Андреев В.А., Елкин В.Г.

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

В докладе описывается структура создаваемой системы управления для ускорительного комплекса NICA. Особое внимание уделяется элементам системы, внедренным в последнее время:

1. Системе авторизации и контроля прав доступа, основанной на ролях и совместимой с единой системой аутентификации ОИЯИ;
2. Системе сохранения и восстановления режимов работы элементов системы управления;
3. Системе архивации “быстрых” данных, связанных с конкретным циклом ускорения.
4. Системе архивации “медленных” данных, не связанных с конкретным циклом ускорения
5. Комплексу небольших управляющих веб-клиентских приложений (“контролек”) для элементов системы управления;
6. Усовершенствованию существующих компонентов системы управления для реализации новых режимов работы, таких как многократная инжекция, быстрая перестройка цикла ускорения, совместный доступ для анализа данных.

ИЗМЕРЕНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ С ПУЧКОМ НА УСКОРИТЕЛЬНОМ КОМПЛЕКСЕ NICA

Смирнов В.Л., Головенский Б.В., Горбачев Е.В., Лебедев В.А., Николайчук И.Ю., Тамашевич Е.С.

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

Ускорительный комплекс NICA (ОИЯИ, Дубна, Россия) [1] состоит из коллайдера, двух синхротронов и нескольких инжекционных линий и предназначен для ускорения и столкновений легких и тяжелых ионов с магнитной жесткостью до 38 Тл·м. Основной задачей является получение проектных значений интенсивности пучков в коллайдере, что требует минимизации потерь пучка на протяжении всей ускорительной цепочки. Решение поставленной задачи требует изучения оптики ускорителей и линий транспортировки пучка, и оптимизация настроек систем. Целью является приближение оптики ускорителей и каналов пучка к расчетным значениям, либо выставление новых настроек, которые приведут к оптимальным параметрам пучка. Для этого проводятся измерения с пучком, на основе которых калибруются расчетные модели и вычисляется оптика ускорителей.

Пучок ионов $^{124}\text{Xe}^{26+}$ из источника KRION ускоряется с помощью RFQ и линейного ускорителя до энергии 3.2 МэВ/нуклон и инжектируется в бустерный синхротрон. Ускорившись в бустере до энергии 220 МэВ/нуклон пучок переводится в Нуклотрон, после ускорения в котором до 2.8 ГэВ/нуклон переводится в кольца коллайдера. Основное внимание при настройке установки направлено на согласование линий перевода пучка и ускорителей. Режим работы бустера предусматривает многократную инжекцию с продольным накоплением при использовании системы электронного охлаждения. Положительного эффекта можно добиться лишь имея размер ионного пучка не превышающий размер электронного пучка в области системы электронного охлаждения. В случае бетатронного рассогласования пучка, приходящего из инжекционного канала, и оптических функций бустера наблюдается размазывание портрета пучка на фазовом пространстве, что ведет к увеличению эмиттансов пучка на фазовых плоскостях. Поэтому оптика инжекционного канала оптимизируется для получения требуемых параметров пучка, инжектируемого в бустер. Для этого проводятся измерения откликов орбит и поперечных профилей пучка в канале, на основании которых калибруется расчетная модель канала и выставляются его новые настройки.

Относительный рост эмиттансов пучка на первых оборотах в бустере также зависит от величины связи поперечных движений, которая управляется с помощью выбора рабочей точки на частотной диаграмме. Измерения показали, что эффект влияния электронного охлаждения на ионный пучок, выражающийся в скорости уменьшения поперечного и продольного размеров пучка, зависит

от величины дисперсии в области расположения системы электронного охлаждения. Подавление дисперсии, осуществленное в измерениях с помощью выбора рабочей точки, привело к кратному уменьшению времени охлаждения. После накопления достаточной интенсивности пучка в бустере возможны проявления эффектов от искажений бетатронных функций кольца, которые присутствуют из-за наличия ошибок системы. Поэтому проводятся измерения бетатронных функций кольца, на основании которых будут вычислены источники ошибок и сделаны соответствующие коррекции. Анализ независимых компонент используется для расчетов бетатронных функций.

Список литературы

1. O. I. Brovko, et al., NICA ion collider and its acceleration complex, in: Proceedings of IPAC'2023, Venezia, Italy, 2023.

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ $e^+ e^-$ КОЛЛАЙДЕРА ВЭПП-6 В ИЯФ СО РАН

Богомяжков А.В.

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

Обсуждается выбор параметров $e^+ e^-$ коллайдера ВЭПП-6 в ИЯФ СО РАН. Основными характеристиками ускорителя являются встреча по схеме крабовой перетяжки с горизонтальным углом встречи $+25$ мрад, периметр меньше 400 м с одним местом встречи, энергия пучка от 500 МэВ до 2100 МэВ, светимость больше $10^{34} \text{см}^{(-2)} \text{с}^{(-1)}$ на энергиях пучка выше 1550 МэВ (J/Ψ -мезон).

Основным ограничением для получения большой светимости на таких энергиях является малое время жизни пучка по эффекту Тушека. В работе описана оптимизация параметров пучка, места встречи, оптической линейной и нелинейной структуры ускорителя позволившая получить большие динамическую апертуру и локальный энергетический акцептанс, обеспечившие время жизни пучка по эффекту Тушека больше 1000 с.

ИЗМЕРЕНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИИ В УСКОРИТЕЛЬНОМ КОМПЛЕКСЕ КОЛЛАЙДЕРА NICA

*Зеленский А.Н.¹, Ладыгин В.П.², Фимушкин В.В.², Дунин В.Б.², Волков И.С.²,
Ившин К.А.², Соловьёв А.Н.², Шиндин Р.А.², Жабин С.Н.¹, Черникова А.А.¹*

¹Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия

²Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

В коллайдере NICA планируются эксперименты с пучками поляризованных протонов, дейтронов (и, возможно, ядер $^3\text{He}^{++}$) в широком диапазоне энергий. В данной работе рассмотрены схемы измерения поляризации пучков протонов, дейтронов и ядер гелий-3 в процессах получения в Источнике Поляризованных Ионов (SPI), ускорения и накопления пучков в ускорительном комплексе NICA.

Задачи поляриметрии измерения степени поляризации (и направления спина) на каждом этапе получения и ускорения пучков (в линейном ускорителе, бустере, Нуклотроне и коллайдере), а также диагностика спиновой динамики пучков при перевороте спина, комплексный анализ пространственных и спиновых характеристик пучков частиц, сталкивающихся в коллайдере. Измерение абсолютной величины поляризации пучков необходимо для определения и минимизации потерь в процессе ускорения и для нормировки результатов физических экспериментов. Требования к абсолютной точности измерений поляризации - $\Delta P/P \leq 5\%$. Также, планируется комплекс исследований по разработке прецизионной поляриметрии для экспериментов по поиску EDM (Electric Dipole Moment) протонов и дейтронов.

Моделирование эволюции распределений спинов при ускорении пучков в циклических ускорителях (Бустер, Нуклотрон, коллайдер NICA) показывают, что возникающая резонансная деполяризация приводит главным образом к потерям поляризации на периферии пучков и появлению профилей поляризации. При этом поляризация центральной части пучка при уско-

рении не теряется и равна поляризации первичного пучка из линейного ускорителя. Поэтому разработка поляриметра для прецизионных измерений абсолютной поляризации пучка при инжекции в Нуклотрон, после линейного ускорителя является одной из приоритетных задач. Для этих целей создаётся система поляриметров на выходе из SPI, которая включает поляриметр для измерений поляризации пучка дейтронов с энергией 100-150 кэВ в реакции на дейтерированной мишени – $D(d,p)T$ и протонного пучка в реакции ${}^6Li(p, {}^3He){}^4He$. В данной работе представлена разработка Lamb-shift поляриметра на основе свойств метастабильных $H(2S)$ состояний атомов водорода и дейтерия для измерений поляризации протонного и дейтронного пучков при энергии 1-25 кэВ. Для измерений поляризации на выходе 5 МэВ/н линейного ускорителя разрабатывается поляриметр, основанный на реакциях рассеяния: ${}^4He(d,d){}^4He$, ${}^3He(d,p){}^4He$ и ${}^4He(p,p){}^4He$. Созданный ранее Breit-Rabi поляриметр, является необходимым инструментом для настройки поляризации атомарного пучка в SPI. Полная реализация системы поляриметров позволит выполнить настройку, оптимизацию и мониторинг параметров SPI и измерять абсолютную поляризацию протонного и дейтронного пучков на входе в циклические ускорители с требуемой абсолютной точностью.

Абсолютная поляризация пучка коллайдера может быть измерена в протон-протонных столкновениях в струе поляризованных атомов водорода (APol – абсолютный поляриметр). Идентичность частиц при рассеянии поляризованных протонов в кольце на поляризованных протонах в составе атомов водорода в поляризованной струе позволяет определить поляризацию протонов в коллайдере – P_{beam} через поляризацию протонов в мишени – P_{target} , которая для атомарного пучка водорода может быть измерена с точностью лучше 0.1 % с помощью Брейт-Раби поляриметра. Эти данные будут использованы для нормировки результатов протон-углеродных CNI поляриметров. Создание такого поляриметра уже начато для NICA. Комплексный анализ пространственных и спиновых характеристик пучков частиц, сталкивающихся в коллайдере и проводимых через системы транспортировки пучка, обеспечит необходимый набор данных для настройки параметров ускорительного комплекса и нормировки результатов физических измерений для столкновений встречных пучков.

Необходимым инструментом для настройки систем контроля и мониторинга поляризации являются быстродействующие поляриметры, позволяющие получить статистическую точность измерений 2-3 % за ~100 циклов ускорителя. Для этой цели могут быть использованы поляриметры, основанные на упругом протон-протон (p-p) или протон-углерод (p-C) рассеянии при малых переданных импульсах в области кулон-ядерной интерференции (CNI). Такой поляриметр с тонкой углеродной мишенью может быть также использован для измерений профилей поляризации в Нуклотроне и коллайдере NICA. Применение подобных поляриметров было показано в ускорителях AGS и RHIC (BNL) при энергиях пучков протонов 2,3-255 ГэВ. В комплексе с измерениями поляризации на выходе линейного ускорителя и APol применение CNI p-C позволит восстановить полную картину эволюции поляризации в процессе ускорения и мониторировать величину поляризации в процессе экспериментов в коллайдере NICA.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ЭЛЕКТРОННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ И НАКОПЛЕНИЯ ИОНОВ ${}^{124}Xe^{26+}$ НА БУСТЕРЕ NICA

Брызгунов М.И.¹, Горбачев Е.В.², Лебедев В.А.², Мешков И.Н.², Пархомчук В.В.¹, Прокофьев Ю.В.², Рева В.Б.¹, Семенов С.В.², Сергеев А.С.², Сидорин А.О.², Тимонин Р.В.², Филиппов А.В.², Харьюзов П.Р.²

¹Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

²Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

Представлен анализ результатов экспериментов электронного охлаждения и накопления ионов ${}^{124}Xe^{26+}$, полученных во время работы Бустера ускорительного комплекса NICA ЛФВЭ ОИЯИ в 2025 г. С помощью быстрого трансформатора тока и ионизационного профилометра ионного пучка измерены скорость продольного охлаждения, значение разброса продольных импульсов ионов, время группировки ионного пучка, захваченного в сепаратрису, значение фазы инжекции и устойчивой фазы относительно начала периода опорного ускоряющего высокочастотного сигнала, а также скорость поперечного сжатия пучка.

ИЗМЕРЕНИЕ ВРЕМЕНИ РАДИАЦИОННОГО ЗАТУХАНИЯ ОПТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

Майор В.Е.^{1,2,3}, Тимошенко М.В.¹, Дорохов В.Л.^{1,3,4}, Мешков О.И.^{1,2}

¹ Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

² Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

³ Центр коллективного пользования «Сибирский кольцевой источник фотонов», Кольцово, Россия

⁴ Новосибирский Государственный Технический Университет, Новосибирск, Россия

Время радиационного затухания является важным параметром, зависящим от магнитной структуры ускорителя. Сравнение модельных и экспериментально измеренных времён затухания представляет значительную ценность. Оно позволяет выявить различия между реальной установкой и идеализированной моделью, обусловленные несовершенством магнитной системы, погрешностями юстировки или неучтёнными нелинейными эффектами. Подобные измерения особенно актуальны для современных коллайдеров и источников синхротронного излучения с низкими эммитансами, где требуется точное знание структуры ускорителя и поведения системы.

В этом исследовании мы представляем серию измерений времени радиационного затухания на коллайдерах ВЭПП-4М (на синхротроне ВЭПП-3) и ВЭПП-2000 в ИЯФ СО РАН. Пучок возбуждался электромагнитным кикером, что вызывало колебания пучка и увеличение его поперечного размера. Поперечный профиль пучка регистрировался оптическими методами (Рис. 1), а именно цифровой камерой, работающей в режиме быстрой регистрации изображений. Запуск камеры синхронизировался с моментом начала возбуждения пучка электронов. Измерения проводились при различных энергиях пучка и частотах обращения, что позволило исследовать зависимость времени затухания от параметров ускорителя. На рисунке 2 представлены типичные кривые затухания, регистрируемые во время эксперимента.

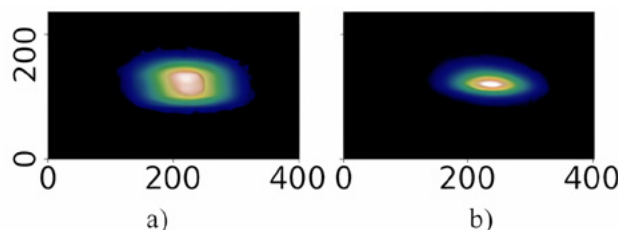


Рис. 1. Примеры экспериментально полученных изображений пучка где: (а) пучок непосредственно после воздействия кикера, (б) пучок после завершения процесса затухания.

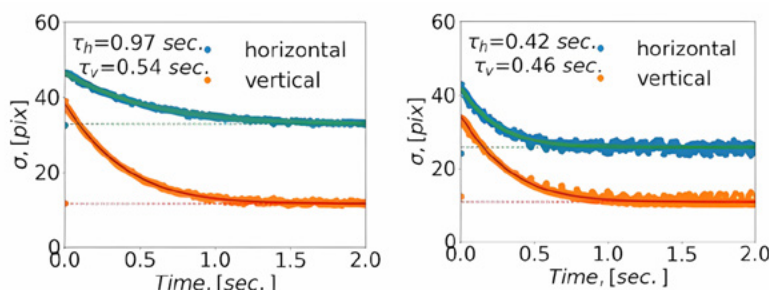


Рис. 2. Типичные зависимости изменения размеров пучка для различных частот обращения.

Изображения аппроксимировались двумерным гауссовым распределением с учётом возможного поворота. Результаты аппроксимации давали размеры пучка, учитывающие поворот изображения.

Полученные экспериментальные результаты сравниваются с результатами моделирования для оценки точности текущей модели магнитной системы. Моделирование радиационного затухания в накопительном кольце ВЭПП-3 и коллайдере ВЭПП-2000 было выполнено с использованием программного пакета Methodological Accelerator Design (MADX), разработанного в ЦЕРН.

ИССЛЕДОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМА РАБОТЫ КРИОГЕННЫХ ГЕЛИЕВЫХ УСТАНОВОК В ПЕРВОМ ЦИКЛЕ ПУСКОНАЛАДОЧНЫХ РАБОТ КОМПЛЕКСА NICA

*Константинов А.В., Агапов Н.Н., Гудков С.В., Митрофанова Ю.А.,
Швидкий Д.С., Жиронкина Т.Г.*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

С января 2025 г. Лаборатория физики высоких энергий приступила к важнейшему этапу реализации проекта NICA, программой которого предусмотрен запуск каскада из трех сверхпроводящих колец и столкновение встречных пучков в детекторе MPD.

Рабочая температура сверхпроводящих магнитов ускорителей составляет 4,5 К и для ее поддержания создан крупнейший в стране криогенный гелиевый комплекс холодопроизводительностью 10 000 Вт на температурном уровне 4,5 К. В состав оборудования комплекса входят три гелиевых ожижителя (2 шт. КГУ-1600 и ОГ-1000) и три сателлитных рефрижератора РСГ-2000/4,5. По состоянию на июль 2025 г. эти установки готовы к работе: с января по июль обеспечено криостатирование ускорителей Бустер и Нуклотрон, на сентябрь намечено охлаждение Коллайдера.

Сотрудниками криогенного отдела Лаборатории ведется активная работа по изучению режимов криостатирования ускорителей. Ее промежуточным итогом стало снижение энергозатрат на охлаждение ускорителя Бустер.

В статье описаны эксперименты по определению минимально достаточного расхода гелия, необходимого для работы Бустера при проектном поле в 18 кГс, и определению возможности работы ускорителя по упрощенной схеме подачи жидкого гелия - без промежуточных переохладителей. По результатам эксперимента проведена оптимизация работы рефрижератора РСГ-1 путем применения турбодетандера от установки КГУ-1600/4,5 и предложены решения по дальнейшему улучшению режимов.

В период 23-25 гг. в магнитную систему Нуклотрона были внесены изменения, связанные с необходимостью транспортировки ускоренного пучка частиц в Коллайдер. В структуре комплекса NICA, Нуклотрон занимает промежуточное положение между Бустером и Коллайдером. В связи с этим, на участках переходов «Бустер-Нуклотрон» и «Нуклотрон-Коллайдер», в магнитную структуру Нуклотрона были добавлены два септум-магнита Ламбертсона, предназначенные для инжекции и вывода пучка. Эти магниты отличаются от магнитов регулярной структуры значительно большей массой. Так, масса квадрупольной линзы Нуклотрона составляет ≈ 500 кг, а магнита Ламбертсона – более 2000 кг. Наличие единичных элементов большой массы привело к необходимости изменения технологии охлаждения Нуклотрона, которая была успешно отработана в 2023-2025 гг.

ЭЛЕКТРОННОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ: ЭКСПЕРИМЕНТЫ НА БУСТЕРЕ NICA

*Горбачёв Е.В.¹, Лебедев В.А.¹, Мешков И.Н.¹, Семёнов С.В.¹, Сергеев А.С.¹, Сидорин А.О.¹,
Тимонин Р.В.¹, Прокофьев Ю.В.¹, Харьюзов П.Р.¹, Филиппов А.В.¹, Бехтенов Е.А.²,
Брызгунов М.И.², Пархомчук В.В.², Рева В.Б.²*

¹Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

²Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

Для формирования необходимых параметров пучка в Бустере NICA предусмотрено использование системы электронного охлаждения (СЭО), которая была разработана и изготовлена в ИЯФ (г. Новосибирск). В 2017 г. система была поставлена в ОИЯИ и начаты ее монтаж, настройка и ввод в эксплуатацию. Особенностью данной системы является то, что впервые метод электронного охлаждения с замагниченным электронным пучком применяется на синхротроне со сверхпроводящей магнитной системой, что накладывает дополнительные требования к конструкции и запуску СЭО, которая находится при комнатной температуре.

В данной работе описаны результаты экспериментов с СЭО на Бустере NICA, полученные на сеансе в 2024-2025 гг.

**ДИНАМИКА ПУЧКА,
НОВЫЕ ПОДХОДЫ
К УСКОРЕНИЮ ЧАСТИЦ**

ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ ПУЧКА ПРИ ЗАПУСКЕ ИНЖЕКЦИОННОГО КОМПЛЕКСА СКИФ

Мешков О.И., Бехтенов Е.А., Визитиу И.В., Волков В.Н., Дорохов В.Л., Карпов Г.В., Карнаев С.Е., Левичев А.Е., Никифоров Д.А., Решетов Д.Ф., Рева С.В., Тур А.В., Судник А.В., Фомин Л.Б.

Институт ядерной физики имени Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

Инжекционный комплекс Сибирского Кольцевого Источника Фотонов (СКИФ) состоит из линейного ускорителя на энергию 200 МэВ, бустерного синхротрона на энергию 3 ГэВ и двух электронно-оптических каналов для перепуска пучка из линейного ускорителя в бустер и из бустера в главный накопитель СКИФ. Каждая установка в составе инжекционного комплекса оснащена набором устройств диагностики пучка, обеспечивающих измерение необходимых параметров при его получении, ускорении и транспортировке. В состав диагностик линейного ускорителя входят пикап-электроды для измерения траектории пучка, люминофорные датчики для настройки и контроля поперечного профиля пучка, черенковские датчики для измерения продольного профиля пучка, быстрые трансформаторы тока (ФСТ) для настройки токопрохождения по длине установки и контроля распределения заряда по сгусткам, а также датчик потерь пучка на основе кварцевого волокна. Комплекс диагностик пучка в бустерном синхротроне практически повторяет этот набор устройств, отличаясь лишь их количеством. Дополнительно, в бустере имеется измеритель среднего тока пучка (ДССТ), оптические диагностики контроля поперечного и продольного профиля пучка по синхротронному излучению, а также сцинтилляционный датчик потерь. Диагностический комплекс электронно-оптического канала бустер – накопитель в целом схож с измерителями параметров пучка линейного ускорителя. В докладе описаны в деталях все диагностические устройства, входящие в состав инжекционного комплекса и анализируется опыт их использования, полученный при достижении проектных параметров пучка частиц и в процессе эксплуатации комплекса.

ДИНАМИКА ПОЗИТРОНОВ В КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКОМ СПЕКТРОМЕТРЕ

Мешков И.Н., Мальцева Ж.Л.^{1,4}, Мешков О.И.^{3,4}

¹Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск

²Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

³Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск

⁴Новосибирский государственный университет, Новосибирск

В Лаборатории ядерных проблем (ЛЯП) им. В.П. Джелепова ОИЯИ создан и используется в экспериментах спектрометр, основанный на методе позитронной аннигиляционной спектроскопии (ПАС). Данный метод высокочувствителен к точечным дефектам в твердотельных материалах и известен применением нескольких вариантов, отличающимися возможностями исследования их различных характеристик. С 2015 г. установка ПАС служит для исследования структуры различных материалов методом Доплеровского Уширения Аннигиляционной Линии (ДУАЛ – Doppler Broadening Annihilation Line – DBAL). Спектрометр ДУАЛ выполнен состоит из трёх частей:

- высоковольтный источник позитронов с радиоактивной таблеткой ^{22}Na и крио-системой для её охлаждения жидким гелием до температуры 7 К,
- вакуумный транспортировочный канал,
- камера с оборудованием для размещения образцов исследуемых материалов и аппаратуры детектора для регистрации аннигиляционных фотонов.

Спектрометр погружен в однородное магнитное поле соленоида, соосного с потоком позитронов. Напряжённость магнитного поля – до 1 кГс.

Установка ПАС в ЛЯП ОИЯИ обладает двумя уникальными особенностями:

- высокая монохроматичность потока позитронов – ширина спектра (Full Width on Half Magnitude – FWHM) на выходе источника позитронов составляет 1.5 – 2 эВ при их характерной энергии от десятков эВ до десятков кэВ;
- энергия позитронов на мишени (исследуемой образец) варьируется в интервале 0.5 – 30 кэВ, что позволяет менять глубину проникновения «исследующего» позитрона и проводить ис-

следования материалов без нарушения их кристаллической структуры; этот диапазон энергии монохроматических позитронов планируется увеличить до 100 кэВ.

Возможности метода ДУАЛ ограничены – метод позволяет определить количество дефектов на единицу размера мишени, но не может различить типы дефектов. Более точную и широкую информацию даёт метод измерения аннигиляционного времени жизни позитрона в твёрдом теле – Positron Annihilation Lifetime Spectroscopy (PALS). Правда, для этого сегодня приходится использовать «послойное» применение позитронов – срезать поверхностный слой, чтобы исследовать образец на глубину, превышающую пробег позитрона. Метод PALS чувствителен к точечным дефектам в твердом теле. Пара гамма-квантов, рожденных в результате процесса позитрон-электронной аннигиляции, несет информацию о виде концентрации дефектов размерами менее 10 нм на глубине от поверхности материала, которая определяется энергией позитронов. Это классический вариант: момент испускания позитрона радиоактивным ядром сопровождается гамма-фотоном сопровождающего распад радиоактивного ядра (например, ^{22}Na), и затем производится регистрация момента времени аннигиляции пары позитрона и атомарного электрона в два гамма-фотона. Точность измерений существенно затруднена неопределённостью взаимодействия позитрона с атомарными электронами материала источника (^{22}Na) и исследуемого материала.

Задача данного проекта – используя монохроматичность потока позитронов и вариабельность их энергии на мишени, построить прибор высокого разрешения для измерения времени жизни позитронов в твердотельном материале. Для этого нужно разработать схему инъекции и транспортировки группы позитронов с приходом на мишень в один и тот же момент времени независимо от значения момента времени их выхода из источника.

Динамика позитронов в спектрометре описывается двумя нелинейными дифференциальными уравнениями второго порядка и связывающего их алгебраического уравнения движения позитронов в пространстве, свободном от электрических полей, но погружённом в соленоидальное магнитное поле.

Два электрических поля источника позитронов формируются в зазоре между катодом (радиоактивной таблеткой) и анодом и распространяются за анод. Одно поле статическое, а другое высокочастотное, сложной зависимости от времени. Оно обеспечивает позитронам одно и то же значение времени прихода на мишень. Эта задача решается в представленном докладе.

ЭФФЕКТ ВНУТРИПУЧКОВОГО РАССЕЯНИЯ НА ШОТТКИ ШУМ СГРУППИРОВАННОГО ПУЧКА

Абед М.А., Лебедев В.А.

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

Шоттки-шум возникает в результате случайных флуктуаций тока пучка, обусловленных дискретной природой заряженных частиц. Он широко используется, как надёжный и хорошо изученный неинвазивный метод диагностики пучков в циклических ускорителях. Спектр Шоттки-шума применяется для оценки ключевых параметров пучка и содержит ценную информацию о его внутренней динамике. Он также отражает влияние различных диффузионных и демпфирующих процессов, таких как внутрипучковое рассеяние (IBS) и охлаждение пучка. Анализ влияния этих процессов на Шоттки-шум необходим для понимания устойчивости пучка и оптимизации работы ускорителя.

Электромагнитный сигнал, создаваемый пучком, содержит когерентную узкополосную компоненту от сгустков, которая наблюдается на гармониках частоты обращения. В то время как Шоттки-спектр распущенного пучка представляет собой непрерывный спектр вокруг каждой гармоники, спектр сгруппированного пучка состоит из набора синхротронных линий, отражающих продольные синхротронные колебания. Ширина этих линий в основном определяется разбросом по синхротронному туну и, при отсутствии дополнительных механизмов диффузии, линейно увеличивается с номером гармоники.

В данной работе мы исследуем, как внутрипучковое рассеяние, являющееся диффузионным процессом, обусловленным кулоновским взаимодействием между частицами пучка, влияет на форму и

ширину спектра Шоттки. Хотя при низких частотах влияние IBS на уширение линий незначительно, его вклад растёт квадратично с номером гармоники и может доминировать на высоких частотах. Мы представляем теоретическую модель, описывающую, как чисто диффузионные процессы изменяют продольный спектр Шоттки. Хотя модель была разработана с учётом внутривидового рассеяния, она применима к любому механизму чистой диффузии. Результаты данной работы важны для корректной интерпретации диагностики на основе Шоттки-шума и для более глубокого понимания стохастического охлаждения сгруппированных пучков.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПУЧКА КИСЛОРОДА В УСКОРИТЕЛЕ ЛЕГКИХ ИОНОВ С ПОЛЯМИ РЕАЛЬНОГО КВАДРУПОЛЯ

Юрин И.А., Лозеева Т.А., Полозов С.М.

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

В Национальном Исследовательском Ядерном Университете «МИФИ» проводится разработка ускорителя-инжектора протонов и легких ионов с энергией 7.5 МэВ/нуклон. В инжекторе применяется несколько десятков однотипных квадрупольных магнитов с градиентом магнитного поля 3.8-18.2 Тл/м [1]. В связи с низкой частотой повторения импульсов тока для уменьшения энергопотребления и возможности использования свободного охлаждения предложено разработать квадрупольные линзы, работающие в импульсном режиме. Был разработан квадрупольный магнит, способный функционировать как в постоянном режиме работы при малых градиентах поля до 3.8 Тл/м, а также в импульсном без использования активной системы охлаждения при больших полях. Для обеспечения требуемого качества транспортировки пучка были выполнены расчеты распределений магнитных полей разработанной линзы с учетом реалистичных допусков на механические погрешности изготовления и неидеальность системы питания. На основе полученных карт магнитного поля проведен расчет динамики пучка ионов кислорода в линейном ускорителе. Результаты моделирования позволили определить и обосновать критические допуски: погрешности сборки самих магнитов, на погрешности их взаимного позиционирования в структуре ускорителя, на допустимые отклонения качества магнитного поля, а также точность синхроимпульсов системы питания (управления). Полученные данные необходимы для последующей успешной реализации и настройки ускорителя. В докладе будут представлены основные результаты разработки квадрупольных магнитов, а также первые данные по их испытаниям. Также будут обсуждаться основные результаты численного моделирования динамики пучка.

Список литературы

1. Magnets for light ions accelerator I.A. Yurin, in Proceedings of RuPAC 2021 (Alushta, Crimea, 2021), WEPSC21.

ПРИМЕНЕНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ

Борисов М.А.^{1,2}, Шведун В.И.^{1,2}

¹ НИИЯФ им. Д. В. Скобелева МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия

² ООО «Лаборатория электронных ускорителей МГУ», Москва, Россия

Задачей, решаемой в рамках настоящей работы, является разработка метода оптимизации линейных ускорителей электронов прикладного назначения на энергию ускоренного пучка единицы-десятки МэВ и среднюю мощность пучка единицы - десятки киловатт, в основе которых лежит ускоряющая структура, работающая в режиме стоячей волны. Такие ускорители широко применяются в лучевой терапии, радиологии, инспекционно-досмотровых комплексах, гамма-активационном анализе, в стерилизационных комплексах. Одним из важнейших требований к современным ускорителям для перечисленных применений является их способность работать в широком диапазоне энергий ускоренного пучка, по крайней мере с двукратным ее изменением при минимальном изменении прочих характеристик, таких как: ширина энергетического спектра, размеры ускоренного пучка на выходе структуры, средняя мощность обратного потока электронов, попадающих на катод. Особенности динамики пучка в импульсных линейных ускорителях электронов со стоячей волной позволяют разбить решение задачи оптимизации на несколько этапов с использованием различных подходов. Наиболее сложным

является оптимизация начальной части, где инжектируемый пучок с энергией десятки кэВ испытывает воздействие зависящих от фазы сильных фокусирующих-дефокусирующих сил, происходит его продольная группировка в сгустки, а также велика роль пространственного заряда.

Оптимизация начальной части структуры проводится в комбинации электродинамических расчетов и расчетов динамики пучка. Для этой цели нами используется генетический алгоритм (ГА). Данный подход оптимизации сложных систем в течение многих лет используется в различных областях науки и техники, см., например, [1] и ссылки в этой работе. ГА, в отличие от классических методов оптимизации [2], позволяет за приемлемое время находить глобальный минимум целевой функции или, по крайней мере, приближаться к нему с удовлетворительной точностью, не останавливаясь в локальных минимумах, число которых в сложных системах может быть весьма велико. В качестве параметров, с помощью которых оптимизируются ячейки начальной части, являются их количество, длина, ширина ускоряющего зазора и величина ускоряющего напряжения. Пример параметризации представлен на рисунке 1. Поиск оптимальных значений осуществляется в расчетах полей и динамики пучка. Расчет динамики пучка включает также регулярную часть структуры.

В результате оптимизации была найдена и построена в CST геометрия ускоряющей структуры. Сравнение производилось с текущим поколением ускорителей для лучевой терапии, производимыми в лаборатории и представлено на рисунке 2. Видно уменьшение энергетического разброса, а также увеличение коэффициента захвата во всем диапазоне энергии. Таким образом алгоритм подтвердил свою работоспособность и может в дальнейшем быть использован для получения необходимых характеристик ускорителя.



Рис. 1 Пример параметризации ячейки начальной части

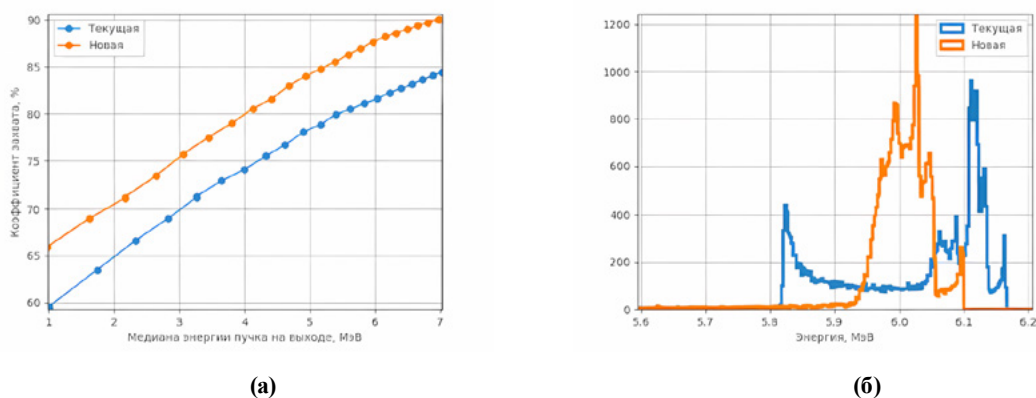


Рис. 2 Сравнение параметров текущей и новой ускоряющих структур: (а) – зависимость коэффициента захвата от медианы энергии пучка, (б) – спектры пучка при энергии 6 МэВ

Список литературы

1. Holland J. H. Genetic algorithms, scientific american, 1992.
2. Н.Н. Калиткин, Численные методы, Москва, «Наука», 1978, 512 стр.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОДОЛЬНОЙ ДИНАМИКИ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА В НОВОСИБИРСКОМ ЛАЗЕРЕ НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ И СРАВНЕНИЕ С РЕЗУЛЬТАТАМИ ИЗМЕРЕНИЙ

Шевченко О.А.¹, Винокуров Н.А.^{1,2}, Гетманов Я.В.^{1,2,3}, Энтинцев Е.С.^{1,2}, Борин В.М.^{1,2,3}, Рева С.В.¹

¹ Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

² Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

³ Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

Новосибирский лазер на свободных электронах (Новосибирский ЛСЭ) является уникальной научной установкой [1] и включает в себя три лазера на свободных электронах (ЛСЭ). В качестве источника электронов для генерации излучения в ЛСЭ используется линейный ускоритель-рекуператор (УР). В УР электроны, прошедшие через ЛСЭ и передавшие часть своей энергии излучению, возвращаются в ускоряющую структуру, где замедляются, возвращая при этом часть энергии, затраченной на их ускорение.

Работа ЛСЭ существенным образом зависит от таких параметров электронного пучка, как заряд и длительность, а также энергетический разброс. Эти параметры определяются особенностями продольной динамики электронного пучка в инжекторе, а также выбором фазы ускорения и дальнейшей продольной динамикой в УР. Правильный выбор ускоряющей фазы и продольной дисперсии также важен для рекуперации электронного пучка после его взаимодействия с излучением в ондуляторе ЛСЭ.

Непосредственное измерение всех продольных параметров, включая энергетический разброс, является довольно сложной технической задачей и требует использования дополнительного диагностического канала, для которого, как правило, нет свободного места. Относительно легко можно измерить продольное распределение тока пучка и его зависимость от фазы ускорения и продольной дисперсии. Сопоставление результатов этих измерений с численным моделированием позволяет определить продольный фазовый объем пучка и более точно описать его продольную динамику.

В данной работе представлены результаты моделирования продольной динамики пучка в УР второго ЛСЭ Новосибирского лазера на свободных электронах, а также проведено их сравнение с результатами измерений продольного распределения тока.

Список литературы

1. Винокуров Н.А., Шевченко О.А. Лазеры на свободных электронах и их разработка в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН. Успехи физических наук. - 2018. - Т. 188, № 5. - С. 493–507. DOI 10.3367/UFNr.2018.02.038311.

НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ВОЛН В ЗАРЯЖЕННОЙ ИЗОЭНТРОПИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЕ, УДЕРЖИВАЕМОЙ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

Буянов Г.О.¹, Каримов А.Р.^{1,2}

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

²Объединенный Институт высоких температур РАН, Москва, Россия

В рамках гидродинамического описания исследуется динамика нелинейных электростатических волн, возбуждаемых в изоэнтропической цилиндрической заряженной плазме, удерживаемой постоянным аксиальным магнитным полем [1,2]. Используя частное, точное аналитическое решение уравнений гидродинамики, получена система обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающая динамику электронов во магнитном поле с учетом конечной электронной температуры. Данная модель использовалась для исследования влияния температурных эффектов и величины магнитного поля на развитие гидродинамических сингулярностей в заряженном, вращающемся, цилиндрическом слое плазмы. Для вогнутого температурного профиля показано, что увеличение азимутальной скорости электронов приводит к стабилизации потока и исключению сингулярностей, установлено влияние магнитного поля на этот процесс. Эти исследования имеют непосредственное приложение к генерации электромагнитного излучения.

Список литературы

1. Каримов А.Р., Буянов Г.О. Нелинейная динамика цилиндрических волн в изотермической плазме. Вестник НИЯУ МИФИ. 2024; Т. 13, № 6, с. 373-379.
2. Karimov A.R., Buyanov G.O., Shikanov A.E. and Kozlovskij K. I. Generation of Coupled Nonlinear Oscillations in Charged-Particle Beam by Crossed Magnetic Fields. Quantum Beam Science. 2025; V.9, No. 2, p. 14.

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ УСКОРЯЮЩИХ СТРУКТУР НА СТОЯЧЕЙ ВОЛНЕ В ЛИНЕЙНЫХ УСКОРИТЕЛЯХ ЭЛЕКТРОНОВ НА БОЛЬШИЕ ЭНЕРГИИ

Зуев Ю.В., Варламова М.В., Калининченко М.А.

АО «НИИЭФА», Санкт-Петербург, Россия

В линейных ускорителях электронов на большие энергии чаще всего используется ускоряющая структура на бегущей волне (TW) с набегом фазы колебаний $2\pi/3$, разработанная в SLAC. Технология изготовления таких структур хорошо отработана многими производителями, что сказывается на стоимости, которая в пересчете на единицу длины оказывается ниже стоимости ускоряющих структур на стоячей волне (SW). Из-за особенностей переходных процессов TW структуры имеют преимущество в линейных коллайдерах и инжекторах накопительных колец с системами компрессии энергии СВЧ поля (типа SLED) и пучками малой длительности. Для ускорения таких пучков в SW структурах используется режим запасенной энергии. Несмотря на компактность, более высокую стабильность к колебаниям температуры и ошибкам изготовления, применение нормально проводящих SW структуры S-диапазона обычно ограничено энергией 100..200 МэВ.

Особенности ускорения электронов полем стоячей волны анализируются в связи с предложением [1] использовать бипериодические ускоряющие структуры для достижения энергии 6 ГэВ с минимальным возрастанием нормализованного эмиттанта и минимальным энергетическим разбросом. В силу характера полей, действующих в периодических ускоряющих структурах, качественный анализ происходящих процессов обеспечивает модель ускоряемого сгустка с разложением траекторий движения релятивистских электронов на медленную («гладкую») составляющую и быстрые осцилляции малой амплитуды. Усредненное по осцилляциям параксиальное уравнение для среднеквадратичной огибающей пучка имеет вид

$$\sigma'' + \frac{\gamma'}{\gamma} \sigma' + K_p \sigma = \frac{\kappa_s}{\gamma^3 \sigma} + \frac{\varepsilon_n^2}{\gamma^2 \sigma^3}$$

и дает равновесное решение, характеризующее асимптотическое поведение сгустка: при малом заряде сгустка (обобщенный первеанс $\kappa_s \rightarrow 0$)

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{\varepsilon_n}{\gamma \sqrt{K_p}}} = \sqrt{\frac{\varepsilon_n}{\gamma' \sqrt{\eta/8}}};$$

при высокой яркости пучка (нормализованный эмиттанс $\varepsilon_n \rightarrow 0$)

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{\kappa_s}{\gamma^3 K_p}} = \frac{1}{\gamma'} \sqrt{\frac{8}{\eta} \cdot \frac{\kappa_s}{\gamma}}$$

Режим работы и фокусирующие свойства ускоряющей структуры описываются через средний темп ускорения $\gamma' \equiv d\gamma/dz$ и градиент поперечной силы (силы Миллера)

$$K_p = \frac{\eta}{8} \left(\frac{\gamma'}{\gamma} \right)^2$$

Последняя зависит от соотношения амплитуд пространственных гармоник ВЧ поля и фазы этого поля в момент прохождения сгустком центра ускоряющей ячейки [2],

$$\eta \equiv \sum_{n=1}^{\infty} b_n^2 + b_{-n}^2 + b_n b_{-n} \cos 2\varphi$$

Влияние несинхронных (обратных) гармоник приводит к тому, что в SW структурах при $\varphi=0$ (максимум ускорения) $\eta \approx 1$. При ускорении в стандартных TW структурах $\eta \approx 0$, что актуализирует задачу дополнительной фокусировки пучка внешним магнитным полем.

Индукцированные ВЧ полем локальные изменения проекционного эмиттанса также носят колебательный характер. На каждом периоде ускоряющей структуры наблюдаются два пика, амплитуда которых

$$\Delta \varepsilon_x \propto \sigma_x^{2..4} \sigma_z^{1..2} \cos \bar{\varphi}$$

где $\bar{\varphi}$ – средняя фаза частиц в сгустке длиной σ_z . Обратимость колебаний эмиттанса зависит от волнового состава поля, степени его нелинейности и размеров сгустка.

Особенности работы SW структур иллюстрируются результатами моделирования динамики электронов в линейном ускорителе, разрабатываемом для УНК СИЛА [3]. Определены требования к инжектируемому пучку, обеспечивающие его ускорение с минимальным ростом нормализованного эмиттанса без использования магнитных фокусирующих линз. Показано, что одним из источников необратимого роста эмиттанса могут быть резонансные процессы, связанные с мультипольными составляющими полей, формируемых щелями связи между ячейками структуры.

Список литературы

1. Ашанин И.А. и др. Линейный электронный ускоритель-инжектор для специализированного источника синхротронного излучения четвертого поколения СИЛА // ВМУ. Серия 3. Физика. Астрономия. 78(1), 2310401 (2023).
2. Rosenzweig J. and Serafini L. Transverse particle motion in radio-frequency linear accelerator // Phys. Rev. E 49, 1599 (1994).
3. Зуев Ю.В. и др. Разработка и численные исследования линейного ускорителя электронов для синхротронно-лазерного комплекса «СИЛА» // Письма в ЭЧАЯ. 2025. Т.22, №4 (261).

ПРОЕКТ КОМПТОНОВСКОГО ИСТОЧНИКА РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ИНСТИТУТА ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ МОСКОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА

*Бобылев Д.А.¹, Алимов А.С.¹, Артюков И.А.², Борисов М.А.¹, Виноградов А.В.²,
Волков Р.В.³, Ермаков А.Н.¹, Потемкин Ф.В.³, Савельев-Трофимов А.Б.^{2,3}, Ханкин В.В.¹,
Шведун В.И.¹, Шведун Н.В.¹, Шемухин А.А.¹, Юров Д.С.¹*

¹НИИЯФ им. Д.В. Скобелева МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

³МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Источники рентгеновского и гамма-излучения на основе обратного комптоновского рассеяния лазерных пучков на релятивистских электронных пучках (комптоновские источники, КИ) являются новым типом лабораторных спектрально ярких источников фотонов с энергией от десятков кэВ до десятков МэВ, активные разработки которых в последние два десятилетия ведутся во многих научных центрах мира. По характеристикам генерируемого рентгеновского излучения КИ, размещаемый в пределах небольшой лаборатории, может обеспечить проведение широкого круга исследований, которые в настоящее время ведутся только на установках масштаба мегасайнс – источниках синхротронного излучения.

В настоящее время в НИИЯФ МГУ разрабатывается КИ [1-5], в основе которого лежит линейный ускоритель электронов с энергией в диапазоне 35-50 МэВ, зарядом сгустка 100 пКл, нормализованным эмиттансом 1 мм*мрад, длительностью сгустка 10 пс и частотой следования сгустков до 1000 Гц. При данных параметрах ускорителя ожидаемый поток рентгеновского излучения составит более 10¹⁰ фотонов в секунду, а его спектральная ширина составит 350 эВ. Максимальная энергия рентгеновского излучения составит около 46 кэВ.

Список литературы

1. Шведун В.И., и др. Состояние работ по ускорительной тематике в ОЭПВАЯ. Научная конференция НИИЯФ МГУ по итогам 2024 года.

2. Григоренко Л.В., и др. Проект научной программы ИНОК – комптоновского источника монохроматических гамма-квантов НЦФМ // ФИЗМАТ. - 2024. - Т. 1. - № 3-4. - С. 123-264.
3. Бобылев Д.А., Шведун В.И. Накопительное кольцо комптоновского источника НЦФМ // Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия. - 2024 - №2.
4. Vinogradov A. et al. Ray Tracing Simulation of X-ray Microdiffraction Beamline on the Inverse Compton Source //Symmetry. – 2023. – Т. 15. – №. 5. – С. 1068.
5. Артюков И.А. и др. Исследования фотоядерных реакций на комптоновских источниках: современное состояние и перспективы // XXIV Харитоновские тематические научные чтения. Проблемы ускорительной техники и физики высоких энергий. Сборник тезисов. – 2023.

ОБЛИК КОМПТОНОВСКОГО ИСТОЧНИКА РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НАЦИОНАЛЬНОГО ЦЕНТРА ФИЗИКИ И МАТЕМАТИКИ НА ОСНОВЕ ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ И НАКОПИТЕЛЬНОГО КОЛЬЦА НА ЭНЕРГИЮ 120 МЭВ

*Бобылев Д.А.¹, Алимов А.С.¹, Артюков И.А.², Борисов М.А.¹, Виноградов А.В.², Волков Р.В.³, Ермаков А.Н.¹,
Иванов К.А.³, Мухин И.Б.⁴, Потемкин Ф.В.³, Савельев-Трофимов А.Б.^{2,3}, Феценко Р.М.², Ханкин В.В.¹,
Шведун В.И.¹, Шведун В.В.¹, Шемухин А.А.¹, Юров Д.С.¹*

¹НИИЯФ им. Д.В. Скобельцына МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

³МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

⁴Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН,
Нижний Новгород, Россия

Источники рентгеновского и гамма-излучения на основе обратного комптоновского рассеяния лазерных пучков на релятивистских электронных пучках (комптоновские источники, КИ) являются новым типом лабораторных спектрально ярких источников фотонов с энергией от десятков кэВ до десятков МэВ, активные разработки которых в последние два десятилетия ведутся во многих научных центрах мира. По характеристикам генерируемого рентгеновского излучения КИ, размещаемый в пределах небольшой лаборатории, может обеспечить проведение широкого круга исследований, которые в настоящее время ведутся только на установках масштаба мегасайнс – источниках синхротронного излучения. В настоящее время в Национальном центре физики и математики (НЦФМ) ведётся разработка подобного источника комптоновского излучения (ИКИ НЦФМ) [1, 2].

В данной работе разработан облик линейного ускорителя электронов на энергию до 120 МэВ, разработана магнитная структура накопительного кольца ИКИ НЦФМ, и проведено моделирование динамики электронного пучка в нём. Проводится учёт таких эффектов, как внутривпучковое рассеяние [3, 4], радиационное и лазерное [5, 6] затухания, когерентное синхротронное излучение [7, 8, 9]. Производятся оценки динамической апертуры и аксептанса разработанного накопительного кольца. Разработан облик лазерной системы и рентгеновских станций КИ. В работе производятся оценки выхода рентгеновского излучения и обсуждаются его основные параметры.

Список литературы

1. Бобылев Д.А., Шведун В.И. Накопительное кольцо комптоновского источника НЦФМ// Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия. - 2024 - № 2.
2. Григоренко Л.В., и др. Проект научной программы ИНОК – комптоновского источника монохроматических гамма-квантов НЦФМ // ФИЗМАТ. - 2024. - Т. 1. - № 3-4. - С. 123-264.
3. Левичев Е.Б. // ЦКП «СКИФ» ИК СО РАН/ИЯФ СО РАН. Школа по физике и технике ускорителей. ОИЯИ. Дубна. 2023.
4. Bjorken J., Mtingwa S. // Intrabeam scattering. Particle accelerators. 1983 Vol. 13 pp. 115-143.
5. Посеряев А. // Расчёт динамики и оптимизация параметров ускорительных комплексов различного назначения. Диссертация на соискание учёной степени кандидата физ.-мат. Наук. Москва 2006.

6. Chaikovska I., Variola A. // Equilibrium energy spread and emittance in a Compton ring: An alternative approach. Phys. Rev. St Accel. Beams 17. 044004 (2014).
7. Bessonov E.G., Feshenko R.M., Shvedunov V.I. The coherent synchrotron radiation influence on the storage ring longitudinal beam dynamics. Proceedings of the 2004 FEL Conference, 625-628.
8. Demin Zhou. Coherent synchrotron radiation and microwave instability in electron storage rings. A thesis submitted for the degree of PhD. 2011.
9. Vinogradov A. et al. Ray Tracing Simulation of X-ray Microdiffraction Beamline on the Inverse Compton Source //Symmetry. – 2023. – Т. 15. – №. 5. – С. 1068.

ОБ УПРАВЛЕНИИ ЗАМКНУТОЙ ОРБИТОЙ В ИСТОЧНИКЕ СИ 4-ГО ПОКОЛЕНИЯ «СИЛА»

Дюбков В.С.^{1,2}, Юрин И.А.^{1,2}, Царев Г.А.²

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

²НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

Для проведения прецизионных экспериментов с фотонами, генерируемыми электронными сгустками источника СИ 4-го поколения СИЛА, реализуемого НИЦ «Курчатовский институт» необходимо осуществлять контроль и коррекцию замкнутой (равновесной) орбиты пучка. Для эффективной работы пользователей СИ стабильность орбиты должна быть не хуже 10% от размера пучка [1]. Для коррекции ведущего магнитного поля, хроматичности и секступольных нелинейностей магнитных полей оптической элементов, а также ошибок их выставки, предусмотрена система коррекции, включающая 11 корректирующих магнитов (корректоров) на каждом из 40 суперпериодов накопительного синхротрона СИЛА. Для контроля положения пучка в магнитооптической структуре накопительного синхротрона СИЛА предусмотрено 10 мониторов положения пучка (ВРМ) в расчете на каждый суперпериод накопителя. Для проекта СИЛА предполагается внедрение новой, специально разработанной для проекта, аппаратной архитектуры системы обратной связи по пучку. В работе представлены результаты расчетов, полученные для предполагаемых полевых ошибок и ошибок выставки магнитных элементов накопителя, а также приводится описание программно-аппаратной части системы обратной связи.

Список литературы

1. G. Decker, in Proceedings of DIPAC 2005 (Lyon, France, 2005), p. 233.

РЕАЛИЗАЦИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МОДУЛЕЙ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИКИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ И ПРОЦЕССА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

Наумова Д.Н., Гарипова А.В., Гудаев Ш.Д., Михайлов Е.С., Плужан К.Г., Шевченко В.В.

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров, Нижегородская обл.

В докладе представлены результаты реализации функциональных модулей программного комплекса, предназначенного для моделирования динамики заряженных частиц и распространения электромагнитных волн на основе самосогласованного совместного решения уравнений Максвелла и уравнений движения заряженных частиц. Программный комплекс реализует трехмерный и осесимметричный подходы для решения задач сильноточной ускорительной техники.

Программный комплекс обладает следующими особенностями: использование неравномерной конечно-разностной сетки, возможность проведения расчетов в трехмерной и осесимметричной постановках, возможность проведения расчетов в многопоточном режиме вычислений.

Спроектированы и протестированы функциональные модули обработки исходных данных, построения геометрии, расчета электромагнитных полей, движения частиц с учетом собственных полей объемного заряда, обработки выходных данных и визуализации. Реализована поддержка стан-

дартных форматов данных, позволяющая проводить пре- и постпроцессинг задач с использованием различных САПР и программ визуализации научных данных.

Работа выполнена в рамках реализации направления №6 научной программы Национального центра физики и математики (проект «Ядерная и радиационная физика. Этап 2023-2025»).

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ СИЛЬНОТОЧНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА В МАГНИТНОЙ ШИКАНЕ

Петренко А.В., Старостенко Д.А., Павлов О.А., Павлюченко В.А., Алякринский О.Н.

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

Для применения сильноточных электронных пучков в экспериментах с разрушением мишени (получение вторичных частиц, материаловедение), часто необходимо исключить прямую видимость между мишенью и ускорителем электронов. Для этой цели можно использовать повороты и параллельные переносы пучка при помощи магнитных элементов. В данной работе при помощи численного моделирования мы исследуем динамику сильноточного электронного пучка в короткой шикане, т.е. в транспортном канале, который обеспечивает временное параллельное смещение пучка на размер апертуры вакуумной камеры и затем возвращает пучок на ось установки. Такая электронно-оптическая система, составленная из дипольных магнитов с параллельными краями, является ахроматической и широко применяется в ускорителях на высоких энергиях. Для ускорителя электронов с низкой энергией ~ 1 МэВ и высоким током ~ 1 кА важным фактором поперечной динамики пучка становится его дефокусировка за счет объемного заряда и притяжение пучка к зарядам, наведенными на стенках вакуумной камеры. Эти эффекты накладывают ограничения на конструкцию транспортного канала и определяют соотношение между предельно допустимым рабочим током пучка и его энергией.

НАСТРОЙКА ОРБИТЫ И ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НА ИНЖЕКТОРЕ СКИФ

Федоров В., Никифоров Д., Левичев А., Синяткин С., Арсентьева М., Рева С., Набиль А., Смирнов К., Ральникова П.

Институт ядерной физики имени Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

В настоящее время происходит запуск инжекционного комплекса ЦКП «СКИФ», который состоит из линейного ускорителя с энергией 200 МэВ и синхротрона с энергией до 3 ГэВ. В первую очередь был произведен ввод в эксплуатацию линейного ускорителя, далее – синхротрона. Для запуска данных ускорителей была написана библиотека SCAUT, которая легла в основу кода, позволяющего производить проводку и коррекцию пучка, измерять его параметры и пр. Данный код позволил оперативно и своевременно произвести запуск линейного ускорителя, а также получить пучок в бустерном синхротроне.

Фреймворк SCAUT обеспечивает единый интерфейс для управления оборудованием, проведения измерений и анализа данных как в режиме моделирования, так и при работе с реальными установками. Модульная архитектура позволяет легко адаптировать систему под различные типы ускорителей и быстро интегрировать новое оборудование без изменения базового кода.

Описан рабочий процесс от планирования эксперимента до архивирования результатов с примерами практического применения. Показано использование SCAUT при запуске инжекционного комплекса СКИФ, где фреймворк обеспечил автоматизацию коррекции орбиты пучка, оптимизацию параметров ускорителя и измерение характеристик пучка. Применение SCAUT сократило время пуконаладочных работ и повысило воспроизводимость результатов измерений.

Фреймворк интегрирован с системой управления и поддерживает работу с различными симуляторами, что обеспечивает непрерывный цикл разработки от моделирования до реализации. Централизованное логирование и система обратных вызовов позволяют проводить сложные многопараметрические эксперименты в автоматическом режиме.

ВЫВОД ПУЧКА ПРОТОНОВ ИЗ УСКОРИТЕЛЯ У-70 ПРИ ПОМОЩИ КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ДЕФЛЕКТОРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЯВЛЕНИЯ ОБЪЕМНОГО ЗАХВАТА В КАНАЛИРОВАНИЕ

Решетников С.Ф., Барнов Е.В., Васильев А.Н., Мочалов В.В., Машиев В.А., Чесноков Ю.А.

НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ, Протвино, Россия

Рассмотрены результаты работ по выводу пучка протонов из ускорителя У-70 кристаллом с использованием явления объемного захвата в каналирование. Продемонстрирована возможность использования такого режима вывода для обеспечения работы физических установок в сеансах на ускорителе У-70.

Объемный захват исследовался ранее как физическое явление, но никогда не применялся для формирования пучка на ускорителях для работы физических установок. В этом случае кристалл устанавливается на циркулирующий пучок боком, как показано на Рис.1.

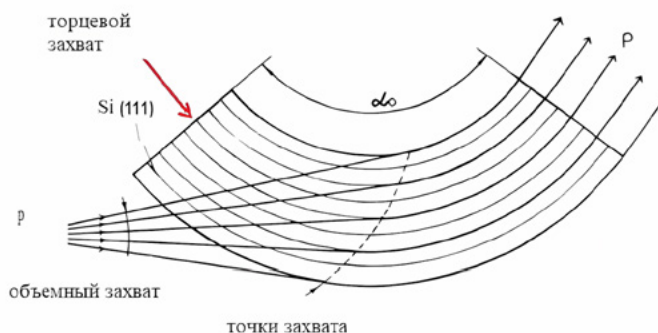


Рис. 1 Схема вывода частиц при объемном захвате в каналирование

Захват частиц в каналирование осуществляется в середине кристалла, где траектории падающих протонов выходят на касательные к изогнутым кристаллографическим плоскостям. Вероятность объемного захвата в каналирование существенно ниже, чем та, что происходит при торцевом захвате, но у этого режима имеется ряд положительных особенностей: улучшается временная структура пучка, увеличивается растяжка, так как появляется независимость параметров вывода от угла падения частиц пучка на кристалл. Требуемый для такого режима кристалл (с увеличенным углом изгиба) был подготовлен для вывода частиц в канала №14 в 24 промежутке У-70. При сбросе на кристалл интенсивности $3 \cdot 10^{11}$ прот./цикл на установке «СПАСЧАРМ» наблюдалась интенсивность $2 \cdot 10^6$ прот./цикл, что является приемлемой величиной для работы физической установки. Профили пучка на внутренней мишени установки «СПАСЧАРМ» показаны на рисунке 2.

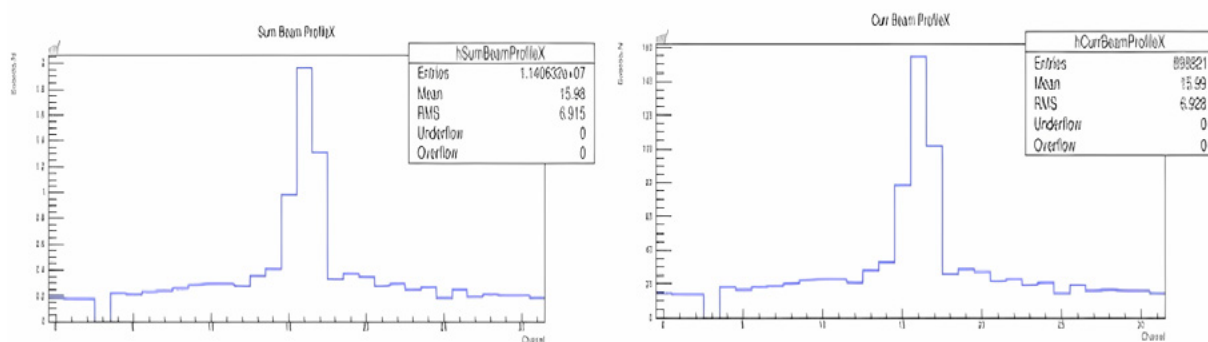


Рис. 2 Профили пучка протонов на установке «СПАСЧАРМ», при выводе пучка с помощью кристалла, работающего в режиме объемного захвата в каналирование

ПОЛУЧЕНИЕ ПУЧКА ЗАРЯЖЕННЫХ АДРОНОВ В ДИАПАЗОНЕ ИМПУЛЬСОВ 2-13 ГЭВ/С НА УСКОРИТЕЛЬНОМ КОМПЛЕКСЕ У-70

Решетников С.Ф., Барнов Е.В., Васильев А.Н., Маишеев В.А., Мочалов В.В. Чесноков Ю.А.

НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ, Протвино, Россия

Рассмотрены результаты работ по получению пучка заряженных адронов в диапазоне импульсов 2-13 ГэВ/с на установке «СПАСЧАРМ» ускорительного комплекса У-70. Продемонстрирована схема получения такого пучка при использовании кристаллического дефлектора для вывода первичных протонов на внешнюю алюминиевую мишень.

Схема получения пучка заряженных адронов, в диапазоне импульсов 2-13 ГэВ/с, показанная на Рис.1, предполагала вывод в направлении канала транспортировки первичного протонного пучка 50 ГэВ изогнутым кристаллом на установленную внешнюю мишень (30 см алюминия).

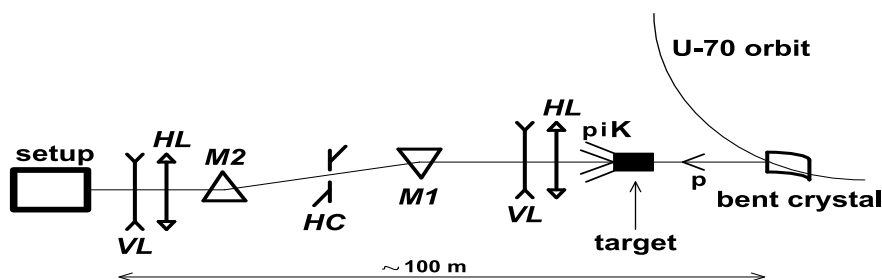


Рис. 1 Схема получения вторичного пучка заряженных адронов на установке «СПАСЧАРМ»

При сбросе на кристалл 1011 прот./цикл интенсивность пучка на мишени была порядка $3 \cdot 10^7$ прот./цикл. В этих условиях интенсивность пучка вторичных частиц в канале транспортировки пучка, по измерениям установки «СПАСЧАРМ», составляла 104 ч./цикл.

Успех был достигнут за счет оптимизации размеров кристалла. Эффективность поворота пучка в кристалле определяется формулой $\text{Eff} \sim (\theta_c/\varphi) \cdot \exp(-L/L_d)$, где характерный параметр L_d , называемый длиной деканализирования, составляет ~ 20 мм для энергии 50 ГэВ, что на 40% меньше, чем для 70 ГэВ, в соответствии с этим фактором новый кристалл был укорочен, по сравнению со старыми дефлекторами, применяемыми для 70 ГэВ. Кроме того, была создана прецизионная станция кристаллических дефлекторов, позволяющая устанавливать угол ориентации кристалла по пучку с точностью 10 мкрад. Также была рассчитана новая оптическая схема канала вторичных частиц №14 специально для работы с внешней мишенью (Рис. 2).

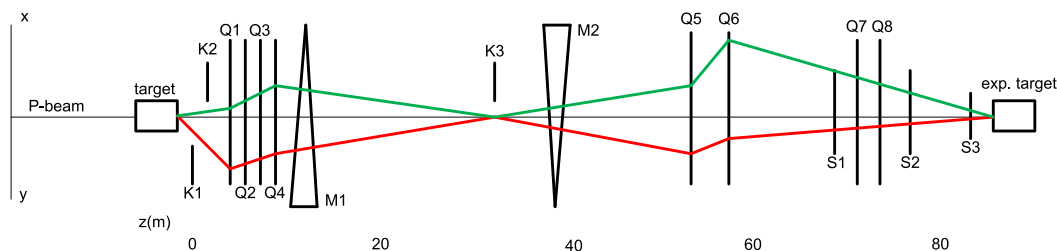


Рис. 2 Оптическая схема канала вторичных частиц для работы с внешней мишенью

**УСКОРИТЕЛИ
С ВЫСОКОЙ
ИНТЕНСИВНОСТЬЮ
УСКОРЯЕМОГО ПУЧКА**

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОПЕРЕЧНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ИНТЕНСИВНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА, ГЕНЕРИРУЕМОГО В ЛИНЕЙНОМ ИНДУКЦИОННОМ УСКОРИТЕЛЕ, ДЛЯ ПРОЕКТА ЛСЭ-ГЕНЕРАТОРА ТГц-ДИАПАЗОНА

*Сандалов Е.С., Синицкий С.Л., Сквородин Д.И., Аржанников А.В., Логачев П.В., Бак П.А.,
Живанков К.И., Куркучев В.В., Трунев Ю.А., Атлуханов М.Г., Попов С.С., Песков Н.Ю.*

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

В настоящее время в областях вакуумной электроники и физики интенсивных пучков заряженных частиц многими научными коллективами разрабатываются и реализуются различные проекты мощных источников когерентного электромагнитного излучения большой мощности в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах [1]. Интерес к этим диапазонам обусловлен тем, что их освоение представляет новые возможности и предоставляет инструменты для фундаментальных и прикладных научных исследований. Например, подобные источники активно применяются в настоящее время для нагрева плазмы в установках УТС с магнитным удержанием, для разработки систем локации (сканирования), для создания и исследования новых химических соединений, лекарств и энергетических материалов [2-4]. Как известно, одним из наиболее эффективных источников для формирования интенсивных потоков электромагнитного излучения традиционно считаются лазеры на свободных электронах (ЛСЭ), так как они обладают высокими значениями пиковой мощности и энергосодержания в импульсе [3]. Однако для создания таких устройств требуется формирование электронных пучков малого диаметра ($\sim$ несколько мм) с низким угловым разбросом при достаточно высоких значениях энергии электронов (от нескольких единиц до десятков МэВ) и тока пучка (1-2 кА).

В этой связи, одной из актуальных задач, решаемых сегодня в ИЯФ СО РАН, является создание уникального ЛСЭ-генератора ТГц-излучения (0.3, 0.6 и 1.2 ТГц) субгигаваттной мощности, с энергосодержанием в импульсе ~ 10 -100 Дж на базе линейного индукционного ускорителя ЛИУ (5-20 МэВ/1-2 кА) [5, 6]. Для того, чтобы осуществить формирование электронного драйвера с указанными параметрами, требуется решение двух основных задач: 1) подавление критических пучковых неустойчивостей, в частности, поперечной неустойчивости пучка (Beam break-up instability) [7], 2) обеспечение условий стабильной транспортировки электронного пучка в ЛИУ с последующей компрессией в магнитной системе ЛСЭ-генератора и его проводка через электродинамическую систему. В рамках данного доклада будут приведены общая концепция создаваемого ЛСЭ-генератора и его основные конструктивные элементы. Особое внимание в докладе будет уделено способам подавления поперечной неустойчивости и детальному расчетно-экспериментальному исследованию влияния различных факторов на ее инкремент, что необходимо для создания пучка высокого качества. В частности, будут представлены результаты анализа влияния на инкремент поперечной неустойчивости нескольких ключевых факторов: а) добротности собственных ЭМ-колебаний, возникающих в полостях ускоряющих модулей ЛИУ, б) длительности фронта импульса тока пучка, в) смещения и наклона от оси элементов ускоряющей и фокусирующей систем ЛИУ, г) пространственных распределений и величин ускоряющих электрических и фокусирующих магнитных полей.

Список литературы

1. Benford J., E Schamiloglu, JC Stephens et al. High-power microwaves. – CRC press, 2024.
2. Gallerano G. P., Doria A., Giovenale E. et al. The physics of and prospects for THz-compact FELs. Terahertz Science and Technology, 2014, vol. 7, no. 4, p.160.
3. Lee Y. S. Principles of terahertz science and technology. – Springer Science & Business Media, 2009. – Т. 170.
4. Michalchuk, A. A., Hemingway, J., & Morrison, C. A. (2021). Predicting the impact sensitivities of energetic materials through zone-center phonon up-pumping. The Journal of Chemical Physics, 154(6), 064105.
5. Sandalov E. S., Sinitsky S.L., Burdakov A.V. et al. Electrodynamical system of the linear induction accelerator module //IEEE transactions on plasma science. – 2021. – Т. 49. – №. 2. – С. 718-728.

6. Sandalov E. S., Sinitsky S.L., Arzhannikov A.V. et al. Magnetic System of a Sub-Gigawatt Free-Electron Laser of the Terahertz Range Based on a Kiloampere Beam of Relativistic Electrons // Radiophysics and Quantum Electronics. – 2023. – Т. 66. – №. 7. – С. 489-503.
7. Neil V. K., Cooper R. K., Hall L. S. Further theoretical studies of the beam breakup instability //Part. Accel. – 1979. – Т. 9. – С. 213-222.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИНТЕНСИВНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА НА ОСНОВЕ РЕГИСТРАЦИИ ОПТИЧЕСКОГО ПЕРЕХОДНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Абед Н., Кандауров И.В., Куркуचेков В.В., Никифоров Д.А.

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

Работа посвящена диагностике пространственных характеристик интенсивного частотно-импульсного электронного пучка методом регистрации оптического переходного излучения (ОПИ) пучка на мишени.

Работа выполнялась на экспериментальном стенде, созданном для решения задач термоядерного материаловедения и физики высоких энергий. Основным элементом стенда является источник трубчатого электронного пучка на основе термокатода LaB6 [1], способного генерировать пучок с энергией до 20 кэВ, током до 10 А, длительностью импульса 0,1 – 10 мс с частотой повторения до нескольких десятков герц. Представляемая в работе диагностика необходима для измерения распределения плотности тока в поперечном сечении электронного пучка, поскольку эта информация важна при моделировании длительных импульсных тепловых нагрузок на обращённые к плазме элементы термоядерных установок [2], а также представляет интерес для изучения пространственной динамики интенсивных трубчатых электронных пучков, перспективных для коллимации гало ионных пучков в адронных коллайдерах [3].

Подробно рассмотрено создание визуализирующей диагностики распределения плотности тока пучка в поперечном сечении с использованием ОПИ с поверхности металлического коллектора-мишени, включая проблемы выбора материала мишени, углов падения пучка, техники регистрации ОПИ, методов подавления фонового излучения от горячего катода и алгоритмов обработки полученных изображений.

Представлены результаты экспериментов по регистрации изображения электронного пучка в ОПИ и выполнены измерения однородности пучка в поперечном сечении.

Список литературы

1. Repeated Pulse Electron Beam Source for Materials Science Applications / N. Abed, V. V. Kurkuchekov, A. V. Ivanov [et al.]; [sci. ed. V. V. Kurkuchekov]. - DOI 10.1134/S1063778824130179.
2. Pitts R.A. A full tungsten divertor for ITER: Physics issues and design status. — J. of Nuclear Materials, 2013, vol. 438, p. S48—S56.
3. G. Stancari, V. Previtali, A. Valishev, R. Bruce, S. Redaelli, A. Rossi et al., Conceptual design of hollow electron lenses for beam halo control in the Large Hadron Collider, Tech. Rep., CERN-ACC-2014-0248, FERMILAB-TM-2572-APC, CERN, Geneva (2014).

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ИЗГОТОВЛЕНИЕ ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ ПРИКЛАДНОГО НАЗНАЧЕНИЯ НА ЭНЕРГИЮ 8 МЭВ

Лалаян М.В., Артамонов А.С., Батов А.А., Бехтев Б.В., Бондаренко Т.В., Гусарова М.А., Дмитриев М.С., Дьяконов М.В., Збруев Р.А., Иванов О.А., Ключевская Ю.Д., Малашин М.В., Мацевский С.В., Полозов С.М., Пономаренко А.Г., Прокопенко А.В., Ращиков В.И., Самароков Н.Ю., Смирнов С.А., Страхов П.В., Туманов С.А., Чумаков А.И., Шатохин В.Л., Юрин И.А.

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

В настоящее время в НИЯУ МИФИ завершаются работы по проектированию и изготовлению новой экспериментальной установки – линейного ускорителя электронов на энергию около 8 МэВ с повышенной интенсивностью пучка. Ускоритель предназначен для испытаний электронной компонентной базы на радиационную стойкость. Он включает в себя специально разработанную электронную пушку, позволяющую генерировать пучок с импульсным током более 1 А с возможностью регулировки в широком диапазоне, а также две коротких (12 и 8 ускоряющих ячеек) бипериодических ускоряющих структуры (БУС), работающих на стоячей волне и частоте 2856 МГц. Используются симметричные вводы СВЧ мощности. Измеренное распределение амплитуды СВЧ поля полностью соответствует расчетному. Съемная мишень-конвертер позволяет работать как на выведенном пучке электронов, так и на потоке гамма-квантов. Для питания ускорителя будет использоваться однолучевой клистрон КИЛ-258 производства НПП «Исток» мощностью около 17 МВт. В докладе будут представлены основные результаты разработки и изготовления основных частей ЛУЭ.

ИЗМЕРЕНИЕ ЭФФЕКТА ПРИТЯЖЕНИЯ ИНТЕНСИВНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА К МЕТАЛЛИЧЕСКОМУ ПРОБНИКУ

Решетов Д.Ф.¹, Петренко А.В.¹, Алякринский О.Н.¹, Живанков К.И.¹, Пензин И.В.², Журавлев И.В.², Дон А.Р.², Протас Р.В.²

¹Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

²ФГУП «РФЯЦ – ВНИИТФ им. акад. Е.И. Забабахина», Снежинск, Россия

Учет эффектов, возникающих при взаимодействиях интенсивных пучков с наведенными ими на стенках вакуумной камеры зарядами, являются актуальной задачей физики ускорителей. Эти эффекты наиболее сильно проявляются при пролете пучка около неоднородностей вакуумной камеры в разных устройствах, например, септум-магнитах, датчиках, коллиматорах. Точный трехмерный расчет эффектов искажения фазового объема пучка при пролете вблизи подобных неоднородностей можно провести в некоторых специализированных программах, но эти расчеты требуется проверить в эксперименте. Для этой цели нами было проведено измерение эффекта притяжения электронного пучка с энергией 20 МэВ и током 1.6 кА к металлическому датчику, вводимому в вакуумную камеру на разную глубину перпендикулярно направлению движения пучка. При этом эффект притяжения наблюдался на расположенных далее датчиках положения и профиля пучка. Приводится сравнение экспериментальных данных с аналитическими оценками и точным трехмерным моделированием.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАХВАТА ВТОРИЧНОГО ПОЗИТРОННОГО ПУЧКА В ОТКРЫТУЮ МАГНИТНУЮ ЛОВУШКУ

Бухаров Н.Ф.¹, Петренко А.В.¹, Никифоров Д.А.¹, Живанков К.И.¹, Мартышкин П.В.¹, Иванов А.В.^{1,2}, Логачёв П.В.¹

¹Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

²Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

Мощные электронные пучки линейных индукционных ускорителей могут быть использованы для генерации вторичных частиц, например, позитронов. Данный подход позволяет за один импульс получать пучки позитронов, на два порядка более интенсивные, чем в традиционной схеме с использованием линейных ВЧ ускорителей. При заряде подобного позитронного сгустка ~100–1000 нКл и длительности ~10–100 нс традиционные методы захвата и ускорения (в ВЧ ускорителе) оказываются неприменимы. В данной работе рассматривается схема захвата такого интенсивного позитронного пучка в открытую ловушку. При этом конверсионная мишень располагается в области сильного

поля (вблизи пробки), а в области слабого поля расположена секция импульсного замедления позитронов, которая включается только во время первого пролёта пучка. Таким образом, замедленный позитронный пучок оказывается захваченным в открытой ловушке. В дальнейшем предполагается осуществить ионизационное охлаждение позитронов, например, путём напуска газа в ловушку. Данный интенсивный источник холодных позитронов может быть использован в качестве альтернативы реакторным источникам позитронов.

УПРАВЛЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ СПЕКТРОМ ПУЧКА БОЛЬШОГО СЕЧЕНИЯ, ГЕНЕРИРУЕМОГО В УСКОРИТЕЛЕ ЭЛЕКТРОНОВ С СЕТОЧНЫМ ПЛАЗМЕННЫМ КАТОДОМ

Недошивин В.В., Воробьёв М.С., Коваль Н.Н., Дорошкевич С.Ю., Бакиит Е.Х.

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия

Перспективность использования ускорителей электронов с выводом пучка в атмосферу уже неоднократно продемонстрирована [1–3]. В ряде работ показано [4, 5], что при прохождении пучка через фольгу и слой воздуха атмосферного давления происходит расширение энергетического спектра электронного пучка. Широкий энергетический спектр пучка в атмосфере позволяет проводить более эффективную модификацию (полимеризацию) поверхностного слоя и может быть полезен в ряде применений, например, полимеризация лаковых покрытий [6, 7]. Целью настоящей работы являлось измерение суммарного энергетического спектра электронного пучка, выведенного в атмосферу, используя широкоапертурный ускоритель электронов с сеточным плазменным катодом на основе дугового разряда низкого давления, с учетом изменения ускоряющего напряжения на высоковольтной конденсаторной батарее в течение импульса тока пучка.

Эксперименты проводились на экспериментальном стенде [8]. Измерение энергетического спектра электронного пучка, выведенного в атмосферу, осуществлялось, так называемым, методом фольг [4]. На расстоянии 15 мм от выводного фольгового окна ускорителя располагался экранированный коллектор диаметром 65 мм, фиксирующий часть тока пучка, выведенного в атмосферу. Конструкция такого коллектора включала в себя набор алюминиевых фольг, толщина каждой из которых была около 9 мкм. Таким образом, были сняты кривые ослабления тока пучка в зависимости от толщины фольги, с помощью которых строились соответствующие спектры (Рис. 1). Путем сложения спектров при разном ускоряющем напряжении был получен суммарный энергетический спектр (Рис. 2).

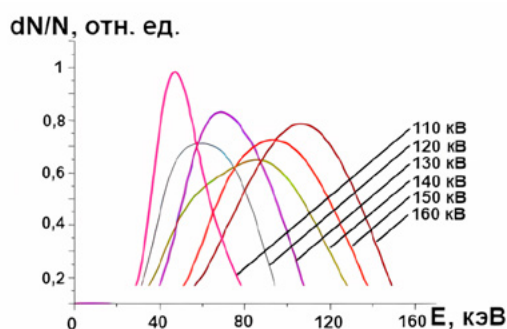


Рис. 1 – Энергетические спектры электронного пучка, выведенного в атмосферу при различных ускоряющих напряжениях

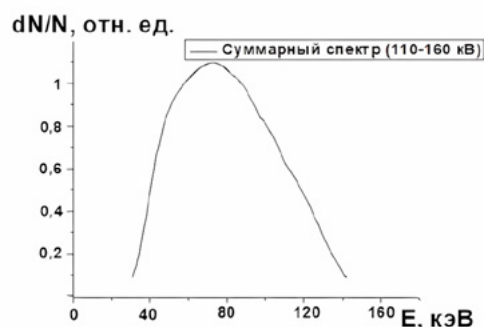


Рис. 2 – суммарный энергетический спектр при изменении ускоряющего напряжения за длительность импульса тока пучка с 160 кВ до 110 кВ

При использовании метода регуляризации Тихонова была решена задача восстановления энергетического спектра импульсно-периодического электронного пучка, выведенного в атмосферу через тонкую металлическую фольгу, используя ускоритель электронов с сеточным плазменным катодом. Показано, что за счет изменения ускоряющего напряжения в течение импульса тока пучка возможно контролируемое расширение его энергетического спектра.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (номер: FWRM-2021-0006).

Список литературы

1. Бугаев С.П., Крейнделъ Ю.Е., Щапин П.М. Электронные пучки большого сечения. М.: ЭАИ, 1984. 112 с.
2. Соковнин С.Ю. 2007 Наносекундные ускорители электронов и радиационные технологии на их основе (Екатеринбург, УрО РАН) 224 с.
3. Ростов В.В., Алексеенко П.И., Выходцев П.В., Штейнле А.В., Мазин В.И. и др. 2012 Сибирский медицинский журнал, 27, №1, с. 141–146.
4. Kozyrev A.V., Kozhevnikov V.Yu., Vorobyov M.S., Baksht E.Kh., Burachenko A.G., Koval N.N., Tarasenko V.F.// Laser and Particle Beams, 2015. P.1–10. Cambridge University Press. – 0263-0346/15.
5. Григорьев Ю.В., Степанов А.В. 1982 ПТЭ, 5, с. 124.
6. Burlant W. and Hinsch J., 1965, // J. Polim. Sci. A, No.3, 3587.
7. Абдуллин Е. Н., Чмух В. Н. 1979 // Химия высоких энергий. 13 № 2, с.181.
8. М.С. Воробьев, Н.Н. Коваль, С.А. Сулакшин 2015 // ПТЭ, 58, № 5, с. 112–120.

КОНЦЕПЦИЯ КОМПАКТНОГО УСКОРИТЕЛЯ-ТАНДЕМА С ВАКУУМНОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ

*Колесников Я.А.^{1,2}, Кащеев А.А.¹, Савинов С.С.¹, Сингатулин Ш.Р.^{1,2},
Сингатулина Н.Ш.^{1,2}, Сорокин И.Н.^{1,2}, Таскаев С.Ю.^{1,2}*

¹Институт ядерной физики имени Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

²Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

В Институте ядерной физики СО РАН предложен, создан и эффективно используют электростатический тандемный ускоритель заряженных частиц оригинальной конструкции, названный со временем ускорителем-тандемом с вакуумной изоляцией VITA [1]. Ускоритель обеспечивает получение стационарного моноэнергетического пучка протонов или дейтронов с энергией от 0,1 до 2,3 МэВ и током до 10 мА. Ускоритель используют для многих приложений, включая радиационное тестирование потоком быстрых нейтронов перспективных материалов, представляющее большой исследовательский интерес для разных научных групп [2, 3].

В Институте начаты пионерские работы по созданию компактного источника быстрых нейтронов [4]. Идея состоит в том, чтобы в качестве источника питания для ускорителя использовать каскадный умножитель Кокрофта-Уолтона VITAmín [5] вместо секционированного выпрямителя ускорителя электронов ЭЛВ. Текущий этап работ предполагает высоковольтное тестирование электрической трубы для газо-вакуумного уплотнения умножителя напряжения, пуско-наладочные работы инвертора и трансформатора, проведение исследований по напуску обдирочного газа с земляного потенциала и проведение высоковольтного тестирования каскадного умножителя.

На основе проделанной инженерно-технической работы предложены две концепции компактных генераторов, – один для генерации нейтронов эпитеплового диапазона с высоковольтным потенциалом 1,135 МВ (энергия 2,3 МэВ) и током протонного пучка 8 мА для применения в БНЗТ, второй для генерации быстрых нейтронов с высоковольтным потенциалом 0,5 МВ (энергия 1,03 МэВ) и током протонного пучка 5 мА. В работе представлены результаты испытаний каскадного умножителя, представлены концепции компактного генератора быстрых нейтронов и компактного ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-72-30005).

Список литературы

1. С.Ю. Таскаев. Ускорительный источник нейтронов VITA. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2024.
2. Д.А. Касатов и др. Источник быстрых нейтронов на основе ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией и литиевой мишени. Приборы и техника эксперимента, 2020, № 5, 5-9.

3. I. Kolesnikov et al. Generation of a High-Yield Fast Neutron Flux on the Accelerator Based Neutron Source VITA. 2024 IEEE 25th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM), Altai, Russian Federation, 2024, pp. 960-963.
4. I. Sorokin, S. Taskaev “A new concept of a Vacuum Insulation Tandem Accelerator”, Applied Radiation and Isotopes, vol. 106, pp. 101-103, 2015.
5. A. Kashcheev et al. Concept of Compact Fast Neutron Source VITamin. 2024 IEEE 25th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM), Altai, Russian Federation, 2024, pp. 1280-1283.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД ПЛАЗМЕННОГО УСКОРИТЕЛЯ

Горяинов В.Ю.

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

Стенд плазменного ускорителя в ФТИ им. А.Ф. Иоффе – универсальная установка с обширным диагностическим комплексом, позволяющая автономно решать различные задачи, будь то исследование параметров струи плазменных источников различных модификаций в геометрии и энергетике, или облучение материалов; и активная работа которого не прекращается несколько десятков лет. Экспериментальный стенд (рис. 1) состоит из вакуумной камеры, системы откачки газа, плазменного источника и диагностик. Удобство конструкции позволяет за короткое время без полной откачки вакуумной камеры заменять компоненты эксперимента и энергетiku. Размеры вакуумной камеры объемом 2.5 м³ позволяют без влияния стенок оценивать состояние вытекающей струи. Внутри камеры имеется ряд заменяемых диагностик: давления, скорости, энергии струи. Возможно проведение спектральных измерений, видеосъемки скоростной камеры и тепловизионной съемки через окна.

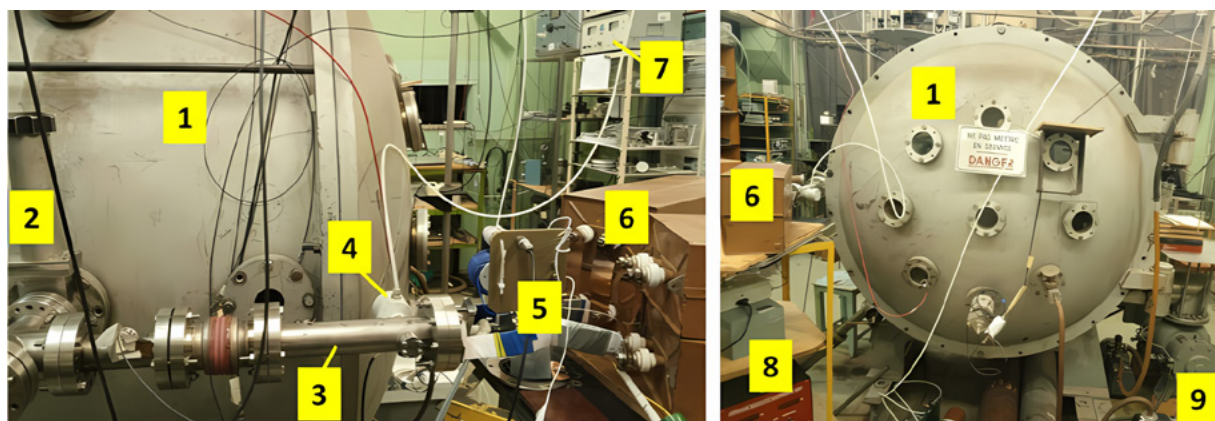


Рис. 1 Внешний вид стенда плазменного ускорителя. 1 – вакуумная камера, 2 – затвор, 3 – внешний электрод, 4 – клапан, 5 – запуск и коммутатор тока, 6 – емкостные накопители, 7 – вакуумметр ВИТ-3 ламповый, 8 – зарядный блок, 9 – турбомолекулярный насос.

Основная задача исследований состоит в эффективной подаче вещества-топлива в токамак и поддержания тока. Для этого требуется формирование плазменной струи, свободной от примесей, с высокими плотностью, скоростью, достаточными для ее прохождения через магнитное поле токамака (до 1 Тл). С этой целью был разработан и модернизирован коаксиальный ускоритель с улучшенными значениями давления и энергии струи, плотностью 10^{15} см⁻³, скоростью свыше 100 км/с [1]. Ускоритель представляет собой коаксиальный плазменный рельсотрон с системами питания, подачи газа и управления. Диаметр наружного электрода составлял 48 мм, длина 250 мм. Напряжение на электродах для емкости 200 мкФ можно варьировать от 3 до 5 кВ, ток разряда может достигать 120 кА, длительность импульса ~ 30 мкс. Использование стенда позволяет без взаимодействия с токамаком проводить тестовые испытания плазменного ускорителя после каждой модификации и находить наиболее подходящие режимы работы.

Результатом стало успешное применение ускорителя в качестве инжектора плазмы в токамак, в том числе на плато тока. Большинство испытаний проводилось на установке Глобус-М/М2 с маг-

нитными полями до 0.8 Тл. Инжекция струи на периферию плазменного шнура позволила измерить электронную температуру и профиль q [2]. Подача плазмы на старте тока позволяла улучшать пробы, что было выполнено на Глобус-М2 и КТМ. В настоящее время планируется использование плазменной пушки в качестве источника микрочелюстей бора.

Параметры струи ускорителя позволяют имитировать плазменные нагрузки токамака на материалы стенки реактора. Энергия потока струи > 0.1 МДж/м². Неограниченная повторяемость импульсов позволяет рассматривать воздействие широкого диапазона потока плазмы на облучаемые материалы. За время функционирования установки проводились многочисленные испытания по облучению вольфрама, молибдена и др. металлов, а также пьезокерамики.

Работа выполнена на УНУ «Сферический токамак Глобус-М», входящей в состав ФЦКП «Материаловедение и диагностика в передовых технологиях» при поддержке гранта РНФ №24-19-00716. Эксплуатация ускорителя плазмы обеспечивается в рамках государственного задания ФТИ им. А.Ф. Иоффе (тема FFUG-2024-0028). Стенд с диагностическим комплексом поддерживается Министерством науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания в сфере науки по проекту № FSEG-2024-0005.

Список литературы

1. А.В. Воронин, В.Ю. Горяинов, В.К. Гусев, ЖТФ – 2020 – т. 90, п. 6 - с. 1028-34, doi:10.21883/JTF.2020.06.49294.372-19.
2. A.V. Voronin, B.B. Ayushin, V.K. Gusev, G.S. Kurskiev, M.M. Kochergin, E.E. Mukhin, V.B. Minaev, I.V. Miroshnikov, Yu.V. Petrov, M.I. Patrov, N.V. Sakharov, S.Yu. Tolstyakov, A.V. Zabuga, 36th EPS Conference on Plasma Phys. Sofia, June 29 - July 3, 2009 ECA Vol. 33E, P-5.157 (2009).

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ УСКОРИТЕЛЯ-ТАНДЕМА С ВАКУУМНОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ

Таскаев С.Ю., Быков Т.А., Колесников Я.А., Кошкарев А.М., Остреинов Г.М., Савинов С.С., Щудло И.М.

Институт ядерной физики имени Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

Перспективной методикой лечения злокачественных опухолей рассматривается бор-нейтронозахватная терапия (БНЗТ), обеспечивающая избирательное уничтожение клеток опухоли. Для этой методики необходимы мощные компактные источники нейтронов эпитеплового диапазона энергий.

В Институте ядерной физики СО РАН предложен, создан и эффективно используется ускорительный источник нейтронов VITA [1], включающий в себя электростатический тандемный ускоритель заряженных частиц оригинальной конструкции, названный со временем ускорителем-танемом с вакуумной изоляцией VITA, оригинальную тонкую литиевую и ряд систем формирования пучка нейтронов. Ускоритель используют для получения стационарного моноэнергетичного пучка протонов или дейтронов с энергией от 0,1 до 2,3 МэВ, током до 10 мА. На выходе из ускорителя пучок протонов имеет поперечный размер 10 ± 1 мм, угловую расходимость – от $\pm 0,5$ мрад до $\pm 1,2$ мрад, нормализованный эмиттанс – 0,2 мм мрад [2]. Такой слабо расходящийся пучок протонов позволяет транспортировать его до литиевой мишени без применения фокусирующих линз. Единственным существенным недостатком следует признать нагрев неохлаждаемой диафрагмы первого ускоряющего электрода.

В следующих двух ускорительных источниках нейтронов, поставленных в БНЗТ клинику г. Сямынь (Китай) и в НМИЦ онкологии им. Н.Н. Блохина Минздрава России в Москве добавлено предускорение. Его использование приводит к увеличению энергии протонов на 100 кВ и позволяет уменьшить нагрев неохлаждаемых диафрагм ускорителя из-за меньшего размера пучка ионов. Однако качество получаемого пучка протонов ухудшилось: он стал больше в размере (15-20 мм), его расходимость стала больше ($\pm 3-4$ мрад) и он стал неоднородным. Для транспортировки пучка протонов до литиевой мишени требуются средства фокусировки. Также усложняет установку само использование предускорения – требуются высоковольтная платформа и развязывающий трансформатор.

Принципиальным предложением по усовершенствованию ускорителя является замедление инжектируемого в ускоритель ионного пучка. Этого можно добиться, изолировав входную диафрагму

ускорителя и подав на нее отрицательный потенциал. Поскольку подаваемое напряжение составляет десятки киловольт, то, как представляется, больших трудностей в реализации такого предложения не возникнет. В работе представляются результаты численного моделирования транспортировки и ускорения пучка ионов, демонстрирующих возможность получения слаборасходящегося вплоть до параллельного пучка протонов при уменьшении нагрева неохлаждаемых диафрагм ускорителя. Также в докладе будут представлены технические решения, позволяющей реализовать эту идею, на защиту интеллектуальных прав на которую подана заявка на патент.

Список литературы

1. С.Ю. Таскаев. Ускорительный источник нейтронов VITA. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2024.
2. М.И. Бикчурина, Т.А. Быков, Я.А. Колесников и др. Измерение фазового портрета пучка ионов в ускорителе-тандеме с вакуумной изоляцией. Приборы и техника эксперимента, 2022, № 4, стр. 18-29.

УСКОРИТЕЛЬ ЭЛЕКТРОНОВ НА ОСНОВЕ НЕСАМОСТОЯТЕЛЬНОГО ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА С ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКИМ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫМ РАЗРЯДОМ

Дорошкевич С.Ю., Воробьёв М.С., Коваль Н.Н., Гришков А.А., Торба М.С.

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия

Одним из типов ускорителей, позволяющих генерировать электронные пучки большого сечения, являются ускорители на основе несамостоятельного высоковольтного тлеющего разряда (ВТР) [1, 2]. Обеспечение коэффициента вывода пучка в атмосферу выше 0,5 в таких системах является непростой задачей и зачастую требует тщательного расчета и моделирования ионно-электронной оптической системы (ИЭОС). При этом стабильная работа таких ускорителей реализуется в узком диапазоне давлений рабочего газа, которое сверху ограничено пробоем ускоряющего промежутка по закону Пашена, а снизу – стабильностью генерации вспомогательного разряда. Поскольку коэффициент вывода тока пучка напрямую зависит от сформированной ИЭОС, то возникает необходимость управления параметрами эмиссионной плазмы с целью достижения высокой эффективности вывода электронного пучка для разных условий его генерации без изменения конфигурации электродной системы. В рамках данной работы проведены исследования по возможности повышения коэффициента вывода электронного пучка из вакуума в атмосферу при переходе к импульсно-периодическому режиму генерации эмиссионной плазмы, когда при одинаковом среднем токе вспомогательного разряда можно управлять его амплитудой, регулируя коэффициент заполнения импульсов [3].

Роль вспомогательного разряда выполняет самостоятельный орбитронный тлеющий разряд с полым катодом и двумя тонкопроволочными анодами. Электропитание вспомогательного разряда осуществляется с помощью источника, который способен работать как в непрерывном, так и импульсно-периодическом режиме работы с частотой f от 1 до 50 кГц с возможностью изменения коэффициента заполнения импульсов D в диапазоне (0,1–0,8), а также позволяющий стабилизировать и управлять средним выходным током I_{dcp} в диапазоне от 10 до 500 мА.

Импульсно-периодический режим с частотой следования импульсов десятки килогерц позволяет снизить величину полного тока в ускоряющем промежутке, что повышает эффективность вывода электронного пучка в атмосферу. Кроме этого, повышение амплитуды тока разряда и наличие паузы между импульсами в диапазоне десятков микросекунд способствует снижению неоднородности распределения эмиссионной плазмы и, соответственно, снижению неоднородности распределения плотности тока выведенного пучка [4].

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (номер: FWRM-2021-0006).

Список литературы

1. Широкоапертурные низкоэнергетичные ускорители электронов АО «НИИЭФА» на основе высоковольтного тлеющего разряда / С. Л. Косоголов, Н. А. Успенский, В. Я. Шведюк [и др.] // Известия вузов. Физика. – 2020. – Т. 63, № 10(754). – С. 41-47. – DOI 10.17223/00213411/63/10/41.

- Advances in electron beam technology for environmental and biotechnological applications at Fraunhofer FEP / T. Teichmann, L. Dincklage, L.L. Schaap and other // Journal of Physics Conference Series 2443(1):012017 – DOI:10.1088/1742-6596/2443/1/012017.
- Эффективный способ генерации и вывода электронного пучка в атмосферу в широкоапертурном ускорителе на основе ионно-электронной эмиссии / С. Ю. Дорошкевич, М. С. Воробьев, М. С. Торба [и др.] // Приборы и техника эксперимента. – 2023. – № 3. – С. 53-60. – DOI 10.31857/S0032816223020052.
- Reduction of Inhomogeneity of the Beam Current Density in the Atmosphere in an Electron Accelerator Based on a Non-Self-Sustained HVGD / S. Yu. Doroshkevich, M. S. Vorobyov, A. A. Grishkov [et al.] // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2023. – Vol. 87, No. S2. – P. S305-S309. – DOI:10.1134/s1062873823704774.

ЛИНЕЙНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ ЭЛЕКТРОНОВ ЛЯП ОИЯИ (ЛИНАК): СТАТУС ПУСКОНАЛАДОЧНЫХ РАБОТ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Ноздрин М.А.¹, Кобец В.В.¹, Акоста М.Э.¹, Афанасьев А.В.¹, Бруква А.Е.¹, Буятов К.С.¹, Гаранжа Н.И.¹, Демин Д.Л.¹, Дятлов А.С.^{1,2}, Журавлев П.П.¹, Надгериева С.Д.¹, Скрыпник А.В.¹, Станкус А.С.¹, Трифонов А.Н.¹, Уланкин А.А.¹, Шабратов В.Г.¹, Шокин Д.С.¹, Юненко К.Е.¹, Глаголев В.В.¹

¹Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия, ²Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

В феврале 2025 г. начались пусконаладочные работы на новой базовой установке Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований – ускорителе ЛИНАК (ранее ЛИНАК-200) [1].

Установка представляет собой линейный ускоритель электронов, оснащённый четырьмя каналами вывода пучка: 24, 60, 130 и 207 МэВ. В каждом из каналов энергия пучка может меняться в широком диапазоне. Таким образом, пользователям может быть предоставлен доступ к пучку электронов с любой энергией в диапазоне от 5 до 207 МэВ.

Длительность импульса может варьироваться в диапазоне от 0,25 до 3 мкс, ток может быть задан в широком диапазоне значений: от 80 мА в импульсе (заряд 240 нКл при длительности 3 мкс) до практически нулевых значений (единичные электроны в импульсе). Максимальная частота повторения импульсов – 25 Гц.

