

Секция ядерной физики Отделения физических наук Российской академии наук и
Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН.
Сессия-конференция «Физика фундаментальных взаимодействий»

Современные тенденции увеличения частот в линейных ускорителях заряженных частиц

А.Е. Левичев

A.E.Levichev@inp.nsk.su

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН

10.03.2026

Оглавление

1. Введение
2. С-диапазон
3. X-диапазон
4. W-диапзаоны
5. Диэлектрические структуры

Введение

Обозначения диапазонов:

Обозначение	Диапазон частот, ГГц	Диапазон длин волн, мм
L	1-2	150-300
S	2-4	75-150
C	4-8	37.5-75
X	8-12	25-37.5
...		
W	75-110	2.7-4

Пример развития источников СВЧ мощности (клистронов)

Type	Frequency (MHz)	Peak Power (MW)
E37612	1428	30
E3730A	2856	50
E37314	2856	60
E3729	2856	70
E37320	2856	80
E37327A	2998	45
E37333	2998	70
E37214	5712	50
E37115B	11424	6
E37118	11989	20
E37119	11994	25

<https://etd.canon/en/product/category/microwave/klystron.html>

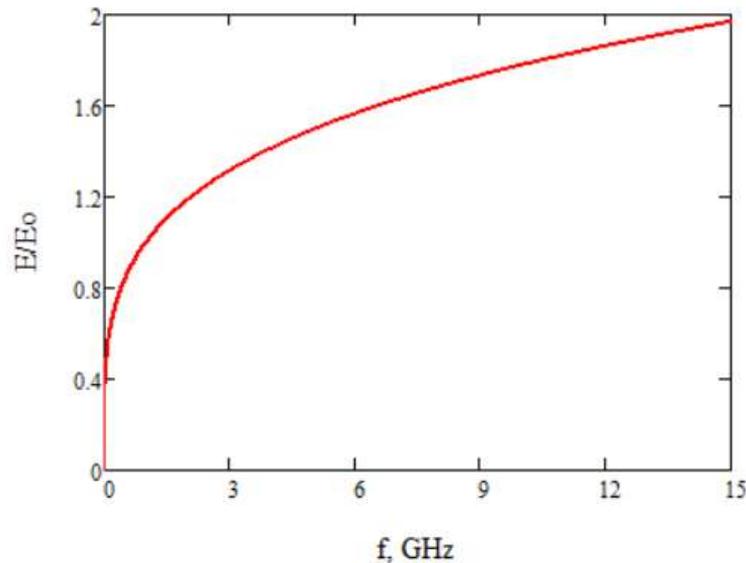
Зависимости параметров ускоряющих структур от частоты

Шунтовое сопротивление $R_{sh} \sim f^{1/2}$

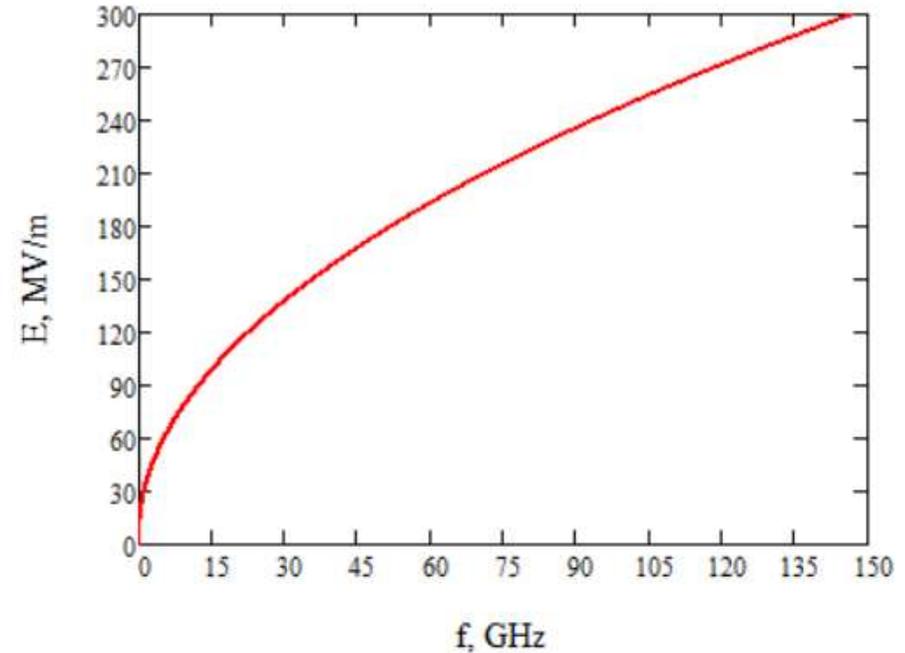
Добротность $Q_0 \sim f^{-1/2}$

Ускорение $E \sim f^{1/4}$

$$E e^{-4.25/E} = 24.4 (f[\text{GHz}])^{1/2}, \text{MV/m} - \text{Критерий Килпатрика}^*$$