На любом из пользовательских выводов может быть установлен конвертер: вольфрамовый для генерации гамма-излучения или бериллиевый для генерации нейтронов. Схема пользовательского вывода представлена на рисунке.

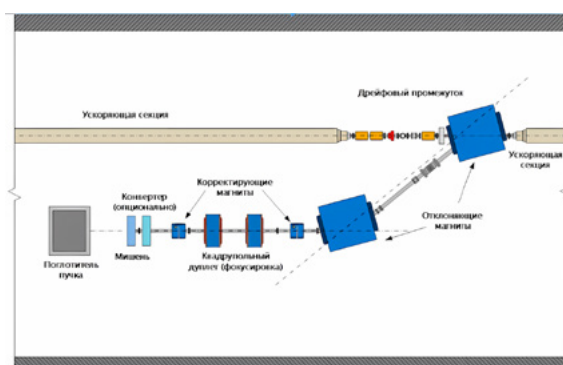


Схема пользовательского вывода

В рамках пусконаладочных работ получен пучок на всех четырёх выводах. К концу 2025 года ожидается запуск ускорителя в опытную эксплуатацию. Параллельно идёт работа по установке следующих секций ускорителя с целью увеличения энергии до 400 и далее 800 МэВ и создания пользовательских выводов на этих энергиях.

Список литературы

- M. Nozdrin et al. Linac-200: a new electron test beam facility at JINR. Proceedings of the 12th International Particle Accelerator Conference (IPAC21), Campinas, Brazil. ISBN: 978-3-95450-214-1. Pp. 2697–2699.

**УСКОРИТЕЛИ
ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ**

ТЯЖЕЛО-ИОННЫЙ СИНХРОТРОННЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ЦЕНТРА РАДИАЦИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ РФЯЦ-ВНИИЭФ

*Тельнов А.В., Грунин А.В., Завьялов Н.В., Крылевский Е.Н., Курапов Н.Н., Лазарев С.А.,
Машагин А.В., Опекунов А.М., Сметанин М.Л., Фильчагин С.В.*

Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики
(РФЯЦ-ВНИИЭФ), г. Саров, Россия

В РФЯЦ-ВНИИЭФ создается испытательный синхротронный комплекс (СКИ) для испытаний радиационной стойкости и отказоустойчивости изделий перспективной электронной компонентной базы (ЭКБ) и радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) космических аппаратов (КА) к воздействию ионизирующих излучений космического пространства [1, 2].

В состав испытательного комплекса входят: синхротронный ускоритель тяжелых заряженных частиц высокой энергии и испытательные установки на базе ускорителя электронов непрерывного действия, генератора нейтронов, закрытых изотопных источников гамма-излучения, многоканального генератора электростатических разрядов. Разрабатываемые установки обеспечат проведение как пофакторных, так и комплексных исследований, и испытаний ЭКБ в режиме on-line и должны работать под управлением автоматизированной системы управления и съема информации.

Проведение комплексных испытаний ЭКБ и РЭА становится возможным в результате реализации в испытуемых изделиях комплекса базовых радиационных эффектов, связанных с ионизацией полупроводниковых и диэлектрических слоев ЭКБ, структурными нарушениями и одиночными событиями, а также с влиянием электризации на функционирование аппаратуры в процессе облучения.

В работе представлены результаты разработки синхротронного ускорителя тяжелых заряженных частиц. Создаваемый синхротронный ускоритель представляет собой комплекс, состоящий из бустерного ускорителя и основного синхротрона. Бустерный ускоритель состоит из двух линейных ионных резонансных ускорителей - инжекторов и синхротрона-бустера. Такая компоновка позволяет реализовать генерацию широкого набора пучков заряженных частиц высоких энергий от ионов водорода (H) до висмута (Bi) с формированием нескольких полей облучения с различной площадью и оперативной перестройкой типа иона в «коктейле». Рассмотрены характеристики испытательных установок комплекса, и также оборудования для обеспечения условий проведения исследований и испытаний и для контроля характеристик ЭКБ.

Список литературы

1. Модель космоса: Научно-информационное издание: в 2 т./ Под ред. проф. М.И. Панасюка и проф. Л.С. Новикова. т.1 Физические условия в космическом пространстве.- М.:КДУ,2007.-872 с.
2. Завьялов Н.В. Исследовательские установки РФЯЦ-ВНИИЭФ для экспериментального получения фундаментальных и прикладных знаний в области ядерной, радиационной физики и физики быстропротекающих процессов // Успехи физических наук. 2021 г., т. 191, № 9.

СИСТЕМА ВЫВОДА УСКОРЕННЫХ ПУЧКОВ ИОНОВ С ГЛУБОКОЙ ВАРИАЦИЕЙ ПО ЭНЕРГИИ ИЗ ЦИКЛОТРОНА У400Р

Иваненко И.А., Гикал К.Б., Гульбекян Г.Г., Казаринов Н.Ю.

Объединённый институт ядерных исследований, Дубна, Россия

В ЛЯР ОИЯИ после запуска ускорительного комплекса ДЦ-280 возобновлена подготовка к реконструкции циклотрона У400 в У400Р. Новый ускоритель У400Р будет обладать более широкими функциональными возможностями, позволяя ускорять пучки ионов с отношением массы к заряду $A/Z = 4 - 12$ с интенсивностью до 2.5 pmkA [1]. При этом будет обеспечена глубокая вариация по энергии в пределах 0.8 – 27 МэВ/нуклон за счет изменения уровня магнитного поля в диапазоне 0.8 – 1.8 Тл. В таких условиях магнитная жесткость выводимых пучков варьируется в диапазоне 1.2 – 3.2 Тл*м, что накладывает особые требования к системе вывода [2].

Основной системой вывода пучков из циклотрона У400Р является электростатический дефлектор. Четыре магнитных канала обеспечивают фокусировку пучка в процессе вывода. Ожидаемая эффективность вывода дефлектором до 90%. Радиальное положение дефлектора соответствует орбите с равновесным радиусом 1800мм. Угловая протяженность дефлектора определяется секторной структурой магнита и составляет 33°. Ограничивающим фактором в использовании дефлектора является предельно допустимая величина напряженности электрического поля в 100 кВ/см. При более высоких значениях напряженности повышается вероятность возникновения электрических пробоев. Вследствие широкого диапазона значений магнитной жесткости выводимых пучков, дефлектор будет состоять из трех секций, что позволит проводить оперативную подстройку кривизны электродов дефлектора под различные режимы ускорения. Четыре магнитных канала располагаются в областях с сильными радиальными градиентами магнитного поля до 18Тл/м и оказывают фокусирующее воздействие на выводимый из циклотрона пучок.

Предусмотрена вспомогательная система вывода перезарядкой на тонкой графитовой фольге для чего на ускорителе установлены два пробника фольги. Направление вывода перезарядкой соответствует направлению вывода дефлектором с дополнительной корректировкой угла входа в линию транспортировки посредством корректирующего магнита с полем до 6кГс. Вывод перезарядкой будет использован прежде всего в процессе пуско-наладочных работ для упрощения ввода ускорителя в эксплуатацию. Кроме того, вывод перезарядкой будет использован в тех режимах ускорения, для которых необходимый уровень напряженности электрического поля дефлектора будет превышать допустимые 100кВ/см.

Список литературы

1. G.G. Gulbekyan, at al., Development of FLNR heavy ions accelerator complex (DRIBsIII) // In: Proceedings of the 21 Conference on Cyclotrons and Their Applications, 11 – 16 September 2016, Zurich, Switzerland p.p. 278-280.
2. Yu.Ts. Oganessian, at. al., Modernization of U400 cyclotron at FLNR JINR // In: Proceedings of the 3 Asia Particle Accelerator Conference, 2004, Korea, p.p. 79-81.

ВЫВОД УСКОРЕННОГО ПУЧКА ПОЛОЖИТЕЛЬНО ЗАРЯЖЕННЫХ ПРОТОНОВ ИЗ ЦИКЛОТРОНА ЗА СЧЕТ ЧАСТИЧНОГО СБРОСА ЭНЕРГИИ ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ ЧЕРЕЗ ПОГЛОТИТЕЛЬ

Иваненко И.А., Гульбекян Г.Г.

Объединённый институт ядерных исследований, Дубна, Россия

В современных медицинских циклотронах наибольшее распространение получило ускорение пучков отрицательно или положительно заряженных протонов или дейтронов [1]. Отрицательно заряженные ионы выводятся из циклотрона перезарядкой на тонкой фольге, а положительно заряженные ионы посредством электростатического дефлектора. Обе схемы ускорения и вывода обладают как положительными, так и отрицательными качествами.

Вывод отрицательно заряженных протонов или дейтронов посредством перезарядки на тонкой фольге прост в реализации [2]. Однако, для получения отрицательно заряженных протонов или дейтронов как правило используется сложная в реализации система внешней инжекции. А эффект электромагнитной диссоциации электрона в процессе ускорения ограничивает уровень используемых магнитных полей.

Преимущество ускорения положительно заряженных протонов или дейтронов заключается в том, что для их получения используется простой внутренний ионный источник Пеннинга с холодным или накаливаемым катодом. Однако, вывод такого пучка из циклотрона возможен только сложной в реализации системой с электростатическим дефлектором и пассивным или активным фокусирующим элементом.

В работе рассматривается вывод пучка положительно заряженных протонов посредством частичного сброса энергии на поглотителе [3]. Предложенный способ объединяет в себе положительные качества известных схем, такие как простота получения, требования к условиям ускорения и технической реализации системы вывода. При этом вывод может быть осуществлен одновремен-

но в нескольких направлениях, количество которых определяется числом элементов периодически магнитной системы циклотрона. Недостатком такой схемы является значительное увеличение эмиттанса пучка после прохождения поглотителя. В качестве материала поглотителя лучше других подходит доступный, устойчивый к распылению и термическим нагрузкам графит. Толщина графитового поглотителя определяет необходимый уровень потери энергии, а также влияет на параметры выводимого пучка, такие как угловой и энергетический разброс заряженных частиц в пучке. Поглотитель устанавливается в долине на предельном радиусе ускорения. После поглотителя пучок с уменьшенной магнитной жесткостью проходит неполный оборот и выводится из ускорителя под углом, зависящим от величины сброса энергии.

В качестве примера предложен вариант ускорения протонов в трехсекторном циклотроне с уровнем поля 1Тл до энергии 15МэВ и вывода за счет 5% сброса энергии на графитовом поглотителе толщиной 117 мкм.

Список литературы

1. Paul Schmor, Review of Cyclotrons for the Production of Radioactive Isotopes for Medical and Industrial Application // In: Proceedings of the 19 Conference on Cyclotrons and Their Applications, 6 – 10 September 2010, China, p.p. 419-422.
2. G.G. Gulbekyan, O.N. Borisov, V.I. Kazacha, D. Solivaijs, Extraction by Stripping of Heavy Ion Beams From AVF Cyclotrons // In: Proceedings of the 18 Conference on Cyclotrons and Their Applications, 1 – 5 October 2007, Italy, p.p. 308-313.
3. И.А. Иваненко, Г.Г. Гульбекян, Способ вывода ускоренного пучка положительно заряженных частиц из циклотрона//Заявка на изобретение (RU)2024120232.

УСКОРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ЛЯР ОИЯИ

Семин В.А.

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

Обзорный доклад, представляющий текущий статус ускорительного комплекса ЛЯР ОИЯИ и информацию по реализуемым проектам: модернизация циклотрона У-400М (МЦ-400), создание Ускорительного комплекса ДЦ-140, проект У-400Р, а также по другим работам, проводимым Научно-технологическим отделом ускорителей.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЯЖЕЛОИОННЫХ ПУЧКОВ УСКОРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА NICA ОИЯИ В ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

Сливин А.А.¹, Сыресин Е.М.¹, Филатов Г.А.¹, Агапов А.В.¹, Бутенко А.В.¹, Тузиков А.В.¹, Галимов А.Р.¹, Колесников С.Ю.¹, Тюлькин В.И.¹, Тихомиров А.М.¹, Балдин А.А.¹, Харьюзов П.Р.¹, Четвериков С.А.¹, Коровкин Д.С.¹, Сафонов А.Б.¹, Кулевоу Т.В.², Титаренко Ю.Е.², Чумаков А.И.³, Бобровский Д.В.³, Печенкин А.А.³, Соловьев С.А.³, Кубанкин А.С.⁴, Подорожный Д.М.⁵, Ковалев И.М.⁵, Карманов Д.Е.⁵, Ткачев П.Л.⁵

¹Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

²НИЦ «Курчатовский институт» – ИТЭФ, Москва, Россия

³АО «ЭНПО СПЭЛС» и НИЯУ «МИФИ», Москва, Россия

⁴Белгородский государственный университет и ООО «Вакуумные системы и технологии», Белгород, Россия

⁵НИИЯФ им. Д.В. Скобельцына МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

В последние годы исследования воздействия радиации на микроэлектронику и биологические объекты приобрели особую актуальность в связи с растущими потребностями аэрокосмической отрасли, ядерной энергетики и программ по освоению космоса. Эти исследования требуют контролируемых и воспроизводимых радиационных условий, которые могут быть обеспечены ускорителями с пучками тяжёлых ионов в широком диапазоне энергий. Однако такие ускорительные инфраструктуры ограничены в доступности, особенно для междисциплинарных приложений, сочетающих материаловедение, микроэлектронику и космическую радиобиологию.

Ускорительный комплекс NICA (Nuclotron-based Ion Collider fAcility), созданный на базе Лаборатории физики высоких энергий имени В.И. Векслера и А.М. Балдина Объединённого института

ядерных исследований, предназначен для изучения свойств плотной барионной материи. В рамках мегасайенс проекта NICA в течении 2021–2024 годов была основана и развита специализированная инфраструктура для прикладных исследований ARIADNA (Applied Research Infrastructure for Advanced Developments at NICA fAcility), позволяющая проводить экспериментальные работы по оценке радиационной стойкости микроэлектроники и исследованию влияния пучков тяжёлых ионов на биологические объекты. Эти разработки направлены на удовлетворение растущей потребности в исследованиях радиационно-индуцированных отказов электронных систем и оценки рисков для здоровья при длительных космических миссиях.

Настоящая работа посвящена обзору статуса работ по прикладным станциям [1], созданным в составе комплекса NICA, – СОЧИ (Станция Облучения ЧИпов, 3.2 МэВ/нуклон), ИСКРА (Испытательная станция компонентов радиоэлектронной аппаратуры, 150–500 МэВ/нуклон), СИМБО (Станция Исследования Медико-Биологических Объектов, 400–1000 МэВ/нуклон), а также соответствующим каналам транспортировки ионных пучков. Каждая станция предназначена для решения конкретных исследовательских задач: испытания на радиационную стойкость декапсулированных (СОЧИ) и капсулированных (ИСКРА) микросхем, радиобиологические эксперименты для космических программ (СИМБО), а также разработка новых методов диагностики и облучения. Целью данной работы является описание технических возможностей и текущего состояния каждой станции, представление первых результатов по облучению декапсулированных микросхем импульсными пучками тяжёлых ионов низких энергий.

Список литературы

1. A. Slivin et al, «Construction of Stations for Applied Research at the NICA Accelerator Complex», Phys. Part. Nuclei Lett., vol. 19, No. 5, pp. 528–531, 2022.

SRF КРИОМОДУЛЬ ДЛЯ NICA

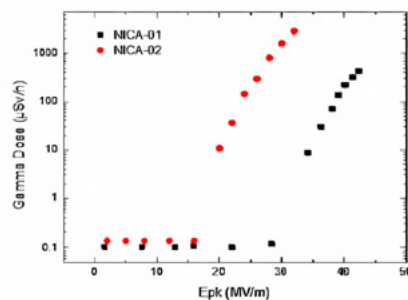
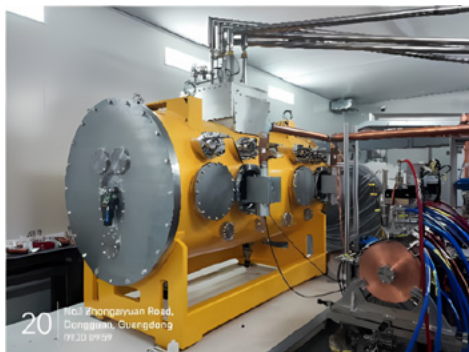
*Teng Tan¹, Yuan He¹, Tiancai Jiang¹, Chunlong Li¹, Qitong Huang², Yuqin Wan¹,
Luozhu Nian¹, Zongheng, Xue¹, Hao Guo¹, Lu Li¹*

¹Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, P.R. China

²Advanced Energy Science and Technology Guangdong Laboratory, Huizhou 529599, P.R. China

В рамках четырехстороннего сотрудничества, возглавляемого Минобрнауки, MOST, JINR и CAS, команда сверхпроводящего линейного ускорителя из Института современной физики (IMP) при CAS вносит значительный вклад в развитие сверхпроводящих радиочастотных ускорителей и применение полостей SRF с низким бета в комплексе инжектора NICA. За последние четыре года исследователи из IMP и JINR тесно сотрудничали, что привело к успешным криогенным испытаниям полостей SRF с низким бета.

Эта презентация погрузится в основные принципы работы SRF-ускорителей и обсудит вопросы проектирования для модернизации комплекса инжекторов NICA. Мы представим оптимизированную конструкцию полостей, процессы производства, обработку поверхностей и результаты радиочастотных испытаний. Примечательно, что две полости, изготовленные на IMP, превысили расчетные ускоряющие градиенты более чем на 50%. Кроме того, прототип криомодуля прошел горизонтальное испытание в ноябре 2024 года, демонстрируя перспективные результаты. Сверхпроводящая ускорительная установка с радиочастотным полем для NICA.



Криомодуль в испытательном bunker и характеристики полостей

МЕСТА ВВОДА-ВЫВОДА ИОННОГО ПУЧКА СИСТЕМЫ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ КОЛЛАЙДЕРА NICA

*Кремнев Н.С.¹, Брызгунов М.И.¹, Бублей А.В.¹, Панасюк В.М.¹, Пархомчук В.В.^{1,2},
Константинов В.М.¹, Рева В.Б.^{1,2}, Посполита С.П.¹, Путьмаков А.А.¹, Шиянков С.В.¹.*

¹Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск, Россия

²Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия

Разработанная в ИЯФ СО РАН высоковольтная система электронного охлаждения (СЭО) коллайдера NICA, первая система, позволяющая осуществить независимое охлаждение двух ионных пучков.

В виду того что СЭО будет установлено на тяжелоионный коллайдер NICA, установка имеет ряд конструктивных особенностей, связанных с конструкцией коллайдера. Так, расстояние между осями пучков каналов охлаждения соответствует расстоянию между пучками коллайдера, что является одним из главных ограничивающих факторов, повлиявших на конструкции магнитных элементов СЭО. Важную роль в конструкции мест ввода-вывода ионного пучка установки электронного охлаждения, так же сыграла последовательность окончательной сборки СЭО на месте монтажа.

В докладе приводится конструкция мест ввода и вывода ионного пучка, системы электронного охлаждения коллайдера NICA, разработанная с учетом предъявляемых ограничений. Описывается новая двухканальная конструкция поворотных соленоидов (тороидов), позволяющих совместить электронный и ионный пучок и примыкающих к ним элементов, необходимых для коррекции положения пучков и согласования магнитных полей соленоидов транспортной системы электронного пучка и участка охлаждения, и служащих заключительными местами сборки участка охлаждения СЭО.

ПОЛУЧЕНИЕ МНОГОКРАТНОЙ ИНЖЕКЦИИ ВЫСОКОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ ОТ ИСТОЧНИКА КРИОН-6Т В БЕСТЕР УСКОРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА НИКА

*Тамашевич Е.С., Левтеров К.А., Головенский Б.В., Манчинский В.А., Мялковский В.В.,
Донец Е.Е., Донец Д.Е., Рамздорф А.Ю., Бойцов А.Ю., Понкин Д.О., Рассадов Д.Н.,
Елкин В.Г., Сыресин Е.М., Лебедев В.А., Бутенко А.В.*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

Для обеспечения работы ускорительного комплекса NICA на проектных параметрах линейный ускоритель тяжелых ионов (ЛУТИ) проходит существенную модернизацию.

Значительные изменения были внесены в системы синхронизации и особенно в систему питания магнитов для обеспечения работы линака на частоте 10 Гц. С этой же целью были модернизированы источники ионов.

Кроме того, все системы диагностики пучка были подключены к единой системе управления, что позволяет операторам комплекса в реальном времени получать параметры пучка в инжекторе. Продолжаются работы по переходу на новую систему LLRF и полноценной интеграции линака в систему АСУ. Кроме того, ведутся работы по установке дополнительных ионных источников, что позволит сократить время простоя при обслуживании ионных источников, а в перспективе даст возможность переключаться между типами ионов в реальном времени.

МОДЕРНИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ СИНХРОНИЗАЦИИ НАЧАЛЬНОЙ ЧАСТИ УСКОРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА NICA С ЦЕЛЬЮ РЕАЛИЗАЦИИ РЕЖИМА МНОГОКРАТНОЙ ИНЖЕКЦИИ

Шириков И.В., Донец Д.Е., Жабин И.Н., Козловский А.А., Красняков А.С., Пешков В.В.

Объединённый институт ядерных исследований, Дубна, Россия

Для повышения интенсивности пучка в ускорителе Бустер комплекса NICA было принято решение о реализации режима многократной инжекции в Бустер. С целью реализации такого режима необходимо было решить ряд задач по модернизации системы синхронизации начальной части ускорительного комплекса:

- Осуществить привязку момента сброса инфлекторных пластин к заданной фазе ускоряющего ВЧ Бустера;
- Осуществить привязку системы вывода ионов из источника КРИОН к заданной фазе ускоряющего ВЧ Бустера;
- Расширить функциональные возможности контроллера и управляющей программы системы синхронизации для более гибкой и точной настройки режимов.

В ходе выполнения поставленных задач проведен анализ структуры и разделение тактовых доменов синхронизации инжекционного комплекса. Необходимо было осуществить привязку импульсов запуска к фазе ускоряющего ВЧ поля Бустера. При этом, часть запускающих импульсов должна была остаться в основном тактовом домене, без привязки.

Также было произведено разделение сигналов запуска компонентов, отвечающих за процессы подготовки, инъекции и экстракции ионов источника КРИОН. Был проведен анализ внутренней системы синхронизации источника КРИОН, система была разделена на инжекционный и экстракционный сегменты, работающие в разных тактовых доменах. Работа проведена с целью получения возможности более точной настройки момента выпуска ионов и синхронизации его с работой инфлекторных пластин.

Осуществлен перевод блоков синхронизации под управление отдельного Головного устройства и создание интерфейса управления данным сегментом системы синхронизации для удобной настройки режимов ускорения и тонкой настройки режима многократной инъекции. Реализованы режимы: генерации серий импульсов, независимого управления каждым сигналом серии, подстройки задержки импульсов запуска, как в тактах основной частоты, так и в тактах обратной частоты ВЧ.

В результате модернизации системы синхронизации был реализован режим ускорения с многократной инъекцией в Бустер в рамках сеанса №1 пуско-наладочных работ комплекса NICA в 2025 году, благодаря чему наблюдалось накопление в кольцевом ускорителе.

ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ КОНТРОЛЛЕРА ГЕНЕРАТОРА ТОКА СИСТЕМЫ ПИТАНИЯ МАГНИТНОЙ ОПТИКИ КАНАЛА ТРАНСПОРТИРОВКИ ПУЧКА НУКЛОТРОН-КОЛЛАЙДЕР

*Пешков В.В., Донец Д.Е., Жабин И.Н., Красняков А.С., Леткин Д.С.,
Спиридонова И.К., Шириков И.В.*

Объединённый институт ядерных исследований, Дубна, Россия

Для реализации системы питания магнитной оптики канала Нуклотрон-коллайдер возникла необходимость в разработке универсального контроллера заряда и параметров источников.

Ключевые задачи:

1. Создание контроллера для управления тремя типами источников питания:
Дипольные магниты: ток до 530 А, напряжение до 2,5 кВ, длительность импульса 180 мс;
Квадрупольные линзы: ток до 250 А, напряжение до 1 кВ, длительность импульса 60 мс;
Корректоры: ток до 200 А, напряжение до 1 кВ, длительность импульса 30 мс;
2. Обеспечение максимального рабочего цикла 4 с и точности поддержания тока 300 ppm на полке импульса.
3. Учет двух вариантов компоновки источников питания в пределах 1 шкафа, при условии общей системы аварий и блокировок.

Реализованные решения:

Был разработан алгоритм точного поддержания тока за счёт управления системой заряда накопительной ёмкости. Манипуляция цепями разрешения заряда позволила с достаточной

точно подстраивать уровень напряжения на полке импульса, не применяя дополнительных коммутирующих устройств.

Благодаря встроенной системе измерения температуры охлаждающей жидкости удалось обеспечить компенсацию температурного дрейфа и тем самым добиться требуемой точности. Применение ПИ-регулятора позволило добиться плавного выхода на рабочий режим.

При проектировании контроллера удалось создать интегральное решение, содержащее интерфейс системы синхронизации комплекса NICA.

В результате разработан универсальный контроллер, обеспечивающий необходимую точность и стабильность тока в импульсных системах питания магнитной оптики канала КТП Н-К.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ ВАКУУМНОЙ СИСТЕМЫ БУСТЕРА NICA В ПОСЛЕДНИХ ПУЧКОВЫХ СЕАНСАХ НА КОМПЛЕКСЕ

Галимов А.Р., Погодин А.А., Свидетелев А.Н., Тюлькин В.И.

Лаборатория физики высоких энергий им. В.И. Векслера и А.М. Балдина
Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна, Московская обл., Россия

Вакуумные объёмы Бустера по требованию к величине и чистоте вакуума условно можно разделить на два типа: а) пучковые камеры и камеры с диагностирующим оборудованием, имеющие высокие требования к чистоте вакуума и рабочее давление в которых порядка 2×10^{-9} Па; б) изоляционные объёмы, имеющие низкие требования к чистоте вакуума и рабочее давление в которых порядка 10^{-5} Па. При этом физически ускоритель разделен на «холодные» и «теплые» зоны. В «холодных» зонах элементы в рабочем состоянии находятся при гелиевых и водородных температурах, в «теплых» - при комнатных.

Для получения требуемого давления были спроектированы системы откачки и разработаны технологические операции для сборки вакуумных объемов.

В ходе последних пучковых сеансов средний вакуум в пучковой камере не превышал значения 8×10^{-9} Па. В изоляционном объеме рабочее давление, измеренное по датчикам на изоляционном объеме, составляло от 10^{-4} до 10^{-6} Па.

Полученные значения позволили достигнуть стабильной работы как магнитно-криостатной системы ускорителя, так и получить достаточное для ускорения время жизни пучка.

РЕАЛИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ СТАНЦИЕЙ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЯДЕРНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ НА ВЫВЕДЕННЫХ ПУЧКАХ УСКОРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА NICA НА БАЗЕ АСУ НТО «ОРИЦИКЛ»

*Бушмина Е.А.^{1,2}, Александров В.А.¹, Архипов Е.В.^{1,3,4}, Астахов В.И.¹, Балдин А.А.¹,
Балдина Э.Г.¹, Гусев М.А.³, Клевцова Е.А.¹, Коровкин Д.С.¹, Кухарев В.А.¹, Рубанович И.А.⁴,
Салтовская А.Х.³, Сафонов А.Б.¹, Харьюзов П.Р.¹, Чепурнов А.С.⁴, Четвериков С.А.¹*

¹ОИЯИ, Дубна, Россия, ²НИ ТПУ, Томск, Россия

³ООО «ОРИЦИКЛ», Дубна, Россия, ⁴ООО «Марафон», Москва, Россия

Станция для исследования ядерно-энергетических технологий (СИЯЭТ) на выведенных пучках ускорительного комплекса NICA предназначена для прикладных исследований в области ядерной энергетики (ADS системы). СИЯЭТ представляет собой зону с надежной биологической защитой, системами настройки и контроля выведенных пучков, системами детекторов регистрации вторичных излучений, дистанционного ввода-вывода и позиционирования мишеней и детекторов, комплексом спектрометров для активационного анализа и прочими системами управления и контроля.

Представлена система управления и контроля процессом настройки пучков для прикладных экспериментов, ввода-вывода мишеней, процессом облучения и измерения полей вторичных частиц и излучений, а также процессом сохранения данных, их визуализации и первичного анализа на основе программного комплекса АСУ НТО «ОРИЦИКЛ» [1] для станции СИЯЭТ. Данная система разработана на основе отечественных компонент и является импортонезависимой.

Список литературы

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2025668225 Российской Федерация. Автоматизированная система контроля и управления научно-техническим оборудованием «ОРИЦИКЛ»: №202566721: заявл. 11.07.2025: опубл. / заявитель Общество с ограниченной ответственностью «ОРИЦИКЛ».

К ВОПРОСУ РЕКОМБИНАЦИИ ПУЧКА ИОНОВ С ОХЛАЖДАЮЩИМИ ЭЛЕКТРОНАМИ

Филиппов А.В., Мешков И.Н., Прокофьев Ю.В., Сергеев А.С.

Объединённый институт ядерных исследований, Дубна, Россия

В работе описана методика оценки скорости процесса рекомбинации пучка ионов на электронах пучка в секции электронного охлаждения. На основе экспериментальных данных интенсивности пучка ионов $^{124}\text{Xe}^{26+}$ в Бустере «Комплекса NICA» 1 даётся оценка их скорости рекомбинации на электронах в секции электронного охлаждения Бустера.

Для определения времени радиационной рекомбинации ионов пучка с электронами в секции электронного охлаждения можно использовать следующую методику. Интенсивность пучка $N(t)$ в синхротроне убывает экспоненциально:

$$N(t) = N_0 e^{-t/\tau_{\text{полн.}}}$$

где $\tau_{\text{полн.}}$ — полное время жизни пучка, N_0 — начальная интенсивность

Полное время жизни пучка определяется процессами, включая: рассеяние на остаточном газе ($\tau_{\text{газ}}$), радиационную рекомбинацию с электронами ($\tau_{\text{рек.}}$), например, в секции электронного охлаждения пучка, а также другими процессами (например, внутривпучковое рассеяние, и т. д.). Полное время жизни определяется как:

$$\frac{1}{\tau_{\text{полн.}}} = \frac{1}{\tau_{\text{газ}}} + \frac{1}{\tau_{\text{рек.}}} + \dots$$

Если уже известно (например, измерено при выключенном электронном охлаждении), то можно найти, сравнив время жизни пучка с включённым и выключенным электронным охлаждением.

Список литературы

1. Технический проект объекта «Комплекс NICA» / В. Д. Кекелидзе и др.; под ред. В. Д. Кекелидзе и Ю. К. Потребеникова. — Дубна.: Изд. отд. ОИЯИ, 2018 г. — 90 с.

ШОТТКИ МОНИТОРИНГ НА БУСТЕРЕ

Осипов К.Г., Абед М.А., Тихонов Е.В., Панков Е.А., Утин А.А., Горельщиков И.В.

Объединённый институт ядерных исследований, Дубна, Россия

Одной из важных подсистем разрабатываемой в настоящее время системы стохастического охлаждения коллайдера НИКА является система диагностики дробового шума пучка (Шоттки-шума), для отработки элементов которой используется прототип, установленный в тёплой секции бустера. В ходе текущего сеанса были проведены следующие работы с данным прототипом: 1. Изготовлен и смонтирован $\Delta\Sigma$ – Пикап. 2. Изготовлены и измерены $\Delta\Sigma$ гибриды. Отработана технология изготовления многослойных СВЧ плат-микросборок. Отработана технология группового заказа многослойных СВЧ-компонентов. 3. Изготовлены и настроены СВЧ МШУ и Фильтры. Проведены измерения. Отработана технология ускоренного прототипирования СВЧ-компонентов. 4. Проведен анализ и разработка алгоритмов цифровой обработки Шоттки-сигналов. 5. Проведена настройка SDR-приёмника LimeSDR. Разработана программа онлайн-мониторинга на основе GNU-радио. Проанализированы достоинства/недостатки использования GNU-радио. Выбрана платформа для дальнейшей разработки. 6. Записаны Шоттки сигналы в различных режимах работы.

ВОЗМОЖНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ АСУ НТО «ОРИЦИКЛ» ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ УСКОРЯЕМЫХ И ВЫВЕДЕННЫХ ПУЧКОВ УСКОРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА NICA

Архипов Е.В.^{1,3,4}, Александров В.А.¹, Астахов В.И.¹, Балдин А.А.¹, Балдина Э.Г.¹, Бушмина Е.А.^{1,2}, Гусев М.А.³, Клевцова Е.А.¹, Коровкин Д.С.¹, Рубанович И.А.⁴, Салтовская А.Х.³, Сафонов А.Б.¹, Харьюзов П.Р.¹, Чепурнов А.С.⁴, Четвериков С.А.¹

¹Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

²Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия

³ООО «ОРИЦИКЛ», Дубна, Россия

⁴ООО «Марафон», Москва, Россия

Программный комплекс АСУ НТО «ОРИЦИКЛ» (Автоматизированная система контроля и управления научно-техническим оборудованием «ОРИЦИКЛ») [1] предназначен для создания автоматизированных систем контроля и управления экспериментальными установками, работающими на пучках ускорителей заряженных частиц, а также автоматизированных систем управления ускорительными комплексами и их элементами. Основной особенностью данного ПК является контроль элементов экспериментальных установок в режиме реального времени, включая детекторы, электронику считывания, мишенные станции.

На данный момент активно вводится в эксплуатацию ускорительный комплекс NICA, где задействовано более тысячи детекторов. Необходимость одновременно контролировать большое количество разнородных параметров существенно усложняет эффективное управление такими системами, поэтому разработка интегрированной среды управления на основе АСУ НТО «ОРИЦИКЛ» радикально решает проблемы настройки и поддержания режимов работы ускорительного комплекса.

В данной работе рассмотрено применение АСУ НТО «ОРИЦИКЛ» для одновременного контроля параметров ускоряемых (циркулирующих) и выведенных пучков ускорительного комплекса NICA в режиме реального времени с помощью профилометров Бустера и Нуклотрона на основе МКП и с помощью ионизационных камер, расположенных на каналах перевода пучков Нуклотрон-Коллайдер NICA.

Список литературы

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2025668225 Российская Федерация. Автоматизированная система контроля и управления научно-техническим оборудованием «ОРИЦИКЛ»: №2025667213: заявл. 11.07.2025: опубл. / заявитель Общество с ограниченной ответственностью «ОРИЦИКЛ».

ИОНИЗАЦИОННЫЙ МОНИТОР ПРОФИЛЯ ДЛЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕЙ ДИАГНОСТИКИ УСКОРЕННЫХ ПУЧКОВ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ

Исатов А.Т.^{1,2,3}, Тетерев Ю.Г.¹, Крылов А.И.¹, Митрофанов С.В.¹, Тимошенко К.Д.^{1,4}

¹Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

²Евразийский национальный университет им Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

³Институт ядерной физики, Алматы, Казахстан

⁴Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия

Разработан и изготовлен монитор ИРМ для измерения детального профиля пучка. Монитор разработан в процессе модернизации конструкции, работающей на принципе сканирования электрического поля. Монитор также состоит из экстрактора, сканера и двух электростатических анализаторов. Разработана и изготовлена система управления монитором и обработки информации с него. В результате проверки работоспособности изготовленного монитора ИРМ установлено, что с его помощью возможно детальное измерение профилей широких пучков с разрешением $1,5 \times 1,5$ мм². Установлено, что минимальная чувствительность монитора для пучка ионов ксенона энергией 1,2 МэВ/нуклон и давлении остаточного газа в блоке диагностики $5 \cdot 10^{-4}$ Па составляет $n \cdot 10^3$ частиц/

см². Монитор пригоден для контроля как при создании однородного распределения профиля пучка, также как и для постоянного наблюдения за изменениями однородности в процессе экспозиции. Разработаны мониторы детального профиля пучка диаметром 45 мм для установки по исследованию в области радиационной биологии и пучка диаметром 60 мм для установок по изучению радиационных эффектов радиоэлектронной аппаратуры.

ЭЛЕКТРОННОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ НА НИЗКУЮ И ВЫСОКУЮ ЭНЕРГИИ В ПРОЕКТЕ NICA: РАЗРАБОТКА, ТЕСТИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Брызгунов М.И.¹, Рева В.Б.¹, Пархомчук В.В.¹, Бублей А.В.¹, Уразов Э.Р.¹, Панасюк В.М.¹, Гончаров А.Д.¹, Денисов А.П.¹, Петрожитский А.В.¹, Кремнев В.И.¹, Кремнев Н.С.¹, Путьмаков А.А.¹, Скоробогатов Д.Н.¹, Сеньков Д.В.¹, Гусев И.А.¹, Беликов О.В.¹, Чекавинский В.А.¹, Горчаков К.М.¹, Карпов Г.Б.¹, Бехтенов Е.А.¹, Пурескин Д.Н.¹, Павленко А.В.¹, Жаринов А.А.¹, Батраков А.М.¹, Штро К.С.¹, Кондауров М.Н.¹, Иванов А.В.¹, Востриков В.А.¹, Блинов М.Ф.¹, Бахарев П.А.¹, Турло В.С.¹, Лебедев В.А.², Сергеев А.С.², Мешков И.Н.², Сыресин Е.М.², Сидорин А.О.², Прокофьев Ю.В.², Николайчук И.Ю.², Смирнов В.Л.², Харьюзов П.Р.², Семенов С.В.², Тимонин Р.В.²

¹Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

²Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

В рамках работ по строительству ускорительного комплекса NICA (ОИЯИ, г. Дубна) в ИЯФ СО РАН ведется разработка высоковольтной системы электронного охлаждения (СЭО) на энергию до 2.5 МэВ, предназначенной для накопления тяжелых ионов в Коллайдере и компенсации роста эмиттансов и разброса импульсов из-за внутripучкового рассеяния. После изготовления, для большей части оборудования проводятся испытания, в рамках которых проверяется механическая сборка и соответствие требуемым параметрам.

В Бустере комплекса NICA уже сейчас работает (также разработанная в ИЯФ СО РАН) низковольтная СЭО на энергию до 50 кэВ, предназначенная как для охлаждения пучка ионов на энергии инъекции, так и на некоторой промежуточной энергии при подготовки пучка к ускорению и перепуску в Нуклотрон. Данная система уже использовалась в нескольких сеансах работы комплекса для охлаждения пучка ионов на энергии инъекции. В настоящее время ведутся работы по настройке накопления ионов в Бустере при многократной инъекции с электронным охлаждением.

В данной работе описаны результаты испытаний различных элементов и подсистем высоковольтной СЭО и результаты экспериментов с низковольтным электронным охлаждением на Бустере NICA.

ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЕ РЕШЕНИЯ ПО ОПТИМИЗАЦИИ РАБОТЫ УСКОРЯЮЩИХ ВЧ СИСТЕМ БУСТЕРА В ХОДЕ ПЕРВОГО СЕАНСА НА КОМПЛЕКСЕ NICA

Володин А.А.¹, Бровко О.И.¹, Ганюшкин Ф.Н.¹, Лебедев В.А.¹, Троицкий А.А.¹, Сенченко А.И.², Стюф А.С.², Фаткин Г.А.², Яминов К.Р.²

¹Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

²Козилаб Сибирь, Новосибирск, Россия

Эксперименты на встречных пучках в коллайдере требуют повышения интенсивности на выходе Нуклотрона. Для этого необходимо оптимизировать работу многих систем инжекционного комплекса и в том числе уменьшить потери, связанные с ускоряющими ВЧ-системами [1]. Опыт предыдущих сеансов и его анализ позволил выбрать основные направления при разработке программно-аппаратного комплекса по увеличению эффективности захвата и ускорения ионов [2]. Этими направлениями стали: недопущение роста продольного эмиттанса при инъекции и ускорении и минимизация потерь ионов как в начале ускорения, так и на последующих этапах.

Для выполнения поставленных задач было решено разработать программно-аппаратный комплекс ранее не существовавший, без которого настройка ускорения была неэффективной и отнимала значительное время на подбор параметров. Основными функциональными узлами системы по оптимизации работы ВЧ-систем являются:

- (1) система взаимного согласования амплитуды ускоряющего напряжения и темпа роста магнитного поля;
- (2) система мониторинга синхротронных колебаний;
- (3) система определения частоты обращения ионного пучка на поле инжекции;
- (4) система LLRF, генерирующая ВЧ-опорный сигнал и реализующая различные сценарии работы ускоряющих станций.

Список литературы

1. О.И. Бровко, А.А. Володин, Г. Фатькин, В. А. Лебедев, Е.М. Сыресин, А.О. Сидорин, «Работа ВЧ-систем в ходе совместных сеансов бустера и нуклотрона», DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-2-71-79, Сибирский Физический Журнал.
2. А.В. Бутенко, О.И. Бровко, А.Р. Галимов, Е.В. Горбачев, С.А. Костромин, В.Н. Карпинский, И.Н. Мешков, В.А. Мончинский, А.О. Сидорин, Е.М. Сыресин, Г.В. Трубников, А.В. Тузиков, А.В. Филиппов, Г.Г. Ходжибагиян, «Бустер комплекса NICA: сверхпроводящий синхротрон нового поколения», DOI: 10.3367/UFNr.2021.12.039138.

СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ МОДУЛЕЙ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ КВАДРУПОЛЬНЫХ МАГНИТОВ АРОК КОЛЛАЙДЕРА NICA

*Донгузов И.И., Борисов В.В., Голубицкий О.М., Золотых Д.А.,
Костромин С.А., Никифоров Д.Н., Шандов М.М.*

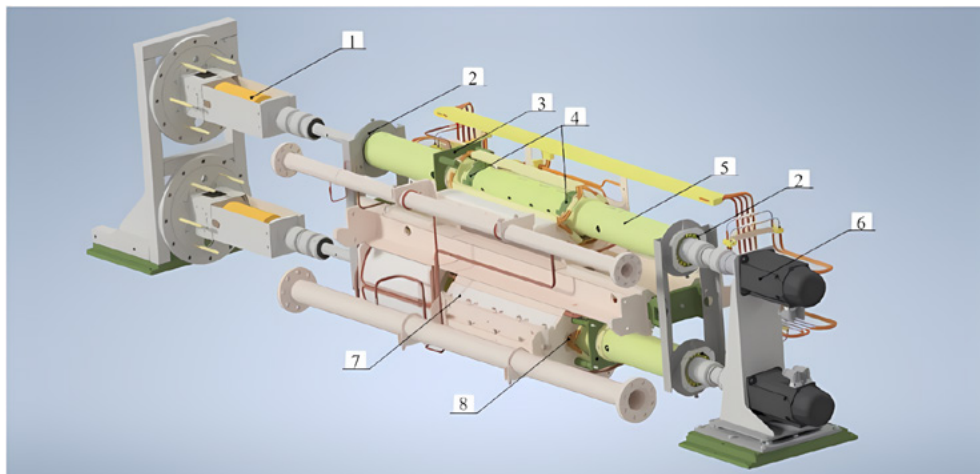
Объединённый институт ядерных исследований, Дубна, Россия

Основу магнитооптической структуры арок коллайдера NICA [1] составляют двухапертурные сверхпроводящие дипольные и квадрупольные магниты, а также мультипольные корректирующие магниты (МПК). Квадрупольные и мультипольные корректирующие магниты объединены в модули [2], сборка и испытания которых выполнены в научно-экспериментальном отделе сверхпроводящих магнитов и технологий в Лаборатории физики высоких энергий им. В. И. Векслера и А. М. Балдина Объединённого института ядерных исследований.

Измерение параметров магнитного поля один из важнейших этапов производства сверхпроводящих магнитов. Технология производства включает «тёплые» (при температуре окружающей среды) и «холодные» (при температуре 4.5 К) магнитные измерения. Данные измерения позволяют контролировать качество сборки и выходные параметры магнита, которые используются в дальнейшем при позиционировании магнитов на проектную замкнутую орбиту коллайдера NICA и расчёте динамической апертуры.

В каждом модуле за один сеанс охлаждения измеряются следующие параметры: градиент магнитного поля (G) в центре магнита [Тл/м]; интеграл градиента магнитного поля ($\int G dl$) [Тл]; относительные интегральные гармоники поля до 10-й включительно; параметры поля каждой корректирующей сверхпроводящей обмотки в МПК.

Для проведения магнитных измерений выбран метод гармонических катушек [3]. Основной измерительный элемент магнитометра – массив из пяти гармонических катушек, выполненный по технологии многослойных печатных плат. Печатная плата состоит из 20 слоёв, в каждом из которых содержится 20 витков.



Общий вид магнитометрической системы: 1 – токосъёмник, 2 – внешние опоры, 3 – упорная планка, 4 – внутренние опоры, 5 – магнитометр, 6 – servomotor, 7 – железное ярмо, 8 – сверхпроводящая обмотка.

Магнитометр с катушками базируется в ярме магнита на поверхности полюсов во внутренних опорах скольжения (поз. 4). Вкладыши подшипника изготовлены из политетрафторэтилена (PTFE [4]). Позиционирование магнитометра от продольного смещения осуществляется с помощью планок (поз. 3), монтируемых на ярме магнита со специальными упорами. На швеллер магнита монтируется специальная конструкция с внешними регулируемыми самоцентрирующимися опорами качения (поз. 2).

Для вращения и точного углового позиционирования магнитометров во время измерений используется сервоприводы (поз. 6). С помощью специальных токосъёмников (поз. 1) осуществляется передача сигналов с разъёма на магнитометре [7] на выходной стационарный разъём. Распределение магнитного поля измеряется по 64 точкам.

Выполнены серийные измерения 46 модулей квадрупольных магнитов. Для оценки параметров измеренных магнитов и выпуска сводного протокола, проведена относительная калибровка геометрического коэффициента чувствительности катушек к величине магнитного поля на основании обобщенной статистики измеренных данных. Представленные результаты измерений [8] являются приведенными по отношению к одному из шести магнитометров.

Список литературы

1. Technical Project of NICA Acceleration Complex (Dubna, 2015).
2. Khodzhibagiyan H. G. et al. «Superconducting Magnets for NICA Accelerator-Collider Complex» // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2014. V. 3.
3. V. Borisov, D. Zolotikh et al., «Serial magnetic measurements of the NICA Collider Twin-Aperture Dipoles. The Main Results», in Proc. XXVII Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC-2021), Scientific Council of RAS on Charged Particle Accelerators, Joint institute for nuclear research, Alushta, Russia Sept. – Oct. 2021, pp 383-385 doi:10.18429/JACoW-RuPAC2021-WEPS18.
4. plastspb.ru.
5. eandc.ru/pdf/snc146.pdf.
6. D. A. Zolotikh, V. V. Borisov, I. I. Donguzov et al., «Serial Magnetic Measurements of the NICA Collider Lattice Quadrupoles» ISSN 0020-4412, Instruments and Experimental Techniques, 2024, Vol. 67, Suppl. 2, pp. S265–S278. © Pleiades Publishing, Ltd., 2024.

ТРАЕКТОРИИ СВЕРХТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ В РАЗЛИЧНЫХ ВАРИАНТАХ КОМПОНОВКИ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ СЕПАРАТОРА GASSOL

Забанов А.С., Гульбежян Г.Г., Казаринов Н.Ю., Соловьев Д.И.

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

В Лаборатории ядерных реакций Объединенного института ядерных исследований идут работы по созданию магнитного газонаполненного сепаратора GASSOL. Установка GASSOL предназначена для изучения химических свойств короткоживущих изотопов сверхтяжелых элементов. Целью данной работы является исследование возможной установки дополнительных магнитных элементов после основного соленоида, что может значительно улучшить фоновые условия в будущих экспериментах. В данной работе приводятся результаты расчетов транспортировки пучка ионов $^{287}\text{Fl}^{6+}$ с энергией $W = 36$ МэВ в нескольких вариантах компоновки: соленоид – соленоид (S-S), соленоид – дипольный магнит (S-D), соленоид – дипольный магнит – дипольный магнит (S-D-D), соленоид – дипольный магнит – соленоид (S-D-S).

**УСТАНОВКИ
СИНХРОТРОННОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ И ЛАЗЕРОВ
НА СВОБОДНЫХ
ЭЛЕКТРОНАХ**

СТРИК-КАМЕРА UNISTREAK КАК ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ ОПТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ПУЧКА В СОВРЕМЕННЫХ УСКОРИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСАХ

*Сметанкин Д.И.¹, Никишин Д.В.¹, И. В. Визитиу², Дорохов В.Л.², Коновалов П.И.¹,
Мешков О.И.², Соколов А.Ю.¹*

¹ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова», Москва, Россия

²Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера» СО РАН, Новосибирск, Россия

Современные ускорительные комплексы, такие как синхротроны, лазеры на свободных электронах и коллайдеры, предъявляют высочайшие требования к системам диагностики пучка. Одним из ключевых измеряемых параметров является продольный профиль сгустка, от которого напрямую зависят стабильность пучка, эффективность ускорения и качество генерируемого излучения. Для решения этой задачи необходимы детекторы с высоким временным разрешением, широким динамическим диапазоном и гибкостью в настройке, способные работать в различных режимах ускорителя.

Стрик-камеры являются одним из наиболее эффективных инструментов для таких измерений, преобразуя временной профиль светового импульса (синхротронного, черенковского или переходного излучения от сгустка) в его пространственное изображение. Однако существующие системы зачастую специализированы под узкий диапазон временных шкал или требуют сложной перенастройки, что ограничивает спектр их применения.

В докладе представлена разработанная во ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова» универсальная стрик-камера Unistreak. Её ключевые преимущества для задач ускорительной техники:

- широкий диапазон времен регистрации: применение двухкаскадного модуля разверток оригинальной конструкции позволяет регистрировать процессы длительностью от сотен пикосекунд до десятков микросекунд без смены блоков, что идеально подходит для измерения как коротких одиночных сгустков, так и длинных последовательностей сгустков частиц;
- высокий динамический диапазон: использование металлокерамического электронно-оптического преобразователя (ЭОП) нового поколения ST3001 [1] производства ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова» обеспечивает динамический диапазон регистрации около 3.5 порядков для импульса лазерного излучения с длительностью 500 пс и длиной волны 532 нм, что позволяет одновременно измерять интенсивное ядро сгустка и его слабое гало;
- полное дистанционное управление: реализация удаленного управления всеми параметрами стрик-камеры через универсальный протокол позволяет интегрировать стрик-камеру в общую систему управления научным оборудованием ускорителя.



Стрик-камера Unistreak производства ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова»

В рамках работы были проведены всесторонние лабораторные исследования характеристик стрик-камеры Unistreak, включая калибровку временных разверток, измерение их линейности и определение динамического диапазона для различных длительностей входного излучения. Показано, что характеристики Unistreak не уступают лучшим зарубежным аналогам.

Продemonстрированы результаты применения стрик-камеры Unistreak для прямых измерений параметров пучка на линейном ускорителе - инжекторе Сибирского кольцевого источника фотонов (ЦКП «СКИФ») [2]. В ходе эксперимента были успешно зарегистрированы и проанализированы продольные профили электронных сгустков. Полученные результаты демонстрируют высокий потенциал прибора как универсального и надежного инструмента для систем диагностики современных ускорительных комплексов.

Список литературы

1. Sokolov A.Yu. et al. Streak Tubes for Diagnostics of Lasers and Plasmas // Journal of Physics: Conference Series, 2016, Vol. 747, № 1. DOI:10.1088/1742-6596/747/1/012067.
2. A. Andrianov, M. Arsenyeva, A. Barnyakov, D. Chekmenev, A. Levichev, O. Meshkov, et al., "Development of 200 MeV Linac for the SKIF light source injector", J. Instrum., vol. 17, T02009, 2022.

НОВЫЙ ПИКОСЕКУНДНЫЙ ДИССЕКТОР ДЛЯ СИСТЕМ ДИАГНОСТИКИ СИНХРОТРОНА СКИФ: РАЗРАБОТКА И ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

*Соколов А.Ю.¹, Коновалов П.И.¹, Дорохов В.Л.², Куркин Г.Я.²,
Мешков О.И.², Никишин Д.В.¹, Рыбальченко Я.Г.¹*

¹ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова», Москва, Россия

²Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера» СО РАН, Новосибирск, Россия

Появление синхротронных источников излучения поколения «4+», к которым относится Сибирский кольцевой источник фотонов (СКИФ), требует качественно нового уровня временного разрешения диагностических систем. Одним из ключевых приборов для регистрации продольной структуры пучка в режиме реального времени является пикосекундный электронно-оптический диссектор [1, 2]. В последние годы в России применялись ограниченные партии таких приборов, в частности ЛИ-602 [3] и диссекторы ИОФ РАН [4]. Однако первый из них не обеспечивает разрешения лучше 20 пс, чего уже недостаточно для диагностики пучка новых ускорителей [4], а второй существует в единичных экземплярах и подвержен деградации фотокатодов. В связи с этим разработка серийно воспроизводимого пикосекундного диссектора с временным разрешением ниже 8 пс – одна из приоритетных задач в области диагностики ускорителей частиц.

В работе описаны результаты разработки и испытаний пикосекундного диссектора, изготовленного в ФГУП «ВНИИА» по новой технологической схеме, включающей финишную сборку методом переноса фотокатодного узла. Такое конструктивное решение позволяет формировать фотокатод в отдельном вакуумном объеме с последующим его перемещением и герметизацией в корпусе прибора, благодаря чему кардинально снижается загрязнение внутренних элементов прибора и, тем самым улучшается его отношение сигнал/шум, чувствительность и долговечность, повышается стабильность работы и предельное рабочее напряжение ВЭУ.

Применение в диссекторе металлокерамического корпуса обеспечивает высокую электрическую прочность, точность и повторяемость размеров электронно-оптической системы (ЭОС), механическую прочность прибора и стабильность параметров от образца к образцу.

Конструкция прибора основана на ЭОС ST3001 [5], применяющейся в стрик-камерах ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова» [6] и доказавшей свою способность обеспечивать предельное временное разрешение порядка 0,7 пс. В диссекторе, также, как и в ST3001, применен фотокатод конденсаторного типа [7], способный эффективно снижать влияние продольного тока и, соответственно, сохранять фокусирующее поле даже при высокой плотности импульсного фототока, что существенно расширяет динамический диапазон прибора при работе с синхротронным излучением большой мощности.

Результаты измерений демонстрируют, что разработанные макеты диссекторов достигают наилучшего временного разрешения 1,4 пс. Диапазон входной мощности на фотокатод, в пределах которого сохраняется разрешение не хуже 8 пс, достигает нескольких тысяч относительных единиц.

Полученные результаты подтверждают работоспособность разработанного прибора и его пригодность для применения в системах диагностики пучков на ускорителях нового поколения, вклю-

чая СКИФ и ТНК «Зеленоград». Первая партия экспериментальных образцов диссекторов уже изготовлена и передана в ИЯФ СО РАН для оснащения ЦКП «СКИФ».



Экспериментальный образец диссектора ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова»

Список литературы

1. O.I. Meshkov O, A.I. Stirin et al. A new station for optical observation of electron beam parameters at electron storage ring SIBERIA-2 // Journal of Instrumentation. 2016. Vol. 11. № 12. DOI: 10.1088/1748-0221/11/12/P12015.
2. D.A. Malyutin et al. The optical dissector bunch length measurements at the Metrology Light Source // Proceedings of the 6th International Beam Instrumentation Conference, IBIC 2017. p. 125-128.
3. E.I. Zinin et al., Nucl. Instrum. Methods, 208, 439 (1983).
4. Анчуглов О.В., Дорохов В.Л., Куркин Г.Я., Зинин Э.И. Калибровка электронно-оптического пикосекундного диссектора. Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН // АВТО-МЕТРИЯ. 2016. Т. 52, № 3, стр. 108-115.
5. A.Yu. Sokolov et al. Streak Tubes for Diagnostics of Lasers and Plasmas // Journal of Physics: Conference Series. 2016. Vol. 747. № 1. DOI:10.1088/1742-6596/747/1/012067.
6. Д.В. Никишин и др. Универсальная стрик-камера для задач физических измерений // Сборник тезисов II Научно-практической конференции Физико-технические интеллектуальные системы ФТИС-2023. с. 77.
7. Патент № RU185547 Российская Федерация МПК H01J 40/00 (2006.01). Фотокатод для импульсных фотоэлектронных приборов: № 2018130799 : заявл. 20.02.2017 : опубл. 14.12.2018 / Соколов А.Ю., Долотов А.С., Коновалов П.И. и др.; заявитель ФГУП ВНИИА им. Н.Л. Духова. – 14 с.: ил.

УПРАВЛЕНИЕ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫМИ ПРОЦЕССАМИ ПОСРЕДСТВОМ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Карпешин Ф.Ф.¹, Кондратьев В.Н.²

¹Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д.И. Менделеева, Санкт-Петербург, Россия

²Лаборатория теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова Объединенного института ядерных исследований, Дубна, Россия

Современные мощные пучки синхротронного излучения создают богатое поле для физических приложений, направленных на изучение фундаментальных процессов с участием атомных ядер, таких, как стимулированный гамма- и бета-распад, двойной безнейтринный захват атомных электронов, производство изомеров, создание ядерных стандартов частоты, длины и времени следующего поколения, и др.

Рассмотрим захват $2e0\nu L^1L^1$ в ^{78}Kr на уровень $2^+ 2438$ кэВ ^{78}Se . Дефект резонанса $\Delta = 6.87$ кэВ. Эта избыточная энергия может быть передана полю мягкого рентгеновского лазера [1]. Здесь мы хотим обратить внимание, что ускорения распада можно достичь и путем открытия новых каналов, например, $K_L L^1$ и даже $K_L K_L$. Для этого надо уменьшить порог распада путем подкачки энергии в атом из внешнего поля облучения. Эксплоатация этого канала способна поднять скорость распада еще на один-два порядка величины. Таким образом получим, что скорость захвата удваивается уже

при напряженности поля $E = 40 \text{ V/cm}$, or irradiation power of only $P = 2 \text{ W/cm}^2$. Такие мощности выглядят вполне реальными в свете строящихся синхротронных ускорителей СКИФ нового поколения, а также множества действующих гамма- и фотонных фабрик на Западе, европейского Extreme Light Infrastructure (ELI) проекта и др.

Список литературы

1. Kondratyev V. N., Karpeshin F. F. External Radiation Assistance of Neutrinoless Double Electron Capture. Atoms. 2024. V. 12. P. 27. URL: <https://doi.org/10.3390/atoms12050027>.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ САМОЗАТРАВКИ ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ОНДУЛЯТОРНОЙ ЛИНИИ ЛАЗЕРА НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ ЖЕСТКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ДИАПАЗОНА «СИЛА»

Аккуратов В.И., Таргонский А.В.
НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

На экспериментальных станциях лазера на свободных электронах (ЛСЭ) СИЛА предполагается использование жесткого (3–12 кэВ) рентгеновского излучения. Для генерации импульсов жесткого когерентного рентгеновского излучения с высокой спектральной яркостью как правило используется ЛСЭ в режиме самоусиления спонтанного излучения (англ. SASE, Self-Amplified Spontaneous Emission) [1]. Данный подход применяется во многих современных ЛСЭ, например, LCLS, SACLA и EuXFEL.

В докладе представлены результаты моделирования параметров трех основных компонентов системы самозатравки ЛСЭ СИЛА для работы в SASE режиме при помощи открытого программного обеспечения SPECTRA и SIMPLEX [2,3]:

1. ондулятора №1, где происходит генерация рентгеновских импульсов в режиме SASE;
2. монохроматора для рентгеновского излучения, полученного в режиме SASE. Монохроматор позволяет выбирать определенную длину волны из относительно широкого спектра излучения после первого ондулятора. Параллельно с монохроматором используется магнитная шикана, которая обводит электронный пучок вокруг монохроматора и одновременно задерживает его на заданное время;
3. ондулятора №2, «усилителя» для монохроматизированного излучения, в котором это излучение и электронный пучок снова совмещаются для повышения когерентности.

Список литературы

1. Ya.S. Derbenev et al., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Vol. 193, 1982, p. 415-421.
2. T. Tanaka, Journal of Synchrotron Radiation, Vol. 28, 2021, p. 1267-1272.
3. T. Tanaka, Journal of Synchrotron Radiation, Vol. 22, 2015, p. 1319-1326.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ И КОРРЕКЦИИ ЗАМКНУТОЙ ОРБИТЫ В БУСТЕРНОМ СИНХРОТРОНЕ КОМПЛЕКСА СКИ РФЯЦ-ВНИИЭФ

Братишка Е.В., Акифьев А.А., Мусеева П.С., Опекунов А.М., Поляков Л.Е.

Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики (РФЯЦ-ВНИИЭФ), г. Саров, Россия

В настоящее время в РФЯЦ-ВНИИЭФ ведутся работы по созданию синхротронного комплекса (СКИ) для проведения радиационных испытаний [1]. В состав комплекса входит бустерный синхротрон, обеспечивающий ускорение широкого набора тяжелых ионов от водорода до висмута.

Установка позволяет получать пучки ускоренных ионов с перестраиваемой энергией (до 700 МэВ по протонам и 36 МэВ/нуклон для ионов висмута) с возможностью формирования поля облучения до 100 см² на испытательной позиции.

Динамические параметры пучка частиц в реальном ускорителе отличаются от расчетных значений. Поэтому существует необходимость контроля параметров пучка, в частности, его поперечного положения в процессе ускорения и транспортировки, а также проведения коррекции замкнутой орбиты. Для этих целей используются мониторы положения пучка и магнитные корректоры положения пучка, которые должны работать согласованно с магнитной системой ускорителя.

В программе трехмерного электродинамического моделирования построены трехмерные модели линейного разрезного монитора положения пучка и магнитного корректора положения пучка. Выполнены расчеты напряжений с электродов монитора при различных параметрах ионов и при определенных энергиях на каждом этапе ускорения. Получены результаты расчетов положения пучков на различных расстояниях от корректора и при определенных величинах подаваемого тока на катушки корректора. В программе MAD-X [2] смоделирована магнитная структура синхротрона с элементами диагностики и корректировки орбиты пучка. В ходе работы в расчетных программах получены результаты коррекции орбиты ионного пучка при ее критических искажениях.

Список литературы

1. Завьялов Н.В. Исследовательские установки РФЯЦ-ВНИИЭФ для экспериментального получения фундаментальных и прикладных знаний в области ядерной, радиационной физики и физики быстропротекающих процессов // Успехи физических наук. 2021. Т. 191, №9. С.3-15.
2. L. Deniau et al., The MAD-X Program User's Reference Manual, CERN, 2023.

ИЗМЕРЕНИЕ ПРОДОЛЬНОГО РАЗМЕРА ПУЧКА НА НОВОСИБИРСКОМ ЛСЭ

Рева С.В., Борин В.М., Шевченко О.А., Мешков О.И., Винокуров Н.А., Гетманов Я.В.

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

Новосибирский лазер на свободных электронах (НовоЛСЭ) представляет собой установку, состоящую из трёх лазеров на свободных электронах, размещённых на трех различных дорожках линейного ускорителя-рекуператора. Все три лазера используют общую систему ускорения, что обеспечивает высокий средний ток электронов — около 10 мА [1]. Точное измерение параметров электронного пучка необходимо для контроля работы ускорителя и настройки его режимов. Предыдущие эксперименты по оптической диагностике параметров пучка НовоЛСЭ представлены в [2, 3].

В данной статье представлены результаты экспериментов по изучению продольного размера пучка в различных лазерах Новосибирского FEL. В ходе исследований использовалось излучение Вавилова-Черенкова, возникающее при прохождении электронного пучка через тонкую пластину аэрогеля. Вспышка излучения регистрировалась стрик-камерой, что позволило определить продольные размеры пучка. Также приведены результаты анализа зависимости продольного размера пучка от различных параметров ускорителя.

Список литературы

1. O. A. Shevchenko et al., “The Novosibirsk free electron laser facility”, in AIP Conf. Proc., Novosibirsk, Russia, July 2020, p. 020001. doi:10.1063/5.0031513
2. V. M. Borin et al., “An Experimental Study of Beam Dynamics in the ERL-Based Novosibirsk Free Electron Laser”, in Proc. IPAC'17, Copenhagen, Denmark, May 2017, pp. 3781-3783. doi:10.18429/JACoW-IPAC2017-THPAB036
3. V. M. Borin et al., “Measurements of Beam Parameters at the Last Track of the ERL-Based Novosibirsk Free Electron Laser”, in Proc. IPAC'19, Melbourne, Australia, May 2019, pp. 2632-2634. doi:10.18429/JACoW-IPAC2019-WEPGW068.

РЕНТГЕНОВСКАЯ ДИАГНОСТИКА НА ОСНОВЕ КАМЕРЫ-ОБСКУРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПОПЕРЕЧНОГО ПРОФИЛЯ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА В ИСТОЧНИКЕ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЦКП «СКИФ»

Бородич В.В.¹, Дорохов В. Л.^{1,2,3}, Майор В. Е.^{1,2,4}, Мешков О. И.^{1,4}

¹Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

²Центр коллективного пользования «Сибирский кольцевой источник фотонов», Кольцово, Россия

³Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

⁴Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

В статье представлен проект диагностики, разрабатываемого совместно ИЯФ и ЦКП «СКИФ», предназначенного для измерения поперечного профиля электронного пучка с использованием жесткого рентгеновского излучения. Диагностика основана на оптической схеме камеры-обскуры, что позволяет избежать использования сложных и дорогостоящих рентгеновских оптических компонентов. Описаны предложенная оптическая схема, результаты моделирования пучка излучения, а также предварительный проект конструкции. Особое внимание уделено проблемам, связанным с дифракционными эффектами и необходимостью точного численного моделирования для интерпретации измерений. Разрабатываемая диагностика поможет минимизировать эмиттанс и проверить его соответствие проектному значению.

Разработка циклических ускорителей формирует основу для синхротронных и нейтронных исследований, которые необходимы для создания прорывных технологий, обеспечения развития исследовательской инфраструктуры. С этой целью в России создается источник синхротронного излучения (СИ) четвертого поколения – ЦКП «СКИФ». Важное значение для СКИФ имеет наличие диагностических приборов, измеряющих в непрерывном режиме поперечные и продольный размеры пучка. Это позволит минимизировать эмиттанс и сравнить его с расчетным значением в $75 \text{ пм} \cdot \text{рад}$, что имеет решающее значение при определении соответствия физической установки проектным требованиям. Расчетный эмиттанс источника СИ ЦКП «СКИФ» соответствует характерным поперечным размерам пучка, в местах наблюдения, менее 8 мкм , что заметно усложняет задачу экспериментального определения этого параметра. Прежде всего, это связано с тем, что диагностика электронного эмиттанса заключается в измерении поперечного размера пучка электронов в точке ускорителя с известными параметрами Твисса. В электронных накопителях для измерения размера пучка как правило используется СИ, благодаря своей неразрушающей природе. Измерение поперечного профиля, основанное на прямой визуализации, в источниках синхротронного излучения четвертого поколения ограничено эффектом дифракции [1], что для повышения разрешающей способности заставляет работать в коротковолновом диапазоне, таком, как рентгеновское излучение. С помощью зонной пластинки Френеля или рентгеновских линз [2,3] можно добиться пространственного разрешения изображения в несколько мкм , однако такую систему сложно настроить, так как она требует работы в высоком вакууме и дорогостоящей оптики, работающей в жестком рентгеновском диапазоне, а также предварительной монохроматизации излучения. При этом, наиболее распространенный подход предполагает построение изображения источника с помощью камеры-обскуры [4], что относительно дешево ввиду отсутствия сложных рентгеновских оптических компонентов. Тем не менее, для интерпретации измерений этим методом требуется точное численное моделирование процесса получения изображения и дифракционных эффектов.

Работа посвящена, разрабатываемому совместно ИЯФ и ЦКП «СКИФ», комплексу рентгеновской диагностики поперечного профиля пучка электронов с использованием жесткой части синхротронного излучения. Этот проект диагностического комплекса построен на основе камеры-обскуры использующей излучение из стандартного канала диагностики поперечного профиля. Нами предложена оптическая схема, проведено моделирование пучка излучения в соответствии с предложенной схемой измерения эмиттанса, представлен предварительный проект конструкции этой диагностики.

Список литературы

1. Shin, S. New era of synchrotron radiation: fourth-generation storage ring. AAPPS Bull. 31, 21 (2021). <https://doi.org/10.1007/s43673-021-00021-4>

2. Y. S. Chu, J. M. Yi, F. De Carlo, Q. Shen, Wah-Keat Lee, H. J. Wu, C. L. Wang, J. Y. Wang, C. J. Liu, C. H. Wang, S. R. Wu, C. C. Chien, Y. Hwu, A. Tkachuk, W. Yun, M. Feser, K. S. Liang, C. S. Yang, J. H. Je, G. Margaritondo; Hard-x-ray microscopy with Fresnel zone plates reaches Rayleigh resolution. Appl. Phys. Lett. 10 March 2008; 92 (10): 103119. <https://doi.org/10.1063/1.2857476>
3. H. Sakai, M. Fujisawa, K. Iida, I. Ito, H. Kudo, N. Nakamura, K. Shinoe, T. Tanaka, H. Hayano, M. Kuriki, and T. Muto, Phys. Rev. ST Accel. Beams 10, 042801 (2007), DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevSTAB.10.042801>
4. Thomas, C., et al. "X-Ray Pinhole Camera Resolution and Emittance Measurement." PHYSICAL REVIEW SPECIAL TOPICS-ACCELERATORS AND BEAMS, vol. 13, no. 2, 2010., DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevSTAB.13.022805>.

СТАТУС УСКОРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ЦКП «СКИФ»

Синяткин С.В.¹, Абед Н.^{1,2}, Арсентьева М. В.^{1,2,3}, Баранов Г.Н.^{1,2,4}, Батраков А. М.¹, Беликов О.В.¹, Волков В. Н.¹, Гуров С.М.¹, Кондаков А.А.¹, Краснов А.А.^{1,2}, Левичев А.Е.^{1,2,3}, Левичев Е.Б.^{1,2,4}, Мешков О. И.^{1,3}, Никифоров Д.А.^{1,2,3}, Окунев И.Н.^{1,2}, Павленко А.В.¹, Павлов О.А.¹, Ротов Е.А.^{1,2}, Самойлов С.Л.^{1,2}, Семенов А. М.^{1,4}, Сеньков Д.В.¹, Сибирякова К.А.^{1,2}, Смирнов К.И.¹, Старостенко А.А.¹, Федоров В.В.^{1,2,3}, Чекменев Д. И.¹

¹Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия.

² Центр коллективного пользования «СКИФ», Институт катализа им. Г.К. Борескова Сибирского отделения Российской академии наук, Кольцово, Россия,

³Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

⁴Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

В наукограде Кольцово в Новосибирской области создается источник синхротронного излучения четвертого поколения Центр коллективного пользования «Сибирский кольцевой источник фотонов» (ЦКП «СКИФ»). Ускорительный комплекс ЦКП «СКИФ» включает инжектор электронов – линейный ускоритель с энергией пучка 200 МэВ и бустерный синхротрон, ускоряющий частицы до энергии эксперимента 3 ГэВ, – и накопительное кольцо с малым эмиттансом, набором вставных устройств-излучателей, фронтэндами для вывода СИ и т.д. В докладе представлены результаты работы с пучком электронов в инжекторе ЦКП «СКИФ» в 2025 году, статус накопительного кольца и других систем источника СИ, планы его ввода в строй в 2026 году.

СТАТУС УНИКАЛЬНОЙ НАУЧНОЙ УСТАНОВКИ «НОВОСИБИРСКИЙ ЛАЗЕР НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ»

Шевченко О.А.¹, Винокуров Н.А.^{1,2}, Гетманов Я.В.^{1,2,3}, Арбузов В.С.¹, Чернов К.Н.¹, Дейчули О.И.¹, Дементьев Е.Н.¹, Довженко Б.А.¹, Горбачев Я.И.¹, Кондаков А.А.¹, Козак В.Р.¹, Козырев Е.В.^{1,2}, Крутихин С.А.¹, Кубарев В.В.¹, Кулипанов Г.Н.^{1,3}, Купцов В.¹, Куркин Г.Я.¹, Медведев Л.Э.¹, Мотыгин С.В.¹, Овчар В.К.¹, Осипов В.Н.¹, Петров В.М.¹, Пилан А.М.¹, Попик В.М.¹, Попик И.В.¹, Репков В.В.¹, Саликова Т.В.¹, Седяров И.К.¹, Середняков С.С.¹, Скринский А.Н.¹, Тарарышкин С.В.¹, Трибендис А.Г.¹, Ческидов В.Г.¹, Власенко М.Г.¹, Волков В.Н.¹

¹Институт ядерной физики. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

²Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

³Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

Уникальная научная установка «Новосибирский лазер на свободных электронах» [1] включает три лазера на свободных электронах (ЛСЭ), ускоритель-рекуператор (УР) и каналы вывода излучения с пользовательскими станциями. В УР электроны, прошедшие через ЛСЭ и передавшие часть своей энергии излучению, возвращаются в ускоряющую структуру, где замедляются, возвращая туда часть энергии, затраченной на их ускорение. Таким образом происходит рекуперация энергии отработанного электронного пучка. Ондюляторы всех трёх ЛСЭ установлены на разных дорожках одного и того же многооборотного УР.

Новосибирский УР имеет три основных конфигурации включения магнитной системы - по одной на каждый из трех ЛСЭ. Первый ЛСЭ установлен под ускоряющей структурой. Поэтому после прохождения через ускоряющую структуру электронный пучок с энергией 11 МэВ поворачивается на 180 градусов в вертикальной плоскости. После использования в ЛСЭ пучок возвращается в ускоряющую структуру в замедляющей фазе. В данной конфигурации УР работает как однооборотная установка.

Для работы со вторым и третьим ЛСЭ необходимо включить два круглых поворотных магнита. Они поворачивают пучок в горизонтальной плоскости. После четырёх ускорений в основной ускоряющей структуре электронный пучок попадает в ондулятор третьего ЛСЭ. Энергия электронов в третьем ЛСЭ составляет 42 МэВ. И использованный пучок замедляется четыре раза и приходит в поглотитель, имея низкую энергию. Если включить четыре дополнительных магнита на второй дорожке УР, электроны, имеющие после двух прохождений ускоряющей структуры энергию 20 МэВ, проходят через второй ЛСЭ и после двукратного замедления в ускоряющей структуре попадают в поглотитель.

Несмотря на то, что установка работает на пользователей излучения (физиков, химиков и биологов) более двадцати лет, она до сих пор имеет самую высокую среднюю мощность узкополосного перестраиваемого когерентного излучения в своём диапазоне длин волн (8–400 микрон).

В докладе описаны регулярная работа установки на пользователей инфракрасного и субмиллиметрового излучения, специальные режимы работы и недавние модернизации подсистем.

Список литературы

1. Винокуров Н.А., Шевченко О.А. Лазеры на свободных электронах и их разработка в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН. Успехи физических наук. - 2018. - Т. 188, № 5. - С. 493–507. DOI 10.3367/UFNr.2018.02.038311.

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕДЛЕННОГО ВЫПУСКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭЛЕКТРОННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

Попов Д.М., Востриков В.А., Блинов М.Ф.

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

В ИЯФ СО РАН разрабатывается бустерный синхротрон с электронным охлаждением. В бустерном синхротроне предусмотрен медленный выпуск, обеспечивающий высокую однородность дозного поля выпущенного пучка. Медленный выпуск выполняется на резонансе $3\nu_x$, для возбуждения которого используется пара секступолей. Для контролируемого извлечения частиц из области регулярного движения предлагается использовать установку электронного охлаждения, позволяющую управлять энергией пучка.

В настоящей работе проведено моделирование процесса медленного выпуска методом трекинга частиц. В результате получена оптимальная зависимость энергии электронного пучка от времени, обеспечивающая однородную интенсивность выпущенного ионного пучка. Таким образом показано, что использование установки электронного охлаждения для организации медленного выпуска на резонансе $3\nu_x$ имеет высокий потенциал для практического применения.

ПРИМЕНЕНИЕ ОНДУЛЯТОРОВ НА ПОСТОЯННЫХ МАГНИТАХ С ПЕРЕМЕННЫМ ПЕРИОДОМ ДЛЯ РЕНТГЕНОВСКИХ ЛАЗЕРОВ НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ

Шевченко О.А.¹, Винокуров Н.А.^{1,2}

¹ Институт ядерной физики им. Г.И. СО РАН, Новосибирск, Россия

² Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

В ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН была разработана оригинальная конструкция ондуляторов с переменным периодом на постоянных магнитах [1, 2]. Такой ондулятор был создан и успешно используется на уникальной научной установке «Новосибирский лазер на свободных электронах» [3]. Позднее мы разработали конструкцию ондуляторов с переменным периодом на постоянных магнитах с большим отношением рабочей апертуры к периоду [4]. В них используются С-образные блоки постоянных магнитов, охватывающие цилиндрическую вакуумную камеру.

В данной работе приведены оценки параметров рентгеновских лазеров на свободных электронах с использованием таких ондуляторов. Из-за относительно малого периода предлагаемые ондуляторы могут существенно упростить и удешевить лазеры на свободных электронах, особенно в длинноволновой части рентгеновского диапазона.

Список литературы

1. Vinokurov N.A., Shevchenko O.A., Tcheskidov V.G. Variable-period permanent magnet undulators. *Physical Review Special Topics - Accelerators and Beams*. - 2011. - Vol. 14, Is. 4. - Art.nr 040701. - DOI 10.1103/PhysRevSTAB.14.040701.
2. Винокуров Н.А., Шевченко О.А. Лазеры на свободных электронах и их разработка в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН. *Успехи физических наук*. - 2018. - Т. 188, № 5. - С. 493–507. DOI 10.3367/UFNr.2018.02.038311.
3. Shevchenko O., Vinokurov N., Getmanov Ya.V. et al. Commissioning the First Free Electron Laser Based on a Variable-Period Undulator. *Physics of Particles and Nuclei Letters*. - 2023. - Vol. 20, Is. 4. - P. 897-900. DOI 10.1134/S1547477123040611.
4. Davidyuk I., Shevchenko O.A., Tcheskidov V.G., Vinokurov N.A. Magnetic and mechanical design of large-aperture variable-period permanent magnet undulator. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Sec. A*. - 2019. - Vol. 915. - P. 36-39. DOI 10.1016/j.nima.2018.10.168.

МОДИФИКАЦИЯ ОНДУЛЯТОРА ЛАЗЕРА НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ ДЛЯ ОГРАНИЧЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РАЗБРОСА, ОТРАБОТАННОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА

Шевченко О.А.¹, Винокуров Н.А.^{1,2}

¹ Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

² Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

В ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН работает уникальная научная установка «Новосибирский лазер на свободных электронах» [1]. В ней электроны, прошедшие через лазер на свободных электронах (ЛСЭ) и передавшие часть своей энергии излучению, возвращаются в ускоряющую структуру, где замедляются, возвращая туда часть энергии, затраченной на их ускорение. Таким образом происходит рекуперация энергии отработанного электронного пучка.

Под действием усиливаемой в ЛСЭ электромагнитной волны одни электроны ускоряются, а другие замедляются. Поэтому при прохождении электронов через ЛСЭ существенно возрастает их энергетический разброс, что препятствует возвращению всех электронов в ускоряющую структуру. Для ограничения этого разброса предлагается вставить в середину ондулятора один период ондулятора с увеличенными длиной и амплитудой магнитного поля, то есть использовать магнитную систему типа «оптический клистрон» [1, 2]. При прохождении через такую вставку (магнитный группирователь) электронного пучка с большим энергетическим разбросом

происходит расплывание электронных микросгустков, образующихся под действием электромагнитной волны в первой половине ондулятора ЛСЭ. Из-за этого усиление ЛСЭ при больших мощностях электромагнитной волны снижается, что ограничивает генерируемую мощность и энергетический разброс электронов, прошедших через ЛСЭ.

В данной работе приведены оценки необходимых параметров вышеописанной вставки для ондулятора с переменным периодом [3, 4], используемого во втором ЛСЭ уникальной научной установки «Новосибирский ЛСЭ».

Список литературы

1. Винокуров Н.А., Шевченко О.А. Лазеры на свободных электронах и их разработка в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН. Успехи физических наук. - 2018. - Т. 188, № 5. - С. 493–507. DOI 10.3367/UFNr.2018.02.038311.
2. Винокуров Н.А., Скринский А.Н. Генераторный клистрон оптического диапазона на ультрарелятивистских электронах. Новосибирск: ИЯФ СО АН СССР, 1977. - 10 с. - (Препринт / Ин-т ядер. физики СО АН СССР; 77-59).
3. Vinokurov N.A., Shevchenko O.A., Tcheskidov V.G. Variable-period permanent magnet undulators. Physical Review Special Topics - Accelerators and Beams. - 2011. - Vol. 14, Is. 4. - Art.nr 040701. - DOI 10.1103/PhysRevSTAB.14.040701.
4. Shevchenko O., Vinokurov N., Getmanov Ya.V. et al. Commissioning the First Free Electron Laser Based on a Variable-Period Undulator. Physics of Particles and Nuclei Letters. - 2023. - Vol. 20, Is. 4. - P. 897-900. DOI 10.1134/S1547477123040611.

РАЗРАБОТКА НИЗКОИМПЕДАНСНОГО ПОЛОСКОВОГО КИКЕРА ДЛЯ СИСТЕМЫ ПОДАВЛЕНИЯ ПОПЕРЕЧНЫХ НЕУСТОЙЧИВОСТЕЙ НАКОПИТЕЛЯ ЦКП «СКИФ»

Байструков М.А.^{1,2}, Бехтеев Е.А.¹, Никифоров Д.А.^{1,2}, Краснов А.А.^{1,2}, Пиминов П.А.^{1,2}

¹Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

²Центр Коллективного Пользования «СКИФ», Кольцово, Россия

Современные источники синхротронного излучения 4 поколения имеют низкий эмиттанс при относительно высоком полном токе пучка и большом количестве заполняемых сепаратрис. Несмотря на оптимизацию импеданса вакуумной камеры накопителя таких источников СИ, в них при определённом токе пучка возникают многосгустковые неустойчивости. Такой тип неустойчивостей может приводить как к увеличению эффективного эмиттанса пучка, так и к частичной или полной потере пучка, что в свою очередь может не позволить работать в том или ином режиме заполнения сепаратрис при превышении определённого тока пучка. По этой причине современные источники СИ оснащаются посгустковой (Bunch-By-Bunch) системой обратной связи, которая позволяет подавить многосгустковые неустойчивости до некоторой степени. Более того, такие системы также позволяют частично подавить сильные односгустковые неустойчивости, такие как ТМСИ, и повысить их пороговый ток. Одним из важнейших компонент посгустковой системы обратной связи является полосковый кикер, который также может выполнять роль полоскового датчика положения пучка.

В рамках данной работы был разработан низкоимпедансный полосковый кикер для системы обратной связи накопителя ЦКП «СКИФ» — источника СИ поколения 4+, который в настоящее время строится вблизи города Новосибирска. Полосковый кикер оптимизирован по согласованию вакуумных вводов с полосками и однородности поперечного импульса, сообщаемого частицам пучка. Также конструкция оптимизирована для простоты изготовления. Более того, кикер обладает низким импедансом за счёт особенностей конструкции. Данный кикер планируется применять и как кикер, и как полосковый датчик положения пучка для горизонтальной и вертикальной посгустковой систем обратной связи. В работе рассчитаны и приведены все основные характеристики полоскового кикера, включая продольный и поперечный импеданс.

ОЦЕНКА КОЛЛЕКТИВНЫХ ЭФФЕКТОВ ДЛЯ ТЕКУЩЕЙ МОДЕЛИ ИМПЕДАНСА ВАКУУМНОЙ КАМЕРЫ НАКОПИТЕЛЯ ЦКП «СКИФ»

Байструков М.А.^{1,2}, Скамароха М.А.^{1,2}, Ротов Е.А.^{1,2}, Пиминов П.А.^{1,2}, Краснов А.А.^{1,2}

¹Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

²Центр Коллективного Пользования «СКИФ», Кольцово, Россия

В настоящее время завершается строительство источника синхротронного излучения поколения 4+ ЦКП «СКИФ». Одной из ключевых особенностей данного источника СИ является малый расчётный эмиттанс 75 пм·рад при токе пучка 400 мА и энергии частиц 3 ГэВ. При таких параметрах пучка возникают всевозможные коллективные эффекты, часть из которых связана с взаимодействием пучка с вакуумной камерой. Величина, характеризующая это взаимодействие, называется импедансом. Коллективные эффекты, связанные с импедансом вакуумной камеры, зависят как от среднего тока пучка, так и от пикового тока в сгустке и могут приводить к разным эффектам, таким как изменение продольной формы сгустков, увеличение энергоразброса, возникновение сильной поперечной неустойчивости (ТМСИ), возникновение продольных и поперечных многосгустковых неустойчивостей. Все эти эффекты сильно влияют на динамику пучка и должны быть рассчитаны перед введением установки в эксплуатацию. В данной работе приведена текущая модель импеданса вакуумной камеры накопителя ЦКП «СКИФ». На основе этой модели сделаны аналитические оценки основных коллективных эффектов. Для части эффектов проведены численные моделирования и представлены полученные на их основе результаты.

ОПТИМИЗАЦИЯ МАГНИТНОЙ СТРУКТУРЫ ДВУХДОРОЖЕЧНОГО УСКОРИТЕЛЯ-РЕКУПЕРАТОРА КОМПЛЕКСА «НОВОСИБИРСКИЙ ЛАЗЕР НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ»

Эптешев Е.С.^{1,2}, Винокуров Н.А.^{1,2}, Гетманов Я.В.^{1,2,3}, Шевченко О.А.¹

¹Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

²Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

³Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

Комплекс «Новосибирский лазер на свободных электронах» (НЛСЭ) состоит из трёх ЛСЭ, использующих в качестве источников электронов одно-, двух- и четырёхдорожечные ускорители-рекуператоры (УР). На сегодняшний день, комплекс НЛСЭ является единственным УР, работающим в режиме многооборотной рекуперации и при этом, обеспечивающий генерацию ЛСЭ. Диапазон излучения ЛСЭ в двухоборотном режиме составляет 15 – 156 мкм.

Использование схемы рекуперации энергии подразумевает торможение электронного пучка после генерации лазерного излучения в поле ВЧ-резонаторов. В конфигурации двухдорожечного УР, электронный сгусток тормозится дважды, после прохождения каждой дорожки, что приводит к увеличению относительного энергетического разброса.

Появление дополнительного энергетического разброса при прохождении электронов через ЛСЭ непосредственно связано с механизмом генерации ЛСЭ. Вообще, воздействие световой волны вызывает изменение его энергетического распределения, которое приводит к повышению потерь электронов, нагреву элементов вакуумной камеры и, как следствие, к ограничению максимальной средней мощности излучения.

В работе рассматриваются возможности модификации магнитной структуры двухдорожечного ускорителя-рекуператора НСЛЭ, основной целью которых является обеспечение работы в режиме генерации высокой средней мощности.

ВОЗДЕЙСТВИЕ ГЕНЕРАЦИИ ИЗЛУЧЕНИЯ НА ЭЛЕКТРОННЫЙ ПУЧОК, ЦИРКУЛИРУЮЩИЙ В ДВУХДОРОЖЕЧНОМ УСКОРИТЕЛЕ-РЕКУПЕРАТОРЕ КОМПЛЕКСА «НОВОСИБИРСКИЙ ЛАЗЕР НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ»

Эптешев Е.С.^{1,2}, Винокуров Н.А.^{1,2}, Гетманов Я.В.^{1,2,3}, Шевченко О.А.¹

¹Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

²Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

³Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

Комплекс «Новосибирский лазер на свободных электронах» (НЛСЭ) состоит из трёх ЛСЭ, использующих в качестве источников электронов одно-, двух- и четырёхдорожечные ускорители-рекуператоры (УР). На сегодняшний день, комплекс НЛСЭ является единственным УР, работающим в режиме многооборотной рекуперации и при этом, обеспечивающий генерацию ЛСЭ. Диапазон излучения ЛСЭ в двухоборотном режиме составляет 15 – 156 мкм.

Взаимодействие электронного пучка и световой волны при генерации ЛСЭ оказывает определяющее воздействие на работу комплекса НЛСЭ. Оно приводит к значительному изменению энергетического распределения электронов.

В статье изучается процесс взаимодействия с помощью численного моделирования движения электронных пучков в поле ондулятора в присутствии внешней электромагнитной волны. Производится сравнение результатов моделирования и экспериментальных данных, полученных в процессе эксплуатации комплекса НЛСЭ.

ИЗУЧЕНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ВТОРОГО ЛАЗЕРА КОМПЛЕКСА «НОВОСИБИРСКИЙ ЛАЗЕР НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ»

Гетманов Я.В.^{1,2,3}, Винокуров Н.А.^{1,2}, Горбачев Я.И.¹, Середняков С.С.^{1,2}, Шевченко О.А.¹, Эптешев Е.С.^{1,2}

¹Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

²Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

³Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

Уникальная научная установка «Новосибирский лазер на свободных электронах» (НЛСЭ) включает три лазера на свободных электронах (ЛСЭ), ускоритель-рекуператор (УР) и каналы вывода излучения с пользовательскими станциями. В УР электроны, прошедшие через ЛСЭ и передавшие часть своей энергии излучению, возвращаются в ускоряющую структуру, где замедляются, возвращая туда часть энергии, затраченной на их ускорение. Таким образом происходит рекуперация энергии отработанного электронного пучка. Ондуляторы всех трёх ЛСЭ установлены на разных дорожках одного и того же многооборотного УР.

Новосибирский УР имеет три основных конфигурации включения магнитной системы - по одной на каждый из трех ЛСЭ. На сегодняшний день комплекс НЛСЭ является единственным УР, работающим в режиме многооборотной рекуперации и при этом обеспечивающим генерацию ЛСЭ.

Второй лазер работает при энергии электронов около 20 МэВ в двухоборотной конфигурации УР. Первая генерация была получена в 2009 году, но до недавнего времени такая конфигурация комплекса не пользовалась популярностью у пользователей, ввиду сложности настройки режимов и поддержания стабильной генерации. Ситуация существенно изменилась с внедрением режима модуляции частоты следования электронных пучков. В этом случае электронный ток в ускорителе представляется в виде двух периодически чередующихся макроимпульсов. Первый обеспечивает генерацию ЛСЭ, а второй, не участвующий в работе лазера, необходим для поддержания стабильной работы высокочастотной системы УР.

Режим модуляции электронного тока позволяет значительно снизить потери электронов. Благодаря этому времена работы пользователей на втором и первом ЛСЭ практически сравнялись. Вос требованность второго лазера обеспечивается широким диапазоном генерации излучения – от 15 до

156 мкм, а также высокой пиковой мощностью. При этом в оптимальном режиме средняя мощность излучения в макроимпульсе составляла 850 Вт.

Рекордные параметры излучения были достигнуты благодаря использованию в ЛСЭ уникального ондулятора, сделанного на основе постоянных магнитов. Перестройка длины волны излучения осуществляется с помощью изменения периода ондулятора – сжатия или растяжения его магнитной структуры, а также вариации числа магнитных полюсов.

В работе изучаются режимы генерации излучения второго лазера комплекса НЛСЭ. Обсуждаются условия получения генерации высокой мощности и ограничения, связанные с такой конфигурацией.

ЗАПУСК СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ ПУЧКА В ИНЖЕКТОРЕ КОМПЛЕКСА СКИФ

Бехтенов Е.А.^{1,2}, Г.В. Карпов Г.В.¹

¹Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера, Новосибирск, Россия

²Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

Система измерения положения пучка, разработанная и изготовленная в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера для Инжектора комплекса СКИФ, обеспечивает измерения поперечных координат пучка на всем его пути, начиная с Линейного ускорителя до выпуска из Бустера. Система включает в себя 15 датчиков положения пучка (пикапов) полоскового типа в Линейном ускорителе (Линаке) и канале Линак-Бустер, 38 пикапов “пятакowego” типа в Бустере и электронику. Электроника основана на использовании калибровочного сигнала в промежутках времени, когда отсутствует пучок. Разработанное программное обеспечение на основе EPICS работает внутри блоков электроники пикапов. Система измерения положения пучка успешно введена в эксплуатацию на Инжекторе комплекса СКИФ, получены первые результаты работы с пучком.

МАГНИТНАЯ СИСТЕМА ПЕРЕПУСКНОГО ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКОГО КАНАЛА ЛИНАК-БУСТЕР КОМПЛЕКСА КИСИ-2

Ульев И.А., Никифоров Д.А., Киселев В.А., Борин В.М., Окунев И.Н.

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

Транспортировка электронов из линейного ускорителя в бустерный синхротрон комплекса КИСИ-2 осуществляется с помощью электронно-оптического канала ЭОК-1. Канал включает в себя 2 поворотных магнита, 6 квадрупольных линз, систему инжекции в бустер, и систему измерения разброса энергии. Система инжекции состоит из импульсного септум-магнита и трех кикеров. Система измерения разброса энергии представляет собой спектрометр и поворотный магнит с углом отклонения 26 градусов.

В статье представлена структура электронно-оптического канала комплекса КИСИ-2, описание системы инжекции, описание системы измерения разброса энергии и расчет характеристик магнитов.

Список литературы

1. А.А. Коломенский, А.Н. Лебедев, Теория циклических ускорителей.- Физматгиз, М., 1962.
2. Персов Б. З. Расчет и проектирование экспериментальных установок / Б. З. Персов ; ответственный редактор действительный член РАН Л. М. Барков. — Изд. 2-е, испр. — Москва ; Ижевск : Институт компьютерных исследований, 2019. — 346 с.
3. Beam diagnostics for linear accelerator of SKIF synchrotron light source / M.Xiaochao, Y. I. Maltseva, O. I. Meshkov [et al.]. – Текст: электронный //Journal of Instrumentation. – 2022. – Vol. 17. – № 4. – P. T04001.
4. W. Kang, X. P. Ding, Q. Han. et al. “Theoretical Analysis and Computer Simulation of Eddy-Current Septum Magnets”, High Energy and Nuclear Physics (in Chinese), 2001, 25(3): 264-270.

РЕЖИМ РАБОТЫ ИНЖЕКТОРА СКИФ БЕЗ ГРУППИРОВАТЕЛЯ

*Волков В.Н., Левичев А.Е., Никифоров Д.А., Павленко А.В., Кондаков А.А.,
Батраков А.М., Дорохов В.Л., Мешков О.И., Мотыгин С.В., Ротов Е.А.*

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

В институте Ядерной Физики (ИЯФ) им. Г.И. Будкера строится синхротрон 4-го поколения СКИФ [1], в инжекторе которого впервые в мире используется термокатодная высокочастотная (ВЧ) пушка с сеточным управлением [2]. В настоящее время работают над запуском инжектора и перепуском сформированного сгустка в бустерное кольцо СКИФ. В данной статье рассматриваются новые характеристики работы ВЧ системы инжектора в режиме без группирователя 535 МГц, что значительно облегчает настройку и повышает устойчивость функционирования системы.

Основная задача ВЧ системы инжектора СКИФ [3] заключается в формировании коротких электронных сгустков продолжительностью $15\div 20$ псек (FWHM) из более длинных сгустков, длительность которых составляет 1 нсек и которые поступают с термокатада, находящегося внутри ВЧ пушки. Укорочение сгустков осуществляется путем создания почти линейного распределения скоростей частиц вдоль сгустка, которое увеличивается от его головы к хвосту, и за счет применения дрейфового участка, где частицы хвоста догоняют частицы головы. В конце дрейфового участка сгустки ускоряются в пред-ускорителе до релятивистских энергий, после чего их длительность остается практически неизменной.

Необходимое распределение скоростей частиц внутри сгустков формируется переменным ускоряющим полем ВЧ пушки. Чем ниже фаза эмиссии сгустков, тем более крутым становится это распределение, однако оно не является линейным из-за значительной длительности сгустков, составляющей 60° от периода ВЧ поля пушки 178.5 МГц. Наименьшая фаза эмиссии, которая не приводит к потере частиц, составляет 30° . Группирующий резонатор на третью гармонику (535.5 МГц) предназначен для линейной настройки распределения скоростей частиц внутри сгустков, что одновременно приводит к незначительному снижению полной энергии сгустков.

Расчеты показывают, что группирователь 535 МГц можно не использовать в инжекторе при формировании проектных коротких сгустков с зарядом до 0.6 нКл. В этом случае достаточно установить фазу в ВЧ пушке на 0 градусов, не меняя фокусировку соленоидов. Это упрощает работу инжектора, устраняя необходимость в оптимальном выборе фаз и амплитуд ВЧ 535 МГц, а также обеспечении их стабильности. Кроме того, исключаются проблемы, связанные с возникновением мультипакторного разряда в резонаторе 535 МГц, что значительно повышает стабильность формирования сгустков.

Эффект укорочения сгустков при нулевой фазе в ВЧ пушке объясняется естественным сокращением заряда длинного наносекундного сгустка за счет частиц, попадающих в фазу отрицательного напряжения на резонаторе, а также перераспределением плотности заряда вдоль сгустков под воздействием Кулоновского взаимодействия. При этом усиливается эффект группировки сгустков на 3-метровом участке дрейфа благодаря более выраженному увеличению распределения энергий частиц от головы к хвосту.

На выходе из пушки формируются сгустки с длинными тонкими хвостами (0.2% от общего заряда), вдвое увеличивающими энергетический разброс. Эти частицы отбрасываются естественным образом, как в линейном ускорителе, так и при переходах в канале перепуска в бустерное кольцо, из-за их низкой энергии. Согласно расчетам, в диапазоне рабочих фаз ВЧ пушки от 0° до 40° заряд сгустков и энергия повышаются линейно пропорционально фазе, в то время как продолжительность сгустков растет экспоненциально, при этом эмиттанс остается достаточно низким, составляя 20 мкм.

Список литературы

1. S.M., Volkov V.N., Zolotarev K.V., Levichev A.E., "Injection System for the Siberian Ring Source of Photons." Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques 14.4 (2020): p. 651-654.
2. В. Н. Волков и др., «Термокатодная высокочастотная пушка и группирующий резонатор для инжектора синхротрона СКИФ». Журнал технической физики, 2024, том 94, вып. 6, стр.913-923, стр. 924-933. DOI: 10.21883/000000000000.
3. В. Н. Волков и др., «Инжектор синхротрона СКИФ с термокатодной высокочастотной пушкой». Журнал технической физики, 2024, том 94, вып. 6, стр. 913-923. DOI: 10.21883/000000000000. <https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/58132>.

СТАТУС ДИАГНОСТИКИ ПРОДОЛЬНОГО ПРОФИЛЯ ПУЧКА ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В ЛИНЕЙНОМ УСКОРИТЕЛЕ ЦКП «СКИФ»

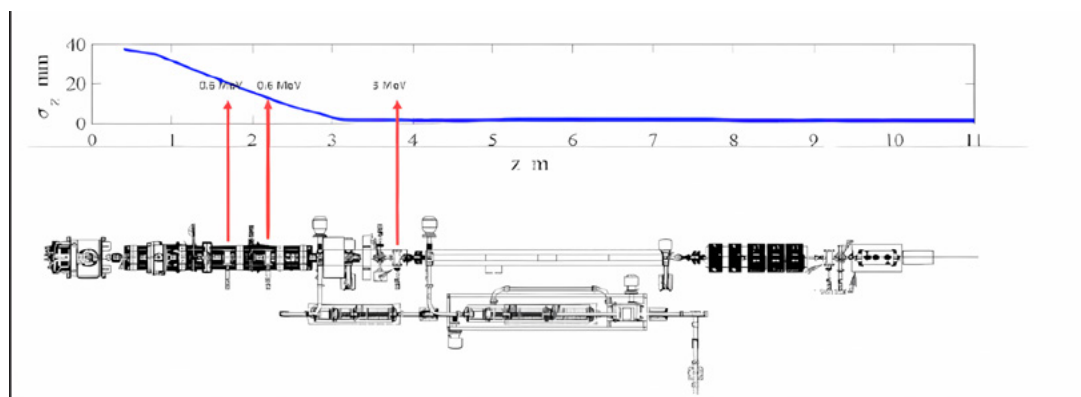
*Визитиу И.В., Дорохов В.Л., Меишков О.И., Левичев А.Е., Никифоров Д.А.,
Карнаев С.Е., Арсентьева М.В.*

Институт ядерной физики имени Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

Линейный ускоритель центра коллективного пользования Сибирского Кольцевого Источника Фотонов (ЦКП «СКИФ»), расположенного в Новосибирске, успешно прошел ввод в эксплуатацию.

Разработанная в ИЯФ система оптической диагностики пучка линейного ускорителя помогла достигнуть проектных параметров, предоставляя измерения важнейших параметров пучка, включающие поперечные размеры и координаты центра масс, а также вид продольного распределения заряженных частиц в пучке.

В канале линейного ускорителя установлено 3 черенковских датчика и их расположение показано на Рис 1. Они используются для определения продольного размера пучка в диапазоне энергий от 0.6 до 3 МэВ в характерных участках линейного ускорителя: после ВЧ пушки (178.5 МГц), после группирующего резонатора на третью гармонику (535 МГц) и после предускорителя-группирователя.



Расположение черенковских датчиков в структуре линейного ускорителя

В качестве радиатора на первом черенковском детекторе выступает кварцевая пластина толщиной 0.5 мм и показателем преломления 1.46, второй и третий черенковский датчик используют в качестве радиатора аэрогель толщиной 5 мм и с показателем преломления 1.05.

Также в докладе подробно рассматриваются конструкция, режим работы и практическое применение устройств диагностики продольного распределения пучка. Также приводятся результаты измерений, полученные при настройке линейного ускорителя ЦКП «СКИФ».

РАЗРАБОТКА ПЛАТЫ БЛОКА КОРРЕКЦИИ ДЛЯ СИСТЕМЫ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ НАКОПИТЕЛЯ «СИБИРСКОГО КОЛЬЦЕВОГО ИСТОЧНИКА ФОТОНОВ»

Смирнов В.А.^{1,2}, Суханов Д.П.^{1,2,3}, Пиминов П.А.^{1,4}

¹Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

²Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

³Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

⁴Центр коллективного пользования «СКИФ», Кольцово, Россия

Эффективность работы мощных ускорительных установок ограничена взаимодействием пучка с наведёнными полями и остаточными ионами газа в вакуумной камере: оно приводит к появлению продольных и поперечных неустойчивостей и, как следствие, значительному ухудшению параметров сигнала или даже полной потере пучка. Для подавления неустойчивостей и достижения проектных параметров используются системы обратной связи. Однако эти системы узко специализированы и потому производятся небольшим числом зарубежных фирм, в последнее время отказавшихся работать с российскими исследователями. В работе описана разработка печатной платы для

блока коррекции системы обратной связи накопителя ЦКП СКИФ: с учётом технического задания разработаны функциональная и электрическая схемы, выполнена разводка печатной платы, разработана объёмная модель блока в сборке.

ОБ ИЗМЕРЕНИИ ЭМИТТАНСА НАКОПИТЕЛЯ ЦКП «СКИФ» В ЖЕСТКОМ РЕНТГЕНОВСКОМ ДИАПАЗОНЕ

Хомяков Ю.В.^{1,2}, Мешков О.И.², Назьмов В.П.², Ракиун Я.В.^{2,3}, Чернов В.А.², Чхало Н.И.⁴

¹Центр коллективного пользования «СКИФ», Кольцово, Россия

²Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск, Россия

³Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, г. Новосибирск, Россия

⁴Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород, Россия

Электронный эмиттанс ϵ_e определяет яркость генерируемого синхротронного излучения (СИ), а поэтому является ключевым параметром источников СИ. На новых источниках СИ 4-го поколения, в которых используются магнитные ячейки типа Multi-Bend Achromat, достигается рекордно низкий горизонтальный эмиттанс $\epsilon_{e,x}$ порядка 100 pm·rad, что делает эти источники дифракционно-ограниченными до мягкого рентгеновского диапазона (т.е. при $E_{ph} \lesssim 1$ keV) [1].

Диагностика электронного эмиттанта сводится к измерению поперечных размеров электронного пучка σ_e , для чего на современных машинах (где $\sigma_e \sim 10$ μ m) с целью нивелирования дифракционных эффектов все чаще прибегают к использованию СИ в жестком рентгеновском диапазоне. При этом самый консервативный и популярный метод измерений размеров электронного пучка основан на построении его изображения при помощи пинхол-камеры [2-3], однако применяются и более сложные изображающие рентгенооптические системы [4-7]. Принципиально достижимое в таком подходе пространственное разрешение ограничивается низкой эффективной числовой апертурой оптики (из-за узкой диаграммы направленности СИ). Альтернативный подход – рентгеновская интерферометрия – основан на измерении поперечных длин когерентности СИ, связанных с размерами пучка электронов σ_e . Для этого обычно используют пары щелей [8], пинхолов [9] или дифракционных решеток [10]. Кроме того, свою эффективность показала гетеродинная интерферометрия [11-12], основанная на анализе спекл-картин в ближнем поле.

В работе кратко описаны некоторые вариации вышеуказанных методов измерения сверхнизкого электронного эмиттанта, а также предложена оптическая схема специализированной диагностической станции жесткого рентгеновского диапазона для ЦКП «СКИФ» [13]. Предложено комбинировать методы диагностики для перекрестной проверки результатов измерений и исключения влияния отдельных рентгенооптических элементов.

Список литературы

1. P. Willmott. An introduction to synchrotron radiation: techniques and applications (John Wiley & Sons, 2019). DOI: 10.1002/9781119280453.
2. C.Thomas, [et al.]. Phys. Rev. Spec. Top. Accel. Beams, 13 (2), 022805 (2010). DOI:10.1103/PhysRevSTAB.13.022805.
3. P.Elleaume, [et al.]. J. Synchrotron Radiat., 2 (5), 209 (1995). DOI: 10.1107/S0909049595008685.
4. H. Sakai [et al.]. Phys. Rev. Spec. Top. Accel. Beams, 10 (4), 042801 (2007). DOI:10.1103/PhysRevSTAB.10.042801.
5. T.Weitkamp, [et al.]. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, 467, 248 (2001). DOI: 10.1016/S0168-9002(01)00284-4.
6. T.R. Renner, [et al.]. Rev. Sci. Instrum., 67 (9), 3368 (1996). DOI: 10.1063/1.1147369.
7. D.C. Zhu, [et al.]. Nucl. Sci. Tech. 29, 148.1 (2018). DOI: 10.1007/s41365-018-0477-y.
8. V.Nazmov, [et al.]. Microsyst. Technol., 20 (10), 2031 (2014). DOI: 10.1007/s00542-013-2056-9.

9. W.Leitenberger, [et al.]. J. Synchrotron Radiat., 11 (2), 190 (2005). DOI: 10.1107/S0909049503029169.
10. L.Assoufid, [et al.]. Rev. Sci. Instrum., 87 (5), 052004 (2016). DOI: 10.1063/1.4950775.
11. Y.Kashyap, [et al.]. Phys. Rev. A, 92 (3), 033842 (2015). DOI: 10.1103/PhysRevA.92.033842.
12. M.Siano, [et al.]. Phys. Rev. Accel. Beams, 25 (5), 052801 (2022). DOI: 10.1103/PhysRevAccelBeams.25.052801.
13. G. Baranov, [et al.]. Phys. Rev. Accel. Beams, 24 (12), 120704 (2021). DOI: 10.1103/PhysRevAccelBeams.24.120704.

ЗАПУСК ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ИНЖЕКТОРА ЦКП «СКИФ»

Левичев А.Е.^{1,2,3}, Никифоров Д.А.^{1,2,3}, Федоров В.В.^{1,2,3}, Рева С.В.¹, Синяткин С.В.¹, Абед Н.^{1,2}, Смирнов К.И.¹, Арсентьева М. В.^{1,2,3}, Дорохов В.Л.¹, Батраков А.М.¹, Волков В.Н.¹, Мешков О.И.^{1,3}, Павленко А.В.¹, Барняков А.М.^{1,2}, Кондаков А.А.¹, Сибирякова К.А.^{1,2}, Павлов О.А.¹, Чекменев Д.И.¹, Самойлов С.Л.^{1,2}, Семенов А.М.^{1,4}, Пивоваров И.Л.¹, Фомин Л.Б.¹, Тур А.В.¹, Судник А.В.¹, Визитиу И.В.^{1,4}

¹Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

²Центр коллективного пользования «СКИФ», Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН, Кольцово, Россия,

³Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

⁴Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

В конце 2024 года в наукограде Кольцово был собран линейный ускоритель инжектора центра коллективного пользования Сибирский Источник Кольцевых Фотонов (ЦКП «СКИФ»). Ускоритель состоит из источника электронов ВЧ пушки, канала группировки пучка, предускорителя-группирователя и пяти регулярных ускоряющих структур на основе диафрагмированных волноводов с постоянным импедансом. Для питания ускоряющих структур используются три клистрона с мощностью 50 МВт каждый и рабочей частотой 2856 МГц, два из клистронов полностью изготовлены в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН (ИЯФ СО РАН). При эксплуатации ускорителя были достигнуты максимальные значения СВЧ мощностей в волноводных трактах и ускоряющих структурах. Произведена настройка поперечной динамики пучка, получен сгруппированный пучок и одногустковый режим. С помощью механических волноводных фазовращателей подобраны фазы ускоряющих полей, которые обеспечили необходимую энергию пучка 200 МэВ. Достигнутые параметры пучка в линейном ускорителе позволили продолжить работу с каналом инжекции и бустерным синхротроном. В статье приводятся описание запуска линейного ускорителя, достигнутые параметры пучка, а также текущий статус его работы.

АВТОМАТИЗАЦИЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПОПЕРЕЧНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА НА НОВОСИБИРСКОМ ЛСЭ

Середняков С.С.^{1,2}, Горбачев Я.И.¹, Шевченко О.А.¹

¹Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

²Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

Новосибирский лазер на свободных электронах (ЛСЭ) является источником когерентного излучения с перестраиваемой длиной волны в достаточно широком диапазоне. На параметры генерируемого излучения влияет много параметров, и в первую очередь – параметры электронного пучка – его энергия, средний ток, а также продольные и поперечные размеры пучка и эмиттанс.

Один из способов измерения эмиттанса пучка основан на анализе изменения его поперечных размеров при изменении параметров фокусировки(дефокусировки) пучка элементами магнитной системы. В данной статье представлена реализация данного метода.

Само измерение поперечных размеров осуществляется при помощи видеокамеры, регистрирующей изображение, которое получается посредством переходного излучения, появляющегося при попадании электронного пучка на специальную мишень. Алгоритм управления данным процессом – управление нужными элементами магнитной системы, снятие и обработка изображения представлен в данной статье.

АРХИТЕКТУРА И ОСНОВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НОВОСИБИРСКОГО ЛСЭ

Середняков С.С.^{1,2}, Винокуров Н.А.^{1,2}, Козак В.Р.¹, Дементьев Е.Н.¹, Тарарышкин С.В.¹

¹ Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

² Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

Новосибирский лазер на свободных электронах (ЛСЭ) является источником когерентного излучения с перестраиваемой длиной волны, который работает на базе многооборотного микротрона-рекуператора. На разных оборотах данного микротрона установлены три различных лазера на свободных электронах (ЛСЭ), каждый из которых имеет свой диапазон длин волн и максимальную мощность генерируемого излучения.

Как и для всех установок такого рода, для осуществления эффективного управления и контроля, была разработана специализированная система управления. В данной работе приведено подробное описание данной системы управления, а также рассмотрены основные отличия данной системы от других систем подобного рода, исходящие из особенностей работы данного комплекса.

ВЛИЯНИЕ НАСТРОЕК ЦЕПЕЙ ОБРАТНЫХ СВЯЗЕЙ ВЧ СИСТЕМЫ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ НАКОПЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОГО ТОКА В НАКОПИТЕЛЕ КУРЧАТОВСКОГО ИСТОЧНИКА СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Смыгачева А.С.

НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

В 2009 году ВЧ система накопителя Курчатовского источника синхротронного излучения была модернизирована [1]. На кольцо были установлены три резонатора новой конструкции вместо двух резонаторов, вышедших из строя. Однако количество ВЧ генераторов осталось прежним и равным двум. Таким образом, два новых резонатора, запитанные от одного генератора, оказались связаны между собой через волноводно-коаксиальный тройник и охвачены общей системой обратной связи.

Одним из основных требований к ВЧ системе накопителя является совокупное обеспечение необходимого энергетического аксептанса для частиц, имеющих разброс по импульсу, компенсации потерь энергии на синхротронное излучение (СИ) и так называемой устойчивости движения частиц по Робинсону [2,3]. В соответствии с потерями энергии на СИ и разбросом по импульсу инжектируемого в накопитель электронного пучка выбирается и задается ускоряющее напряжение на резонаторе. Устойчивость по Робинсону определяется правильным расположением собственной частоты ВЧ резонатора относительно рабочей гармоники тока пучка на шкале частот: для энергий частиц выше критической собственная частота резонатора должна быть меньше частоты соответствующей гармоники тока пучка.

Важную роль в эффективности накопления тока и устойчивости движения электронного пучка играет система обратных связей, поддерживающая стабильную и корректную работу ВЧ системы накопителя вне зависимости от уровня тока электронов. Система обратных связей позволяет стабилизировать амплитуду и фазу напряжения на резонаторе и разницу фаз между величинами тока коаксиального фидера, подводящего мощность к резонатору, и напряжения на резонаторе, так называемую расстройку резонатора. В случае двух резонаторов, связанных с одним генератором, стабилизируется суммарное напряжение, а не напряжение отдельно взятого резонатора. Задание и стабилизация разницы фаз определяет относительное положение собственной резонансной частоты и частоты возбуждения резонатора, обеспечивая условие Робинсона.

За годы работы установки сложился уникальный опыт эксплуатации и настройки ВЧ системы в новой конфигурации, в частности, восстановления рабочих параметров системы обратных связей. Периодический уход рабочих настроек из-за естественного износа, ремонта и замены оборудования (электронных блоков системы обратных связей) приводит к падению уровня накапливаемого электронного тока, которое составляет 40÷60% от 150 мА. Стоит отметить, что такое уменьшение уровня тока не всегда связано со сбоем в работе системы обратных связей.

Настройки системы обратной связи влияют на корректность обработки заданных значений амплитуды и фазы ускоряющего напряжения и расстройки резонатора, на диапазон возможной перестройки собственной резонансной частоты, на перераспределение суммарного напряжения в случае двух связанных резонаторов. Выявить закономерности в отклике ВЧ системы на задания значений, принятых к стабилизации, при различных настройках системы обратных связей и определить допуски на рабочие параметры системы обратных связей позволила модель, описывающая работу двух связанных ВЧ резонаторов. Модель, разработанная на основе теории длинных линий и многополюсников [4,5], учитывает некоторые особенности конструкции волноводно-коаксиального тройника и коаксиальных фидеров, различия в параметрах двух ускоряющих резонаторов и условия стабилизации, заложенные в системе обратных связей.

Список литературы

1. I.K.Sedlyarov et al., Upgrade of the RF system of Siberia-2 electron storage ring/ SR source, Proc. Of PAC09, Vancouver, BC, Canada, May 2009, paper WE5PFP015, pp. 2018-2020.
2. K. W. Robinson, Stability of beam in radiofrequency system, Cambridge Electron Accel. CEAL-1010, 1964.
3. A. Hofmann, Beam instabilities, CAS CERN Accelerator School, CERN 95-06, vol. 1, 1995, pp. 307-330.
4. Г. И. Атабеков, Основы теории цепей, Энергия, Москва, 1969, с. 282-311.
5. Ж. Будурис, П. Шеневье, Цепи сверхвысоких частот, Советское радио, Москва, 1979.

КУРЧАТОВСКИЙ ИСТОЧНИК СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ТРЕТЬЕГО ПОКОЛЕНИЯ КИСИ-2

*Фомин Е.А.¹, Валентинов А.Г.¹, Забелин А.В.¹, Корчуганов В.Н.¹, Смыгачева А.С.¹,
Ушаков В.А.¹, Снятков С.В.², Левичев А.Е.²*

¹НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

²Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

Курчатовский источник синхротронного излучения на базе 2,5 ГэВ накопителя электронов является источником поколения 2+ с горизонтальным эмиттансом 98 нм·рад. Периметр основного накопителя составляет 124,13 м. В настоящее время в составе комплекса работают 13 экспериментальных станций и еще четыре находятся в стадии строительства. Основным источником синхротронного излучения являются поворотные магниты с полем 1,7 Т с характеристической энергией фотонов 7,07 кэВ. Полный спектральный диапазон синхротронного излучения простирается от 0,1 до 2000 Å. Для расширения экспериментальных возможностей комплекса в прямолинейные промежутки основного накопителя установлены три сверхпроводящих вигглера (один с максимальным полем 7,5 Т и два с полем 3 Т).

Улучшение потребительских качеств пучков – яркости и интенсивности синхротронного излучения – требует модернизации всего ускорительного комплекса. Проведение полной модернизации позволит уменьшить горизонтальный эмиттанс электронного пучка более чем в 30 раз и создать новый источник синхротронного излучения с параметрами излучения, характерными для источников третьего поколения.

В настоящее время в НИЦ «Курчатовский институт» приступили непосредственно к реализации проекта модернизации комплекса. В 2024 году были заключены все необходимые для этого договора – договор на выполнение строительных работ и подключение дополнительных электрических мощностей, договор на выполнение конструкторских работ, изготовление и монтаж специализированного оборудования ускорительного комплекса.

Таким образом, на базе существующей инфраструктуры взамен действующего источника синхротронного излучения будет построен новый источник с натуральным эмиттансом 2,6 нм·рад. Для обеспечения «непрерывной» работы источника синхротронного излучения будет создан новый ин-

жекционный комплекс, включающий в себя бустерный синхротрон на энергию электронов (0,2–2,5) ГэВ и линейный ускоритель электронов на 200 МэВ.

Обязательным требованием к новому комплексу является сохранение всех действующих в настоящее время экспериментальных станций, сверхпроводящих вигглеров и действующей ВЧ системы основного накопителя.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭФФЕКТОВ ВНУТРИГУСТКОВОГО РАССЕЯНИЯ В БАЗОВОЙ ОПТИКЕ НАКОПИТЕЛЯ ЦКП «СКИФ» ДЛЯ ОСНОВНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ

Скамароха М.А.^{1,2}, Левичев Е.Б.^{1,2,3}

¹ Центр коллективного пользования «Сибирский кольцевой источник фотонов»
Института катализа им. Г.К. Борескова СО РАН, Кольцово, Россия,

² Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия,

³ Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

Важнейшей характеристикой источника синхротронного излучения 4+ поколения ЦКП «СКИФ» [1] является поперечный эмиттанс электронного пучка, который зависит от режима работы и параметров накопительного кольца (интенсивность пучка, параметры вставных устройств, коэффициент связи бетатронных колебаний, удлинение пучка дополнительной ВЧ системой высшей гармоники). В этой работе приводятся результаты моделирования эффектов внутрисгусткового рассеяния, изучается их влияние на эмиттанс, энергетический разброс и время жизни пучка.

Основными режимами работы накопителя ЦКП «СКИФ» является многосгустковый режим с полным током пучка 400 мА, а также односгустковый режим. В работе рассматривается структура без вставных устройств и со вставными устройствами первой очереди [2,3]. Рассматривается также возможность удлинения пучка с использованием дополнительной активной ВЧ системы третьей гармоники. Под эффектами внутрисгусткового рассеяния в данной статье понимается кулоновское рассеяние частиц в сгустке электронов, приводящее к потере частиц и определяющее время жизни пучка (эффект Тушека), а также приводящее к увеличению фазового объёма пучка (увеличение эмиттанса, уменьшение яркости синхротронного излучения). Моделирование эффектов внутрисгусткового рассеяния сделано в программах для проектирования ускорителей Elegant [4,5] и Xsuite [6].

Моделирование позволяет проверить правильность расчётов, а также позволяет использовать полученную модель в сочетании с другими эффектами, например, коллективными эффектами, связанными с продольными и поперечными wake-полями, эффектом нагрузки ВЧ резонаторов пучком и др.

Список литературы

1. Bukhtiyarov, A.V. et al. Synchrotron Radiation Facility “Siberian Circular Photon Source” (SRF SKIF). Crystallogr. Rep. 67, 690–711 2022. doi:10.1134/S1063774522050029
2. Шкаруба В. А., Брагин А. В., Волков А. А., Ерохин А. И., Зорин А. В., Казанцев Ф. П., Каноник П. В., Мезенцев Н. А., Сафронов А. Н., Седов А. А., Тарасенко О. А., Хрущев С. В., Цуканов В. М. Сверхпроводящие вигглеры и ондуляторы для генерации синхротронного излучения на накопителе «СКИФ» // Письма в ЭЧАЯ. 2023. Т. 20, №4(249). С. 999–1005.
3. Гуров Д. С., Золотарев К. В., Зуев В. В., Уткин А. В., Ческидов В. Г. Эллиптический электромагнитный ондулятор UE212M для станции 1-6 «Электронная структура» источника синхротронного излучения ЦКП «СКИФ» // Технол. Инфраструктура Сибирского кольцевого источника фотонов «СКИФ». 2022. Т. 3. С. 42–52.
4. Borland M. Elegant: A Flexible SDDS-Compliant Code for Accelerator Simulation. Advanced Photon Source LS-287. 2000.

5. Y. Wang, M. Borland, Pelegant: A Parallel Accelerator Simulation Code for Electron Generation and Tracking, AIP Conf. Proc. 877, 241–247 2006. doi:10.1063/1.2409141
6. G. Iadarola, R. De Maria, S. Łopaciuk, A. Abramov, X. Buffat, D. Demetriadou, L. Deniau, P. Hermes, P. Kicsiny, P. Kruyt, A. Latina, L. Mether, K. Paraschou, G. Sterbini, F. F. Van Der Veken, P. Belanger, P. Niedermayer, D. Di Croce, T. Pieloni, L. Van Riesen-Haupt, M. Seidel. “Xsuite: An Integrated Beam Physics Simulation Framework,” JACoW HB2023 (2024), TUA211.

СТАТУС КУРЧАТОВСКОГО ИСТОЧНИКА СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Валентинов А.Г., Корчуганов В.Н., Бельков А.И., Фомин Е.А., Ефимов Ю.В., Крылов Ю.В., Кузьмин И.Н., Мосейко Н.И., Пестерев С.Г., Попов В.Н., Смыгачева А.С., Стирин А.И., Ушаков В.А.

НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

Курчатовский источник синхротронного излучения продолжает работать в диапазоне энергий от вакуумного ультрафиолета до жесткого рентгеновского излучения. Максимальный ток электронов на энергии 2.5 ГэВ достигает 150 мА, количество одновременно работающих экспериментальных станций доходит до 12. Продолжается модернизация КИСИ в рамках Федеральной Целевой Программы. В текущем году завершается модернизация системы управления комплекса. Проведена реконструкция систем вентиляции здания, в котором расположен ускорительный комплекс, в том числе залов с ускорителями. Проведена реконструкция систем освещения и электроснабжения здания. Идёт подготовка к глубокой модернизации всего комплекса с заменой всех ускорительных установок в соответствии с Федеральной Научно-Технической Программой по развитию научной инфраструктуры.

ОСНОВНЫЕ СИСТЕМЫ УСКОРИТЕЛЕЙ И УКОРИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ

ЦИЛИНДРЫ ФАРАДЕЯ ДЛЯ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ

Лалаян М.В., Абакумов Я.М., Бондаренко Т.В.

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

В настоящий момент в НИЯУ МИФИ запускаются в работу несколько линейных ускорителей для промышленных и научных применений с энергией до десяти МэВ. Приемка этих ускорителей требует системы диагностики пучка, которая позволила бы измерить базовые параметры пучка электронов на выходе из структуры, такие как ток, поперечный размер и энергия. Два из трех параметров могут быть измерены с помощью цилиндра Фарадея. Было разработано три конструктивных исполнения цилиндров: базовый цилиндр, работающий под вакуумом для измерения тока пучка, многопластинчатый воздушный цилиндр для измерения тока и энергии пучка, и коаксиальный цилиндр Фарадея с алюминиевым фильтром для измерения энергии и тока для измерения параметров пучков с короткими длительностями. Приведены результаты Монте-Карло и электромагнитных расчетов вместе с конструктивом готовых изделий.

ГЕНЕРАЦИЯ ОНДУЛЯТОРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ВОЛНОВОДЕ С АСИМЕТРИЧНЫМ ПЕРИОДИЧЕСКИМ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ЗАПОЛНЕНИЕМ

Шейнман И. Л.

СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, Россия, НИУ ВШЭ, Санкт-Петербург, Россия

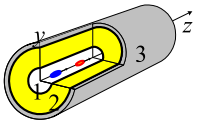
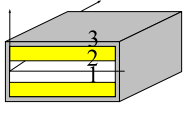
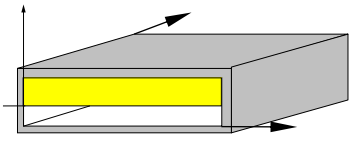
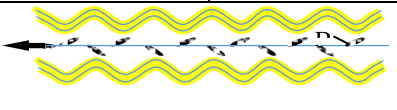
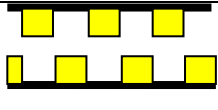
Рассматривается возможность получения электромагнитного излучения с использованием новой схемы ондулятора на основе периодически заполненной диэлектрической ускорительной структуры, называемой кильватерным ондулятором. Идея [1-4] состоит в создании ондулятора или вигглера без использования внешнего магнитного поля, а на основе взаимодействия пучка с полями черенковского излучения, генерируемыми им самим в диэлектрическом волноводе.

Проведено сопоставление структуры, изогнутой по гармоническому закону с симметричным относительно ее оси диэлектрическим заполнением и линейной структуры с асимметричным относительно ее оси периодическим диэлектрическим заполнением. Асимметричные варианты заполнения прямоугольного в поперечном сечении волновода являются одним из возможных способов увеличения амплитуды отклоняющего поля в сочетании с фокусирующим воздействием по остальным направлениям.

В качестве диэлектрика во всех структурах использовался кварц ($\epsilon = 3.75$), базовая частота волновода была принята $f = 60$ ГГц, радиус или полуширина вакуумного канала каждого из волноводов 0.5 mm. Расчеты проводились для гауссова сгустка-драйвера с зарядом $Q = -10$ nC, энергией $W = 2.5$ GeV, среднеквадратичным размером пучка $\sigma_z = 0.1$ mm и средним током $I \approx Qc / (3\sigma_z) = 10$ kA. Результаты расчетов сведены в таблицу. Дистанция ζ для позиционирования второго сгустка в каждом из волноводов выбиралась из условия максимизации поперечных полей при одновременной минимизации продольных полей, действующих на ведомый сгусток. Такой выбор обеспечивает практическую неизменность фазы кильватерного поля в процессе движения при максимизации ондуляторного коэффициента $K = eG_y \lambda_u / (2\pi mc^2)$ – параметра, показывающего эффективность генерации синхротронного излучения. Здесь $G_y = E_y - v_z B_x$.

Динамика одиночного сгустка показывает быстрое развитие неустойчивости сгустка-драйвера и выход сгустка за пределы канала. Уменьшение длины сгустка резко ослабляет собственную неустойчивость драйвера и увеличивает дальность полета. В связи с этим целесообразно использование схемы из двух коротких сгустков, причем создающий поперечное кильватерное поле первый сгусток должен быть низкоэнергетичным, сильноточным и коротким, тогда как генерирующий рентгеновское излучение высокоэнергетичный второй сгусток помещается на расстоянии, обеспечивающим максимальное поперечное и минимальное продольное поле, создаваемое первым сгустком.

Обобщая результаты расчетов для волноводов различной геометрии и типов заполнения, можно сделать вывод, что наиболее перспективным выглядит вариант использования прямоугольной структуры с асимметричным заполнением, позволяющей получить значительные амплитуды отклоняющего поля при одновременной фокусировке пучка в поперечном направлении.

Структура регулярного волновода				
Периодиче- ская структура				
ζ , cm	- 0.95	-1.177	-1.2175	-1.204
G_y max, MV/m	94.5	72.5	66.1	87.8
E_z , MV/m	0.5	3.8	0	8.3

Список литературы

1. I.L. Sheinman. “Beam Dynamics in Dielectric Structure when Using it as Undulator” // 2015 International Conference “Stability and Control Processes” in Memory of V. I. ZUBOV (SCP) Joined with 21st International Workshop on Beam Dynamics and Optimization (BDO) Saint-Petersburg, 05-09 October 2015. Published by IEEE SCP 2015 – Proceedings p. 201-204.
2. I. L. Sheinman, “Undulator effect on a bending acoustic wave of the wakefield waveguide”, in Wave electronics and its application in information and telecommunication systems (WECONF-2019), Saint-Petersburg, Russia, June 2019. doi:10.1109/WECONF.2019.8840619.
3. И. Л. Шейнман, О. С. Алексеева. Динамика короткого сгустка в кильватерном ондуляторе. X Всероссийская научно-техническая конференция «Электроника и микроэлектроника СВЧ». 31 мая-4 июня 2021. Россия, Санкт-Петербург.
4. I. L. Sheinman, O. S. Alekseeva. “Wakefield undulator based on a sinusoidal dielectric waveguide”. 27th Russian Particle Acc. Conf. JACoW Publishing. RuPAC’2021, Alushta, Russia. P. 274–276.

ОПТИМИЗАЦИЯ ФИНИШНОЙ ОЧИСТКИ ВАКУУМНЫХ КАМЕР
НАКОПИТЕЛЬНОГО КОЛЬЦА ИСТОЧНИКА
СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СКИФ

Кайгородцев В.А.^{1,2}, Жуков А.А.^{1,2}, Краснов А.А.^{1,2,3}, Мамошкина Е.В.^{1,2}

¹ Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

² Центр Коллективного Пользования «СКИФ», Новосибирск, Россия

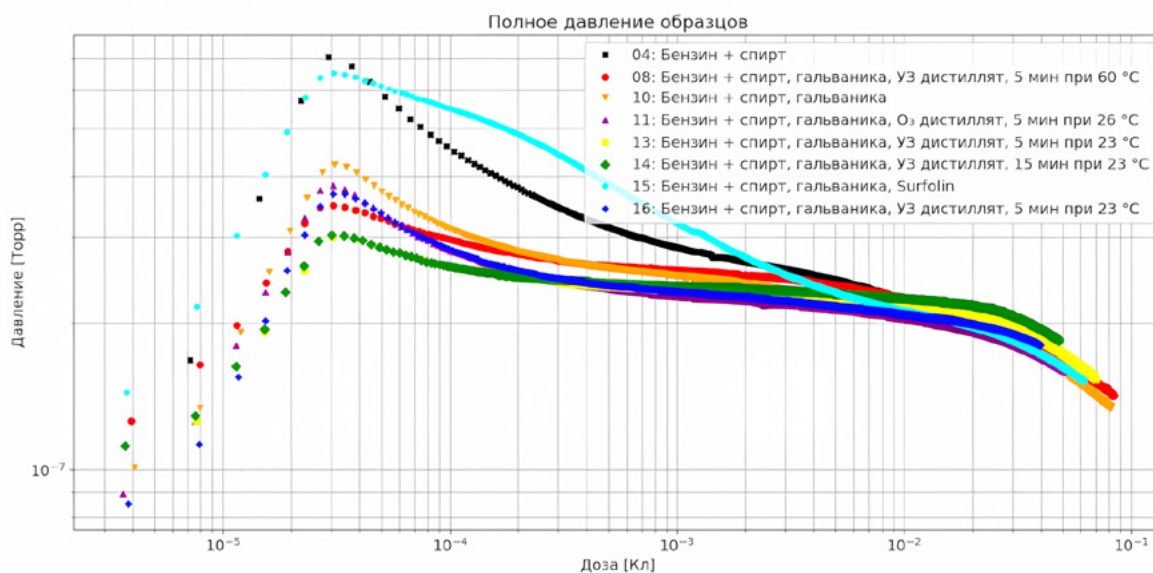
³ Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

Накопительное кольцо СКИФ состоит из 16 сегментов, каждый из которых представляет собой линейный промежуток длиной 6 метров и арку длиной 23,75 метров. В линейных сегментах накопительного кольца, где применяются нераспыляемые геттеры, сверхвысокий вакуум достигается сразу после прогрева [1–3]. В арочных сегментах для достижения сверхвысокого вакуума требуется предварительная тренировка поверхности синхротронным излучением [4–6].

Поскольку фотостимулированная десорбция тесно связана с фотоэффектом [7], и, как следствие, с электронно-стимулированной десорбцией, наиболее простым способом оценки газовыделения, при наличии пучка в ускорителе, является исследование десорбции с поверхности образца вакуумной камеры при облучении его электронами.

Актуальность эксперимента по исследованию влияния химической обработки внутреннего покрытия вакуумной камеры связана с нахождением оптимального метода финишной очистки, который привёл бы к наименьшей электронно-стимулированной десорбции с поверхности. Чем меньше

газовыделение при малой накопленной электронной дозе (т. е. в начале облучения), тем быстрее будет происходить процесс тренировки вакуумной камеры, и тем быстрее ускоритель выйдет на проектный режим работы [6].



Зависимость полного давления образцов от накопленной электронной дозы

В данной работе были проведены исследования влияния химической очистки вакуумной камеры на электронно-стимулированную десорбцию с её поверхности. Проведены измерения на 20-и образцах, очищенных 8-ю разными способами, проведена обработка полученных данных. Влияние накопленной электронной дозы на электронно-стимулированную десорбцию (зависимость давления от дозы) для некоторых образцов представлены на рисунке. По предварительным результатам, наилучший метод очистки — химическое травление, пассивация и очистка ультразвуком в дистилляте ($< 5 \mu\text{S}/\text{cm}$) при комнатной температуре.

Список литературы

1. Анашин В.В., Гусев Г.А., Жуков А.А., Краснов А.А., Кузьминых В.С., Пиминов П.А., Семенов А.М. Описание вакуумной системы источника синхротронного излучения 4+ поколения ЦКП «СКИФ» // Наноиндустрия. - 2023. - Т. 16, № 7-8. - С. 462-475. - Библиогр.: 23 назв. - DOI 10.22184/1993-8578.2023.16.7-8.462.475.
2. C.Benvenuti, P.Chiggiato, F.Cicoira, V.Ruzinov. Decreasing surface outgassing by thin film getter coatings. Vacuum, vol. 50, p. 57 (1998)
3. I.R.Collins, V.L.Ruzinov, O.B.Malyshev, V.V.Anashin, R.V.Dostovalov, N.V.Fedorov, A.A.Krasnov. A photodesorption study of a TiZrV coated stainless steel vacuum chamber” - EPAC-2002, Paris, France, June 2002, Proc. of EPAC-2002, pp. 2550-2552.
4. T.Kobari, H.J.Halama. Photon stimulated desorption from a vacuum chamber at the National Synchrotron Light Source. J. Vac. Sci. Technol. vol. 5, Issue 4, pp. 2355 - 2358 (1987)
5. Honry J.Halama, Conrad L.Foerster. Comparison of photodesorption yields from aluminum, stainless and Cu-plated beam tubes. Vacuum, vol. 42, N 3, pp. 185-188 (1991).
6. Анашин В.В., Кайгородцев В.А., Краснов А.А. Оптимизация системы откачки и расчёт динамического давления в накопителе СКИФ // Труды 30-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Вакуумная техника и технологии – 2023», Санкт-Петербург, 20-22 июня 2023 г. - Санкт-Петербург : Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. - С. 403-407. - Библиогр.: 6 назв. - EDN JTPRVU.
7. Electron and photon-stimulated desorption: Benefits and pitfalls. December 1983, Ultramicroscopy 11(2-3):187-198. DOI:10.1016/0304-3991(83)90236-X.

РАЗРАБОТКА МИКРОЯДЕРНОЙ АРХИТЕКТУРЫ ПО УПРАВЛЕНИЮ РАЗНОРОДНОЙ АППАРАТУРОЙ ФИЗИЧЕСКИХ УСТАНОВОК НА ПРИМЕРЕ СИСТЕМЫ СИНХРОНИЗАЦИИ ИНЖЕКТОРА УСКОРИТЕЛЯ БУСТЕР

Козловский А.А.¹, Бухарин А.П.², Жабин И.Н.¹, Шириков И.В.¹

¹ММО «Объединенный институт ядерных исследований», Дубна, Россия

²ФГБОУ ВО «Университет «Дубна», Дубна, Россия

Постоянно меняющиеся условия использования аппаратного обеспечения, способствующие штатному проведению сеансов ускорительных комплексов, требуют своевременной подготовки программ высокого уровня, предоставляющих оператору возможность настройки и контроля систем комплекса. Архитектура программного обеспечения является ядром процесса его разработки, а корректный выбор её стиля и шаблонов ведет к повышению эффективности реализации, тестирования и ввода в эксплуатацию новых программных модулей.

В работе рассматриваются вопросы создания архитектурной модели ПО, основанной на микроядре. Выбор архитектурного стиля аргументируется классификацией Нила Форда и Марка Ричардса [1], основанной на наиболее приоритетных для решаемых задач атрибутов качества, таких как: «Интеграция», «Возможность развития», «Простота», «Стоимость» и «Гибкость». Работа освещает не только детали проектирования, но и подготовку программных инструментов, создающих условия для разработки. Авторами также демонстрируется сравнение предлагаемого решения с существующими альтернативами, такими как LabView.

В работе показаны результаты апробации разработанных программных комплексов для управления аппаратной частью системы синхронизации инжектора ускорителя «Бустер» и системы синхронизации источника КРИОН. Затрагиваются вопросы возможности интеграции ПО с другими системами управления комплексом NICA, в частности, приводятся в пример результаты внедрения технологии Tango Controls в рамках предложенной архитектурной модели.

Авторы предлагают методику разработки ПО для управления аппаратурой физических установок, позволяющую снизить порог входа в задачи реализации программной части программно-аппаратных комплексов. Это обеспечивает эффективное вовлечение в рабочий процесс студентов старших курсов IT-направлений вузов, а также высококвалифицированных программистов. Такой подход способствует снижению нагрузки на инженеров и разработчиков аппаратного обеспечения, позволяя им сосредоточиться на решении комплексных проблем аппаратного уровня, не отвлекаясь на задачи разработки ПО.

Список литературы

1. Ричардс, М. Фундаментальный подход к программной архитектуре: паттерны, свойства, проверенные методы / М. Ричардс, Н. Форд; пер. с англ. – СПб.: Питер, 2023. – 448 с

РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ МНОГОКАНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ СБОРА И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДЛЯ СИСТЕМЫ ВНУТРЕННИХ ПИКАП-ЭЛЕКТРОДОВ ЦИКЛОТРОНА SSC

Павлов Л.А.¹, Митрофанов С.В.¹, Калагин И.В.¹, Anthony L.², Sakieldeen M.²

¹Лаборатория ядерных реакций им. Г.Н. Флерова Объединенного института ядерных исследований, Дубна, Россия

²iThemba LABS, Somerset West 7129, South Africa

В данной работе представлены технические решения по модернизации системы внутренних пикап электродов циклотрона SSC с использованием многоканальной модульной системы сбора данных, разработанной в ЛЯР ОИЯИ. Основное внимание уделено реализации программного обеспечения для обработки, интерпретации и визуализации сигналов, получаемых с пробников внутри циклотрона SSC в iThemba LABs в ЮАР.

Описаны алгоритмы обработки данных, включая методы фильтрации шумов, точного определения фазы пучка и его пространственного положения. Рассмотрена архитектура ПО, обеспечиваю-

щая многопоточный сбор данных в реальном времени, а также инструменты для их последующего анализа. Приведены результаты тестирования и отладки системы, включая калибровку датчиков и проверку синхронизации с ускоряющими структурами.

Реализованные решения позволяют повысить качество мониторинга параметров пучка, что важно для проведения длительных экспериментов на ускорителе SSC.

РАЗРАБОТКА ЕМКОСТНОГО НАКОПИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ НА 50 КВ 30 КДЖ

*Бочков Д.В.², Еникеев Р.Ш.¹, Фридман Б.Э.¹, Коришунов А.¹, Сапожников К.С.¹,
Томашевич П.В.¹, Бочков В.Д.², Коротков С.В.³*

¹АО «НИИЭФА», Санкт-Петербург, Россия

²ООО «Импульсные технологии», Рязань, Россия

³ФТИ им. А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

Описаны исследования экспериментального блока предназначенного для работы в составе большого емкостного накопителя энергии. Конденсаторный блок соединяется с нагрузкой кабельной линией длиной не менее 20 м, время нарастания разрядного тока до максимального значения в режиме короткого замыкания должно быть не более 10 мкс, длительность фронта напряжения на выходе кабельной линии в режиме холостого хода - не более 0,1 мкс. Блок генерирует импульс тока при положительной или отрицательной полярности напряжения заряда конденсаторов. Блок содержит два конденсатора 50 кВ, 12 мкФ и коммутатор разрядного тока – псевдо-искровой разрядник (тиратрон).

Для конденсаторного блока разработаны двунаправленные тиратроны ТДИ1-100к/75Д и ТДИ1-100к/75ДЭ (с внутренним токовым экраном) на рабочее напряжение до 75 кВ, коммутируемый ток до 200 кА, у которого джиттер не более 10 нс при любой полярности напряжения между основными электродами. В тиратроне имеется два узла поджига, размещенных на каждом из основных электродов. Высокая пространственная стабильность и ресурс при коммутации больших значений заряда обеспечивается за счет применения «толстых» проводящих экранов, которые перекрывают область плазменных каналов и при этом не возникают выбросы токовых шнуров на оболочку прибора.

Генератор импульсов запуска тиратрона построен на основе диодного прерывателя тока в виде блока дрейфовых диодов с резким восстановлением (DSRD), у которых наносекундное время выключения. Генератор формирует импульсы с высокой скоростью нарастания напряжения (до 4 кВ/нс), что обеспечивает малый джиттер включения тиратрона (не более 5 нс) при любой полярности напряжения между основными электродами.

КАНАЛ ИНЖЕКЦИИ В БУСТЕРНЫЙ СИНХРОТРОН

*Востриков В.А., Блинов М.Ф., Кооп И.А., Бехтенов Е.А., Карпов Г.В., Кобец В.В.,
Мешков О.И., Хлыстов Д.А., Ческидов В.Г.*

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

В ИЯФ СО РАН разработан инжекционный канал, для транспортировки пучков протонов и ионов от инжектора в бустерный синхротрон с электронным охлаждением. Канал инжекции включает в себя обдирочную мишень, магнитный фильтр для сепарации частиц с необходимым зарядовым состоянием, трехмерный поворот заканчивающийся впускным септумом, системы коррекции и диагностики.

Для обдирки ионов используются углеродные фольги с толщиной 50 -200 мг/см². Оригинальная конструкция обдирочной мишени позволяет установку до 30 фольг, с возможностью их оперативно-го переключения.

В настоящее время начато производство основных элементов канала.

ПОВЫШЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТАБИЛЬНОСТИ ПЛАЗМЕННЫХ КАНАЛОВ ПРИ КОММУТАЦИИ ТОКОВ В СОТНИ КИЛОАМПЕР

Бочков В.Д., Бочков Д.В.,

ООО «Импульсные технологии», Рязань, Россия

ТДИ-тиратроны превосходят по ряду параметров известные газоразрядные и вакуумные коммутаторы, в частности: имеют существенно меньшую индуктивность, меньший джиттер при относительно малых габаритах. Однако при увеличении коммутируемого заряда свыше 1 Кулона в приборах возникали неустойчивости разрядной плазмы, приводящие к выбросу ее на стенки окружающих электродов. Существенно увеличить коммутируемую энергию и надежность приборов удалось за счет стабилизации пространственного положения токовых каналов при учете процессов взаимодействия сильнотоковых плазменных пучков с окружающей их проводящей стенкой [1]. Последние разработки тиратронов с внутренним объемным экраном ТДИ1-150к/50Э обеспечивают коммутацию повышенных значений заряда на уровне вакуумных РВУ. Подобный эффект был обнаружен недавно [2] и в токамаках, где резкое повышение предела Гринвальда в 10 раз было объяснено наличием толстой стенки токамака.

Список литературы

1. Bochkov V.D., Bochkov D.V., Krivosheev S.I., Adamian Yu.E., Effect of conductive screens on the stabilization of plasma channels with currents of hundreds kamps, «Pleiades Publishing, Inc.» / Physics of Particles and Nuclei Letters, Vol 13, No.7, pp. 818-821, 2016.
2. Hurst N. C., Chapman B. E., Sarff J. S., Almagri A. F., McCollam K. J., Den Hartog D. J., Flahavan J. B., and Forest C. B. «Tokamak Plasmas with Density up to 10 Times the Greenwald Limit» Phys. Rev. Lett. 133, 055101 (2024).

СИСТЕМА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ ИСТОЧНИКАМИ ПИТАНИЯ ПОВОРОТНЫХ МАГНИТОВ ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ ЛИНАК-200

Трифонов А.Н., Бруква А.Е., Кобец В.В.

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

Линейный ускоритель электронов ЛИНАК-200 (Лаборатория ядерных проблем ОИЯИ) и система каналов вывода пучка предназначены для проведения научно-методических исследований в области физики и техники ускорителей, разработки и создания детекторов элементарных частиц, фундаментальных и прикладных исследований, а также образовательных проектов. Для вывода пучка из ускорительного тракта и его дальнейшей транспортировки для проведения экспериментов, используются дипольные магниты. Чтобы отклонить пучок электронов заданной энергии требуется создать определенную величину индукции магнитного поля, которая, в свою очередь, пропорциональна току в обмотках поворотного магнита. Таким образом, управляя током магнита, можно изменять энергию отклоняемых им электронов.

Для питания этих магнитов используются источники питания Delta Elektronika серии SM3000, удаленное управление которыми осуществляется с помощью изолированного аналогового интерфейса. В докладе представлена концепция системы автоматизированного управления данными источниками питания, включающая в себя как аппаратные решения, так и программное обеспечение на базе фреймворка Tango Controls.

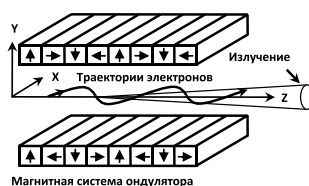
КОМПЬЮТЕРНАЯ ПРОГРАММА ДЛЯ РАСЧЕТА МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПЛОСКОГО ОНДУЛЯТОРА НА ПОСТОЯННЫХ МАГНИТАХ

Клочков Н.С., Смоляков Н.В.

НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

Для генерации электромагнитного излучения в накопительных кольцах электронов самое широкое применение нашли ондуляторы на постоянных магнитах. Существует ряд компьютерных программ для расчетов магнитного поля в таких ондуляторах. Но эти программы, будучи универсальными, достаточно сложны, и их применение требует некоторой подготовки. Однако наиболее востребованный случай – это расчет плоского ондулятора на постоянных магнитах со стандартной схемой, предложенной более 40 лет назад в работах [1, 2]. Нами была написана компьютерная программа для такой наиболее часто встречающейся структуры ондулятора, рис. 1. При заданной геометрии ондулятора программа рассчитывает распределения его магнитного поля в зазоре между полюсами. Алгоритмы программы основаны на точных аналитических формулах, описывающих магнитное поле прямоугольного параллелепипеда [3]. Такой подход позволил резко повысить скорость расчета поля, достигая при этом высокой точности расчета (в рамках выбранной модели).

Входные параметры для расчета поля задаются посредством текстового файла. На выходе генерируется файл с картой магнитного поля ондулятора, а также рисуется график поля.



Рассчитываемая конфигурация ондулятора.

Эта программа будет очень полезна при конструировании ондуляторов для установки «СИЛА».

Список литературы

1. К. Halbach, Nuclear Instruments and Methods 169 (1980) p. 1-10.
2. К. Halbach, Nuclear Instruments and Methods 187 (1981) p. 109-117.
3. Вагин Д.В. и др. Вестник Московского университета, Серия 3. 2008, №6. С. 53-55.

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОТОННОГО ПУЧКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЛАСТИКОВЫХ СЦИНТИЛЛЯТОРОВ, ОБОГАЩЕННЫХ БОРОМ

Верховод Г.Д.¹, Быков Т.А.¹, Поросев В.В.^{1,2}, Таскаев С.Ю.^{1,2}

¹Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

²Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

В представленной работе представлены результаты измерения пространственного распределения потоков протонов и вторичных частиц на комплексе протонной терапии «ПРОМЕТЕУС» ФТЦ ФИАН, а так же проведено сравнение с результатами расчетов, выполненных с помощью пакета моделирования GEANT4. Измерения выполненные с использованием водного фантома, а также с использованием разработанного в ИЯФ СО РАН малогабаритного детектора нейтронов на основе сцинтиллятора обогащенного бором, продемонстрировали хорошее согласие наблюдаемых потоков нейтронов с расчетами. Из данных полученных в моделировании следует, что механизм усиления биологической эффективности при облучении протонами и использовании борсодер-

жащих препаратов, наблюдаемый в ряде исследований, вызывает сомнение в виду значительно меньшего вклада в дозу облучения от альфа частиц по сравнению с основной компонентой, обусловленной протонами и другими продуктами реакций. Таким образом, необходимо дальнейшее изучение данного вопроса и поиск альтернативных механизмов, объясняющих наблюдаемый эффект усиления биологической эффективности терапии.

ФОКУСИРУЮЩИЕ СВОЙСТВА ТРЕХМЕРНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ ОНДУЛЯТОРА

Смоляков Н.В.

НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия.

В данной работе рассмотрена фокусировка релятивистского электронного пучка в трехмерном синусоидальном магнитном поле плоского ондулятора. Актуальность этой работы возникла в связи с работой над проектом лазера на свободных электронах «СИЛА». Излучение в нем генерируется в длинной цепочке ондуляторов. Поэтому необходимо более глубокое понимание влияния магнитных полей ондуляторов на динамику электронного пучка. Наличие фокусирующих свойств магнитного поля ондулятора (фокусировка пучка электронов в вертикальной плоскости и его дефокусировка в горизонтальной плоскости) впервые теоретически было показано в работе [1]. В последующих работах эти результаты с теми или иными модификациями были повторены. При этом дифференциальные уравнения движения электрона в магнитном поле ондулятора решались методом усреднения по быстрым осцилляциям траектории электрона (сглаживающее приближение).

В данной работе также учитываются все три компоненты магнитного поля ондулятора. Однако уравнения движения электрона решались аналитически с помощью теории возмущений вплоть до кубических слагаемых включительно по всем малым величинам, а не методом усреднений по осцилляциям. Также написаны компьютерные программы, решающие численно методом Рунге-Кутты уравнения движения электрона в трехмерном поле ондулятора. Получено хорошее взаимное согласие результатов при всех рассмотренных комбинациях начальных параметров траекторий. Вместе с тем в ряде случаев эти новые результаты противоречат результатам, полученным в рамках сглаживающего приближения. Так, обнаружена критическая зависимость горизонтального фокусного расстояния от начального угла входа электрона в ондулятор. Различия значительные, вплоть до противоположного знака фокусирующих добавок к поперечным компонентам скорости электрона. Так, горизонтальное фокусное расстояние уменьшается вдвое или же увеличивается до бесконечности при изменении горизонтального угла входа электронов на величину $\Delta\theta_x = \pm K/2$, в ту или иную сторону от равновесного значения. Здесь K - параметр ондуляторности (порядка нескольких единиц), а γ - приведенная энергия электрона (порядка тысячи или больше). Полученные в работе результаты позволяют предложить новые методы, как можно модифицировать фокусирующие свойства ондуляторов (их фокусные расстояния).

Список литературы

1. Barkov L. M., Baryshev V. B., Kulipanov G. N., Mezentsev N.A. и др. A proposal to install a superconducting wiggler magnet on the storage ring VEPP-3 for generation of the synchrotron radiation. Nuclear Instr. Meth. 1978. V. 152. № 1. P. 23.

ОСНОВНЫЕ РЕШЕНИЯ, ИСПОЛЬЗУЮЩИЕСЯ ДЛЯ СОЗДАНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ УСКОРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА СКИФ

Карнаев С.Е., Балакин В.А., Баранов Г.Н., Беликов О.В., Герасев А.В., Липовый Д.А., Павленко А.В., Пиминов П.А., Чеблаков П.Б.

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

В докладе перечислены основные требования к управлению ускорительным комплексом СКИФ и описаны основные технические решения, касающиеся:

- подготовки и размещения контрольно-измерительной электроники,
- обеспечения компьютерной базы и построения сети,
- организации системы синхронизации,
- выбора общей программной платформы для интеграции всех устройств управления.

В работе приведены первые результаты использования системы, полученные при запуске инжекционного комплекса СКИФ, включающего линейный ускоритель и бустерный синхротрон, а также представлена программа дальнейших работ по созданию системы управления накопителем.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МКП-ДЕТЕКТОРОВ В СИСТЕМАХ ДИАГНОСТИКИ ПУЧКОВ УСКОРИТЕЛЕЙ

Чугунов А.В.

ВТЦ «Баспик», Владикавказ, Россия

Контроль параметров пучка ускорителя в реальном времени позволяет оптимизировать работу экспериментальной установки и получить максимальный эффект при решении исследовательской задачи. Важным параметром пучка ускорителя является его профиль или пространственное и временное распределение. В докладе на конкретных примерах использования в ускорительных центрах показано применение детекторов на базе микроканальных пластин (МКП) в системах контроля и мониторинга пучка ускорителей, приведены потенциальные возможности МКП в определении пространственных и временных характеристик пучка и связанные с требованиями к характеристикам способы считывания информации, показаны некоторые схемы и принципы, применяемые в системах мониторинга пучков ускорителей:

- схема, работающая по принципу ионизации остаточного газа;
- схема, работающая по принципу электронной эмиссии из тонкой фольги на пути пучка;
- схема прямого детектирования с детектором на пути пучка мюонов.

В докладе приведены взятые из открытых источников примеры реальных устройств, применяемых для мониторинга пучков в ускорительных центрах GSI (Германия), CNS и J-PARC (Япония).

На примере установок комплекса GSI (Центр по изучению тяжёлых ионов имени Гельмгольца, Дармштадт) представлено использование детекторов на основе МКП для получения поперечного и продольного профиля пучка ускорителя по ионизации остаточного газа,

на примере детектора на базе МКП, установленного в CNS (центре ядерных исследований Токийского университета) показано определение профиля пучка, основанное на эмиссии вторичных электронов из тонкой фольги на пути пучка,

определение профиля пучка мюонов методом прямого детектирования с установкой детектора на пути пучка показана на примере установки в линейном ускорителе мюонов комплекса J-PARC (Протонный ускорительный исследовательский комплекс Японии).

Также в докладе даётся краткая информация о продукции ВТЦ Баспик, выпускающем МКП и детекторы на их основе, которые применяются в оборудовании в научных и технических центрах в России и за рубежом.

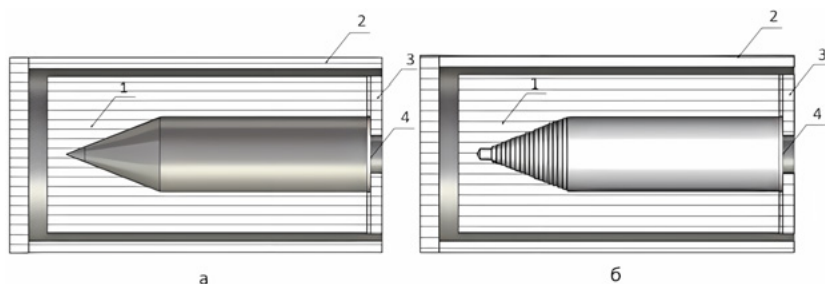
ВЫБОР МАТЕРИАЛА И КОНСТРУКЦИИ ЦИЛИНДРОВ ФАРАДЕЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ С ЭНЕРГИЕЙ 5КЭВ И 7МЭВ

Краснов А.С., Дмитриев М.С., Бондаренко Т.В.

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

В работе представлены результаты разработки и оптимизации конструкции цилиндров Фарадея из алюминия и меди, предназначенных для работы с электронными пучками на энергиях 5 кэВ и 7 МэВ. Рассмотрены особенности геометрического проектирования, включая выбор формы коллектора. Особое внимание уделено моделированию процессов взаимодействия пучка с материалом цилиндра.

В качестве начальных условий рассматривались моноэнергетичные электронные пучки с энергиями 5 кэВ и 7 МэВ и токами 20 мА и 6 мкА, соответственно, имеющие квадратное поперечное сечение 1,175х1,175 мм и нулевую расходимость. На рис. приведены варианты моделей исследуемых цилиндров Фарадея с гладким и ступенчатым конусом в основании коллектора.



Варианты моделей цилиндров Фарадея (1 – коллектора, 2 – заземленный корпус, 3 – запирающий электрод, 4 – фторопластовая прокладка)

На основании результатов моделирования можно сделать вывод, что алюминиевые цилиндры эффективнее удерживают электроны. Средняя энергия вылетающих частиц показывает, что наибольший вклад в утечку вносят отраженные от поверхности электроны. При 7 МэВ утечка тока в алюминиевых цилиндрах в 2–3 раза ниже, чем в медных. При 5 кэВ алюминий также показывает лучшие результаты по сравнению с медью. Использование ступенчатой конструкции увеличивает утечку до 1,5 раз. Сделан вывод, что для энергий 5 кэВ и 7 МэВ лучшим вариантом является гладкий алюминиевый цилиндр. Алюминиевые цилиндры обладают меньшей утечкой тока за счет слабого отражения первичных электронов, однако из-за глубокого проникновения электронов в материал толщина алюминиевого коллектора должна быть увеличена до значений CSDA [1] алюминия на энергии 7 МэВ (~16 мм).

Список литературы

1. <https://physics.nist.gov/PhysRefData/Star/Text/ESTAR.html>.

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЕРХНЕГО УРОВНЯ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ И ОТСЛЕЖИВАНИЯ СОСТОЯНИЯ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ МАГНИТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ УСКОРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА «СКИФ»

Балакин В.В., Григорук Е.И.

Институт ядерной физики имени Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

В данной работе описывается программное обеспечение верхнего уровня для управления источниками питания магнитной системы ускорительного комплекса «СКИФ», а также отслеживания состояния этих элементов. Основных компонент этого программного обеспечения три: высокоуровневый драйвер источников питания магнитной системы, операторские программы для управления источниками питания и SCADA-мониторинг состояния магнитной системы.

SCADA-мониторинг дает пользователям информацию об актуальном состоянии каждого магнита ускорителя и его источника питания в реальном времени, а операторские программы (скрины) – пользовательский интерфейс для управления магнитной системой. Эти программные компоненты работают в связке с высокоуровневым драйвером источников питания, который не только получает данные от оператора комплекса, проверяет их корректность и доводит уставки до контроллера источника питания, но и отслеживает состояние источников и особенности его функционирования, передавая информацию о каких-либо сбоях и неполадках в систему управления.

ПРЕЦИЗИОННЫЙ ИСТОЧНИК ТОКА ДЛЯ ПИТАНИЯ ДИПОЛЬНЫХ МАГНИТОВ СИНХРОТРОНА

Опекунов А.М.¹, Сметанин М.Л.¹, Востриков В.А.², Гусев Г.³, Попов А.Ю.³, Осипов В.Ф.³, Сытых Д.С.³, Зуевич Ю.Д.³, Михайлов Д.П.⁴, Доброскок Н.А.⁴

¹Институт ядерной и радиационной физики РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров

²Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск

³ООО «НИИЭФА-ЭНЕРГО», Санкт-Петербург, Россия

⁴Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет ЛЭТИ им. В.И. Ульянова (Ленина), СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, Россия



Рисунок 1



Рисунок 2

В структуре электропитания магнитно-оптической системы создаваемого в РФЯЦ-ВНИИЭФ испытательного синхротронного комплекса (СКИ) [1] важное место занимают источники питания дипольных магнитов. К данным источникам, имеющим преимущественно импульсно-периодический режим работы, кроме высоких требований по стабильности выходного тока предъявляются дополнительные требования по снижению влияния на питающую сеть и обеспечению возможности рекуперации энергии из нагрузки. В работах [2, 3] приводятся примеры реализации источников питания дипольных магнитов для новейших ускорительных комплексов с применением емкостных накопителей энергии.

Разработан и изготовлен источник питания дипольных магнитов, в котором при формировании импульса тока используется энергия питающей сети и энергия емкостного накопителя. При формировании фронта импульса тока емкостной накопитель и питающая сеть работают совместно, обеспечивая заданную скорость нарастания тока в магнитах. Плоская часть импульса тока формируется только с использованием энергии питающей сети. При формировании среза импульса тока осуществляется рекуперация энергии из магнитов в емкостной накопитель. В настоящее время проводятся наладка и испытания источника на эквивалент нагрузки.

Фотографии изготовленных шкафов источника представлены на рисунках 1 и 2.

Представленное схмотехническое решение источника тока обеспечивает:

- рекуперацию энергии, запасённой в нагрузке в емкостной накопитель, имеющий минимальную ёмкость, объём и стоимость по сравнению с иными решениями;
- эффективное использование запасённой в емкостном

накопителе энергии в следующих за предыдущим циклах работы и тем самым минимизацию потребления энергии из питающей сети;

- широкую вариативность алгоритмов управления благодаря двухвекторной комбинации питающих напряжений – модулируемого вектора напряжения накопителя и модулируемого вектора напряжения питающей сети. Модуляция векторов напряжений осуществляется изменением длительности открытого состояния соответствующих ключей;
- мягкую без резких выбросов форму тока питающей сети;
- пульсации тока в нагрузке на уровне единиц миллиампер;
- высокочастотные пульсации напряжения в нагрузке на уровне единиц вольт;
- равномерное распределение напряжения между выводами нагрузки симметрично относительно земли;
- возможность аварийного рассеивания запасённой в накопителях энергии через нагрузку.

Список литературы

1. Тельнов А.В., Блинов М.Ф., Будников Д.В., Востриков В.А., Грунин А.В., Завьялов Н.В., Кооп И.А.1, Крылевский Е.Н., Кулевой Т.В., Кропачев Г.Н., Карпов И.А., Киселев Ф.К., Курапов Н.Н., Лазарев С.А., Машагин А.В., Музюкин К.М., Опекунов А.М., Полозов С.М., Полиенко Г.А., Поляков Л.Е., Сметанин М.Л., Фильчагин С.В. Сборник докладов «Труды международной конференции <XXIV Харитоновские тематические научные чтения по проблемам ускорительной техники и физики высоких энергий>», г. Саров, стр. 144, 2024 год.
2. Шиянов А.А., Сеннов Ю.М., Чистилин С.В., Мустафа Г.М., Гусев С.И., Карпинский В.Н., Ходжибагиян Г.Г., Шурыгин А.А., Травин Н.В. Приборы и техника эксперимента, 2023, № 3, стр. 23-36. Прецизионный источник тока с накопителем энергии для питания сверхпроводящих структурных магнитов бустера комплекса NICA/
3. Беликов О.В., Актершев Ю.С., Баранов Г.Н., Винник Д.С., Горчаков К.М., Гуров С.М., Карнаев С.Е., Крылов А.А., Морсин А.А., Пиминов П.А., Пурескин Д.Н., Сеньков Д.В., Сингатулин Ш.Р., Синяткин С.В., Чернякин А.Д. Физика и техника ускорителей. Система питания магнитов накопителя ЦКП «СКИФ»/

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ УСТАНОВКИ ИРЕН ОИЯИ

Пономарев И.Д.

Объединённый институт ядерных исследований, Дубна, Россия

Установка ИРЕН в ОИЯИ представляет собой двухсекционный линейный ускоритель электронов с нейтронопроизводящей мишенью. Стабильная работа и безопасность установки требуют постоянного мониторинга различных параметров. До настоящего времени отсутствовала единая централизованная система диагностики, что затрудняло оперативную оценку состояния и наладку оборудования.

Целью данной работы стало проектирование и внедрение расширяемой системы мониторинга и диагностики, обеспечивающей сбор, хранение, визуализацию и анализ данных в режиме реального времени. Архитектура системы представлена на Рис. 1.

Для сбора данных были разработаны агенты на языках Python и Go, получающие информацию с температурных датчиков, нейтронного счетчика, а также внешней системы радиационного контроля (свыше 30 гамма и нейтронных датчиков). Данные поступают в систему мониторинга на базе Prometheus, Grafana и Loki. Визуализация и телеграм-оповещения обеспечивают оперативную реакцию на критические события.

Система мониторинга работает в изолированной контейнерной среде (Docker, LXC), что обеспечивает переносимость и надёжность.

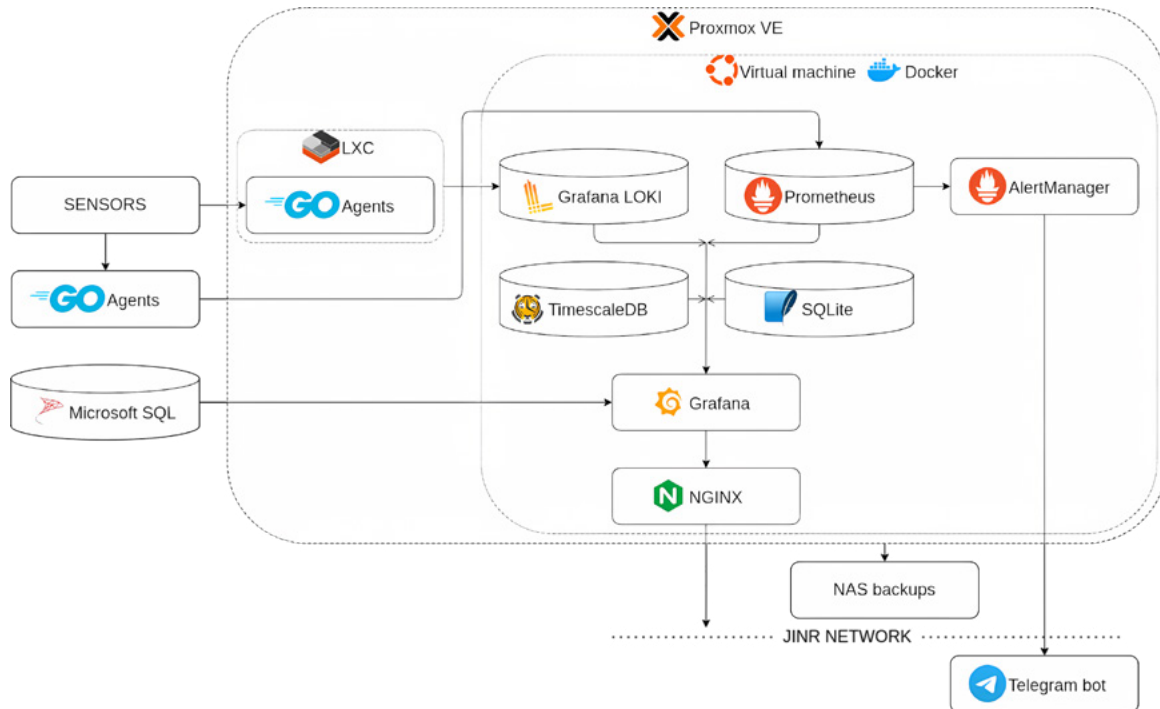


Рис. 1 Архитектура системы мониторинга ИРЕН

В рамках дальнейшего расширения была реализована обработка сигналов от пояса Роговского, подключенного к цифровому осциллографу. Полученные формы сигналов сохраняются в TimescaleDB и автоматически обрабатываются. Расчёт включает полуширину импульса, интеграл и ток электронного пучка, что позволяет вести диагностику формы и стабильности импульсов.

Проведен первичный анализ корреляций между различными параметрами установки: температура секций и мишени, ток пучка, поток нейтронов. По результатам анализа и последующей настройки ускорителя были достигнуты следующие улучшения (Рис. 2):

- Средний поток нейтронов увеличен с 54 000 до 68 000 импульсов за 10 секунд
- Температура мишени возросла с 180°C до 250°C
- Ток пучка увеличен с 1.5 А до 2 А
- Устранено постоянное дрожание потока нейтронов
- По данным экспериментаторов, увеличился общий выход нейтронов

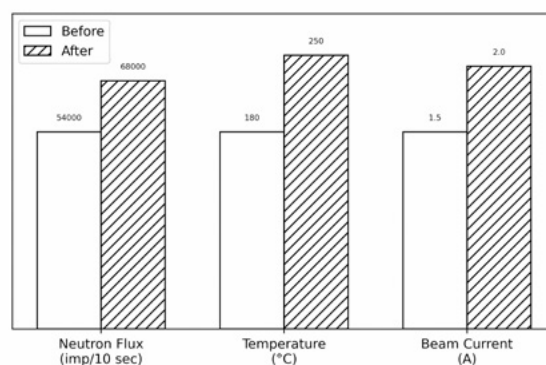


Рис. 2 Результаты настройки ускорителя

В планах – реализация мониторинга мощности пучка, а также вакуума, частоты работы ускорителя и токов источников. Внедрение автоматического обнаружения аномалий, в том числе с применением методов машинного обучения, и интеграция с инфраструктурой ОИЯИ.

Разработанная система мониторинга обеспечила централизованный контроль за ключевыми параметрами установки ИРЕН и продемонстрировала практическую пользу для анализа и наладки параметров установки. Внедрение хранения и обработки сигнала с осциллографа позволило расширить диагностические возможности и повысить прозрачность процессов. Архитектура системы остается гибкой и пригодной для дальнейшего развития, включая подключение новых источников данных и функций автоматического анализа.

МОДЕРНИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ ЗАМКНУТОЙ ОРБИТЫ ПУЧКА В УСКОРИТЕЛЕ У-1.5

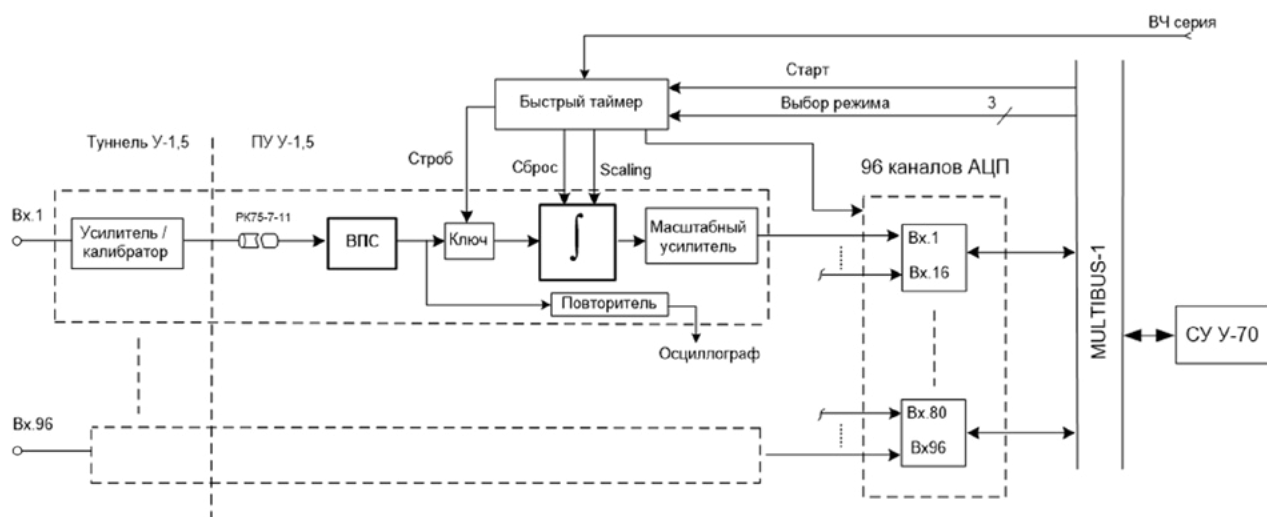
Сыщиков Е.А., Иванова И.В., Игнашин Н.А., Сытов С.Э., Терехов В.И.

«Курчатовский институт» – ИФВЭ, Протвино, Россия

В данной презентации изложены результаты разработки и первых испытаний с реальным пучком обновленной системы измерения замкнутой орбиты (ЗО) как протонного, так и углеродного пучка в синхротроне У-1.5 [1]. Актуальность работы обусловлена необходимостью создания двухуровневой электронной аппаратуры с соответствующим программным обеспечением в рамках системы управления комплекса У-70 (СУ У-70), способной в условиях значительного уровня электромагнитных помех и радиационных полей выполнять измерения ЗО для обоих видов пучков в течение всего ускорительного цикла. Ожидаемые параметры системы:

- диапазон рабочих интенсивностей - от 3×10^9 (5×10^8 ионов) до 3×10^{12} одно зарядовых частиц;
- количество измерений за ускорительный цикл – выбирается по желанию до 32 для каждого из 32 рабочих циклов;
- временное разрешение - 1мс в рутинном режиме и 0.8мкс в исследовательском;
- абсолютная точность измерения координаты - не хуже ± 1 мм с RMS отклонением не более чем ± 0.3 мм в рабочем диапазоне интенсивностей;
- режимы измерения: многооборотный и однооборотный.

Аппаратура состоит из датчиков положения центра тяжести пучка и обрабатывающей электроники, которая, в свою очередь, представлена нижним уровнем (предварительная многоканальная электроника, размещаемая вблизи от датчика) и верхним, где и производится основная часть обработки. Электроника этого уровня размещается вне зоны ускорителя, в помещении пульта управления ускорителя У-1.5.



Упрощенная блок-схема системы измерения орбиты пучка в У-1.5

В качестве датчика выбраны 2-координатные станции электростатических электродов в количестве 24 шт. Основная часть их установлена в апертурах корректирующих магнитов. В непосредственной близости от станций размещены металлические боксы, в которых смонтированы 4-канальные, индивидуальные для каждого электрода, предварительные усилители. Они обеспечивают необходимый импеданс для электростатических электродов, адаптацию чувствительности к интенсивности пучка и высокую нагрузочную способность. Здесь же находятся тест-генераторы, обеспечивающие возможность дистанционного автоматического тестирования усилителей и попарной калибровки всех измерительных каналов в отсутствии пучка. Выходные сигналы усилителей по индивидуальным коаксиальным кабелям, длина которых варьируется от 180 до 250 м, поступают к электронике верхнего уровня, состоящей из 96 каналов. Основными узлами каждого канала являются широкополосный восстановитель постоянной составляющей (ВПС), быстрые линейный ключ и интегратор. Формирование строб-импульсов для ключей и интеграторов производится быстрым местным таймером, осуществляющим и временную привязку генерируемых импульсов к высокочастотному напряжению ускоряющих станций (ВЧ серия). Длительность строба для ключа определяется выбранным количеством оборотов, за которое производится интегрирование. При этом чувствительность интеграторов коррелируется с выбранным режимом измерения. Их выходные напряжения оцифровываются индивидуальными АЦП.

К настоящему времени все 24 станции датчиков с предварительной электроникой установлены на штатные места, изготовлена партия 8-канальных модулей (12 шт.) аналоговой обработки. Варианты интегрирования описанной электронной аппаратуры в СУ У-70 и соответствующее программное обеспечение находятся в стадии проработки. Во время последних двух сеансов работы ускорителя были проведены пилотные измерения положения центра тяжести пучка в одной выбранной азимутальной точке при изменении частоты ускоряющего поля. Результаты испытаний соответствуют ожидаемым.

Список литературы

1. V. Kalinin et al., "Status of U70", Proceedings of the 27th Russian Conference on Particle Accelerators (RuPAC'21), Alushta, Russia, September-October 2021, pp. 20-22.

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ, ИНЖЕКТИРУЕМЫХ И ВЫВОДИМЫХ ПУЧКОВ УСКОРИТЕЛЯ У-1.5

Сыщиков Е.А., Суслёнков А.А., Сухов К.А., Терехов В.И., Васильева А.Г.

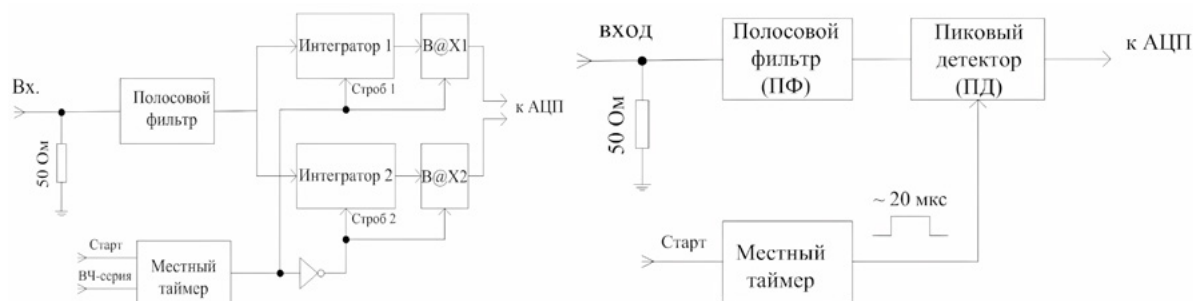
НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ, Протвино, Россия

Бустер ИФВЭ – Быстроциклирующий протонный синхротрон У-1.5, который является частью каскада ускорителей комплекса У-70 [1]. Пучки в У-1.5 инжектируются по двум вводным каналам от линейных ускорителей ЛУ-30 и И-100. Схема вывода имеет две ветви. По одной из них пучок инжектируется в основной ускоритель У-70, по другой выводится на поглотитель. В соответствии с проектом ОМЕГА, планируется организация третьей ветви в канал ЗН для вывода высокоинтенсивных пучков протонов на нейтронную мишень. Оптимизация настройки этих каналов немыслима без развитых средств диагностики пучка, важнейшим из которых является система измерения интенсивности инжектируемого и выводимого пучков, обновленная версия которой создается в настоящее время. Эта система базируется на основе использования импульсных тороидальных трансформаторов тока (ТТ) в качестве датчиков. Конструкция всех ТТ одинакова, используются сердечники одинакового размера с симметричными обмотками и калибровочными витками. Трансформаторы на каналах ввода работают в широкополосном режиме, на каналах вывода - в интегрирующем (колебательном). Такой подход позволяет мониторить процессы инжекции и измерять интенсивность выведенных пучков с высокой точностью в условиях высокого уровня электромагнитных помех от работы выводного магнитно-оптического оборудования. В соответствии с этим имеются различия в организации обрабатывающей электроники (рис.). Предусмотрена индивидуальная предварительная электроника с переключаемой чувствительностью на основе инструментальных усилителей, выходные сигналы по коаксиальным кабелям поступают в помещение пультной У-1.5, где размещена обрабатывающая электроника.

Показанная на рис.1а схема обработки сигналов широкополосных ТТ использует две группы поочередно переключаемых интеграторов с периодом обращения пучка при инжекции в У-1.5.

На рис.1б представлена схема для обработки сигналов с интегрирующего ТТ, основу которой составляет пиковый детектор.

Калибровка ТТ с электроникой осуществляется подачей специально сформированными эталонными зарядами на калибровочные витки.



а) Схема для широкополосного ТТ

б) Входная цепь для ТТ в колебательном режиме

Рис1. Упрощенные блок-схемы электроники для обработки сигнала с ТТ

Данная система покрывает широкий спектр задач:

- Измерение с высокой точностью интенсивности инжектируемых и выводимых пучков;
- Контроль эффективности инжекции и вывода пучков;
- Эффективность транспортировки пучков вдоль каналов.

В настоящее время все трансформаторы изготовлены и частично установлены на штатные места. Разработана и реализована в пилотном варианте обрабатывающая электроника. Первые результаты с реальным пучком подтверждают правильность принятых технических решений.

Список литературы

1. V. Kalinin, et al., “Status of U70” in Proc. 27th Russian Particle Accelerator Conf. (RuPAC’21), Alushta, Russia, Sept. - Oct. 2021, pp. 20-22.

МЕТОД НАТЯНУТОЙ НИТИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПОТОКА МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ СОСТАВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НАКОПИТЕЛЯ «СИЛА»

Бекетов Д.Д., Гончаров С.В., Амиров А.А., Комлев А.С.

НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

Достижение проектных параметров синхротрона четвертого поколения «СИЛА» требует высокой точности изготовления и диагностики магнитных систем, особенно вставных устройств (ондуляторов, вигглеров). Ключевыми характеристиками для обеспечения стабильности и качества электронного пучка и генерируемого синхротронного/ондуляторного излучения являются первый и второй интегралы магнитного поля, определяющие угловое и пространственное смещение пучка, а также положение магнитной оси [1, 2]. Для их измерения необходим метод, сочетающий высокую точность, применимость в узких зазорах и возможность измерения вдоль всей траектории электронов.

В работе представлены результаты разработки и применения метода натянутой нити для диагностики вставных устройств. Метод основан на перемещении токопроводящей нити (Cu-Be, Ø100 мкм) в магнитном зазоре устройства перпендикулярно направлению пучка. Индуцируемая в нити ЭДС, регистрируемая высокочувствительным нановольтметром, прямо пропорциональна скорости перемещения и интегральным характеристикам поля [3, 4].

К преимуществам представленного метода относятся: отсутствие требований к ширине зазора вставных магнитных устройств, возможность измерения с высокой точностью интегральных магнитных характеристик вдоль всего устройства и возможность определения его магнитной оси. Данный метод также представляет возможность измерять мультипольные компоненты магнитных устройств путём движения нити по окружности.

Для проведения измерений описанным методом создан макет измерительного стенда, а также разработано программное обеспечение, позволяющее осуществлять поступательное движение нити с параллельным сбором данных.

Метод натянутой нити представляет собой эффективное решение для диагностики вставных магнитных устройств ускорительно-накопительного комплекса «СИЛА». Реализация метода подтверждает его пригодность для диагностики и настройки требуемых параметров вставных магнитных устройств накопителя «СИЛА».

Список литературы

1. Moog E. R. et al., “Magnetic performance of insertion devices at the Advanced Photon Source,” in Proc. Part. Accel. Conf. (PAC), 1997, vol. 3, pp. 3224–3226.
2. Wallbank J. V. et al., “Pulsed-Mode Magnetic Field Measurements with a Single Stretched Wire System,” Sensors, vol. 24, no. 14, p. 4610, 2024. doi:10.3390/s24144610.
3. Kitegi C., “Development of a cryogenic permanent magnet undulator at the ESRF,” Ph.D. dissertation, Univ. Joseph Fourier, Grenoble, France, 2008.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ДАВЛЕНИЯ В ВАКУУМНЫХ КАМЕРАХ НАКОПИТЕЛЬНОГО КОЛЬЦА ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ УСТАНОВКИ «СИЛА»

Сухов А.В.

НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

Одной из важнейших систем накопительного кольца (далее – НК) исследовательской установки «СИЛА» [1], является вакуумная система. В связи с необходимостью обеспечивать уникальные параметры пучка (продолжительное время жизни, высокий средний ток, малый эмиттанс) выдвигаются высокие требования к поддержанию среднего давления не более 10^{-7} Па [2, 3]. Кроме того, вакуумные камеры, входящие в ее состав, обладают сложной геометрией, поскольку их необходимо встраивать в магнитную структуру на ограниченных расстояниях. Все это обуславливает высокую важность определения и контроля распределения давления и предельного создаваемого давления в характерных сечениях [4].

В ходе реализации проекта разработана методика расчета указанных параметров, включающая в себя использование моделей микроуровня (статистический метод) и макроуровня (метод сосредоточенных параметров). Связь между ними проводится в виде осреднения по характерным сечениям. Указанная методика применена для экспериментального образца вакуумной камеры НК.

Описанная методика и полученные данные позволяют определять параметры ключевых элементов вакуумной системы НК исследовательской установки «СИЛА» и оценивать результаты инженерных решений на соответствие заданным проектным требованиям.

Список литературы

1. М.В. Ковальчук и др. Источник синхротронного излучения четвертого поколения с рентгеновским лазером на свободных электронах “СИЛА”: концепция ускорительно-накопительного комплекса // Кристаллография. – 2022. – Т. 67. – №. 5. – С. 726-734

2. В.В. Анашин, Г.А. Гусев, А.А. Жуков, А.А. Краснов, В.С. Кузьминых, П.А. Пименов, А.М. Семенов. Описание вакуумной системы источника синхротронного излучения 4+ поколения ЦКП «СКИФ» // Наноиндустрия. – 2023. – Т. 16. – № 7–8. С. 462–475.
3. А.В. Кондратьев. Особенности вакуумных систем каналов синхротронного излучения (СИ) // Международный научный журнал «Инновационная наука». – № 11-1 / 2023
4. А.А. Глазков, Г.Л. Саксаганский. Вакуум электрофизических установок и комплексов. М: Энергоатомиздат, 1985. – 184 с.

КОНТРОЛЛЕР ПРЕЦИЗИОННЫХ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ МАГНИТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ УСКОРИТЕЛЕЙ

Штро К.С.^{1,2}, Актершев Ю.С.^{1,2}, Батраков А.М.¹, Павленко А.В.¹

¹Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

²Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, Новосибирск, Россия

Кратковременная и долговременная стабильность полей в магнитных элементах ускорителей напрямую влияет на параметры пучка. Магнитная система накопителя комплекса СКИФ содержит 282 квадрупольные линзы, величина тока в которых варьируется от 140 А до 300 А, а ошибка задания тока должна быть на уровне $2 \cdot 10^{-5}$. Ток задаётся от прецизионного источника ВЧ-500, управляющим устройством которого является описываемый в докладе контроллер.

Контроллер содержит ЦАП с разрядностью 20 бит, 8-канальный $\Delta\Sigma$ АЦП с разрядностью 24 бита, 16-разрядный регистр ввода-вывода с оптической развязкой. Для реализации алгоритмов системы управления комплекса по выдаче и сбору данных контроллер может синхронизировать выборки ЦАП и АЦП с внешней частотой.

В докладе описывается структура и ряд технических решений устройства. Особое внимание уделяется методикам измерения точностных характеристик контроллера. Также в докладе приводятся результаты измерений кратковременной и долговременной стабильностей на тестовом стенде.

ПРОЕКТ СИСТЕМЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ УСКОРИТЕЛЬНО-НАКОПИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА СИЛА

Фаткин Г.А.^{1,2}, Непин А.Р.^{1,2}, Сенченко А. И¹, Стюф А.С.^{1,2}, Царев Г. А.³, Яминов К.Р.¹

¹ООО «Бюро Ф», Новосибирск, Россия

²Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

³НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

Представлен проект системы технологической синхронизации ускорительно-накопительного комплекса СИЛА, состоящего из Линейного ускорителя электронов, накопительного кольца и лазера на свободных электронах. Система технологической синхронизации должна обеспечить раздачу более 3000 синхроимпульсов. Все подсистемы установки разделены на “медленные” - более 2560 каналов и “быстрые” - более 490 каналов, из экономической целесообразности каждая из которых управляется своим контуром синхронизации. “Быстрый” контур с тактовой частотой 175 МГц, строится на базе событийной синхронизации, сигналы которой передаются по оптической сети и представлен блоками генераторов-передатчиков событий, приемника событий и генерации синхроимпульсов. “Медленный” контур с тактовой частотой 25 МГц строится на базе протокола FPD-LINKII передающегося по оптической сети и представлен следующими модулями производства ООО “Диалтек”: головным, распределителя-коммутатора, оконечных устройств.

ИЗМЕРИТЕЛЬ ПРОФИЛЯ ЦИРКУЛИРУЮЩЕГО ПУЧКА НА ПЕРВЫХ ОБОРОТАХ

Савин Д.А., Терехов В.И., Сухов К.А., Чесноков Ю.А.

НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ, Протвино, Россия

В работе представлена концепция измерителя профиля циркулирующего пучка на первых оборотах синхротрона У-70 «Курчатовский институт» – ИФВЭ.

Измерение профиля циркулирующего пучка на первых оборотах — важный инструмент для контроля согласования поперечного фазового объема инжектируемого пучка и соответствия энергии инжектируемого пучка полю инжекции.

Упрощенная блок - схема головной части измерителя профиля пучка представлена на рис.1

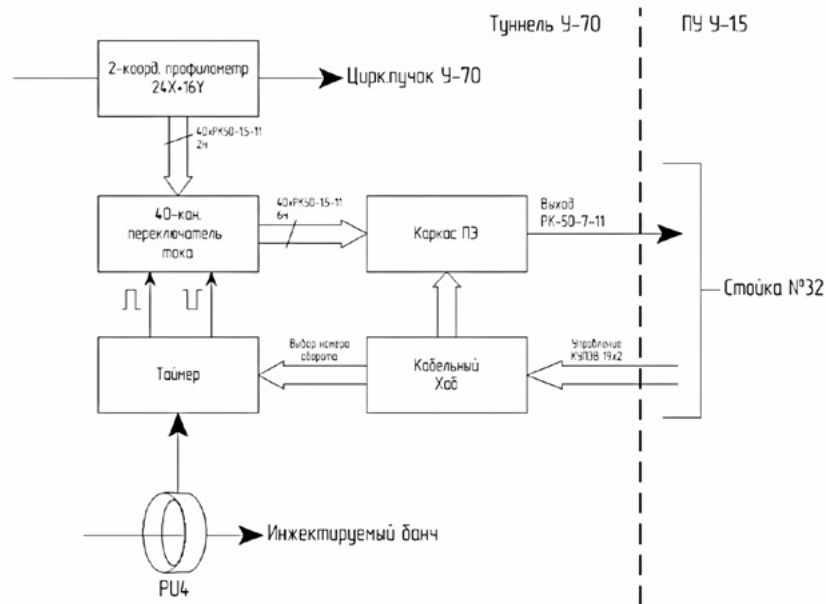


Рис.1. Упрощенная блок-схема головной части измерителя профиля пучка на первых оборотах

Представленный измеритель состоит из:

- двухкоординатного подвижного с дистанционным управлением профилометра (24 канала по горизонтали, шаг 6 мм; 16 каналов по вертикали, шаг 5 мм) с эмиттерными электродами на полиимидной пленке (Al, 0.1 мкм), вносящий ~4.2 мг/см² вещества.
- токового переключателя, регистрирующего токи эмиттеров за время ≤ 6 мкс (время оборота);
- предварительной электроники (интеграторы + мультиплексор) и кабельной системы на базе стандартных компонентов.

Принцип работы профилометра состоит в следующем: инжектируемый банч за счет малого вещества профилометра может совершить десятки оборотов, производя на каждом заряд на электродах (эмиттерах) за счет вторичной электронной эмиссии. Токи с электродов эмиттерной сборки профилометра через токовый переключатель поступают на входы интеграторов, смонтированных в каркасе предварительной электроники. Выходы последних мультиплексируются и последовательно читаются в каркасе MULTIBUS-1, интегрированном в систему управления ускорителя У-70 (СУ У-70).

Токовый переключатель, управляемый местным быстрым таймером, позволяет выбрать номер интересующего оборота в диапазоне 1-8 по желанию.

Измерение профиля пучка на первых оборотах позволит оперативно выявлять и корректировать отклонения, минимизирует потери частиц и повышая эффективность инжекции.

ОПТИМИЗАЦИЯ МАГНИТНОЙ СТРУКТУРЫ ОНДУЛЯТОРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА

Ветюгов И.А., Колюшеноков М.А., Комлев А.С.

НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

Современные научные исследования требуют высокоточных инструментов, среди которых особое место занимают синхротронные технологии. Эти технологии позволяют получать яркое излучение, необходимое для изучения структуры вещества на атомном уровне. Ключевым элементом синхротронных установок являются ондуляторы — устройства, создающие синхротронное излучение за счет периодического отклонения электронного пучка магнитным полем. Эффективность работы ондулятора напрямую зависит от того, насколько точно его пространственное распределение магнитного поля соответствует синусоидальной форме. Однако на практике достижение такой точности сталкивается с рядом трудностей, включая дискретное расположение магнитов, их технологические погрешности и неидеальные характеристики.

Решение задачи оптимального расположения магнитов в ондуляторе требует минимизации отклонений реального магнитного поля от заданной синусоидальной зависимости. Традиционные алгоритмы, описанные в литературе [1–4], не учитывают дискретную природу этой задачи, что ограничивает их эффективность. Генетический алгоритм, благодаря своей способности работать с комбинаторными задачами, рассматривался как перспективное решение [5]. В частности, в работе [6] была предпринята попытка его применения для сортировки магнитов, однако достигнутая точность оказалась недостаточной для практического использования.

В данной работе предлагается усовершенствованный генетический алгоритм, специально разработанный для оптимизации магнитных систем ондуляторов. Этот алгоритм отличается гибкостью при работе с дискретными конфигурациями, что позволяет эффективно перебирать возможные расположения магнитов и минимизировать отклонения поля от синусоидального.

Таким образом, оптимизация магнитной структуры ондуляторов остается актуальной задачей, от решения которой зависит эффективность синхротронных установок. Предложенный генетический алгоритм демонстрирует высокую точность и практическую применимость, открывая новые возможности для проектирования современных источников синхротронного излучения. Его внедрение может способствовать дальнейшему развитию синхротронных технологий и расширению их применения в науке и промышленности.

Список литературы

1. Scott D. Magnet Block Sorting For Variably Polarising Undulators //Proc. EPAC. – 2004. – С. 461-463.
2. Tanaka T., Kitamura H. Effective initial sorting of undulator magnets //Review of Scientific Instruments. – 2000. – Т. 71. – №. 8. – С. 3010-3015. Семашко Н.Н. и др., Инжекторы быстрых атомов водорода, М.: Энергоиздат, 1981, с. 168.
3. Rakowsky G. et al. A simple model-based magnet sorting algorithm for planar hybrid undulators // Proceedings of IPAC. – 2010. – Т. 10.
4. Tanaka T., Seike T., Kitamura H. Undulator field correction by in-situ sorting //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2001. – Т. 465. – №. 2-3. – С. 600-605.
5. Sohrabi M., Fathollahi-Fard A. M., Gromov V. A. Genetic Engineering Algorithm (GEA): An Efficient Metaheuristic Algorithm for Solving Combinatorial Optimization Problems //arXiv preprint arXiv:2309.16413. – 2023.
6. Chubar O. et al. Application of genetic algorithms to sorting, swapping and shimming of the SOLEIL undulator magnets //AIP Conference Proceedings. – American Institute of Physics, 2007. – Т. 879. – №. 1. – С. 359-362.

ИНДУКЦИОННЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ЛОКАЛЬНОГО ПЕРИОДА МАГНИТНОЙ СТРУКТУРЫ ОНДУЛЯТОРА

Самсонов Д.О., Клочков Н.С., Гончаров С.В., Амиров А.А., Комлев А.С.

НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

Ондуляторы на постоянных магнитах, выполненные по схеме Хальбаха [1], являются ключевыми элементами современных источников синхротронного излучения благодаря их компактности и высокой эффективности [2]. Однако производственные допуски, вариации свойств магнитных материалов, а также несовершенства при сборке могут вызывать отклонения значений магнитного поля от результатов расчетной модели, что приводит к нарушению стабильности электронного пучка и ухудшению спектральных характеристик излучения [3,4]. Одним из важнейших параметров ондулятора является длина периода магнитной структуры, точное измерение которого требует методов с высоким пространственным разрешением и чувствительностью.

Традиционные методы, такие как Холловское сканирование [5,6], ограничены размерами чувствительного элемента датчика (порядка 0.1 мм), что недостаточно для выявления мелких вариаций периода [7]. Альтернативные подходы, основанные на перемещении катушки в зазоре ондулятора, чувствительны к механическим вибрациям, что снижает точность измерений [8]. В данной работе предложен и экспериментально апробирован индукционный метод, основанный на регистрации смещения доменной границы в ферромагнитной пластине, помещенной в зазор ондулятора.

Метод предполагает использование никелевой пластины с намотанными силовой и приемной катушками. При помещении пластины в область с нулевой поперечной компонентой магнитной индукции ($B_z = 0$) в ней формируется доменная структура. Пропускание тока через силовую катушку создает дополнительное магнитное поле, вызывающее смещение доменной границы, что приводит к изменению магнитного потока и индуцированию электродвижущей силы (ЭДС) в приемной катушке. Для повышения чувствительности применялся метод lock-in, позволивший выделить слабые сигналы на фоне шума. Экспериментальная установка включала генератор сигналов, усилитель, осциллограф и систему позиционирования.

Испытания проводились на макете ондулятора с длиной периода 27 мм и зазором 12 мм. Измеренная ЭДС варьировалась от 8 мВ до 12 мВ, отражая периодическое изменение магнитного поля. Обработка данных показала, что длина полупериодов составляет 13.37 – 13.72 мм (среднее значение 13.56 мм), что согласуется с результатами Холловского сканирования (13.37 – 13.78 мм, среднее 13.58 мм). Максимальное расхождение между методами составило 100 мкм.

Теоретический анализ подтвердил возможность достижения субмикронного разрешения при использовании материалов с высокой скоростью движения доменных границ, таких как ортоферрит иттрия (YFeO_3 , скорость до 20 км/с). Оптимизация геометрии пластины и использование прецизионных систем позиционирования (≤ 1 мкм) позволят дополнительно повысить точность метода.

Предложенный метод обладает рядом преимуществ: высокое пространственное разрешение (обусловленное малой толщиной доменной границы, ~55 нм для никеля [9]), устойчивость к высоким градиентам магнитного поля и отсутствие необходимости в сложной обработке данных. Перспективы развития включают применение новых материалов, оптимизацию геометрии датчика и внедрение современных алгоритмов обработки сигналов. Метод открывает новые возможности для диагностики магнитных систем ондуляторов, что особенно актуально для создания высокоточных источников синхротронного излучения.

Список литературы

1. K. Halbach, Design of permanent multipole magnets with oriented rare earth cobalt material, Nuclear Instruments and Methods 169 (1980) 1–10. [https://doi.org/10.1016/0029-554X\(80\)90094-4](https://doi.org/10.1016/0029-554X(80)90094-4).
2. N. Majernik, J. Rosenzweig, Design of comb fabricated Halbach undulators, Instruments 3 (2019) 58.
3. V.A. Papadichev, Electron trajectories in undulators, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment 304 (1991) 749–752.

4. K. Chapman, B. Lai, F. Cerrina, J. Viccaro, Modelling of undulator sources, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment 283 (1989) 88–99.
5. S. Marks, Precise integration of undulator Hall probe scans, IEEE Transactions on Magnetics 30 (1994) 2435–2438.
6. L.-L. Gong, W. Chen, W. Kang, S.-C. Sun, Z.-Q. Li, L. Zhang, Y.-F. Yang, H.-H. Lu, X.-Y. Li, S.-T. Zhao, Hall sensor angle error and relative position calibrations for cryogenic permanent magnet undulator of high energy photon source test facility (HEPS-TF), Radiation Detection Technology and Methods 1 (2017) 1–6.
7. C. Wouters, V. Vranković, C. Rössler, S. Sidorov, K. Ensslin, W. Wegscheider, C. Hierold, Design and fabrication of an innovative three-axis Hall sensor, Sensors and Actuators A: Physical 237 (2016) 62–71. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2015.11.022>.
8. S. Casalbuoni, A review of magnetic field measurements of full scale conduction cooled superconducting undulator coils, Superconductor Science and Technology 32 (2018) 023001.
9. R.H. Wade, The determination of domain wall thickness in ferromagnetic films by electron microscopy, Proceedings of the Physical Society 79 (1962) 1237.

ФИЗИЧЕСКОЕ ЯДРО СИСТЕМЫ ДОЗНО-АНАТОМИЧЕСКОГО ПЛАНИРОВАНИЯ СЕАНСОВ ПРОТОННОЙ И ИОННОЙ ЛУЧЕВОЙ ТЕРАПИИ

Цветков Д.А.¹, Селезнева А.Р.¹, Дегтярев И.И.¹, Морозов С.К.^{1,2}

¹НИЦ «Курчатовский институт»-ИФВЭ, Протвино, Россия

² ИАТЭ НИЯУ МИФИ, Обнинск, Россия

В данном докладе представлено описание основных особенностей новейшей версии физического ядра системы планирования сеансов протонной и ионно-углеродной лучевой терапии (СПИЛТ) RIPLAN2025. Программный комплекс RIPLAN2025 предназначен для точного планирования конформного облучения онкологических новообразований методом Монте-Карло в гетерогенных пространственно-неоднородных структурах. Для определения 3D-распределения физической и биологической дозы используются два различных компьютерных метода моделирования взаимодействия пучка протонов и ионов углерода с анатомией пациента. Первый алгоритм основан на использовании прецизионного комплекса переноса излучения RTS&T [1-5]. Второй алгоритм основан на оригинальном методе Ульмера для первичного протонного пучка и адаптированном авторами алгоритме Ульмера для первичного пучка ионов углерода.

В докладе также приводится обзор используемого метода обработки данных формата DICOM, описание развития возможностей физического ядра с целью повышения скорости обработки регулярных геометрических структур большой размерности (воксельных фантомов), отражена методика расчета оптимального (по физической и биологической дозе) профиля линейно-ступенчатого гребенчатого фильтра – устройства пассивного формирования энергетического спектра первичного пучка. Приведены выборочные результаты верификации физического ядра.

Список литературы

1. I.I. Degtyarev, F.N. Novoskoltsev, O.A. Liashenko, E.V. Gulina, L.V. Morozova, RTS&T-2014 code status, Nuclear Energy and Technology, Volume 1, Issue 3, November 2015, Pages 222-225.
2. И.И. Дегтярев, Ф.Н. Новоскольцев, О.А. Ляшенко, Р.Ю. Синюков, Е.В. Алтухова, А.И. Блохин, П.А. Блохин, А.А. Пряничников, RTS&T-2021 — Обновленный комплекс программ статистического моделирования связанного переноса многокомпонентного излучения в гетерогенных пространственно-неоднородных средах, Сборник трудов XI Российской научной конференции «Радиационная защита и радиационная безопасность в ядерных технологиях», Москва, 26—29 октября 2021 года, т. 3, с. 148.
3. V.I. Belyakov-Bodin, V.P. Bolotsky, Yu.V. Katinov, V.N. Nozdrachev, I.I. Degtyarev, H. Yasuda, K.

Niita, Calorimetric-time-of-flight technique for determination of energy spectra of particles from a high intensity pulsed proton target, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Volume 465, Issues 2–3, 11 June 2001, Pages 346-353.

4. A.I. Blokhin, I.I. Degtyarev, A.E. Lokhovitskii, M.A. Maslov, and I.A. Yazynin. RTS&T Monte Carlo Code (Facilities and Computation Methods), in Proceedings of the SARE-3 Workshop, KEK, Tsukuba, Japan, May 1997; INDC(CCP)-426.
5. И.И. Дегтярев, О.А. Ляшенко, А.Е. Лоховицкий, И.А. Язынин, В.И. Беляков-Бодин, А.И. Блохин, Описание моделирования процессов переноса и геометрии в программе RTS&T, ВАНТ, Сер. Ядерные константы, вып. 2, 1999.

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ НЕТОЧНОСТИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ ОНДУЛЯТОРА ТИПА APPLE-2 НА ПАРАМЕТРЫ ЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Соколов Г.Р., Абакумов Я.М., Амиров А.А., Комлев А.С.

НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

Во многих современных научных исследованиях, использующих ондуляторное излучение, важную роль играет возможность управления его поляризацией. Одним из эффективных решений в данном направлении является применение спирального ондулятора типа APPLE-II [1]. Коллективом НИЦ КИ УСИУ был разработан его макет. Конструкция данного ондулятора имеет большое количество подвижных элементов, которые могут оказывать влияние на качество и конфигурацию создаваемого магнитного поля.

Целью данной работы являлся анализ влияния неточности позиционирования его механических элементов конструкции устройства на параметры магнитного поля. Исследовалось изменение конфигурации поля при разном отклонении челюстей от параллельности, а также повторяемость индивидуальной регулировки высоты магнитных блоков.

Конструкция представляет собой две пары магнитных массивов, нижний правый и верхний левый из которых могут перемещаться в продольном направлении. Держатели магнитов позволяют регулировать высоту магнитных элементов и их поперечное расположение.

Конфигурация магнитного поля внутри устройства является спиральной [2]:

$$\vec{B} = iB_{x0} \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda_0}z\right) + jB_{y0} \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda_0}z - \alpha\right)$$

где B_{x0} – амплитуда магнитной индукции в горизонтальной плоскости, Тл;

B_{y0} – амплитуда магнитной индукции в вертикальной плоскости, Тл;

λ_0 – пространственный период ондулятора, м;

α – разность фаз между колебаниями магнитной индукции в горизонтальной и вертикальной плоскостях, °.

Продольное смещение челюстей вызывает изменение фазового сдвига α , что приводит к перестройке конфигурации магнитного поля в зазоре, изменению траектории пучка и, как следствие, к переключению поляризации генерируемого излучения [3].

Измерения магнитного поля проводились на измерительном стенде, основанном на гранитной плите, вдоль которой была установлена направляющая по оси Z. На подвижной каретке, перемещающейся по этой направляющей, были закреплены направляющие по горизонтальной (X) и вертикальной (Y) осям, обеспечивающие трёхкоординатное перемещение датчика Холла. Положение датчика отслеживалось с помощью оптических линеек с разрешением 5 мкм.

Исследовалось влияние отклонения верхней челюсти от параллельности относительно нижней на распределение магнитного поля в зазоре ондулятора. Конструкция устройства позволяет задавать небольшой клин за счёт независимого крепления верхней челюсти на двух винтах. В ходе эксперимента высота челюсти с правой стороны оставалась постоянной, тогда как левый винт вращался, создавая наклон. Как и ожидалось, с увеличением угла между челюстями амплитуда пиков магнитной индукции при пространственном сканировании уменьшалась, причём наибольшее снижение наблюдалось со стороны приподнятого края. Было определено допустимое отклонение от параллельности, при котором сохраняется требуемое качество магнитного поля.

Также исследовалась повторяемость установки вертикального положения магнита. Конструкция держателя включает в себя скользящий клин с малым углом наклона, который при вращении дифференциального винта смещается, что приводит к изменению высоты магнитного блока. Несмотря на высокую точность изготовления держателя, при регулировке наблюдался небольшой механический гистерезис, проявлявшийся в разнице положений магнитного блока при подъёме и опускании на одну и ту же высоту. Исследовалось изменение магнитного поля, в частности высоты отдельных пиков, при регулировке высоты отдельных магнитных блоков.

В ходе работы проведён анализ влияния неточности позиционирования механических элементов конструкции ондулятора типа APPLE-II на параметры магнитного поля. Исследование показало, что отклонение верхней челюсти от параллельности приводит к заметному изменению амплитуды магнитных пиков и влияет на качество магнитного поля в рабочем зазоре. Повторяемость установки вертикального положения магнитных блоков обеспечивается конструкцией держателя со скользящим клином, однако выявлен небольшой механический гистерезис при регулировках. Полученные результаты важны для повышения точности настройки и стабильности магнитного поля в ондуляторе, что способствует улучшению управления параметрами генерируемого излучения.

Список литературы

1. Sasaki S Novel APPLE-type undulator for variable polarization // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A. 1994. Vol. 347, No. 1–3. P. 83–86. DOI: 10.1016/0168-9002(94)90739-0.
2. Clarke J The Science and Technology of Undulators and Wigglers. Oxford: Oxford University Press, 2004. 244 p. ISBN 0198508557.
3. Onuki H, Elleaume P Undulators, Wigglers and their applications. London: Taylor & Francis, 2003. 1st ed. ISBN 0-415-28040-0.

СТАТУС ВАКУУМНОЙ СИСТЕМЫ КОЛЛАЙДЕРА ВЭПП-2000

Тимошенко М. В.¹, Семенов А. М.^{1,2}, Сенченко А. И.¹

¹Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

²Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

ВЭПП-2000 – это уникальный электрон-позитронный коллайдер ИЯФ СО РАН, работающий с 2010 года в диапазоне энергий 250 - 1000 МэВ на один пучок, в котором реализована концепция круглых пучков в месте встречи. В статье описаны последствия, вызванные вакуумной аварией в 2021 г., когда произошло натекание атмосферы в вакуумную систему коллайдера, а также мероприятия, направленные на достижение необходимой для работы на светимость степени вакуума. А именно: откачка атмосферы, прогрев резонатора, обезгаживание пучком. В статье представлен анализ данных, на основе которых вычислена зависимость коэффициента фотостимулированной десорбции остаточного газа со стенок вакуумной камеры из нержавеющей стали от дозы потока фотонов СИ пучка.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЯ МАГНИТНЫХ ВЕЛИЧИН СОСТАВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НАКОПИТЕЛЯ «СИЛА»

Комлев А.С., Самсонов Д.О., Соколов Г.Р., Бекетов Д.Д., Клочков Н.С., Гончаров С.В., Ветюгов И.А., Ромашов А.С., Мухамедов Н.М., Абакумов Я.М., Амиров А.А.

НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

Одной из ключевых подсистем ускорительно-накопительного комплекса «СИЛА» является его магнитная структура, включающая электромагниты, диполи на постоянных магнитах и ондуляторы на постоянных магнитах. Эти элементы выполняют несколько критически важных функций: поворот пучка заряженных частиц, его фокусировку, а также генерацию ондуляторного и синхротронного излучения. Поскольку запланированные параметры синхротрона «СИЛА» четвертого поколения требуют высоких точностей изготовления магнитной системы, необходимы комплексные экспериментальные методики как для входного контроля магнитных свойств материалов, так и для выходного контроля готовых изделий [1,2,3].

К реализованным методикам входного контроля магнитных материалов можно отнести: измерения остаточной величины магнитного момента постоянных магнитов методом вращения измеряемого объекта внутри катушек Гельмгольца и измерения полевых зависимостей намагниченности магнитномягких материалов методом индукционной магнитометрии. Конструктивные особенности измерительного стенда на основе катушек Гельмгольца также позволяют проводить измерения под воздействием внешних механических напряжений, симулируя нагрузки на материалы, которые действуют на них со стороны крепежных элементов конструкций конечных устройств. При помощи реализованной версии индукционного магнитометра возможно не только измерение намагниченности насыщения и коэрцитивной силы магнитномягких материалов, но и проведение спектроскопических измерений с частотой внешнего возбуждения до 20 МГц.

Экспериментальные методики выходного контроля изготовленных магнитных элементов (мультиполей и ондуляторов) включают в себя: Холловскую магнитометрию, измерение мультипольных компонент магнитных линз методом вращающихся катушек, измерение первого и второго интеграла магнитного поля методом натянутой нити (двигающейся в пространстве), измерение локального полупериода магнитной структуры ондулятора методом детектирования движения доменной стенки. Набор реализованных методик позволяет проводить локальные измерения распределения магнитной индукции в пространстве магнитного зазора изготовленных устройств, проводить оценку мультипольных компонент магнитных линз, а также выявлять некомпенсированные дипольные компоненты в магнитных структурах различных типов ондуляторов. Стоит отметить, что методика измерения локального полупериода магнитной структуры ондулятора методом детектирования движения доменной стенки была реализована впервые.

Практическая реализация описанных методик входного и выходного контроля подтверждает техническую возможность достижения требуемых параметров магнитных элементов накопителя «СИЛА» в соответствии с проектными требованиями.

Список литературы

1. Kovalchuk M. V. et al. Fourth-Generation Synchrotron Radiation Source with X-ray Free-Electron Laser SILA: Concept of Accelerator–Storage Complex //Crystallography Reports. – 2022. – Т. 67. – №. 5. – С. 676-683.
2. Levichev E., Vinokurov N. Undulators and other insertion devices //Reviews of Accelerator Science and Technology. – 2010. – Т. 3. – №. 01. – С. 203-220.
3. Elleaume P., Chavanne J., Faatz B. Design considerations for a 1 Å SASE undulator //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2000. – Т. 455. – №. 3. – С. 503-523.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОТКЛИКА НЕЙТРОННЫХ МОНИТОРОВ ПРИ СБРОСЕ ПУЧКА ИОНОВ УГЛЕРОДА НА МИШЕНЬ ПОЛНОГО ПОГЛОЩЕНИЯ

Суманев О.В., Ажгирей И.Л., Байшев И.С., Курочкин И.А., Пикалов В.А.,

НИЦ «Курчатовский институт»- ИФВЭ, Протвино, Россия

Исследование отклика нейтронных мониторов в разных полях необходимо для расчётного бенчмаркинга измерений и для разработки поправок, повышающих точность измерений в нейтронных полях с различным спектром излучения.

Были проведены измерения в зоне радиобиологического стенда на выведенном углеродном пучке ускорителя У-70 НИЦ КИ-ИФВЭ. Пучок ионов углерода с номинальной энергией 400 МэВ/А выводился на фантом, расположенный в центре зала. Для измерений были использованы мониторы GFPC2A, GFPC2B и GFPC, парами в различных сочетаниях.

Приведены сравнения с расчётным моделированием результатов измерений по программе CERN FLUKA.

GEANT4-МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОХОЖДЕНИЯ ЧАСТИЦ ЧЕРЕЗ ВЫВОДЯЩИЙ МАГНИТ УСКОРИТЕЛЯ ЛИНАК НА ВЫВОДЕ 200 МЭВ

Демичев М.А., Кузьменко А.С., Юненко К.Е.

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

Линейный ускоритель ЛИНАК [1] в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ – это установка, предназначенная для использования тестовых пучков электронов для проведения НИОКР в области детекторов элементарных частиц, научно-методических работ по созданию аппаратуры для диагностики электронного пучка, прикладных работ в области радиационного материаловедения, радиобиологии и радиохимии, проведения экспериментов в области ядерной физики, а также для образовательных проектов. В настоящий момент возможен вывод пучка в две тестовые зоны с энергией пучка электронов до 25 МэВ и до 200 МэВ. В течение 2023-24 годов, во время выполнения работ по системам контроля и безопасности ускорителя, запуски пучка были запрещены. В это же время возникла необходимость проверить рабочую характеристику выводящего магнита в тестовой зоне 200 МэВ, для чего были использованы источники Cm-244 и Ra-226 с известной энергией альфа-частиц.

В процессе работы в программе GEANT4 [2] была построена модель вакуумной камеры и полюсного наконечника магнита, а также коллиматора альфа-частиц и твердотельного кремниевго детектора. Проведенное моделирование помогло правильно интерпретировать полученные экспериментальные данные и показало эквивалентность движения электронов и альфа-частиц через выводящий магнит, при условии согласования знака и величины поля. Кроме того были рассчитаны возможные систематические ошибки, связанные с неточностью определения положения детектора и источника, а также позиционирования вакуумной камеры относительно полюсного наконечника магнита. Было исследовано влияние ранее измеренной неоднородности поля на краях магнита на энергию выведенных частиц.

Список литературы

1. A. Trifonov, et al., Linac-200: a new electron test beam facility, Proc. of ICHEP'22 (2023) 1–4.
2. J. Allison, et al., Recent developments in Geant4, Nucl. Instrum. Meth. A 835 (2016) 186–225.

ПОЛУЧЕНИЕ РАДИОИЗОТОПА ^{89}Zr ДЛЯ БИМЕДИЦИНСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА БАЗЕ ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ПРОТОНОВ

Замышляева В.Е., Марков Н.В., Малышев А.А., Кулевой Т.В.

НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

В настоящее время, ввиду увеличивающейся востребованности и распространенности нейтронных исследований, обретают популярность проекты компактных источников нейтронов на базе линейных ускорителей заряженных частиц, такие как российский проект DARIA [1]. Однако нейтронные исследования – не единственное возможное практическое применение такой установки. Разрабатываемый линейный ускоритель протонов также может быть использован в области материаловедения, облучения электронно-компонентной базы, а также в биомедицинских исследованиях, включая наработку целого ряда медицинских радиоизотопов.

Кроме рядовых ПЭТ-изотопов, уже много десятилетий широко применяемых в клинической практике, большой интерес представляют и более новые, такие как цирконий (Zr). Для циркония известно 39 изотопов, один из которых – цирконий-89 (^{89}Zr), наиболее интересный для научного сообщества в аспекте радионуклидной диагностики различных заболеваний, а также при разработке препаратов на основе моноклональных антител, где в последнее время все большую популярность набирает иммуно-ПЭТ [2]. В основе данной технологии лежит использование радионуклидов, которые могут быть присоединены к моноклональным антителам для получения стабильных конъюгатов «in vivo». При этом радиоизотоп должен иметь период полураспада, сопоставимый с характерным временем биораспределения иммуноглобулина. В этом отношении ^{89}Zr является идеальным радиоизотопом для иммуно-ПЭТ, поскольку его период полураспада (78,42 ч) сопоставим с фармакокинетикой моноклональных антител «in vivo» [3].

При облучении протонами исходным материалом для наработки ^{89}Zr является стабильный изотоп иттрия-89 (^{89}Y). Максимум сечения реакции наработки $^{89}\text{Y}(p,n)^{89}\text{Zr}$ расположен на энергии протонов 13 МэВ, что как раз соответствует максимальной энергии протонного пучка ускорителя проекта DARIA.

В работе представлены результаты расчета активности получаемого радиоизотопа ^{89}Zr при облучении прототипа мишенной сборки на основе иттриевой фольги при различных режимах облучения. Расчет проводился как с использованием аналитического подхода, так и в процессе моделирования облучения методом Монте-Карло в программе FLUKA [4]. Также в результате Монте-Карло моделирования проведена оценка радиационных полей в области расположения мишенной сборки. В дальнейшем, помимо технологии иммуно-ПЭТ, полученные результаты могут быть использованы при разработке других медицинских применений ^{89}Zr . Одним из таких применений является создание «тераностической» пары для микросфер ^{90}Y , широко применяемых в настоящее время при трансартериальной радиоэмболизации злокачественных новообразований печени [5]. В ходе выполнения работ было проведено тестовое облучение оксида иттрия протонами с начальной энергией 24,5 МэВ на базе линейного ускорителя протонов И-2.

Список литературы

1. Кулевой Т.В. Проект компактного источника нейтронов DARIA / Т.В. Кулевой, Г.Н. Кропачев, А.Л. Ситников, А.И. Семенников, Вл.С. Скачков, И.В. Кильметова, Р.П. Куйбида, А.В. Козлов, Е.Р. Хабибуллина, А.А. Малышев, С.Н. Андреев, А.О. Гребешков, С.В. Григорьев, Н.А. Коваленко, М.В. Булавин, К.А. Мухин, Е.В. Москвин, К.А. Павлов, Н.А. Григорьева, В.А. Скалыга, И.В. Изотов, А.Ю. Гойхман, Е.А. Кравцов, С.А. Гаврилов. – DOI: 10.1134/S0020441224701239 // Приборы и техника эксперимента. – 2024. – №7, Прил. 1. – С. S16–S26.
2. Бубенщиков В.Б. Хелатирующие препараты для циркония-89 в синтезе радиофармацевтических препаратов: текущее состояние и перспективы развития / В.Б. Бубенщиков, А.А. Ларенков. – DOI: 10.31857/SO132344X22110020 // Координационная химия. – 2022. – Т. 48, №11. – С. 647-668. – URL: Координационная химия. Т. 48, Номер 11, 2022 (дата обращения 09.07.2025).
3. Maria Silvia De Feo. ^{89}Zr -PET imaging in humans: a systematic review / Maria Silvia De Feo et al. // Clinical and Translational Imaging. – 2022. – No. 10. – pp. 23-36.

4. T.T. Böhlen. The FLUKA Code: Developments and Challenges for High Energy and Medical Applications / T.T. Böhlen et al. // Nuclear Data Sheets. – 2014. – No. 120, pp. 211-214.
5. Каприн А.Д. Радиоэмболизация печени: исторические очерки и первые отечественные результаты / А.Д. Каприн и др. // Онкология. Журнал им. П.А. Герцена. – 2021. – Т. 10, №5. – С. 5-12

ВАКУУМНЫЙ РАСЧЁТ РЕГУЛЯРНОГО ПЕРИОДА УСКОРИТЕЛЬНО-НАКОПИТЕЛЬНОГО КОЛЬЦА И ВАКУУМНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ВАКУУМНОЙ КАМЕРЫ

Иванов А. Г., Карпов Д. А., Юрченков М.И., Борисенко К.В., Крижановский С.А.

АО «НИИЭФА», Санкт-Петербург, Россия

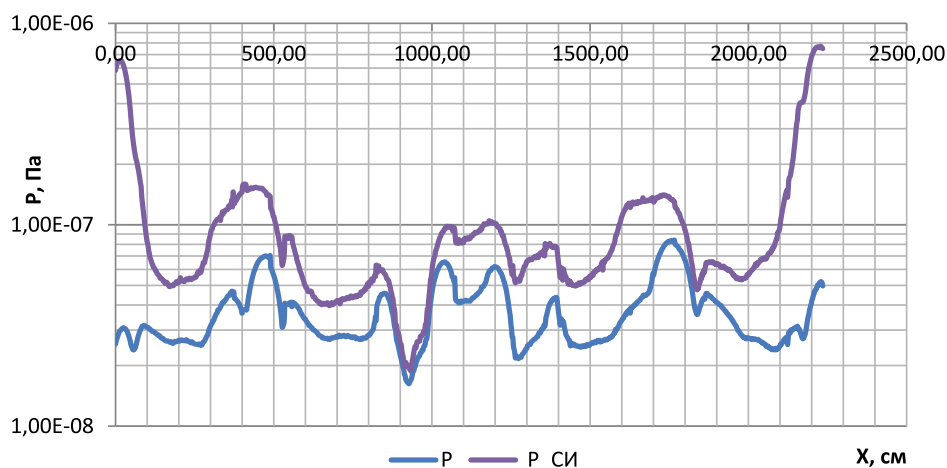
Создаваемый НИЦ «Курчатовский институт» ускорительно-накопительный комплекс 4-го поколения с энергией электронов 6 ГэВ и токе пучка 200 мА должен обеспечить его конкурентоспособные технические характеристики по сравнению с действующими и проектируемыми международными источниками синхротронного излучения. Одним из важнейших технических параметров ускорительно-накопительного комплекса (УНК) является уровень достигаемого вакуума в процессе транспортировки электронного пучка и генерации синхротронного излучения (СИ). Для обеспечения достаточного времени жизни электронов давление в вакуумной камере с пучком электронов должно быть не выше $1 \cdot 10^{-7}$ Па. Генерация синхротронного излучения при поворотах пучка электронов приводит к значительному увеличению газовыделения с поверхности вакуумных камер и поглотителей СИ, что приводит к снижению величины достигаемого без СИ вакуума.

Накопительное кольцо длиной 1110 м состоит из 40 одинаковых регулярных периодов по 14 вакуумных камер в каждом периоде. В этой связи, разработка вакуумной системы и проведение вакуумных расчётов УНК, проводимых в АО «НИИЭФА», ограничивалось рассмотрением его одного регулярного периода.

В докладе представлены: разработанная вакуумная система регулярного периода УНК, результаты численного расчёта методом Монте-Карло распределения давления в регулярном периоде (как при отсутствии, так и при наличии фотон-стимулированной десорбции), результаты поверочных вакуумных испытаний одной из экспериментальных камер (камера №8) регулярного периода УНК.

Распределение давления рассчитывалось в ПО Molflow. Распределение потоков и мощности СИ рассчитывалось в ПО Synrad. Для учёта фотон-стимулированной десорбции рассчитанный в ПО Synrad поток СИ импортировался в ПО Molflow.

На рисунке 1 представлено распределение давления вдоль камер регулярного периода при отсутствии и при наличии СИ (при поглощенной дозе $100 \text{ А} \cdot \text{ч}$).



Распределение давления вдоль камер регулярного периода УНК
при отсутствии и при наличии СИ при поглощенной дозе $100 \text{ А} \cdot \text{ч}$

При отсутствии СИ давление на всём протяжении регулярного периода значительно ниже $1 \cdot 10^{-7}$ Па. При наличии фотон-стимулированной десорбции картина распределения давления существенно изменяется. На некоторых участках регулярного периода давление превышает порог $1 \cdot 10^{-7}$ Па. Для обеспечения давления ниже $1 \cdot 10^{-7}$ Па, возможно, потребуется нанесение на внутреннюю поверхность камер на этих участках специальных покрытий из материала нераспыляемого геттера для снижения давления и предотвращения потери электронов.

Длительные поверочные высоковакуумные испытания экспериментальной камеры №8 регулярного периода с прогревом до 180 °С (без пучка) показали достижение давления в камере менее $1 \cdot 10^{-7}$ Па (предел измерения вакуумметра ПММ-32М-1). Оценка давления в камере по току магниторазрядного насоса (менее 1 мкА) показала достижение уровня давления $<1 \cdot 10^{-8}$ Па.

МАСС-СЕПАРАТОРНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ШИРОКОГО СПЕКТРА ВЫСОКОЧИСТЫХ РАДИОНУКЛИДОВ НА ЦИКЛОТРОНЕ Ц-80

Клопенков Р.М.¹, Акимова А.А.¹, Варламова М.В.¹, Григоренко С.В.¹, Гудков В.И.¹, Зуев Ю.В.¹, Карпенков С.С.¹, Лазарев И.В.¹, Леухина А.Н.¹, Лугин В.П.¹, Мудролюбов В.Г.¹, Осина Ю.К.¹, Пантелеев В.Н.²

¹АО «НИИЭФА», Санкт-Петербург, Россия

²«Курчатовский институт» – ПИЯФ, Гатчина, Россия

Получение высокочистых радионуклидов является критически важной задачей для фундаментальных и прикладных областей современной науки, техники и медицины.

Использование масс-сепараторного комплекса позволяет проводить разделение широкого спектра радионуклидов, сечение наработки которых оптимально в диапазоне энергий циклотрона Ц-80.

Применение масс-сепаратора особенно актуально в тех случаях, когда требуется получение изотопов, выделение которых невозможно радиохимическим способом.

В статье представлены результаты разработки масс-сепараторного комплекса, в состав которого входит мишенная станция, предназначенная для облучения мишени из карбида тория или урана пучком протонов с энергией 80 МэВ, система ионизации и ускорения продуктов ядерных реакций, система пространственного разделения радиоактивных ионных пучков с атомными массами от 6 до 270 а.е., а также система транспортировки целевых радионуклидов к приемным устройствам.

МИШЕННЫЙ КОМПЛЕКС ЦИКЛОТРОНОВ ПРОИЗВОДСТВА АО «НИИЭФА»

Клопенков М.Л., Акимова А.А., Гнутов П.А., Клопенков Р.М., Кравчук К.А., Степанов Д.Н.

АО «НИИЭФА», Санкт-Петербург, Россия

Разработан мишенный комплекс, являющийся составной частью циклотронных комплексов серии СС и предназначенный для наработки радионуклидов в твердой (Cu-64, Zr-89, I-123, I-124, Ga-67, Ga-68, Tl-201, Ge-68), жидкой (F-18, N-13, Ga-68) и газовой (C-11) фазах с заданной активностью.

Мишенный комплекс предназначен для применения в циклотронных комплексах с диапазоном энергии протонов 12÷30 МэВ.

Мишенный комплекс обеспечивает выполнение следующих операций:

- автоматическую пневмотранспортировку твердотельных мишеней из радиохимических боксов, их загрузку в мишенное устройство и возврат после облучения;
- автоматическую заправку жидкостных и газовых мишенных устройств стартовыми жидкостями и газами соответственно и отправку облученных жидкостей и газов в соответствующие радиохимические боксы.

Представлены конструкции твердотельных мишеней и соответствующих транспортировочных шаттлов для наработки радионуклидов Cu-64, Zr-89, I-123, I-124, Ga-67, Ga-68, Tl-201, Ge-68.

Описана конструкция твердотельного мишенного устройства для наработки радионуклидов в твердой фазе, алгоритм заправки мишенного шаттла в мишенное устройство и его выгрузки из мишенного устройства после облучения. Все перечисленные радионуклиды в твердой фазе нарабатываются в одном и том же мишенном устройстве.

Представлена система пневматической транспортировки облученных твердотельных мишеней.

Описаны разработанные конструкции жидкостного и газового мишенных устройств для наработки радионуклидов в жидкой и газовой фазах, блоки автоматической заправки жидкостного и газового мишенных устройств.

Описана система обеспечения рабочими средами (вода, газы, сжатый воздух), предназначенная для охлаждения мишени в процессе облучения.

Мишенный комплекс полностью автоматизирован и управляется с компьютера АСУ циклотронного комплекса.

РАСЧЁТ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНОГО ДАВЛЕНИЯ В УСКОРИТЕЛЬНОМ ОБЪЁМЕ ЦИКЛОТРОНА MSC-230

Пальников И.М., Власов А.И., Федоренко С.Б.

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

Цель работы – расчёт остаточного давления в ускорительном вакуумном объёме циклотрона MSC-230 и выбор турбомолекулярного насоса для достижения рабочего давления Па. Основным источником газовой нагрузки является поток водорода от ионного источника, расположенного внутри ускорительной камеры.

На первом этапе выполнен аналитический расчёт суммарного газового потока в камеру, включающего десорбцию с внутренних поверхностей, натекание через уплотнения и ионный поток. Для водорода при температуре 293 К определены средняя длина свободного пробега и число Кнудсена. По расчёту оценена требуемая производительность насоса.

Для подтверждения результатов выполнено моделирование в COMSOL Multiphysics методом конечных элементов. Через интерфейс свободно-молекулярного течения рассчитано распределение давления по поверхностям. Рассматривались различные варианты размещения насосов относительно ярма магнитопровода. Особое внимание уделено области вдоль дефлектора как наиболее чувствительной к локальному повышению давления.

Дополнительно выполнен расчёт методом Монте-Карло в MolFlow. Для обработки его данных разработан скрипт на MATLAB, обрабатывающий значения давления и строящий двумерные карты. Анализ показал, что оптимальной является конфигурация с перекрёстным размещением насосов на расстоянии 1 м от ярма, что снижает давление в области дефлектора и защищает насос от рассеянного магнитного поля.

Результаты представлены в виде таблиц и цветных карт распределения давления. Полученные данные могут быть использованы при проектировании или модернизации вакуумных систем циклических ускорителей.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УГЛЕРОДНЫХ ПЕРЕЗАРЯДОЧНЫХ ФОЛЫГ ПРОИЗВОДСТВА АО «НИИЭФА» ДЛЯ ЦИКЛОТРОНОВ SIEMENS И IBA

Барышников Ю.С., Гольтяев И.В., Захаров М.А.

АО «НИИЭФА», Санкт-Петербург, Россия

Были проведены исследования возможности применения углеродных перезарядочных обдирочных фольг производства АО «НИИЭФА» для циклотронов производства Siemens и IBA взамен углеродных фольг, поставляемых этими компаниями. Отечественные аналоги показали свою пригодность для работы на таких циклотронах, исследования проводились при энергиях пучка до 18 МэВ и токах пучка до 100 мкА. На российских циклотронах были испытаны фольги до 80 МэВ и токах 200 мкА, при таких режимах фольги АО «НИИЭФА» тоже показали свою пригодность и устойчивость при работе. Коэффициент трансмиссии (коэффициент отношения тока на обдирочной фольге к току на облучаемой мишени) пленки производства НИИЭФА, испытанной для циклотрона Siemens, оказался выше, чем у оригинальной перезарядной обдирочной фольге производства Siemens.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ ЖИЗНИ ПЕРЕЗАРЯДНЫХ УГЛЕРОДНЫХ ФОЛЫГ С ПОМОЩЬЮ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧНОГО ПУЧКА ЭЛЕКТРОНОВ

Гольтяев И.В.^{1,2}, Барышников Ю.С.¹, Григоренко С.В.¹, Вересов О.Л.¹, Лазарев И.В.¹, Родионов И.А.^{1,3}, Люллин З.Г.^{1,2}, Кострин Д.К.², Бойко А.В.^{1,3}

¹АО «НИИЭФА», Санкт-Петербург, Россия

²СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, Россия

³СПбПУ, Санкт-Петербург, Россия

В настоящее время одно из актуальных направлений исследований в ускорительной технике связано со способами увеличения срока службы перезарядных углеродных фольг. В АО «НИИЭФА» предложена методика экспериментального определения времени жизни углеродных перезарядных фольг, изготовленных способом вакуумно-дугового напыления и применяемых в ускорителях ионов. Методика основана на использовании облучения фольги электронным пучком низких энергий. Данное решение имеет физическое обоснование: основная мощность, выделяемая при прохождении пучка ускоренных протонов через углеродную фольгу, связана с взаимодействием протонов с электронной оболочкой атомов; взаимодействие с ядрами атомов пренебрежимо мало. С целью прогноза результатов проведенных экспериментов, был произведен теоретический расчет выделяемой тепловой мощности на углеродной фольге при прохождении через фольгу пучка ускоренных электронов. Для реализации предложенной методики сконструирован и собран испытательный стенд. Проведены сравнительные электронно-микроскопические исследования и рентгеновский спектральный микроанализ элементного состава образца углеродной фольги плотностью 290 мкг/см² до и после экспериментального воздействия электронным пучком. Исследован характер рельефа и элементный химический состав поверхности после воздействия электронного пучка на фольгу. Выполненная в рамках данных исследований работа позволяет экспериментально определить срок службы углеродных фольг, изготовленных при различных технологических параметрах напыления, без использования полноценного ускорителя.

РАЗРАБОТКА ИНТЕГРИРУЮЩЕГО ТРАНСФОРМАТОРА ТОКА ДЛЯ ПИКОСЕКУНДНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ СГУСТКОВ

Полоник И.И., Гаврилов С.А.

Институт ядерных исследований РАН, Москва, Россия

Заряд в импульсе является одним из ключевых параметров пучка для диагностики в ускорителях заряженных частиц. Интегрирующие трансформаторы тока применяются для проведения неразрушающих измерений зарядов коротких импульсов длительностью менее 1 нс, данные датчики обладают линейностью и независимостью отклика от продольной структуры первичного импульса, однако требуют проведения предварительной калибровки.

С использованием методов численного 3D-моделирования работы датчика были рассчитаны частотный и временной отклики датчика, выявлено влияние ключевых параметров датчика: количества витков измерительной обмотки, количества активных и пассивных ферритовых сердечников и емкости датчика. Рассмотрена зависимость отклика датчика от материала ферритовых сердечников, вызванная частотной зависимостью магнитной проницаемости ферритов.

Для предварительной калибровки опытного образца в лабораторных условиях по продетому через корпус датчика проводу подавался сигнал с генератора субнаносекундных импульсов, имитирующий ток пучка. Отклик датчика регистрировался с помощью цифрового осциллографа, для усиления сигнала использовался трансимпедансный усилитель собственного производства ИЯИ РАН. В ходе лабораторных испытаний была подтверждена независимость формы отклика датчика от временной структуры первичного импульса и линейная зависимость амплитуды отклика от заряда в импульсе, по результатам испытаний чувствительность датчика составила 2.7 мВ/пКл.

На данный момент датчик установлен в диагностической камере тестового стенда фотопушки для комплекса СИЛА, успешно прошел вакуумные испытания и ожидает проведения испытаний на пучке.

ХОД РАБОТ ПО ИЗГОТОВЛЕНИЮ СОСТАВНЫХ ЧАСТЕЙ УСКОРИТЕЛЯ-ИНЖЕКТОРА ПРОТОНОВ И ЛЕГКИХ ИОНОВ ДЛЯ КОМПЛЕКСА СКИ

Дмитриев М.С.¹, Абакумов Я.М.¹, Акифьев А.А.², Антонова К.К.³, Антонович Д.А.⁴, Асафьев В.В.¹, Авксентьев С.Д.¹, Бендин С.С.¹, Бондаренко Т.В.¹, Галкин В.Т.¹, Гусарова М.А.¹, Дьяконов М.В.¹, Евсеев М.А.¹, Жигайлова М.И.¹, Завьялов Н.В.², Залесский В.Г.⁴, Иванов О.А.¹, Индюшный Е.Н.¹, Ицук Д.И.¹, Калиева И.Р.¹, Ключевская Ю.Д.¹, Козловский К.И.¹, Краснов А.С.¹, Лазарев Г.В.¹, Лалаян М.В.¹, Лозеева Т.А.¹, Лозеев Ю.Ю.¹, Макаров А.В.¹, Малашин М.В.¹, Машагин А.В.², Мацевский С.В.¹, Мелехов А.П.¹, Могилевский С.В.¹, Мурыгин О.В.¹, Новиков Г.Г.¹, Опекунов А.М.², Опеньишев П.В.², Осин Р.А.¹, Панишев А.С.¹, Плотников Е.А.¹, Поболь А.И.⁴, Поболь И.Л.⁴, Полозов С.М.¹, Поляков Л.Е.², Пономаренко А.Г.¹, Поцелов Н.В.¹, Рациков В.И.¹, Рыбickaя Т.В.³, Самошин А.В.¹, Сметанин М.Л.², Смирнов С.А.¹, Соломатин М.А.¹, Старостенко А.А.³, Стеблин Н.А.¹, Страхов П.В.¹, Тельнов А.В.², Труфанов Д.С.², Туманов С.А.¹, Тумкин А.Д.², Фильчагин С.В.², Шаравин Э.А.², Шатохин В.Л.¹, Шиканов А.Е.¹, Юрин И.А.¹

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

²Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики (РФЯЦ-ВНИИЭФ), г. Саров, Россия

³Институт ядерной физики имени Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

⁴ГНУ Физико-технический институт национальной академии наук Беларуси, Минск, Белоруссия

В настоящее время во ФГУП «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики» завершается проектирование и начато строительство «Синхротронного комплекса испытательного» - нового российского ускорительного центра для проведения прикладных исследований на пучках ионов. В состав комплекса должны войти два синхротрона, два линейных ускорителя-инжектора, а также большое число экспериментальных станций различного назначения. Линейный ускоритель протонов и легких ионов ЛУ1 на энергию 7,5 МэВ/нуклон предназначен для ускорения ионов от протонов до кислорода и их инжекции в бустерный синхротрон. В состав ускорителя включены несколько источников ионов, ускоритель-группирователь с ПОКФ и 14 резонаторов ИН в регулярной части, а также несколько группирователей, каналы транспортировки пучка и другие устройства и системы.

В докладе будут представлены результаты разработки основных элементов ускорителя-инжектора и информация о ходе изготовления составных частей и комплектующих для него. В настоящее время идет изготовление резонатора с ПОКФ, изготовлены тестовые экземпляры ИН резонаторов, произведена большая часть высокочастотного оборудования (петли ввода ВЧ мощности, подстроечные плунжеры, измерительные антенны и ВЧ измерительные модули, задающий ВЧ генератор) для резонаторов. Изготовление квадрупольных и дипольных магнитов перешло в серийную стадию. Изготовлено около половины стоек для автоматизированной системы управления, плат размножения сигналов и тайминга.

ЭЛЕМЕНТЫ ТРАЕКТОРНОГО АНАЛИЗА НА БАЗЕ ТРЕХМЕРНОЙ КАРТЫ ПОЛЯ ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ КОНСТРУКЦИИ ДИПОЛЬНЫХ МАГНИТОВ УНК-СИЛА

*Овсянников А.Д.², Гавриш Ю.Н.¹, Еникеев Р.Ш.¹, Зуев Ю.В.¹, Казаченко Н.И.¹,
Князев Н.А.¹, Кухтин В.П.¹, Ламзин Е.А.¹, Мельников Д.Д.¹, Неженцев А.Н.¹,
Сычевский С.Е.¹, Филатов О.Г.¹, Овсянников Д.А.², Иваненко И.А.³, Казаринов Н.Ю.³,
Ромашов А.С.⁴, Самсонов Д.О.⁴, Соколов Г.Р.⁴, Юрин И.А.⁴, Комлев А.С.⁴, Амиров А.А.⁴*

¹АО «НИИЭФА», Санкт-Петербург, Россия

²СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия

³ОИЯИ ЛЯР СФУ, Дубна, Россия

⁴НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

Характерной особенностью разрабатываемого в Национальном центре «Курчатовский институт» синхротронного источника нового поколения УНК-СИЛА является применение в его накопительном кольце большого числа дипольных магнитов, использующих в качестве источников поля высококоэрцитивные постоянные магниты. Согласно Техническому заданию, требуемая точность формирования магнитного поля в рабочих областях длинных диполей составляет $2 \cdot 10^{-4}$, что предъявляет жёсткие требования к разрабатываемой конструкции магнитов.

Проект «СИЛА» (синхротрон-лазер) превосходит по техническим характеристикам действующие и проектируемые международные источники синхротронного излучения. Данный комплекс представляет собой комбинацию накопительного кольца и лазера на свободных электронах. Магнитная структура накопительного кольца УНК-СИЛА аналогична структуре европейского источника ESRF-EBS. Отличия заключаются в увеличении количества суперпериодов и, соответственно, в разных параметрах магнитных элементов (поле, градиент, длина), в длине и угле поворота суперпериода. Также в центральную часть суперпериода был добавлен короткий диполь, что позволило увеличить число каналов вывода фотонов.

Разработка поворотных диполей на основе постоянных магнитов является сложной инженерно-технической задачей, включающей в себя, в том числе и обеспечение однородности магнитного поля. Для минимизации рисков несоответствия между реальными характеристиками магнитов и их теоретическими моделями необходимы анализ и верификация проектируемых конструкций. Изготовление дипольных магнитов происходит на основе параметрических пространственных моделей, учитывающих измеренные или расчетные свойства магнитной системы. Это позволяет проводить трехмерное компьютерное моделирование движения пучка заряженных частиц в канале магнита.

Важной составляющей оптимизации и обоснования конструкции служит анализ оптических параметров магнитной системы, полученных путем численного моделирования динамики заряженных частиц с применением специализированных алгоритмов. В исследовании использовался комбинированный подход: комплекс MAD-X применялся для предварительного анализа упрощенных одномерных моделей магнитного поля в диполях, а разработанный авторами программный комплекс – для детального трехмерного моделирования, учитывающего пространственное распределение поля, которое соответствует выбранной конструкции дипольных магнитов. В работе кратко изложены результаты, полученные обоими методами, что позволяет провести сравнительный анализ данных и подтвердить их достоверность.

НИЗКОЧАСТОТНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ПУЧКА ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ НА ОДИНАРНОМ И ДВОЙНОМ СЕТЧАТОМ ЭКРАНЕ

Симаков Е.С., Тюхтин А.В., Галямин С.Н.

СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия

Рассматривается излучение тонкого пучка заряженных частиц, движущегося в присутствии планарной сетчатой структуры с квадратными ячейками. Сетка состоит из тонких проводников, которые имеют гальванический контакт в перекрестиях. Предполагается, что рассматриваемые длины волн намного больше размера ячейки (так называемое «длинноволновое» излучение), который, в

свою очередь, существенно превышает поперечный размер проводника. В рассматриваемом приближении сетчатый экран описывается усредненными граничными условиями (УГрУ) М.И. Конторовича [1]. Отметим, что ранее метод УГрУ был успешно применен в ряде «длинноволновых» задач (см., в частности, статьи [2,3]).

В первой задаче анализируется излучение пучка, пролетающего сквозь одинарный сетчатый экран. С помощью метода УГрУ ищется общее аналитическое решение задачи, которое затем исследуется асимптотически. Показано, что излучение состоит только из объемных (сферических) волн. Получены Фурье-образы компонент электромагнитного поля, проанализированы зависимости энергетических характеристик от свойств пучка и геометрических параметров структуры. В частности, показано, что при определенных параметрах сетки можно генерировать излучение, практически неотличимое от излучения в случае идеально проводящей сплошной поверхности.

Во второй задаче анализируется излучение пучка, пролетающего сквозь двойной сетчатый экран. Предполагается, что сетки расположены параллельно друг другу, а расстояние между ними существенно превышает размер ячейки. Как и в предыдущей задаче, общее аналитическое решение ищется с помощью метода УГрУ и затем исследуется асимптотически. Показано, что в области между экранами пучок частиц генерирует ряд волноводных мод (цилиндрические волны). При этом, в зависимости от параметров структуры, возможна ситуация, когда возбуждается только одна распространяющаяся мода. За пределами этой области данные волны также возбуждаются, но их амплитуды относительно малы (пропорциональны малому параметру задачи) и каждая мода существует в определенном диапазоне углов. Отдельно исследуются сферические волны. Показано, в частности, что в области между экранами на относительно большом расстоянии от траектории движения пучка сферическими волнами можно пренебречь, в то время как за пределами этой области поле излучения может состоять только из сферических волн.

Полученные результаты могут быть полезны для разработки методов детектирования и диагностики пучков частиц. Важно отметить, что применение сетчатого экрана, состоящего из тонких проводников, не требует точного позиционирования пучка в плоскости экрана, а методы диагностики могут быть неинвазивными.

Список литературы

1. М.И. Конторович, М.И. Астрахан, В.П. Акимов, Г.А. Ферсман. Электродинамика сетчатых структур. М.: Радио и связь, 1987.
2. Э.Г. Доильница, А.В. Тяхтин. Особенности селективного экранирования волноводных мод системой двух сеток с квадратными ячейками. Радиотехника и электроника. Т. 54 (10), с. 1232-1236 (2009).
3. A.V. Tyukhtin, V.V. Vorobev, S.N. Galyamin. Radiation excited by a charged-particle bunch on a planar periodic structure. Phys. Rev. ST-AB. Vol. 17, 122802 (2014).

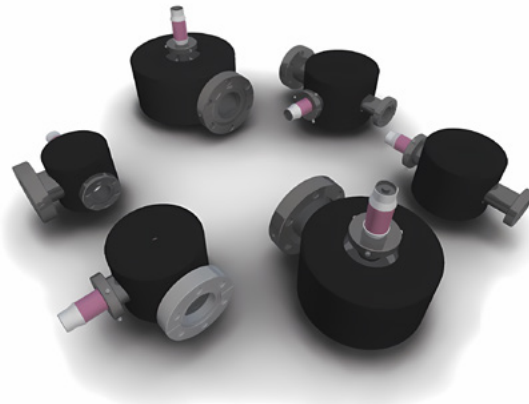
НОВЫЕ РАЗРАБОТКИ СВЕРХВЫСОКОВАКУУМНЫХ НАСОСОВ ДЛЯ ЦКП «СКИФ»

Куныгин К.А., Нечаев П.Г.

ООО «Оптикон», Новосибирск, Россия

В связи со сложностью приобретения, икратно возросшей ценой, импортных высоковакуумных насосов для ЦКП «СКИФ» потребовалось создать аналогичные отечественные насосы. По итогам работы были разработаны триодные ионно-геттерные насосы – аналоги фирмы Gamma Vacuum, насосы с нераспыляемым геттером на базе отечественных газопоглотителей из материала Ti-Zr-Al фирмы АО «Полема» – аналоги фирмы SAES Getters, а также комбинированные насосы, состоящие как из диодных, так и триодных насосов в тандеме с насосами с нераспыляемым геттером. За короткое время было изготовлено и поставлено порядка тысячи насосов разных типов и производительности. Для откачки небольших объемов, таких как шибберные затворы, были разработаны малогабаритные Noble диодные и триодные насосы со скоростью откачки 6.3 л/с. Экспериментальные

результаты измерения быстроты откачки от давления, по азоту и аргону, для данных насосов, приводятся в настоящей работе. Наша компания не ограничилась разработкой насосов с запрошенной скоростью откачки, а создала целую линейку малогабаритных магниторазрядных насосов с производительностью от 0,5 л/с до 25 л/с по азоту (рис.1). Отличительной особенностью конструкции малогабаритных насосов является совмещение панцирных магнитопроводов с цилиндрическим корпусом, что резко ограничивает величину магнитных полей рассеивания. Все высоковакуумные насосы, представленные в статье, серийно изготавливаются фирмой ООО «Оптикон» (г. Новосибирск, Россия.)



Малогабаритные магниторазрядные насосы

РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ КИКЕР-МАГНИТА ПРОТОННОГО СИНХРОТРОНА

*Акифьев А.А., Моисеева П.С., Опекунов А.М., Поляков Л.Е., Сметанин М.Л.,
Тресков С.М., Труфанов Д.С., Юрьев А.Л.*

Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики (РФЯЦ-ВНИИЭФ), г. Саров, Россия

Одной из составных частей синхротронных ускорителей является система экстракции пучка. Чтобы доставить пучок из синхротрона на испытательную позицию, его необходимо сместить с орбиты накопительного кольца в каналы вывода. Для этой цели можно использовать кикер-магнит [1]. Режим работы таких магнитов может представлять собой как одиночное срабатывание, обеспечивая однооборотный вывод всего пучка, так и обеспечивать медленный многооборотный вывод одного или нескольких банчей за срабатывание.

Предложенный кикер-магнит набирается из идентичных модулей, представляющих собой ферритовый магнитопровод с одновитковой обмоткой индуктивностью до 700 нГн. Система питания кикер-магнита основана на формирующих линиях, питаемых высоковольтным генератором. Коммутирующим элементом в цепи является тиратрон [2].

В данной работе приведены результаты расчетов кикер-магнита системы экстракции пучка протонного синхротрона. Приведены результаты расчетов характеристик магнитных полей для различных режимов работы. Проведена оценка смещения пучка в рассматриваемом магнитном поле. Рассмотрены предполагаемая конструкция и характеристики источника питания кикер-магнита. Приведены результаты расчетов режимов работы системы питания кикер-магнита.

Список литературы

1. Barnes M.J. et al. Injection and extraction magnets: kicker magnets // arXiv preprint arXiv: 1103.1583. – 2011.
2. Barnes M. Kicker systems // CERN Yellow Reports: School Proceedings. – 2018. – Т. 5. – С. 229-283

БЛОК УПРАВЛЕНИЯ АТТЕНЮАТОРОМ ТРАКТА ВОЗБУЖДЕНИЯ КЛИСТРОНА УСКОРИТЕЛЯ ЛИНАК

Надгериева С.Д., Журавлев П.П., Кобец В.В.

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

В системе высокочастотного питания ЛИНАК в цепях возбуждения перед клистроном устанавливаются аттенюаторы, которые служат для управления уровнем СВЧ-сигнала. Эти аттенюаторы (далее пойдет речь на примере одного аттенюатора) позволяют нормировать СВЧ-мощность, подаваемую на входы клистронов [1].

В настоящее время в тракте возбуждения клистрона ЛИНАК применяется переменный аттенюатор, обеспечивающий ручную регулировку уровня СВЧ-мощности [2]. Имеется штатный аттенюатор, реализованный на четырех pin-диодах. На данный момент на ускорителе ЛИНАК он не используется, так как система управления им морально устарела. Управление блоком и его настройка осуществляется с помощью переключателей, кнопок, переменных и подстроечных резисторов и прочими элементами управления. Часть из них расположена на плате управления внутри блока, что крайне неудобно при наладочных работах. Отсюда возникает потребность в определении нового алгоритма и концепции управления аттенюатором с возможностью дистанционного управления им, контроля его состояния и подключения к АСУ ускорителем. При существующей структуре блока управления это сделать невозможно.

В ходе работы были разработаны алгоритм (Рис. 1. Блок-схема алгоритма управления аттенюатором Рис. 1) и схема управления аттенюатором с возможностью дистанционного управления, для организации которого было принято решение внедрить цифровые методы управления.

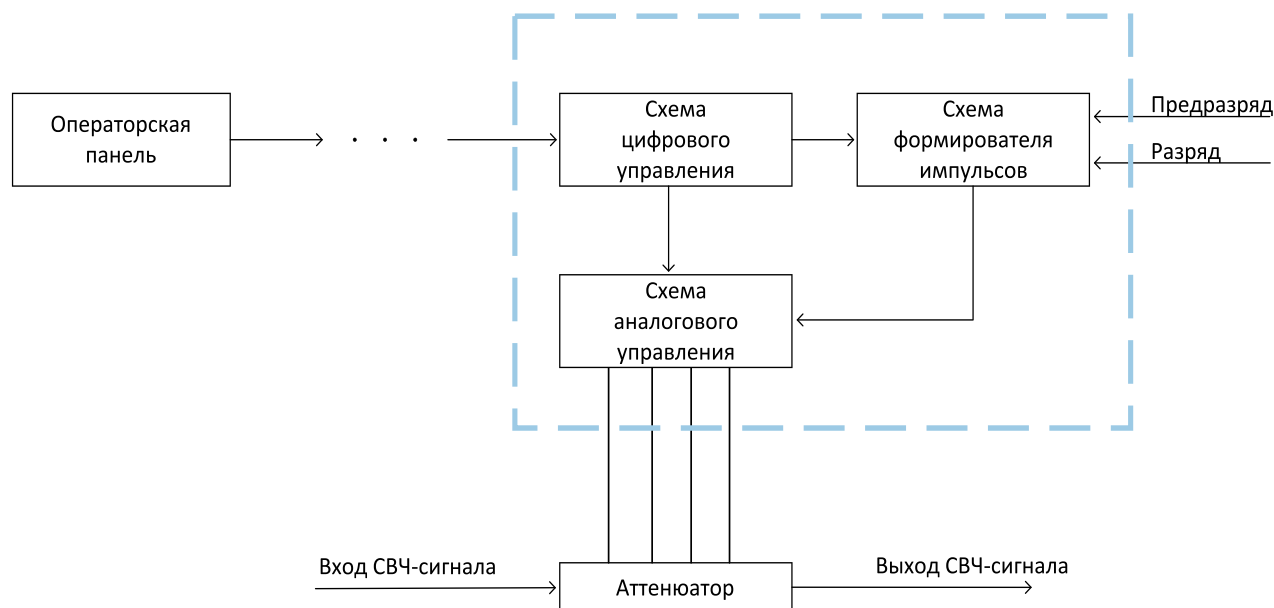


Рис. 1. Блок-схема алгоритма управления аттенюатором

На базе разработанной схемы была разработана топология печатной платы. Печатная плата была смонтирована и передана для отладки и испытания, с последующим тиражированием (Рис. 2). Разработано ПО, управляющее микроконтроллером блока управления аттенюатором [3]. Проведено тестирование разработанного ПО в среде Proteus Professional. Результаты тестирования подтвердили работоспособность программы и правильность реализации заданных функций.

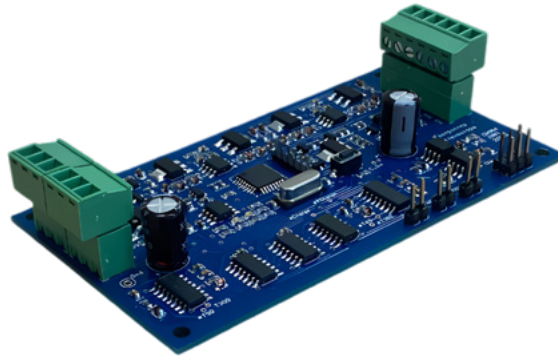


Рис. 2. Смонтированная плата управления аттенуатором

Список литературы

1. Лебедев И. В. Техника и приборы сверхвысоких частот. Т. I. Под ред. Н. Д. Девяткова. Учебник для вузов по специальности «Электронные приборы», М., «Высшая школа», 1970. 440с.
2. Фуско В. СВЧ цепи. Анализ и автоматизированное проектирование / В. Фуско; Перевод с англ. А. А. Вольман, А. Д. Муравцова; Под ред. В. И. Вольмана. – Москва: Радио и связь, 1990. – 287 с.
3. Евстифеев А.В. Микроконтроллеры AVR семейства Mega. Руководство пользователя. – М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2007. – 592с.: (Серия «Программируемые системы»).

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЗОНАНСНОЙ СИСТЕМЫ И ДИНАМИКА ПУЧКА МОДИФИЦИРОВАННОГО ЦИКЛОТРОНА СС-18

Горбунов И.В., Галчук А.В., Данилец Л.А., Мудролюбов В.Г., Осина Ю.К.

АО «НИИЭФА», Санкт - Петербург, Российская Федерация

В АО «НИИЭФА» разрабатывается новая модификация циклотрона СС-18 с внутренним источником и горизонтальной медианной плоскостью. Резонансная система, состоящая из двух четвертьволновых резонаторов, полностью размещается в вакуумной камере циклотрона. Штоки и баки резонаторов расположены в верхних отверстиях двух оппозитных долин электромагнитного поля. Рабочая частота системы 40,68 МГц, мощность активных потерь 11 кВт при амплитуде ВЧ напряжения 40 кВ. Модель резонансной системы представлена на рисунке 1.

При расчёте топологии электромагнитных полей и динамики ионов водорода особое внима-

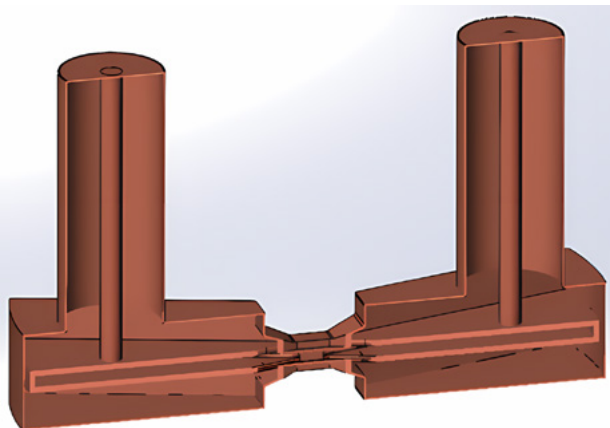


Рис. 1. Модель резонансной системы

ние было уделено вертикальной компоненте электрического поля, возникающей за счёт несимметричного подключения штоков к дуантам. Амплитуда вертикальной компоненты напряжения между верхней и нижней крышками дуанта достигает 2-3 кВ в зоне подключения штока и уменьшается до нуля в местах гальванического контакта крышек.

Исследована динамика пучка в центральной области и в основной зоне ускорения. Расчёты показали отсутствие существенных изменений в коэффициенте захвата, разбросе центров орбит и амплитуде вертикальных колебаний. Разработана система охлаждения резонаторов. Наиболее серьёзной проблемой

явилось охлаждение штоков, в которых выделяется около 70% мощности активных потерь.

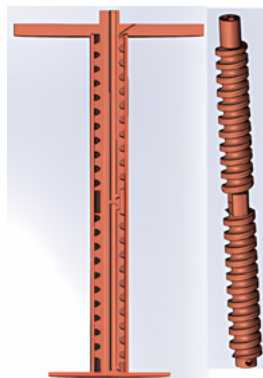


Рис. 2. Модель штока

Кроме того, через отверстия в штоках необходимо вывести трубки охлаждения дуантов. Предложена и исследована с использованием программного комплекса Ansys Fluent 2021 R1 конструкция штока, показанная на рисунке 2.

Шток представляет собой медную трубу, во внутренней полости которой размещён составной шнек. Максимальное расчётное увеличение температуры (на фланце, соединяемом с закороткой) не более 10 °С. Расчётные термдеформации центральной области не превышают 200 мкм.

МАГНИТООПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА КАНАЛА ТРАНСПОРТИРОВКИ ПУЧКА ДЛЯ ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ ПРИКЛАДНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Збруев Р.А., Полозов С.М.

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

Кафедра Электрофизических установок НИЯУ МИФИ в данный момент реализует проект ускорителей для проведения прочностных исследований электронных компонентов к воздействию излучением [1]. Для осуществления экспериментов в данной области на ускорители заряженных частиц накладываются дополнительные требования к форме и однородности пучка. Таким образом, должна быть предусмотрена магнитооптическая система, с помощью которой можно обеспечить пучок необходимого качества на облучаемых образцах. Были рассмотрены комбинации квадрупольных и секстипольных линз, при этом секстипольные линзы располагали под различными углами относительно оси канала транспортировки. Расчёты проводились с использованием пакета BEAMDULAC-BL [2,3]. С помощью BEAMDULAC-BL проведен расчет динамики ускоряющей структуры, результаты которого являются начальными условиями для данной работы. Исследование включало в себя подбор длины магнитов и их расположения, определение значения их градиентов.

Список литературы

1. Zbruev R. A. et al. Developing a Two-Section 8-MeV Linear Electron Accelerator for Applied Research // Physics of Atomic Nuclei. – 2024. – Т. 87. – №. 11. – С. 1676-1681.
2. Bondarenko T. V., Masunov E. S., Polozov S. M. BEAM-DULAC-BL Code for 3D Simulation of Electron Beam Dynamics Taking into Account Beam Loading and Coulomb Field // Вопросы атомной науки и техники. – 2013. – V. 6. – P. 114–118.
3. Masunov E. S., Polozov S. M. BEAMDULAC code for numerical simulation of 3D beam dynamics in a high-intensity undulator linac // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2006. – Т. 558. – №. 1. – С. 184-187.

НАСТРОЙКА СВЧ СИСТЕМЫ ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ИНЖЕКТОРА ЦКП «СКИФ»

*Смирнов К.И., Левичев А.Е., Никифоров Д.А., Абед Н., Федоров В.В., Арсеньтьева М.В.,
Синяткин С.В., Барняков А.М., Самойлов С.Л.*

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

В рамках реализации центра коллективного пользования Сибирский Кольцевой Источник Фотонов (ЦКП «СКИФ») [1] был введен в эксплуатацию линейный ускоритель инжектора [2]. Данный ускоритель должен формировать и ускорять электроны до энергии 200 МэВ, после чего они поступают в синхротрон-накопитель с энергией до 3 ГэВ. Накопленные и ускоренные частицы инжектируются в основное кольцо.

Линейный ускоритель проекта ЦКП «СКИФ» (Линак-200) состоит из пяти регулярных ускоряющих структур (УС) [3], предускорителя-группирователя, источника электронов на основе ВЧ пушки, магнитной системы, а также волноводного сверхвысокочастотного (СВЧ) тракта, занимающегося доставкой мощности от трех клистронов до ускоряющих структур и рассчитанного на рабочую частоту 2856 МГц. В конце 2024 года Линак-200 был собран в здании инжектора ЦКП «СКИФ» и запущен в работу. Поскольку именно в нем происходит рождение и формирование электронного пучка, то ввод в эксплуатацию линейного ускорителя непосредственно влиял на дальнейшую работу всех других частей комплекса ЦКП «СКИФ». В связи с этим, требовалось получить параметры пучка, пригодные для работы бустерного синхротрона в кратчайшие сроки, что оказывало влияние на оптимизацию и настройку линейного ускорителя.

Одним из ключевых параметров ускорителя является полная набираемая пучком энергия, которая зависит от входной СВЧ мощности. В качестве источников СВЧ мощности на линейном ускорителе используются два новых клистрона, разработанных и изготовленных полностью в ИЯФ СО РАН [4] и один зарубежный Canon 3730A [5]. Несмотря на то, что клистроны были предварительно протестированы на стенде, именно работа с реальным ускорителем и набираемая пучком энергия служат окончательным признанием правильности работы клистронов. Таким образом, работоспособность СВЧ системы и подобранные ее параметры в первую очередь определяют работу линейного ускорителя. В докладе приведены описание СВЧ системы ускорителя, измерения ее параметров, описан процесс настройки ускорителя для достижения необходимых параметров. Так же обсуждается опыт работы разработанных клистронов с реальным ускорителем.

Список литературы

1. Центр коллективного пользования «Сибирский кольцевой источник фотонов» (ЦКП «СКИФ»). / Бухтияров А. В. [и др.] // Кристаллография. – 2022 – Т. 67 – № 5 – С. 742-765
2. Инжекционная система для сибирского кольцевого источника фотонов / С. М. Гуров [и др.] // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2020. – №7. – С.3-7. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?doi=10.31857/S1028096020060072>.
3. Results of manufacturing and operation of the first accelerating structures for the linear accelerator of the SKIF injector based on a disk-loaded waveguide. – Текст : электронный / Levichev A. [и др.]. // Journal of Instrumentation. – 2023. – V.18. –URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/18/07/T07001>.
4. Development and testing of a high-power S-band klystron at BINP SB RAS. / Levichev A. [и др.] – Текст : электронный // Nuclear Science and Techniques. – 2024. – V. 35. – No. 7. – С. 1-10. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s41365-024-01471-9>.
5. Pulsed klystron amplifier E3730A. Product Information [Электронный ресурс] // URL: [https://etd.canon/en/product/pdf/microwave/E3730A_PI\(E\)_2018-11.pdf](https://etd.canon/en/product/pdf/microwave/E3730A_PI(E)_2018-11.pdf).

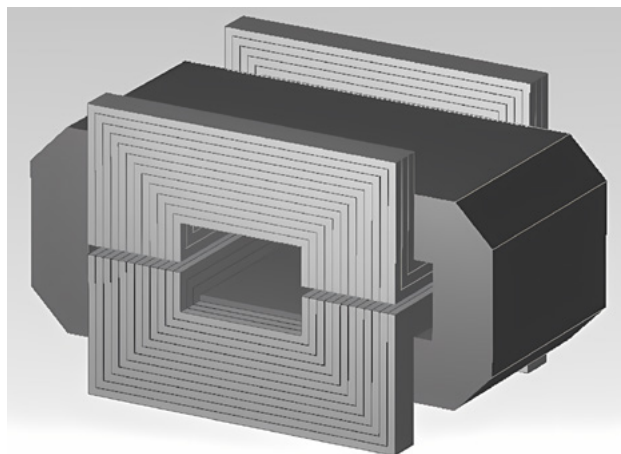
МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИПОЛЬНОГО МАГНИТА С МНОГОВИТКОВОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИЕЙ ОБМОТКИ ДЛЯ КАНАЛА МЕВТ МЕДИЦИНСКОГО СИНХРОТРОНА

Малышев А.А., Цыплаков Е.Д., Козлов А.В., Марков Н.В., Кулевой Т.В.

НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

В рамках реализации стадии технического проектирования ускорительного комплекса «ЛУЧ-ПРОТОН» [1] в настоящий момент ведётся разработка магнитооптических элементов, необходимых для отклонения и фокусировки протонного пучка. Для компоновки канала транспортировки пучка средней энергии, располагаемого от выхода секции линейного ускорителя до основного синхротрона требуется проводить численное моделирование поворотных магнитов с прямоугольной и секторной конфигурацией магнитопровода, пользуясь специализированными средами для расчёта и анализа магнитных полей [2,3]. В представленной работе рассматриваются результаты числен-

ного моделирования 35-градусного магнита, обеспечивающего прохождение пучка с жёсткостью $BR=0,29$ Тл·м в магнитном поле величиной $B=0,605$ Тл вдоль оси, в пределах вакуумной камеры, и в границах области с допуском на неоднородность $\Delta B/B=0,5\%$. В целях проведения детальной процедуры моделирования (от электромагнитного расчёта, с получением 3D-карты магнитного поля, до импортирования модели в среду для расчёта тепловой нагрузки) был создан макрос в формате VBA. Варьируемые в макросе параметры позволяют изменять габариты магнитопровода, его составные элементы и токопроводящую обмотку в соответствии с техническими требованиями, обусловленными динамикой пучка и геометрией канала транспортировки. Встроенные в макрос программные циклы обеспечивают возможность многовитковой визуализации медной катушки и варьирование числа проводников.



Физическая модель 35-градусного дипольного магнита канала МЕВТ

Список литературы

1. Г.Н. Кропачёв, Т.В. Кулевой, А.Л. Ситников, Е.Р. Хабибулина, Динамика частиц в инжекторе для комплекса протонно-лучевой терапии «ЛУЧ-ПРОТОН», Сибирский физический журнал, 2024, Том 19, №4, с. 20-30.
2. S. Terner, Cern Accelerator School, Fifth general accelerator physics course, “Proceedings Vol.II” September 9-18, 1992, University of Jyväskylä, Finland, pp.875-880.
3. Iwashita, Yoshihisa et al. (1999). Novel Design for Electromagnet with Wide Excitation Range. Japanese Journal of Applied Physics, 38: 895-897. doi 10.1143/JJAP.38. L895.

ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ МАГНИТНЫХ КАНАЛОВ ДЛЯ ЦИКЛОТРОНА МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ И ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ЦИКЛОТРОНА Ц-250

Кирицев Д.В., Галчук А.В., Осина Ю.К., Стогов Ю.И.

АО «НИИЭФА», Санкт-Петербург, Россия

Для обеспечения вывода пучка многозарядных ионов и протонов в достаточно широком диапазоне регулирования энергий, в разработанных АО «НИИЭФА» циклотронах применена система магнитных каналов на основе постоянных магнитов. Циклотрон многозарядных ионов (МЗИ) предназначен для получения различных ионов, имеющих отношение массы к заряду в диапазоне от 3 до 7 с энергией 7,5-15 МэВ/нуклон. Высокоэнергетический циклотрон Ц-250 предназначен для получения пучков протонов в диапазоне регулирования энергии от 30 до 250 МэВ, причем в диапазоне от 30 до 125 МэВ ускоряются ионы Н- с последующим выпуском перезарядкой на фольге. Траектории этих пучков не проходят через систему магнитных каналов. Для каждого из циклотронов система магнитных каналов состоит из трех частей. В циклотроне МЗИ используется один пассивный и два активных магнитных канала. В циклотроне Ц-250 применены только активные магнитные каналы.

Рассчитанные траектории пучка протонов для двух граничных режимов работы циклотрона Ц-250 показаны на рисунках 1 и 2.

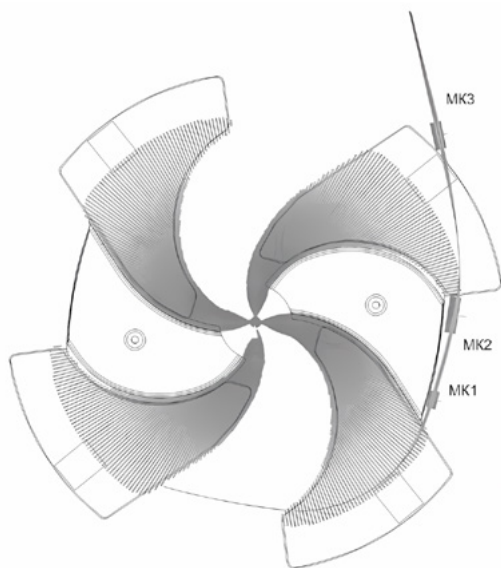


Рис. 1 Система магнитных каналов (МК1, МК2, МК3) в режиме выпуска протонов с энергией 250 МэВ

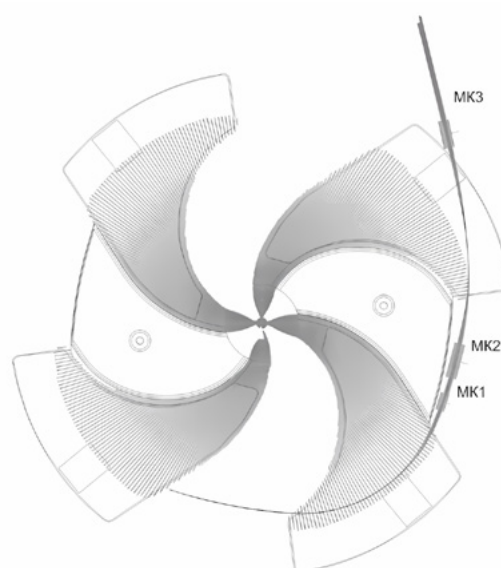


Рис. 2 Система магнитных каналов (МК1, МК2, МК3) в режиме выпуска протонов с энергией 125 МэВ

Перемещение магнитного канала 2 в диапазоне 500 мм по азимуту (с одновременной регулировкой по радиусу и углу) обусловлено изменением фокусирующих свойств магнитного поля на траектории при выпуске пучка в широком диапазоне регулирования энергии.

КОМПЕНСАЦИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ЭФФЕКТОВ ДАТЧИКА ХОЛЛА В МАГНИТНЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО ОНДУЛЯТОРА

Каноник П.В., Шкаруба В.А., Брагин А.В., Волков А.А., Гусев Е.А., Казанцев Ф.П., Мезенцев Н.А., Сафронов А.Н., Седов А.А., Тарасенко О.А., Хрущев С.В., Цуканов В.М.

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

Настройка магнитного поля сверхпроводящих ондуляторов требует высокой точности измерений, поскольку даже незначительные отклонения от периодичности магнитной структуры приводят к потере когерентности и ухудшению характеристик синхротронного излучения. Одной из ключевых задач при калибровке магнитного поля является обеспечение достоверности данных, получаемых с использованием датчиков Холла. Камера криостата, в которой производится измерение магнитного поля, имеет выраженный температурный градиент: от 300 К на входе до ~70 К в центральной части. Поскольку чувствительность датчиков Холла зависит от температуры, необходимо выполнять температурную коррекцию измеренных значений.

Данная работа посвящена разработке методики коррекции температурной зависимости сигнала датчика Холла. По данным измерений температуры и сигнала датчика с использованием метода наименьших квадратов были определены линейные и квадратичные поправочные коэффициенты к коэффициенту Холла. Кроме того, с помощью математических инструментов (Mathcad) была получена температурная зависимость нуля Холла, также аппроксимированная линейными и квадратичными функциями. Реализация данной методики позволила устранить температурную зависимость сигнала и снизить систематическую ошибку измерений магнитного поля на уровне 5–7 мТл, что существенно, учитывая, что корректирующая система вносит изменения порядка 10–15 мТл.

КОНТРОЛЬ И АНАЛИЗ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ ВЫСОКОКОЭРЦИТИВНЫХ МАГНИТОВ ДЛЯ ДИПОЛЕЙ НАКОПИТЕЛЬНОГО КОЛЬЦА УНК - СИЛА»

*Яловой Д. Ю.¹, Глушенкова Т. В.¹, Грошева А. Д.¹, Еникеев Р. Ш.¹, Казанцев В. Д.¹,
Кухтин В. П.¹, Ламзин Е. А.¹, Ларионов М. С.¹, Михайлов В. В.¹, Неженцев А. Н.¹,
Пальчик В. В.¹, Сычевский С. Е.¹, Ромашов А. С.², Самсонов Д. О.², Соколов Г. Р.², Юрин И. А.²,
Комлев А. С.², Амиров А. А.², Надеев М. М.³, Копелиович Д. Б.⁴*

¹АО «НИИЭФА», Санкт-Петербург, Россия

²НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

³ООО «Полимагнит», Санкт-Петербург, Россия

⁴ООО «ПМТиК», г. Троицк, Москва, Россия

В Национальном исследовательском центре «Курчатовский институт» (г. Протвино, Московская область) ведётся разработка проекта источника синхротронного излучения «УНК-СИЛА». В конструкции источника использованы наработки созданного синхротрона ESRF - EBS. Конструкция накопительного кольца предполагает наличие дипольных поворотных магнитов, источником магнитного поля в которых являются блоки постоянных магнитов из редкоземельного сплава $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$.

К диполям накопительного кольца предъявлены высокие требования к однородности поля в рабочей зоне. Следовательно, встаёт вопрос об измерении магнитных свойств большой выборки высококоэрцитивных магнитов. $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$. Обеспечение температурной стабильности работы дипольных магнитов требует учета температурных зависимостей используемых материалов, в том числе, постоянных магнитов.

Для проведения необходимых измерений в АО «НИИЭФА» создана лабораторная измерительная установка, которая отвечает техническим требованиям ГОСТ Р 58885-2020. Эта установка состоит из измерительных катушек Гельмгольца и тесламетр-веберметра универсального ТПУ-2В (поставлена «ООО «ПМТиК»). Рабочая область установки позволяет проводить измерения параметров постоянных магнитов любого типоразмера, характерного для диполей УНК-СИЛА.

С целью определения температурной зависимости намагниченности и температурных коэффициентов магнитов было разработано нагревательное устройство, с элементом Пельтье, в котором размещался исследуемый постоянный магнит. Для ограничения теплового обмена с окружающей средой использовался термоизоляционный защитный кожух с внутренним датчиком температуры. Измерение намагниченности осуществлялось после достижения магнитом требуемой температуры.

По результатам измерений осуществлена выборка постоянных магнитов для изготовления экспериментальных образцов диполей. Результаты измерений также учитывались в численных 2D и 3D моделях дипольных магнитов для коррекции их параметров.

РАЗРАБОТКА ПОЛОСКОВОГО ДАТЧИКА ПОЛОЖЕНИЯ ПУЧКА ДЛЯ ЛИНЕЙНЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ ИОНОВ

Амосова В.Е., Гаверилов С.А.

Институт ядерных исследований РАН, Москва, Россия

В современных резонансных ускорителях ионов точное определение поперечного центра масс пучка является критически важной задачей для обеспечения стабильности и минимизации потерь. Полосковые датчики положения пучка широко применяются благодаря неразрушающему методу измерений и выделяются из других типов датчиков высокой чувствительностью, линейностью и относительной компактностью, что делает их предпочтительными для линейных ускорителей протонов и ионов.

В работе предложена методика проектирования короткозамкнутых полосковых датчиков, включающая в себя оптимизацию геометрии, калибровку опытного образца в лабораторных условиях и испытания на пучке действующего ускорителя.

С использованием методов численного 3D-моделирования геометрия датчика была оптимизирована под ключевые параметры, влияющие на определение положения, по результатам был изготовлен опытный образец.

Для исследования электродинамических характеристик опытный образец помещался на специальный тестовый стенд на основе линейного позиционера и тонкого провода, имитирующего пучок. На вход провода подавался импульс генератора, считывание сигнала производилось на цифровом осциллографе через малошумящий усилитель 3 гармоник. Положение пучка определялось по сигналам осциллографа с использованием двух подходов: процедуры нормализации Δ/Σ и логарифмической обработки. По результатам испытаний на стенде были измерены чувствительность, область линейности и точность для каждого метода определения положения. Итоговая область линейности составила 30% для обработки Δ/Σ и 50% для логарифмической обработки по обеим осям, среднеквадратичная ошибка не превысила 70 мкм в области линейности.

Датчик положения пучка был установлен и протестирован на линейном ускорителе протонов ИЯИ РАН. Для сигнала без усилителя максимальное напряжение составило ~ 12 мВ на 1 мА импульсного тока, для узкополосного усиленного – ~ 80 мВ. Полученные значения хорошо описываются данными численного моделирования.

ТРАЕКТОРНЫЕ РАСЧЕТЫ В ПОДДЕРЖКУ РАЗРАБОТКИ ДЛИННЫХ ДИПОЛЬНЫХ МАГНИТОВ УНК-СИЛА

Казаченко Н.И.¹, Арсланова Д.Н.¹, Знаменщикова Н.С.¹, Зуев Ю.В.¹, Князев Н.А.¹, Кухтин В.П.¹, Ламзин Е.А.¹, Мельников Д.Д.¹, Неженцев А.Н.¹, Сычевский С.Е.¹, Овсянников А.Д.², Овсянников Д.А.², Иваненко И.А.³, Казаринов Н.Ю.³, Колюшенков М.А.⁴, Саган К.С.⁴, Юрин И.А.⁴

¹АО «НИИЭФА», Санкт-Петербург, Россия

²Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

ЗОИЯИ ЛЯР СФУ, Дубна, Россия

⁴НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

Крупномасштабные исследовательские установки класса «Мегасайенс» находят применение в широком спектре научных дисциплин, включая физику, химию, биологию, медицину и т. д., при этом источники синхротронного излучения занимают ключевое положение среди них. Компьютерное моделирование и инженерное проектирование дипольных поворотных магнитов представляют собой важный этап разработки ускорительных комплексов, поскольку эти элементы отвечают за формирование равновесной орбиты в оптической системе транспортировки пучка. Особую актуальность данная задача приобретает в контексте разработки высокоэнергетических точных систем нового поколения, в частности, источника синхротронного излучения УНК-СИЛА (Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»). Следовательно, возникает необходимость практической оценки выбранных конструкций дипольных магнитов и анализа их влияния на оптические характеристики пучка.

В работе исследуются длинные дипольные магниты комплекса УНК-СИЛА. Подобная установка, ESRF-EBS, уже была построена и успешно запущена во Франции. В обоих ускорителях используются высококоэрцитивные постоянные магниты, что обеспечивает высокую индукцию поля и отсутствие необходимости в питании, в отличие от электромагнитов. Требуемая точность однородности магнитного поля (на уровне 10^{-4}) в рабочей области длинных диполей предъявляет жёсткие требования к разрабатываемой конструкции магнитов. Процесс проектирования дипольных магнитов основан на прецизионных пространственных моделях, которые позволяют учитывать реальные или близкие к реальным свойства элементов магнитной системы и описываются трехмерными картами магнитных полей.

В работе проведен детальный анализ влияния проектируемой конструкции длинных дипольных магнитов на оптические характеристики пучка. Важной составляющей данного исследования является моделирование динамики заряженных частиц в накопителе УНК-СИЛА на основе численного пространственного распределения магнитного поля. В работе используются как упрощенные модели матричного отображения для одномерного случая (комплекс MAD-X), так и методы численного интегрирования уравнений движения частиц для трехмерного описания (разработанный комплекс). Эксперименты показывают, что добавление в оптическую систему суперпериода накопительного кольца УНК-СИЛА моделей длинных дипольных магнитов, со-

ответствующих выбранным конструкциям, приводит к изменению равновесной орбиты и ее смещению на величину порядка 170 микрометров. Также были получены оптические функции пучка частиц и сопоставлены с соответствующими функциями идеализированной магнитной системы из Технического задания.

ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ КОРРЕКТОРОВ СИСТЕМЫ БЫСТРОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ ОРБИТЫ СКИФ

Дмитриев М.С., Беликов О.В., Крылов А.А.

Институт ядерной физики имени Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

На накопителе СКИФ для стабилизации орбиты пучка используется система быстрой обратной связи (FOFB). Эта система служит для подавления отклонений орбиты, вызываемых внешними воздействиями в полосе частот до 1 кГц. В системе FOFB применяются 48 двухкоординатных дипольных корректора. Для питания корректоров FOFB были разработаны новые источники тока со следующими характеристиками: диапазон выходного тока $\pm 3,625$ А, максимальное выходное напряжение ± 60 В, полоса пропускания 0 Гц – 16 кГц. Источники представляют собой специализированные УНЧ, работающие в классе D. Они имеют полностью цифровую систему управления и обратной связи по выходному току. В докладе будут представлены схемные, технические и программные решения, примененные в разработанных источниках, результаты тестовых испытаний

МОДЕРНИЗАЦИЯ БЛОКОВ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ ДЛЯ ДАТЧИКОВ ПОЛОЖЕНИЯ ПУЧКА КОЛЛАЙДЕРОВ ВЭПП-2000 И ВЭПП-4М

Гребнев М.С., Карпов Г.В.

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

Ускорительные комплексы заряженных частиц ВЭПП-2000 и ВЭПП-4М предназначены для проведения экспериментов с электрон-позитронными пучками для изучения физики элементарных частиц. Для корректного проведения экспериментов требуется отслеживать равновесную орбиту пучков заряженных частиц в накопительных кольцах. Для этого используются датчики положения пучка и блоки обработки сигналов. Разработанные в 2011-2015 гг. блоки электроники удовлетворяют требованиям эксплуатации на ускорительных комплексах, однако имеют ряд недостатков: малая частота тактовых сигналов АЦП, большая погрешность измерения координаты пучков малого тока (< 1 мА) и малый объем памяти пооборотных измерений.

Разработанные в 2025 году новые блоки обработки сигналов лишены описанных недостатков, благодаря увеличению частоты дискретизации АЦП с частоты обращения F0 до частоты ВЧ, внедрению дополнительного канала с усилением на 22 дБ, а также увеличению объема памяти пооборотных измерений (до 512К оборотов для одного пучка). Модернизация позволила расширить возможности диагностики положения пучка, предоставляя физикам ускорительных комплексов мощный инструмент для настройки и изучения динамики пучка без снижения точности измерений.

КОНТРОЛЬ И АНАЛИЗ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ СПЛАВА ДЛЯ ТЕРМОМАГНИТНЫХ ШУНТОВ ДИПОЛЕЙ НА ПОСТОЯННЫХ МАГНИТАХ НАКОПИТЕЛЬНОГО КОЛЬЦА УНК-СИЛА

*Кухтин В. П.¹, Глушенкова Т. В.¹, Грошева¹ А. Д., Еникеев Р. Ш.¹, Казанцев В. Д.¹,
Ламзин Е. А.¹, Ларионов М. С.¹, Михайлов В. В.¹, Неженцев А. Н.¹, Пальчик В. В.¹, Сычевский С. Е.¹,
Яловой Д. Ю.¹, Ромашов А. С.², Самсонов Д. О.², Соколов Г. Р.², Юрин И. А.²,
Комлев А. С.², Амиров А. А.², Зимичев С. А.³*

¹АО «НИИЭФА», Санкт-Петербург, Россия

²НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

³ГНЦ ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина», Москва, Россия

Работа посвящена экспериментальному исследованию терромагнитных свойств сплава H31X79. Этот сплав предполагается к использованию для терромагнитного шунтирования в диполях с постоянными магнитами источника синхротронного излучения УНК-СИЛА». Этот источник в настоящее время разрабатывается в НИЦ «Курчатовский Институт».

Терромагнитные материалы, к которым относится сплав H31X79, обладают сильной зависимостью магнитной индукции от температуры, при этом индукция насыщения убывает с ростом температуры по закону, близкому к линейному закону, и применяются для изготовления терромагнитных шунтов (ТМШ). Терромагнитные свойства сплавов и материалов описываются терромагнитной характеристикой – зависимостью магнитной индукции в заданном поле от температуры.

Для определения данной характеристики использовалось две методики. Первая основана на рекомендациях ГОСТ 8.377-80, согласно которому эксперимент проводился на набранном из пластин кольцевом образце. Для поддержания стабильной температуры образец помещался в сосуд с маслом, при этом температура масла могла изменяться с помощью электрического нагревателя с цифровым датчиком температуры. При достижении температуры масла 50 С нагреватель извлекался и по мере остывания масла проводились измерения семейства петель гистерезиса образце на аппарате МК-4Э с шагом по температуре.

Измерения по второй методике производились на установке с катушками Гельмгольца. В термоизолированный объем помещалась сборка из постоянного магнита и двух пластин материала H31X79, которая нагревалась до заданной температуры. По мере остывания, производилось измерение магнитного момента сборки и вычислялась предельная намагниченность материала ТМШ.

По результатам входного контроля были получены терромагнитные характеристики сплава H31X79, позволяющие уточнить математические модели коротких и длинных диполей накопительного кольца источника УНК-СИЛА излучения.

СИСТЕМЫ ИМПУЛЬСНОГО ПИТАНИЯ ДЛЯ НИЗКОДОБРОТНЫХ МАГНИТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ УСКОРИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ

Крылов А.А.^{1,2}, Макаренко Ю.А.^{1,2}, Дмитриев М.С.¹, Сингатулин Ш.Р.¹

¹Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

²Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

В докладе представлено исследование топологии источника импульсного питания. Предложена и протестирована модернизированная версия классической системы питания. Подход основан на использовании двойного источника для каждого магнитного элемента, в том случае, первый источник позволяет развить необходимый ток в магните, а второй вытянуть энергию из индуктивной нагрузки. В работе представлено сравнение с существующими топологиями, предложены готовые схемотехнические решения, а также подробно рассмотрен частный случай применения топологии для питания винтового ондулятора, входящего в состав ТГц излучателя в ИЯФ СО РАН.

Использование описанной топологии для низкодобротных магнитных элементов, позволяет существенно сократить тепловыделение на нагрузках, а также уменьшить размеры и стоимость самого источника питания.

РАЗРАБОТКА И ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ КАТУШЕК ГЕЛЬМГОЛЬЦА СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЙ МАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ ДЛЯ ДИПОЛЕЙ НАКОПИТЕЛЬНОГО КОЛЬЦА УНК-СИЛА

*Крылова Н. А.¹, Амосков В. М.¹, Еникеев Р. Ш.¹, Кухтин В. П.¹, Ламзин Е. А.¹,
Мельников Д. Д.¹, Неженцев А. Н.¹, Сычевский С. Е.¹, Шатиль Н. А.¹, Гончаров С. В.²,
Ветюгов И. А.², Комлев А. С.², Копелиович Д. Б.³, Надеев М. М.⁴*

¹АО «НИИЭФА», Санкт-Петербург, Россия

²НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

³ООО «ПМТиК», г. Троицк, Москва, Россия

⁴ООО «Полимагнит», Санкт-Петербург, Россия

В докладе обсуждается методика измерения магнитных свойств высококоэрцитивных постоянных магнитов (ПМ), применяемых в диполях накопительного кольца ускорителя УНК-СИЛА.

Требуемая точность формирования магнитного поля в диполях ускорителя (допустимое отклонение $2 \cdot 10^{-4}$) предъявляет жёсткие требования к определению магнитных характеристик блоков ПМ, входящих в состав диполей. Это, в свою очередь, обуславливает необходимость тщательного выбора методик измерения магнитных параметров блоков ПМ, чтобы обеспечить соответствие заданным стандартам точности (ГОСТ Р 58885-2020)

Одной из основных характеристик ПМ является их намагниченность. В процессе изготовления блоков ПМ имеют место отклонения вектора намагниченности, как по величине, так и по направлению, что требует контроля качества ПМ.

Стандартный метод измерения намагниченности основан на использовании катушек Гельмгольца. Интегрирующий вольтметр, подключённый к выводам катушек, позволяет измерить интеграл ЭДС, наводимой в катушке либо при извлечении магнита, либо при его повороте на 180 градусов. Величина измеренного интеграла пропорциональна проекции полного магнитного момента ПМ на ось катушек, что позволяет находить все три компонента намагниченности. При этом необходимым условием высокоточных магнитных измерений является требование высокой однородности поля, создаваемого катушками Гельмгольца, в области размещения ПМ.

В докладе обсуждаются практические аспекты применения катушек Гельмгольца для анализа блоков ПМ, приводятся оценки параметров катушек для измерения блоков постоянных магнитов основных типоразмеров. Проведено сопоставление с методикой, основанной на использовании процедуры перемещения плотно обжимающих ПМ рамок. Целесообразным в рассматриваемом случае представляется решение с использованием двойных катушек Гельмгольца.

По результатам проведённых исследований, в частности, с использованием математически моделей, сформулированы требования к техническому заданию, в соответствии с которыми спроектирована и изготовлена магнитная система установки.

Установка на базе катушек Гельмгольца и измерителя магнитного потока использована для входного контроля партии $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ постоянных магнитов диполей УНК-СИЛА.

ВАКУУМНЫЕ СИСТЕМЫ КАНАЛОВ ТРАНСПОРТИРОВКИ ПУЧКА ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ИОНОВ

Шатохин В.Л., Панишев А.С., Полозов С.М.

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

Каналы транспортировки линейного ускорителя предназначены для передачи ионного пучка от источников до элементов ускорительных структур и между ними. Эффективность транспортировки пучка во многом зависит от вакуумных условий в трактах каналов. Выбор системы откачки для различных участков каналов транспортировки зависит от ряда факторов. К ним относятся тип и зарядность ионов, энергия пучка на данном участке транспортировки, вид и величина газовых нагрузок, конструкция и геометрия каналов транспортировки. В программе Molflow+ были созданы расчетные модели для моделирования и оптимизации систем откачки. Выполнены расчеты для каналов

транспортировки низкой энергии от источников ионов, средней энергии между участками резонаторных ускоряющих структур, и на участках канала высокой энергии вывода ускоренного пучка.

ЧИСЛЕННОЕ 3D МОДЕЛИРОВАНИЕ В ПОДДЕРЖКУ ИЗМЕРЕНИЙ НА КАТУШКАХ ГЕЛЬМГОЛЬЦА МАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛОВ ДИПОЛЕЙ УНК СИЛА

*Мельников Д. Д.¹, Глушенкова Т. В.¹, Казанцев В. Д.¹, Кухтин В. П.¹, Ламзин Е. А.¹,
Ларионов М. С.¹, Михайлов В. В.¹, Неженцев А. Н.¹, Сычевский С. Е.¹, Шатиль Н. А.¹,
Ромашов А. С.², Самсонов Д. О.², Соколов Г. Р.², Юрин И. А.², Комлев А. С.²,
Амиров А. А.², Надеев М. М.³, Копелиович Д. Б.⁴*

¹АО «НИИЭФА», Санкт-Петербург, Россия

²НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

³ООО «Полимагнит», Санкт-Петербург, Россия

⁴ООО «ПМТиК», г. Троицк, Москва, Россия

В состав НК УНК СИЛА входят поворотные магниты – длинные и короткий диполи – магнитное поле в которых создается блоками постоянных магнитов. Кроме того, в конструкцию диполей входят термомагнитные шунты, обеспечивающие компенсацию температурной зависимости поля постоянных магнитов. Конструкция этих диполей, на настоящем этапе экспериментальных образцов, разработана с учетом заданных предполагаемых магнитных свойств используемых материалов, как постоянных магнитов, так и термомагнитных шунтов. На практике, свойства поставляемых для изготовления изделий материалов всегда имеют отклонения от предписанных требований, причем эти отклонения могут относиться как к средней величине в поставке, так и к каждому индивидуальному образцу. Поэтому крайне важным этапом является входной контроль магнитных свойств поставляемых образцов с целью выборки и возможной коррекции конструкции диполя.

Основными магнитными характеристиками постоянных магнитов являются остаточная индукция B_r , коэрцитивная сила по намагниченности H_{cJ} и магнитная проницаемость μ на рабочем участке кривой размагничивания $B(H)$. Определение этих величин для изготовленных образцов магнитов прямым методом невозможно, поэтому используется метод измерения магнитного момента каждого индивидуального образца с помощью катушек Гельмгольца.

С помощью математического моделирования была определена численная зависимость между магнитным моментом и остаточной индукцией при заданной (по результатам выходного контроля производителем) магнитной проницаемости для каждого из заказанных типоразмеров постоянных магнитов. Разработанная численная модель была верифицирована сопоставлением с аналитической моделью. Проведен анализ влияния на результаты измерений таких факторов как анизотропность размагничивания постоянного магнита, размер области однородности катушек Гельмгольца, неточность расположения измеряемого магнита относительно центра области однородности.

Основной характеристикой термомагнитного шунта, используемой при разработке диполей, является предельная намагниченность в зависимости от температуры. Для ее определения используется специально разработанный метод, основанный на разнице магнитного момента постоянного магнита и системы из того же постоянного магнита с шунтирующими пластинами. С помощью математического моделирования определена численная зависимость между этой разницей магнитных моментов и намагниченностью шунтирующих пластин. Рассмотрены две модели намагниченности пластин: постоянная с заданным вектором намагниченности и заданная в виде зависимости $B(H)$. Также были оценены погрешности от неточного размещения или выхода за границы области однородности.

Результаты математического моделирования легли в основу методики измерения и были использованы при определении магнитных характеристик постоянных магнитов и термомагнитных шунтов.

СЕКСТУПОЛЬНЫЕ ЛИНЗЫ И КОРРЕКТОРА ИСТОЧНИКА СИ ЧЕТВЕРТОГО ПОКОЛЕНИЯ СКИФ

*Павлюченко В.А.¹, Никифоров Д.А.^{1,2}, Баранов Г.Н.^{1,2}, Старостенко А.А.¹,
Жилыев К.В.¹, Пахомов А.Ю.¹*

¹Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

²Центр коллективного пользования «СКИФ», Новосибирск, Россия

Одними из универсальных, инструментов для получения качественного излучения, позволяющего исследовать структуру вещества и применяемого для исследований в самых разных дисциплинах: химии, биологии, материаловедении, геологии и т. п. [1,2], являются источники синхротронного излучения (СИ). Современные источники СИ – это ускорители (накопители) электронов ультрарелятивистских энергий (до нескольких гигаэлектронвольт), которые, двигаясь в поперечном магнитном поле, генерируют мощное электромагнитное излучение в широком диапазоне длин волн.

В работе описываются устройство и характеристики магнитных элементов накопителя для источника СИ «СКИФ». Представлены результаты моделирования секступольных линз, комбинированных корректоров, которые служат для дипольной и скью-квадрупольной коррекции, а также быстрые дипольные корректора. Секступольные линзы используются для подавления естественного хроматизма в ускорительном кольце, а также для коррекции орбиты пучка и квадрупольной и скью-квадрупольной коррекции. Данные элементы должны обеспечить возможность транспортировки электронного пучка в кольце ускорителя без потерь тока пучка. В работе продемонстрированы результаты магнитных измерений изготовленных элементов, выполненные с использованием вращающегося вала с радиальной катушкой, а также магнитные измерения датчиками Холла.

Список литературы

1. Xiao C. et al. Application of Synchrotron Radiation in Fundamental Research and Clinical Medicine //Biomedicines. – 2025. – Т. 13. – №. 6. – С. 1419.
2. Zolotarev K. et al. Synchrotron radiation applications in the Siberian Synchrotron and Terahertz radiation center //Physics Procedia. – 2016. – Т. 84. – С. 4-12.

ТРАЕКТОРНЫЕ РАСЧЕТЫ В ПОДДЕРЖКУ РАЗРАБОТКИ КОРОТКОГО ДИПОЛЬНОГО МАГНИТА УНК-СИЛА

*Князев Н.А.¹, Арсланова Д.Н.¹, Знаменищикова Н.С.¹, Зуев Ю.В.¹, Казаченко Н.И.¹,
Кухтин В.П.¹, Ламзин Е.А.¹, Мельников Д.Д.¹, Неженцев А.Н.¹, Сычевский С.Е.¹,
Котина Е.Д.², Овсянников А.Д.², Овсянников Д.А.², Иваненко И.А.³, Казаринов Н.Ю.³,
Колюшенков М.А.⁴, Саган К.С.⁴, Юрин И.А.⁴*

¹АО «НИИЭФА», Санкт-Петербург, Россия

²Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

³ОИЯИ ЛЯР СФУ, Дубна, Россия

⁴НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

Объектом исследования является источник синхротронного излучения четвертого поколения УНК-СИЛА – перспективная установка класса «Мегасайенс», разрабатываемая в НИЦ «Курчатовский институт». Проект станет флагманским научным объектом России, объединяющим два типа ускорителей: накопительное кольцо и лазер на свободных электронах. Особенностью структуры накопительного кольца данной установки является добавление в центральную часть регулярного суперпериода короткого диполя, использующего в качестве источников поля высококоэрцитивные постоянные магниты, что позволило увеличить число каналов вывода фотонов. УНК-СИЛА обеспечит рекордную яркость, необходимую для изучения структуры материалов на атомарном уровне, белковых молекул, нанообъектов и т. д.

Конструирование прецизионных дипольных магнитов на основе постоянных магнитов представляет собой технологически сложную задачу, сопряженную с рядом инженерных вызовов, которые обусловлены спецификой создания требуемой конфигурации поля. Короткий дипольный магнит проектируется на основе пространственных моделей, учитывающих свойства конструкции, полученные численно или путём измерений. Это позволяет проводить детальное

трехмерное моделирование траекторий частиц в канале короткого магнита. Цель исследования заключается в практическом обосновании выбранной конструкции короткого дипольного магнита.

В работе проведен подробный анализ влияния проектируемой конструкции короткого дипольного магнита на оптические характеристики пучка частиц. Использовались различные методы для моделирования динамики заряженных частиц в накопительном кольце УНК-СИЛА: одномерные линейные модели кусочно-постоянной аппроксимации и отклонений (ошибок) магнитного поля в комплексе MAD-X для предварительного анализа и разработанное программное обеспечение для трехмерного траекторного анализа с учетом пространственного распределения поля. Сравнение полученных результатов позволяет подтвердить достоверность обоих методик.

Численные эксперименты показывают, что замена в суперпериоде накопительного кольца УНК-СИЛА модели короткого магнита с постоянным распределением поля на модель, соответствующую выбранной конструкции, приводит к деформации и смещению равновесной орбиты на величину порядка 30 микрометров. Полученные оптические функции пучка частиц были сопоставлены с соответствующими оптическими функциями идеализированной магнитной системы УНК-СИЛА, соответствующей Техническому заданию.

МОДЕРНИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ СИНХРОНИЗАЦИИ УСКОРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ИЯИ РАН

*Титов А.И.¹, Гаврилов С.А.¹, Донец Д.Е.², Жабин И.Н.², Козловский А.А.², Леткин Д.С.²,
Спиридонова И.К.², Шириков И.В.²*

¹Институт ядерных исследований РАН, Москва, Россия

²ООО «ДИАЛТЕК», Дубна, Россия

В ИЯИ РАН завершается четырехлетняя модернизация системы синхронизации ускорительного комплекса. Оборудование, установленное в 80-х годах 20 века, требовало полной замены в связи с ухудшением стабильности работы системы, дефицитом запасного оборудования, деградацией основного оборудования вследствие непрерывной работы на протяжении десятилетий и возросшим уровнем высокочастотных помех от систем ВЧ-питания комплекса.

Данная статья посвящена различным аспектам процесса модернизации. В тексте приводятся основные требования к новой системе синхронизации, описание её архитектуры. Описывается аппаратная составляющая новой системы, особое внимание уделяется модульной системе оконечных устройств. В работе проводится сравнение старой и новой систем синхронизации, выделяются преимущества новой системы.

Одним из важнейших условий при замене системы синхронизации была необходимость сохранить работоспособность ускорительного комплекса на протяжении всего цикла работ. Это условие привело к определенным особенностям при проведении модернизации, что также отражено в данной работе. Для интеграции новой системы синхронизации в автоматизированную систему управления ускорительного комплекса было разработано клиент-серверное программное обеспечение, основные характеристики которого описываются в тексте работы. В конце приводятся результаты и данные об опыте использования новой системы.

КОНТРОЛЬ И АНАЛИЗ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ СТАЛЕЙ ДЛЯ ДИПОЛЕЙ НА ПОСТОЯННЫХ МАГНИТАХ НАКОПИТЕЛЬНОГО КОЛЬЦА УНК-СИЛА

Глушенкова Т. В.¹, Грошева А. Д.¹, Еникеев Р. Ш.¹, Казанцев В. Д.¹, Кухтин В. П.¹, Ламзин Е. А.¹, Ларионов М. С.¹, Михайлов В. В.¹, Неженцев А. Н.¹, Пальчик В. В.¹, Сычевский С. Е.¹, Фирсов А. А.¹, Яловой Д. Ю.¹, Ромашов А. С.², Самсонов Д. О.², Соколов Г. Р.², Клочков Н. С.², Юрин И. А.²

¹АО «НИИЭФА», Санкт-Петербург, Россия

²НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

В настоящее время в Национальном исследовательском центре «Курчатовский Институт» разрабатывается проект нового лазерно-синхротронного источника УНК-СИЛА, г. Протвино, Московская область. Дипольные магниты накопительного кольца этого источника являются прецизионными устройствами. Для создания такой системы особую роль играют свойства используемых материалов, в частности – электротехнических сталей, используемых в качестве магнитных шунтов в дипольных магнитах, где источником магнитного поля выступают постоянные магниты.

Предполагаемая к использованию в диполях сталь 10860 является аналогом стали ARMCO, отличающаяся низким содержанием углерода (менее 0,02%) и, как следствие, заявленной малой коэрцитивной силой ($H_c < 60$ А/м) и высокими магнитными свойствами (магнитная проницаемость $\mu_{max} > 7000$). Эти характеристики обеспечивают высокую способность данного материала к намагничиванию, что значительно снижает потери на перемагничивание.

На этапе входного контроля целью магнитных измерений является получение основной кривой намагничивания стали В-Н, представляющей собой нелинейную зависимость между напряжённостью (Н) и индукцией магнитного поля (В), а также получение величины коэрцитивной силы H_c , определяемой по предельной петле гистерезиса.

Экспериментальная часть работы включает в себя отжиг образцов стали и их предварительное размагничивание перед проведением измерений переменным магнитным полем с убывающей практически до нуля амплитудой и, собственно, сами измерения. Методология проведения измерений соответствует стандарту ГОСТ 8.377-80. Для получения магнитных характеристик стали использовались образцы двух видов, соответствующие различным методикам измерений: кольцевые при малых полях и цилиндрические образцы при сильных полях. Анализ полученных данных показал высокую степень согласованности между результатами, полученными различными методами измерений. Это подтверждает надёжность использованных методов и позволяет сделать вывод о достоверности определения основных магнитных характеристик исследуемой стали 10860.

ИЗМЕРЕНИЕ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ДИПОЛЕЙ НА ПОСТОЯННЫХ МАГНИТАХ НАКОПИТЕЛЬНОГО КОЛЬЦА УНК-СИЛА

Казанцев В. Д.¹, Арсланова Д. Н.¹, Гавриш Ю. Н.¹, Глушенкова Т. В.¹, Грошева А. Д.¹, Еникеев Р. Ш.¹, Знаменицкова Н. С.¹, Кухтин В. П.¹, Ламзин Е. А.¹, Ларионов М. С.¹, Михайлов В. В.¹, Неженцев А. Н.¹, Пальчик В. В.¹, Сычевский С. Е.¹, Яловой Д. Ю.¹, Филатов О. Г.¹, Ромашов А. С.², Самсонов Д. О.², Соколов Г. Р.², Юрин И. А.², Комлев А. С.², Амиров А. А.²

¹АО «НИИЭФА», Санкт-Петербург, Россия

²НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

В Национальном исследовательском центре «Курчатовский институт» (г. Протвино, Московская область) ведётся разработка перспективного проекта источника синхротронного излучения «УНК-СИЛА», который в качестве референсной использует магнитную структуру накопительного кольца европейского источника ESRF-EBS.

Конструкция дипольных поворотных магнитов накопительного кольца предусматривает использование технически чистого железа для изготовления магнитных полюсов и блоков постоянных магнитов из редкоземельного сплава Sm_2Co_{17} .

Отклонение однородности рабочего поля диполей в пределах ширины ± 10 мм составляет величину $\Delta B/B_{\text{average}} = \pm 0,0002$. Диполи относятся к высокопрецизионным магнитам, что требует тщательной проработки конструкции. Ситуация усугубляется тем, что поставляемые промышленностью ПМ могут иметь недопустимый для подобных систем разброс магнитных свойств.

Требование высокой однородности поля диполей может быть достигнуто при выполнении ряда условий, которые включают предварительную выборку постоянных магнитов из большей партии с последующей их группировкой, использование магнитных и термомагнитных шунтов, применение сталей с низкой коэрцитивной силой. Использование предыдущего опыта при создании прецизионных систем позволяет оценить требования к магнитным свойствам материалов, сформулированные, в том числе, в соответствующем ТЗ. При этом встаёт вопрос о необходимости проведения входного контроля всех магнитных материалов дипольных магнитов, общее число которых в накопительном кольце источника составляет около 200 штук.

НИОКР, опирающиеся на использование детальных прецизионных численных 2D и 3D моделей диполей, учитывают нелинейные магнитные свойства их материалов, наличие в их конструкции корректирующих элементов, к которым относятся магнитные и термомагнитные шунты. Параметры этих корректирующих элементов являются индивидуальными для каждого магнита и должны уточняться на основе результатов магнитных измерений и математического моделирования.

При этом имеет место температурная зависимость в рабочем диапазоне температур магнитных свойств материалов диполей, что, в свою очередь, требует экспериментального определения этих зависимостей и их учёта в математических моделях диполей.

Для организации процедуры измерения магнитных свойств использованы рекомендации соответствующих ГОСТов, при этом параметры самих измерительных устройств определялись конкретными параметрами разрабатываемых магнитов. Таким образом, входному контролю должны быть подвергнуты все блоки постоянных магнитов, применяемые стали 10860 с низкой коэрцитивной силой и высокой магнитной проницаемостью, сталь H31X79 термомагнитных шунтов.

Предложенные авторами программы и методики измерений магнитных свойств были реализованы при разработке и создании макетов короткого и длинного дипольных магнитов. Приобретённый опыт будет использован для организации процедуры входного контроля материалов диполей накопительного кольца синхротронного источника.

В силу ограничений на объём материала доклада детальное описание предполагаемых подходов и методик приводится в соответствующих специализированных докладах.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ ПОТЕРЬ ПУЧКА ИНЖЕКЦИОННОГО КОМПЛЕКСА СКИФ

Фомин Л.Б., Мальцева Ю.И., Мешков О.И., Судник А.В., Тур А.В.

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Источник синхротронного излучения поколения 4+ СКИФ, строящийся в г. Новосибирске, представляет собой установку, состоящую из линака, бустерного синхротрона и основного накопительного кольца. В линаке электронный пучок достигает энергии 200 МэВ, в бустере поднимается до 3 ГэВ, а затем перепускается в основной накопитель. Для обеспечения проектных параметров всех элементов ускорительного комплекса на СКИФ реализована система диагностики потерь пучка на основе кварцевых оптических волокон и сцинтилляционных датчиков.

Для диагностики потерь пучка в линейном ускорителе и канале линака-бустер используется кварцевое оптическое волокно диаметром 500 мкм, которое проложено вдоль всей трассы (линак и канал), и, по сути, является черенковским детектором частиц от вторичных ливней, возникающих в местах касания пучком вакуумной камеры. Возникающее в оптическом волокне

черенковское излучение попадает в фотоэлектронный умножитель, сигнал с которого оцифровывается быстрым АЦП. Использование быстрых ФЭУ с временем отклика 1.5нс и быстрого АЦП с частотой сэмплирования 5ГГц позволяет получить пространственное разрешение (локализацию места потери пучка) в 1 метр.

Разработанное программное обеспечение наглядно показывает оператору места, в которых локализованы потери, и оператор, управляя прохождением пучка, может нивелировать эти потери до приемлемого уровня. В докладе приведены типичные графики распределения потерь, возникающих в ускоряющих структурах, дипольных корректорах и квадрупольных при работе линака.

В бустерном синхротроне для диагностики потерь пучка используется две системы – с применением оптического волокна и с применением сцинтилляторов. Схема диагностики с помощью оптического волокна полностью аналогична диагностике на линаке - вдоль периметра кольца бустера проложено кварцевое оптическое волокно, сигнал с которого показывает распределение потерь вдоль периметра кольца. Система диагностики с применением сцинтилляторов, в свою очередь, представляет собой два сцинтиллятора цилиндрической формы, расположенных на уровне орбиты пучка в двух выделенных диаметрально противоположных точках кольца. Свет со сцинтилляторов также заводится на фотоэлектронный умножитель, сигнал с которого оцифровывается и выводится оператору в виде графика. Помимо своей непосредственной задачи – контроль потерь в процессе эксплуатации – обе системы весьма успешно использовались для первоначального проведения пучка по кольцу.

В канале бустер-накопитель, протяженностью 400м, также предусмотрена диагностика с помощью оптического волокна, проложенного вдоль канала. Через каждые 50 метров сигнал с оптоволокну вводится в фотоэлектронный умножитель и оцифровывается. Оператор на экране видит схематический рисунок канала с указанием мест потерь пучка. Система полностью аналогична применяемой на Линаке.

В докладе обобщен опыт использования системы регистрации потерь при запуске линейного ускорителя и бустерного синхротрона СКИФ.

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПОЛЯ МАГНИТОВ УСКОРИТЕЛЕЙ МЕТОДОМ НАТЯНУТОЙ СТРУНЫ

Николайчук И.Ю.

Объединённый институт ядерных исследований, Дубна, Россия

Создание современных ускорительных комплексов требует изготовления большого количества высокоточных магнитных элементов, что влечет за собой необходимость проведения прецизионных измерений параметров поля при производстве. Наиболее распространенными средствами магнитных измерений являются датчики Холла, измерительные катушки и токопроводящая струна. На основе данных инструментов создаются высокоточные магнитометрические системы.

Техники измерения магнитных полей при помощи струны делятся на три основных метода – вибрирующая струна (vibrating wire), натянутая струна (stretched wire) и пульсирующая струна (pulsed wire). Методика натянутой струны заключается в измерении ЭДС, наводящейся в струне, движущейся как целое в постоянном магнитном поле или в неподвижной струне, находящейся в импульсном поле. Интегрируя ЭДС по времени, определяется величина векторного потенциала. Метод натянутой струны позволяет измерять положение магнитной оси, угол скручивания магнитного поля (roll angle) квадрупольного магнита, интегральную величину магнитного поля и интегральные гармоники [1].

Методы, техника и оборудование разрабатываются в ОИЯИ для проведения измерений параметров поля магнитов ускорительного комплекса NICA и синхротрона SiS100 комплекса FAIR. Схема магнитометрической системы приведена на Рис. 1. Данная система использовалась для измерения положения магнитной оси квадрупольных магнитов Коллайдера NICA методом вибрирующей струны. На этапе разработки системы измерений были применены системотехнические решения, позволяющие реализовать все известные струнные техники измерений.

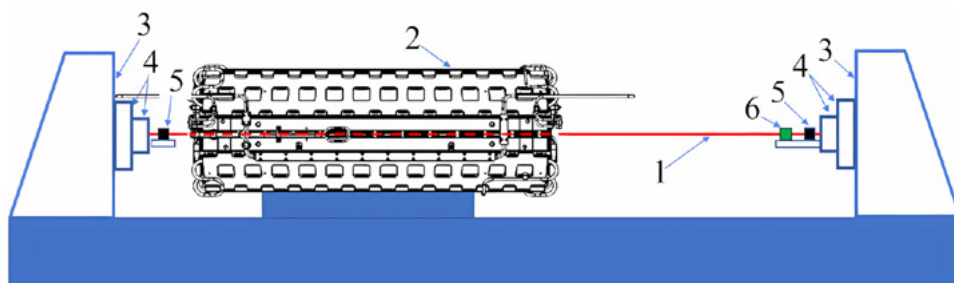


Рис. 1 Схема магнитометрической системы: 1 – струна, 2 – квадрупольный магнит, 3 – стойки поддержки основных узлов системы, 4 – система перемещения струны, 5 – система натяжения струны, 6 – система детектирования колебаний [2]

Разработана высокоточная методика измерений гармоник поля в диапазоне средних магнитных полей (до 0,02 Тл) при импульсном режиме работы магнита. Методика апробирована на сверхпроводящих магнитах, производимых в ЛФВЭ ОИЯИ – дипольном магните Коллайдера NICA и предсерийном образце квадрупольного магнита SIS100. Измерения проводились в импульсном режиме работы магнита при температуре окружающей среды. Таким образом, величина поля составляла $\approx 0,01$ Тл на радиусе измерений 40 мм. Точность измерений была оценена по среднеквадратичному разбросу результатов 10 циклов измерений (рис. 2-3) и находится на уровне $1 \cdot 10^{-4}$. Проведен сравнительный анализ результатов измерений индукционными катушками (ММС 1-4) и струной. Расхождение между результатами, полученными различными системами, связано с процессом сборки датчиков с индукционными катушками. Принцип сборки датчиков не позволяет получить точность измерения абсолютных параметров лучше, чем $5 \cdot 10^{-4}$ – $1 \cdot 10^{-3}$. Струнные системы измерений лишены данного недостатка и позволяют проводить измерения абсолютных параметров поля с точностью 10^{-4} и лучше.

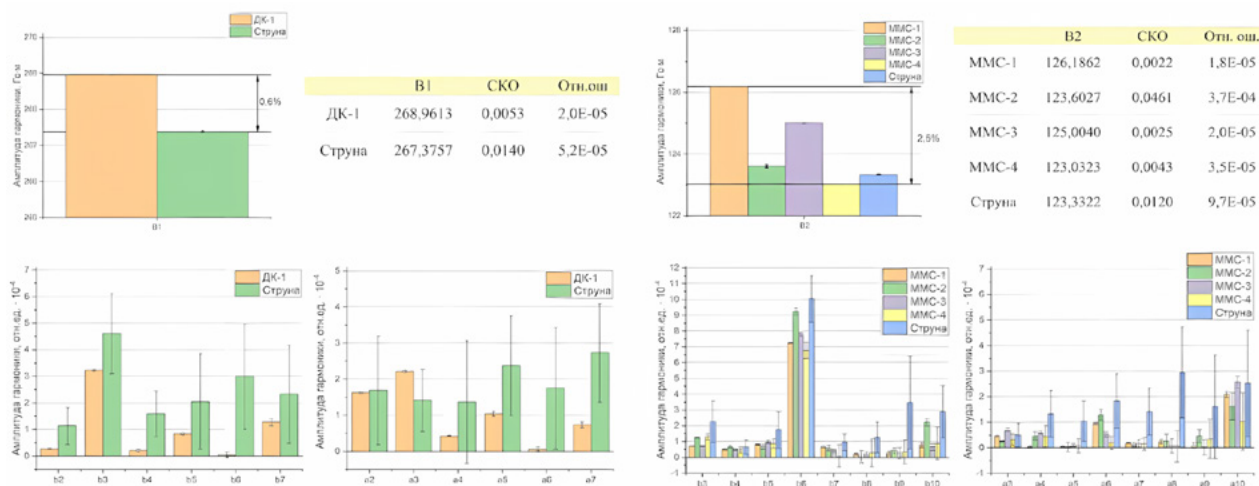


Рис. 2 Результаты измерений основной (слева) и относительных (нормированных на основную гармонику) (справа) гармоник поля дипольного магнита Коллайдера NICA (среднее значение и среднеквадратичное отклонение для 10-ти измерений) и квадрупольного магнита синхротрона SiS100 (среднее значение и среднеквадратичное отклонение для 10-ти измерений)

Список литературы

1. Petrone C. Wire methods for measuring field harmonics, gradients and magnetic axes in accelerator magnets // PhD Thesis, CERN-THESIS-2013-130, 2013.
2. Николайчук, И. Ю. Методика калибровки струнного измерительного стенда и методы подавления систематических ошибок измерений параметров магнитного поля // ЭЧАЯ, 2025. Т. 56, №3. С. 1257-1265.

РАСХОДОМЕРЫ НА ОСНОВЕ СУЖАЮЩИХ УСТРОЙСТВ В СИСТЕМАХ КРИОГЕННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСКОРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА NICA

Жиронкина Т.Г., Гудков С.В., Константинов А. В., Митрофанова Ю.А., Швидкий Д.С.

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

В ходе проведения сеансов работы ускорительного комплекса NICA важной задачей было определение производительности оборудования криогенных систем с целью измерения эффективности его работы. Для определения производительности необходимо измерять расход среды через установки. В работе рассматриваются случаи применения диафрагм в составе оборудования криогенного комплекса.

Успешный опыт использования расходомеров данного типа был получен в ходе эксплуатации системы контроля остаточного ресурса адсорбентов блоков маслоочистки и осушки гелия МО-800 №1-4 после монтажа и ввода в эксплуатацию в 2024-25 гг.

Измерение расходов среды через основной и турбодетандерный потоки гелиевого рефрижератора КГУ-1600/4.5 позволит определить холодопроизводительность турбодетандеров и провести оптимизацию его цикла, что приведет к снижению энергозатрат на получение холода. В конце 2024 г. был произведен расчет для подбора диафрагм. Их монтаж и ввод в эксплуатацию программного обеспечения в составе АСУ ТП КГУ-1600/4.5 №1, обеспечивающего измерение расходов, запланирован на осень 2025 г.

Контроль величины расхода сжатого азота через азотный реконденсатор РА-0.5 позволит подтвердить паспортные параметры установки и эффективность ее работы. АСУ ТП РА-0.5 №1 будет введена в эксплуатацию осенью 2025 г.

Расходомер, установленный на линии нагнетания азотных турбокомпрессоров, позволит измерить производительность каждого из них для подтверждения характеристик оборудования и, при необходимости, провести мероприятия по выводу их к паспортным значениям. Система измерения позволит определить удельные затраты энергии на получение жидкого азота для создаваемого азотного комплекса. В настоящее время ведутся работы по подбору диафрагмы: определяются технические характеристики и КИП обвязки, монтаж запланирован на 2026 г.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПУЧКА УСКОРИТЕЛЯ ЛУЭ-200

Жиронкин И.С., Михайлов К.И., Репкин А.Н., Сумбаев А.П.

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

Ускоритель ЛУЭ-200 – драйвер источника фотонейтронов установки ИРЕН ОИЯИ [1] образован сборкой из двух ускоряющих секций с бегущей э/м волной 10 см диапазона (2856 МГц). В данном сообщении авторами предпринята попытка систематизации результатов измерений энергии пучка в различных режимах настройки систем ускорителя. Получены спектры энергий пучка в результате комплексной настройки ускорителя, включающей подбор частоты задающего генератора СВЧ возбуждения клистронов, согласование с ней собственной частоты резонаторов систем SLED[2] и выбор времени инжекции[3] с целью получения максимальной энергии при сохранении адекватного уровня прохождения пучка (1,3А на мишени). Смещение спектра ускоренных частиц в сторону более высоких энергий достигало ~45МэВ, максимум спектра сместился в область ~125МэВ. Увеличение мощности пучка составило ~40%.

В зависимости от конкретных задач использования пучка можно выделить несколько режимов настройки ускоряющей и СВЧ-систем: для максимальной энергии частиц, для минимального энергетического разброса, для максимальной мощности пучка, т.е. для максимального выхода фотонейтронов из неразмножающей мишени.

Список литературы

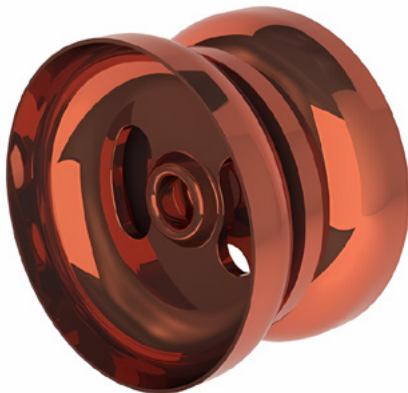
1. Sumbaev, V. Kobets, V. Shvetsov, N. Dikansky, P. Logatchov. LUE-200 Accelerator – A Photon-neutron Generator For The Pulsed Neutron Source IREN. Journal of Instrumentation. 2020_ JINST_15_T11006.
2. E. Levichev, M. V. Arsentyeva, S. L. Samoilov, I.S. Zhironkin, K.I. Mikhailov, A. P. Sumbaev, V. V. Kobets., On the Influence of the Operating Frequency Shift on the Efficiency of the Accelerating Structure of the LUE-200 Accelerator, Physics of Particles and Nuclei Letters, 21, 425–429 (2024). <https://doi.org/10.1134/S1547477124700390>.
3. И.С. Жиронкин, А.П. Сумбаев, В.В. Кобец А.Е. Левичев. О роли тайминга инжекции пучка электронов в ускоряющую структуру ускорителя ЛУЭ-200 при использовании системы компрессии СВЧ мощности Письма в ЭЧАЯ. Т. 22, № 4, 2025г. DOI: 10.1134/S1547477125700311.

ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ БИПЕРИОДИЧЕСКОЙ УСКОРЯЮЩЕЙ СТРУКТУРЫ ДЛЯ ЛИНЕЙНЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОНОВ

*Батов А.А., Ашанин И.А., Бондаренко Т.В., Гусарова М.А., Збруев Р.А.,
Лалаян М.В., Полозов С.М.*

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

У кафедры электрофизических установок НИЯУ МИФИ имеется значительный опыт применения бипериодических ускоряющих структур (БУС) с повышенным коэффициентом связи для изготовления линейных ускорителей электронов на стоячей волне. Сотрудниками кафедры разработаны, изготовлены и запущены [1-4] установки S, K диапазонов прикладного, медицинского и научного назначений на базе БУС.



Модель бипериодической
ускоряющей структуры

May 8–13, 2016. V. 7. P. 1794-1796.

В работе рассматривается влияние параметров структуры на основные электродинамические характеристики (ЭДХ). Показано изменение влияния параметров на ЭДХ в зависимости от рабочей частоты структуры. Приводится зависимость изменения ЭДХ от объема ячейки группирователя. Отдельно рассматривается оптимизация геометрии окон связи. Показано согласие рассчитанных зависимостей с экспериментом при производстве таких ускоряющих структур.

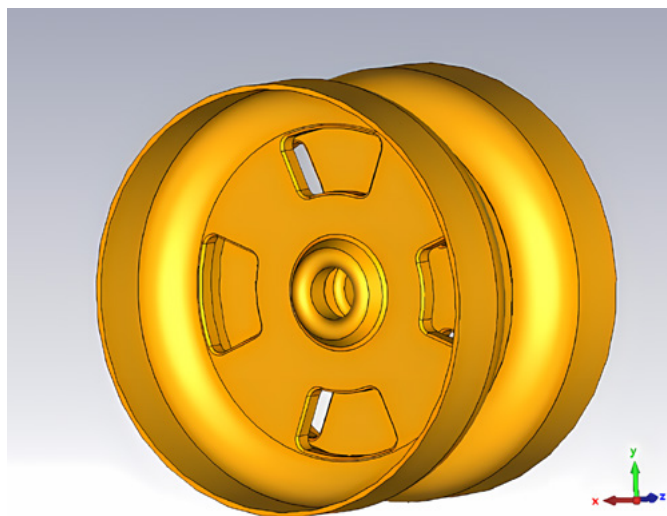
Список литературы

1. Basyl D. S. et al. New 10 MeV High-Power Electron Linac for Industrial Application // Proc. of the 7th Intern. Part. Accel. Conf. (IPAC 2016), Busan, Korea, May 8–13, 2016. V. 7. P. 1794-1796.
2. Batov A. A., Bondarenko T.V., Zbruev R.A., Gusarova M. A., Lalayan M. V., Shashkov Ya. V., Polozov S. M. Developing and Optimizing the S-Band Accelerating Structure and Coupling Device for the Radiation Therapy Facility // Physics of Particles and Nuclei Letters. 2023. V. 20. No. 4. P. 699-703.
3. Bondarenko T. V. et al. The Base Parameters of the Compact 27 GHz Electron Linac for Medical Application //IPAC 2014: Proceedings of the 5th International Particle Accelerator Conference. – 2014. – C. 2189-2191.
4. Ashanin I. A. et al. Low-Level RF Measurements of a 2450 MHz Accelerating Structure for a 20 MeV Electron Photoinjector //2024 IEEE 9th All-Russian Microwave Conference (RMC). – IEEE, 2024. – C. 273-276.

ВЫСОКОЭФФЕКТИВНАЯ УСКОРЯЮЩАЯ СТРУКТУРА ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ ДЛЯ КОМПЛЕКСА СИЛА

Батов А.А., Ашанин И.А., Бондаренко Т.В., Гусарова М.А., Лалаян М.В., Полозов С.М.

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия



Модель бипериодической структуры с четырьмя окнами связи

Линейный ускоритель электронов (ЛУЭ) на энергию 6 ГэВ планируется использовать в качестве инжектора комплекса синхротронного излучения четвертого поколения СИЛА (Синхротрон-Лазер), проектируемого в НИЦ «Курчатовский институт». При проектировании ЛУЭ на такую энергию следует учитывать ряд эффектов, влиянием которых обычно пренебрегают при производстве установок прикладного назначения [1]. Один из таких эффектов – возникновение поперечной дипольной составляющей в ускорителях на базе бипериодической ускоряющей структуры с двумя окнами связи [2]. При помощи разработанной на кафедре 14 НИЯУ МИФИ программы BEAMDULAC [3] показано, что при

ускорении электронов в регулярной части ЛУЭ на 6 ГэВ, состоящей из 100 или более секций, дипольная составляющая приводит к раскачке поперечных колебаний, что увеличивает поперечный эмиттанс пучка примерно вдвое.

Решением данной проблемы является увеличение количества окон связи до четырех [4], как показано на рисунке. В работе приведены результаты подбора оптимальной формы окон связи исходя из максимизации коэффициента связи между ячейками и шунтового сопротивления структуры. При этом важно было сохранить низкий коэффициент перенапряженности так как в ускорителе планируется сравнительно большая напряженность поля на оси – выше 400 кВ/см. В результате оптимизации удалось получить коэффициент связи 8,4% при эффективном шунтовом сопротивлении 80 МОм/м и коэффициенте перенапряженности 2,2.

Список литературы

1. Basyl D. S. et al. New 10 MeV High-Power Electron Linac for Industrial Application // Proc. of the 7th Intern. Part. Accel. Conf. (IPAC 2016), Busan, Korea, May 8–13, 2016. V. 7. P. 1794-1796.
2. Batov A. A., Bondarenko T.V., Zbruev R.A., Gusarova M. A., Lalayan M. V., Shashkov Ya. V., Polozov S. M. Developing and Optimizing the S-Band Accelerating Structure and Coupling Device for the Radiation Therapy Facility // Physics of Particles and Nuclei Letters. 2023. V. 20. No. 4. P. 699-703.
3. Bondarenko T. V., Masunov E. S., Polozov S. M. BEAMDULAC-BL code for 3D simulation of electron beam dynamics taking into account beam loading and coulomb field // Вопросы атомной науки и техники. 2013. V. 46. P. 114-118.
4. Paramonov V. et al. The PITZ Booster Cavity--A Prototype for the ILC Positron Injector Cavities // Proceedings of the 2005 Particle Accelerator Conference. – IEEE, 2005. – С. 1030-1032.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПАССИВНОГО И АКТИВНОГО МЕТОДОВ ВЫРАВНИВАНИЯ ПОПЕРЕЧНЫХ ДОЗОВЫХ ПОЛЕЙ, ПРИМЕНИТЕЛЬНО К КАНАЛУ 26А УСКОРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА У-70

Воронков Н.Е., Максимов А.В.

«Курчатовский институт» – ИФВЭ, Протвино, Россия

Приводится сравнение двух методов выравнивания поперечных дозовых полей сооружаемого комплекса ионной лучевой терапии на Ускорительном комплексе У-70.

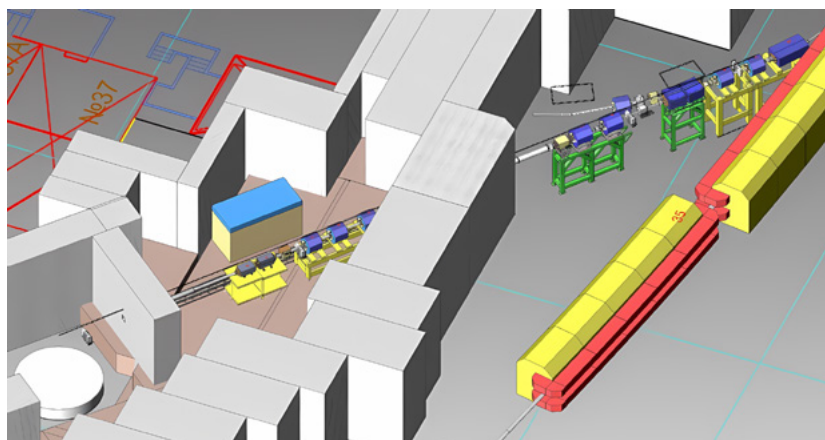


Рис. 1. Расположение оборудования в зоне канала 26А

В случае пассивного метода применяется двойная рассеивающая система, состоящая из двух рассеивателей. Первый представляет собой простой рассеиватель постоянной толщины, второй – профилированный, поперечная толщина которого задается гауссовым распределением.

При активном методе формирования равномерных дозовых полей используется система вобблер-магнитов - горизонтального и вертикального. В расчетах используется растровый способ сканирования. Этот способ позволяет получить распределение плотности для простых 2D фигур.

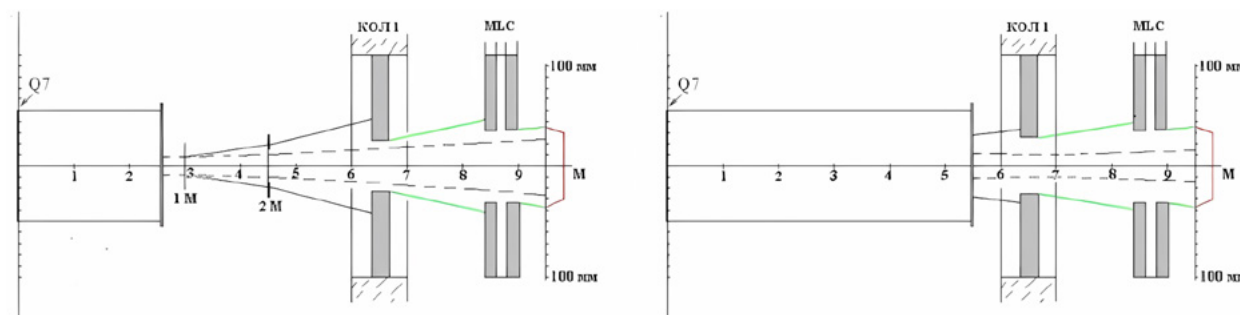


Рис. 2. Принципиальная схема пассивного метода выравнивания слева, активного метода выравнивания справа

Приводятся результаты моделирования метода пассивного и активного выравнивания и показаны преимущества и недостатки каждого метода применительно к каналу 26А.

КАНАЛ ТРАНСПОРТИРОВКИ ЦИКЛОТРОНА ДЦ280 ДЛЯ СЕПАРАТОРА GASSOL

Лисов В.И., Казаринов Н.Ю., Гикал К.Б., Соловьев Д.И.

Лаборатория ядерных реакций им. Г.Н. Флерова Объединенного института ядерных исследований, Дубна, Россия

Для проведения экспериментов по исследованию химических свойств СТЭ на фабрике СТЭ в ЛЯР ОИЯИ предполагается создание новой разделительной установки. GASSOL — заполненный газом сверхпроводящий магнитный соленоид, который отделяет продукты реакции полного слияния от первичных и рассеянных ионов пучка и продуктов фоновых реакций.

В данной работе представлена новая структура канала № 1 и результаты расчетов транспортировки пучка ионов $^{48}\text{Ca}^{9+}$ от точки вывода циклотрона DC280 до нового сепаратора GASSOL. Канал транспортировки включает в себя: коммутирующий магнит с переменной индукцией магнитного поля до 1,5, набор квадрупольных линз с градиентами до 7,7 Тл/м и диагностику пучка. Диагностика пучка состоит из цилиндров Фарадея (ЦФ), щелевых коллиматоров, секторных апертурных диафрагм и ионизационных профилометров пучка.

БЫСТРЫЕ ДИПОЛИ ДЛЯ СКАНИРОВАНИЯ ПУЧКОМ ИОНОВ

Быков С.А., Востриков В.А., Морозов И.И.

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Доза ионизирующего излучения создаётся медленно выпускаемым из синхротронного ускорителя пучком ионов (протоны с энергией 10 – 700 МэВ или $^{41}\text{Bi}^{209}$ с энергией 4 – 36 МэВ/нуклон). Распределение дозы по глубине регулируется энергией выведенного пучка. Для распределения пучка по площади облучения была предложена и разработана магнитная система формирования поля облучения. Система формирования необходима для того, чтобы равномерно покрыть область облучения $100 \times 100 \text{ мм}^2$. Магнитная система состоит из горизонтального и вертикального дипольных магнитов переменного тока. Горизонтальный и вертикальный магниты должны отклонять пучки ионов на углы не меньше, чем на ± 25 и ± 26 мрад соответственно.

Для изучения поведения магнитного поля в динамике, были сделаны и оптимизированы временные расчёты сканирующих магнитов. Расчёты проводились для частоты изменения магнитного поля 200 Гц. Оптимизация заключалась в построении сетки для расчётов, подборе продольной и поперечной проводимостей материала в шихтованном сердечнике магнита, использовании кривой намагничивания. Сердечники магнитов производятся шихтованные из стали толщиной 0,08 мм, покрытые термостойким изоляционным покрытием. Катушки – охлаждаемые, с сечением $9 \times 9 \text{ мм}^2$. Минимизированы токи Фуко, так как они искажают распределение магнитного поля и приводят к дополнительному нагреву магнита.

Было смоделировано сканирование пучком для того, чтобы посмотреть, как покрывается область сканирования, и понять какие параметры работы магнита нужно поменять, чтобы полностью покрыть эту область.

ИЗМЕРЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ДЕТЕКТОРА MPD

Антохин Е. И.¹, Батракаов А. М.¹, Бербасова Т. В.¹, Дербышева Т. Р.¹, Елисеев В. С.¹, Жилев К. В.¹, Головатюк В. М.², Клименко А. С.¹, Мухин К. А.², Пахомов А. Ю.¹, Штро К. С.¹,

¹Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

²Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

Магнит детектора MPD коллайдера NICA предназначен для создания в его апертуре однородного магнитного поля с номинальным значением магнитной индукции 0.5 Тл. Конструктивно магнит состоит из сверхпроводящего соленоида, окруженного многогранным ярмом. Для создания области высокой однородности магнитного поля (порядка 2×10^{-4}) в дрейфовом промежутке время-пролетной системы ТРС, в магните будут использованы дополнительные компенсационные катушки, расположенные в области полюсных частей магнита. Требуемая однородность магнитного поля налагает условие на точность измерения поля порядка 1×10^{-4} .

В данной статье описана конструкция системы измерений магнитного поля магнита MPD на базе трехмерного датчика Холла, движущегося в полярной системе координат. При этом три независимых серводвигателя приводят в движение датчик Холла по трем осям – радиальной, азимуту и продольной.

Описана также работа лазер-трекера как сопутствующего устройства измерительной системы для определения координат и углов датчика Холла и внесения поправок в измеренную карту поля.

Показан процесс калибровки измерительного блока системы по магнитному полю и температуре, а также функционал программного обеспечения, включая постобработку данных.

В работе приведены измеренные тестовые карты магнитного поля Земли и магнитного поля магнита MPD.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ МАГНИТНОГО ГРУППИРОВАТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ ДЛЯ НОВОСИБИРСКОГО ЛСЭ

Лачинов Ш.Б.^{1,2}, Винокуров Н.А.^{1,2}

¹Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

²Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, Новосибирск, Россия

Для различных приложений ускорительной техники требуются электронные сгустки с длиной до 1 пс, пиковым током превышающим 1 кА и эмиттансом менее 100 мм*мрад. Для получения таких сгустков широко используются специальные электронно-оптические системы, осуществляющие группировку пучка, т.н. магнитные группирователи. Несколько лет назад в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера началась разработка магнитного группирователя с поворотом на 540 градусов, устройства, которое в будущем позволит получать беспрецедентно короткие сгустки с большим зарядом [1]. Эффективная группировка при этом обеспечивается особенно сильной зависимостью времени пролёта частиц от их энергии. Кроме того, для удешевления дальнейшего обслуживания, вся электронно-оптическая система будет выполнена на постоянных магнитах. В данной работе представлен краткий обзор текущего состояния работы и изложены новые результаты, связанные с исследованием влияния пространственного заряда на поперечную динамику частиц при движении в электронно-оптических элементах проектируемого группирующего устройства.

Список литературы

1. Lachynov S.B., Vinokurov N.A., Getmanov Y.V. Development of a 540° Magnetic Buncher Based on Permanent Magnets //Physics of Particles and Nuclei Letters. – 2023. – Т. 20. – №. 4. – С. 822-824.

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ВАКУУМНЫМ ОБОРУДОВАНИЕМ БУСТЕРА NICA

Пивин Р.В., Галимов А.Р., Заграй А.И., Косачев В.В.

Объединённый институт ядерных исследований, Дубна, Россия

В Лаборатории физики высоких энергий (ЛФВЭ) Объединённого института ядерных исследований (ОИЯИ) реализуется проект «Комплекс NICA» 0. Ключевым звеном комплекса является сверхпроводящий ионный синхротрон Бустер, который обеспечивает накопление пучка, его охлаждение с помощью системы электронного охлаждения и ускорение от энергии 3,2 МэВ/н до энергии около 600 МэВ/н. Бустер имеет 4 «холодных» и 4 «тёплых» участка, а также сопряжён с двумя каналами транспортировки линейным ускорителем тяжёлых ионов (ЛУТИ) и ионным синхротроном Нуклотрон. Все вышеперечисленные особенности ставят жёсткие требования на работу вакуумной системы, которая должна обеспечивать среднее давление в кольце ускорителя на уровне $2 \cdot 10^{-9}$ Па.

В статье представлена схема вакуумной системы, структура системы управления, рассмотрен подход к выбору технических решений и представлены результаты работы системы в рамках первого ускорительного сеанса на комплексе NICA.

Список литературы

Технический проект объекта «Комплекс NICA» / В. Д. Кекелидзе и др.; под ред. В. Д. Кекелидзе и Ю. К. Потребеникова. – Дубна.: Изд. отд. ОИЯИ, 2018 г. – 90 с.

МОНИТОРИНГ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ДИПОЛЯХ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ НАКОПИТЕЛЯ «СКИФ»

Окунев И.Н., Батраков А.М., Кобец В.В., Карпов Г.В., Пахомов А.Ю., Черновский Д.П.

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

Одной из особенностей магнитной структуры накопителя ЦКП «СКИФ» являются диполи с постоянными магнитами. Их создание и использование объясняется сочетанием компактности, достижения максимально необходимого поля 2.1 Т и вместе с тем возможности аккуратной подстройки поля с помощью активной коррекции, заложенной в конструкцию магнита.

В то же время заметная температурная зависимость намагниченности постоянных магнитов, достигающая 10^{-20} Гс/градус при рабочих полях 2 Т, заставила создать средства, измеряющие долговременные уходы поля и компенсировать их. С этой целью были разработаны и протестированы дублирующие друг друга системы мониторинга магнитного поля в ВРС магнитах. Одна использует ЯМР метод, другая – измерения с датчиками Холла.

В работе обсуждаются причины создания дублирующих систем, приводятся их структурные решения, основные параметры, результаты магнитных измерений. Также описаны конструкции ЯМР датчика и датчика Холла и объясняются места их установки в магните.

СИСТЕМЫ, ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ ПУЧКОВ ДЛЯ ЛИНЕЙНЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ ИОНОВ

Гаврилов С.А.

Институт ядерных исследований РАН, Москва, Россия

В настоящее время пучки ускоренных заряженных частиц находят всё более широкое применение, как в фундаментальных, так и в прикладных научных задачах, что приводит к сооружению новых и модернизации, действующих многофункциональных ускорительных центров. При этом во время настройки и эксплуатации ускорителей решающую роль играют системы контроля и диагностики пучков, позволяющие обеспечить работу ускорителей с требуемыми параметрами.

В данной работе представлен процесс создания в ИЯИ РАН приборно-методической базы систем диагностики пучков для сооружаемых и проектируемых линейных резонансных ускорителей ионов. Кратко изложены обобщенные физико-технические принципы построения систем диагностики пучков в линейных ускорителях ионов для обоснования выбора состава систем и конфигурации отдельных устройств. Показаны универсальные конфигурации оборудования базовой диагностики пучков, разработанные для аппаратного обеспечения сооружаемых и проектируемых установок. А также приведены в качестве примеров результаты экспериментальных исследований параметров пучков с помощью изготовленного оборудования диагностики на линейных ускорителях ионов, каналах транспортировки и исследовательских стендах отечественных и зарубежных ускорительных центров.

В частности, в статье обсуждаются особенности разработки, изготовления и эксплуатации таких систем и приборов базовой диагностики пучков, как: индукционные датчики тока и цилиндры Фарадея, проволочные сканеры и многопроволочные профилометры, ионизационные и флуоресцентные мониторы, диафрагмированные и щелевые измерители эмиттанса, полосковые и электростатические датчики положения, а также измерители формы сгустков (фазовые анализаторы микроструктуры пучка). Кроме того, кратко представлены комплексные системы диагностики пучков ионов водорода смешанных зарядностей и системы диагностики пучков протонов, выведенных на воздух, для исследовательских стендов протонного облучения и протонной терапии.

СИСТЕМА МОНИТОРИНГА МАГНИТНОГО ПОЛЯ ДЕТЕКТОРА MPD

Бедарева Т.В., Антохин Е.И.

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

На базе Объединённого института ядерных исследований (Дубна, Россия) создается новый ускорительный комплекс NICA с целью изучения свойств плотной барионной материи. Коллайдер NICA обеспечит широкий спектр пучков от протонных и дейтронных, до пучков, состоящих из таких тяжёлых ионов, как ядра золота. Широкий диапазон энергий столкновений на комплексе NICA очень перспективен для проведения исследований, например, тяжёлые ионы будут ускоряться до энергии до 4,5 ГэВ/нуклон, протоны – до энергии 12,6 ГэВ.

Одной из точек взаимодействия частиц на ускорительном комплексе NICA является детектор MPD. Многоцелевой детектор MPD предназначен для детального изучения всех частиц, рождающихся в результате столкновений тяжелых ионов при различных энергиях пучка в коллайдере. Магнитное поле до 0,5 Тл.

В изучении фундаментальных свойств материи важнейшим инструментом современной экспериментальной физики высоких энергий служат детекторы на сверхпроводящих магнитах. Для отслеживания реальных изменений магнитного поля сверхпроводящего магнита для детектора MPD требуется эффективная система мониторинга постоянного магнитного поля. Причиной изменений магнитного поля могут служить: изменения тока от источника питания, положение сверхпроводящей катушки и переполусовка магнита.

В данной работе приведены конструкция элементов системы мониторинга и варианты использования датчиков контроля в сверхпроводящем соленоиде MPD. Описан принцип установки проектируемого оборудования и варианты использования необходимых приборов контроля.

ВЫСОКО СУПЕРПЕРИОДИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА НУКЛОТРОНА С КВАЗИ-ЗАМОРОЖЕННЫМ СПИНОМ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДИПОЛЬНОГО МОМЕНТА ЛЕГКИХ ЯДЕР

Сеничев Ю.В.^{1,2}, Колокольчиков С.Д.^{1,2}, Аксентьев А.Е.^{1,2}, Мельников А.А.^{1,2,4}

Паламарчука П.И.^{1,3}, Николаев Н.Н.^{2,4}, Ладыгин В.П.⁵, Сыресин Е.М.⁵

¹Институт ядерных исследований РАН, Москва, Россия

²Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия,

³Московский инженерно-физический институт, Москва, Россия

⁴Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау, Черноголовка, Россия

⁵Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

Задача адаптации структуры Нуклотрона к требованиям изучения электрического дипольного момента дейтрона и протона может быть определена комплексом проблем спин-орбитального движения: наличие прямолинейных участков с ненулевой дисперсией для размещения трех семейств секступолей, подавляющих декогеренцию прецессии спина и сохраняющих направление спина вдоль кольца. Высокая суперпериодичность структуры с квази-замороженным спином необходима для протонного пучка из-за высокого значения аномалии магнитного дипольного момента. Целью предлагаемой работы является определение взаимосвязи Нуклотрона и коллайдера NICA, в том числе модификация магнитооптической структуры Нуклотрона для создания синхротрона с двумя функциями в одном ускорителе: бустера поляризованных пучков протонов и дейтронов для инъекции в коллайдер и независимого синхротронного накопителя для проведения прецизионных экспериментов по ЭДМ легких ядер и поиска аксиона.

Нами рассмотрены два варианта модернизации Нуклотрона. В первом варианте будет исследована возможная магнитооптическая структура с сохранением всех свойств существующего ускорителя и дополнительно к этому создающая условия проведения экспериментов по измерению электрического дипольного момента дейтрона за счет размещения на кольце электрических deflectоров или фильтров Вина. Каждый из этих устройств позволит сохранять направление вектора спина вдоль направления пучка поляризованных частиц на кольце ускорителя. В первом варианте

Нуклотрона все основные параметры Коллайдера, его критическая энергия, параметры электронного охладителя, остаются неизменными.

Во втором варианте Нуклотрона предполагается сделать изменения в части согласования с Коллайдером. Неизменным остается энергия инжекции поляризованных протонов в Коллайдер на том же уровне 2-3 ГэВ. Но для исключения влияния прохождения критической энергии после электронного охлаждения предполагается подъем критической энергии в Коллайдере выше максимальной его энергии.

СОЗДАНИЕ И ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ АЛМАЗНЫХ ПЛАСТИН С АЗОТНО-ВАКАНСИОННЫМИ ЦЕНТРАМИ ДЛЯ ДАТЧИКОВ ТОКА И МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Есеев М.К.¹, Кузив И.В.¹, Костин А.А.¹, Мешков И.Н.², Сидорин А.А.², Орлов О.С.²

¹ФГАОУ ВО «САФУ имени М.В. Ломоносова», Архангельск, Россия

²Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

В работе представлены результаты экспериментальных исследований по синтезу и характеристике монокристаллических алмазных пластин с азотно-вакансионными центрами для создания устройств по измерению магнитного поля и тока на их основе. Использовался электронный пучок для создания вакансий и последующей диагностики вакансий с использованием монохроматического позитронного пучка для характеристики. Полученные результаты позволили создать основу квантовых сенсоров [1-3], запатентовать методики и прототипы устройств [4,5] для характеристики и высокоточного изменения характеристик магнитного поля.

Список литературы:

1. Мешков И.Н., Есеев М.К., Кузив И.В., Костин А.А., Сидорин А.А., Орлов О.С. Возникновение дефектов при электронном облучении синтетических НРНТ-алмазов по данным позитронной аннигиляционной спектроскопии // Письма в Журнал физика элементарных частиц и атомного ядра. 2024. Т. 21. № 3 (254). С. 660-668.
2. Babunts R.A., Gurin A.S., Uspenskaya Yu.A., Likhachev K.V., Yakovleva V.V., Batueva A.V., Skomorokhov A.M., Veyshtort I.P., Uchaev M.V., Eseev M.K., Vins V.G., Yelissev A.P., Urmantseva Z.F., Baranov P.G. Magnetic resonance express analysis and control of NV– diamond wafers for quantum technologies // Applied Magnetic Resonance. 2024. Т. 55. № 4. С. 417-428.
3. Костин А.А., Подойлов И.О., Харламова А.А., Ладвищенко А.А., Есеев М.К., Макаров Д.Н., Макарова К.А. Спектроскопия алмазных пластин, модифицированных электронными пучками // Журнал технической физики. 2025. Т. 95. № 3. С. 505-511.
4. Подойлов И.О. и др. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2024665059, дата решения 02.03.2024. «Программа по измерению внутренних напряжений в алмазной пластине».
5. Есеев М.К. и др. Патент на полезную модель № RU 2024135491, дата решения 05.06.2025. «Датчик тока».

ОПТИМИЗАЦИЯ МАГНИТНОЙ СТРУКТУРЫ СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО ОНДУЛЯТОРА ДЛЯ ЦКП «СКИФ»

Казанцев Ф.П.¹, Мезенцев Н.А.^{1,2}, Шкаруба В.А.^{1,2}

¹Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

²Центр Коллективного Пользования «СКИФ», Кольцово, Россия

В настоящее время ондуляторы все более широко используются в качестве источников синхротронного излучения, ввиду их крайне высокой интенсивности излучения на заданных гармониках. В связи с этим предъявляются серьезные требования к качеству магнитной структуры онду-

ляторов – фазовая ошибка должна не превышать 3 градуса. Задача осложняется тем, что в случае сверхпроводящих ондуляторов невозможно выполнить тонкую подстройку магнитного поля у каждого полюса после сборки, в отличие от традиционных ондуляторов на постоянных магнитах.

В ИЯФ СО РАН был предложен способ уменьшить фазовую ошибку путем предварительных магнитных измерений каждого полюса до сборки ондулятора, чтобы затем, имея информацию о распределении полюсов по уровню магнитного поля, установить их в магнитную структуру в определенном порядке, уменьшив разброс магнитных полей у соседних полюсов.

В статье описано устройство для индивидуальных магнитных измерений полюсов сверхпроводящих ондуляторов, изготавливаемых для ЦКП «СКИФ», его принцип работы. Были проведены магнитные измерения полюсов ондуляторов для станций 1-1 «Микрофокус» и 1-2 «Структурная диагностика» в количестве около 600 шт, проведен их отбор. Разработан алгоритм расстановки полюсов в магнитной структуре ондулятора. Приведены результаты магнитных измерений собранного ондулятора станции 1-1 в жидком гелии с помощью датчика Холла.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ КЕМАРИКИ ВК-95-1 В ЛЮМИНОФОРНЫХ ПРОБНИКАХ УСКОРИТЕЛЕЙ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

Терентьев И. А., Мешков О. И., Коробейников М. В.

Институт ядерной физики имени Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

В диагностике пучка на ионно-оптическом канале нуклотрон – коллайдер NICA (Nuclotron-based Ion Collider Facility) используется 10 люминофорных датчиков. В качестве люминофорного экрана в датчиках применена пластина из керамики ВК-95-1. Ожидаемая плотность заряда частиц в пучке, выпущенном из нуклотрона в канал, может превышать 10^{13} е-/см-2.

Для надежного измерения поперечных размеров пучка с помощью люминофорного датчика необходимо убедиться в линейности световыхода керамики при потоках частиц, характерных для экспериментов на NICA.

Измерение характеристик керамического люминофорного экрана было проведено на промышленном ускорителе ИЛУ-6 в ИЯФ СО РАН. при энергии пучка электронов от 1,2 МэВ до 2,5 МэВ. По результатам эксперимента были измерены: зависимость световыхода экрана от плотности пучка, спектр излучения экрана и его время высвечивания. Показано, что свойства керамики удовлетворяют требованиям экспериментов на NICA и керамика ВК-95-1 является аналогом популярного люминофорного материала Chromax.

ИЗМЕРЕНИЕ ЭМИТТАНСА СИЛЬНОТОЧНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА ПРИ ПОМОЩИ НАКЛОННОЙ МАСКИ-ПЕРЕЧНИЦЫ

Полозова П.А.¹, Живанков К.И.¹, Петренко А.В.¹, Решетов Д.Ф.¹, Никифоров Д.А.¹,

Иванов А.В.^{1,2}, Ахметов А.Р.³, Пензин И.В.³, Журавлев И.В.³, Дон А.Р.³

¹ Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

² Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

³ Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики им. акад. Е. И. Забабахина, Снежинск, Россия

Экспериментальное определение размера, эмиттанса и угловой расходимости сильноточного электронного пучка является важной задачей, возникающей в процессе настройки транспортных каналов линейных индукционных ускорителей. Обычно для этой цели производится измерение профиля пучка после его фокусировки квадрупольной или соленоидальной линзой. По зависимости размера пучка от силы линзы можно определить эмиттанс пучка и его начальные электронно-оптические параметры перед линзой. Однако, такой подход требует много времени и часто приводит к повреждению датчика профиля пучка. Альтернативой этому методу является метод измерения эмиттанса при помощи маски-перечницы, то есть наблюдение тени пучка, прошедшего через пер-

форированную пластину. В этом случае, измерения всех параметров пучка происходят за один выстрел, а сам метод не требует сильной фокусировки пучка на профилометре. В пустом пространстве фокусировка релятивистского пучка собственным магнитным полем почти полностью компенсируется кулоновским расталкиванием, а на поверхности проводящей маски тангенциальная компонента электрического поля обращается в ноль, что вблизи маски приводит к сильной фокусировки пучка за счет собственного магнитного поля. Для сильноточных пучков необходимо учитывать это эффект фокусировки как на этапе проектирования установки, так и при обработке экспериментальных данных. В данном эксперименте мы можем наблюдать профиль пучка, падающего на наклонную маску, за счет генерации переходного излучения. При этом падение пучка на маску под углом 45 градусов усложняет расчет эффекта фокусировки, так как в этом случае нарушается цилиндрическая симметрия задачи и требуются трехмерные расчеты.

В данной работе представлены результаты измерения эмиттанса сильноточного электронного пучка с энергией 20 МэВ и током 1.4 кА методом маски-перечницы. Для решения 3D задачи расчета электромагнитных полей нами разработана численная схема на основе решения уравнений электростатики и магнитостатики при помощи дискретного преобразования Фурье. Приводится сравнение результатов этого эксперимента с измерением эмиттанса методом сканирования фокусировки пучка квадрупольной линзой.

РАЗРАБОТКА ТОНКИХ ИОНИЗАЦИОННЫХ КАМЕР ДЛЯ 16-КАНАЛЬНОЙ ДЕТЕКТИРУЮЩЕЙ СИСТЕМЫ, ОСНОВАННОЙ НА МЕТОДЕ МНОГОУГЛОВОГО СКАНИРОВАНИЯ

*Тимошенко К.Д.^{1,2}, Алексеев С.И.¹, Булавская А.А.², Бушмина Е.А.^{1,2}, Милойчикова И.А.^{2,3},
Митрофанов С.В.¹, Поломошнова Д.А.², Стучебров С.Г.², Тетерев Ю.Г.¹*

¹ Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

² Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия

³ Научно-исследовательский институт онкологии, Томский национальный исследовательский медицинский центр Российской академии наук, Томск, Россия

В работе представлены результаты разработки и апробации тонких воздушнонаполненных цилиндрических ионизационных камер, предназначенных для измерения поперечного профиля электронного пучка методом многоугольного сканирования [1]. Для оптимизации процесса сбора данных была предложена многоканальная детектирующая система. В ранних исследованиях [2] была продемонстрирована работоспособность 4-канальной системы, детектирующими элементами которой были ионизационные камеры. Испытания подтвердили корректную работу всех компонентов при реализации метода многоугольного сканирования. Однако были выявлены ограничения, связанные с недостаточным пространственным разрешением. Это стало ключевым фактором, побудившим к модернизации. Диаметр анодной трубки был уменьшен с 3 мм до 2 мм, а число каналов увеличено до 16. Новое решение существенно расширяет возможности диагностики и обеспечивает более детальное восстановление формы пучка.

Для реализации обновленной конфигурации была разработана электронная схема и программное обеспечение, используемое для получения изображений текущих проекций пучка. Последовательный сбор проекций пучка под различными углами позволяет восстанавливать поперечный профиль. Стендовые испытания подтвердили, что при размещении камер диаметром 2 мм в матрице с шагом 5 мм сохраняется высокая линейность отклика и низкий фоновый ток, что обеспечивает быструю и точную диагностику электронного пучка.

Список литературы

1. Grigorieva A.A., Bulavskaya A.A., Bushmina E.A., et al., Stuchebrov S.G., Using Multiangle Scanning to Determine the Transversal Profile of a Carbon Ion Beam // Phys. Part. Nuclei Lett. 2023. V. 20, N 5. P. 1243–1245.
2. Bushmina E.A., Alexeev S., Baldin A. et al. Development and calibration of the multidetector system for multi-angle scanning method to measure 2D electron beam profile. PEPAN Letters. In press.

РАСЧЕТНОЕ ФОРМИРОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ИЗОХРОННОГО ЦИКЛОТРОНА MSC230

Лятин И.Д., Карамышев О.В.

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

В докладе представлены результаты расчетного проектирования последней версии магнитной системы изохронного циклотрона MSC230. Описаны особенности магнитной системы и примененные современные методы компьютерного моделирования, позволившие значительно упростить и ускорить процесс. Основное внимание уделено результатам моделирования динамики пучка в рассчитанном магнитном поле.

Отдельно обсуждаются перспективные подходы к оптимизации изохронизации магнитного поля с использованием методов машинного обучения. Рассматривается возможность применения этих методов для решения сложной обратной задачи – поиска оптимальной геометрии магнитной системы, обеспечивающей минимальные отклонения от идеальной изохронности. Применение методов машинного обучения представляется перспективным направлением для дальнейшего совершенствования процесса формирования магнитного поля и оптимизации характеристик ускоряемого пучка.

СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ В УСКОРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКЕ

РАЗВИТИЕ МАГНИТНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ НА ОСНОВЕ СВЕРХПРОВОДИМОСТИ

*Никифоров Д.Н., Новиков М.С., Беспалов Ю.Г., Петров М.В., Фишер Э., Золотых Д.А., Борисов В.В.,
Шемчук А.В., Сергеева Е.В., Голубицкий О.М., Кузнецов Г.Л., Бычков А.В.*

Объединённый институт ядерных исследований, Дубна, Россия

Статья посвящена развитию магнитных технологий на основе низкотемпературной и высокотемпературных сверхпроводимостей в Лаборатории физики высоких энергий им. Балдина А.М. и Векслера В.И., Объединенного института ядерных исследований в подмосковной Дубне.

Одним из первых ключевых проектов, где применялись сверхпроводящие технологии для создания магнитов, является синхротрон Нуклотрон, который был введен в эксплуатацию в 1993 году. При реализации Нуклотрона были внедрены новаторские решения: параллельного питания парожидкостным гелием более 100 магнитов, использование трубчатого сверхпроводящего кабеля на основе NbTi стрендов [1].

Пройдя долгий путь развития, включающий в себя модернизацию магнитов Нуклотрона для создания сверхпроводящих (СП) магнитов SIS100 проекта FAIR в период с 1999 по 2014 гг. [2,3], разработку СП магнитов для ускорителей комплекса NICA бустерного синхротрона и коллайдера 2010 – 2022 гг.

На сегодняшний день направление по созданию СП магнитов на основе сверхпроводимости обрело обширный перечень задач, которые коллектив Научно-экспериментального отдела сверхпроводящих магнитов и технологии (НЭОСМТ) успешно решает. В статье представлены результаты криогенных испытаний СП магнитов коллайдера комплекса NICA и синхротрона SIS100 проекта FAIR, последние разработки СП медицинского циклотрона MSC – 230 для протонной терапии с уникальной криогенной системой на основе криокулеров, результаты испытаний модельного СП дипольного магнита, работающего в цикле с рекордной скоростью роста поля 10 Тл/с, для проекта китайского коллайдера HIAF. Активно ведутся разработки по тематике высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП), на примере таких направлений как, индукционный ВТСП накопитель энергии SMES, который имеет запасенную энергию 3 МДж, рабочую температуру ВТСП обмоток 27 К, достигаемую новой неоновой криогенной системой с холодопроизводительностью 500 Вт.

Ввиду более 30-ти летнего стажа работы и 60-ти циклов охлаждения/отопления Нуклотрон нуждается в обновлении магнитной структуры кольца. В НЭОСМТ ведутся разработки магнитов на основе ВТСП для проекта Новый Нуклотрон.

Список литературы

1. Балдин А. М., Василишин В. В., Дьячков Е. М., Зельдович А. Г., Зиновьев Л. П., Иссинский И. Б., Кириллов А. Д., Кулакова Е. М., Макаров Л. Г., Семенюшкин И. Н., Смирнов А. А., Степанюк В. Л., Михайлов В. А. и др. Нуклотрон — ускорительный комплекс релятивистских ядер в ЛВЭ ОИЯИ // Тр. четвертого Всесоюз. совещ. по ускорителям заряженных частиц. М.: Наука, 1974. Т. II. С. 4–8.
2. G. Moritz, C. Muehle, M. Anerella, A. Ghosh, W. Sampson, P. Wanderer, E. Willen, N. Agapov, H. Khodzhibagiyani, A. Kovalenko, W.V. Hassenzahl, M.N. Wilson “Towards fast-pulsed superconducting synchrotron magnets”, Proc. of the 2001 Particle Accelerator Conf., Chicago, pp.211-213.
3. E. Fischer et al., “Status of the superconducting magnets for the SIS100 synchrotron and the NICA project”, J. IEEE Trans. on Appl. Supercond., vol. 23, no. 3, 2013, Art. no. 6397567, doi: 10.1109/TASC.2012.2232952.

СИСТЕМЫ ПОДСТРОЙКИ ЧАСТОТЫ В СВЕРХПРОВОДЯЩИХ УСКОРЯЮЩИХ РЕЗОНАТОРАХ

Гусарова М.А., Калиева И.Р., Лалаян М.В., Мацевский С.В., Шатохин В.Л.

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

В настоящее время в рамках проекта NICA коллаборацией научных институтов России (ОИЯИ, Дубна; НИЯУ МИФИ, Москва), Республики Беларусь (ИЯП БГУ, Минск; ФТИ НАН Беларуси, Минск) и КНР (ИМР, Китай, Ланьчжоу) проводится работа по созданию экспериментального стенда со сверхпроводящими (СП) резонаторами для линейного ускорителя ионов [1-7]. Изготовлены и проведены испытания на низком уровне мощности двух опытных образцов 325 МГц сверхпроводящих резонаторов на основе полуволновой коаксиальной линии [2]. Разработка криомодуля на четыре резонатора проводится совместно с Институтом современной физики (ИМР, Китай, Ланьчжоу). Разработка системы подстройки частоты являлась одной из важных задач проекта. Приводятся результаты исследований и расчетов смещений и компенсации частоты, проведенных в ходе разработки полуволновых коаксиальных резонаторов с рабочей частотой 325 МГц и системы подстройки частоты для них.

Список литературы

1. Sukhotski et al., Electromagnetic properties of superconductive low- β 325 MHz half-wave resonators at low RF field, *Supercond. Sci. Technol.*, 2024. DOI 10.1088/1361-6668/ad9418
2. G.V. Trubnikov, A.V. Butenko, N. Emelianov, et al., “Status of R&D on New Superconducting Injector Linac for Nuclotron-NICA”, in *Proc. IPAC'17, Copenhagen, Denmark, May 2017*, paper WEPVA014, pp. 3282-3285.
3. G.V. Trubnikov, T.V. Kulevoy, S.M. Polozov et al., “New Superconducting Linac Injector Project for Nuclotron-Nica: Current Results”, in *Proc. RuPAC'16, St. Petersburg, Russia, Nov. 2016*, paper THPSC041, pp. 626-628.
4. S.M. Polozov et al., “Status of R&D on New Superconducting Injector Linac for Nuclotron-NICA”, in *Proc. HB'18, Daejeon, Korea, June 2018*, paper TUA2WC02, pp. 83-87. doi:10.18429/JACoW-HB2018-TUA2WC02.
5. A. Butenko, E. Syresin, G. Trubnikov et al., “Status of the SC HWR cavities production for NICA project”, in *Proc. of 27th Russian Particle Acc. Conf. RuPAC2021, Alushta, Russia*, paper THA01, pp. 85-88. doi:10.18429/JACoW-RuPAC2021-THA01
6. D. Bychanok, A. Sukhotski, S. Huseu et al., «Electromagnetic properties control during prototyping, fabrication and operation of low- β 325 MHz half-wave resonators», *Journal of Physics D: Applied Physics*, 54(25), 255502. doi:10.1088/1361-6463/abf168, (2021).
7. D. Bychanok, E. Gurnevich, A. Sukhotski, et al., “Quality factor characterization of superconductive low-beta 325 MHz half-wave resonators at low microwave field amplitudes”, ID167, XXVIII Russian Particle Accelerator Conference, 11-15 September 2023, p.177-179.

СЕРИЙНЫЕ МАГНИТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ ДИПОЛЬНЫХ МАГНИТОВ ВЕРТИКАЛЬНОГО СВЕДЕНИЯ/РАЗВЕДЕНИЯ ПУЧКОВ КОЛЛАЙДЕРА NICA

Золотых Д.А.^{1,2}, Борисов В.В.¹, Галкин Н.С.¹, Голубицкий О.М.¹, Золотых Е.В.¹, Никифоров Д.Н.¹

¹Объединённый институт ядерных исследований, Дубна, Россия

²Государственный университет «Дубна», Дубна, Россия

Система вертикального сведения/разведения пучков коллайдера комплекса NICA (Nuclotron based Ion Collider fAcility) [1] включает в себя 4 одно и 4 двух апертурных дипольных сверхпроводящих (СП) магнитов (BV1 и BV2, соответственно), расположенных в прямолинейных участках, около места встречи пучков. Сборка и испытания данных магнитов осуществлялась в научно-экспериментальном отделе сверхпроводящих магнитов и технологий в Лаборатории физики высоких энергий им. В. И. Векслера и А. М. Балдина (ЛФВЭ) Объединённого института ядерных исследований.

Одной из важнейших задач на этапе сборки и тестирования СП магнитов является магнитные измерения. Для оценки параметров поля магнитов при рабочей температуре (4.5 К) выбрана методика вращающихся гармонических катушек. Используя ранее созданный магнитометрический стенд для измерения полей дипольных двух апертурных магнитов регулярной структуры коллайдера NICA [2], проведена модернизация магнитометров и магнитометрического стенда. С учётом конструктивных особенностей BV1 и BV2, создана специальная система упоров, переходных планок и внешних опор, позволяющих позиционировать имеющиеся магнитометры в центре апертуры магнитов. Так же выполнена модернизация соединительных элементов между магнитометром и системой ввода вращения, магнитометром и системой передачей сигналов на внешние разъёмы.

Проведена модернизация программного обеспечения для выполнения процедуры магнитных измерений. Выполнена процедура магнитных измерений при рабочей температуре за один сеанс охлаждения магнита. Из-за большой величины индуктивности BV2, магнитные измерения осуществлялись в каждой апертуре по очереди. Для питания магнитов использовался разработанный сотрудниками ЛФВЭ источник тока, способный работать в том числе с высоко индуктивной (~ 250 мГн) нагрузкой.

С учётом особенностей магнитов BV1 и BV2, магнитные измерения выполнялись в импульсном режиме с длительностью роста тока ~ 5 с. Данный режим измерений в дальнейшем позволит выполнить расчёт параметров магнитного поля для большого числа токов с малым шагом, что является преимуществом для дальнейшего моделирования динамики пучка в коллайдере NICA.

Выполнена обработка результатов магнитных измерений магнитов BV1 и BV2 с помощью специализированного программного обеспечения. Полученные результаты измерений могут быть использованы для расстановки магнитов в коллайдере комплекса NICA.

Список литературы

1. Technical Project of NICA Acceleration Complex (Dubna, 2015).
2. M.M. Shandov., D.A. Zolotykh et al., “First Serial Magnetic Measurements of the NICA Collider Twin-Aperture Dipoles”, in Proc. 9th Int. Particle Accelerator Conf. (IPAC’18), Vancouver, Canada, Apr.-May 2018, pp. 3645-3648. doi:10.18429/JACoW-IPAC2018-THPAL013.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СПЕКТР ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА, УСКОРЕННОГО В МУЛЬТИЧАСТОТНОМ СВЕРХПРОВОДЯЩЕМ ЛИНЕЙНОМ УСКОРИТЕЛЕ В РЕЖИМЕ НАКОПЛЕННОЙ ЭНЕРГИИ

Куракин В.Г.

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

Сверхпроводящий резонансный линейный ускоритель привлекателен для многочисленных применений, поскольку требует для возбуждения ускоряющего поля сравнительно небольшой мощности. Он может ускорять большой импульсный ток пучка в режиме накопленной энергии, используя двух- и трёхчастотную схему, позволяющую поддерживать одной и той же энергией каждого сгустка в последовательности ускоряемых сгустков (1). Было показано, что дополнительный вч резонатор, работающий на частоте, смещенной относительно частоты основного ускоряющего резонатора, может компенсировать влияние токовой нагрузки. Чтобы компенсировать дополнительный разброс энергии, вызванный конечными размерами ускоряемых сгустков, была предложена также схема с двумя дополнительными резонаторами, работающими на разных частотах, смещенных относительно частоты основного резонатора. В данной работе проводится подробный анализ динамики пучка в данной схеме ускорения. Приводятся аналитические выражения для энергетического спектра пучка, сопровождаемые численными расчётами.

Список литературы

1. G.Kurakin, P.V.Kurakin. Multi Frequency Stored Energy RF Linac. Proceedings of RuPAC2012, Saint-Petersburg, Russia, September 24-28, p. 350-352.

ВТСП МАГНИТНАЯ СИСТЕМА БЕЗ ЭЛЕКТРОДНОГО ПЛАЗМЕННОГО РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ

*Козуб С.С.¹, Агеев А.А.¹, Алтухов Ю.В.¹, Богданов И.В.¹, Брагин Е.Ю.², Власов А.С.¹,
Жильцов В.А.², Коробцев С.В.², Леженникова Д.А.², Смирнов В.М.¹, Спицын А.В.²,
Степанов В.А.², Столяров М.Н.¹, Харченко А.Д.¹, Шувалов В.И.¹*

¹НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ, Протвино, Россия

²НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

Работа посвящена разработке магнитной системы для создания магнитного поля в макете геликонного безэлектродного плазменного ракетного двигателя (ГБПРД). Для оптимизации параметров макета ГБПРД величина и конфигурация магнитного поля должны варьироваться в широких пределах. Магнитная система состоит из двух соленоидов, обмотки которых изготовлены из высокотемпературного сверхпроводника (ВТСП) второго поколения. Сверхпроводник выполнен в виде ленты, имеющей размеры 12,13×0,17 мм² с учетом изоляции. Каждый соленоид имеет внутренний диаметр обмотки 333 мм, наружный диаметр 430 мм, длину 52 мм, магнитное поле 0,5 Тл на оси при номинальном токе 150 А. Каждая обмотка соленоида имеет многослойную экранно-вакуумную теплоизоляцию и расположена в своем вакуумном кожухе. Охлаждение обмотки осуществляется через тепловые связи криокулером, работающим по циклу Гиффорда-Макмагона с холодопроизводительностью 45 Вт при 20 К. Время охлаждения магнитной системы до рабочей температуры 50 К составляет 45 часов, а ввод тока до номинального значения занимает 30 с. Криостат имеет наружный экран с водяным охлаждением для удаления теплопритока от плазмы. Опорная система позволяет менять расстояние между криостатами в диапазоне от 200 мм до 600 мм, а система питания позволяет индивидуально регулировать ток в каждой катушке, допуская в том числе встречную ориентацию магнитных полей для получения магнитной конфигурации типа «касп». Каждый соленоид имеет систему измерения температуры ВТСП обмотки и холодного конца криокулера, вакуума в криостате и температуры наружного экрана, а также систему защиты при переходе ВТСП обмотки в нормальное состояние. В докладе представлены описание конструкции, результаты расчёта характеристик и испытания соленоидов в рабочих режимах.

РАЗРАБОТКА ДВУХ-АПЕРТУРНОГО БЛОКА СВЕРХПРОВОДЯЩИХ СОЛЕНОИДОВ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПОЛЯРИЗАЦИЕЙ ПУЧКОВ В КОЛЛАЙДЕРЕ NICA

*Козуб С.С.¹, Агеев А.И.¹, Богданов И.В.¹, Борисов В.В.², Гусаков Ю.В.²,
Костромин С.А.², Никифоров Д.Н.², Сыресин Е.М.², Шувалов В.И.¹*

¹НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ, Протвино, Россия

²Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

Статья посвящена разработке двух-апертурного блока сверхпроводящих соленоидов для формирования поляризованных протонных пучков в кольцах коллайдера NICA. Рассмотрены требования к конструкции этого блока, на основе которых проведены расчеты магнитных полей, оптимизация геометрии и параметров соленоидов, дипольных корректирующих магнитов и магнитопровода двух-апертурных блоков сверхпроводящих соленоидов. Представлены результаты расчета тепловыделений и обусловленного ими нагрева соленоида, дипольных корректирующих магнитов, магнитопровода. Рассмотрена организация охлаждения магнитов блока двухфазным гелием, протекающим через каналы магнитопровода, расположенными на его наружной поверхности. Показано, что максимальная температура 5,0 К во внутреннем слое соленоида будет ниже его критической температуры 5,8 К. Предложены схемы защиты соленоида и дипольных корректирующих магнитов, проведен расчет максимальной температуры в процессе их перехода в нормальное состояние. Определена тепловая нагрузка на криостат магнитов и предложена схема охлаждения блока соленоидов, использующая криогенику NICA.

СВЕРХПРОВОДЯЩАЯ ДВУХАПЕРТУРНАЯ КВАДРУПОЛЬНАЯ ЛИНЗА ФИНАЛЬНОГО ФОКУСА ДЛЯ КОЛЛАЙДЕРА ТИПА КРАБ-ВЭЙСТ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ ССТ

*Мезенцев Н.А.^{1,2}, Седов А.А.¹, Шкаруба В.А.¹, Цуканов В.М.¹, Сыроватин В.М.¹,
Сафронов А.Н.¹*

¹Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

²Центр Коллективного Пользования «СКИФ», Кольцово, Россия

Финальный фокус является важной частью магнитной структуры, от которой зависит стабильность пучков и величина светимости коллайдера. Ключевыми элементами финального фокуса являются квадрупольные линзы, которые должны создавать магнитное поле высокого качества на орбите пучков с минимальными добавками от высших мультипольных гармоник и при этом иметь высокий уровень градиента магнитного поля и компактные размеры. Сверхпроводящие квадрупольные линзы, изготовленные по технологии ССТ (Canted Cosine Theta), хорошо удовлетворяют эти требованиям. В ИЯФ СО РАН был создан прототип двухапертурной квадрупольной линзы финального фокуса с градиентом 40 Тл/м, имеющий внутреннюю апертуру 24 мм и длину 160 мм. В докладе описаны первые результаты холодных испытаний прототипа двухапертурной линзы при параллельном расположении осей обеих линз, в том числе, процесс захлаживания в сухом криостате и тренировки на предмет получения требуемого градиента магнитного поля, а также результаты магнитных измерений трёх-секционной вращающейся катушкой. Средняя секция катушки предназначена для измерения сигнала, наведённого в центральной части, а две боковые секции измеряли краевые эффекты. Преимущество двухапертурной линзы в конфигурации финального фокуса краб-вэйст состоит в том, что встречные пучки пролетает точно по оси своих квадрупольных линз, а не под углом, как в случае одноапертурной линзы. При этом важной задачей является компенсация взаимного влияния полей соседних линз друг на друга. В докладе представлены результаты измерений влияния магнитных полей двух параллельно расположенных линз друг на друга, приводящее к взаимному искажению градиентов поля. Расположение линз под углом друг к другу значительно осложняет возможность компенсации взаимного влияния. В докладе предложен метод подавления взаимного влияния двух квадрупольных линз, расположенных под углом друг к другу, введением дополнительных мультипольных модуляций в форму витков квадрупольной обмотки на основе ССТ технологии.

СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ ВСТАВНЫЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ЦКП «СКИФ»

*Шкаруба В.А., Брагин А.В., Волков А.А., Гусев Е.А., Казанцев Ф.П., Каноник П.В.,
Мезенцев Н.А., Сафронов А.Н., Седов А.А., Тарасенко О.А., Хрущев С.В., Цуканов В.М.*

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

В ИЯФ СО РАН в настоящее время создаётся пять сверхпроводящих вставных устройств для генерации синхротронного излучения на первой очереди строящегося электронного накопителя ЦКП «СКИФ» поколения 4+ с ключевыми параметрами: энергия 3 ГэВ, периметр ускорительного кольца 476 м и эмиттанс 75 пм·рад. Для генерации синхротронного излучения будут использованы сверхпроводящие многополюсные вставные устройства, оптимизированные для проведения экспериментов на нескольких исследовательских станциях. Один из сверхпроводящих вигглеров имеет поле 4.5 Тл при периоде магнитной структуры 48 мм, а поле второго вигглера имеет величину 2.7 Тл при периоде 27 мм. Данные параметры являются рекордными с точки зрения достижения максимального уровня поля при минимальном периоде для вертикальной апертуры вакуумной камеры для пучка, равной 5 мм, и приближаются к физическому и техническому пределу. Два сверхпроводящих 258-полюсных ондулятора с уровнем поля 1.25 Тл и периодом 15.6 мм, а также один 220-полюсный ондулятор с полем 1.6 Тл и периодом 18 мм имеют оригинальную конструкцию на основе чередующихся активных и нейтральных полюсов, что позволяет минимизировать величину фазовой ошибки с помощью дополнительных

корректирующих токов до 3 градусов. На современных источниках синхротронного излучения с малым эмиттансом и энергетическим разбросом значение этого параметра особенно важно, так как большая величина фазовой ошибки будет ограничивать яркость излучения на высоких гармониках и не позволит в полной мере использовать возможности накопителя. Криогенная система данных сверхпроводящих вигглеров и ондуляторов основана на косвенном охлаждении с помощью криокулеров и позволяет, охлаждая «сухие» магниты до температуры менее 3.5 К, работать в тоннеле накопителя автономно в течение нескольких лет без расхода гелия. В докладе представлен статус работ по созданию данных сверхпроводящих устройств, в том числе, обоснование выбора основных параметров, особенности конструкции магнитной и криогенной системы, а также результаты испытаний на различных этапах их изготовления.

**УСКОРЯЮЩИЕ СВЧ
СИСТЕМЫ И ПРИБОРЫ
ДЛЯ ИХ ПИТАНИЯ**

РАЗРАБОТКА И АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИИ БАНЧЕРОВ Б1-Б3

Абакумов Я.М

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

В настоящее время в НИЯУ МИФИ ведется разработка линейного ускорителя ионов для разрабатываемого в РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров ионно-синхротронного комплекса. В данный комплекс входят резонаторы для предварительной группировки пучков (Б1) и для контроля длины пучка и обрезки его хвоста (Б2), а также резервный банчер Б3. Все ускоряющие и группирующие резонаторы данного комплекса будут работать на одинаковой частоте 81,25 МГц.

В данной работе описывается унифицированная конструкция группирователей Б1-Б3, основанная на единой параметризованной модели, а также приводятся результаты ее прочностного и вибрационного анализа. Дополнительно представлен термдеформационный расчет конструкции в СВ и импульсном режиме и оценено суммарное влияние механических деформаций на смещение рабочей частоты.

Список литературы

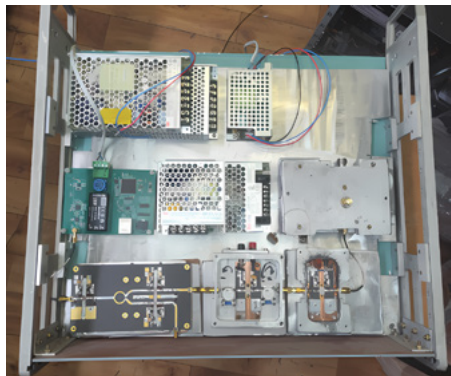
1. Polozov, Sergey & Aksentyev, A & Bulgacheva, M & Deryabochkin, O & Dmitriyev, V & Dmitriyeva, M & Dyakonov, V & Dyubkov, A & Gerasimenko, A & Gorchakov, M & Gusarova, M & Guzun, E & Indushnii, O & Ivanov, A & Korshunov, K & Kozlovskiy, A & Krasnov, M & Lalayan, Y & Lozeev, T & Telnov, A. (2021). THE CONCEPTUAL DESIGN OF THE 7.5 MeV/U LIGHT ION INJECTOR. 10.18429/JACoW-RuPAC2021-TUB07.

ИМПУЛЬСНЫЙ ГЕНЕРАТОР-ДРАЙВЕР КЛИСТРОНА С РАБОЧЕЙ ЧАСТОТОЙ 2,8 ГГц

Дьяконов М.В., Дмитриев М.С., Евсеев М.А., Туманов С.А.

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

Выполнена разработка блок-схемы импульсного задающего генератора-драйвера клистрона, произведен расчет его основных модулей, произведена их настройка. Осуществлена сборка задающего генератора и проведены его испытания.



Задающий генератор в корпусе

в корпусе показан на рисунке.

Задающий генератор состоит из синтезатора частоты, усилительных модулей, схемы управления и схемы питания. Особенностью данного генератора является наличие дополнительного выхода с непрерывной СВЧ мощностью до 200 мВт, необходимого для обеспечения фазово-частотной привязки лазера фотопушки к СВЧ сигналу. Также в генераторе предусмотрено измерение выходной мощности и возможность установки дополнительного усилительного каскада с выходной мощностью до 280 Вт.

Произведена сборка СВЧ импульсного задающего генератора-драйвера клистрона и проведены его испытания. Результаты испытаний подтверждают его соответствие заявленным характеристикам.

В НИЯУ МИФИ в рамках проекта «СИЛА» разрабатывается фотопушка, источником СВЧ мощности которой является усилительный клистрон с выходной импульсной мощностью до 6,5 МВт. Для получения требуемой выходной мощности на вход клистрона необходимо подавать от нескольких единиц до нескольких десятков Вт импульсной мощности в зависимости от частоты. Для данного клистрона был разработан импульсный задающий генератор на частоту 2800 МГц с возможностью перестройки частоты в диапазоне до 400 МГц. Задающий генератор клистрона может выдавать импульсы с длительностью до 100 мкс и коэффициентом заполнения не более 10 %, при этом максимальная мощность в импульсе составляет 120 Вт. Генератор

СИСТЕМА СВЧ ПИТАНИЯ ЭЦР ИСТОЧНИКА ИОНОВ С РАБОЧЕЙ ЧАСТОТОЙ 2,46 ГГц

Туманов С.А., Дмитриев М.С., Дьяконов М.В.

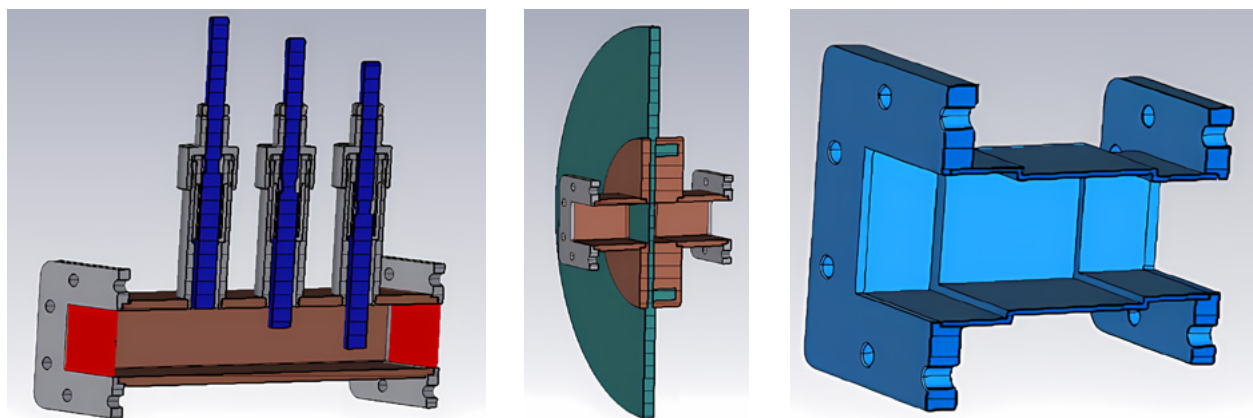
Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

Разработана система СВЧ питания ЭЦР источника ионов, включающая волноводный согласователь, высоковольтный DC-break, волноводные переходы. Разработана блок-схема, выполнено численное моделирование нестандартных компонентов системы.

Произведен расчет трехшлейфового штыревого согласователя, позволяющего согласовывать нагрузку в виде плазменной камеры с волноводной линией передачи. Расстояние между стержнями соответствует четверти длины волны в прямоугольном волноводе согласователя. При этом электрический контакт между стержнями и волноводом обеспечивается специальной дроссельной вставкой.

Выполнен расчет высоковольтного DC-break, позволяющий разделить высоковольтную и заземленную части источника. DC-break должен обеспечивать высокий коэффициент передачи при минимуме излучения в окружающее пространство, а также обладать высокой электрической прочностью, которая достигается за счет фторопластовой вставки специальной формы. Представленная конструкция рассчитана на разность потенциалов до 80 кВ.

Рассчитан ступенчатый волноводный переход с прямоугольного волновода WR-340 на WR-284. Также был разработан переход с волновода WR-284 на H-образный. Вид некоторых расчетных моделей приведен на рис.



Вид моделей согласователя, DC-break и волноводного перехода.

Источником СВЧ мощности в разработанной системе СВЧ питания является магнетрон, для работы которого разработан стабилизированный блок питания с постоянным напряжением 4 кВ и проведены его испытания.

РАЗРАБОТКА ИМПУЛЬСНОГО ЗАДАЮЩЕГО ГЕНЕРАТОРА С ВЫХОДНОЙ МОЩНОСТЬЮ 1 кВт

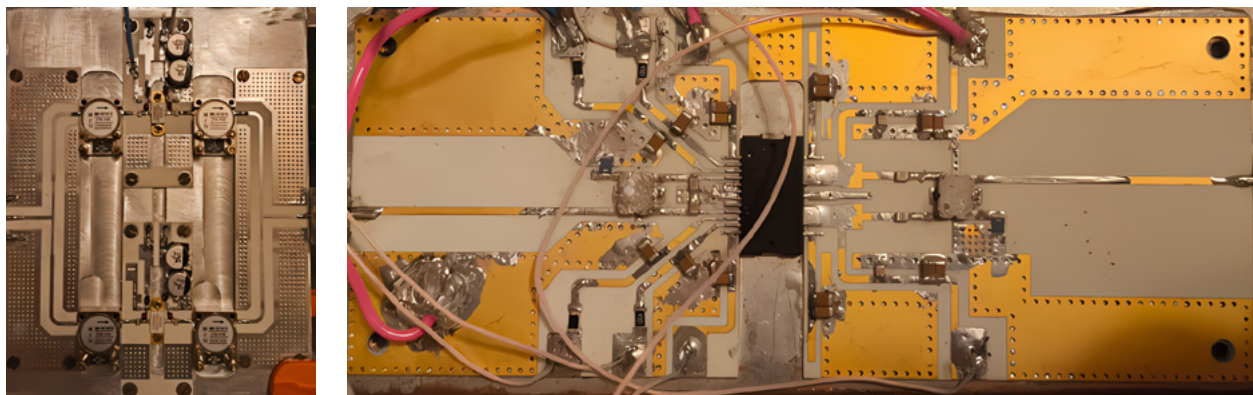
Туманов С.А., Дмитриев М.С., Дьяконов М.В., Евсеев М.А.

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

Выполнена разработка блок-схемы импульсного задающего генератора с выходной мощностью 1 кВт и рабочей частотой 2856 МГц. Произведен расчет его основных модулей, выполнена сборка и проведены испытания отдельных каскадов.

Для клистрона с выходной мощностью 18 МВт и рабочей частотой 2856 МГц был разработан импульсный задающий СВЧ генератор с выходной мощностью не менее 1 кВт. Была разработана блок-схема задающего генератора, включающая СВЧ-синтезатор, усилительные модули, схему питания и схему управления.

Выполнено моделирование первого усилительного модуля на основе A2125D025NR1. Входная мощность данного модуля не превышает 100 мВт, а импульсная выходная мощность может достигать 24 Вт. Данный модуль был изготовлен и протестирован на входной мощности 50 мВт, при этом мощность на выходе составила более 20 Вт. Расчетная выходная мощность второго усилительного модуля составляет около 200 Вт. После него мощность равномерно делится между 8 одинаковыми усилительными модулями третьего каскада, каждый из которых может выдавать до 250 Вт. В завершающей части генератора будет располагаться сумматор с изоляторами, защищающими транзисторы от обратной волны. Был произведен расчет делителей и сумматоров, рассмотрены варианты сложения мощности мостами Wilkinson, Gysel, а также Т-мостами. Плата для испытания Т-мостов и плата усилителя показаны на рис. По результатам моделирования были изготовлены различные варианты мостов и проведены их испытания.



Плата для испытания Т-мостов и плата усилителя A2125D025NR1

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ ИМПУЛЬСНЫХ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ КИЛОВАТТНОГО УРОВНЯ ОВЧ ДИАПАЗОНА НА ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЕ

Лозеева Т.А.¹, Калмыкова Л.В.¹, Александров В.А.¹, Опекунов А.Н.², Поляков Л.Е.²

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

²Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики (РФЯЦ-ВНИИЭФ), г. Саров, Россия

Представлены результаты исследования возможности реализации на отечественной элементной базе основных систем мощных импульсных твердотельных усилителей метрового диапазона длин волн для применения в ускорительной технике.

Проведено исследование рынка отечественных электронных компонентов в части поиска основного элемента твердотельного усилителя киловаттного уровня – мощного LDMOS транзистора, были разработаны усилительные ячейки на базе отечественных транзисторов, работающие на частотах 40, 81 и 162 МГц, проведены электрические и электродинамические измерения ячеек.

Для обеспечения стабильности параметров фазы и амплитуды усилителя была разработана система контроля фазы и амплитуды ВЧ сигнала (СКВЧ), исследована возможность частичного импортозамещения ее составных частей.

В результате сотрудничества с АО «НИИ «Феррит-Домен» были разработаны, произведены и испытаны опытные образцы ферритовых циркуляторов, обладающих стабильностью параметров в установившемся тепловом режиме.

Поскольку импульсные усилители мощности киловаттного уровня требуют наличия систем питания, содержащих большое количество конденсаторов, в составе данных систем используются контроллеры горячей замены (hot-swap) обеспечивающие ограничение стартового тока, плавный заряд конденсаторов и защиту от КЗ. Рассмотрено и спроектировано два варианта реализации функции горячей замены (hot-swap) контроллера на отечественных дискретных компо-

нентах и интегральных схемах [1,2]. Произведен расчет системы питания и подобраны конкретные модели конденсаторов отечественного производителя АО «Электон» [3].

Список литературы

1. URL: <https://group-kremny.ru/> (дата обращения 26.06.25).
2. URL: <https://integral.by/> (дата обращения 26.06.25).
3. URL: <https://elecond.ru/> (дата обращения 26.06.25).

ЛИНЕЙКА КОМПАКТНЫХ СУММАТОРОВ ВЫСОКОЙ МОЩНОСТИ ОВЧ ДИАПАЗОНА

Лозеева Т.А.¹, Лозеев Ю.Ю.¹, Козлов М.С.¹, Труфанов Д.С.², Акифьев А.А.²

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

²Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики (РФЯЦ-ВНИИЭФ), г. Саров, Россия

Представлены результаты разработки, макетирования и измерений на малой мощности линейки сумматоров высокой импульсной ВЧ мощности. Данные сумматоры являются конечным элементом усилительных каскадов твердотельных усилителей мощности для питания ускорителей ионов. Выбранный тип сумматоров – «коаксиальный» сумматор прямоугольного сечения $\square$ – позволяет разместить их и весь каскад усиления в массиве, например, серверных стоек и таким образом повысить компактность всего твердотельного усилителя, избежав ориентации стоек вокруг финального сумматора. Однако, линейка рабочих частот сумматоров – 40, 81 и 162 МГц – предполагает большие геометрические размеры согласующих элементов такого сумматора (как и сумматоров других типов). Предложены модификации выбранной конструкции сумматоров для работы в ОВЧ диапазоне частот с сохранением компактности сумматоров и способности стабильной работы на высокой мощности с различными КВСн вплоть до кратковременной работы на КЗ. Представлены результаты настройки и измерений на малой мощности изготовленного сумматора на рабочей частоте 81 МГц.

Список литературы

1. Патент RU2017123749A Модернизированный сумматор РЧ-мощностей. Заявитель ООО «Сименс». Изобретатель Краснов А.А., Смирнов А.Ю. Оpubл. 10.01.2019.

ВЫСОКОЧАСТОТНАЯ И ВАКУУМНАЯ СИСТЕМЫ УСКОРЯЮЩЕГО РЕЗОНАТОРА С ПОКФ НА ЭНЕРГИЮ ИОНОВ Н- 3 МЭВ С ИМПУЛЬСНЫМ ТОКОМ 30 МА

*Труфанов Д.С., Акифьев А.А., Макарова М.И., Моисеева П.С., Опекунов А.М.,
Поляков Л.Е., Сметанин М.Л.*

Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики (РФЯЦ-ВНИИЭФ), г. Саров, Россия

В настоящее время в РФЯЦ-ВНИИЭФ ведется разработка протонного синхротрона для исследования быстропротекающих процессов. Важной составной частью протонного синхротрона является линейный ускоритель, предназначенный для ускорения пучков протонов до требуемой энергии, начальной частью которого является ускоряющий резонатор с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой (ПОКФ). Ускоряющая структура с ПОКФ должна обеспечивать возможность ускорения ионов Н- до энергии 3 МэВ с импульсным током пучка ~ 30 мА с минимальными потерями.

На этапе разработки конструкции резонатора с ПОКФ проведены расчетные исследования его периферийных систем. В работе представлены результаты тепломеханических расчетов резонатора с использованием водяного охлаждения. Предложена принципиальная схема системы высокочастотного (ВЧ) питания, показаны результаты расчета узла ввода ВЧ мощности и определены требования в вакуумной системе.

РАСЧЕТНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК УСКОРЯЮЩЕГО РЕЗОНАТОРА С ПРОСТРАНСТВЕННО-ОДНОРОДНОЙ КВАДРУПОЛЬНОЙ ФОКУСИРОВКОЙ НА ЭНЕРГИЮ ИОНОВ Н- 3 МЭВ

Поляков Л.Е., Макарова М.И., Труфанов Д.С.

Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики (РФЯЦ-ВНИИЭФ), г. Саров, Россия

В РФЯЦ-ВНИИЭФ разрабатывается линейный ускоритель-инжектор с выходной энергией ионов Н- 3 МэВ и импульсным током до 30 мА. Основной частью ускорителя является резонатор с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой (ПОКФ). Он представляет собой четырех-камерный резонатор с окнами магнитной связи.

На этапе разработки конструкции резонатора проведены расчетные исследования, направленные на оптимизацию электродинамических характеристик резонатора таких, как собственная добротность, мощность потерь, шунтовое сопротивление, распределение ВЧ поля, электропрочность и т.д.

В результате проведенной работы за счет оптимизации геометрических параметров резонатора удалось обеспечить достаточную для данной длины волны сепарацию рабочей и паразитных мод ВЧ колебаний, низкую мощность потерь и требуемую неравномерность ВЧ поля в ускоряющем канале. Проведена оптимизация геометрии резонатора в приторцевых областях. Полученное в результате расчетов распределение ВЧ поля в инжекционном зазоре не оказывает влияния на пучок.

ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ И НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ СВЕРХМОЩНЫХ КЛИСТРОНОВ С ВЫСОКИМ КПД ДЛЯ УСКОРИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ

Юнаков А.Н.

АО «НПП «Исток» им. Шокина», Фрязино, Россия

В докладе представлен обзор существующих и разрабатываемых клистронов с высоким уровнем выходной мощности, предназначенных для применения в ускорительных комплексах различного назначения. Энергопотребление современных ускорительно-накопительных комплексов по данным ведущих центров составляет более 70% общей мощности потребления. В связи с этим требование по обеспечению высокого КПД клистронов является приоритетной задачей.

Специалистами ЦЕРНа в рамках проекта НЕК (High Efficiency klystrons) разработана новая концепция компактного (высотой 3 м) низковольтного (<60 кВ) двухступенчатого клистрона. Такой прибор может обеспечивать непрерывную выходную СВЧ мощность до 1,2 МВт на частоте 400 МГц с очень высоким КПД – более 85%. Проведена оптимизация тристроны. Окончательный вариант конструкции 10 лучевого тристроны показал возможность достижения КПД более 90 % при выходной мощности в диапазоне от 300 до 600 кВт.

Приведены результаты работы китайских специалистов в рамках проекта СЕРС. Для работы СЕРС требуются 96 клистронов с непрерывной мощностью 800 кВт на частоте 650 МГц. Приведены три варианта построения клистрона. Наилучший КПД достигнут в многолучевом клистроне с напряжением катода 54 кВ и суммарным током катода 20 А, 8 лучей по 2,5 А. Расчетный КПД клистрона не менее 80 %.

Для питания линейного ускорителя СЕРС требуются 33 клистрона с выходной импульсной мощностью 80 МВт на частоте 2860 МГц и 236 клистронов с выходной импульсной мощностью 50 МВт на частоте 5720 МГц. Приборы с такими параметрами разработаны и могут серийно производиться.

Представлены параметры отечественных сверхмощных клистронов для линейных ускорителей. В АО «НПП «Торий» в S диапазоне разработан клистрон с выходной импульсной мощностью не менее 20 МВт и КПД около 33%.

Специалистами Института ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН достигнута выходная импульсная мощность на разработанном ими клистроне 50 мегаватт.

В АО «НПП «Исток» им. Шокина» выпускаются клистроны в S и L диапазонах с выходной импульсной мощностью более 20 МВт. Приведены результаты модернизации клистрона, работающего в S диапазоне. Достигнут КПД прибора 42-44 %.

УСКОРЯЮЩАЯ ВЫСОКОЧАСТОТНАЯ СИСТЕМА БУСТЕРА СКИФ

*Ротов Е.А.^{1,2,4}, Кондаков А.А.¹, Крутихин С.А.¹, Купцов И.В.¹, Куркин Г.Я.¹,
Мартыновский А.Ю.¹, Трибендис А.Г.^{1,3}, Тарнецкий В.В.^{1,2}, Чернов К.Н.^{1,2}*

¹Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

²Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

³Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

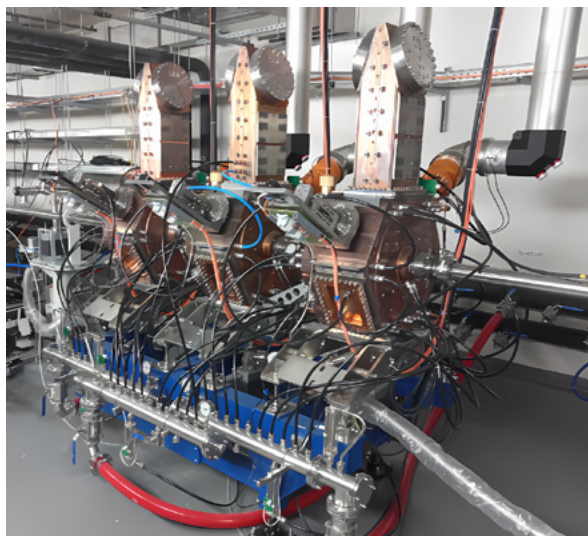
⁴Центр коллективного пользования «Сибирский кольцевой источник фотонов», Россия

Институт Ядерной Физики им. Г.И. Будкера ведёт работы по изготовлению, поставке и пусконаладке оборудования для ускорительного комплекса источника синхротронного излучения поколения «4+» «СКИФ». Бустерный синхротрон предназначен для ускорения пучка электронов до проектной энергии основного кольца (3 ГэВ). Ускоряющая ВЧ система Бустера обеспечивает необходимое ускорение.

Ускоряющая система бустера работает частоте 357 МГц. На энергии выпуска резонаторы бустера должны обеспечить ускоряющее напряжение, равное 1.2 МВ. Мощность радиационных потерь на энергии выпуска при среднем токе пучка 30 мА составляет 20.6 кВт.

ВЧ система состоит из резонаторов, генераторов (усилителей мощности) и электроники управления/синхронизации. Резонаторы ВЧ системы – нормально проводящие, с подавлением высших мод с помощью вакуумных нагрузок на основе проводящей керамики. В качестве источников ВЧ мощности используются твердотельные (транзисторные) усилители. Необходимое напряжение достигается при помощи трёх ВЧ резонаторов. Каждый из которых подключен к отдельному усилителю мощностью 50 кВт.

Резонаторы имеют Ω -образную форму и снабжены тремя двоянными волноводами с СВЧ поглотителями в оконечной части для демпфирования высших мод (ВМ), возбуждаемых в резонаторах пролетающими сгустками электронов.



ВЧ резонаторы



Усилители мощности

К настоящему времени ВЧ система установлена в Бустер. Резонаторы прошли обезгаживающий прогрев и ВЧ тренировку. На них получены необходимый для работы Бустера вакуум и напряжение. ВЧ система Бустера готова к работе с пучком.

ГИБРИДНЫЕ ФОКУСИРУЮЩИЕ ЭЛЕМЕНТЫ НА ОСНОВЕ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ

Парамонов В.В., Овчинникова Л.Ю.

Институт ядерных исследований РАН, Москва, Россия

Численным решением 3D задачи нелинейной магнитостатики исследованы линзы конечной длины как полностью состоящие из M постоянно намагниченных (ПМ) сегментов из материала SmCo_5 с $B_r = 0.9 \text{ Т}$, $M = 4, 8, 12, 16, 20$, так и гибридные конфигурации, в которых часть ПМ сегментов заменена полюсами из ферромагнетика (ФМ), [1]. Для развития выбраны гибридные линзы с $M = 4$, (рис. 1а) и $M = 8$, (рис. 1б).

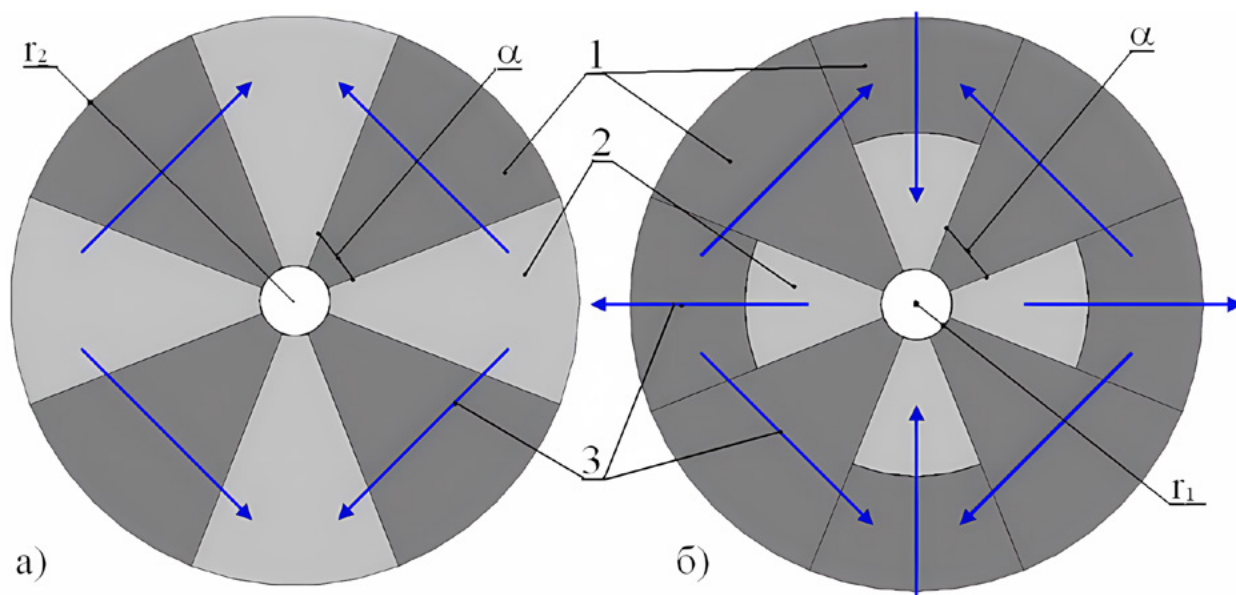


Рис. 1. Гибридные квадрупольные линзы с $M = 4$ (а) и $M = 8$ (б). 1 – ПМ сегменты, 2- ФМ полюсы, 3 – векторы намагниченности ПМ сегментов. r_1, r_2 – внутренний и внешний радиусы линз, α – угол сектора ПМ сегментов

При малых значениях α , принятом в линейном ускорителе (ЛУ) протонов для медицины [2] и реализуется величина фокусирующего градиента G и более. При отношении r_2/r_1 величина превышает достижимую в РМК [3] при любом M и α . Наконечники полюсов находятся в режиме сильного насыщения, и их форма не оказывает влияния на уровень мультипольных добавок. Величина α , позволяющая получить как высокий G , так и ограничить уровень мультипольных добавок < 0.01 , является устойчивым признаком линз. Величина индукции насыщения материала ФМ полюсов так же не оказывает критического влияния на характеристики.

Разработан алгоритм определения размеров линз и расстояния между ними для заданного интегрального градиента G_i при формировании дублетов и триплетов, учитывающий взаимное влияние линз. Приведены характеристики компактных дублетов с $G_i = 5 \text{ Т}$ для ЛУ [3], и с $G_i = 2.5 \text{ Т}$ для резонаторов [4], .

Список литературы

1. Л.Ю. Овчинникова и др., Сборник тезисов ЛаПлаз-2025, с. 256, 2025
2. V.V. Paramonov, A.P. Durkin, A.A. Kolomiets, Proc. RuPAC-2021, pp. 117-119, 2021
3. K. Halbach, NIM A, vol. 169, no. 1, pp. 1-10, 1980
4. И.В. Рыбаков и др., “Ускоряющие резонаторы ...”, RuPAC’25, 2025

УСКОРЯЮЩИЕ РЕЗОНАТОРЫ НА ОСНОВЕ СЕКЦИЙ СТРУКТУРЫ SDTL ДЛЯ УЧАСТКОВ НИЗКИХ ЭНЕРГИЙ ИОНОВ ВОДОРОДА

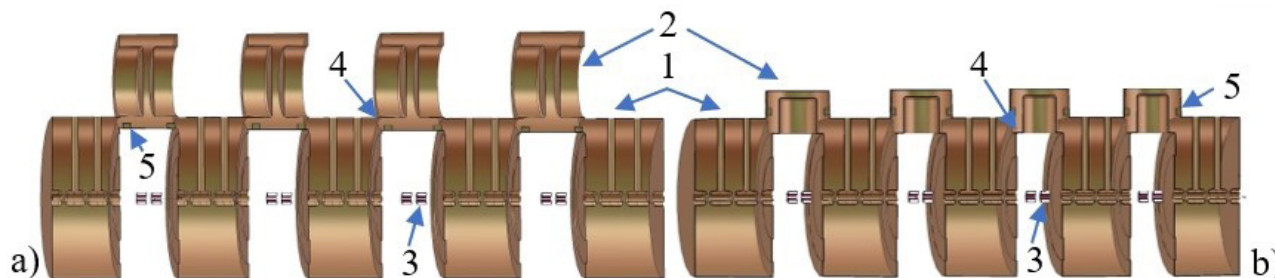
Парамонов В.В., Рыбаков И.В., Дуркин А.П., Овчинникова Л.Ю.

Институт ядерных исследований РАН, Москва, Россия

Применение коротких ускоряющих резонаторов на колебании типа TM010 и расположенными между резонаторами фокусирующими элементами – структуры Separated Drift Tube Linac (SDTL) [1] – обеспечивает несомненные технологические преимущества при сооружении, настройке и эксплуатации линейного ускорителя (ЛУ). На участке низких энергий разумно объединить несколько секций SDTL в резонатор, питаемый от одного мощного генератора, упрощая системы ЛУ. Объединение секций SDTL в резонатор с помощью цилиндрических ячеек связи (ЯС) рассмотрено в [2]. Разработаны электродинамическая модель связанной системы, учитывающая величины и направления магнитного поля ЯС на щелях связи, методика выбора оптимальных параметров ЯС и методика коррекции частот секций и ЯС до объединения в резонатор.

Выбор ориентации оси ЯС определяет знаки магнитного поля на щелях связи, что позволяет реализовать как противофазное, так и синфазное распределение ускоряющего поля в прилегающих секциях с сохранением всех свойств рабочего колебания вида $\pi/2$.

В секциях SDTL и в ЯС предусмотрены элементы настройки – плунжеры для коррекции



Резонаторы из пяти секций SDTL на частоте 325 МГц с противофазным, а) и синфазным, б) распределениями поля. 1- секции SDTL, 2 – ЯС, 3 – фокусирующие элементы, 4 – щели связи, 5 – плунжеры в ЯС

частот элементов и резонатора в целом. Плунжеры в ЯС позволяют так же регулировать отношение амплитуд поля E_0 в прилегающих секциях в пределах . Градиенты поля в фокусирующих элементах выбраны с учетом существенного увеличения длины периода фокусировки [3]. Размещенные между секциями компактные дублеты состоят из гибридных линз на основе постоянных магнитов [4].

Список литературы

1. T.Kato // Separated Drift Tube Linac for a Medium-Energy Structure, 1992, КЕК 92-10.
2. И.В. Рыбаков и др. // Сборник тезисов ЛаПлаз-2025, Москва, стр. 230.
3. А.П. Дуркин и др. // Сборник тезисов ЛаПлаз-2025, Москва, стр. 225.
4. Л.Ю. Овчинникова и др. // “Гибридные фокусирующие элементы”, RuPAC2025, 2025.

КОНТРОЛЛЕР ВЧ-СТАНЦИИ БУСТЕРНОГО СИНХРОТРОНА САРОВСКОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА

Иванова П.И.^{1,2}, Батраков А.М.¹, Востриков В.А.¹, Павленко А.В.¹, Черновский Д.П.^{1,2}

¹Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

²Новосибирский национальный исследовательский государственный Университет, Новосибирск, Россия

В РФЯЦ-ВНИИЭФ (г.Саров) создаётся ускорительный комплекс СКИ (Синхротронный Комплекс Испытательный), предназначенный для проведения радиационных испытаний электронных компонентов и аппаратуры. Одной из задач ИЯФ СО РАН в рамках данного проекта является изготовление ВЧ станции бустерного синхротрона СКИ.

Управление ВЧ станции осуществляется с помощью контроллера, основными функциями которого является измерение полей инжекции и основного изменяющегося (рэмпового) поля и генерация частоты ускоряющего напряжения в зависимости от данных этих измерений.

Измерение начального поля с погрешностью порядка 10^{-4} осуществляется с помощью датчика Холла с применением 4-фазного метода вращающегося тока, а для вычисления рэмпового поля используется метод прямого цифрового интегрирования данных, получаемых от индукционного датчика. Рабочий диапазон генерируемых частот – 0.3 – 2.6 МГц, диапазон полей инжекции 1.4 – 5.3 кГс (в зависимости от сорта частиц). Максимальное рэмповое поле достигает 16 кГс.

В докладе обсуждаются подробности структурных и технических решений контроллера ВЧ-станции, а также некоторые элементы схемотехники и полученные результаты.

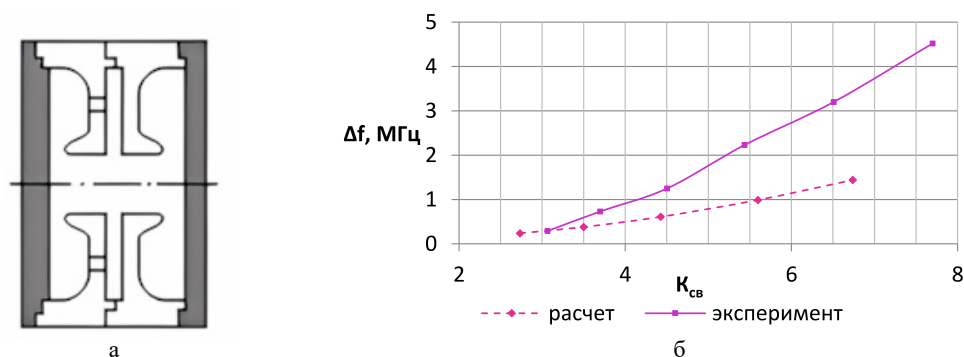
ОСОБЕННОСТИ НАСТРОЙКИ УСКОРЯЮЩИХ СТРУКТУР С БОЛЬШИМИ КОЭФФИЦИЕНТАМИ СВЯЗИ МЕЖДУ ЯЧЕЙКАМИ

Леухин С.А., Масленников О.Л., Калининченко М.А.

АО «НИИЭФА», Санкт-Петербург, Россия

Наибольшее применение при реализации линейных ускорителей электронов (ЛУЭ) получили бипериодические ускоряющие структуры (БУС) с внутренними ячейками связи на стоячей волне, работающие на $\pi/2$ типе колебаний [1]. Основными электродинамическими характеристиками БУС являются эффективное шунтовое сопротивление, коэффициент связи между ячейками, добротность, групповая скорость, максимальные значения электрического и магнитного полей на поверхности структуры, коэффициент перенапряженности электрического поля, времяпролетный фактор. Ускоряющие структуры с большими коэффициентами связи между ячейками обеспечивают высокую стабильность при изменении параметров ускоренного пучка, менее жесткие допуски на изготовление ускоряющей структуры, лучшую стабильность работы СВЧ-генератора [2].

Настройка группирующего участка ускоряющей структуры является одним из сложнейших и ответственных этапов в процессе изготовления. При настройке первого из ускоряющих резонаторов необходимо учитывать факторы, влияющие на его собственную частоту, а также учитывать влияние второго ускоряющего резонатора при больших коэффициентах связи. Для исследования был изготовлен макет (см. рис. а). В ходе исследования макета изменялся угол раствора щелей связи от 57° до 77° , что соответственно приводило к изменению коэффициента связи между ячейками ($K_{св}$). Была получена экспериментальная и расчетная зависимость (см. рис. б) разницы частот $\pi/2$ типа колебаний и собственной частоты ускоряющего резонатора (Δf) от коэффициента связи между резонаторами.



а – исследуемый макет; б – зависимость разницы частот $\pi/2$ типа колебаний и собственной частоты ускоряющего резонатора от коэффициента связи между резонаторами

Полученные зависимости (рис. б) следуют из теоретического анализа [3], а также данный вопрос теоретически рассмотрен в [2]. Проведенный эксперимент показывает, на сколько может отличаться собственная частота первого ускоряющего резонатора на группирующем участке от частоты $\pi/2$ типа колебаний при увеличении коэффициента связи между ячейками. Так же в ходе эксперимента с увеличением коэффициента связи между резонаторами наблюдалось, что колебания 0 и π типа

отдаляются на дисперсионной характеристике от $\pi/2$ типа, при этом $\pi/2$ тип колебаний приобретает все более ассиметричное положение между 0 и π типом колебаний.

Для устранения влияния фактора, связанного с большим коэффициентом связи между резонаторами, и осуществления более точной настройки ускоряющих структур предложено производить предварительные измерения первого и второго ускоряющего резонатора группирующего участка с закороченной ячейкой связи, определяя по собственным частотам резонаторов среднюю частоту (f_{cp}). Разница f_{cp} и частоты $\pi/2$ типа колебаний дает нужную поправку для настройки первого ускоряющего резонатора группирующего участка. Данный способ настройки был применен на практике для настройки ускоряющих структур, выпускаемых АО «НИИЭФА».

Список литературы

1. Справочник по диафрагмированным волноводам. / О.А. Вальднер, Н.П. Собенин, Б.В. Зверев, И.С. Щедрин; Изд.2-е. М.: Атомиздат, 1977
2. Е.А. Савин, Н.П. Собенин. Бипериодическая ускоряющая структура с внутренними ячейками связи с повышенным коэффициентом связи, Журнал технической физики, 2013, том 83, выпуск 5. С. 141-146.
3. Каминский В.И., Лалаян М.В., Собенин Н.П. Ускоряющие структуры. М.: МИФИ, 2005. 294 с.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕЗОНАНСНЫХ СИСТЕМ ЦИКЛОТРОНОВ

Данилец Л.А.

АО «НИИЭФА», Санкт-Петербург, Россия

Работа резонансных систем циклотронов сопровождается значительными тепловыделениями. Перегрев узлов резонансной системы вызывает изменения рабочей частоты и термические деформации, которые приводят к потерям интенсивности пучка и ухудшению его характеристик. Следовательно, термостабилизация резонансных систем является актуальной задачей проектирования и обеспечивается за счёт организации водяного охлаждения наиболее нагреваемых узлов.

На первом этапе разработки системы охлаждения проводятся:

- 3D расчет тепловыделений по узлам резонансной системы, например, решателем Frequency Domain Solver, входящим в состав программного комплекса CST Studio Suite;
- трассировка трубок и каналов охлаждения по узлам резонансной системы с учетом интенсивности тепловыделений.

Далее обычно строится полная 3D модель системы, что часто требует больших вычислительных ресурсов компьютера. В настоящей работе предлагается методика, позволяющая значительно уменьшить вычислительные затраты без существенного снижения точности получаемых результатов.

Для каждого узла системы проводятся:

1. аналитическая оценка усреднённого теплового потока через охлаждаемую часть поверхности;
2. аналитическая оценка усреднённого перепада температур воды и охлаждаемой части поверхности с учётом выбранного расхода воды (на практике 35 л/(мин·кВт));
3. замена трубок охлаждения узлов, где перепад температур меньше 5 °С, поверхностями постоянной температуры, которые фактически являются стоками тепла;
4. выполнение тепловых расчетов, оценка эффективности охлаждения, при необходимости повтор расчетов с доработанной расчетной моделью; выбор оптимального варианта исполнения системы охлаждения.

Для узлов с перепадом температур больше 5 °С выполняется отдельный расчет с использованием программного пакета Ansys Fluent.

Представлены результаты тепловых расчетов конкретной резонансной системы, выполненных с использованием рассмотренной методики.

АНАЛИЗ МЕХАНИЗМА ВОЗБУЖДЕНИЯ ВЫНУЖДЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ КОАКСИАЛЬНОГО РЕЗОНАТОРА

Данилец Л.А., Мудролюбов В.Г.

АО «НИИЭФА», Санкт-Петербург, Россия

Проведено аналитическое исследование механизма возбуждения вынужденных колебаний в коаксиальном резонаторе. В качестве объекта исследования применена аналитическая модель резонатора, представляющая собой отрезок регулярной линии передачи с распределенными параметрами и сосредоточенным шунтовым сопротивлением.

Для частного случая индуктивного ввода ВЧ мощности рассмотрены причины возникновения и локализация магнитных потоков в резонаторе, их влияние на вносимое в петлю ввода ВЧ мощности комплексное сопротивление. Изучен процесс установления стоячей волны как суперпозиции бегущей волны и суммы волн, отражённых от короткозамкнутого и разомкнутого концов линии передачи. Показано, что сдвиг частоты вынужденных колебаний относительно собственной частоты резонатора однозначно определяется индуктивностью петли. Режим вынужденных колебаний резонатора с коэффициентом стоячей волны, близким к единице, реализуется подбором эффективной площади петли, прямо пропорционально которой изменяются магнитный поток, сцепленный с петлей, и ток, необходимый для его компенсации.

Изучены особенности электромагнитного взаимодействия резонатора с петлёй ввода ВЧ мощности в режиме с подключением параллельно шунтовому сопротивлению дополнительного резистора. Подтверждена корректность методики калибровки высокочастотных датчиков, основанной на определении коэффициента трансформации напряжений от дополнительного резистора к индуктивному датчику.

ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛНОМАСШТАБНОГО МАКЕТА УСКОРЯЮЩЕЙ СЕКЦИИ НА БАЗЕ ИИ-РЕЗОНАТОРА

Семенников А.И., Ситников А.Л., Селезнев Д.Н., Кулевой Т.В.

НИЦ «Курчатовский институт» – ККТЭФ, Москва, Россия

В НИЦ «Курчатовский Институт» -ККТЭФ ведется разработка линейного ускорителя для компактного нейтронного источника DARIA (DARIA-neutron source Dedicated to Applied Research and Industrial). Линейный ускоритель, состоящий из двух типов ускоряющих резонаторов: RFQ и ИИ-DTL, должен обеспечить ускорения протонного пучка с током до 100 мА до энергии 13 МэВ.

В работе представлены результаты измерений электродинамических характеристик изготовленного полномасштабного макета ускоряющей секции на базе ИИ-резонатора.

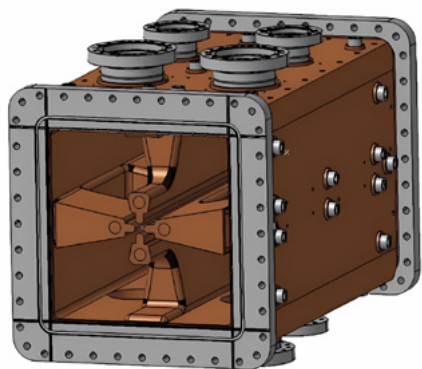
КОНСТРУКЦИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОЛНОМАСШТАБНОГО МАКЕТА СЕКЦИИ УСКОРЯЮЩЕЙ СТРУКТУРЫ RFQ

Семенников А.И.¹, Ситников А.Л.¹, Кропачев Г.Н.¹, Селезнев Д.Н.¹, Стешов А.Г.²,
Косарев А.Н.², Науменко М.Ю.³, Анфалова О.В.³, Оленин И.В.³, Султанов А.В.³,
Сидоров Б.А.³, Краев В.С.³, Остаишков Г.В.³, Кучина Ю.Э.³, Кулевой Т.В.¹

¹НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

²Институт ядерной физики имени Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

³ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. акад. Е.И. Забабахина, Снежинск, Россия



3D-модель секции резонатора RFQ

В ККТЭФ НИЦ «Курчатовский Институт» в рамках проекта DARIA ведутся работы по разработке линейного ускорителя (ЛУ) с отношением массы к заряду $A/Z = 1$, энергией 13 МэВ/н и током 100 мА. ЛУ состоит из ускорителя с пространственно однородной квадрупольной фокусировкой (ПОКФ), работающего на частоте 162,5 МГц, и ускоряющей структуры с трубками дрейфа (DTL), работающих на частоте 162,5 МГц.

Ускоритель с ПОКФ должен быть изготовлен по технологии высокотемпературной посекционной пайки. Ускоряющая структура ПОКФ будет состоять из семи секций с суммарной длиной 5.4 метра.

В рамках работ для отработки технологии производства и сравнения расчетных характеристик физической модели и натурального образца предложено изготовить полномасштабный образец одной из семи секций резонатора. В работе представлена конструкция и технология изготовления полномасштабного макета одной секции ускоряющей структуры RFQ.

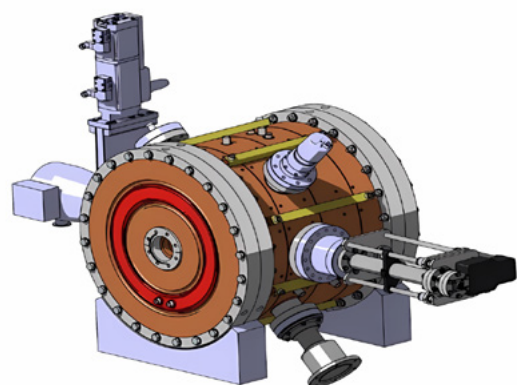
КОНСТРУКЦИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОЛНОМАСШТАБНОГО МАКЕТА, УСКОРЯЮЩЕГО ПЯТИ-ЗАЗОРНОГО РЕЗОНАТОРА С ТРУБКАМИ ДРЕЙФА

Семенников А.И.¹, Ситников А.Л.¹, Кропачев Г.Н.¹, Селезнев Д.Н.¹, Стешов А.Г.²,
Косарев А.Н.², Науменко М.Ю.³, Оленин И.В.³, Султанов А.В.³, Сидоров Б.А.³,
Краев В.С.³, Остаишков Г.В.³, Кучина Ю.Э.³, Кулевой Т.В.¹

¹НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

²Институт ядерной физики имени Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

³ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. акад. Е.И. Забабахина», Снежинск, Россия



3D-модель полномасштабного макета резонатора структуры DTL

В ККТЭФ НИЦ «Курчатовский Институт» в рамках проекта DARIA ведутся работы по разработке линейного ускорителя (ЛУ) с отношением массы к заряду $A/Z = 1$, энергией 13 МэВ/н и током 100 мА. ЛУ состоит из ускорителя с пространственно однородной квадрупольной фокусировкой (ПОКФ), работающего на частоте 162,5 МГц, и ускоряющей структуры с трубками дрейфа (DTL), работающих на частоте 162,5 МГц.

Предполагается, что ускоряющая структура DTL будет состоять из шести пятизазорных H-резонаторов.

В рамках проекта DARIA предложено изготовить полномасштабный образец резонатора для отработки технологии производства и сравнения расчетных характеристик физической модели и натурального образца. В работе представлена конструкция и технология изготовления полномасштабного макета ускоряющей структуры DTL.

ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛНОМАСШТАБНОГО МАКЕТА ОДНОЙ СЕКЦИИ РЕЗОНАТОРА RFQ

Семенников А.И., Ситников А.Л., Кропачев Г.Н., Селезнев Д.Н., Кулевой Т.В.

НИЦ «Курчатовский институт» – ККТЭФ, Москва, Россия

В НИЦ «Курчатовский Институт»-ККТЭФ ведется разработка линейного ускорителя для компактного нейтронного источника DARIA (DARIA-neutron source Dedicated to Applied Research and Industrial). Линейный ускоритель, состоящий из двух типов ускоряющих резонаторов: RFQ и IN-DTL, должен обеспечить ускорения протонного пучка с током до 100 мА до энергии 13 МэВ.

В работе представлены результаты измерений электродинамических характеристик (ЭДХ) изготовленного полномасштабного макета одной секции ускорителя RFQ.

СОВРЕМЕННЫЕ РАЗРАБОТКИ МОЩНЫХ КЛИСТРОНОВ ДЛЯ ЛИНЕЙНЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ

Трофимов Д.С., Парамонов Ю.Н.

АО «НПП «Торий», Москва, Россия

АО «НПП «Торий» является ведущим предприятием по разработке и производству мощных электровакуумных приборов для СВЧ питания ускоряющих структур линейных ускорителей заряженных частиц. Изделия предприятия нашли свое применение в комплексах стерилизации, дефектоскопии, лучевой терапии, модификации материалов, инспекционно-досмотровых комплексах.

Основные параметры мощных импульсных клистронов АО «НПП «Торий» представлены в таблице. Аналогов данных приборов нет в мире.

Основные параметры мощных импульсных клистронов АО «НПП «Торий»

Наименование	Рабочая частота, МГц	Выходная импульсная мощность, МВт	Выходная средняя мощность, кВт	Напряжение катода, кВ
КИУ-111	2450	5	5	50
КИУ-147	2450	5	25	50
КИУ-168	2856	6	5	52
КИУ-268	2856	6	25	52
КИУ-273	5712	3,6	10	45
КИУ-278	2856	8	16	58
КИУ-279	2998	3	7,5	45
КИУ-283	9300	3	6	55
КИУ-284	2856	8,9	17,8	58
КИУ-287 А/ Б	2856/ 2998	5	36/72	125

На сегодняшний АО «НПП «Торий» образует контур по производству отечественных линейных ускорителей совместно с группой предприятий:

- ООО «ЛЭУ МГУ» проводит моделирование ускоряющей структуры и подготавливает конструкторскую документацию на нее;
- АО «НПП «Торий» изготавливает ускоряющую структуру, окна ввода и вывода энергии, а также разрабатывает и изготавливает источник СВЧ энергии (клистрон);
- импульсные модуляторы (аналоги модуляторам шведской фирмы Skandinova) разрабатывает и изготавливает Лаборатория Импульсных Модуляторов (ЛИМ);
- ООО «СТАРЕКС» осуществляет сборку комплектующих линейного ускорителя;

- ООО «Скантроник Системс» разрабатывает и собирает инспекционно-досмотровые комплексы на базе ускорительных установок.

Основными направлениями развития клистронов для линейных ускорителей электронов являются повышение долговечности, КПД, средней и импульсной мощности. АО «НПП «Торий» ведет следующие разработки:

- многолучевой импульсный клистрон С диапазона длин волн с резонаторами на виде колебаний E020. Применение данного типа резонаторов позволяет увеличить площадь катодов, снизив плотность тока, тем самым увеличив долговечность изделия;
- многолучевой импульсный клистрон S диапазона длин волн с увеличенной мощностью на 33 % и увеличенным диапазоном частот на 50%.

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ АМПЛИТУДЫ УСКОРЯЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ РЕЗОНАНСНЫХ СИСТЕМ ЦИКЛОТРОНОВ

Мудролюбов В.Г., Васильченко И.Н., Данилец Л.А., Пермяков М.П., Смирнов К.Е.

АО «НИИЭФА», Санкт-Петербург, Россия

Одним из основных эксплуатационных параметров резонансных систем циклотронов является амплитуда ускоряющего напряжения. Этот параметр оказывает существенное влияние на характеристики пучков ускоренных ионов и должен постоянно контролироваться в рабочих режимах с целью его стабилизации. Поскольку прямые измерения невозможны, используется косвенный метод измерений с помощью высокочастотных датчиков. Получаемые с датчиков сигналы пропорциональны амплитуде ускоряющего напряжения, однако требуется их калибровка, признанная методика которой заключается в измерении спектра тормозного излучения паразитных электронов.

В АО «НИИЭФА» разработана и используется методика калибровки датчиков на низком уровне мощности и без применения сложной физической аппаратуры. Для её реализации между дуантом и плакировкой в центральной области резонансной системы подключается резистор с сопротивлением 50 Ом, оснащённый разъёмом под кабель с волновым сопротивлением 50 Ом. Калибровка заключается в измерении коэффициента трансформации напряжений от резистора к высокочастотному датчику. В рабочих режимах сигнал с датчика измеряется и пересчитывается в амплитуду ускоряющего напряжения программой модуля управления и стабилизации ВЧ генератора.

ПАЗАИТНОЕ МИКРОВОЛНОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ С КАТОДНОЙ НОЖКИ МАГНЕТРОНОВ В ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ

Прокопенко А.В.², Лушников И.В.¹, Морозов А.О.¹

¹АО «НПП «Магратеп», г. Фрязино, Россия

²Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

При создании электрофизических установок, использующих магнетронные генераторы, возникают вопросы электромагнитной совместимости. В магнетронах возникают паразитные колебания на более высоких частотах с мощностью в несколько процентов от установленной мощности прибора, которые выходят через элементы катодной ножки магнетрона. В электронных медицинских ускорителях магнетронный генератор размещается совместно с электронными системами контроля и управления ускорителем. Традиционными способами борьбы с паразитным излучением от катодной ножки магнетрона является её экранирование и установка поглощающих элементов. В работе рассматриваются вопросы размещения в катодных ножках магнетронов дроссельных фильтрующих элементов, запирающих электромагнитное излучение с катодной ножки на основной и второй гармониках магнетрона. Исследованы спектральные характеристики излучения с катодной ножки магнетрона М-177. Выполнена численная оптимизация по частотам дроссельной структуры для подавления излучения из катодной ножки магнетрона на частоте генерации магнетрона (π -вид) и ближайшей более высокой паразитной частоте. Проведены работы по интеграции модернизированного дроссельного элемента в конструкцию опытного образца магнетрона М-177 и экспериментальному исследованию характеристик прибора.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СВЕРХМОЩНОГО КЛИСТРОНА ДЛЯ ИСТОЧНИКА СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

Сурков С.В., Парамонов Ю.Н., Саблин В.М., Калашников Д.А., Шарков С.Е., Осин Р.А., Трофимов Д.С.

АО «НПП «Торий», г.Москва, Россия

Данная работа посвящена проектированию сверхмощного усилительного импульсного многолучевого клистрона S-диапазона частот для СВЧ системы питания линейного ускорителя электронов источника синхротронного излучения нового поколения, не имеющего мировых аналогов.

Проектирование электронно-оптических систем (ЭОС) высоковольтных сильнотоочных релятивистских клистронов связано с рядом особенностей. Увеличение массы электронов высоких энергий эквивалентно увеличению первеанса, что накладывает большие ограничения со стороны электронной пушки (главным образом, электрической прочности). Кроме того, наличие значительного самофокусирующего магнитного поля сильнотоочного электронного потока приводит к необходимости его учета как в области электронной пушки, так и в области транспортировки. В связи с этим расчеты проводились с учетом и релятивизма, и собственного магнитного поля электронов [1].

Разрабатываемая ЭОС предназначена для формирования и сопровождения электронного потока в мощном многолучевом клистроне. Было рассмотрено два варианта: с 30-ю лучами (115 кВ, 315 А) на магнитной периодической фокусирующей системе (МПФС) и 6-ю лучами (180 кВ и 300 А) в поле соленоида. При проведении предварительных расчетов предполагалось, что сокращение длин первых двух пролетных промежутков, т.е. расстояния между реверсами магнитной системы на постоянных магнитах, позволит исключить проблему низкого токопрохождения в 30-ти лучевой конструкции. Однако при последующем анализе траектории электронов была выявлена невозможность обеспечить токопрохождения на необходимом уровне в данном исполнении ЭОС, в связи с этим в дальнейшем рассматривалась только 6-ти лучевая конструкции.

Электродинамическая система (ЭДС) клистрона представляет собой набор резонаторов с коаксиальным вводом и волноводным выводом энергии. Резонаторы – кольцевые, работающие на основном виде колебаний E010, с центральной втулкой для удобства корректировки частоты резонаторов на этапе настройки ЭДС. Выходной резонатор соединен щелью связи с выводом энергии баночного типа на смеси типов волн, где керамическое окно выполнено в виде диска из алюмооксидной керамики ВК-94. Данная конструкция вывода энергии позволяет в несколько раз снизить напряженность электрического поля в области спая металл-диэлектрик, что снижает вероятность пробоев с микроострий припоя при большом уровне импульсной мощности. Введение дополнительного емкостного выступа в выходном резонаторе способствовало снижению азимутальной неоднородности электрического поля в области пространства взаимодействия электронного потока с ВЧ полем, вносимой щелью связи [2].

Как правило, критерием максимально возможного электронного КПД выбирают достижение предельного значения амплитуды первой гармоники конвекционного тока при минимальном разбросе скоростей электронов в сгустке. Исходя из требуемого коэффициента усиления и вычисленных значений характеристического сопротивления, была выбрана шести резонаторная схема прибора. Использование резонатора второй гармоники было исключено по следующим причинам: механическую перестройку кольцевого резонатора в динамическом режиме осуществить весьма сложно, а его значение частоты должно быть обеспечено с точностью до 3-5 МГц, что практически не реализуемо. Несоответствие частоты резонатора второй гармоники оптимальному значению приведет к резкому спаду КПД, что будет невозможно скомпенсировать ни величиной напряжения катода, ни значением катодного тока. В этой связи была рассмотрена классическая схема клистрона, в которой амплитуда второй гармоники наращивается увеличением пролетного пространства между четвертым и пятым резонатором до необходимого уровня электронного КПД.

Задача оптимизации многорезонаторного клистрона по данному критерию не является тривиальной в связи с большой вариативностью изменяемых параметров (пролетные длины,

расстройке частот, нагруженная добротность входного и выходного резонатора и т.д.). Была осуществлена следующая методическая схема моделирования: последовательно рассчитывались двухрезонаторный, трехрезонаторный и так до шестирезонаторного клистрона. В результате оптимизации в программе KLYS-5.63 [3] полученное значение предельного КПД составило 66% при уровне входной мощности 50 Вт.

Список литературы

1. В.М. Саблин, Р.А. Осин, В.И. Оконенко «Влияние собственного магнитного поля электронного потока на его транспортировку в мощных многолучевых клистронах», материалы XIII Всероссийской научно-технической конференции “Электроника и микроэлектроника СВЧ”, 27 мая - 31 мая 2024 года, г. Санкт-Петербург, «ЛЭТИ».
2. D. A. Komarov, E. P. Yakushkin, Y. N. Paramonov, S. E. Sharkov. Increased efficiency of high-power multiple-beam klystrons based on optimization of the output cavity. IVEC 2018.
3. Malykhin A.V., Yakushkin E.P., Kononov A.V/ Validation of klystrons development code – KLYS 4.5/Pros. IEEE2003, pp. 101-102.

СВЧ СИСТЕМА НИЗКОГО УРОВНЯ МОЩНОСТИ ДВУХСЕКЦИОННОГО ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ

Ермаков А.Н.^{1,2}

¹НИИЯФ имени Д.В. Скобельцына МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²ООО «Лаборатория электронных ускорителей МГУ», Москва, Россия

Представляемая работа посвящена разработке системы стабилизации резонансных частот, амплитуд и фаз ускоряющих полей двухсекционного линейного ускорителя электронов на основе преобразования сигнала СВЧ в цепи обратной связи с использованием квадратурной модуляции/демодуляции. Такой подход имеет ряд преимуществ, например, перед использованием фазового детектора за счет сокращения количества аналоговых элементов схемы. Следует также отметить доступность и разнообразие современной элементной базы (квадратурные модуляторы и демодуляторы, быстрые flash-АЦП и ЦАП, программируемые матрицы FPGA). Данное обстоятельство позволяет реализовывать компактные, легко масштабируемые на большее количество ускоряющих структур, системы трактов низкого уровня мощности СВЧ линейных ускорителей электронов.

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИМПУЛЬСНОГО КЛИСТРОНА S ДИАПАЗОНА KL-S-5 С ПОВЫШЕННЫМ ПЕРВЕАНСОМ

Самойлов С.Л., Левичев А.Е., Никифоров Д.А.

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

В ИЯФ СО РАН разработан и изготовлен импульсный клистрон S диапазона с выходной мощностью 50+ МВт с первеансом (далее вместо первеанса будет использоваться значения микропервеанса $\mu P = P \times 10^{-6}$) 1,5. Были изготовлены три рабочих модели, две из которых установлены на линейный ускоритель для синхротрона «СКИФ». Для повышения выходной мощности клистрона, при использовании тех же металлопористых катодов, требуется повышение первеанса.

Чтобы повысить первеанс было предложено уменьшить расстояние между катодом и анодом на 1,9 мм в катодном узле. Для расчета динамики пучка использовалась программа UltraSAM. Результат расчёта показал возможность получить первеанс 1.7 (350 А, 350 КВ). Так же в докладе представлены результаты испытания клистрона KL-S-5. Измерения максимальной выходной мощности показали, что удалось достичь более 60 МВт. Приведены амплитудная, амплитудно-частотная характеристика, график согласования входного резонатора, и сводная таблица параметров клистрона.

**ИОННЫЕ,
ЭЛЕКТРОННЫЕ
И ПОЗИТРОННЫЕ
ИСТОЧНИКИ**

МОДУЛЯТОР ДИОДНОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ПУШКИ НА ОСНОВЕ СОСТАВНОГО ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ТРАНЗИСТОРНОГО КЛЮЧА

Малашин М.В., Пономаренко А.Г.

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

Разработан и создан модулятор для питания импульсной диодной электронной пушки с термомиссионным катодом с амплитудой напряжения -50 кВ, током до 1 А и плавно регулируемой длительностью импульса от 3 до 15 мкс. Модулятор представляет собой реализацию классической схемы из коммутирующего элемента и повышающего трансформатора. Особенности модулятора является применение в качестве коммутирующего элемента высоковольтного транзисторного ключа на основе последовательно-параллельного соединения большого количества коммерчески доступных IGBT-транзисторов [1-3] и применение отечественного материала из аморфной стали в качестве сердечника повышающего импульсного трансформатора. Модулятор предназначен для использования в составе стенда автоматической тренировки и испытаний диодных электронных пушек и оснащён системой автоматической защиты коммутационного элемента от пробоев в электронной пушке.

Список литературы

1. Малашин М.В., Мошкунов С.И., Небогаткин С.В., Хомич В.Ю. Статическая симметрия напряжений при последовательном соединении твердотельных коммутирующих приборов. Успехи прикладной физики. 2013; Т. 1, № 6, с. 744-747.
2. Малашин М.В., Мошкунов С.И., Ребров И.Е., Хомич В.Ю., Шершунова Е.А. Высоковольтные твердотельные ключи микросекундного диапазона. Приборы и техника эксперимента. 2014; № 2, с. 53-56.
3. Малашин М.В., Мошкунов С.И., Хомич В.Ю. О переходных процессах в ключах на последовательно соединенных биполярных транзисторах с изолированным затвором. Приборы и Техника Эксперимента. 2016; № 2, с. 67-70.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ЗАПУСК ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОБРАЗЦА СВЧ ЭЛЕКТРОННОЙ ПУШКИ С ФОТОКАТОДОМ ДЛЯ КОМПЛЕКСА «СИЛА» НИЦ «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»

Лалаян М.В.¹, Абакумов Я.М.², Авксентьев С.Д.¹, Ашанин И.А.¹, Батов А.А.¹, Бендин С.С.¹, Бехтев Б.В.¹, Бондаренко Т.В.¹, Буянов Г.О.¹, Владимиров М.В.¹, Гачева Е.И.³, Гусарова М.А.¹, Дмитриев М.С.¹, Дьяконов М.В.¹, Ефимов М.А.¹, Збруев Р.А.¹, Иванов О.А.¹, Индюшный Е.Н.¹, Ицук Д.И.¹, Ключевская Ю.Д.¹, Лазарев Г.В.¹, Мацевский С.В.¹, Миронов С.Ю.³, Окишев К.Н.⁴, Полозов С.М.¹, Пономаренко А.Г.¹, Прокопенко А.В.¹, Рациков В.И.¹, Савченко А.А.¹, Самароков Н.Ю.¹, Сергеева Д.Ю.¹, Смирнов С.А.¹, Соломатин М.А.¹, Стеблин Н.А.¹, Страхов П.В.¹, Таусенев А.В.⁴, Теняков С.Ю.⁴, Тищенко А.А.¹, Туманов С.А.¹, Шатохин В.Л.¹, Юрин И.А.^{1,2}

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

²НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

³Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия

⁴ООО «Авеста», Москва, Россия

В настоящее время в НИЦ «Курчатовский институт» ведутся работы по проектированию российского источника излучения 4го поколения «СИЛА». Предполагается, что накопительный синхротрон и несколько лазеров на свободных электронах будут использовать один линейный ускоритель на полную энергию 6 ГэВ для генерации ускоренного пучка электронов. При этом для генерации пучка, инжектируемого в накопительный синхротрон, будет использоваться классический источник с термопушкой, а для ЛСЭ – фотопушка. Далее будет установлена регулируемая ускоряющая часть, включающая более 100 одинаковых секций.

В докладе будут представлены результаты разработки и изготовления основных частей СВЧ фотопушки с энергией на выходе около 7 МэВ, а также результаты запуска установки в тестовую эксплуатацию. Ускоряющая структура были изготовлена и в ходе настройки получено распределение амплитуды ускоряющего поля в ячейках с отклонением не хуже 2 %. Изготовлен комплект металлических (медных и молибденовых) и алмазных катодов, а также изготовлена револьверная система замены катодов. Разработаны и изготовлены диагностические устройства: датчики положения и тока пучка, цилиндр Фарадея, люминофорные экраны, щелевой профилометр. ИПФ РАН совместно с компанией «Авеста» разработана и изготовлена лазерная система. Экспериментальный образец СВЧ фотопушки собран, откачен до уровня остаточного давления лучше 10-8 Торр, проведено СВЧ кондиционирование и выполнен физический пуск ускорителя.

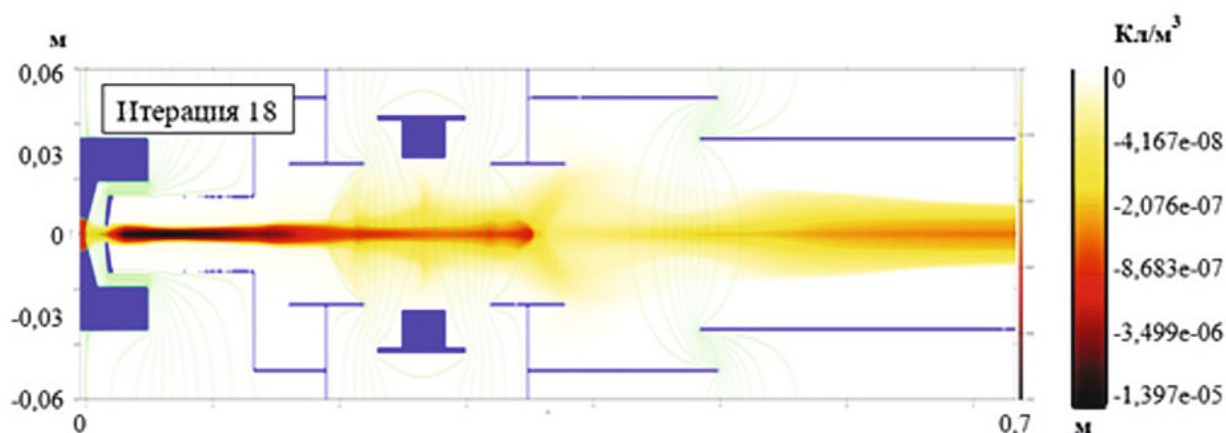
КОМПЕНСАЦИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ЗАРЯДА ИОННОГО ПУЧКА В ЭЦР ИСТОЧНИКЕ

Макаров А.В., Рациков В.И.

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

Проектирование современных ускорителей критически зависит от точного моделирования динамики пучков. Особую сложность представляют задачи динамики многокомпонентных пучков, в состав которых входят частицы с разным отношением заряда к массе. К ним относится и задача учета эффекта нейтрализации пространственного заряда первичного пучка в ионных источниках. Используемые в настоящее время PIC методы для решения задач подобного рода весьма ресурсоемки, а метод трубок тока для двухкомпонентных пучков пока недостаточно разработан.

Создана программа, написанная на языке программирования C++ с использованием библиотеки IBSimu [1]. В функционал библиотеки входят алгоритмы численного решения уравнения Пуассона, раздача заряда на сетку, интегрирование уравнений движения и т.д. Алгоритм программы является модификацией метода трубок тока, а само моделирование представляет собой итерационный процесс накопления электронного заряда в траекториях ионов с последующим получением установившегося решения.



Распределение пространственного заряда электронов в итерации цикла моделирования нейтрализации пучка

В ходе работы рассчитана динамика ионного пучка без компенсации, с компенсацией электронами и с 10% величиной заряда. Проведен сравнительный анализ параметров ионного пучка, таких как его огибающие, параметры Твисса, зависимости степень компенсации ионного пучка от продольной координаты.

Список литературы

1. <https://ibsimu.sourceforge.net>

НОВАЯ ВЕРСИЯ ПРОГРАММЫ BEAMDULAC_RF_GUN ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИКИ ПУЧКА ЭЛЕКТРОНОВ В ФОТОПУШКАХ

Полозов С.М., Ращиков В.И.

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

Для мощных лазеров на свободных электронах с энергиями пучка в несколько ГэВ и компактных источников излучения энергией до нескольких десятков МэВ необходимы яркие сгустки электронов с зарядом до нескольких нКл при пико- или даже фемтосекундных длительностях. В этом случае пиковый ток в сгустке может составлять несколько сотен ампер. Для получения таких сгустков обычно используются СВЧ электронные пушки с фотокатодом. Особенностью фотоэмиссии является также очень низкая энергия электронов, вылетающих из катода, составляющая всего несколько эВ. В данной ситуации квазистатическая составляющая собственного поля сгустка будет оказывать определяющее влияние на динамику сгустка на первых нескольких миллиметрах траектории, пока энергия электронов не достигнет нескольких сотен кэВ. К задаче динамики пучка электронов в СВЧ фотопушке в процессе эмиссии и при движении около катода традиционный метод моделирования квазистатической компоненты собственного поля «частица в ячейке» (PIC) и его модификации не может быть применен напрямую из-за особенностей постановки граничных условий. Традиционно в PIC методе используют периодические продольные граничные условия, а собственное поле вычисляется в системе координат, связанной со сгустком. Период принято выбирать равным периоду СВЧ поля. Периодические граничные условия для СВЧ пушки с фотокатодом не применимы, так как эмиссия происходит из проводящей (электрической) стенки, а период СВЧ поля слишком велик по сравнению с длительностью сгустка. В докладе будут рассмотрены особенности построения алгоритмов для решения данной задачи и результаты моделирования динамики ярких сгустков, полученные с помощью новой версии программы BEAMDULAC-RF_gun_8.

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ СИСТЕМЫ ЭКСТРАКЦИИ ЭЦР ИСТОЧНИКА

Дьяконов М.В., Дмитриев М.С., Иванов О.А.

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

В связи с необходимостью высокой точности позиционирования извлекающего электрода относительно магнитной системы и плазменного электрода, а также обеспечения возможности замены всех элементов системы экстракции, проведены численные расчёты. Целью моделирования являлась оптимизация расположения несимметричной электростатической линзы в различных конфигурациях системы. На основе полученных данных определены параметры, обеспечивающие минимальные значения эмиттанса и стабильную форму пучка на выходе источника.

Представлены результаты разработки ЭЦР источника и численного моделирования системы экстракции и фокусировки ионного пучка. Особенностью конструкции является длиннофокусная система экстракции с общей длиной извлекающей части более 700 мм. Моделирование выполнено на основе квазипирсовской системы электродов, компенсирующей пространственный заряд за счет специально подобранной конфигурации электрического поля. Определена оптимальная геометрия электродов для формирования сходящегося пучка с диаметром менее 10 мм и нормализованным эмиттансом менее 0,003 мм·рад. На рис. 1 представлена расчетная модель, а на рис. 2 зависимости среднеквадратичного поперечного эмиттанса от координаты при перемещении центрального электрода для пучка протонов.

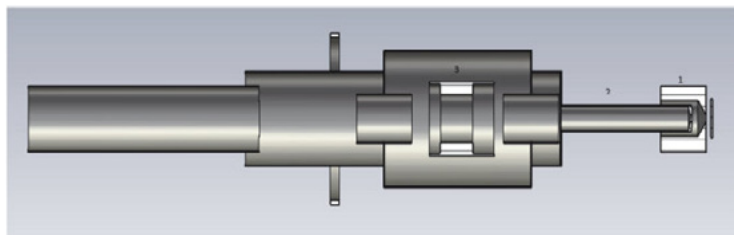


Рис. 1. Расчетная модель экстрактора: 1 – плазменный электрод, 2 – извлекающий электрод, 3 – блок электродов электростатической линзы с несимметричным центральным электродом

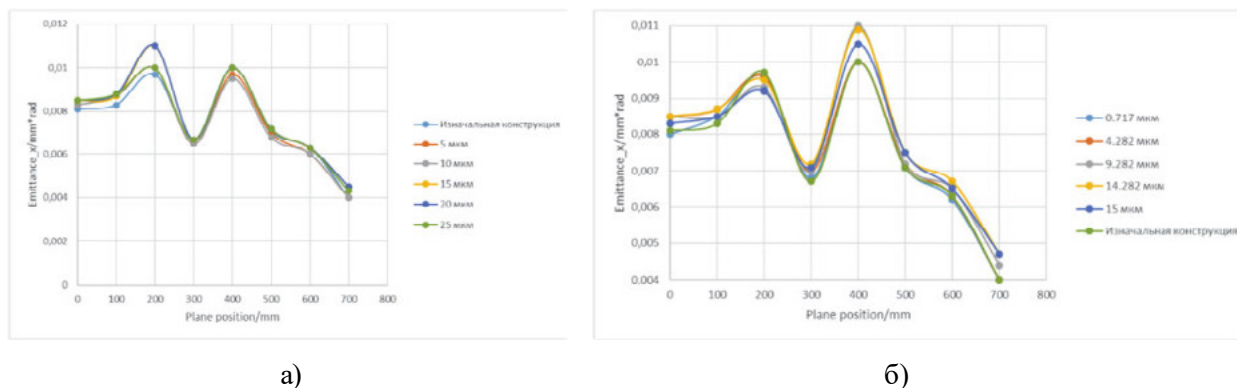


Рис. 2. Зависимости среднеквадратичного поперечного эмиттанта от координаты для пучка протонов при смещении центрального электрода линзы: а) от источника, б) к источнику

МЕТОД ФАЗОВОЙ АВТОПОДСТРОЙКИ ЧАСТОТЫ ЛАЗЕРА С ЧАСТОТОЙ ВОЗБУЖДЕНИЯ КЛИСТРОНА УСКОРИТЕЛЯ S ДИАПАЗОНА

Журавлёв П.П., Кобец В.В., Ноздрин М.А.

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

В настоящее время в ОИЯИ проводится разработка и отладка фотоинжектора на основе СВЧ-фотопушки S-диапазона для ускорителя электронов ЛИНАК. Использование фотопушки вместо существующей термопушки позволит улучшить качество электронного пучка, его эмиттанс, энергетический разброс и расширить возможности профилирования пучка по времени.

Для правильной работы фотоинжектора, наряду с многими другими параметрами, должна быть правильно выбрана фаза инжекции относительно СВЧ поля.

Для этого необходимо обеспечить импульс лазера в определённой фазе высокочастотного ускоряющего импульса. Используется разработанный в ИПФ РАН лазер [1], модифицированный под частоту ≈ 40 МГц. Частота СВЧ-импульса клистрона 2856 МГц. Длительность импульса лазера, снимаемого с фотодиода, – несколько десятков пс в зависимости от типа применяемого фотодиода. Т.е. необходимо обеспечить фазовую синхронизацию задающего генератора клистрона с 71-й гармоникой задающего генератора импульсов лазера (рис. 1).

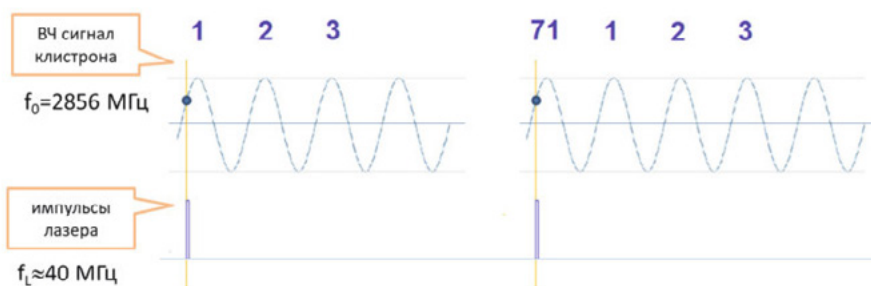


Рис. 1. Синхронизация лазера с СВЧ

Амплитуда 71-й гармоники при оптимальной ширине импульса лазера оставляет всего 0,009 от амплитуды импульса. Резонансным методом выделить 71-ю гармонику крайне проблематично ввиду близости соседних частот, требуемой добротности резонансной системы с высокими реактивностями при незначительных расстройках, метод предварительного деления частоты клистрона сводит на нет точность фазового детектора – точность уменьшается в 71 раз.

Предложено использовать радиочастотный смеситель для фазовой автоподстройки на гармониках импульса. При подаче синусоидального СВЧ сигнала (f_0) и импульсов лазера (f_L) на выходе смесителя получается суперпозиция частот со значениями $kf_0 \pm n f_L$. При близких f_0 и $n f_L$ на выходе возникают

биения. Все остальные высокие частоты отсекаются фильтром нижних частот. При $kf_0 = n f_L$ на выходе получается постоянное напряжение пропорциональное фазовому сдвигу в диапазоне $-\frac{\pi}{2} \leq \varphi \leq \frac{\pi}{2}$.

Для облегчения работы с малыми сигналами предложено использовать два смесителя, на входы которых поданы рабочий СВЧ сигнал и сигнал гетеродина, и импульсный сигнал лазера и сигнал того же гетеродина. Сигнал гетеродина отличается от рабочего ВЧ сигнала примерно на 10 МГц. На выходе смесителей получаются сигналы частотой 10 МГц, разность фаз между которыми соответствует фазовому сдвигу между СВЧ сигналом и 71-й гармоникой импульсов лазера. Этот сигнал легко усиливается ВЧ усилителями и может быть обработан цифровыми фазовыми детекторами, например, на логических элементах.

Используя принцип масштабирования радиотехнических систем [2], в среде Multisim NI была реализована схема балансного смесителя на частотах на 3 порядка ниже – 2856 кГц и 40 кГц. Значения f_0 и $n f_L$ были выбраны немного отличающимися для получения биений, что позволило наблюдать биения вместо измерения постоянного напряжения для оценки работоспособности устройства.

На выходе смесителя был выделен сигнал биений между частотой 2856 кГц и 71 й гармоникой сигнала 40 кГц. Также был проверен вариант с 57 гармоникой частоты 50 МГц. Данная симуляция подтвердила принципиальную работоспособность этого метода фазового детектирования без использования резонансных элементов и делителей частоты.

Список литературы

1. Gacheva E.I. et al. Laser Driver for a Photoinjector of an Electron Linear Accelerator //IEEE J. Quant. Electron. 2014. V. 50, No. 7. P. 522-529.
2. И. С. Гоноровский. Радиотехнические цепи и сигналы М. «Радио и связь» 1986.

ПОЛУЧЕНИЕ ПУЧКА ИОНОВ ТИТАНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФТОРИДОВ И ФТОРИДООБРАЗУЮЩИХ ПРЕКУРСОРОВ В ЭЦР-ИСТОЧНИКЕ

*Пугачев Д.К., Бондарченко А.Е., Берестов К.И., Логинов В.Н., Лебедев А.Н.,
Кузьменков К.И., Миронов В.Е., Подойников Д.С., Яковлев Д.С.*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

Получение многозарядных ионов титана представляет значительный интерес для экспериментов с использованием ускорительной техники, технологий поверхностной модификации и приложений в ядерной физике. Однако с учетом высокой температуры плавления титана (1668 °С) и низкого давления насыщенных паров, получение пучков заряженных ионов данного элемента из ЭЦР источника ионов представляет собой крайне сложную задачу. Выбор прекурсоров и методов их подачи в плазму ЭЦР источника играет ключевую роль в достижении высокой эффективности ионизации, стабильности плазмы и долговечности работы источника.

В настоящее время для ввода тугоплавких металлов в ЭЦР-источники применяются три основных метода:

- MIVOC (Metal Ions from Volatile Compounds) – введение летучих металлорганических соединений в плазму; метод эффективен для металлов, для которых доступны соответствующие летучие компаунды;
- Распыление (Sputtering) – плазменное распыление металлического образца, расположенного внутри плазменной камеры; универсальный метод, требующий точного контроля параметров, но обладающий значительно низкой эффективностью по сравнению с другими методами;
- Высокотемпературная печь (НТО) – испарение металлов при повышенных температурах с использованием резистивного или индукционного нагрева; метод требует точного температурного контроля и применения термостойких конструкционных материалов.

В рамках работы, для титана были исследованы альтернативные подходы получения нейтральных атомов в плазменной камере ЭЦР источника, включая использование фторсодержащих соединений. Титановые фториды (TiF_3 , TiF_4) обладают сравнительно высоким давлением насыщенного пара при умеренных температурах, что позволяет использовать резистивный нагреватель с рабочей температурой до 1000°C . Второй метод, рассмотренный в работе, описывает эксперимент с образованием летучих титановых фторидов непосредственно в плазменной камере в результате химического взаимодействия титановой фольги с гексафторидом серы (SF_6). Данный подход обеспечивает контролируемую и эффективную подачу титана в ЭЦР плазму, с удовлетворительной стабильностью пучка из источника.

ИЗМЕРЕНИЕ МАСС-ЗАРЯДОВОГО СОСТАВА ПУЧКА С ВАКУУМНО-ДУГОВОГО ИСТОЧНИКА ИОНОВ МЕТАЛЛА НА ТЯЖЕЛОИОННОМ УСКОРИТЕЛЕ ТИПР

Огородников С.А.^{1,2}, Федин П.А.¹, Прянишников К.Е.¹, Кулевой Т.В.¹

¹НИЦ “Курчатовский институт”, Москва, Россия

²Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

В работе представлены результаты измерений состава пучков ионов различных металлов (Fe, Al, Mo, V, Ni, Co, Ti, Cr, Cu), генерируемых вакуумным дуговым ионным источником металлов (ВДИИМ) на ускорителе ТИПР. С применением времяпролетного метода определены временные характеристики и зарядные состояния ионов в течение импульса длительностью 330 мкс. Проведен анализ зависимости состава пучков от времени горения дуги. Полученные данные важны для оптимизации параметров ускорителя, для проведения экспериментов по изучению радиационного воздействия на материалы ядерных реакторов и термоядерных установок, а также исследованию влияния ионного облучения на свойства высокотемпературных сверхпроводников. Результаты могут быть использованы в прикладных исследованиях, включая модификацию поверхностей ионной имплантацией.

РАЗРАБОТКА ИСТОЧНИКА ИОНОВ ЭЛЕКТРОННО-ЦИКЛОТРОННОГО РЕЗОНАНСА

Завадцев А.А.¹, Завадцев Д.А.¹, Клачков А.П.², Чуранов Д.В.¹

¹ООО «Нано Инвест», Москва, Россия

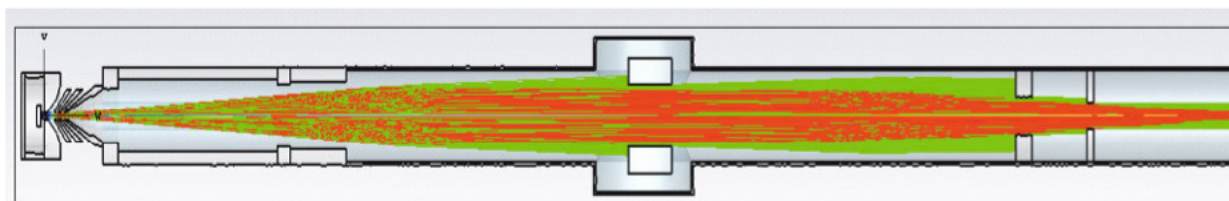
²ООО «Колибри Инжиниринг», Москва, Россия

Источник ионов на основе электронно-циклотронного резонанса (ECR) разработан, создан и испытан в рамках проекта по созданию линейного ускорителя ионов с отношением $Z/A=0.5$ (дейтроны и альфа-частицы), работающего в импульсном режиме, и предназначенного для производства изотопов медицинского назначения.

Пучок ионов, генерируемый источником, проходит линию транспортировки пучка низкой энергии (LEBT) и попадает с ускоряющую систему низкой энергии (RFQ) [1] со средним радиусом апертуры 4,5 мм, после которой он ускоряется в ускоряющей системе средней энергии.

Источник ионов включает следующие составные части: ионизационная камера ECR с частотой 2450 МГц, магнитная система, четырехэлектродная ионно-оптическая система (ИОС) с рабочим напряжением до 75 кВ и радиусом апертуры 4 мм, твердотельный СВЧ генератор с мощностью до 2,8 кВт, волноводная система, вакуумная система, система подачи рабочего газа. Магнитная система включает две катушки и шестиполосный постоянный магнит.

Рассчитанные траектории ионов He^{2+} и He^+ в источнике ионов и в LEBT, включающей две электромагнитные линзы, до входа в RFQ показаны на Рис. 1. Пучок He^{2+} фокусируется в LEBT до среднеквадратичного значения радиуса 0,47 мм в сечении кроссовера, который располагается на выходе LEBT – на входе RFQ. Пучок He^+ расфокусируется в LEBT и практически целиком поглощается системой коллиматоров в LEBT и входной апертурой RFQ, где его среднеквадратичный радиус составляет 30 мм.

Рис.1 Траектории пучков He^{2+} (красный) и He^{+} (зеленый)

На Рис.2 показаны: а) ионизационная камера с магнитной системой, волноводным вакуумным окном и вакуумным датчиком, б) рассчитанная область резонансного магнитного поля ($0,0875 \pm 0,003$) Т в ионизационной камере, в) ИОС внутри керамического изолятора CF200.

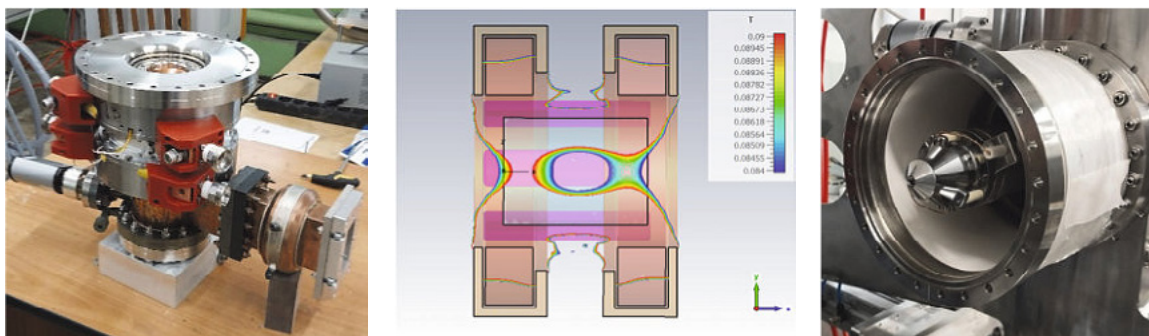


Рис.2 Ионизационная камера, магнитное поле в ней и ИОС внутри изолятора

Источник ионов собран и испытан на экспериментальном стенде – Рис. 3. Здесь же приведены полученные осциллограммы основных параметров источника.

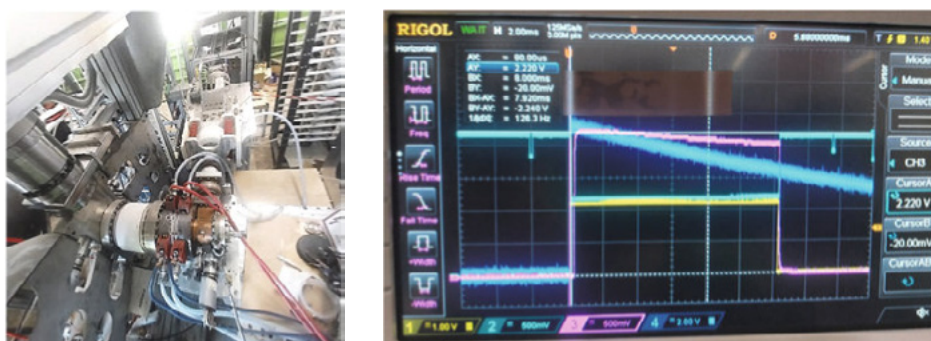


Рис.3 Источник ионов и осциллограмма высоковольтных испытаний (2 мс/клетка): СВЧ мощность – бирюзовый, высокое напряжение – голубой, ток ионов – фиолетовый

При испытании на экспериментальном стенде получены следующие параметры источника: напряжение ионизационной камеры и плазменного электрода 70 кВ, вытягивающего электрода 0 кВ, запирающего электрода -700 В, заземленного электрода 0 кВ, СВЧ мощность 2,8 кВт, проектная длительность импульса 1 мс, длительность импульса при испытаниях 12 мс, суммарный импульсный ток ионов He^{2+} и He^{+} 2 мА.

Список литературы

1. Yu. V. Senichev, A. E. Aksentiev, A. A. Zavadtsev, A. A. Melnikov, A. P. Klachkov, D. A. Zavadtsev, D. V. Churanov, V. S. Yutskevich. Features of a deuteron accelerator based on the RFQ structure. ISSN 1063-7788, Physics of Atomic Nuclei, 2022, Vol. 85, No. 10, pp. 1–5. © Pleiades Publishing, Ltd., 2022.

СВЧ ФОТОПУШКА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ КОРОТКИХ И ИНТЕНСИВНЫХ ПУЧКОВ ЭЛЕКТРОНОВ

Сибирякова К.А., Левичев А.Е.

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

СВЧ фотопушки являются современными и перспективными источниками электронов с высоким качеством пучка для различных применений и установок [1,2]. При этом существует ряд задач, которые могут быть решены исключительно экспериментально, поскольку, в первую очередь, связаны с техническими решениями. К таким задачам можно отнести, например, влияние интенсивного СВЧ поля на время жизни фотокатода, глубина вакуума и качество изготовления фотопушки, влияние интенсивного лазерного излучения на состояние поверхности фотокатодов и др. Для решения таких задач на базе Института ядерной физики им. Будкера СО РАН (ИЯФ СО РАН) создается стенд для работ с СВЧ фотопушкой.

Стенд необходим для проведения исследований электронной эмиссии под действием лазерного излучения с длиной волны 266 нм из металлических фотокатодов и исследований возможности получения интенсивных пучков электронов с зарядом до 1 нКл, длительностью порядка 1 пс и энергией 3-5 МэВ. Стенд включает в себя фотопушку, порт для ввода лазерного импульса, систему диагностики, магнитную систему, систему синхронизации лазерных импульсов и СВЧ импульсов.

Выполнены холодные измерения электродинамических характеристик СВЧ фотопушки, разработан, изготовлен и испытан опытный образец системы формирования, управления и синхронной регистрации оптических и электрических сигналов, проработаны основные составляющие стенда для проведения испытаний фотопушки, включая магнитную систему и систему диагностики. Также выполнено сравнение динамики и качества получаемого электронного пучка в разных типах фотопушек: 1.5 ячеечная СВЧ фотопушка, фотопушка на основе структуры с параллельной связью и фотопушка с краевой фокусировкой.

Список литературы

1. Электронный ресурс. Режим доступа: <https://www.inp.nsk.su/nauka/issledovatel'skaya-infrastruktura/proekty/superc-tau-factory>.
2. Conceptual Design of a Dedicated Fourth-Generation Specialized Synchrotron Radiation Source (SSRS-4) at the Kurchatov Institute // Nucl. Phys. Engin. 2018. V. 9, No. 2. P. 192–199.

СТАЦИОНАРНЫЙ ИСТОЧНИК ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ С ВЫСОКОЧАСТОТНЫМ ГЕНЕРАТОРОМ ПЛАЗМЫ ДЛЯ УСКОРИТЕЛЬНОГО ИСТОЧНИКА НЕЙТРОНОВ

Гмыря А.А., Бельченко Ю.И., Булатова У.Д., Гаврисенко Д.Ю., Санин А.Л., Сотников О.З.

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск, Россия

В Институте ядерной физики СО РАН (Новосибирск) создан ускорительный источник нейтронов для бор-нейтронозахватной терапии, в котором нейтроны образуются при взаимодействии ускоренных протонов с литиевой мишенью. Протоны генерируются в тандемном ускорителе с вакуумной изоляцией (VITA) [1] из пучка отрицательных ионов водорода, произведенных из ионного источника.

Для работы в клинике к оборудованию предъявляются дополнительные требования повышенной надежности, безотказности работы и простоты обслуживания. Для ускорительного источника нейтронов важным является обеспечить долговременную работу стационарного источника отрицательных ионов (ИОИ) с током порядка 10 мА. В существующих стационарных ИОИ с дуговым разрядом, ограничивающим длительность работы фактором является износ накаливаемых катодов [2], тогда как в пеннинговских ИОИ с водородно-цезиевым разрядом важно предотвратить распыление материала катода и образование пробок в каналах подачи цезия и водорода [1]. Высокую надежность работы и простоту в обслуживании демонстрируют стационарные ИОИ с

высокочастотными генераторами плазмы, разрабатываемые в ИЯФ для инжекторов нагрева плазмы для установок термоядерного синтеза [3].

В настоящей работе описываются работы по созданию нового стационарного источника отрицательных ионов с высокочастотным генератором плазмы для применения в клинике. Описываются конструкция источника и результаты исследования характеристик его высокочастотного (ВЧ) драйвера: зондовых измерений параметров генерируемой плазмы и тепловых режимов основных компонент драйвера при различной ВЧ мощности и давлении водорода.

Список литературы

1. Bayanov B. F. et al. //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A- 413 (1998) 397-426.
2. Bacal M., Sasao M., Wada M. //Journal of Applied Physics. – Т. 129 – 2021. – №. 22.
3. Sotnikov O. et al. //Nuclear Fusion. – Т. 61– 2021. – №. 11. – С. 116017.

ВАКУУМНАЯ СИСТЕМА И ОПТИЧЕСКИЙ ВАКУУМНЫЙ ВВОД СТЕНДА ВЧ ФОТОИНЖЕКТОРА ЛЯП ОИЯИ

*Шокин Д.С.¹, Дятлов А.С.^{1,2}, Кобец В.В.¹, Нечехина Л.В.², Ноздрин М.А.¹,
Скрипник А.В.¹, Шабратов В.Г.¹*

¹Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

²Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

В Лаборатории ядерных проблем (ЛЯП) ОИЯИ реализуется проект стенда ВЧ фотоинжектора. Ключевым его компонентом является СВЧ-фотопушка, разработанная в ИЯФ СО РАН им. Г. И. Будкера [1]. Основная цель проекта – модернизация системы инжекции ускорителя ЛИНАК-200.

Несмотря на то, что используется медный фотокатод, имеющий сравнительно невысокие требования по вакууму [2], в вакуумной камере стенда необходимо поддерживать давление порядка 10^{-8} – 10^{-9} мбар. Вакуумная система стенда выполнена модульной, с двумя изолированными объёмами – СВЧ-фотопушкой и диагностической камерой, разделёнными шиберным затвором. Основное откачное оборудование – ионные насосы, предварительная откачка осуществляется внешним вакуумным постом.

Для доставки лазерного пучка на катод создан вакуумный ввод с механизмом точной юстировки зеркала внутри камеры. Однако стандартные диэлектрические зеркала применять нельзя: заряд, осаждающийся на их поверхности, может ухудшить стабильность пучка. Решением стало изготовление зеркал на металлических подложках из меди и молибдена с многослойным покрытием: 50 нм хрома для адгезии и 200–300 нм алюминия для отражения.

Эти зеркала отражают до 95% ультрафиолетового лазерного излучения, сохраняют качество волнового фронта и устойчивы к высокому уровню мощности. Проводящая подложка также позволяет эффективно отводить заряд на землю.

Список литературы

1. Никифоров Д. А., Левичев А.Е., Барняков А.М., Андрианов А. В., Самойлов С. Л. Моделирование высокочастотной фотопушки для генерации ультракоротких пучков // Журнал технической физики » Год 2018, выпуск 4 » Статья стр. 601.
2. R. Xiang and J. Teichert, Photocathodes for high brightness photo injectors // Physics Procedia 77, 58 (2015), international Conference on Laser Applications at Accelerators, LA3NET 2015, 25-27 March 2015, Mallorca, Spain.

ИНЖЕКЦИОННЫЙ КОМПЛЕКС ВЭПП-5

*Беркаев Д.Е., Еманов Ф.А., Балакин В.В., Астрелина К.В., Боймелыштейн Ю.М., Болховитянов Д.Ю.,
Фролов А.Р., Корень Е.А., Карпов Г.В., Касаев А.С., Лебедев Н.Н., Левичев А.Е.,
Самойлов С.Л., Мамутов Р.З., Баранов Г.Н., Микайылов А.И., Тамбовцев С.В.*
Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

Инжекционный комплекс ВЭПП-5 (ИК) это источник электронных и позитронных пучков для комплексов ВЭПП-2000 и ВЭПП-4. ИК состоит из электронного и позитронного линейных ускорителей, работающие на частоте 2855.5 МГц, накопителя-охладителя (НО) и каналов транспортировки пучка. Канал К-500 соединяет НО с потребителями пучка. В настоящий момент инжекционный комплекс работает на энергии 430 МэВ, которая ограничивается возможностями позитронного линейного ускорителя. Достигнутые скорости накопления частиц в НО $1.1 \cdot 10^{11}$ е-/с и $1.2 \cdot 10^{10}$ е+/с при частоте повторения инъекций 12.5 Гц. Инжекционный комплекс производит достаточное количество частиц для действующих потребителей, но рассматриваются варианты улучшения производительности комплекса для работы с перспективными потребителями. Также на инжекционном комплексе ведутся работы по улучшению стабильности работы и удобства использования комплекса. В докладе представлены текущие достижения и планируемые улучшения инжекционного комплекса.

ПРИКЛАДНОЕ ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИНЖЕКЦИОННОГО КОМПЛЕКСА ВЭПП-5

Еманов Ф.А.

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

Инжекционный комплекс (ИК) представляет собой источник электронных и позитронных пучков для коллайдеров ИЯФ СО РАН. В состав комплекса входит линейный ускоритель с выходной энергией пучков 420 МэВ, накопитель-охладитель и набор каналов транспортировки пучка. ИК работает под управление компьютеров с ОС Linux. В системе управления ИК используется фреймворк CXv4, построенный по трехуровневой модели, содержащей драйверный, серверный и прикладной уровни. На драйверном уровне реализована логика работы одиночных устройств. Серверный уровень обеспечивает абстракцию оборудования и обмен данными между программами. На прикладной уровень возложена групповая работа устройств, предварительная обработка данных и взаимодействие с оператором. Прикладное ПО инжекционного комплекса было разработано в виде набора служб и операторских программ. Для ускорения разработки в качестве основного языка используется Python, для которого разработаны модули: для доступа к данным системы управления, набор Qt-виджетов связанных с системой управления, модуль автоматизирующий разработку служб. В докладе описано разработанное прикладное программное обеспечение инжекционного комплекса.

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ЖУРНАЛИРОВАНИЯ ДАННЫХ ИНЖЕКЦИОННОГО КОМПЛЕКСА ВЭПП-5

Корень Е.А., Еманов Ф.А.

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

Разработана система журналирования данных для инжекционного комплекса ВЭПП-5 (ИК), обеспечивающая непрерывный сбор, анализ и визуализацию параметров работы оборудования. Система решает задачи обработки и сохранения потока данных (до 10 МБ/с с ~6000 каналов) за счёт оптимизированной архитектуры, включающей:

1. Службу журналирования на Python с алгоритмами редукции (пороговое сравнение для скалярных и L2-норма для векторных каналов), буферизацией и пакетной вставкой в TimescaleDB (расширение PostgreSQL), что снизило объем хранимых данных на 99%;

2. Графическое приложение (PyQt5) для интерактивного анализа временных рядов и векторных данных;
3. Автоматизированный генератор отчётов, рассчитывающий ключевые метрики (время работы в режимах, токи, статистику передач пучка) и запускаемый по расписанию через Cron.

Служба журналирования интегрирована в среду ИК с использованием фреймворка CXv4 для взаимодействия с оборудованием и развёрнута как служба systemd для обеспечения отказоустойчивости. Для визуализации аналитики реализован веб-сайт (Django), предоставляющий удалённый доступ к отчётам.

Внедрение решения позволило упростить мониторинг состояния комплекса и выявление аномалий, а также обеспечить единую платформу для анализа данных операторами, инженерами и научными сотрудниками.

СТАТУС ИСТОЧНИКА ВЫСОКОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ «КРИОН-6Т» И ПОЛУЧЕНИЕ МНОГОКРАТНОЙ ИНЖЕКЦИИ ИОНОВ ДЛЯ УСКОРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА «NICA»

*Рассадов Д.Н., Бойцов А.Ю., Бутенко Е.А., Гудков С.В., Дзугаев М.Г., Донец Д.Е., Донец Е.Е.,
Мальшиев Н.А., Понкин Д.О., Рамздорф А.Ю., Сальников В.В., Шутов В.Б.*

Лаборатория физики высоких энергий им. В.И. Векслера и А.М. Балдина Объединённого института ядерных исследований,
г. Дубна, Московская область, Россия

В настоящее время электронно-струнный (модификация электронно-лучевого) источник ионов «Крион-6Т» является основным устройством для получения пучков высокозарядных ионов тяжёлых элементов (^{86}Kr , ^{124}Xe , ^{209}Bi ...) для инжекционного комплекса «NICA» [1].

В ходе подготовки к первому сеансу на коллайдере NICA для работы инжекционной цепочки коллайдера, включающей источник ионов «Крион-6Т» – линейный ускоритель ЛУТИ (3.2 МэВ/нукл.) – синхротрон Бустер (300 МэВ/нукл.) – синхротрон Нуклотрон (4.2 ГэВ/нукл.) в источнике ионов «Крион-6Т» была создана и успешно апробирована новая система вывода ионов, позволившая сократить длительность выведенного из источника импульса ионов $^{124}\text{Xe}^{26+}$ до ~ 4 мкс, что соответствует времени одного оборота пучка в Бустере на энергии инжекции.

Это открывает возможность многократной инжекции в Бустер и накопления в нем нескольких (до 10) ионных импульсов подряд с целью увеличения интенсивности результирующего накопленного и ускоренного пучка в Бустере перед дальнейшей инжекцией в Нуклотрон [2].

В ходе весенне-летнего сеанса 2025 г. на инжекционном комплексе NICA была осуществлена многократная инжекция ионных пучков $^{124}\text{Xe}^{26+}$ из источника «Крион-6Т» в ЛУТИ и далее в Бустер, где пучки были накоплены с помощью электронного охлаждения и далее ускорены до необходимой энергии.

Для обеспечения многократной инжекции в Бустер создана новая система вывода высокозарядных тяжёлых ионов из электронно-струнного источника «Крион-6Т». В отличие от хорошо зарекомендовавшей себя системы вывода ионов, основанной на резистивном делителе напряжений, не позволяющей, к сожалению, сократить время вывода ионов при достижимых напряжениях выводного импульса, новая система основана на принципе «персональной» подачи потенциалов на отдельные трубки дрейфа системы вывода ионов. Для создания этой системы потребовалось собрать воедино 24 импульсных высоковольтных блока (+ 3 кВ), 24-х канальную систему синхронизации, управляющее программное обеспечение [3]. Блок-схема новой системы вывода представлена на рисунке 1.

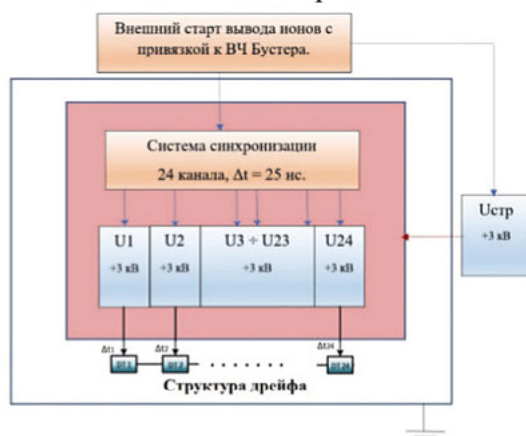


Рис. 1 Блок схема системы вывода ионов

Результаты измеренной длины ионного импульса на ЛУТИ представлены на рисунке 2.

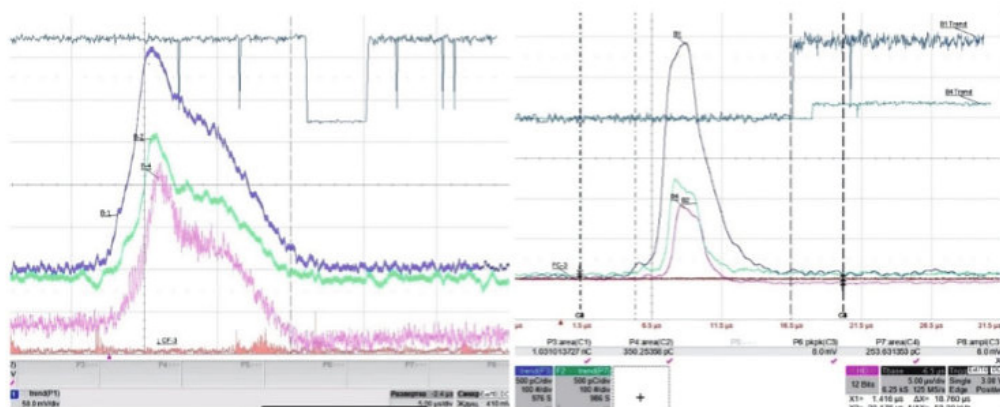
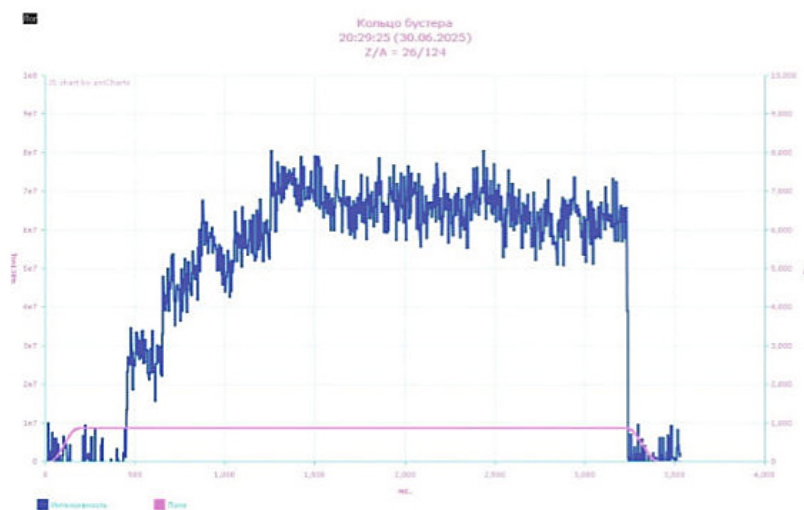


Рис. 2 Сигналы с датчиков Бергоц на входе в RFQ ЛУТИ, перед ускорительными танками и после ускорения. Слева 2023 г., вывод ионов с помощью резистивного делителя, справа 2025 г., вывод ионов с помощью новой системы. Развертка осциллографа 5 мкс/дел

Результаты накопления ионов $^{124}\text{Xe}^{26+}$ в Бустере после 5-ти кратной инжекции после электронного охлаждения представлены на рисунке 3.

Рис. 3 Накопление $^{124}\text{Xe}^{26+}$ в Бустере после 5-ти кратной инжекции после электронного охлаждения

Заключение

Создана новая система вывода высокозарядных тяжёлых ионов из электронно-струнного источника «Крион-6Т», позволившая сократить длительность выведенного из источника импульса ионов $^{124}\text{Xe}^{26+}$ до ~ 4 мкс и инжектировать в ЛУТИ и затем в Бустер и с помощью электронного охлаждения осуществить накопление ионов и увеличить интенсивность в несколько раз.

Список литературы

1. E.M. Syresin et al. Status of accelerator complex NICA // Proceedings of RuPAC 2018.
2. D. N. Rassadov, et al. Prospects for Using the Source of Krion-6T..., Phys. Part. Nuclei Lett. 21, 236–240 (2024). <https://doi.org/10.1134/S1547477124700055>.
3. E.A. Butenko, D.N. Rassadov, et al. Electron String Ion Source (ESIS) Ion Trap Control System Development. Phys. Part. Nuclei Lett. 21, 750–752 (2024), <https://doi.org/10.1134/S1547477124701255>.

СРАВНЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ИСТОЧНИКОВ ВСПОМОГАТЕЛЬНОГО РАЗРЯДА В УСКОРИТЕЛЯХ НА ОСНОВЕ ВТР

Косоговор С.Л., Иванов А.Г., Карнов Д. А., Михайлов В.М., Успенский Н.А.

АО «НИИЭФА», Санкт-Петербург, Россия

Электронные ускорители с выводом пучка большого сечения в атмосферу или иную среду с энергией до 300 кэВ находят широкое применение в радиационных технологиях, плазмохимических реакторах, газовых электро-ионизационных лазерах и др. [1].

Наряду с наиболее распространенными ускорителями на основе ряда протяженных прямонакальных термоэммиттеров широкое применение находят ускорители электронов на основе высоковольтного тлеющего разряда (ВТР). Принцип действия этих ускорителей хорошо известен и основан на ион-электронной эмиссии с холодного металлического катода ВТР при бомбардировке его быстрыми ионами и нейтралами.

Источником ионов для ускорителя ВТР является плазма, генерируемая источником вспомогательного разряда, который, таким образом, является одним из основных конструктивных элементов ускорителей на основе ВТР.

Плазма вспомогательного разряда, или прианодная плазма, может генерироваться различными способами. В качестве источника плазмы может служить тонкопроволочный разряд орбитронного типа [2,3], тлеющий разряд с полым катодом [4], низковольтный разряд, инициируемый термокатодом, дуговой разряд [5,6], источники на основе магнетронного разряда, источники комбинированного типа и т.д.

В настоящей работе приведены результаты исследований характеристик ускорителей ВТР с источниками вспомогательного разряда с тонкопроволочными анодами (орбитронного типа), источниками орбитронного типа с электронной подсветкой, источниками на основе магнетронов и источниками комбинированного типа на основе магнетронов и тонкопроволочных анодов. Проведено их сравнение, отмечены достоинства и недостатки различных типов источников и ускорителей на их основе.

Наиболее часто нами использовались источники орбитронного типа. Однако, эксперименты показали, что таким источникам присущи неустойчивости с возникновением локальных катодных пятен в области горения вспомогательного разряда, снижающие стабильность работы всего ускорителя ВТР. Для обеспечения устойчивости горения вспомогательного разряда и расширения его рабочего диапазона по давлению в дрейфовом промежутке были размещены дополнительные источники электронной подсветки в виде отрицательно смещенных относительно “земли” термоэммиттеров.

Недостатком таких источников является применение накаливаемых элементов, что создает дополнительную тепловую нагрузку в вакуумной камере ускорителя с холодным катодом и лишает его одного из преимуществ в сравнении с ускорителями на основе термоэмиттеров. К тому же срок службы термоэмиттеров при рабочих давлениях $\sim 0,1$ Па ограничен.

Проведены исследования характеристик ускорителя ВТР с магнетронными источниками вспомогательного разряда. Определено существенное влияние на характер распределения плотности тока выведенного пучка геометрии размещения магнетронов в дрейфовом пространстве и высокая пространственная неоднородность распределения концентрации плазмы, генерируемой магнетронами.

Для снижения степени неоднородности пучка нами был применен комбинированный метод генерации вспомогательного разряда введением дополнительных источников вспомогательного разряда орбитронного типа.

Показано, что в ускорителях на основе ВТР в качестве источников плазмы вспомогательного разряда возможно использование планарных магнетронов, при этом магнетронные источники обладают высокой стабильностью параметров, долговечностью и надежностью. Применение магнетронных источников исключает появление неустойчивостей, характерных для самостоятельного орбитронного разряда в ускорителях ВТР и не требует использования дополнительных термонакаливаемых элементов.

Таким образом, при сравнении характеристик ускорителей на основе ВТР с различными исследованными типами источников вспомогательного разряда рассмотрены их достоинства и недостатки. Результаты экспериментальных работ показывают, что несмотря на указанные недостатки, наиболее широким диапазоном характеристик по плотности тока выведенного электронного пучка, диапазоном рабочего давления, высокой пространственной однородностью и стабильностью работы обладают ускорители на основе ВТР с использованием источников вспомогательного разряда орбитронного типа с электронной подсветкой.

Список литературы

1. Бугаев С.П., Крейндель Ю.Е., Щанин П.М. Электронные пучки большого сечения. М.: Энергоатомиздат, 1984. 112 с.
2. Федяков В.П. Тлеющий разряд орбитронного типа. Препринт НИИЭФА: П-К-0781, 1988. М.: ЦНИИатоминформ, 1988.
3. Аброян М.А., Иванов Е.В., Косоголов С.Л. и др. Нормальный тлеющий разряд для управления несамостоятельным разрядом в ускорителях электронов. // Тезисы докладов Седьмой Всесоюзной конференции по физике низкотемпературной плазмы. Ташкент. ФАН: 1987. Ч. 2. С.276-277.
4. Груздев В.А., Крейндель Ю.Е., Ремпе Н.Г., Троян О.Е. // ПТЭ. 1985. № 1. С. 140-142.
5. Гутова Л.А., Крейндель Ю.Е., Никитинский В.А. Плазменный импульсный источник электронов. // Изв. вузов. Сер. Радиоэлектроника. 1970. № 1. С. 77.
6. Казьмин Г.С., Крейндель Ю.Е., Щелоков А.В. Формирование электронного пучка большого сечения в высоковольтном диоде с плазменным эмиттером. // В кн. "III Украинская республиканская конференция по электронной оптике и ее применениям. Ч.1." Харьков. 1974. С.146.

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ИНДУКЦИОННОГО ИСПАРИТЕЛЯ ДЛЯ ЭЦР-ИСТОЧНИКА ФАБРИКИ СТЭ DECRIS-PM

Киданова Е.Ю., Яковлев Д.С., Кузьменков К.И., Миронов В.Е., Пугачев Д.К.

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

Современные эксперименты по синтезу сверхтяжелых элементов, проводимые в Лаборатории ядерных реакций им. Г.Н. Флерова (ЛЯР ОИЯИ), требуют создания стабильных и высокоинтенсивных пучков ионов металлов, таких как ^{50}Ti и ^{54}Cr . Одним из ключевых ограничений при получении требуемых ионов является необходимость эффективного испарения вещества в область формирования ЭЦР-плазмы. Для решения поставленной задачи разработана конструкция высокотемпературного индукционного испарителя, способного обеспечить контролируемое испарение рабочего вещества, стабильную работу в течение эксперимента и совместимость с источником ионов DECRIS-PM [1].

В рамках работы выполнено трехмерное мультифизическое моделирование индукционного испарителя в среде COMSOL Multiphysics. Модель включает подробное описание электромагнитных и тепловых процессов с учетом радиационного теплообмена. Рассмотрены различные конструктивные конфигурации – с размещением испарителя в различных положениях относительно системы инжекции ЭЦР источника, с использованием керамического и металлического экранов. Результаты показали, что максимальная температура достигается при размещении испарителя за пределами системы инжекции (внутри плазменной камеры) и экранировании индуктора танталовым разрезным экраном.

Для верификации результатов моделирования была проведена серия экспериментальных исследований, в рамках которых были получены данные, описывающие распределение температур в различных точках системы испарителя и эффективность нагрева испарителя в зависимости от подаваемой мощности и от частоты тока на выходе резонансного блока. Проведен анализ стабильности работы системы при различных уровнях мощности.

Сопоставление результатов моделирования и эксперимента подтверждает работоспособность и эффективность разработанной конструкции, а также показывает ее перспективность для применения в экспериментах по получению паров тугоплавких элементов.

Список литературы

1. Bekhterev V. et al. Development of the new DECRIS-PM ion source. Proceedings of HIAT2015. 2016. P. 238-240.

ВНЕДРЕНИЕ ФРЕЙМВОРКА TANGO CONTROLS ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ИНЖЕКЦИЕЙ В БЭП НА КОМПЛЕКСЕ ВЭПП-2000

Эминов Э.А.¹, Сенченко А.И.¹, Лысенко А.П.¹, Rogovskiy Ю.А.^{1,2}

¹Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

²Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

Ускорительный комплекс ВЭПП-2000 в ИЯФ СО РАН включает в себя электрон-позитронный коллайдер ВЭПП-2000, бустерное кольцо БЭП (бустер электронов и позитронов) и два транспортировочных канала частиц: канал ИК-БЭП (от инжекционного комплекса к БЭП) и канал БЭП-ВЭПП-2000 (от БЭП к коллайдеру ВЭПП-2000). Система инжекции БЭП, состоящая из четырех кикеров и двух импульсных магнитов, изначально управлялась аппаратно-программным комплексом на базе стандарта КАМАК, разработанным более 20 лет назад. Эта устаревшая система, использующая неподдерживаемые программные библиотеки и морально устаревшую электронику, создает риски для надежной работы ускорительного комплекса.

В данной работе рассматривается архитектура новой программной части системы инжекции БЭП на базе фреймворка Tango Controls, а также замена устаревшей электроники в стандарте КАМАК на модули с интерфейсом CAN bus в системе инжекции БЭП.

РАСЧЕТ И НАСТРОЙКА ФОТОЭМИССИОННОГО ИСТОЧНИКА ЭЛЕКТРОНОВ ДЛЯ ФОТОИНЖЕКТОРА В ИПФ РАН

Самароков Н.Ю.¹, Лалаян М.В.¹, Полозов С.М.¹, Бандуркин И.В.², Вихарев А.А.²

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

² Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия

Представлены результаты исследований, направленных на создание ускоряющей структуры и ввода мощности для СВЧ фотопушки ускорителя электронов, который в настоящее время создается в ИПФ РАН [1]. Ускоряющая структура состоит из 1,5 ускоряющих ячеек, работающих на стоячей волне, π в виде колебаний и рабочей частоте 2,45 ГГц, с коаксиальным вводом мощности [2].

В докладе рассматривается настройка электродинамических характеристик ускоряющей структуры, таких как рабочая частота, добротность, распределение электромагнитного поля, а также настройка параметров коаксиального ввода мощности. При настройке ввода мощности в фотопушку было рассмотрено два варианта перехода с прямоугольного волновода на коаксиальный. В первом варианте использовалась геометрия, совмещающая коническое расширение внутренней части коаксиала и симметричную ступеньку [3 – 6], во втором варианте ступенька отсутствовала. В результате в обоих случаях удалось получить низкий коэффициент отражения, однако в случае со ступенькой в коаксиале всегда возникала стоячая волна. В результате было решено отказаться от данного варианта.

Разработанный фотоэмиссионный источник электронов на данный момент находится в производстве.

Список литературы

1. Ashanin I. A. et al. Design and Testing of the Photogun Resonator and Biperiodic Accelerating Structure with Traveling Wave for the Photoinjector at the IAP RAS //Radiophysics and Quantum Electronics. – 2023. – Т. 66. – №. 7. – С. 504-512.
2. Ершов А. Б. и др. Расчет динамики пучка заряженных частиц в фотоинжекторах в различных программах численного моделирования //Москва. – 2024. – Т. 26. – С. 338.
3. Ашанин И. А. и др. Разработка концепции Российского Специализированного источника синхротронного излучения 4-го поколения ИССИ-4 НИЦ" Курчатовский институт" //Ядерная физика и инжиниринг. – 2018. – Т. 9. – №. 2. – С. 192-199.
4. Ashanin I. A. et al. Beam dynamics simulation in a linear electron accelerator–injector for the 4th generation specialized synchrotron radiation source USSR //Proc. 27th Russ. Particle Accelerator Conf. RuPAC'2021, Alushta, Russia. – 2021. – С. 149-152.
5. Kliuchevskaia Y. D., Polozov S. M. Optimal RF-photogun parameters for the new injection linac for USSR project //CERN-Proceedings. – 2021. – С. 319-321.
6. Ashanin I. A. et al. The SYLA Linear Electronic Accelerator–Injector for a Specialized Source of Synchrotron Radiation of the Fourth Generation //Moscow University Physics Bulletin. – 2023. – Т. 78. – №. 1. – С. 48-56.

РАСЧЕТ И ИЗГОТОВЛЕНИЕ ВЫСОКОТОЧНОГО ИСТОЧНИКА ЭЛЕКТРОНОВ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ КОМПОНЕНТНОЙ БАЗЫ К ВОЗДЕЙСТВИЮ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Самароков Н.Ю., Ращиков В.И., Полозов С.М., Страхов П.В., Лалаян М.В.

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

На кафедре электрофизических установок НИЯУ МИФИ в настоящее время реализуется проект ускорителя электронов для проведения исследований электронной компонентной базы к воздействию излучением [1]. Для осуществления экспериментов в данной области на ускорители заряженных частиц накладываются определенные требования к характеристикам пучка, связанные

с высоким импульсным током пучка и необходимостью регулировки длительности импульса в широких пределах. Параметры пучка на мишени зависят от начального распределения на выходе электронной пушки. Таким образом, контролировать параметры пучка необходимо на всей длине ускорителя с момента получения пучка заряженных частиц, то есть источника электронов, до выхода канала транспортировки.

В докладе представлены результаты численного моделирования трехэлектродного источника электронов на энергию 50 кэВ с током до 2 А при величине поперечного эмиттанта не более 10π см·мрад и радиуса пучка до 4 мм, разработанного на основе более ранних электронных пушек [2 - 4]. Приводятся полученные характеристики пучка. Исследование включало в себя разработку геометрии электронно лучевой оптики для достижения пучка электронов с необходимыми качествами, а также включение в конструкцию отверстий для откачки, которые не должны влиять на динамику пучка. Источник изготовлен, в данный момент начинает проходить пусконаладочные работы.

Список литературы

1. Zbruev R. A. et al. Developing a Two-Section 8-MeV Linear Electron Accelerator for Applied Research //Physics of Atomic Nuclei. – 2024. – Т. 87. – №. 11. – С. 1676-1681.
2. S.M. Polozov, V.I. Rashchikov and M.I. Demsky, Beam dynamics in new 10 MeV high-power electron linac for industrial application, Proceedings of the XXV Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC-2016). 2017. С. 493-495. DOI:10.18429/JACoW-RuPAC2016-WEPSB057.
3. Samarokov N. Y. Optimization of Cathode Electrode Geometry //Physics of Atomic Nuclei. – 2023. – Т. 86. – №. 10. – С. 2271-2274.
4. Basyl D. S. et al. New 10 MeV high-power electron linac for industrial application //IPAC 2016-Proceedings of the 7th International Particle Accelerator Conference. – 1794. – Т. 1796.

ГЕНЕРАЦИЯ ИОНОВ АЛЮМИНИЯ ИСТОЧНИКОМ ТИПА БЕРНА

Селезнев Д.Н., Зарубин А.Б., Виноградский Н.Н., Козлов А.В., Кулевой Т.В.

НИЦ “Курчатовский институт”, Москва, Россия

В ККТЭФ НИЦ «Курчатовский Институт» ведутся разработки и эксплуатация плазменных ионных источников на основе ЭЦР разряда [1], типа ВДИИМ [2], Берна [3], используемых как для ионных резонансных ускорителей, так и ионных имплантеров для производства полупроводниковых элементов. На универсальном исследовательском стенде (УИС) [4] исследованы особенности генерации ионных пучков в источнике типа Берна из хлорида алюминия (AlCl_3). Приведены первые результаты по получению пучка ионов алюминия и рабочие параметры ионного источника. На источнике типа Берна с внешним тиглем был осуществлен разряд в парах хлорида алюминия и получен непрерывный ленточный ионный пучок.

Параметры разряда представлены в таблице.

Параметры разряда в источнике типа Берна на хлориде алюминия

Параметр разряда	Хлорид алюминия AlCl_3 (экстракционное отверстие 2×20 мм ²)
Разрядное напряжение, В	200
Разрядный ток, мА	250-300
Температура тигля, град С	120
Напряжение экстракции, кВ	10
Полный ионный ток, мА	2,0
Ток ионов алюминия, мА	0,6

Измерен магнитным анализатором масс-зарядовый спектр пучка хлорида алюминия. Анализ состава ионного пучка показал, что при температуре тигля 120°C в полном токе пучка ионы алюминия составляют до 30%.

Список литературы

1. Seleznev, D.N., Zarubin, A.B., Vinogradskii, N.N. et al. Laboratory ECR Source of Light Ions with a Resonant Discharge Chamber for Installation on a High-Voltage Platform. *Phys. Atom. Nuclei* 86, 2275–2277 (2023).
2. Surface modification of ferritic steels using MEVVA and duoplasmatron ion sources. Timur V. Kulevoy, , Boris B. Chalyhk, Petr A. Fedin, Alexey L. Sitnikov, Alexander V. Kozlov, Rostislav P. Kuibeda, Stanislav L. Andrianov, Nikolay N. Orlov, Konstantin S. Kravchuk, Sergey V. Rogozhkin, Alexey S. Useinov, Efim M. Oks, Alexey A. Bogachev, Alexander A. Nikitin, Nasib A. Iskandarov, and Alexander A. Golubev Citation: *Rev. Sci. Instrum.* 87, 02C102 (2016).
3. Селезнев Д., Кропачев Г., Козлов А., Куйбеда Р., Кошелев В., Кулевой Т., Хершкович А., Джонсон Б., Пул Дж., Алексеенко О., Гуркова Е., Окс Е., Гушенец В., Полозов С., Масунов Е. Пучок карборана из ионного источника Бернас ИТЭФ для полупроводниковых имплантеров. *Rev Sci Instrum.* 2010 Feb;81(2):02B901.
4. S.Barabin, V.Batalin, A.Kozlov, T.Kulevoy, et.al., Multifunctional Test-Bench for Heavy Ion Sources, *Proceedings DIPAC 2003 – Mainz, Germany*, p 158.

ИСТОЧНИКИ И УСКОРИТЕЛИ ЭЛЕКТРОНОВ С СЕТОЧНЫМИ ПЛАЗМЕННЫМИ КАТОДАМИ НА ОСНОВЕ ДУГИ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

Воробьев М.С., Коваль Н.Н.

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия

В докладе будут освещены вопросы разработки, создания и использования источников и ускорителей электронов с сеточными плазменными катодами, которые находят широкое практическое и научное использование и обладают широким диапазоном параметров генерируемого электронного пучка, определяемого как способами его генерации, так и решаемой задачей по применению. Ускорители электронов могут использоваться для обработки различных органических материалов (полимеры, пищевые или медицинские продукты и др.), чаще всего пучками с энергией уровня сотен кэВ, выводимыми в атмосферу, либо источниками с энергией электронов до нескольких десятков кэВ для обработки в вакууме различных неорганических (металлических и металлокерамических) материалов с целью изменения функциональных и эксплуатационных свойств их поверхности. Приведены примеры, подтверждающие, что вышеуказанные задачи можно рационально решать, используя источники и ускорители электронов с сеточными плазменными катодами, имеющих слоевую стабилизацию границы эмиссионной плазмы, что конструктивно реализуется за счет использования мелкоструктурной металлической сетки, размер ячеек которой сравним с толщиной прианодного ионного слоя. Рассматриваемые источники и ускорители электронов отличаются уникальностью параметров генерируемого пучка, а также диапазоном их перестройки, что крайне важно для проведения поисковых работ по оптимальному энерговкладу электронного пучка в обрабатываемый материал.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект №24-69-00074).

Список литературы

1. Бугаев С.П., Крейндель Ю.Е., Щанин П.М. // Электронные пучки большого сечения. М.: Энергоатомиздат, 1984.
2. Карпов Д.А., Косогоров С.Л., «Ускорители электронов с выводом пучка в атмосферу для радиационных технологий», Санкт-Петербург: АО «НИИЭФА», 2021.

3. Ю.Е. Крейндель, «Источники электронов с плазменным эмиттером», Новосибирск: Наука, 1983.
4. Коваль Н.Н., Окс Е.М., Протасов Ю.С., Семашко Н.Н. // Эмиссионная электроника. М: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009.
5. П.М. Щанин (ред.), «Источники заряженных частиц с плазменным эмиттером», Екатеринбург: УИФ Наука. 1993.
6. А.П. Черняев, «Радиационные технологии. Наука. Народное хозяйство. Медицина», Москва: Издательство Московского университета, 2019.

ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ИСПЫТАНИЯ ИМПОРТОЗАМЕЩАЮЩЕГО ИСТОЧНИКА ЭЛЕКТРОНОВ ДЛЯ МЕДИЦИНСКИХ УСКОРИТЕЛЕЙ

Самароков Н.Ю., Абакумов Я.М., Батов А.А., Бондаренко Т.В., Збруев Р.А.

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

Лучевая терапия – эффективный способ лечения онкологии, использующийся примерно в половине клинических случаев. В нашей стране парк установок для дистанционной лучевой терапии расширяется. Один из ключевых поставщиков – компания Elekta. Поставки комплектующих для комплексов этого производителя значительно осложнены. Аналоги, которые используются сейчас, не отвечают требованиям качества, могут эксплуатироваться полгода, после чего катод выходит из строя. Нынешняя конструкция не позволяет ремонтировать узел, что приводит к замене всего источника.

Коллективом кафедры №14 НИЯУ МИФИ ведется разработка импортозамещающего источника электронов для медицинских ускорителей компании ELEKTA [1, 2]. Предложенная конструкция лишена недостатков по ремонтпригодности, повышена надежность и технологичность узла. Благодаря возможности настройки оптики [3] пушка может быть установлена на систему лучевой терапии с значительной выработкой. Авторы имеют опыт создания подобных источников [4, 5]. Ранее была представлена часть результатов численного моделирования источника электронов [6]. В настоящее время источник изготовлен, собран, установлен на стенд для проведения пусконаладочных работ и успешно прошел предварительные испытания. В докладе представлены результаты численного моделирования характеристик пучка, а также экспериментальные данные, которые сходятся с теоретическими. В настоящее время ведутся работы по улучшению конструкции источника.

Список литературы

1. Winkel D. et al. Adaptive radiotherapy: the Elekta Unity MR-linac concept //Clinical and translational radiation oncology. – 2019. – Т. 18. – С. 54-59.
2. Narayanasamy G. et al. Commissioning an Elekta Versa HD linear accelerator //Journal of applied clinical medical physics. – 2016. – Т. 17. – №. 1. – С. 179-191.
3. ЭЛЕКТРОННАЯ ПУШКА [Текст] : пат. 235384 Рос. Федерация : МПК H01J 3/02
4. Samarokov N. Y. Optimization of Cathode Electrode Geometry //Physics of Atomic Nuclei. – 2023. – Т. 86. – №. 10. – С. 2271-2274.
5. Samarokov N. Y. et al. Preliminary Tests of a Modified Electron Source for a Medical Therapeutic Accelerator //Physics of Particles and Nuclei Letters. – 2024. – Т. 21. – №. 3. – С. 337-340.
6. Самароков Н. Ю. и др. Импортозамещающий источник электронов для медицинских ускорителей компании ELEKTA //ЛАПЛАЗ-2024 Сборник научных трудов X Международной конференции Москва. – 2024. – Т. 26. – С. 366.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО СОЛЕНОИДА ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОГО ИСТОЧНИКА МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ В ПОДДЕРЖКУ ЕГО РАЗРАБОТКИ И ИЗГОТОВЛЕНИЯ

*Грошева А.Д.¹, Амосков В.М.¹, Белов А.В.¹, Гавриш Ю.Н.¹, Кавин А.А.¹, Ковальчук О.А.¹,
Кухтин В.П.¹, Ламзин Е.А.¹, Степанов Д.Б.¹, Сычевский С.Е.¹, Хон Т. А.¹,
Шатиль Н.А.¹, Едаменко Н.С.², Овсянников Д.А.²*

¹АО «НИИЭФА», Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

Экспертная оценка указывает / Развитие физики и технологии ускорителей заряженных частиц /Ред.-сост. Б. Ю. Шарков, И. Н. Мешков. — М.: РАН, 2021. — 140 с. ISBN 978-5-907366-27-5/, что главной мотивацией для продвижения ускорительных технологий в мире остаются ядерная физика и физика высоких энергий, которые требуют генерации пучков высокой энергии и интенсивности. Это позволяет сформулировать требования к качеству электрофизического оборудования, обеспечивающего решение соответствующих задач, в частности, формирования магнитного поля необходимой степени однородности и интенсивности.

В рамках развития ускорительных технологий для задач, решение которых требует использование ионов максимально возможной зарядности, перспективными являются источники с использованием электронного пучка.

Для достижения соответствующих параметров таких источников необходима разработка и создание сверхпроводящих (СП) соленоидов с высоким уровнем поля и высокой азимутальной однородностью.

В данной работе рассматриваются особенности технологии математического моделирования магнитостатического поля для целей разработки и создания СП соленоида в рамках НИОКР оригинального варианта электронно-лучевого источника. Результаты численного моделирования сопоставлены с данными магнитных измерений изготовленного соленоида.

Для анализа и оптимизации магнитной системы СП электронно-лучевого источника многозарядных ионов была использована предложенная ранее вычислительная технология, которая включала в себя: разработку детальной математической модели, верификацию модели с использованием независимых пакетов вычислительных программ, базирующихся на различных постановках задачи магнитостатики, синтез системы катушек, составляющих многосекционный соленоид, на основе решения обратной задачи магнитостатики, анализ параметров магнитной системы на основе решения прямой задачи магнитостатики, модификации параметров соленоида с учётом степени достижения технических и технологических ограничений.

Сопоставление результатов моделирования, натурного (изготовлен образец) и математического (как аналитические, так и численные модели), показало работоспособность методики синтеза точных магнитных систем подобного типа. Процедура оптимизации может повторяться на всех стадиях НИОКР, обеспечивая эффективность поддержки таких работ практически в режиме «on-line».

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОННОЙ ПУШКИ С ФОТОКАТОДОМ

Прокопенко А.В., Смирнов С.А.

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

Важной системой электронной пушки с фотокатодом является система охлаждения основных элементов и термостабилизации ускоряющей структуры, прикатодной стенки и волноводных трактов. Для термостабилизации ускоряющей секции требуется регулировка и поддержание температуры от 30°C до 50°C с точностью поддержания температуры 0,2 градус. Разработана системы термостабилизации и охлаждения электронной пушки с фотокатодом состоящая из одного первичного охлаждающего контура и двух независимо регулируемых вторичных контуров с разнесенными функциями

термостабилизации и охлаждения питающего клистрона ФМЗ-286А и систем его питания. Вторичные контура системы охлаждения включает в себя водяной циркуляционный насос с частотным регулированием, подогреваемый накопительный бак, пластинчатый теплообменник, а также системы управления потоком и контроля за температурой. Для контроля за температурой охлаждающей жидкости применялись термопреобразователи сопротивления Pt1000. Для подключения потребителей использована коллекторная система. Разработан проект рамы с размещенными на ней элементами системами термостабилизации. Проведена комплектация, сборка и подключение системы к элементам электронной пушки с фотокатодом. Выполнен запуск и экспериментальное исследование работы системы термостабилизации электронной пушки с фотокатодом в различных режимах.

СИСТЕМА ВНЕШНЕЙ ИНЖЕКЦИИ МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ С ИСТОЧНИКОМ ЭЦР ДЛЯ ЦИКЛОТРОНА

*Григоренко С.В., Вересов О.Л., Андреева З.А., Григорьев В.И., Емельянов М.А.,
Кужлев А.Н., Усанова М.В., Цыганков С.С.*

АО «НИИЭФА», Санкт-Петербург, Россия

В АО «НИИЭФА» разработана и изготовлена система внешней инжекции (СВИ) многозарядных ионов в циклотрон, предназначенный для прикладных научных исследований и обеспечивающий энергию ускорения в диапазоне 7,5 - 15 МэВ/нуклон [1]. Источником многозарядных ионов служит ЭЦР источник с рабочей частотой 14 ГГц, также созданный в АО «НИИЭФА».

СВИ должна генерировать и транспортировать в циклотрон многозарядные ионы ряда элементов, удовлетворяющих условию $A/Z=5\pm 1$. Энергия инжекции для различных ионов лежит в диапазоне 12 - 24 кэВ/заряд. Интенсивность пучка определяется возможностями ионного источника и быстро уменьшается с ростом атомного номера. СВИ работает в непрерывном режиме.

Пучок многозарядных ионов формируется в ионном источнике и по горизонтальному каналу транспортировки, имеющему фокусирующие и корректирующие электромагнитные ионно-оптические элементы, направляется к поворотному анализирующему электромагниту. Здесь ионы поворачивают на 90° и движутся вверх, по вертикальному участку ионопровода, в котором имеются два фокусирующих соленоидов, затем вводятся в циклотрон при помощи спирального электростатического инфлектора. Длина тракта транспортировки от ионного источника до инфлектора составляет 8 метров.

Для контроля компонентного состава, заряда и интенсивности ионов используется поворотный анализирующий электромагнит (с радиусом поворота 400 мм) в сочетании с коллимирующими щелевыми диафрагмами и цилиндрами Фарадея.

В ионном источнике и в ионопроводах СВИ поддерживается вакуум на уровне $5 \cdot 10^{-8}$ Торр. Основные параметры ионного источника приведены в таблице.

Характеристики источника ионов ЭЦР

Рабочая СВЧ частота, ГГц	14
Максимальная СВЧ мощность, кВт	2
Суммарная потребляемая мощность, кВт	85
Максимальный ток обмотки соленоида, А	1500
Количество соленоидов	3
Индукция аксиального поля со стороны ввода СВЧ, Тл	1,9
Индукция аксиального поля со стороны экстракции пучка, Тл	1,2
Индукция аксиального поля в области минимума поля, Тл	0,45
Расстояние между «пробками», мм	280
Индукция радиального поля гексаполя, Тл	1,15
Внутренний диаметр гексаполя, мм	80
Длина гексаполя, мм	230
Диаметр плазменной камеры, мм	74
Длина магнитопровода, мм	590
Диаметр магнитопровода, мм	700

СВИ смонтирована на испытательном стенде и прошла стадию наладки. Получены спектры многозарядных ионов аргона в различных режимах работы источника. Для обеспечения работы ионного источника с парами твердых веществ подготовлена система MIVOC, аналогичная описанной в [2].

Список литературы

1. Усанова М.В., Акимов А.А., Гавриш Ю.Н., Галчук А.В., Григоренко С.В., Григорьев В.И., Клопенков Р.М., Кравчук К.А., Кужлев А.Н., Мудролюбов В.Г., Осина Ю.К., Смирнов К.Е., Цыганков С.С., Шмидберский П.А. Статус реализации проекта циклотронного комплекса многозарядных ионов / Письма в ЭЧАЯ. 2023. Т. 20, № 4(249). С. 1033–1039.
2. Takasugi W., Wakaisami M., Sasaki N., Sakuma T., Yamamoto M., Kitagawa A., Muramatsu M. MIVOC method with temperature control / REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS 81, 02A329 (2010), 10.1063/1.3266143

КОНСТРУКЦИЯ И ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМЫ ИНЖЕКЦИИ УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ НА СЕРИЙНЫХ МАГНЕТРОНАХ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ МОЩНОСТЬЮ 1 КВТ

Черноусов Ю. Д., Шеболаев И. В., Скирдин В. Н.

Институт химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского СО РАН, Новосибирск, Россия

В работе представлены конструкция и основные характеристики системы инъекции электронного ускорителя на базе серийных непрерывных (CW) магнетронов мощностью 1 кВт. Система содержит электронную пушку с высокочастотным (ВЧ) управлением током инъекции, ВЧ-генератор источника питания пушки, первый ускоряющий резонатор ускорителя, ВЧ-генератор источника питания ускоряющего резонатора на CW-магнетроне, работающем в импульсном режиме. Рабочая частота составляет 2,465 ГГц, импульсная мощность ВЧ-генератора источника питания пушки регулируется до 1 кВт, импульсная мощность магнетрона – до 5 кВт, напряжение инъекции пучка – 50 кВ, шунтовое сопротивление ускоряющего резонатора $\approx 1,2$ МОм. Использован метод термической фиксации элементов резонатора. Обсуждается метод подавления мультипактора в ускоряющем резонаторе.

Электронная пушка и ускоряющий резонатор в разрезе показаны на рис.1.

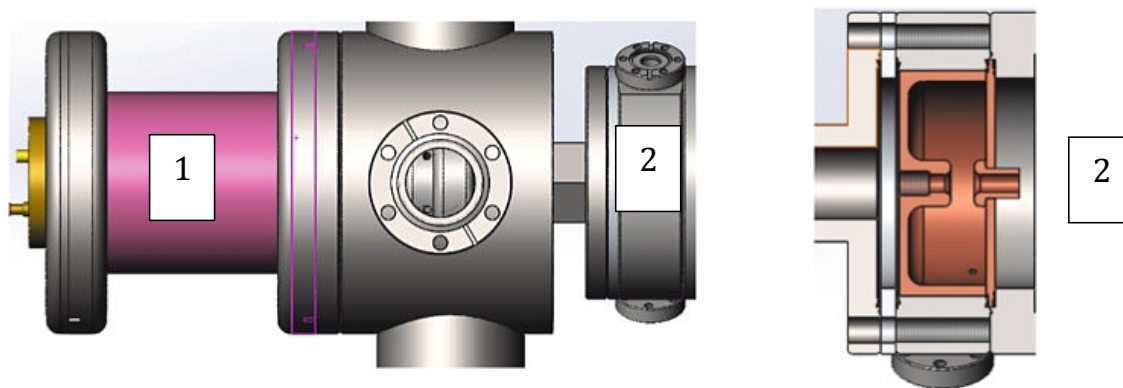


Рис.1 Электронная пушка (1) и первый ускоряющий резонатор (2)

Осциллограммы тока инъекции и импульсов СВЧ-сигнала в различных режимах представлены на (рис. 2). Развёртка – 2 мкс/дел. Ток регулировался напряжением смещения на управляющей сетке пушки. Канал 1 – импульс тока на выходе системы; Канал 2 – огибающая импульса СВЧ-сигнала с ускоряющего резонатора, импульсная СВЧ-мощность; Канал 4 – форма импульса СВЧ-мощности, подаваемой на электронную пушку.

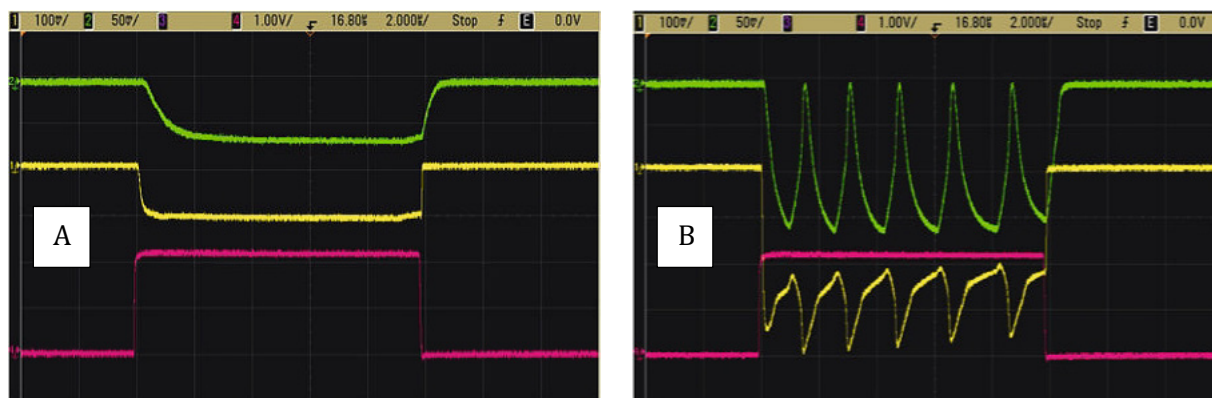


Рис.2 А: Рабочий режим. Канал 1 – 20 мА; Канал 2 – 130 Вт
В: Мультипактор в ускоряющем резонаторе. Канал 1 – 80 мА; Канал 2 – 400 Вт

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ ОДНОРОДНОСТИ ЭМИССИИ С КАТОДОВ БОЛЬШИХ ДИАМЕТРОВ

Старостенко Д.А.¹, Батазова М.А.¹, Иванов А.В.^{1,2}, Петренко А.В.¹

¹Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

²Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

Актуальность задачи создания качественных интенсивных электронных пучков для разного рода применений сохраняется уже на протяжении многих десятилетий. Достижение как можно лучшей однородности эмиссии с катодов больших диаметров важно для разработки мощных СВЧ-устройств, электронных пушек, рентгеновских трубок и др. Неоднородность эмиссии с поверхности катода большого диаметра приводит к отклонению стартовых траекторий электронов от нормали поверхности в этой области, и в конечном итоге, является ограничением на получение малого эмиттанса. Влияние неоднородности эмиссии на эмиттанс и плотность пучка можно определить при помощи расчетов в программе WinSAM, разработанной в ИЯФ СО РАН.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПУЧКА В ЭЛЕКТРОННОЙ ПУШКЕ НОВОСИБИРСКОГО ЛАЗЕРА НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ

Абед Н., Иванов А.В., Никифоров Д.А., Федоров В.В., Шевченко О.А.

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

Работа посвящена созданию модели электронной пушки Новосибирского лазера на свободных электронах (ЛСЭ), с целью определения параметров пука для дальнейшей оптимизации его транспортировки.

Для эмиссии электронного пучка в электростатической пушке ЛСЭ используется катодно-сеточный узел (КСУ) с паркетной сеткой. Расстояние между сеткой и катодом в нагретом состоянии составляет порядка 100 – 120 мкм. Дальнейшее ускорение пучка до энергии около 300 кэВ происходит в секционированной трубке длиной 370 мм с градиентными кольцами. Из-за различия пространственных масштабов в КСУ и ускорительной трубке задача расчета динамики пучка разбивается на три подзадачи:

- 1) Создание модели КСУ и расчет динамики пучка в нём.
- 2) Создание модели ускорительной трубки и расчет электростатических полей в ней.
- 3) Расчёт динамики пучка в транспортном канале.

В программе CST studio [1] была создана модель КСУ для расчёта эмиссии и получения рас-

пределения пучка непосредственно за сеткой. А также создана модель ускорительной трубки для расчета электромагнитных полей.

Далее полученное распределение электромагнитных полей и пучка было использовано для расчета динамики пучка в ускорительной трубке с помощью программы ASTRA [2].

Также с помощью программы KENV [3], которая способна произвести быстрый расчёт, позволяющий сопоставить его с экспериментальными данными в реальном времени, и программы winSAM [4] были определены параметры пучка для дальнейшей быстрой оптимизации его транспортировки.

Комбинированное использование CST и ASTRA, а также быстрого расчёта KENV, позволит оптимизировать параметры пушки для минимизации потерь и улучшения качества электронного пучка.

Список литературы

1. <https://www.3ds.com/products/simulia/cst-studio-suite>. (дата обращения: 03.07.2025).
2. ASTRA: сайт / DESY. – Hamburg, 1997. – URL: <https://www.desy.de/~mpyflo/> (дата обращения: 03.07.2025). – Яз. англ. – Текст: электронный.
3. KENV: [сайт]. – URL: <https://github.com/fuodorov/kenv/> (дата обращения: 03.07.2025). – Яз. англ. – Текст: электронный.
4. Ivanov, A. ULTRASAM-2D code for simulation of electron guns with ultra high precision / A. Ivanov, M. Tiunov. – Текст: электронный // Proceedings of EPAC 2002 (Paris, France, 3–7 June 2002). – EPS-IGA, CERN, 2002. – P. 1634–1636. – URL: <https://accelconf.web.cern.ch/e02/papers/wepri050.pdf> (дата обращения: 03.07.2025).

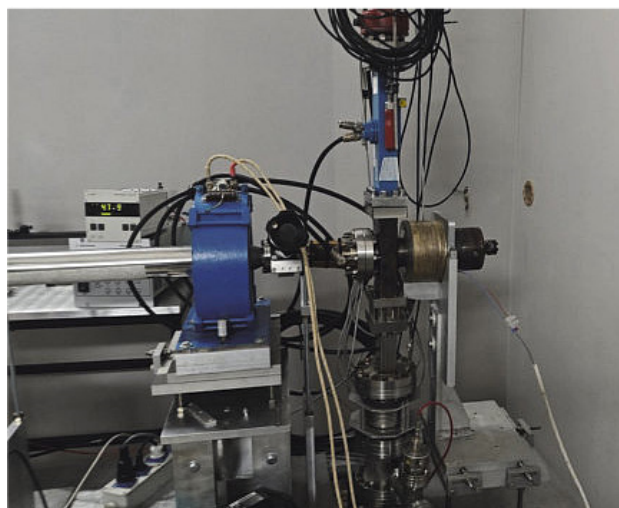
МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИСПЫТАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ СТЕНДА ФОТОИНЖЕКТОРА ЛЯП ОИЯИ

Юненко К.Е.¹, Афанасьев А.В.¹, Дятлов А.С.^{1,2}, Гаранжа И.Н.¹, Кобец В.В.¹, Ноздрин М.А.¹

¹Объединённый институт ядерных исследований, Дубна, Россия

²Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

В рамках работ по модернизации системы инжекции ускорителя ЛИНАК в ЛЯП ОИЯИ проходит сборка и тестирование стенда фотоинжектора, состоящего из лазера, ВЧ пушки [1] и её питания, вакуумной и магнитной системы. В данной работе будут рассмотрены элементы магнитной системы: катодный соленоид и фокусирующий соленоид.



Стенд ВЧ-фотопушки

Для катодного соленоида важно добиться значения магнитного поля порядка 1 Тл [2], а также получить небольшие геометрические размеры катушки (несколько десятков сантиметров в радиусе). У фокусирующего соленоида значение магнитного поля должно достигать примерно 70 мТл [3].

В ходе решения поставленной задачи было проведено моделирование магнитных элементов в программе FEMM [4], подобраны параметры и геометрические размеры соленоидов. На основе этих данных были подобраны подходящие фокусирующие магниты и проведены их тепловые и магнитные испытания (фокусирующие магниты стенда представлены на рисунке). Также сделаны

выводы об нужных для оптимальной работы стенда модификациях магнитной системы, принято решение о разработке импульсного источника тока для катодного соленоида (сам магнит находится в процессе изготовления).

Список литературы

1. Samofalova Y.A. et al. “Design and Simulation of an S-Band RF Photogun for a New Injector of the Accelerator Linac-200 at JINR”, in Proc. XXVII Russian particle accelerator conference (RuPAC2021), Alushta, Russia, Oct. 2021, pp.322–323.
2. Floettmann K., Karlovets D. “Quantum mechanical formulation of the Busch theorem”, Phys. Rev. A 102, 043517 (2020).
3. А.С. Дятлов и др., “Тестовый Стенд ВЧ-фотоинжектора в ЛЯП ОИЯИ”, Материалы конференции RuPAC 2025.
4. Meeker D. FEMM User’s Manual, <https://www.femm.info/wiki/Documentation>.

РАСЧЕТ ТРАНСПОРТНОЙ МАТРИЦЫ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА В ПУШКЕ НОВОСИБИРСКОГО ЛАЗЕРА НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ

Шевченко О.А.¹, Винокуров Н.А.^{1,2}

¹ Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

² Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

Один из способов определения поперечных параметров электронного пучка основан на измерении зависимости его размера от элементов транспортной матрицы, которые при данном измерении меняются контролируемым образом путем изменения токов в элементах магнитной системы [1]. В простейших случаях, например, для идеального квадрупольного магнита с градиентом, независимым от продольной координаты, можно легко получить аналитическую зависимость элементов транспортной матрицы от тока. В реальности поля элементов ускорителя зависят от продольной координаты, причем поля отдельных элементов могут перекрываться друг с другом. В этом случае для расчета матрицы можно использовать численные методы. Такая ситуация, например, возникает при определении параметров пучка, вылетающего с катода электронной пушки.

В данной работе на примере электронной пушки Новосибирского лазера на свободных электронах описан численный расчет транспортной матрицы в аксиально симметричных электрических и магнитных полях.

Список литературы

1. Minty M.G., Zimmermann F. Measurement and Control of Charged Particle Beams. Berlin: Springer, 2003.

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА В ПУШКЕ НОВОСИБИРСКОГО ЛАЗЕРА НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ

Шевченко О.А., Горбачев Я.И., Середняков С.С., Абед Н., Никифоров Д.А., Федоров В.В., Иванов А.В.

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

Для расчета поперечной фокусировки электронного пучка в однопроходном ускорителе необходимо знать его начальные параметры на выходе из электронной пушки такие, как эмиттанс и вторые моменты функции распределения. Численное моделирование динамики пучка в электронной пушке является довольно сложной проблемой. При ее решении используется ряд допущений, что приводит к ограничению точности получаемых результатов. Поэтому непосредственное измерение параметров пучка и сравнение с результатами моделирования является актуальной задачей.

Один из методов нахождения поперечных параметров пучка основан на измерении зависимости его поперечных размеров от каких-либо параметров системы транспортировки (например, тока

фокусирующего соленоида) [1]. Сравнение экспериментально измеренной зависимости с расчетной позволяет определить начальные параметры пучка на входе в систему транспортировки.

В данной работе представлены результаты измерения поперечных параметров пучка, а также его энергии на выходе из пушки Новосибирского лазера на свободных электронах. В работе также проведено сравнение полученных экспериментальных результатов с результатами расчета с использованием нескольких моделей.

Список литературы

1. Minty M.G., Zimmermann F. Measurement and Control of Charged Particle Beams. Berlin: Springer, 2003.

ПРЕДЛОЖЕНИЕ ПО ИСТОЧНИКУ ПОЛЯРИЗОВАННЫХ ИОНОВ ОИЯИ С НАКОПИТЕЛЬНОЙ ЯЧЕЙКОЙ В ПЕРЕЗАРЯДНОМ ПЛАЗМЕННОМ ИОНИЗАТОРЕ

Белов А.С.¹, Зеленский А.Н.², Ившин К.А.³, Куликов М.В.³, Лебедев В.А.³, Соловьёв А.Н.³, Фимушкин В.В.³

¹Институт ядерных исследований РАН, Москва, Россия

²Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия

³Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

Для ускорения пучков поляризованных дейтронов и протонов в ускорительном комплексе ЛФВЭ в ОИЯИ используется источник поляризованных ионов SPI, работающий по методу атомарного пучка с накоплением атомов в перезарядном плазменном ионизаторе [1]. Данный метод был разработан в ИЯИ РАН [2] и позволяет получать пучки поляризованных ионов высокой интенсивности с сохранением высокой поляризации. Параметры источника имеют существенное значение для достижения проектной светимости поляризованных пучков в коллайдере NICA.

В SPI пучок поляризованных атомов инжектируется в плазменный перезарядный ионизатор таким образом, что направления атомарного пучка и плазменной струи противоположны и коллинеарны, что приводит к ряду ограничений в размерах накопительной ячейки и энергии извлекаемых из ионизатора поляризованных ионов. В частности, атомарный пучок инжектируется в ионизатор через поворотный разделительный магнит и систему формирования ионного пучка. Это приводит к увеличению диаметра атомарного пучка из-за его расходимости, к увеличению диаметра накопительной ячейки и к снижению эффективности генерации поляризованных ионов, так как толщина мишени из поляризованных атомов в накопительной ячейке обратно пропорциональна диаметру ячейки в третьей степени. Диаметр эмиссионного электрода в ионно-оптической системе (ИОС) извлечения ионов также определяется диаметром атомарного пучка и накопительной ячейки, что приводит, наравне с неоднородностью плазменного шнура, к увеличению эмиттанса пучка поляризованных ионов. Этих ограничений можно избежать, используя накопительную ячейку Т-образной формы и инжекцию атомарного пучка в направлении, перпендикулярном по отношению к направлению движения плазменной струи.

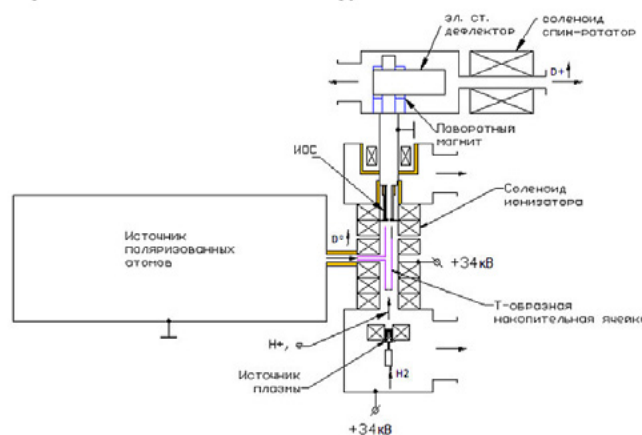


Схема источника поляризованных ионов с поперечной инжекцией поляризованных атомов в накопительную ячейку в перезарядном плазменном ионизаторе.

Предлагаемая схема источника поляризованных ионов с такой инжекцией атомарного пучка поляризованных атомов в накопительную ячейку показана на рисунке. В этой схеме поляризованный атомарный пучок инжектируется в накопительную ячейку через инжекционную трубку ячейки в направлении, перпендикулярном направлению плазменной струи и оси магнитного поля соленоида ионизатора. Адиабатичность спинового движения атомов с тепловой энергией в атомарном пучке приводит к ориентации спина вдоль направления магнитного поля соленоида независимо от взаимного расположения источника поляризованных атомов и соленоида ионизатора. Это дает возможность вертикального расположения источника поляризованных атомов и позволяет реализовать наиболее компактное расположение всего источника поляризованных ионов. Расстояние между источником поляризованных атомов и входом в накопительную ячейку при этом существенно уменьшается по сравнению с SPI, так как поворотный магнит и система электродов извлечения ионов не находятся на пути атомарного пучка. Диаметр эмиссионного электрода в этой схеме определяется диаметром плазменного шнура и может быть уменьшен, что приводит к соответствующему уменьшению эмиттанса, а энергия извлекаемых ионов может быть увеличена, так как размеры поворотного магнита и ИОС в этой схеме не влияют на размер атомарного поляризованного пучка. Возможное увеличение энергии пучка поляризованных ионов приводит также к уменьшению влияния пространственного заряда при прохождении поляризованного пучка через электростатический дефлектор, в котором сильное электрическое поле препятствует компенсации пространственного заряда ионного пучка электронами.

Список литературы

1. A.S. Belov, D E Donets, V V Fimushkin et. al., Source of polarized ions for the JINR accelerator complex, IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 938 (2017) 012017 doi:10.1088/1742-6596/938/1/012017.
2. A. S. Belov, Production of Polarized Ions with Nearly Resonant Charge-Exchange Collisions in Plasma, AIP Conf. Proc. 980, pp. 209-220, (2008) doi: 10.1063/1.2888089.

СИСТЕМА ОТКАЧКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОБРАЗЦА ЭЛЕКТРОННОЙ ПУШКИ С ФОТОКАТОДОМ

Шатохин В.Л., Полозов С.М.

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

В объеме ускоряющей структуры электронного ускорителя вакуум должен быть не хуже 10^{-5} Па. Требования к рабочим условиям при использовании фотокатода задают более высокий уровень вакуума порядка 10^{-6} – 10^{-7} Па, что зависит от типа фотокатода. В электронном ускорителе основной газовой нагрузкой является десорбция с внутренних поверхностей элементов структуры и конструкций, обращенных в вакуум. Для достижения требуемого уровня вакуума ускорятельная структура и другие конструкционные элементы изготавливаются из металлов, основными из которых являются нержавеющая сталь и медь. В качестве основного высоковакуумного средства откачки выбран геттерно-ионный, магнитный электро-разрядный насос. Такие насосы установлены на основных вакуумных объемах ускорителя: камера смены катодов, ускоряющая структура, лазерная камера, камера диагностики пучка. Канал откачки структуры проходит через волновод. Для самой большой диагностической камеры выбран комбинированный насос со встроенным геттерным картриджем. Для предварительной откачки используются откачные посты на основе высоковакуумных турбомолекулярных насосов и низковакуумных механических спиральных насосов.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗРАБОТКИ МАКЕТОВ МИШЕННО-ИОННЫХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ МАСС-СЕПАРАТОРНОГО ЛАЗЕРНО-ЯДЕРНОГО КОМПЛЕКСА «ИРИНА»

Люллин З.Г., Вересов О.Л., Григоренко С.В., Зуев Ю.В., Овчинников В.П., Строкач А.П.

АО «НИИЭФА», Санкт-Петербург, Россия

Разработка комплекса «ИРИНА» производится в рамках проекта по созданию приборной базы высокопоточного реактора ПИК в НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ (г. Гатчина). Назначение комплекса – получение разделенных по массовым числам радиоактивных ионных пучков, исследования нейтронно-избыточных короткоживущих изотопов в режиме реального времени и прикладных исследований в области физики твердого тела. Основными функциональными узлами комплекса являются: внутриреакторное устройство с мишенно-ионным устройством (МИУ), лазерная установка для селективной ионизации радионуклидов, масс-сепаратор с каналами транспортировки и коллекторными станциями.

В штатном режиме МИУ содержит мишень из карбида урана 235, которая под воздействием нейтронов работающего реактора разогревается до температуры 2000 °С. В реакции деления образуются нейтронно-избыточные радионуклиды, атомы которых после ионизации извлекаются электрическим полем в МИУ и разделяются по массам магнитным полем масс-сепаратора. Для наладки оборудования при выключенном реакторе вместо мишени из карбида урана будет использоваться фольга из вольфрама. При резистивном нагреве фольги до температуры 1600-2000 °С с ее поверхности происходит термическая десорбция частиц примеси, как правило, атомов с низкой энергией ионизации (калий и др.). Достигающие эмиссионного отверстия ионы, образующиеся за счет поверхностной ионизации, собираются и формируются в пучок электрическими полями электродов МИУ.

Для отработки конструкции МИУ с накаливаемой вольфрамовой фольгой разработаны и изготовлены два варианта этого устройства. Целью испытаний макетов МИУ являлась проверка работоспособности принятых конструкторских решений в рабочих режимах при напряжении на электродах до 40 кВ и токе пучка ионов примесей до единиц наноампер. В докладе приводятся результаты испытания макетов МИУ и рекомендации по дальнейшему проектированию конструкции для испытания комплекса на исследовательском реакторе ПИК.

ПРОГРАММА PHDYN ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИКИ ЗАРЯДА ФОТОКАТОДА В ФОТОПУШКАХ

Владимиров М.В., Рациков В.И., Полозов С.М.

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

Формализм уравнений в частных производных продуктивен при решении задач, связанных с транспортом носителей заряда в полупроводниковых структурах [1–4]. В контексте высокочастотных (ВЧ) фотопушек такой подход позволяет не только определять время отклика полупроводникового фотокатода [5], но также находить образующийся в нем динамический заряд, учет которого существенен при расчете динамики эмитируемого сгустка в прикатодной области [6].

Ранее было показано, что эволюция неравновесных носителей заряда в фотокатод под внешними воздействиями ВЧ фотопушки позволяет получать временную зависимость фототока, а с ней и заряд сгустка [7]. Позднее, с учетом самосогласованности фотоэмиссии в данном рассмотрении, был предложен переход к численному моделированию [8].

Доклад посвящен описанию численного кода PhDyn для расчета динамики заряда фотокатода в фотопушках. Демонстрируется возможность нахождения профиля фототока и заряда эмитируемого сгустка с учетом его собственного поля. Приводятся некоторые из качественных закономерностей, связанные с выбором параметров фотокатода и лазерной системы.

Список литературы

1. Jiang Y. et al. Quantum efficiency enhancement of reflective GaAs photocathodes with exponential-doping structure generating a favorable built-in electric field //Optics Express. – 2024. – Т. 32. – №. 23. – С. 41925-41935.
2. Wu X., Diao Y., Xia S. Three-dimensional transportation mechanism of transmission-mode AlGaIn nanoarray photocathode within four steps from photon excitation to electron collection //Applied Surface Science. – 2025. – Т. 695. – С. 162927.
3. Hu Y. et al. Simulation of a partially depleted absorber (PDA) photodetector //Optics Express. – 2015. – Т. 23. – №. 16. – С. 20402-20417.
4. Xie X. et al. Optimizing charge transport simulation for hybrid pixel detectors //Journal of Instrumentation. – 2024. – Т. 19. – №. 10. – С. C10007.
5. Jia T. et al. Response time characteristics of a transmissive uniformly doped GaAsP photocathode //Applied Optics. – 2023. – Т. 62. – №. 33. – С. 8804-8810.
6. Krasilnikov M., Chen Y., Stephan F. Studies of space charge dominated electron photoemission at PITZ //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2019. – Т. 1238. – №. 1. – С. 012064.
7. Vladimirov M. V., Polozov S. M., Rashchikov V. I. Electron Transport in Photocathodes as a Response to a Laser Pulse Inducing the Photoelectric Effect //JETP Letters. – 2024. – Т. 120. – №. 6. – С. 428-433.
8. Vladimirov M., Rashchikov V., Polozov S. Features of electron bunch formation in radiofrequency photoguns //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2025. – Т. 1075. – С. 170443.

ГЕНЕРАЦИЯ ИНТЕНСИВНОГО СУБМИЛЛИСЕКУНДНОГО РАДИАЛЬНО СХОДЯЩЕГОСЯ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА В ИСТОЧНИКЕ С СЕТОЧНЫМ ПЛАЗМЕННЫМ ЭМИТТЕРОМ

Торба М.С., Дорошкевич С.Ю., Воробьев М.С., Гришков А.А., Коваль Н.Н., Волис М.Г.

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия

Радиально сходящиеся электронные пучки представляют значительный интерес для применения в технологиях обработки материалов и изделий цилиндрической формы [1–3]. Однако одной из ключевых проблем при их использовании является неоднородность пучка, которая может привести к снижению электрической прочности ускоряющего промежутка, ухудшению стабильности работы электронного источника и, что особенно важно, к снижению качества обработки изделий. Поэтому задача уменьшения неоднородности электронного пучка в таких системах остаётся актуальной и требует новых инженерных решений.

В работе представлены результаты исследований по формированию радиально сходящегося электронного пучка с использованием многодугового сеточного плазменного эмиттера [4]. Экспериментальные исследования были направлены на увеличение амплитуды тока пучка и повышение стабильности работы источника, в том числе за счёт снижения числа электрических пробоев высоковольтного ускоряющего зазора. Для анализа плотности и распределения тока пучка в различных режимах работы была проведена серия измерений с использованием секционированного коллектора из нержавеющей стали. Полученные данные позволили выявить ряд недостатков в применяемой конфигурации плазменного эмиттера, что послужило основанием для его последующей модернизации. Внедрение секционированного полого анода дало возможность значительно уменьшить не-

однородность азимутального распределения плотности тока в радиально сходящемся электронном пучке. Также представлены сравнительные результаты распределения плотности тока для различных конструктивных вариантов плазменного эмиттера.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (номер: FWRM-2021-0006).

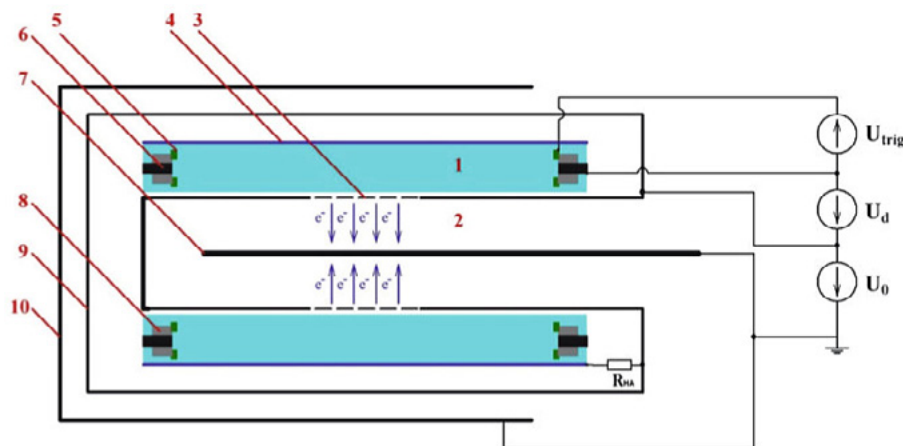


Рис. 1 Схема источника электронов: 1 – эмиссионная плазма, 2 – ускоряющий промежуток, 3 – мелкоструктурная эмиссионная сетка, 4 – полый анод, 5 – поджигающий электрод, 6 – катод, 7 – коллектор, 8 – диэлектрик, 9 – корпус плазменного эмиттера, 10 – вакуумная камера

Список литературы

1. Kiziridi P. P., Ozur G. E. A Source of Radially Converging Low-Energy High-Current Electron Beams // Instruments and Experimental Techniques. – 2022. – Vol. 65, No. 6. – P. 918–923. – DOI: 10.1134/s0020441222060124. – EDN: YTCSKD..
2. Engelko V. I., Fetzer R., Tkachenko K., et al. Experimental Study of the Accelerator of a Pulsed High-Current Radially Converging Electron Beam // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2019. – Vol. 47, No. 1. – P. 329–335. – DOI: 10.1109/TPS.2018.2877990.
3. Teichmann T., Berger M., Clemens H., et al. Advances in electron beam technology for environmental and biotechnological applications at Fraunhofer FEP // Journal of Physics: Conference Series. – 2023. – Vol. 2443, No. 1. – P. 012017. – DOI: 10.1088/1742-6596/2443/1/012017.
4. Torba M. S., Doroshkevich S. Yu., Vorobyov M. S., et al. Electron Source with a Radially Converging Beam and a Multiarc Plasma Cathode // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2023. – Vol. 87, No. S2. – P. S318–S323. – DOI: 10.1134/s1062873823704798.

ТЕСТОВЫЙ СТЕНД ВЧ ФОТОИНЖЕКТОРА ЛЯП ОИЯИ: СТАТУС РАБОТ И ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

*Дятлов А.С.^{1,2}, Афанасьев А.В.¹, Карловец Д.В.^{2,3}, Кобец В.В.¹, Левичев А.Е.⁴,
Никифоров Д.А.⁴, Ноздрин А.А.¹, Ноздрин М.А.¹, Сибирякова К.А.⁴, Юненко К.Е.¹*

¹Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

²Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

³«Курчатовский институт» – ПИЯФ, Гатчина, Россия

⁴Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

В настоящее время в Лаборатории ядерных проблем Объединённого института ядерных исследований ведутся монтажные и пусконаладочные работы на стенде ВЧ фотоинжектора. Основными

компонентами этого стенда являются ВЧ-фотопушка, изготовленная в Институте ядерной физики им. Будкера СО РАН [1], и лазер, разработанный Институтом прикладной физики РАН [2].

Основной целью данного стенда является анализ возможностей модернизации существующей инжекционной системы ускорителя ЛИНАК. Кроме того, важная научная задача, решаемая в рамках этого проекта совместно с Университетом ИТМО, заключается в генерации релятивистских вихревых электронных пучков.

Был проведён анализ основных параметров ВЧ-фотопушки при проведении «холодных» измерений, а также при подводе ВЧ мощности в резонаторные полости. ВЧ фотопушка была выведена на собственную частоту $\omega_0 = 2855,4$ МГц с коэффициентом стоячей волны (КСВ) 1.8.

Для оптимизации работы стенда были проведены симуляции динамики получаемого пучка с использованием программного обеспечения ASTRA. Полученные результаты демонстрируют реализацию схемы Карлстена [3], которая позволяет осуществлять коллимацию генерируемого пучка и компенсацию нелинейных эффектов, вызванных силами пространственного заряда, с использованием простой линейной оптики.

Главным результатом текущих экспериментальных работ на данный момент является генерация первых фотоэлектронов. Интенсивность пока составляет десятки электронов в импульсе. Фотоэмиссия была достигнута с использованием медного фотокатода и лазера с длительностью импульса 5 нс и энергией импульса 30 мДж. В настоящее время ведутся работы по дальнейшей оптимизации функционирования стенда, направленные, прежде всего, на уменьшение сигналов темновых токов и увеличение генерируемого фототока.

Список литературы

1. Nikiforov et al., Technical. Physics Vol. 63 No. 4, 2018.
2. Gacheva et al., IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol. 50, No. 7, July 2014.
3. B.E. Carlsten, Space charge induced emittance compensation in high brightness photoinjectors, Part. Accel. 49 (1995) 27-65.

РАЗРАБОТКА ИСТОЧНИКА ПОЛЯРИЗОВАННЫХ ИОНОВ 3He^{++} С ОПТИЧЕСКОЙ НАКАЧКОЙ ДЛЯ КОЛЛАЙДЕРА NICA, (ОИЯИ)

*Зеленский А.Н.¹, Овсянников В.П.², Фимушкин В.В.², Белов А.С.³, Филатов Ю.Н.¹,
Дунин Н.В.², Ившин К.А.², Рамздорф А.Ю.², Соловьёв А.Н.², Юдин И.С.¹*

¹Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия

²Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

³Институт ядерных исследований РАН, Москва, Россия

Программа поляризационных исследований на коллайдере NICA (ОИЯИ) основана на ускорении и столкновениях поляризованных пучков протонов и дейтронов при энергии до $\sqrt{S}=27$ ГэВ. Также имеется возможность получения для экспериментов поляризованных пучков 3He , основанная на уникальном опыте ОИЯИ по разработке методики EBIS (Electron Beam Ion Source) [1]. Ядерная поляризация в поляризованном пучке 3He^{++} переносится в основном нейтронами, поэтому пучок поляризованных нейтронов высоких энергий может быть доступен для фундаментальных исследований столкновений с поляризованными протонами, дейтронами, пучками 3He^{++} (и другими неполяризованными пучками тяжелых ионов), а также для экспериментов на внешних мишенях в Нуклотроне (ОИЯИ). Предложение по

разработке этого источника находится в стадии разработки в ОИЯИ для коллайдера NICA, а также в других лабораториях за рубежом. Предложено для получения высокоинтенсивного поляризованного пучка ионов $^3\text{He}^{++}$ инжектировать поляризованный методом оптической накачки и обмена метастабильностью газ ^3He в EBIS для ионизации и накопления ионов $^3\text{He}^{++}$ (высокое магнитное поле EBIS 5,0 Тл должно сохранять поляризацию при ионизации) [2]. В данной работе мы представим общую схему EBIS для получения ионов $^3\text{He}^{++}$, конфигурацию магнитного поля, электронную пушку и систему фокусировки электронного пучка, инжекцию газа в дрейфовую трубку, (которая также работает как накопительная ячейка для увеличения эффективности ионизации), систему криогенной очистки и хранения газа ^3He , лазерную систему для оптической накачки ^3He [3]. При использовании электронного пучка мощностью 5 А, 10 кВ и сверхпроводящего соленоида с полем 5 Тл (и длиной 2,0 м), интенсивность ионного пучка $^3\text{He}^{++}$ оценивается в $\sim 2 \cdot 10^{11}$ ионов/цикл (см. Рис.1).

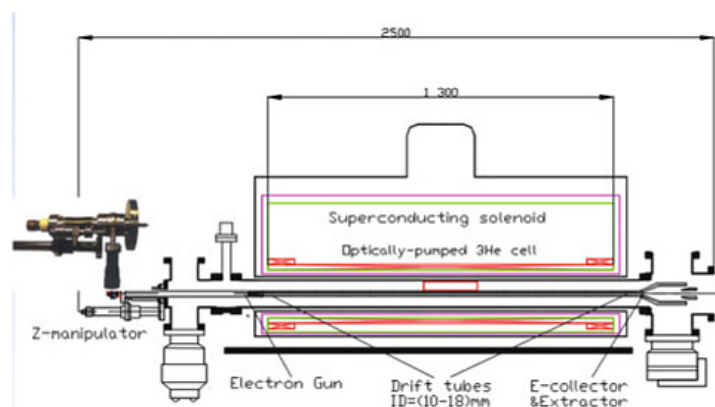


Рис.1 Схема электронно-лучевого источника для получения поляризованных ионов $^3\text{He}^{++}$ и других многозарядных ионов

В таком источнике можно будет также инжектировать другие газы через импульсный клапан в накопительную ячейку и получать многозарядные ионы Xe^{28+} . С добавлением внешней инжекции в EBIS однозарядного пучка твёрдых тяжелых ионов, в источнике можно будет также получать пучки многозарядных ионов вплоть до Au^{33+} и Bi^{38+} с полным зарядом свыше 10 пКл/цикл (Рис. 2).

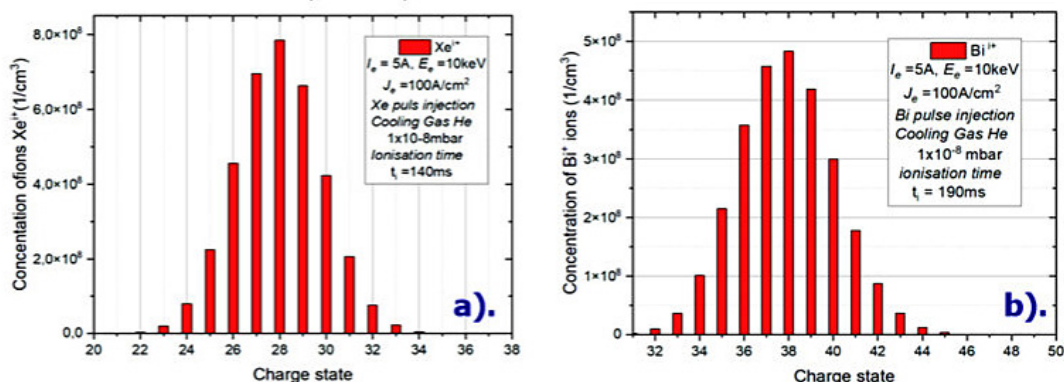


Рис. 2 Расчётный спектр зарядовых состояний ионов: а) ксенона и б) висмута

Список литературы

1. Д.Н. Рассадов и др., Письма в ЭЧАЯ, т.21, № 3(254). С.281–289, (2024).
2. A. Zelenski, J. Alessi, ICFA Beam Dynamics Newsletter, No.30, стр.39, (2003).
3. A. Zelenski et al., Nuclear Instruments Meth. A., v. 1055, P. 168494, (2023).

МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРИБОРОВ ФИЗИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Иванов В.Я.

Институт ядерной физики имени Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

Представлен сравнительный анализ эффективности численных моделей решения задач электронной оптики интенсивных пучков релятивистских заряженных частиц и оптики изображающих систем: матричный метод, метод «частиц-в-ячейке», метод «трубок тока» и численно-аналитический метод на основе теории аббераций. Даны примеры решения практических задач проектирования электронных пушек, многорезонаторных мощных клистронов, электронно-оптических преобразователей и других приборов физической электроники, используемых в физике современных ускорителей заряженных частиц.

Комплект оригинальных программных средств [1-6] позволяет решать задачи анализа, оптимизации и синтеза сложных приборов физической электроники в двумерной и трехмерной постановках [7]. Эти пакеты прикладных программ успешно использовались при расчетах параметров мощных клистрона с плоским пучком X-диапазона [8] в трехмерной постановке и клистрона S-диапазона для проекта «СКИФ» [9].

Список литературы

1. Иванов В.Я. Алгоритмы проектирования и программы для расчёта многорезонаторных пролётных клистронов. – Препринт ИЯФ 2023-03. – Новосибирск, 2023. – 36 с.
2. Иванов В.Я., Левичев А.Е. Программа на ЭВМ BINP3 для расчёта характеристик мощных пролётных клистронов по аналитической теории нелинейного каскадного группирования в среде MathCAD. Сертификат государственной регистрации №2023684964.21.11.2023.
3. Иванов В.Я. Программа на ЭВМ KlyAnal для численного моделирования мощных пролётных клистронов на ранних этапах проектирования. Сертификат государственной регистрации №2024614467.26.02.2024.
4. Иванов В.Я. Программа на ЭВМ KlyOptim для решения задач многомерной оптимизации методом адаптивного случайного поиска. Сертификат государственной регистрации №2024669039.13.08.2024.
5. Иванов В.Я. Программа на ЭВМ MAXWELL-2 для расчета параметров резонаторов методом интегральных уравнений. Сертификат государственной регистрации №2025614083.18.02.2025.
6. Иванов В.Я. Программа на ЭВМ VIDISK для численного моделирования клистронов на основе модели движущихся заряженных лисков. Сертификат государственной регистрации №2024682165.18.09.2024.
7. V. Ivanov. Computational methods, optimization and synthesis in electron optics.- Hmbg: Palmarium Academic Publishing, 2016.-525 pp.
8. V. Ivanov, A. Krasnykh, G. Scheitrum, D. Sprehn, L. Ives, G. Miram. 3-D modeling activity for novel high power electron guns at SLAC. PAC03-PAB011, SLAC-PUB-10080, Jul 2003. 3pp. Proceedings of Particle Accelerator Conference (PAC 03), Portland, Oregon, 12-16 May 2003, pp. 3312-3314.
9. Levichev A., Barnyakov A., Samoylov S., Nikiforov D., Ivanov V., Arsentyeva M., Chermenev D., Pavlov O., Pivovarov I. Development of the S-band klystron at BINP SB RAS. XXVIII Int. Conf. RuPac'23, 11-15 Sept., 2023, Novosibirsk, Russia.

ПРИКЛАДНЫЕ ПРИМЕНЕНИЯ УСКОРИТЕЛЕЙ

СТАТУС РАЗВИТИЯ ЦИКЛОТРОНОВ ПРИКЛАДНОГО НАЗНАЧЕНИЯ В РОССИИ

Гавриш Ю.Н., Мудролюбов В.Г., Осина Ю.К., Смирнов К.Е.

АО «НИИЭФА», Санкт-Петербург, Россия

В докладе рассмотрены особенности циклотронов АО «НИИЭФА», разработанных и поставляемых заказчиком для прикладных целей, в основном, для наработки радиоизотопной продукции медицинского применения. В последнее время стала очевидной тенденция расширения направлений применения циклотронов и комплексов на их основе. С учётом новых задач АО «НИИЭФА» осуществляет работы по модернизации разработанных ранее ускорителей и созданию новых комплексов с более широкими возможностями.

Модернизация циклотрона Ц-80 с энергией протонов в диапазоне 40 – 80 МэВ заключается в создании специализированного канала выпуска и формирования пучка малой интенсивности, каналов формирования пучка высокой интенсивности, оснащении циклотрона комплексом пространственного позиционирования пациентов при лечении онкоофтальмологических заболеваний, а также мишенным комплексом и радиохимическим оборудованием для наработки широкого спектра диагностических и терапевтических радиоизотопов, в том числе стронций-рубидиевых генераторов.

Модернизация циклотрона СС-12 для ускорения молекулярных ионов водорода направлена на получение интенсивных пучков ускоренных протонов с целью генерации мощных нейтронных потоков в интересах бор-нейтронозахватной терапии.

В настоящее время АО «НИИЭФА» одновременно осуществляет три уникальных проекта: создание циклотронного комплекса многозарядных ионов, позволяющего получать пучки ускоренных ионов от углерода до висмута в диапазоне регулируемой энергии от 7,5 до 15 МэВ на нуклон; циклотрона Ц-250 с регулируемой энергией протонов от 30 до 250 МэВ, а также, совместно с ОИЯИ, сверхпроводящего циклотрона на энергию 230 МэВ для протонной терапии онкологических заболеваний.

ПРОГНОЗ ПОТРЕБНОСТЕЙ В УСКОРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКЕ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ КОСМИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ С УЧЕТОМ РАЗВИТИЯ МНОГОСПУТНИКОВОЙ ГРУППИРОВКИ

Чубунов П.А., Протопопов Г.А., Скоркин И.В., Задорожко Д.Н.

АО «НИИ КП», г. Москва, Россия

Ионизирующие излучения космического пространства являются главным фактором, ограничивающим сроки активного существования бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов из-за возникновения радиационных эффектов в комплектующей элементной базе. Для обеспечения стойкости аппаратуры разработчиками выбираются элементы с достаточными уровнями радиационной стойкости, которые определяются по результатам наземных испытаний. Для современной электроники наиболее опасными являются одиночные радиационные эффекты от воздействия ионов галактических и солнечных космических лучей, а также протонов, которые проявляются в возникновении сбоя или отказа при попадании отдельной частицы в чувствительную область элемента. Для определения характеристик стойкости по одиночным эффектам проводятся испытания с использованием ускорителей тяжелых заряженных частиц и ускорителей протонов. В качестве параметра, характеризующего стойкость электронного компонента по одиночным эффектам, используется значение линейной передачи энергии частицы в материале чувствительной области элемента. Исходя из современных требований к срокам активного существования космических аппаратов, параметров орбит и высоких значений вероятности безотказной работы аппаратуры определены типовые требования к уровням стойкости элементной базы. Для проведения испытаний на подтверждение этих требований необходимо использовать ускорители тяжелых заряженных частиц со значениями ЛПЭ ионов в кремнии от единиц до сотни МэВ×см²/мг с пробегами частиц более 30–40 мкм в материале чувствительной области. В ряде случаев, для

оценки стойкости используют ускорители протонов, однако они не обеспечивают требования к испытаниям в полном объеме. Испытания на воздействие тяжелых заряженных частиц являются дорогостоящими, однако их проведение существенно снижает риски потери космической техники, стоимость которой на порядки дороже.

В мировой практике активно развивается подход к предоставлению космических услуг посредством многоспутниковой группировки. В данном случае, требования по качеству и надежности задаются не к отдельному космическому аппарату, а к группировке в целом. При этом допускается выход из строя отдельных аппаратов с последующим их восполнением. Для аппаратов многоспутниковой группировки характерны более низкие требования к срокам активного существования, менее жесткие орбиты функционирования и сниженные требования к вероятности безотказной работы отдельного аппарата. Важной особенностью таких аппаратов является их относительно низкая стоимость. Учитывая это обстоятельство, возникает дилемма: с одной стороны, для комплектования используется не радиационно-стойкая, коммерческая элементная база, с другой – необходимо обеспечить стойкость и работоспособность системы в условиях воздействия космической радиации, при этом средства на испытания ограничены. Необходимо найти баланс между экономическими затратами и обеспечением стойкости. В докладе проводится анализ изменений требований к радиационной стойкости комплектующей элементной базы, и, как следствие, требований к ускорительной технике для обеспечения возможности проведения испытаний, а также обобщен опыт Европейского космического агентства и NASA по заданию и подтверждению требований к многоспутниковой группировке. В России также начаты работы по созданию многоспутниковой группировки. По результатам анализа сформирован прогноз потребностей в развитии ускорительной техники в России для испытаний космической электроники, приводится сравнение с планами развития ускорительной техники для задач радиационных испытаний электроники в Европе, США и Китае.

КУРЧАТОВСКИЙ КОМПЛЕКС ПРОТОННОЙ ЛУЧЕВОЙ ТЕРАПИИ. СТАТУС ПРОЕКТА

Черных А.Н., Благов А.Е., Кленов Г.И., Кулевой Т.В.

НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

Сегодня адронная лучевая терапия (АЛТ) после более чем семидесяти лет своего развития уверенно завоевала свое место в мировом здравоохранении, как высокоэффективный метод лечения онкологических заболеваний. В мире действуют 123 центра протонной лучевой терапии и 14 центров ионной лучевой терапии. Кроме того, строятся еще 33 центра и планируется к строительству 30 центров протонной лучевой терапии [1]. В России работают 3 центра ПЛТ из них 2 на оборудовании иностранного производства.

Понимая необходимость развития АЛТ в стране Правительство РФ своим постановлением от 16 марта 2020 г. № 287 поручило НИЦ «Курчатовский институт» создать в рамках будущего Научно-образовательного медицинского центра ядерной медицины (НОМЦ ЯМ) комплекс протонной лучевой терапии (ПЛТ), онкоофтальмологический комплекс ПЛТ, а также комплекс ионной лучевой терапии и типовое оборудование для тиражирования подобных комплексов [2].

В докладе речь пойдет о комплексе протонной лучевой терапии («Луч-Протон»), создаваемом на территории НИЦ «Курчатовский институт».

Основные параметры комплекса протонной лучевой терапии приведены в таблице. Проектом предусмотрена разработка трех основных элементов оборудования – ускоритель с каналами транспортировки протонных пучков, установка гантри для многопольного облучения пациента в положении лежа и установка с фиксированным в горизонтальной плоскости направлением протонного пучка для облучения пациента как в положении сидя, так и лежа, используя универсальный роботизированный позиционер.

Основные характеристики комплекса «Луч-Протон»

	Наименование параметра установки	Значение
1	Ускорительный комплекс	
1.1	Ускоритель	Протонный синхротрон
1.2	Энергия ускоренных протонов	70–250 МэВ
1.3	Интенсивность	5×10^{10} протонов в секунду
2	Установка Гантри	
2.1	Энергия протонов	70–250 МэВ
2.2	Поворот протонного пучка	$\pm 185^\circ$
2.3	Система формирования дозового распределения	активно/пассивная
2.4	Макс. размер дозового распределения	$25 \times 25 \text{ см}^2$
2.5	Система позиционирования	2D и 3D система рентгеновского позиционирования
2.6	Позиционер	6D стол позиционер
2.7	Локализации	- голова, шея; - новообразования абдоминальной области
3	Установка с фиксированным направлением протонного пучка	
3.1	Энергия протонов	70–250 МэВ
3.2	Система формирования дозового распределения	активно/пассивная
3.3	Макс. размер дозового распределения	$40 \times 40 \text{ см}^2$
3.4	Система позиционирования	2D-система рентгеновского позиционирования
3.5	Позиционер	Универсальный позиционер
3.6	Локализации	- голова, шея; - внутриглазные новообразования; - новообразования орбиты глаза

В настоящее время работы по созданию комплекса протонной терапии находятся на стадии разработки рабочей проектной документации, подготовки площадки для строительства здания, разработки нестандартизированного оборудования, такого как протонный синхротрон с каналами транспортировки, установка с фиксированным в горизонтальной плоскости направлением протонного пучка, автоматизированная система управления, программно аппаратный комплекс. Организуется кооперации по изготовлению лучевой установки гантри. Предполагается, что наладка оборудования Комплекса протонной лучевой терапии начнется в 2028 г.

Список литературы

1. WWW.PTCOG (Particles Therapy Co-Operative Group), Online 2025.
2. Ivanov E.M., Klyonov G.I., Maksimov V.I., Khoroshkov V.S., Chernykh A.N. // Medical Radiology and Radiation Safety. 2022. Vol. 67. No. 3.

ПРОЕКТ ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ ДЛЯ НАРАБОТКИ МЕДИЦИНСКИХ ИЗОТОПОВ

Ермаков А.Н.^{1,2}, Бажал С.В.⁴, Бельшев С.С.³, Бобылев Д.Е.^{1,2}, Борисов М.А.³, Ханкин В.В.^{1,2}, Хромылева Т.А.⁴, Хрячков В.А.⁴, Шведунов В.И.^{1,2}, Шведунов Н.В.^{1,2}, Юров Д.С.^{1,2}

¹НИИЯФ имени Д.В. Скобелевича МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²ООО «Лаборатория электронных ускорителей МГУ», Москва, Россия

³Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

⁴АО «ГНЦ РФ-ФЭИ им. А.И. Лейпунского», Обнинск, Россия

В АО «ГНЦ РФ-ФЭИ» разработан ряд технологий производства изотопов медицинского назначения с использованием тормозного излучения ускорителя электронов. В статье представлен проект сильноточного линейного резонансного ускорителя электронов, предназначенного для ускорительного комплекса АО «ГНЦ РФ – ФЭИ». Линейный ускоритель с перестраиваемой энергией пучка от 18 до 35 МэВ и средним током до 100 мкА включает в себя трехэлектродную электронную пушку, две секции бипериодической ускоряющей структуры с внутренними ячейками связи, работающей в режиме стоячей волны на частоте 2856 МГц, систему транспортировки пучка до мишенного узла, построенную на основе схемы бездисперсионного параллельного переноса.

ЛИНЕЙНЫЕ УСКОРИТЕЛИ ЭЛЕКТРОНОВ S-ДИАПАЗОНА АО «НИИЭФА» ДЛЯ РАДИАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Вахрушин И.Ю., Зуев Ю.В., Котенко К.В., Кравчук К.А., Кужлев А.Н., Смирнов К.Е., Цветков К.И.

АО «НИИЭФА», Санкт-Петербург, Россия

В АО «НИИЭФА» продолжают работы по созданию линейных ускорителей электронов S-диапазона для радиационных технологий.

Разработки ведутся по двум основным направлениям: ускорители для радиационной стерилизации и исследований в области радиационного материаловедения с энергией ускоренных электронов до 10

МэВ и мощностью выходного пучка до 20 кВт и ускорители для неразрушающего контроля крупногабаритных изделий тормозным излучением с энергией ускоренных электронов от 3 до 10 МэВ.

Во всех ускорителях используются бипериодические ускоряющие структуры (БУС) с внутренними ячейками связи на стоячей волне, работающие на $\pi/2$ типе колебаний. Такие структуры отличаются высоким шунтовое сопротивление, малые габариты, низкая чувствительность к колебаниям температуры и ошибкам в изготовлении.



Рисунок 1 Излучатель ускорителя УЭЛР-10-10С-М

Важным фактором является также наличие в АО «НИИЭФА» отработанной технологии изготовления и настройки таких структур.

Для применения в ускорителях для радиационных технологий разработаны и сконструированы 6 ускоряющих структур, отличающихся по параметрам и позволяющих использовать их в ускорителях с различными техническими характеристиками.

Основным различием ускорителей АО «НИИЭФА» для стерилизации является то, что в ускорителе с выходной мощностью пучка 10 кВт используются многолучевые клистроны типа КИУ-268

и линейные модуляторы разработки АО «НИИЭФА» с тиратроном ТГИ2-10к/500. В ускорителях с мощностью 20 кВт планируется использовать однолучевые клистроны КИУ-287 или 8262Р и твердотельный модулятор фирмы «Даншенг».

Основные параметры и характеристики ускорителей для стерилизации представлены в таблице.

Основные параметры и характеристики ускорителей для стерилизации

Наименование параметра	Значение	
Мощность пучка, кВт	10	20
Энергия электронов, МэВ	5-7; 8-10	5; 7,5; 10
Длительность импульса пучка, мкс	14	20
Длина развертки пучка, мм	600	600 - 800
Вывод пучка	горизонтальный	вертикальный
Модулятор	«НИИЭФА»	«Даншенг»
Клистрон	КИУ-268	КИУ-287, 8262Р1



Рисунок 2 Ускоритель для неразрушающего контроля УЭЛ-10Д

Развивая направление радиационной стерилизации, АО «НИИЭФА» провело разработку и осуществило комплексную поставку радиационно-технологической установки (РТУ) в многофункциональный центр облучения (МЦО) в г Казань, включающей в себя кроме ускорителя конвейерно-транспортную систему роликового типа, системы управления и системы безопасности. После завершения приемо-сдаточных испытаний и ввода установки в эксплуатацию данная РТУ может поставляться в центры облучения.

Ускорители АО «НИИЭФА» для неразрушающего контроля крупногабаритных изделий конструктивно выполнены в виде моноблочного излучателя, в котором размещены все узлы ускорителя, включая источник электронов, ускоряющую структуру, тормозную мишень, систему коллимации, систему импульсного высоковольтного питания, магнетрон, ВЧ тракт, узлы системы управления. Излучатель размещен на специальном подвесе, позволяющем перемещать его в горизонтальном и вертикальном направлении. Масса излучателя не превышает 900 кг. Разработаны две основные модификации ускорителей – с энергией тормозного излучения 6 МэВ и 10 МэВ и мощностью дозы 10 Гр/мин и 30 Гр/мин. В дополнение к ним была разработана конструкция ускорителя на 3 МэВ, несколько отличающаяся по компоновке.

ИЗМЕРЕНИЕ ЭМИТТАНСА НАКОПИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОНОВ С ПОМОЩЬЮ ОБРАТНОГО КОМПТОНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ

Каминский В.В.

Институт ядерной физики имени Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия
Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

При обратном комптоновском рассеянии поток рассеянных фотонов наследует свойства начального пучка электронов. В отличие от синхротронного излучения, область комптоновского взаимодействия может быть очень короткой (определяется длительностью лазерного импульса) и может

быть устроена в любом месте в пределах прямолинейного промежутка. Таким образом, из формы пятна комптоновских фотонов на детекторе можно извлечь информацию об угловом и координатном разбросе электронов, и значит, косвенно измерить эмиттансе пучка в накопителе.

Пространственное распределение комптоновских фотонов можно описать так:

$$D = N(x, y) \cdot (C(x, y) \otimes B(x, y))$$

где D – наблюдаемое распределение («data»), C – теоретическое распределение комптоновских фотонов («Compton») при рассеянии на одном электроны (пучке с нулевым фазовым объёмом), B – распределение электронов («beam»), и N – эффективность детектора (дифференциальная нелинейность). Координаты x, y включают в себя координаты и углы, пересчитанные к плоскости регистрации фотонов. Считая, что $N = 1$, или что N предварительно измерена, и пользуясь свойствами свёртки,

$$D = \mathcal{F}^{-1}(\hat{C} \times \hat{B}), B = \mathcal{F}^{-1}\left(\frac{\hat{B}}{\hat{C} + \delta} \times \frac{|\hat{C}|^2}{|\hat{C}|^2 + k \sum |\hat{C}|^2}\right)$$

где $\mathcal{F}^{-1}$ обозначает преобразование Фурье, $\hat{D}, \hat{C}$ – результаты преобразования Фурье, последний множитель – регуляризация Винера для подавления шумов, а δ служит для подавления нулей в знаменателе. Далее при фитировании B моделью углового разброса вычисляется эмиттанс. В первом приближении

$$B = B_0 \exp\left(\frac{-x^2}{2\epsilon_x(\beta_x + L^2\gamma_x)}\right) \cdot \exp\left(\frac{-y^2}{2\epsilon_y(\beta_y + L^2\gamma_y)}\right)$$

где β, γ – функции Твисса, ϵ – эмиттансы, L – расстояние от области взаимодействия до детектора. Подобный метод успешно применяется на установке «Лазерный поляриметр» на коллайдере ВЭПП-4М для решения обратной задачи – извлечения поляризационных характеристик.

Данный метод можно реализовать на коллайдере ВЭПП-4М (при энергии >3 ГэВ и горизонтальном эмиттансе порядка сотен нм·рад). Также он может быть полезен для определения горизонтального эмиттанса ИКИ НЦФМ (энергия до 2 ГэВ, эмиттанс порядка сотен пм·рад). По-видимому, определение сверхмалого эмиттанса накопителя СКИФ (<100 пм·рад при энергии 3 ГэВ) находится на пределе возможностей методики, но методика может быть полезной при настройке накопителя.

ПРИМЕНЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ГЕТТЕРОВ В КАЧЕСТВЕ СРЕДСТВА ОТКАЧКИ В ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКОМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕ С ФОТОЭЛЕКТРОННЫМ УМНОЖИТЕЛЕМ НА ОСНОВЕ МИКРОКАНАЛЬНОЙ ПЛАСТИНЫ

Семенов А.М.

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия
Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

Электронно-оптические преобразователи являются неотъемлемой частью в приборах ночного видения, в регистрации быстропротекающих процессов в нано- и субнаносекундном диапазоне в экспериментальной физике, лазерной технике, астрономии и прочее, как средство усиления яркости или преобразования инфракрасного, ультрафиолетового или рентгеновского излучения в видимое изображение.

Одним из методов усиления сигнала является применение фотоэлектронного умножителя на основе микроканальной пластины, обладающих рядом преимуществ по сравнению с ФЭУ на дискретных диодах: меньшие массогабаритные размеры приборов, способность работать в магнитном поле, задержка сигналов равняется меньше 1 нс.

Поскольку ЭОП является вакуумно-изолированным прибором, то его долговечность и работоспособность напрямую связаны с вакуумом. Традиционно в таких приборах применяются распыляемые геттеры. Дополнительное применение нераспыляемых геттеров обеспечивает не только скорость откачки, но и препятствует десорбции с поверхности, покрытой геттером, т.е. поверхность будет не источником газовой нагрузки, а средством откачки.

В данной работе рассмотрены различные комбинации геттерных покрытий для применения в вакуумном блоке фотоэлектронного умножителя.

ИССЛЕДОВАНИЕ АКТИВАЦИИ ЗАЛА НОВОСИБИРСКОГО ЛАЗЕРА НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ

Каминский В.В.^{1,2}, Мешков О.И.^{1,2}, Старостина Е.В.^{1,2}, Шевченко О.А.¹

¹Институт ядерной физики имени Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

²Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

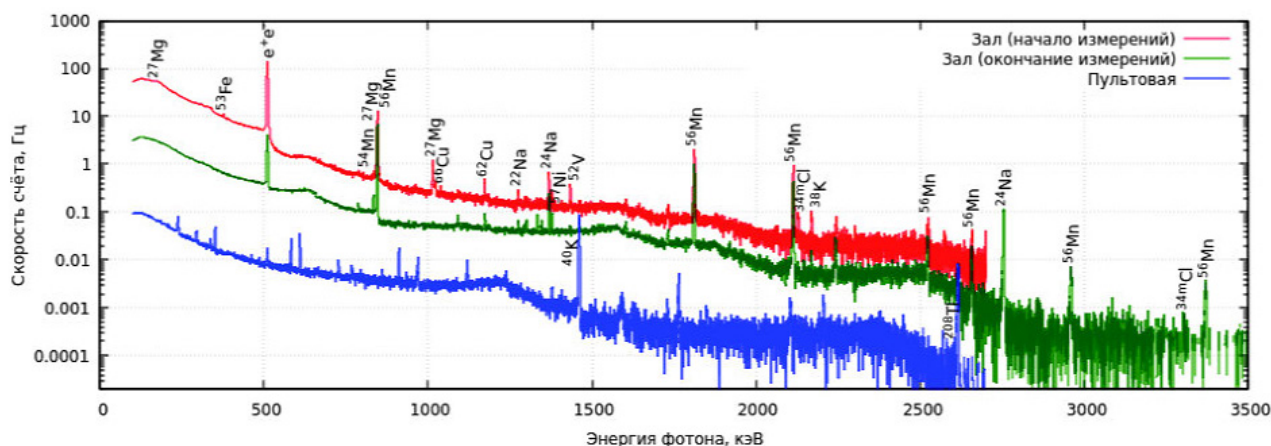
В данной статье описано исследование наведённой радиоактивности в помещении Новосибирского лазера на свободных электронах (ЛСЭ), проведённое в 2025 году. На четвёртой дорожке ускорителя Новосибирского ЛСЭ электронный пучок имеет энергию 40 МэВ, электроны с такой энергией вызывают ядерные реакции практически в любом нуклиде.

После получасовой работы ускорителя в режиме полной потери пучка со средним током около 100 мкА на четвертой дорожке регистрировались спектры гамма-излучения. Спектры порциями по несколько минут регистрировались детектором из сверхчистого германия. В суммарных спектрах по характерным гамма-линиям сначала определялись излучающие ядра-кандидаты. Анализ изменения амплитуд пиков во времени позволил по времени жизни уточнить эти данные, в частности, разделить ядра-изобары (обладающие очень похожими гамма-спектрами).

Определено 3 канала образования нестабильных ядер из стабильных ядер, встречающихся в окружающих материалах:

- Захват электрона ${}^A_ZX(e^-, \nu_e){}^A_{Z-1}Y$: β^- -активный нейтроноизбыточный нуклид;
- Скалывание нейтрона $A_ZX(e^-, n[\gamma]){}^{A-1}_ZY$: β^+ -активный нейтрононедостаточный нуклид;
- Захват нейтрона ${}^A_ZX(n, \gamma){}^{A+1}_ZY$: β^- -активный нейтроноизбыточный нуклид, источник нейтронов — реакции скалывания.

Найдены следующие нестабильные нуклиды, образующиеся из стабильных изотопов алюминия, меди, железа, хрома, марганца, никеля и т.д. — материалов вакуумной камеры, магнитов и стен: ${}^{62}\text{Cu}$, ${}^{27}\text{Mg}$, ${}^{53}\text{Fe}$, ${}^{52}\text{V}$, ${}^{57}\text{Ni}$, ${}^{54}\text{Mn}$, ${}^{56}\text{Mn}$, ${}^{22}\text{Na}$, ${}^{24}\text{Na}$, ${}^{66}\text{Cu}$, ${}^{38}\text{K}$. Наибольшей активностью обладали β^+ -активные ядра ${}^{62}\text{Cu}$. Полная активность убывала с характерным периодом полураспада около 500 с.



ИЗОСПИНОВОЕ РАСЩЕПЛЕНИЕ ГИГАНТСКОГО ДИПОЛЬНОГО РЕЗОНАНСА НА СРЕДНИХ И ТЯЖЕЛЫХ ЯДРАХ

*Расулова Ф.А.^{1,2}, Аксенов Н.В.¹, Алексеев С.И.¹, Бельшиев С.С.^{3,4}, Божиков Г.А.¹, Чупраков И.^{1,5},
Фурсова Н.Ю.^{3,4}, Мадумаров А.Ш.¹, Хушвактов Ж.Х.^{2,6}, Кузнецов А.А.^{3,4}*

¹Лаборатория ядерных реакций им. Г.Н. Флерова Объединенного института ядерных исследований, Дубна, Россия

²Институт ядерной физики Академии наук Республики Узбекистан, Ташкент, Узбекистан

³Институт ядерной физики, Алматы, Республика Казахстан

⁴НИИЯФ им. Д.В. Скобельцына МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

⁵Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

⁶Лаборатория ядерных проблем им. Г.П. Дзепепова Объединенного института ядерных исследований, Дубна, Россия

В данной работе эксперименты проводились при энергиях конечной точки тормозного излучения 10-23 МэВ с пучком из микротрона МТ-25 с использованием техники γ -активации. Энергии электронов находились в диапазоне 10-23 МэВ с шагом энергии 1 МэВ. Для получения гамма-излучения использовалась мишень-радиатор из вольфрама, который является распространенным материалом-конвертером. Для удаления оставшихся электронов из пучка тормозного излучения за вольфрамовым конвертером был помещен алюминиевый поглотитель толщиной 30 мм. Наведенная активность в облученных мишенях из природной смеси Se [1], Mo [2], Cd, Te и Pt измерялась с использованием германиевого γ -детектора высокой чистоты, экспериментальные выходы реакций нормировались на выход реакций $^{82}\text{Se}(\gamma, n)^{81(m+g)}\text{Se}$, $^{100}\text{Mo}(\gamma, n)^{99}\text{Mo}$, $^{116}\text{Cd}(\gamma, n)^{115(m+g)}\text{Cd}$, $^{130}\text{Te}(\gamma, n)^{129(m+g)}\text{Te}$ и $^{198}\text{Pt}(\gamma, n)^{197(m+g)}\text{Pt}$ соответственно. Экспериментальные значения относительных выходов сравнивались с теоретическими результатами, полученными на основе TALYS со стандартными параметрами [3] и комбинированной модели фотонуклонных реакций [4].

В случае относительных выходов для фотопротонных реакций на тяжелых изотопах теоретические значения, рассчитанные с использованием CMPR, значительно превышают результаты TALYS. Экспериментально полученные результаты лежат ближе к теоретической кривой по коду CMPR. Учет изоспинного расщепления в CMPR позволяет описать экспериментальные данные по реакциям с вылетом протонов в диапазоне энергий от 10 до 23 МэВ.

Список литературы

1. F.A. Rasulova et. al., Chinese Physics C, 48, 024002 (2024).
2. F.A. Rasulova et. al., Physical Review C, 111, 024604 (2025).
3. A. Koning. TALYS-2.0: A Nuclear Reaction Program, User Manual, 2023.
4. B. S. Ishkhanov et. al., Physics of Atomic Nuclei, 78, 557 (2015).

КОМПАКТНЫЙ ИСТОЧНИК НЕЙТРОНОВ DARIA НА ОСНОВЕ ЛИНЕЙНОГО РЕЗОНАНСНОГО УСКОРИТЕЛЯ ПРОТОНОВ

Кулевой Т.В.

НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

Под руководством НИЦ «Курчатовский институт» в рамках Федеральной научно-технической программы развития синхротронных и нейтронных исследований и исследовательской инфраструктуры ведется разработка компактного источника нейтронов (КИН) DARIA на основе линейного резонансного ускорителя протонов. КИН DARIA призван стать пилотным образцом серийной установки, предназначенной для оснащения ведущих научных центров страны с целью обеспечить нейтронное сообщество удобным и доступным инструментарием для научных исследований на нейтронных пучках, развития новых методов и оборудования для их проведения, а также постоян-

ного пополнения и повышения квалификации данного сообщества. Созданная сеть установок, охватывающая территорию всей страны от Калининграда до Дальнего Востока, позволит обеспечить загрузку флагманской установки ПИК экспериментами нобелевского класса.

КИН DARIA включает линейный ускоритель, мишенную сборку на основе бериллия и несколько нейтронных станций. Линейный ускоритель состоит из газодинамического ЭЦР источника с уникальными параметрами, разработанного ИПФ РАН, начальной части на основе резонатора с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой (RFQ) и цепочки малогазорных резонаторов с гибридными квадрупольными линзами между ними. На выходе ускорителя в базовой комплектации предполагается иметь ускоренный пучок протонов с энергией 13 МэВ, током пучка 100 мА, длительностью импульса 100 мкс и частотой следования 100 имп/с. Использование бериллиевой мишени и набора соответствующих модераторов обеспечит формирование на исследуемых образцах поток нейтронов требуемой энергии с интенсивностью аналогичной той, что достигается на исследовательских реакторах малой мощности. При необходимости, энергия пучка может быть повышена до 30 МэВ за счет увеличения малогазорных резонаторов, что потребует перехода на жидко-литиевую мишень. Энергия пучка без потери его интенсивности может быть увеличена до 70 МэВ, что в связке с использованием танталовой мишени может обеспечить поток нейтронов на мишени, соответствующий исследовательскому реактору средней мощности. КИН DARIA оснащается набором исследовательских станций под конкретные запросы научного центра, где он устанавливается. В качестве таких станций предлагается выбор из установки малоуглового рассеяния, холодного дифрактометра, стресс-дифрактометра, установки томографии, теплового рефлектометра. Кроме того, установка будет обладать каналом вывода протонного пучка для прикладных исследований, в частности, для наработки радиоизотопов для медицины.

На сегодняшний день выполнены все работы по разработке технологий ключевых элементов ускорителя установки КИН DARIA. Разработанный ИПФ РАН газодинамический ЭЦР источник обеспечивает ток пучка превосходящий и эмиттанс меньший, заложенных в проекте. Разработана технология изготовления секций резонатора RFQ и резонаторов DTL для работы в режиме малой скважности вплоть до непрерывного и изготовлены их полномасштабные прототипы. Разработана конструкция гибридной квадрупольной линзы для установки и изготовлен ее макет. Все это позволяет утверждать, что все технологии для изготовления КИН DARIA освоены и мы готовы к его производству.

ПРОВЕДЕНИЕ РАДИОБИОЛОГИЧЕСКИХ И ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА ЛИНЕЙНОМ УСКОРИТЕЛЕ LINAC

Швидкий С.В., Густов С.А., Кобец В.В., Молоканов А.Г., Углова С.С.

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

Линейный ускоритель электронов Лаборатории ядерных проблем ЛИНЭК предназначен для получения пучков электронов с энергией до 800 МэВ для проведения научно-методических исследований в области физики и техники ускорителей, для разработки и создания детекторов элементарных частиц, радиобиологических, прикладных исследований и образовательных целей. В качестве первого этапа предусмотрен ввод в эксплуатацию ускорителя в составе четырех ускорительных станций с максимальной энергией электронов 200 МэВ (установка ЛИНЭК-200). Структура пучка импульсная, с импульсами длительностью 0,25-3 мкс.

Ускоряющая система линейного ускорителя электронов состоит из инжектора, группирователя и ускорительных станций. Ток в импульсе может быть задан в широком диапазоне значений от 60 мА до практически нулевых значений. Частота следования импульсов задается в диапазоне от 1 до 25 Гц [1]. После проведения пуско-наладочных работ все станции будут работать в интересах разнообразных пользовательских исследований. Станция №1 до 25 МэВ и станция №2 до 60 МэВ, будут использоваться для проведения широкого спектра радиобиологических и прикладных исследований.

Измерительный стенд для проведения физико-дозиметрических, радиобиологических и прикладных исследований состоит из следующих основных систем:

- Система юстировки пучка по оси стенда с использованием лазерной центрации;
- Система формирования пучка;
- Система мониторинга и контроля пучка;
- Система измерения профилей пучка;
- Система дозиметрии;
- Система отпуска дозы при облучении образцов;
- Оборудование пользовательской пультовой комнаты, обеспечивающее дистанционное наблюдение и управление оборудованием стенда.

Дозиметрические измерения:

Измерения пространственного дозного распределения электронного пучка с энергией 20 МэВ на выходе из вакуумного канала проводились радиохромными пленками ЕВТЗ в фантоме с пластинами РММА размерами 8х8 см² и толщиной по 1 см (10 шт.). РММА фантом с радиохромными пленками ЕВТЗ был установлен на выходе пучка из вакуумного канала. В результате измерений были получены глубинное дозное распределение пучка и поперечные профили пучка на различных глубинах.

Дозиметрические измерения проводились с использованием PTW Unidos E и ионизационной камеры типа Farmer 0,6 см³, в измерениях применялись и другие ионизационные камеры [2]. Для дозиметрических исследований также использовался дозиметр ДДС-2К с алмазным детектором. Проводились измерения поперечного распределения электронного пучка с использованием комбинированного рассеивателя (РММА 1мм + Al 0,1 мм) для достижения на расстоянии 1,5 метра от выхода пучка равномерного поля в пределах 10х10 см². Были разработаны и созданы электронные блоки: ток-частота, счетчик импульсов, удаленное управление оборудованием и др. для дозиметрических и радиобиологических исследований на измерительном стенде.

Планируемые радиобиологические исследования:

- Проведение исследований, предполагающих облучение культуры клеток с крайне высокой мощностью дозы (флэш-режим: мощность дозы 70-100 Гр/сек).
- Исследование относительной биологической эффективности электронов на пучке линейного ускорителя.
- Эксперименты по исследованию фармакологической коррекции нейробиологических эффектов, вызванных облучением электронами, на лабораторных животных.
- Стерилизация биоразлагаемых гидрогелей.
- Многие другие исследования.

Список литературы

1. Trifonov A., Brukva A., Gostkin M., Demin D., Kobets V., Nozdrin M., Shabratov V., Shirkov G., Yunenko K., Zhemchugov A., Zhuravlyov P. // Proceed. of Science. 2022 V.414 P. 1094 DOI: 10.22323/1.414.1094.
2. Molokanov A.G, Shvidkiy S.V, I. Khassenova, Grania C. Detectors for measurements at heavy charged particles beams for radiation therapy. New Trends in Nuclear Physics Detectors, Book of Abstracts, p 14, 2021, Warsaw, Poland.

РАДИАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС НАУЧНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ «ОИЭЯИ-СОСНЫ»

Поволанский Э.И., Кузьмин А.В., Сальникова И.А., Давлетбаев В.П., Макарова О.А.

Государственное научное учреждение «Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны»
Национальной академии наук Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

В Республике Беларусь исследования в области радиационных технологий начаты в 70-х годах прошлого столетия после введения в эксплуатацию в 1969 году полупромышленной гамма-установки с кобальтовыми источниками «УГУ-420» в ИЯЭ АН БССР. В 1994 году в научном учреждении ОИЭЯИ-Сосны введен в эксплуатацию ускоритель электронов «УЭЛВ-10-10» (производства АО «НПП «Торий», г. Москва).

В Институте проводились различные работы по радиационной обработке продукции. Основная направленность их связана с радиационно-химическими технологиями (задачи по изменению структуры и свойств мономерных и полимерных материалов, эластомеров и др.); радиационно-биологическими технологиями (уничтожение вредных для безопасности человека микроорганизмов и вредителей – стерилизация медицинских изделий, лекарственных препаратов и др.). Именно под эти технологии первоначально и создавался радиационно-технологический комплекс.

Первые работы – это модификация древесины, изготовление бетонполимерных плит с фактурой естественного камня, получение радиационно сшитого пенополиэтилена.

Разработаны технологии изготовления и внедрены в производство: радиационностойкий антифрикционный материал «Грапол»; медицинский перевязочный материал (влажные антисептические повязки); полиэлектrolитный гидрогель сельскохозяйственного назначения «Гисинар-М»; парентеральная и пероральная лекарственная форма противотуберкулезного препарата «ПАСК»; радиационный способ обработки пищевых продуктов (яичный порошок, лактоза, специи, желатин, мясо птицы).

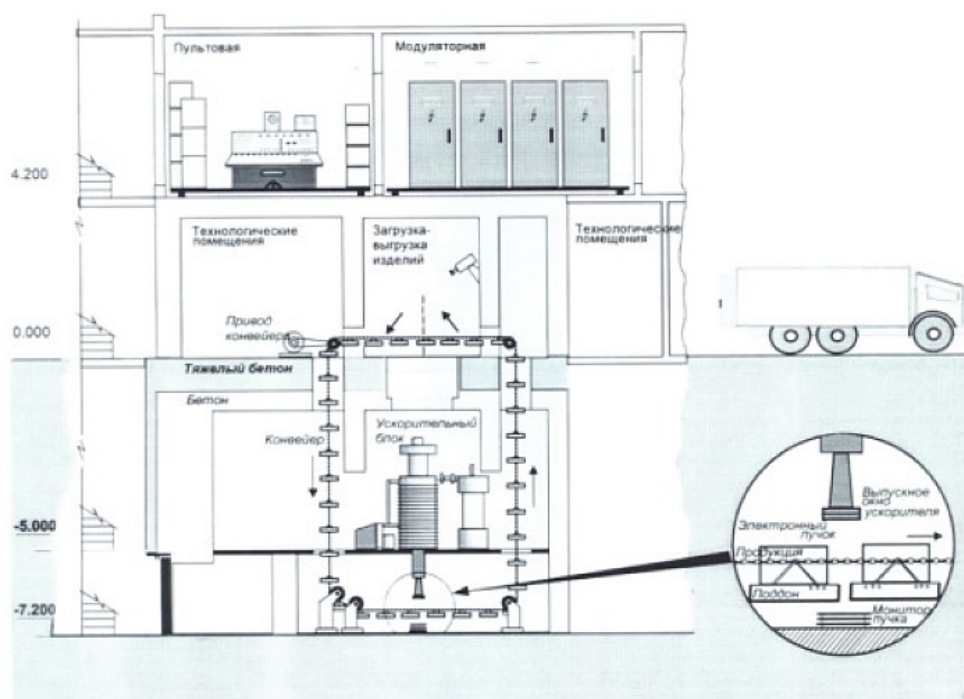
В настоящее время на базе радиационно-технологического комплекса, состоящего из гамма-установки «УГУ-420» и ускорителя электронов «УЭЛВ-10-10» функционирует отраслевая лаборатория радиационных технологий. В лаборатории проводятся фундаментальные научные исследования по взаимодействию мощных пучков электронов и жесткого тормозного излучения с веществом; исследования в области радиационной химии и биологии, радиационного материаловедения, дозиметрии больших доз, исследования радиационной стойкости материалов и изделий, разработка радиационных технологий получения новых материалов и материалов с новыми свойствами, разработка радиационно-технологических процессов и внедрение их в различных отраслях хозяйства Республики Беларусь.

На установках комплекса разрабатываются технологии по радиационной стерилизации и обработке изделий, материалов и сырья различного назначения, модификации полимерных материалов.

Технические характеристики линейного ускорителя электронов «УЭЛВ-10-10»:

- номинальная энергия – 10 МэВ;
- номинальная мощность пучка – 10 кВт;
- номинальный средний ток пучка – 1 мА;
- диапазон регулирования энергии электронов – 6-10 МэВ.

Электронный ускоритель оборудован конвейерно-транспортной системой в виде двух замкнутых цепей, расположенных вертикально. Между цепями подвешиваются поддоны из алюминия для размещения продукции, которая проходит под пучком. Размер поддона: по ширине 70 см, по длине – 45 см. Ширина поддона соответствует длине развертки электронного пучка при его сканировании.



Ускоритель электронов «УЭЛВ-10-10»

Радиационные технологии, предлагаемые радиационно-технологическим комплексом научного учреждения «ОИЭЯИ-Сосны» способствуют повышению качества производимой в Республике Беларусь продукции – получению новых важных потребительских свойств, значительному снижению потерь продукции при хранении и производстве, улучшению условий её реализации, укреплению безопасности жизни людей и улучшению экологической обстановки.

ПРОЕКТ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ РАДИАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ ЦИКЛОТРОНА ДЦ140: ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ И СТАТУС РЕАЛИЗАЦИИ

Комаров П.А., Митрофанов С.В.

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

В настоящее время в Лаборатории ядерных реакций Объединённого института ядерных исследований ведётся масштабная работа по развитию ускорительного комплекса и экспериментальных установок в рамках программы DRIBs III [1]. Одним из ключевых объектов этой программы является реализация проекта циклотрона ДЦ-140, основной задачей которого является удовлетворение растущих комплексных и прикладных задач лаборатории.

Проектируемая АСРК для циклотронного комплекса ДЦ-140 создаётся как принципиально новая система. Её основная задача – обеспечение мониторинга радиационной обстановки в зонах размещения циклотронного комплекса ДЦ-140, его экспериментальных установок, а также в прилегающих помещениях, автоматизации контроля за установленными режимами работы установки и ограничения доступа персонала в контролируемые помещения. Вместе с тем данная система реализуется как подсистема уже существующей инфраструктуры АСРК здания 101[2], и в соответствии с этим, создается с учетом требований по унификации и интеграции с действующими решениями.

В докладе рассматриваются общая архитектура системы, представлено дозиметрическое оборудование, используемое в системе, описана структура сбора и обработки данных. Рассматриваются принципы модульности, масштабируемости и интеграции с существующими решениями, ранее реализованными для ускорителей У400М и ДЦ-280. Представлены аспекты

взаимодействия с другими сопряжёнными автоматизированными системами ускорительного комплекса, такими как АСУ и СБиС ДЦ-140. Доклад отражает текущий статус проекта и запланированные этапы его реализации.

Список литературы

1. Проблемно-тематический план научно-исследовательских работ и международного сотрудничества Объединённого института ядерных исследований на 2024 год. Тема № 03-5-1129-2017/2028 «Развитие ускорительного комплекса и экспериментальных установок ЛЯР (DRIBs-III)». – Дубна: ОИЯИ, 2023.
2. Automated Radiation Monitoring System (ARMS) and Interlock and Signalization System (ISS) of the Cyclotron U400M / P.A. Komarov, S.V. Mitrofanov, V.Yu. Shegolev // Материалы конференции RuPAC-2023, 11–15 сентября 2023 г. – Новосибирск, 2023. – С. 130–132.

ПРОЕКТ СИСТЕМЫ БЛОКИРОВКИ И СИГНАЛИЗАЦИИ ЦИКЛОТРОНА ДЦ140: ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ И СТАТУС РЕАЛИЗАЦИИ

Комаров П.А., Митрофанов С.В.

Объединённый институт ядерных исследований, Дубна, Россия

В настоящее время в Лаборатории ядерных реакций Объединённого института ядерных исследований реализуется проект создания циклотронного комплекса ДЦ-140, призванного удовлетворить растущие потребности лаборатории в решении комплексных и прикладных задач. Данный ускоритель разрабатывается в рамках обширной программы по развитию и модернизации ускорительного комплекса, систем ускорителей и экспериментальных установок, реализуемой в ЛЯР [1].

Система блокировок и сигнализаций (СБиС) циклотронного комплекса ДЦ-140 предназначена для обеспечения безопасной эксплуатации ускорителя и контроля доступа персонала в контролируемые помещения. СБиС осуществляет мониторинг состояния дверей и их замков, контроль положения ключей в сборной панели хранения, а также фиксацию выполнения процедуры осмотра помещений перед запуском ускорения. Система контролирует состояние кнопок аварийного отключения и следит за установленными режимами работы ускорителя. Кроме того, она обеспечивает световую и звуковую сигнализацию, информирующую персонал о текущем режиме работы ускорителя, и формирует управляющие сигналы для сопряжённых систем.

В докладе рассматриваются общая архитектура СБиС циклотронного комплекса ДЦ-140 и основные задачи, поставленные перед ней. Представлены режимы работы установки с отображением организуемых зон. Описывается схема реализации системы, включая выбор аппаратной платформы, используемых контроллеров и коммуникационных модулей, а также принципы хранения и отображения данных. Рассматриваются проектные решения по обеспечению надёжности и интеграции с другими автоматизированными системами комплекса. Доклад отражает текущий статус разработки и ключевые направления дальнейшей работы.

Список литературы

1. Проблемно-тематический план научно-исследовательских работ и международного сотрудничества Объединённого института ядерных исследований на 2024 год. Тема № 03-5-1129-2017/2028 «Развитие ускорительного комплекса и экспериментальных установок ЛЯР (DRIBs-III)». – Дубна: ОИЯИ, 2023.

УСТАНОВКА ГЕЗА-1М ДЛЯ ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ МОДИФИКАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Щеголихин Н.П., Ковалев В.Г., Павлов Е.П., Ткаченко К.И.

АО «НИИЭФА», Санкт-Петербург, Россия

Большое количество выполненных исследований с конструкционными материалами, применяемыми в различных областях техники и промышленности, показало, что наиболее перспективным средством улучшения эксплуатационных характеристик этих материалов (коррозионной стойкости, износостойкости, микротвердости и т.п.) может быть использование сильноточных импульсных электронных пучков (СИЭП).

В докладе представлено описание электронно-пучковой установки (ускорителя электронов) для практической реализации процесса модификации поверхности материалов СИЭП с параметрами:

- | | |
|--------------------------------------|---------------------------|
| • регулируемая энергия электронов | 100 - 120 кэВ |
| • регулируемая длительность импульса | 10 - 60 мкс |
| • плотность энергии пучка в импульсе | 15-100 Дж/см ² |
| • режим работы | одиночные импульсы |
| • частота следования импульсов | до 0,033 Гц |
| • диаметр пучка | до 150 мм |

Внешний вид установки представлен на рисунке ниже.



Внешний вид установки ГЕЗА-1М

Источником высоковольтного питания установки является генератор Маркса на формирующих линиях с корректирующими RC-ячейками. Количество ступеней – 4, каждая из которых состоит из пяти LC-ячеек (высоковольтный конденсатор типа КПИ-100кВ-1,2мкФ и индуктивность 70 мкГн в четырех ячейках и 125 мкГн в пятой) и корректирующей RC-ячейки (высоковольтный конденсатор типа КПИ-100кВ-0,4мкФ и резистор 12 Ом). Для коммутации используются газовые разрядники РГУ-1-75-100 (азот или воздух 0,5-0,7 ати).

В качестве источника электронов в установке использован многоострый катод с управляющим разрядом (МКУР), при этом 2 каскада ГИНа запитывают промежуток «сетка-катод», а разрядный промежуток запитывается от отдельного источника в виде формирующей линии из пяти ячеек.

В результате проведенного теплового расчета работы ГИНа установлено, что зарядные резисторы ТВО-60-10 кОм обеспечивают работу высоковольтного импульсного генератора с заданной частотой следования импульсов (0,033 Гц) и позволяют без их замены перейти, при необходимости, к работе с частотой следования импульсов, по крайней мере, в три раза большей.

Формирование электронного пучка происходит в сходящемся аксиально-симметричном магнитном поле, частично экранированном от катода. Магнитное поле и магнитная система установки удовлетворяют следующим требованиям:

1. Индукция магнитного поля на катоде имеет величину 50-100 Гс, достаточную для обеспечения формирования электронного пучка.
2. Распределение магнитного поля обеспечивает формирование электронного пучка с достаточно малым угловым разбросом и транспортировку пучка без потерь электронов в канале транспортировки.
3. Магнитная система обеспечивает возможность изменения диаметра пучка на мишени от 150 до 80 мм при изменении пробочных отношений $\gamma = V_t/V_c$ от 10 до 20.

В настоящее время установка используется для формирования гомогенных поверхностных слоёв B_4C/W на внутрикамерных компонентах ИТЭР по следующему процессу:

- нанесение покрытия B_4C на W плитки,
- переплавление покрытия B_4C и поверхностного слоя вольфрама с улучшением функциональных характеристик B_4C (пористость) и связыванием интерфейса B_4C/W в модифицированную гомогенную систему B_4C+W мощным импульсным электронным пучком.

После обработки образца с 30 мкм покрытием B_4C электронным пучком с плотностью энергии 100 Дж/см² образуется модифицированный слой толщиной

10-15 мкм. По данным элементного анализа видно, что на поверхности присутствуют участки темного цвета с высоким содержанием углерода, что свидетельствует о переплаве предварительно нанесенного покрытия B_4C .

СТАТУС СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО МЕДИЦИНСКОГО ЦИКЛОТРОНА МСЦ-230

*Яковенко С.Л.¹, Агапов А.В.¹, Весенков В.А.¹, Власов А.И.¹, Гавриш Ю.Н.², Герасимов В.А.¹, Гурский С.В.¹,
Карамышев О.В.¹, Карамышева Г.А.¹, Киричков Н.В.¹, Киян И.Н.¹, Ляпин И.Д.¹, Малинин В.А.¹,
Мицын Г.В.¹, Мудролюбов В.Г.², Никифоров Д.Н.¹, Осина Ю.К.², Петров М.В.¹, Попов Д.В.¹, Рыбаков Н.А.¹,
Синица А.А.¹, Смирнов К.Е.², Станкус А.С.¹, Трубников Г.В.¹, Ширков Г.Д.¹, Федоренко С.Б.¹*

¹Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

²АО «НИИЭФА», Санкт-Петербург, Россия

Продолжаются работы по созданию медицинского сверхпроводящего циклотрона МСЦ-230 [1]. Завершается техническое проектирование систем циклотрона. Основные узлы и оборудование МСЦ-230 находятся в производстве. Ведется подготовка инфраструктуры к проведению пусконаладочных работ.

В докладе дана информация о ходе выполнения работ по созданию МСЦ-230, подготовке инфраструктуры для испытания отдельных систем циклотрона и проведения пуско-наладочных работ. Представлен эскизный проект канала транспортировки протонного пучка к процедурной кабине.

Список литературы

1. А.В. Агапов и др., Медицинский сверхпроводящий циклотрон МСЦ-230. Статус проекта, Материалы XXVIII Российской конференции по ускорителям заряженных частиц (RuPAC'23), с. 4-8, 2023.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ УСКОРИТЕЛИ ЛАБОРАТОРИИ ЭЛЕКТРОННЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ МГУ

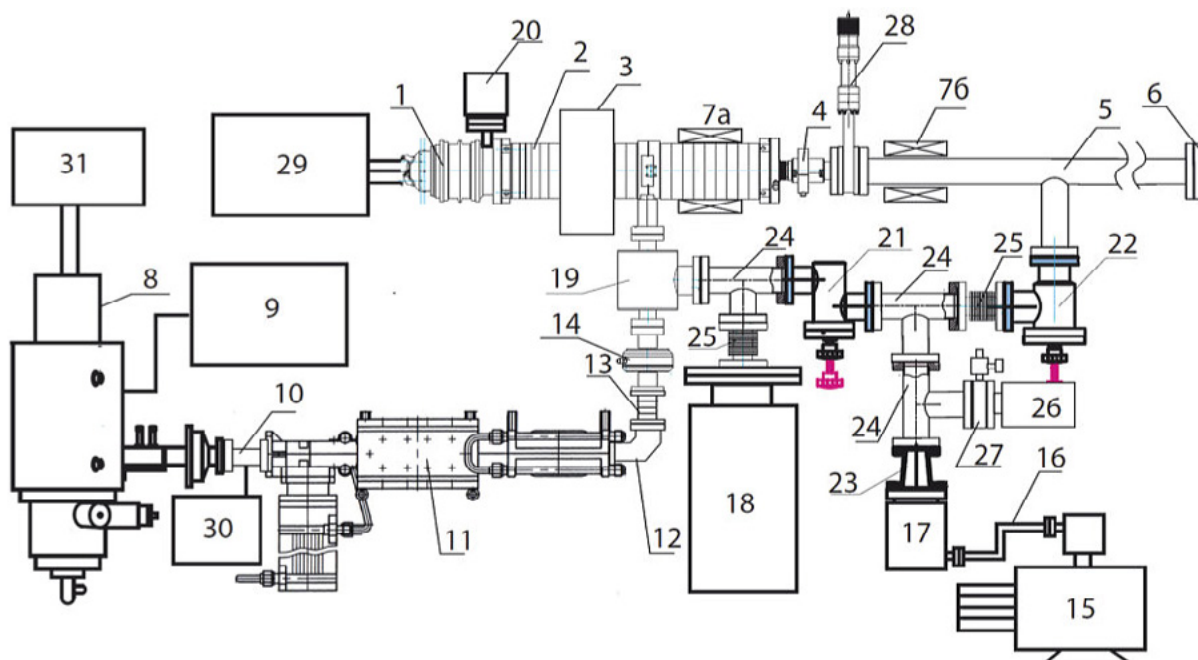
*Ханкин В.В.^{1,2}, Бельшиев С.С.^{2,3}, Бобылев Д.Е.^{1,2}, Бушин М.П.^{1,2}, Ермаков А.Н.^{1,2},
Каманин А.Н.^{1,2}, Шведунов В.И.^{1,2}, Шведунов И.В.^{1,2}, Шведунов Н.В.^{1,2}, Юров Д.С.^{1,2}*

¹НИИЯФ имени Д.В. Скобелева МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²ООО «Лаборатория электронных ускорителей МГУ», Москва, Россия

³Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

В ООО «Лаборатория электронных ускорителей МГУ» разработан новый линейный ускоритель электронов с энергией, варьируемой в диапазоне 4-6 МэВ, и импульсным током до 700 мА. Диапазон регулирования параметров излучения и возможности системы контроля и управления позволяют использовать ускоритель в различных технологических процессах. Корпус излучателя имеет не большие габаритные размеры – 650x158x2590 мм. Возможен как вывод электронного пучка в атмосферу через охлаждаемое титановое окно, так и установка охлаждаемой тормозной мишени. На рисунке показана схема излучателя с выводом электронного пучка в атмосферу. В докладе представлен обзор и результаты измерений параметров пучка ускорителя. Измерения энергетических параметров пучка проведены с использованием нескольких различных методик.



Состав излучателя: электронная пушка (1), ускоряющая структура (2), соленоид (3), датчик тока (4); электропровод (5), выходное окно (6), корректоры (7), клистрон (8), СВЧ система низкого уровня мощности (9), волноводный тракт (10, 12 - 14), циркулятор (11), вакуумная система (15 - 28), система высоковольтного питания пушки (29); система подачи элегаза (30); блок накала клистрона (31)

ПРОЕКТ ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ НА ЭНЕРГИЮ 5 МэВ И МОЩНОСТЬ ПУЧКА 200 кВт

Юров Д.С.^{1,2}, Будник С.В.³, Симонов А.С.², Шведунув В.И.^{1,2}, Шведунув Н.В.^{1,2}

¹НИИЯФ им. Д.В. Скобелевича МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²ООО «Лаборатория электронных ускорителей МГУ», Москва, Россия

³ООО «Теокортес», Москва, Россия

Радиационная модификация полимеров зачастую требует больших величин поглощенной дозы, около 100 кГр по порядку величины. При толщине облучаемой продукции до 8 г/см² для обеспечения высокой производительности возможно и предпочтительно использование электронного пучка с энергией до 10 МэВ с двусторонним облучением. При больших толщинах продукции необходимо применение тормозного излучения, которое имеет низкую конверсию (до 10%) при граничной энергии электронов до 5 МэВ. Таким образом, высокая производительность процесса облучения тормозным излучением требует мощности пучка в сотни киловатт, что на данный момент в вышеуказанном диапазоне энергий серийно обеспечивается ускорителями Rhodotron [1]. Ускоренный пучок с энергией до 10 МэВ с мощностью до 100 кВт может быть получен на ускорителе ИЛУ-14 [2].

На основании опыта разработки ускорителей электронов непрерывного действия [3-5] в НИИЯФ МГУ и ООО «ЛЭУ МГУ» нами был разработан проект ускорителя на энергию 5 МэВ и мощность пучка 200 кВт для центра радиационной модификации полимеров от ООО «Теокортес» [6].

Упрощенная схема ускорителя показана на рисунке ниже, где элементы обозначены следующим образом: 1 – электронная пушка, 2а, 2б – ускоряющие структуры, 3 – клистроны, 4 – источники питания клистронов производства ООО «НПП ЛМ Инвертор», 5 – источник питания электронной пушки от того же производителя, 6 – узлы откачки на выходах ускоряющих структур, 7 – ферритовые вентили производства ООО «НПП «Феррит», 8 – соленоиды для фокусировки пучка, 9 – магниторазрядные насосы, 10 – стойки системы управления, 11 – 2700 поворотный магнит, 12 – сканирующий магнит, 13 – корректирующий магнит, 14 – тормозная мишень, 15 – камера развертки. Из магнитооптических элементов на рисунке не показаны корректоры пучка и квадрупольные линзы.

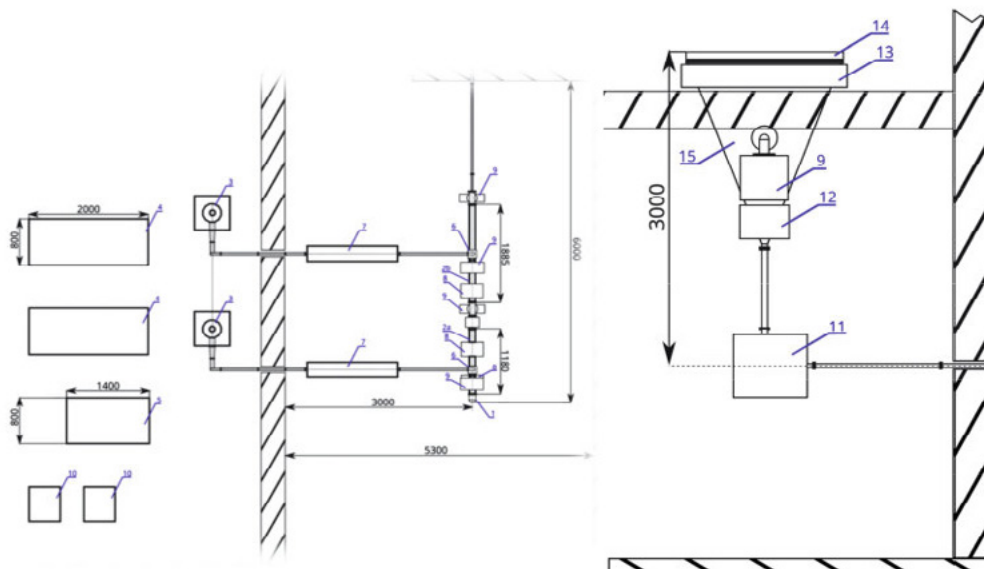


Схема ускорителя: Слева – часть до поворота пучка (вид сверху),
справа – участок с поворотным 2700 магнитом и камерой развертки (вид сбоку)

Для ускорения пучка предполагается использовать две секции бипериодической ускоряющей структуры с внутренними ячейками связи, работающие на $\pi/2$ моде на частоте 2450 МГц. Первая секция с переменной длиной ячеек обеспечивает группирование пучка и ускорение от энергии от

15 кэВ до 2 МэВ, вторая, секция с постоянной длиной ячеек ускоряет пучок от 2 МэВ до 5 МэВ. Расчетная мощность СВЧ потерь в стенках составляет 52 кВт и 62 кВт для первой и второй секций, соответственно. Для питания секций будут использованы клистроны КУ-2.45-200 производства АО «НПП «Исток» им. Шокина» с выходной непрерывной мощностью 200 кВт и катодным напряжением -40 кВ. Суммарное энергопотребление ускорителя без учета системы охлаждения должно составлять около 700 кВт при мощности пучка на мишени 200 кВт.

На данный момент проведены расчеты всех основных элементов тракта пучка: электронной пушки, ускоряющих структур, 2700 поворотного магнита, ведется технологическая проработка конструкторской документации.

Список литературы

1. Jacques Pottier, A new type of RF electron accelerator: the Rhodotron, Nucl. Instrum. Methods B40/41, 92 (1992).
2. A.A. Bryazgin, V.I. Bezuglov, E.N. Kokin, et al, ILU14 Industrial Electron Linear Accelerator with a Modular Structure, Instruments and Experimental Techniques, 2011, Vol. 54, No. 3, pp. 295–311.
3. Alimov A.S., Ermakov D.I., Ishkhanov B.S., Shvedunov V.I. et al. // Instruments and Experimental Techniques, Vol. 45, No. 5, 2002, pp. 691–697.
4. Yurov D.S., Alimov A.S., Ishkhanov B.S., Pakhomov N.I. et al. Industrial prototype of compact CW linac. Proceedings of RuPAC'2014, Obninsk, Russia, 2014, p. 248.
5. D.S. Yurov, A. S. Alimov, B. S. Ishkhanov, and V. I. Shvedunov, Continuous-wave electron linear accelerators for industrial applications, Phys. Rev. Accel. Beams 20, 044702 – Published 26 April, 2017, DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevAccelBeams.20.044702>.
6. <https://teocortex.com>.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ОСНОВНЫХ СИСТЕМ ЦИКЛОТРОННОГО КОМПЛЕКСА СС-18П

*Осина Ю.К., Воробьев К.С., Галчук А.В., Горбунов И.В., Клопенков М.Л.,
Мудролюбов В.Г., Смирнов К.Е., Стогов Ю.И.*
АО «НИИЭФА», Санкт-Петербург, Россия

В АО «НИИЭФА» ведутся работы по созданию нового циклотронного комплекса СС-18П, включающего в свой состав максимально простой по конструкции и обслуживанию, оптимизированный по стоимости комплектующих изделий и трудоёмкости изготовления циклотрон СС-18П с конечной энергией 18 МэВ и проектным током выводимого пучка протонов 150 мкА.

Применение внутреннего источника ионов Н- позволило существенно упростить конструкцию циклотрона СС-18П и уменьшить его стоимость.

Электромагнит циклотрона имеет четырехсекторную структуру. Изохронная топология магнитного поля формируется за счет доработки по высоте вкладышей, размещенных в радиальных пазах секторов. Исходная форма вкладышей – наружная поверхность – совпадает с поверхностью секторов.

Баки и штоки резонансной системы размещены в верхних сквозных отверстиях двух долин. Рабочая частота системы – 40,68 МГц, амплитуда ускоряющего напряжения 35 – 40 кВ.

Корпус вакуумной камеры выполнен обрамляющим полюса. Материал корпуса – алюминиевый сплав – обеспечит поглощение частиц, выпавших из режима ускорения за счёт обдирки на молекулах остаточного газа, без нейтронного излучения.

Для выпуска пучка предусмотрены четыре обдирочных устройства с тонкими углеродными фольгами. Полученные пучки протонов выпускаются из циклотрона через патрубки вакуумной камеры.

Циклотронный комплекс СС-18П может быть оснащен четырьмя ближними мишенными устройствами для облучения газовых или жидкостных мишеней или тремя ближними мишенными устройствами и коротким трактом транспортировки с устройствами формирования пучка, деградатором и мишенной станцией для облучения твердотельных мишеней.

Основные параметры и характеристики циклотронного комплекса представлены в таблице.

Основные параметры и характеристики циклотронного комплекса СС-18П

Наименование параметра, характеристики	Значение
Тип ускоряемых/выпущенных ионов	H/H ⁺
Энергия протонного пучка, МэВ	18
Проектный ток выводимого пучка, мкА	150
Тип магнитопровода	броневой
Диаметр / высота магнита, мм	2000 /1130
Масса активной стали / меди, кг	19950 / 2022
Мощность обмотки, кВт	11,5
Вывод пучка	четыре обдирочных устройства
Тракт транспортировки	опция
Мишенный комплекс с газовыми и жидкостными мишенями	наличие
Мишенный комплекс с твердотельными мишенями	опция

КОНСТРУКТИВНЫЕ СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ТОКА ВЫВЕДЕННОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА В УСКОРИТЕЛЯХ НА ОСНОВЕ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА

Михайлов В.М., Иванов А.Г., Карпов Д. А., Косоголов С.Л., Успенский Н.А.

АО «НИИЭФА», Санкт-Петербург, Россия

В ускорителях на основе высоковольтного тлеющего разряда (ВТР) одним из ключевых параметров является плотность тока выведенного электронного пучка. Здесь будут рассмотрены различные конструктивные подходы для его повышения [1,2].

Для ионизации рабочего газа в дрейфовом объеме ускорителя ВТР, помимо традиционного тонкопроволочного электрода [3], применён планарный магнетрон. Экспериментально получены вольтамперные характеристики тлеющего разряда магнетрона с катодом из титана. Установлено, что разряд может работать в аномально-тлеющем или дуговом режиме; последний нежелателен из-за локализации разряда и неравномерной ионизации.

Проведены испытания двух конфигураций совместной работы планарного магнетрона и тонкопроволочного электрода. Измерения показали, что распределение плотности тока по сечению ускоренного пучка остаётся неравномерным, особенно при удалении от магнетрона. Вольтамперные

характеристики магнетрона слабо зависят от давления газа и тока тонкопроволочного разряда, что свидетельствует о стабильности вспомогательного разряда.

Разработан и испытан второй планарный магнетрон с увеличенным зазором между анодом и катодом и закруглёнными углами для предотвращения дугового режима. Установка двух магнетронов напротив друг друга позволила исследовать влияние на параметры электронного пучка. При их работе достигнуты значения тока пучка от 3,6 мА до 10 мА, что соответствует плотности тока 10–30 мкА/см². Отмечена высокая неоднородность распределения тока по сечению пучка.

Была реализована схема с двумя магнетронами и двумя тонкопроволочными электродами. Подача напряжения на проволочные электроды приводит к формированию дополнительного орбитронного разряда и выравниванию концентрации плазмы вдоль оси ускорителя. Регулировка тока проволочных электродов позволяет повысить однородность распределения плотности тока по сечению пучка. В импульсном режиме работы ускорителя достигается увеличение плотности тока пучка без перегрева выводной фольги [4].

Была проведена замена магнетронов на термоэммиттеры, расположенных так же, как и магнетроны. Ток эмиссии электронов от термоэммиттеров, производил ионизацию остаточного газа, действуя аналогично магнетронам в предыдущей конструкции ускорителя. Отличие заключалось в том, что полученная в результате плазма имела более высокую концентрацию свободных электронов, чем в конструкции с магнетронами [5].

Максимальный полученный ток пучка при использовании термоэммиттеров составил 55 мА и был ограничен возможностями модулятора импульсного напряжения, в то время как максимальный ток при магнетронах составлял 17,7 мА и был ограничен возникающими неустойчивостями в разряде.

Была модифицирована конструкция крепления термоэммиттеров: реализовано последовательное включение и компенсация магнитных полей. Термоэммиттеры, установленные ближе к зоне горения разряда и с отрицательным смещением, способствуют поддержанию вспомогательного разряда и увеличению тока пучка.

Использование планарных магнетронов и их комбинаций с тонкопроволочными электродами позволяет существенно влиять на параметры и однородность электронного пучка. Импульсный режим работы ускорителя способствует увеличению плотности тока без риска перегрева конструктивных элементов. Модификация конструкции термоэммиттеров ускорителя открывает дополнительные возможности для повышения эффективности генерации электронного пучка.

Список литературы

1. Аброян М.А., Косоголов С.Л., Мотовилов С.А., Туманов И.А., Шведюк В.Я. Разработка и исследование генератора озона на основе несамостоятельного разряда и пути повышения его эффективности // В кн. “Развитие и совершенствование способов и средств очистки и обеззараживания питьевых и сточных вод”. Вологда: Полиграфист, 2003. С. 65–70.
2. Аброян М.А., Успенский Н.А., Федяков В.П. // ПТЭ. 1984. № 4. С. 24.
3. Федяков В.П. Тлеющий разряд орбитронного типа. Препринт НИИЭФА: П-К-0781, 1988. М.: ЦНИИатоминформ, 1988.
4. А.Г. Иванов, Д.А. Карпов, С.Л. Косоголов, Н.А. Успенский Широкоапертурный ускоритель электронов на основе высоковольтного тлеющего разряда с генерацией плазмы планарными магнетронами // Труды VII Международного Крейнделевского семинара «Плазменная эмиссионная электроника» (Республика Бурятия 31 июля – 06 августа 2023 года). Улан-Удэ. Изд-во Бурятского научного центра СО РАН, 2023. С. 101-106
5. Баранов Г.А., Бодакин Л.В., Гурашвили В.А., Джигайло И.Д., Комаров О.В., Косоголов С.Л., Кузьмин В.Н., Сень В.И., Ткаченко Д.Ю., Успенский Н.А., Шведюк В.Я. // ПТЭ. 2013. № 1. С. 81. <https://doi.org/10.7868/S0032816213010047>.

СИСТЕМЫ ВЫПУСКА ПУЧКА ДЛЯ ИМПУЛЬСНЫХ ЛИНЕЙНЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОНОВ

*Штарклев Е.А., Безуглов В.В., Брызгин А.А., Воронин Л.А., Коробейников М.В.,
Пак А.В., Сидоров А.В., Ткаченко В.О.*

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

В данной работе представлены расчеты систем выпуска и поворота электронного пучка, разработанных для импульсных линейных ускорителей электронов серии ИЛУ за последние годы. В частности, описана система сканирования пучка, отличительной особенностью которой от предыдущих аналогов является введение коррекции формы сканирующего магнитного поля. Приведены результаты испытаний данной системы на ускорителе ИЛУ-10 для энергии ускоренного электронного пучка 5 МэВ при ширине сканирования пучка 80 см.

Далее описывается система выпуска пучка для ускорителя ИЛУ-14, рассчитанного на энергию ускоренных электронов до 10 МэВ при выходной мощности пучка до 100 кВт. В данной системе дополнительно предусмотрена фокусировка пучка и коррекция его оси в двух плоскостях после выхода из ускоряющей структуры, а также разработано выпускное устройство, позволяющее увеличить ширину сканирования пучка до 160 см.

Также в работе описана система для поворота немонахроматичных электронных пучков, состоящая из двух магнитных зеркал. Данная система поворотных магнитов позволяет компенсировать угловые расходимости пучка на входе в магнит и получать после поворота электронный пучок с фазовыми характеристиками близкими к начальным. Приведены экспериментальные данные поворота немонахроматичного электронного пучка на 180°.

ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ ОБРАБОТКА ПОТПОТРЕБИТЕЛЬСКИХ ПОЛИМЕРОВ

Пономарев А.В.

ФГБУН ИФХЭ РАН, Москва, Россия

Полимеры широко используются в повседневной жизни в качестве конструкционных, отделочных и упаковочных материалов. Низкая стоимость, малый удельный вес, простота получения, легкость механической обработки и долговечность способствуют их популярности и дальнейшему распространению. Однако обратной стороной этих достоинств стало накопление огромного количества трудно-перерабатываемых отходов, устойчивых к природным воздействиям.

Полимерные отходы часто представляют собой неразделимые или трудно-разделяемые композиции, представляющие особую сложность для повторного использования. Сжигание и захоронение полимеров на свалках равносильно безвозвратным потерям энергии и сырья, затраченных на их первичное получение. Соответственно, поиск новых путей использования отработавших полимеров выглядит намного более рациональным экономическим и экологическим решением.

В этой связи возрастает внимание к радиационным технологиям. Применение электронного излучения в переработке полимерных отходов расширяет возможности для охраны окружающей среды, восполнения ресурсов и создания инновационных материалов. В частности, радиолитические методы незаменимы для безопасного инкапсулирования огромного объема полимерных отходов в строительные материалы типа бетона, асфальта, отделочных покрытий и т. д., обеспечивая при этом улучшение свойств этих материалов и снижение эмиссии углеродсодержащих газов [1, 2].

Радиационно-окислительная и радиационно-термическая конверсия полимеров в химические вещества и топливо может стать разумной альтернативой их сжиганию. Высокая восприимчивость природных полимеров к сочетанию облучения и нагрева может быть использована для разработки экономичных методов производства мономеров (ароматических, фурановых, алкилкарбонильных и т. д.) из возобновляемых растительных отходов с целью повышения доступности новых полимеров и уменьшения потребности в мономерах нефтехимического происхождения. Способность радиолиза создавать в полимерах заряженные долгоживущие интермедиаты, а также различные окисленные

продукты, может быть использована для разработки новых методов ускоренной сортировки полимеров и обеспечения их расплавной совместимости. Несомненно, мощный потенциал радиационных технологий незаменим для переориентации мусорных полигонов в сырье для будущего.

Применение ускорителей позволяет разрабатывать и реализовывать технологии непрерывной переработки, в частности для рентабельного использования малыми и средними предприятиями. Дальнейшее развитие радиационной техники и повышение её доступности может способствовать быстрому сокращению разрыва между научным и промышленным развитием. В частности, целесообразно стимулировать разработку экономичных и мощных компактных ускорителей с высокой энергией, пригодных для использования при высоких температурах и в агрессивных средах. Пока радиационные методы мало используются при крупнотоннажной переработке полимерных отходов. Соответственно, необходимо не только создание новых эффективных технологий, но и их популяризация, в частности, с помощью демонстрационных установок.

Список литературы

1. Ponomarev A.V., High Energy Chem., 2020, V. 54, No. 3, P. 194-204.
2. Ponomarev A.V., et al., Radiat. Phys. Chem. 2022, V. 201, P. 110397.

ПРОЕКТ ПРОТОННОГО СИНХРОТРОНА ДЛЯ ТЕРАПИИ

Востриков В.А., Блинов М.Ф., Попов Д.М., Хлыстов Д.А.

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

В ИЯФ СО РАН разрабатывается проект синхротрона для протонной терапии рака с максимальной энергией протонов 250 МэВ. Синхротрон обеспечивает интенсивность $5 \cdot 10^{10}$ частиц в цикле, что достаточно как для пассивного метода формирования дозного поля, так и для активного сканирования.

Особое внимание уделяется организации медленного резонансного выпуска, как основного режима работы синхротрона. Также выбирались технологичные конструкции отдельных элементов синхротрона для упрощения наладки синхротрона и организации серийного производства, а также уменьшения стоимости его изготовления.

Синхротрон состоит из пяти триплетных ячеек с общим периметром 24 м. Каждая ячейка состоит из двух 36° диполей с максимальным полем 1.6 Т, и трех коротких и достаточно слабых квадруполов. Инжекция однооборотная, выпуск медленный на резонансе третьего порядка с поперечной ВЧ раскачкой.

ПРИМЕНЕНИЕ УСКОРИТЕЛЯ-ТАНДЕМА С ВАКУУМНОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ VITA ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СЕЧЕНИЙ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ

Бикчурин М.И.^{1,2}, Быков Т.А.^{1,2}, Касатов Д.А.^{1,2}, Колесников Я.А.^{1,2}, Кошкарёв А.М.^{1,2}, Остреинов Г.М.^{1,2}, Савинов С.С.^{1,2}, Соколова Е.О.^{1,2}, Шуклина А.А.^{1,2}, Таскаев С.Ю.^{1,2}

¹Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия,

²Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

Ускорительный источник нейтронов VITA на основе ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией и литиевой мишени предложен и создан в Институте ядерной физики СО РАН в Новосибирске, Россия. Ускоритель заряженных частиц генерирует моноэнергетичные пучки протонов/дейтронов постоянного тока с энергией до 2,3 МэВ и током до 10 мА. Ускорительный источник нейтронов оснащен современными γ -, α - и нейтронными спектрометрами и дозиметрами. Установку активно используют для разработки методики бор-нейтронзахватной терапии злокачественных опухолей [1], для радиационного тестирования перспективных материалов и оборудования и в последнее время для измерения сечений ядерных реакций [2-5].

В докладе будет дано описание установки, приведены ее характеристики, представлены результаты измерения сечений ядерных реакций взаимодействия протонов и дейтронов с литием

и бором, важных для бор-нейтронозахватной терапии и для безнейтронной термоядерной энергетики. Также в докладе будет приведено описание предложенной и применяемой методики измерения толщины материала, облучаемого пучком заряженных частиц для измерения сечения ядерной реакции, и приведено описание диагностического узла, позволяющего детально измерить углового распределения дифференциального сечения ядерной реакции, что позволит достоверно определить величину полного сечения реакции. Отдельное внимание в докладе будет уделено представлению планов по дальнейшему применению установки для изучения ряда других ядерных реакций, включая реакцию генерации мощного потока позитронов и реакции с пучком α -частиц.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-72-30005).

Список литературы

1. S. Taskaev, E. Berendeev, M. Bikchurina, T. Bykov, D. Kasatov, I. Kolesnikov, A. Koshkarev, A. Makarov, G. Ostreinov, V. Porosev, S. Savinov, I. Shchudlo, E. Sokolova, I. Sorokin, T. Sycheva, G. Verkhovod. Neutron Source Based on Vacuum Insulated Tandem Accelerator and Lithium Target. *Biology* 10 (2021) 350.
2. S. Taskaev, M. Bikchurina, T. Bykov, D. Kasatov, Ia. Kolesnikov, A. Makarov, G. Ostreinov, S. Savinov, E. Sokolova. Cross-section measurement for the ${}^7\text{Li}(p,\alpha){}^4\text{He}$ reaction at proton energies 0.6 - 2 MeV. *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research B* 525 (2022) 55-61.
3. S. Taskaev, M. Bikchurina, T. Bykov, D. Kasatov, Ia. Kolesnikov, G. Ostreinov, S. Savinov, E. Sokolova. Measurement of cross-section of the ${}^6\text{Li}(d,\alpha){}^4\text{He}$, ${}^6\text{Li}(d,p){}^7\text{Li}$, ${}^6\text{Li}(d,p){}^7\text{Li}^*$, ${}^7\text{Li}(d,\alpha){}^5\text{He}$ and ${}^7\text{Li}(d,n\alpha){}^4\text{He}$ reactions at the deuteron energies from 0.3 MeV to 2.2 MeV. *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research B* 554 (2024) 165460.
4. S. Taskaev, V. Bessmeltsev, M. Bikchurina, T. Bykov, D. Kasatov, Ia. Kolesnikov, A. Nikolaev, E. Oks, G. Ostreinov, S. Savinov, A. Shuklina, E. Sokolova, G. Yushkov. Measurement of the ${}^{11}\text{B}(p,\alpha){}^8\text{Be}$ and the ${}^{11}\text{B}(p,\alpha){}^8\text{Be}^*$ reactions cross-sections at the proton energies up to 2.2 MeV. *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research B* 555 (2024) 165490.
5. S. Taskaev, V. Bessmeltsev, M. Bikchurina, T. Bykov, D. Kasatov, I. Kolesnikov, A. Nikolaev, E. Oks, G. Ostreinov, S. Savinov, A. Shuklina, E. Sokolova, G. Yushkov. Measurement of the ${}^{10}\text{B}(d,\alpha){}^8\text{Be}$, ${}^{10}\text{B}(d,\alpha){}^8\text{Be}^*$, ${}^{10}\text{B}(d,p){}^9\text{Be}^*$, ${}^{11}\text{B}(d,\alpha){}^9\text{Be}$, and ${}^{11}\text{B}(d,\alpha){}^9\text{Be}^*$ reactions cross-sections at the deuteron energies up to 2.2 MeV. *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, B* 557 (2024) 165527.

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ НЕЙТРОНОВ, ПОЛУЧАЕМЫХ НА МИШЕНЯХ УСКОРИТЕЛЕЙ ТЗЧ

Намаконов В.В.

ФГУП «РФЯЦ – ВНИИТФ имени академ. Е.И. Забабахина», г. Снежинск, Челябинская область, Россия

При создании центра радиационных испытаний в РФЯЦ-ВНИИТФ, актуальной задачей является измерение поля нейтронов с энергией до 250 МэВ. В работе представлены методы измерений спектральных характеристик высокоэнергетических нейтронов. На основании проведенного анализа определены методы и средства измерений, позволяющие измерить энергию нейтронов до 250 МэВ, а именно: двухпараметрический метод измерений и метод нейтронно-активационного анализа с использованием нейтронно-активационного детектора ${}^{209}\text{Bi}$ в реакциях от $(n, 3n)$ до $(n, 12n)$. Представлена постановка планируемых экспериментов на синхротроне СЦ-1000 с целью отработки методов и средств измерений для плановых экспериментов по измерению полей нейтронов в центре радиационных испытаний.

ОПЫТ СОЗДАНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ МОДЕРНИЗАЦИИ МОЩНОГО УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ НА ОСНОВЕ ТРЕХФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА-ВЫПРЯМИТЕЛЯ

Мачеча А.И., Муравьев Г.В., Павлухов Д.Е., Толстун Н.Г., Рыбин А.А., Варламова М.В.

АО «НИИЭФА», Санкт-Петербург, Россия

Для решения таких проблем, как промышленная обработка газовых выбросов тепловых электростанций, обработка сточных вод, конверсия газов и осуществления других энергоёмких процессов, требующих радиационно-химических преобразований, задача значительного повышения единичной мощности высоковольтных ускорителей электронов продолжает оставаться актуальной, и в настоящее время не решена.

Создание каскадов установок из нескольких ускорителей малой или средней мощности не решают проблему энергоёмких процессов, так как стоимость таких установок возрастает пропорционально количеству ускорителей. Следовательно, необходимы ускорители, имеющие высокую единичную мощность. Высоковольтные ускорители электронов на основе трехфазного трансформатора-выпрямителя с замкнутым магнитопроводом здесь имеют ряд преимуществ перед другими известными схемами в силу высокого коэффициента преобразования электроэнергии в энергию пучка ускоренных электронов и отсутствия ограничений на наращивание мощности.

В АО «НИИЭФА» была проведена большая работа по наладке и испытанию мощного ускорителя электронов «Электрон-23» на основе трехфазного трансформатора-выпрямителя с замкнутым магнитопроводом. В ускоритель изначально заложена возможность установки нескольких ускорительных трубок, что позволяет кратно повысить мощность ускорителя при необходимости. В конструкции ускорителя «Электрон-23» проверена на практике возможность регулирования ускоряющего напряжения от вольтодобавочного трансформатора. Такие трансформаторы широко представлены на мировом рынке под любую требуемую мощность ускорителя. При разработке ускорителя были приняты меры по снижению влияния магнитных полей рассеяния трансформатора-выпрямителя на ускоряемые электроны. Это позволило устанавливать ускорительную трубку рядом с высоковольтным генератором и таким образом существенно снизить общие габариты ускорителя. В конструкции ускорителя широко применены простые в изготовлении, недорогие и общедоступные материалы, например, вместо металлических – детали из пластика, покрытые токопроводящей эмалью, вместо шихтованного железа – ферритовые элементы в устройстве сканирования пучка электронов, производимые промышленностью и устойчивые к коррозии. Экспериментально подтверждена перспективность создания ускорителей электронов с большой единичной мощностью.

В докладе изложены предложения по модернизации ускорителя, после осуществления которых возможно преодоление рубежа в сотни киловатт единичной мощности в одном высоковольтном ускорителе электронов, что позволит решать многие назревшие проблемы в радиационно-химической отрасли.

КОМПАКТНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ ЭЛЕКТРОНОВ С ЛОКАЛЬНОЙ РАДИАЦИОННОЙ ЗАЩИТОЙ

*Мачеча А.И.¹, Муравьев Г.В.¹, Овчинников В.П.¹, Толстун Н.Г.¹, Рыбин А.А.¹, Желавский М.А.¹,
Мальшиева А.В.¹, Пономарёв А.В.²*

¹АО «НИИЭФА», Санкт-Петербург, Россия, ²ФГБУН ИФХЭ РАН, Москва, Россия

Радиационные технологии, т.е. обработка различных материалов и изделий электронным пучком с целью изменения их молекулярной структуры и придания им новых свойств, всегда считались одним из наиболее перспективных направлений практического использования высоковольтных ускорителей. Одним из направлений исследований АО «НИИЭФА» стало изучение возможности создания высоковольтного ускорителя с локальной радиационной защитой для производства облучения труб диаметром 16 мм и толщиной 2,2 мм на основе полиэтилена с целью внедрения в химическую промышленность технологии «сшивания» полимеров пучком электронов. В процессе создания такой установки инженерами АО «НИИЭФА» были изучены

свойства и проведено облучение более 800 полимерных композиций на основе полиэтилена, проведены расчёты и моделирование пространственного распределения дозы в поперечном сечении трубы, разработаны и испытаны макеты узлов для ускорителя электронов с локальной радиационной защитой.

Исследования показали, что для облучения трубы при необходимой по ГОСТ степени сшивки 60% при одностороннем облучении требуется энергия около 3 МэВ, двустороннем – энергия 1,56 МэВ, а при четырёхстороннем – около 0,9 МэВ. Толщина радиационной защиты возрастает пропорционально квадрату энергии пучка электронов, поэтому было принято решение разработать такую конструкцию ускорителя, которая позволила бы облучать обрабатываемое изделие с четырех или со всех сторон при энергии 800-900 кэВ.

За основу был выбрана схема ускорителя «Электрон-10» (750 кВ, 50 кВт), снабженного локальной радиационной защитой, которая обеспечивает двустороннее облучение рулонизируемых материалов. Установки с этим ускорителем работают на российских предприятиях в течение многих лет в трёхсменном режиме, то есть имеют уровень надёжности, соответствующий требованиям промышленности.

В ходе разработки в АО «НИИЭФА» были выполнены расчёты основных характеристик ускорителя, оптимизированы напряжённости полей высоковольтной структуры и индивидуальной радиационной защиты, разработана конструкция и выпущена технологическая документация для производства ускорителя на опытном заводе АО «НИИЭФА». Проведенная работа позволяет решить поставленную задачу и создать компактную технологическую установку с локальной радиационной защитой и минимальными весовыми характеристиками для использования в составе производственной линии.

РАЗРАБОТКА НОВОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ УСКОРИТЕЛЯМИ ЭЛЕКТРОНОВ ИЛУ-12 И ИЛУ-14

*Безуглов В.В., Брызгин А.А., Воронин Л.А., Коробейников М.В.,
Сидоров А.В., Ткаченко В.О., Штарклев Е.А.*

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

Доклад посвящен разработке новой системы управления высокочастотными многорезонаторными ускорителями электронов ИЛУ-12 и ИЛУ-14 [1], которые генерируют пучок электронов с энергией 7,5-10 МэВ и мощностью до 75-100 кВт. Ускоритель является главным элементом промышленного облучательного комплекса, осуществляющего обработку одноразовых медицинских изделий и пищевых продуктов. В докладе приводится описание новой системы управления ускорителями типа ИЛУ на базе универсального PLC (National Instruments CompactRio). Современные быстрые PLC на базе микропроцессоров в среде реального времени со встроенной матрицей FPGA позволяют создавать устройства такого типа с недостижимой ранее гибкостью настройки, точностью измерения параметров и расстановки управляющих импульсов системы управления ускорителем. Контроль такого устройства посредством промышленного компьютера из программы управления ускорительным комплексом в среде LabView 2021 и CVI 2013 совместимой с Windows 7\10\11 позволяет полностью автоматизировать систему управления ИЛУ. Также уделено внимание разработке дополнительных электронных и программных средств, позволивших расширить области применения мощных ускорителей электронов с энергией до 7.5-10 МэВ в промышленности [2].

Список литературы

1. А.А. Брызгин, В.И. Безуглов, Е.Н. Кокин, М.В. Коробейников, Г.И. Кузнецов, И.Г. Макаров, Г.Н. Острейко, А.Д. Панфилов, В.М. Радченко, Г.В. Сердобинцев, А.В. Сидоров, В.В. Тарнецкий, М.А. Тиунов, Б.Л. Факторович, К.Н. Чернов,
2. В.Г. Ческидов // Промышленный линейный ускоритель электронов модульного типа ИЛУ-14. Приборы и техника эксперимента, 2011, No 3, с. 5–21.

3. Брызгин А.А., Куксанов Н.К., Салимов Р.А. Ускорители электронов для промышленного применения разработанные в ИЯФ им Г.И. Будкера СО РАН // Успехи физических наук. 2018. Т. 188. № 6. С. 672-685. DOI: 10.3367/UFN.2018.03.038344. Переводная версия DOI: 10.3367/UFN.2018.03.038344.

СТАТУС УРАЛЬСКОГО ЦЕНТРА РАДИАЦИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ

Андреев С.А., Павленко А.В., Ткачев О.В., Вагина Н.М., Шукайло В.П.

Федеральное государственное унитарное предприятие «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский НИИ технической физики имени академика Е.И. Забабахина», Снежинск, Россия

В докладе освещены текущее состояние и перспективы развития в РФЯЦ-ВНИИТФ экспериментальной базы – Уральского центра радиационных испытаний. В настоящее время центр включает в себя парк импульсных ядерных реакторов, генераторов нейтронов, ускорителей электронов, изотопных γ -установок [1]. Кратко даны их характеристики. В основе развития центра – новые ускорители частиц, создание которых направлено на обеспечение моделирования излучения космического пространства, а также атмосферного излучения. Даны основные характеристики новых моделирующих установок, принцип их действия и текущий статус по их изготовлению. Затронуты основные научно-технологические проблемы создания установок, обозначены пути их решения. Обозначены сроки запуска установок в режиме генерации пучков. Даны предложения по диверсификации центра по направлению ядерной медицины.

Список литературы

1. Андреев С.А., Вагина Н.М., Лыжин А.Е. и др. Экспериментальная база РФЯЦ-ВНИИТФ. Испытательные установки. Современное состояние и перспективы развития. Труды XIII Межотраслевой конференции по радиационной стойкости ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». В 4-х томах. Том 1. С. 200 – 216.

КОНЦЕПТУАЛЬНЫЙ ПРОЕКТ СОЗДАНИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ВЫВОДА ИЗОГНУТЫМ КРИСТАЛЛОМ ПРОТОННОГО ПУЧКА ИЗ СЦ-1000 «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ» – ПИЯФ

Амерканов Д.А., Артамонов С.А., Горшков Б.Л., Илатовский А.В., Иванов Е.М., Иванова П.Ю., Иванов Ю.М., Мурзин В.И., Фомин Э.В., Тонких В.А.

НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, Россия

Вывод протонного пучка из синхроциклотрона СЦ-1000 «Курчатовский институт» – ПИЯФ на энергию протонов 1000 МэВ и интенсивностью 1 мкА осуществляется регенеративным методом с коэффициентом около 30% [1, 2]. Однако в последнее время для многих ядерно-физических задач возрастает потребность в компактных пучках заряженных частиц с интенсивностью на несколько порядков меньшей, чем основной пучок.

Для их получения на уже работающих установках перспективным представляется метод каналирования частиц, когда заряженные протоны или ионы движутся внутри кристаллической решетки кристалла вдоль определенных направлений, при этом незначительно теряя свою кинетическую энергию [3].

Использование изогнутых кристаллов для вывода пучков частиц из ускорителей представляет собой эффективную и перспективную технологию, применяемую в различных областях, включая физику высоких энергий [4]. Отклонение заряженных частиц изогнутым кристаллом определяется углом изгиба кристалла и зависит от энергии частиц и кристаллической структуры. Преимуществами метода являются высокая эффективность вывода, компактность устройства, возможность получения пучков с уникальными характеристиками.

В работе предлагается создать дополнительную независимую систему вывода протонного пучка из камеры синхроциклотрона СЦ-1000, используя отклоняющие свойства изогнутого кристалла. Необходимый для решения той или иной поставленной задачи кристалл вводится, позиционируется, настраивается и эвакуируется из камеры ускорителя при помощи специального устройства.

Предварительные расчеты показали, что в СЦ-1000 возможен вывод каналированного кристаллом протонного пучка, как с использованием регенеративной системы вывода, так и без нее. Но при этом потребуются разный изгиб кристалла. Прототипы изогнутых кристаллов на угол до 4 миллирадиан разработаны и исследованы в [5]. Кристаллы с большими углами изгиба находятся в стадии изучения.

Выведенный компактный низкоинтенсивный протонный пучок в первую очередь будет использоваться при испытаниях детекторов и систем диагностики.

Список литературы

1. Н. К. Абросимов и др. Ленинградский синхроциклотрон на энергию протонов 1 ГэВ. Труды VII Международной конференции по ускорителям заряженных частиц высоких энергий, Ереван, 1969 г., т.1, с.317-323.
2. Н. К. Абросимов и др. A 30 percent beam extraction on the 1 GeV Synchrocyclotron at Gatchina. // Nucl. Instr. Meth., 1975, v.126, p.221.
3. М. Томпсон. Каналирование частиц в кристаллах // Успехи физических наук. Обзоры актуальных проблем. — 1969. — Т. 99, № 2. — С. 297-317.
4. V.M. Biryukov, Yu.A. Chesnokov and V. I. Kotov, Crystal Channeling and its Application at High-Energy Accelerators, Springer Science & Business, Berlin, 2013.
5. Д.А. Амерканов и др. Письма в ЖЭТФ, 2023, том 118, вып. 8, с. 551 - 556.

РАЗРАБОТКА СИНХРОТРОНА ДЛЯ КОМПЛЕКСА ПРОТОННОЙ ЛУЧЕВОЙ ТЕРАПИИ В РАМКАХ ПРОЕКТА «ЛУЧ-ПРОТОН»

Цыплаков Е.Д.^{1,2}, Николаев В.И.¹, Хабибуллина Е.Р.¹, Кулевой Т.В.¹, Марков Н.В.¹, Лякин Д.А.¹, Семенников А.И.¹, Скачков В.С.¹, Федина И.В.¹, Мальшиев А.А.¹

¹НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

²Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия

В рамках Федеральной научно-технической программы развития синхротронных и нейтронных исследований и исследовательской инфраструктуры на базе НИЦ «Курчатовский институт» ведется создание комплекса протонной лучевой терапии (ПЛТ) «Луч-Протон».

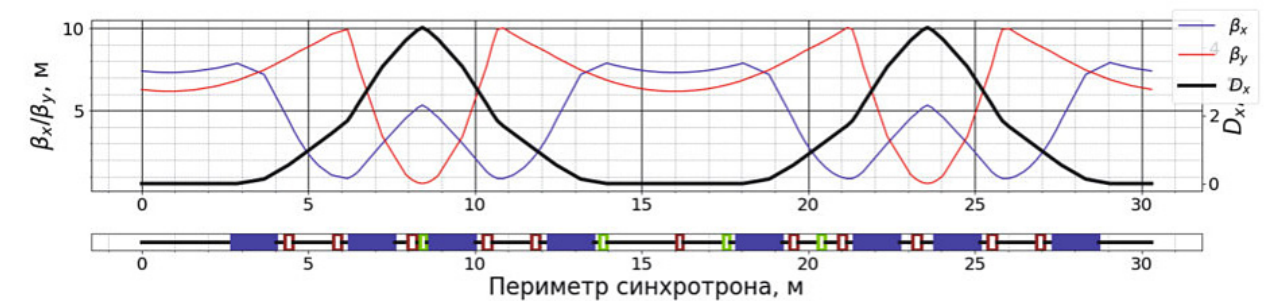
В основе комплекса лежит протонный синхротрон, рассчитанный на ускорение протонов до энергии в диапазоне от 70 до 250 МэВ. После достижения требуемой энергии пучок протонов выводится из синхротрона в высокоэнергетичный канал транспортировки пучка (ВЭ КТП) с требуемым темпом вывода и доставляется в одну из двух лучевых установок. Одна из лучевых установок будет оснащена системой Гантри (ЛУ Гантри), другая фиксированным горизонтальным пучком (ЛУ ГФП). Основные параметры разрабатываемого синхротрона представлены в Таблице.

Параметры разрабатываемого синхротрона

Параметр	Значение
Периметр, м	30.3
Максимальное число частиц в кольце	$1 \cdot 10^{11}$
Энергия инъекции, МэВ	4

Рабочий диапазон энергии экстракции, МэВ	70÷250
Максимальное поле в зазоре магнитов (250 МэВ), Тл	1.5
Инжекция	Однооборотная/многооборотная

В процессе разработки концепции синхротрона одной из первостепенных задач было обеспечение стабильности вывода пучка на пациента. Для этого решено реализовать медленный вывод пучка из синхротрона путем контролируемого возбуждения резонанса третьего порядка. Для стабильности вывода выбрана конфигурация магнитной оптики, которая позволяет управлять хроматичностью и возбуждением третьей гармоники независимо. Это достигается благодаря нулевой дисперсии на прямолинейных промежутках и размещению секступолей в арке (для управления хроматичностью) и на прямолинейном участке (для управления медленным выводом). Описанный подход в свою очередь помогает автоматически выполнить условие Хардта [1] и потенциально ведет к минимизации потерь при выводе и относительной стабилизации тока выводимого пучка вследствие исключения некоторых эффектов синхротрона. На Рисунке представлены структурные функции синхротрона и компоновка магнитной оптики.



Структурные функции синхротрона для протонной терапии (синие прямоугольники – диполи, коричневые прямоугольники – квадруполь, зеленые прямоугольники - секступоли)

Для управления временем вывода и его темпом в кольце будет применен ВЧ-кикер (RF-knockout) [2]. Частицы медленно получают приращение амплитуды бетатронных колебаний вблизи третьего резонанса. При достижении границы устойчивой области частицы покидают зону устойчивого движения и, попадая в зазор между пластинами электростатического дефлектора, выводятся из синхротрона.

Для контроля за параметрами пучка в синхротроне предполагается размещение 8 датчиков положения пучка (BPM), 3 индукционных датчика, 2 профилометра. На участке инжекции будут расположены 4 бамп-магнита, обеспечивающие равномерное замазывание пучка по горизонтальному направлению для увеличения акцептанса пучка и соответственно уменьшения Кулоновского сдвига частот (Space Charge) на энергии инжекции.

Сравнивая предложенную концепцию синхротрона со схожим проектом Hitachi ProBeat [3], можно отметить получившийся относительно больший периметр за счет незначительно заниженного максимального магнитного поля в дипольных магнитах и отличительной компоновки магнитной оптики, обеспечивающей значительные преимущества для обеспечения стабильности вывода пучка из синхротрона.

Список литературы

- 1. P.J. Bryant, CERN Yellow Reports: School Proceedings, 5/2018, p. 315 (2018).
- 2. N. Carmignani, et. al., IPAC Proceedings, THPEB007, p. 3891 (2010).
- 3. P. Ken, W. Puthenparampil, J. Bleddyn, The British journal of radiology, 84 Spec No 1. S4-10 (2011)

СТАТУС УСКОРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ПРОТОННОЙ ЛУЧЕВОЙ ТЕРАПИИ В РАМКАХ ПРОЕКТА «ЛУЧ-ПРОТОН»

*Кулевой Т.В.¹, Марков Н.В.¹, Цыплаков Е.Д.^{1,2}, Кропачев Г.Н.¹, Николаев В.И.¹, Хабибуллина Е.Р.¹,
Ситников А.Л.¹, Зиятдинова А.В.¹, Семенников А.И.¹, Лякин Д.А.¹, Козлов А.В.¹, Прянишников К.Е.¹,
Скачков Вл.С.¹, Скачков Вик.С.¹, Федина И.В.¹, Сергеева О.С.¹, Малышев А.А.¹, Кузьмичев В.Г.¹, Орлов А.Ю.¹,
Барабин С.В.¹, Логвинов Д.Л.¹, Марченков А.И.¹, Кристи Н.М.¹, Селезнев Д.Н.¹, Зарубин А.Б.¹,
Мильяченко А.Д.¹, Семячкин В.К.¹, Стасевич Ю.Б.¹, Куйбида Р.П.¹, Виноградский Н.Н.¹, Федин П.А.¹*

¹НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

²Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия

В настоящее время в рамках Федеральной научно-технической программы развития синхротронных и нейтронных исследований и исследовательской инфраструктуры ведется реализация проекта «Луч-Протон», в результате которого на базе НИЦ «Курчатовский институт» будет создан комплекс протонной лучевой терапии (ПЛТ) с энергией выводного протонного пучка в диапазоне 70 – 250 МэВ. Концепция комплекса ПЛТ «Луч-Протон» подразумевает разработку и оснащение комплекса тремя основными элементами оборудования – ускорительным комплексом и двумя процедурными помещениями: Лучевая Установка Гантри (ЛУ Гантри) для многопольного облучения пациента в положении лежа, и Лучевая Установка с фиксированным в горизонтальной плоскости направлением протонного пучка (ЛУ ГФП) для облучения пациента в положении сидя [1]. Структурно ускорительный комплекс состоит из следующих основных элементов: источник ионов, низкоэнергетический канал транспортировки пучка (НЭ КТП), линейный ускоритель RFQ, канал между линейным ускорителем и синхротроном (ПЭ КТП), протонный синхротрон и высокоэнергетические каналы транспортировки пучка (ВЭ КТП), доводящие пучок протонов до лучевых установок.

В комплексе ПЛТ для создания требуемых дозовых распределений предполагается использовать как активную, так и пассивную системы формирования. В случае использования активной системы формирования дозовых распределений облучаемый объем виртуально разделяется на слои, расположенные поперёк оси распространения пучка. Каждому слою соответствует определенное значение энергии протонов в соответствии с кривой Брэгга. Облучение каждого слоя осуществляется поточно с использованием «карандашного пучка». Пассивную систему предполагается использовать для обеспечения возможности проведения протонной лучевой онкоофтальмологии в ЛУ ГФП.

В процессе разработки технических решений для отдельных элементов ускорителя был проведен детальный анализ существующих в мире специализированных комплексов протонной терапии. В области протонной терапии наибольшее распространение получили комплексы на основе циклотронов компаний IBA и Varian, занимающих более половины мирового рынка. Оставшаяся часть протонных центров оснащена ускорителями на основе синхротронов. Среди синхротронов наибольшее распространение получило оборудование, выпускаемое компанией Hitachi [2]. Определенный интерес с точки зрения анализа используемых технологий представляет собой ускорительный комплекс Прометеус [3] (производитель ЗАО ПРОТОМ), и построенные на его основе комплексы израильской компании P-Cure и американской Protom International. Также были рассмотрены комплексы протонной терапии, расположенные в Медицинском центре в Шанхае [4] (Китай) и в Медицинском Центре Университета города Лома Линда [5] (США). На основании проведенного анализа были определены оптимальные режимы работы ускорителя, инъекции и вывода пучка из синхротрона, а также требования к системам безопасности.

На основании результатов численного моделирования динамики пучка были разработаны конструкторские модели всех элементов ускорительного комплекса. Критерием моделирования и разработки являлось прохождение пучка от источника ионов до кольца синхротрона и от кольца до ЛУ ГФП и ЛУ Гантри с учетом ключевых требований технического задания на разработку комплекса ПЛТ. Также в ходе реализации проекта была разработана концепция автоматической системы управления (АСУ), определены основные параметры источников питания магнито-оптических элементов, системы охлаждения, а также определены параметры ВЧ-системы. На

основании полученной информации ведется разработка технических заданий на размещение оборудования ускорителя в здании.

Создание данного комплекса позволяет продолжить развитие отечественных технологий лучевой терапии и закладывает основу дальнейшей тиражируемости комплекса ПЛТ на базе синхротрона с большой интенсивностью при подтверждении параметров пучка на ЛУ ГФП и Гантри.

Список литературы

1. М. В. Ковальчук и др., Распределенный центр ядерной медицины НИЦ “Курчатовский институт”: история, современное состояние и перспективы развития, Кристаллография, 2022, том 67, № 5, с. 801–817.
2. P.J. Bryant, et al., CERN Yellow Reports: School Proceedings, 5/2018, p. 315 (2018).
3. A. Pryanichnikov, V. Balakin, et al., RuPAC Proceedings, FRXMN03, p. 135 (2018).
4. MZ. Zhang, DM. Li, LR. Shen et al., NUCL SCI TECH 34, 148 (2023).
5. J. Archambeau, et al., FERMILAB-DESIGN-1986-01 (1986).

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АКТИВАЦИОННЫХ ДЕТЕКТОРОВ ДЛЯ КАЛИБРОВКИ ДАТЧИКОВ ИНТЕНСИВНОСТИ ВЫВЕДЕННЫХ ПУЧКОВ ЛЕГКИХ ИОНОВ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ЭНЕРГИЙ НА УСКОРИТЕЛЯХ

Васильева А.Г., Костин М.Ю., Пикалов В.А., Суманев О.В., Янович А.А.

«Курчатовский институт» – ИФВЭ, Протвино, Россия

В качестве мониторов пучка применяются самые разнообразные детекторы, среди которых большое распространение в ускорительной технике получили ионизационные камеры. Особое внимание уделяется разработке методик абсолютной калибровки ионизационных камер для уменьшения неопределенностей в измерении дозы или интенсивности выведенных пучков заряженных частиц. В НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ предложена оригинальная методика абсолютной калибровки ионизационных камер и датчиков обратной связи выведенного пучка ионов углерода промежуточных энергий активационными детекторами [1]. На данный момент методика позволяет реализовать калибровку ионизационных камер для измерения интенсивности пучка ионов углерода в диапазоне энергий 400–450 МэВ/нуклон. При этом используется низкофоновая радиометрическая установка [2], работающая по принципу гамма-гамма-совпадений, активационный детектор из чистого углерода с естественной смесью изотопов и реакция $^{12}\text{C}(^{12}\text{C},\text{X})^{11}\text{C}$. В данной работе рассматриваются предпосылки разработки подобной методики, в частности анализируется мировой опыт применения активационных детекторов на ускорителях и использования активационного анализа для диагностики интенсивности пучков частиц [3–8]. Приводится общее описание предлагаемой методики, описан процесс калибровки плоскопараллельной ионизационной камеры в ходе регулярной работы на экспериментальной установке Радиобиологический стенд ускорительного комплекса У-70 в НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ.

Список литературы

1. Status of the Experimental Setup Radiobiological Stand (RBS) on a Beam of Carbon Nuclei Extracted from the U-70 Accelerator Complex / Yu. M. Antipov, A. G. Vasilyeva, D. A. Vasiliev [et al.] // Instruments and Experimental Techniques. – 2024. – Vol. 67. – No 2. – P. S300-S304.
2. Разработка установки для калибровки ионизационных камер и датчиков обратной связи выведенного пучка ионов углерода активационными детекторами / А. Г. Васильева, М. Ю. Костин, В. А. Пикалов, А. А. Янович // Ученые записки Физического факультета МГУ. – 2025. – № 2. – Ст. 2520201. – 5 с.

3. Методические вопросы использования пороговых активационных детекторов в радиационных исследованиях на ускорительном комплексе ИФВЭ: препринт ИФВЭ 2000-30 / Г. И. Крупный, Г. Н. Стеценко, А. А. Янович. – Протвино: ИФВЭ, 2000. – 14 с.
4. Monitoring reactions for the calibration of relativistic hadron beams / A. Ferrari, F. P. La Torre, G. P. Manessi [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. – 2014. – Vol. 763. – P. 177-183.
5. Beam monitoring of high energy proton flux by the activation foil technique / M. Calviani, F. Cerutti, F. P. La Torre [et al.] // Progress in Nuclear Science and Technology. – 2014. – Vol. 4. – P. 358-362.
6. Single- and multi-foils $^{27}\text{Al}(p,3p)^{24}\text{Na}$ activation technique for monitoring the intensity of high-energy beams / A. Curioni, R. Froeschl, M. Glaser [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. – 2017. – Vol. 858. – P. 101-105.
7. Monitor Reactions for High Energy Proton Beams / J. B. Cumming // Annual Review of Nuclear and Particle Science. – 1963. – Vol. 13. – P. 261-286.
8. Verification of absolute ionization chamber dosimetry in a proton beam using carbon activation measurements / D. Nichiporov // Medical Physics. – 2003. – Vol. 30, No. 5. – P. 972-978.

ГЕНЕРАЦИЯ КОГЕРЕНТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ПУЧКА МИКРОТРОНА С ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ МИШЕНЯМИ

Бушмина Е.А.^{1,2}, Алексеев С.И.¹, Балдин А.А.¹, Блеко Вит.В.¹, Булавская А.А.², Каратаев П.В.³, Киданова Е.Ю.^{1,4}, Кищин И.А.^{4,5}, Кленин А.А.⁵, Кочарян В.Р.⁵, Кубанкин А.С.^{4,5}, Маргарян В.В.⁵, Милойчикова И.А.^{2,6}, Митрофанов С.В.¹, Подойницын А.А.⁵, Семин В.А.¹, Стучебров С.Г.²

¹ОИЯИ, Дубна, Россия

²НИ ТПУ, Томск, Россия

³JAI at RHUL, Эгам, Суррей, Англия

⁴ФИАН, Москва, Россия

⁵БелГУ, Белгород, Россия

⁶ИППФ НАН РА, Ереван, Армения

⁷НИИ Онкологии Томского НИМЦ РАН, Томск, Россия

На сегодняшний день высокоэнергетические пучки электронов востребованы как для решения задач фундаментальной физики, так и во многих прикладных областях. Для эффективного проведения исследований необходимо обеспечить качественную диагностику пучков заряженных частиц. Применяемые сегодня методы диагностики пучков электронов, включают в себя множество подходов и методик. Особое внимание уделяется использованию когерентного электромагнитного излучения как методу высокоточной диагностики пучков заряженных частиц [1, 2].

В данной работе предлагается использовать когерентное электромагнитное излучение в микроволновом диапазоне, генерируемое вблизи диэлектрических мишеней, в качестве метода диагностики пучков электронов высоких энергий. Реализация предложенного метода возможна при одновременно теоретическом и глубоком экспериментальном анализе свойств данного вида излучения. В связи с этим в данной работе были рассчитаны и экспериментально изучены свойства сгенерированного когерентного микроволнового излучения, полученного на микротроне МТ-25 (Дубна, Россия).

Мы благодарим коллаборацию FLAP за помощь в проведении эксперимента и обсуждении результатов.

Список литературы

1. Bushmina E. et al. Observation of Cherenkov diffraction radiation from 3D printed plastic targets // Journal of Instrumentation. – 2025. – Т. 20. – №. 07. – С. P07026.
2. Baldin A. et al. FLAP collaboration: tasks and perspectives. Study of fundamentals and new

applications of controllable generation of electromagnetic radiation by relativistic electrons using functional materials //Physics of Particles and Nuclei Letters. – 2021. – Т. 18. – №. 3. – С. 338-353.

ДОЗИМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УСКОРЕННЫХ ПУЧКОВ ЯДЕР ГЕЛИЯ, ПОЛУЧЕННЫХ НА МОДЕРНИЗИРОВАННОМ КОМПЛЕКСЕ ПРОТОННОЙ ТЕРАПИИ «ПРОМЕТЕУС»

Шемяков А.Е.^{1,2}, Балакин В.Е.^{1,2}, Бажан А.И.², Александров В.А.^{1,2}, Коробов Д.В.^{1,2}, Щепанюк Т.С.^{1,2}

¹Физико-технический центр ФИАН, Протвино

²АО «Протом», Протвино

В последние годы наряду с развитием протонной терапии возрастает интерес к использованию более тяжелых ионов, в частности ядер гелия (^4He), для лучевой терапии онкологических заболеваний. По сравнению с протонами, ядра гелия обладают рядом преимуществ: более высокой линейной передачей энергии (ЛПЭ), меньшим боковым рассеянием в биологических тканях, а также отсутствием выраженного "хвоста" дозы за пиком Брэгга, характерного для углеродных пучков. Эти свойства делают пучки ядер гелия особенно перспективными для лечения опухолей, расположенных вблизи критических органов.

В данной работе представлены результаты экспериментов по ускорению и выводу пучков ядер гелия на ускорительном комплексе "Прометеус" (АО "Протом", Протвино). Основой комплекса является компактный синхротрон диаметром 5 метров, изначально разработанный для протонной терапии. После установки нового ионного источника удалось достичь ток инжекции ядер гелия порядка 0,44 мА. Ускорение частиц проводилось аналогично работе с протонами. Максимальная энергия выпущенного сканирующего пучка для дозиметрических работ составила 80 МэВ/нуклон (320 МэВ для ядер гелия).

Дозиметрические измерения выполнялись в водном фантоме с использованием оборудования производства PTW (Freiburg, Германия), радиохромных пленок Gafchromic EBT3, а также с использованием оборудования собственной разработки. Получены глубинные распределения дозы в воде для пучков с энергиями от 55 до 80 МэВ/нуклон. Оценено рассеяние частиц в воде на глубине до 50 мм. Сформирован модифицированный пик Брэгга пучками ядер гелия разной энергии для облучения экспериментальных биологических объектов. Проведено сравнение полученных данных с дозовым распределением для протонов аналогичной энергии по проникающей способности.

Проведенные эксперименты подтверждают возможность использования компактных синхротронов для генерации сканирующих пучков ядер гелия. Полученные дозиметрические характеристики и распределения в пике Брэгга свидетельствуют о возможности использования ядер гелия для лучевой терапии. В перспективе комплекс "Прометеус" может быть адаптирован для гибридной протон-гелиевой терапии. Полученные результаты открывают новые возможности для развития адронной терапии в России, особенно для лечения радиорезистентных опухолей сложной локализации.

Список литературы

1. T. Tessonier et al. Commissioning of Helium Ion Therapy and the First Patient Treatment With Active Beam Delivery. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*. 2023 116(4):935-948.
2. A. Mairani et al. Roadmap: helium ion therapy. *Phys. Med. Biol.* 67 15TR02. 2022.
3. M. Sapinski et al. Helium beam particle therapy facility. *arXiv* 10.48550/arXiv.2008.08674. 2020.
4. A. Shemyakov et al. Application of a 2D scintillation detector for proton pencil beam dosimetry at Protom synchrotron. *Physica Medica*, Volume 94, Page S119, ISSN 1120-1797. 2022.
5. A. Pryanichnikov et al. Some Results of the Clinical Use of the Proton Therapy Complex "Prometheus". *Physics of Particles and Nuclei Letters*. 2018, Volume 15, Number 7, Page 981.

СТАТУС ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-КЛИНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ИОННОЙ ЛУЧЕВОЙ ТЕРАПИИ В «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ» – ИФВЭ

Пикалов В.А., Васильев Д.А., Васильева А.Г., Воробьев А.П., Гаркуша В.И., Иванов С.В., Калинин В.А., Кошелев А.В., Максимов А.В., Солдатов А.П.

НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ, Протвино, Россия

В «Курчатовский институт» – ИФВЭ ведутся работы по созданию экспериментально-клинического комплекса ионной лучевой терапии на действующем Ускорительном комплексе У-70 [1]. Работы проводятся генеральным подрядчиком МСУ-1 по проекту «Луч У-70».

В докладе кратко описан проект экспериментально-клинического комплекса ионной лучевой терапии в «Курчатовский институт» – ИФВЭ. Описан канал транспортировки пучков ионов углерода, биологическая защита канала, приведены заявленные характеристики выведенных пучков ионов углерода.

Показано состояние работ по строительству комплекса на текущую дату, готовность проекта к пуско-наладочным работам.

Список литературы

1. Постановление Правительства Российской Федерации от 16.03.2019 №287 «Об утверждении Федеральной научно-технической программы развития синхротронных и нейтронных исследований и исследовательской инфраструктуры на 2019 - 2027 годы».

ЭЛЕКТРОННЫЙ РЕЗОНАНСНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ БЕТА-8-10

Сметанин М.Л., Завьялов Н.В., Тельнов А.В., Шеин А.Н., Кузнецов В.В., Путевской С.А.

Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики (РФЯЦ-ВНИИЭФ), г. Саров, Россия

Представлено состояние работ по проекту создания электронного ускорителя БЕТА 8 10 на основе ускорителя БЕТА 8 [1,2,3], работающего в режиме импульсно-периодической и непрерывной генерации, предназначенного для радиационных исследований и испытаний. Основу ускорителя составляет полуволновый коаксиальный резонатор, возбуждаемый на волне типа Т₁, запитываемый от ВЧ генератора со средней выходной ВЧ мощностью 180 кВт. Набор энергии электронным пучком осуществляется при многократном прохождении резонатора в его срединной поперечной плоскости. Темп ускорения электронного пучка составляет ≈ 1.5 МэВ за один полный проход ускоряющего резонатора. Рециркуляция электронного пучка в резонатор осуществляется посредством поворотных магнитов, расположенных на внешних стенках резонатора. Ускоритель оборудован выводным вакуум-атмосферным раструбом со сканирующим магнитом и мишенью тормозного излучения. Основные параметры ускорителя: выходная энергия электронного пучка регулируется и может быть установлена на значения 1.5, 4.5 и 7.5 МэВ, средняя мощность электронного пучка до 10 кВт, рабочая частота 100 МГц. На сегодняшний день ускоритель полностью изготовлен и введен в эксплуатацию. Созданная установка позволяет проводить исследования по изучению механизмов радиационной модификации материалов и испытания для определения показателей стойкости материалов к длительному воздействию электронного и тормозного излучений.

Список литературы

1. С.А. Железов, Н.В. Завьялов, С.Т. Назаренко, В.В. Порхаев, В.Т. Пунин, С.А. Путевской, М.Л. Сметанин, А.В. Тельнов Проект электронного резонансного ускорителя непрерывного действия.// VIII Харитоновские чтения по проблемам физики высоких плотностей энергии. Сборник докладов. 2006 г.Саров – С.122-128.

2. N.V. Zavyalov, S.A. Zhelezov, S.T. Nazarenko, V.V. Porkhaev, V.T. Punin, S.A. Putevskoy, M.L. Smetanin, A.V. Telnov A CW Electron Accelerator. The Planned Design and Electrophysical Characteristics.// Problems of Atomic Science and Technology. 2006 №2 Series: Nuclear Physics Investigations (46), – p.8-10.
3. Gladyshev E.N., Gordeev V.S. et al. Status of works on development project for continuous electron resonance accelerator BETA-8// Proceedings of RFNC-VNIIEF. Ser. Science and Research Edition. 2015. Issue 20. P. 1. P. 184–193.

ГЕНЕРАЦИЯ НЕЙТРОНОВ ПРИ СТОЛКНОВЕНИЯХ СГУСТКОВ ДЕЙТЕРИЕВОЙ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ, УСКОРЕННОЙ В ИМПУЛЬСНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Исаев А.А.², Вовченко Е.Д.¹, Козловский К.И.¹, Шиканов А.Е.¹

¹НИЯУ МИФИ, Москва, Россия

²РТУ МИРЭА, Москва, Россия

В докладе рассмотрен процесс генерации нейтронов при взаимодействии двух сгустков лазерной плазмы, содержащей дейтроны, движущихся навстречу друг другу. Сгустки ускоряются в магнитных полях, спадающих к центру. При этом поле формируется с помощью симметрично расположенных отрезков спиральной электродинамической линии конической формы. В процессе эксперимента был получен выход (d,d)-нейтронов на уровне 103 н/импульс. Этот результат совпал с теоретическими оценками.

ПРИМЕНЕНИЕ ПРОТОННОЙ РАДИОГРАФИИ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СТРУКТУР

Михайлюков К.Л.

Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики
(РФЯЦ-ВНИИЭФ), г. Саров, Россия

В докладе дано краткое описание принципов работы протонной радиографии и принципов каналирования протонов высоких энергий в кристаллах.

В процессе проведения протонографических исследований периодически наблюдается эффект появления тёмно-белых полос на изображении в различных местах поля обзора. Такие структуры проявляются только в тех случаях, когда в протонном пучке установлены образцы из монокристаллов. Исследования показали, что данный эффект может быть обусловлен только эффектом каналирования, а полосы проявляются в тех областях, где направление полёта протонов совпадает с направлением кристаллических плоскостей.

Представлены протонограммы для различных монокристаллов. В некоторых случаях полосы, проявляющиеся вследствие каналирования, изогнуты, что говорит о крупномасштабных искажениях кристаллической структуры.

Для протонной радиографии данный эффект является паразитным и идёт поиск методов его компенсации.

Однако эффект каналирования может оказаться перспективным методом исследования крупномасштабных нарушений в монокристаллической структуре различных объектов.

ПОДКРИТИЧЕСКИЕ РЕАКТОРЫ С УСКОРИТЕЛЬНЫМ ПРИВОДОМ: СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Параипан М.^{1,2}, Белов О.В.¹, Джавадова В.М.¹, Тютюнников С.И.¹, Чан Т.Н.^{1,3}

¹Объединенный Институт Ядерных Исследований, Дубна, Россия

²Институт Космических Наук, Магуреле, Илфов, Румыния,

³Институт Физики Академии Наук Вьетнама (IP VAST), Ханой, Вьетнам

Концепция подкритического реактора, управляемого ускорителем (ADSR), изначально разрабатывалась как средство решения проблемы ядерных отходов. Акцент был сделан на возможности трансмутации актинидов из отработанного ядерного топлива. В наших работах показано, что ADSR может представлять собой эффективный источник энергии, способный обеспечить более безопасную эксплуатацию и более глубокое сжигание актинидов по сравнению с быстрым реактором. Проанализированы аспекты, связанные с геометрией активной зоны, оптимальным значением коэффициента критичности $k_{\text{эфф}}$, материалом конвертора, типом топлива и уровнем обогащения. Активная зона с обогащением 0,985-0,988 и низким обогащением обеспечивает глубокое выгорание актинидов за один цикл (15-20 % от исходной массы актинидов по сравнению с 6-7%, достигаемыми в быстром реакторе). Тип топлива и пик-фактор (ПФ) распределения мощности ограничивают максимальную мощность, которая может быть достигнута в ADSR. Нитридное топливо позволяет достичь наибольших интенсивностей пучка, позволяя достичь электрической мощности 750-800 МВт для ПФ 2. В случае протонных пучков предпочтительным является использование самого LBE в качестве конвертора и равномерного распределения обогащения, реализующего распределение мощности с $PF \sim 2$. В случае ионных пучков с энергией ниже 0,5 АгэВ использование длинного Ве-конвертора и неравномерное распределение обогащения позволяют максимально увеличить выделяемую энергию. При интенсивности пучка выше $1 \cdot 10^{16}$ ч/с в ADSR могут быть достигнуты значения G выше 15. Оптимальная энергия протонного пучка находится в диапазоне 1-1,5 ГэВ. Ионные пучки, начинающиеся с ^7Li , реализуют более высокие значения G . Наиболее интересные результаты получены с ^7Li . Пучок ^7Li с энергией 0,3 ГэВ реализует ту же электрическую мощность, что и пучок протонов с энергией 1,5 ГэВ. Это позволяет уменьшить габариты ускорителя в 2 раза, соответственно снизив затраты на строительство и обслуживание.

Высокие значения прироста энергии G , которые могут быть достигнуты в ADSR, по сравнению со значениями прироста энергии, прогнозируемыми для термоядерных энергетических установок (~ 3 в случае магнитного удержания плазмы, ~ 4 в случае инерционного удержания), показывают, что ADSR может представлять собой более эффективный источник энергии.

На основе анализа возможных экспериментов по проверке эффективности различных пучков представлена конструкция удлиненной свинцовой мишени LETASUR.

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГЛОЩЕННОЙ ЭНЕРГИИ СУБМИКРОСЕКУНДНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА С ШИРОКИМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ СПЕКТРОМ В ВОЗДУХЕ

Серебренников М.А., Дин Ю., Егоров И.С.

ФГАОУ ВО НИ ТПУ, Томск, Россия

В работе представлены результаты исследования закономерностей распространения импульсного электронного пучка с широким энергетическим спектром в объеме реакционной камеры, заполненной воздухом при нормальном атмосферном давлении. Эксперименты проводились на субмикросекундном импульсном электронном ускорителе «Астра-М» (ускоряющее напряжение до 450 кВ, ток пучка до 0,5 кА, длительность импульса на полувысоте – 150 нс) [1]. Диагностика параметров пучка в процессе его транспортировки внутри реакционной камеры осуществлялась с использованием штатного диагностического оборудования ускорителя (пояса Роговского, дозиметрические пленки, калориметр, цилиндр Фарадея), а также с помощью оригинального устройства для измерения характеристик пучка в сечении, разработанного авторами [2,3].

Результаты работы будут полезны для практического использования импульсных ускорителей электронов с выводом электронного пучка в атмосферу.

Список литературы

Egorov, V. Esipov, G. Remnev, M. Kaikanov, E. Lukonin, A. Poloskov. “A high-repetition rate pulsed electron accelerator”, 2012 IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference, San Diego, June 3-7, 2012, [S.I]: IEEE, pp. 716-719, 2012, doi: 10.1109/IPMHVC.2012.6518845.

I. Egorov, M. Serebrennikov, Y. Isakova, A. Poloskov. “Sectioned calorimeter for quick diagnostic of the electron beam energy distribution” , Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, vol. 875, pp. 132-136, 2017, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2017.09.002>.

Serebrennikov, E. Adamov, A. Poloskov, X. Yu, I. Egorov. “A calorimetric system for charge and kinetic energy characterizations of pulsed electron beams”, Radiation Measurements, Vol. 143, Article number 106569, pp. 1-6, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2021.106569>.

[illegible]

This image shows a single sheet of white paper with horizontal ruling lines. The lines are evenly spaced and run across the width of the page. There are no margins, text, or other markings on the paper.

This image shows a single sheet of white paper with horizontal ruling lines. The lines are evenly spaced and run across the width of the page. There are no margins, text, or other markings on the paper.

This image shows a single sheet of white paper with horizontal ruling lines. The lines are evenly spaced and run across the width of the page. There are no margins, text, or other markings on the paper.

ОРГАНИЗАТОРЫ

Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом»

Российская Академия Наук

Акционерное общество «Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры
им. Д.В. Ефремова»

СПОНСОРЫ

ООО «Оптикон»

ООО «НПП Триада-ТВ»

Группа компаний «Научное Оборудование»

ООО «Современное вакуумное оборудование»