Изменение темпа ускорения при частоты за счет увеличения шунтового сопротивления



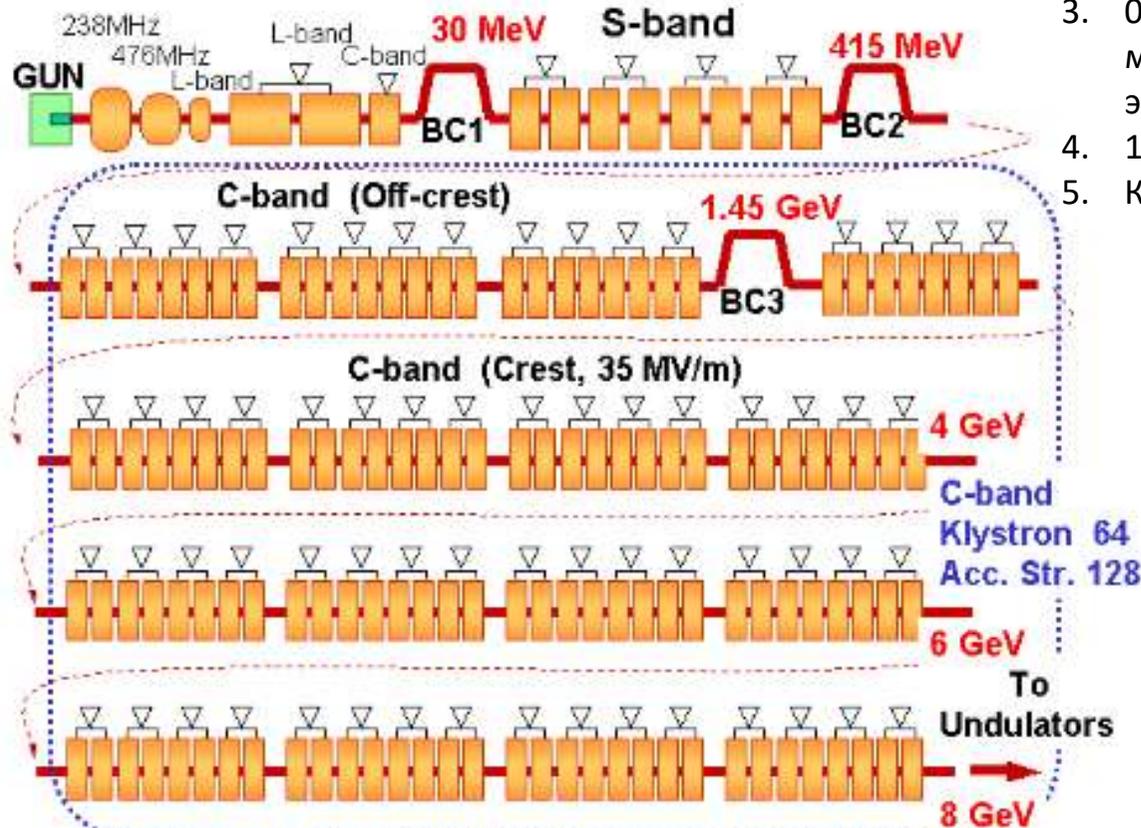
Изменение максимальной напряженности поля при увеличении частоты

*Kilpatrick W.D. Criterion for Vacuum Sparking Designed to Include Both rf and dc. — Vol. 10, no. 28. — Pp. 824–826

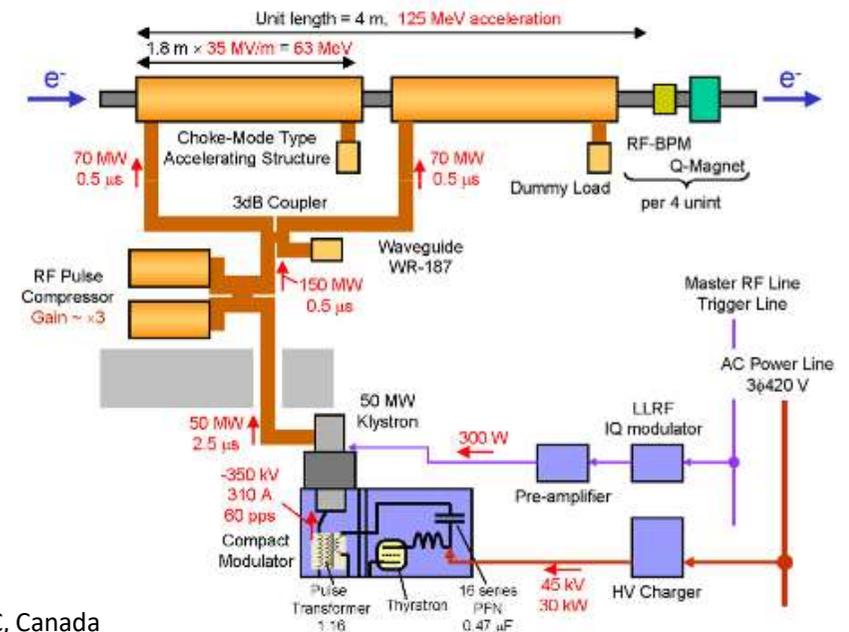
C - диапазон

SACLA (SPring-8 Angstrom Compact free electron LAsER)

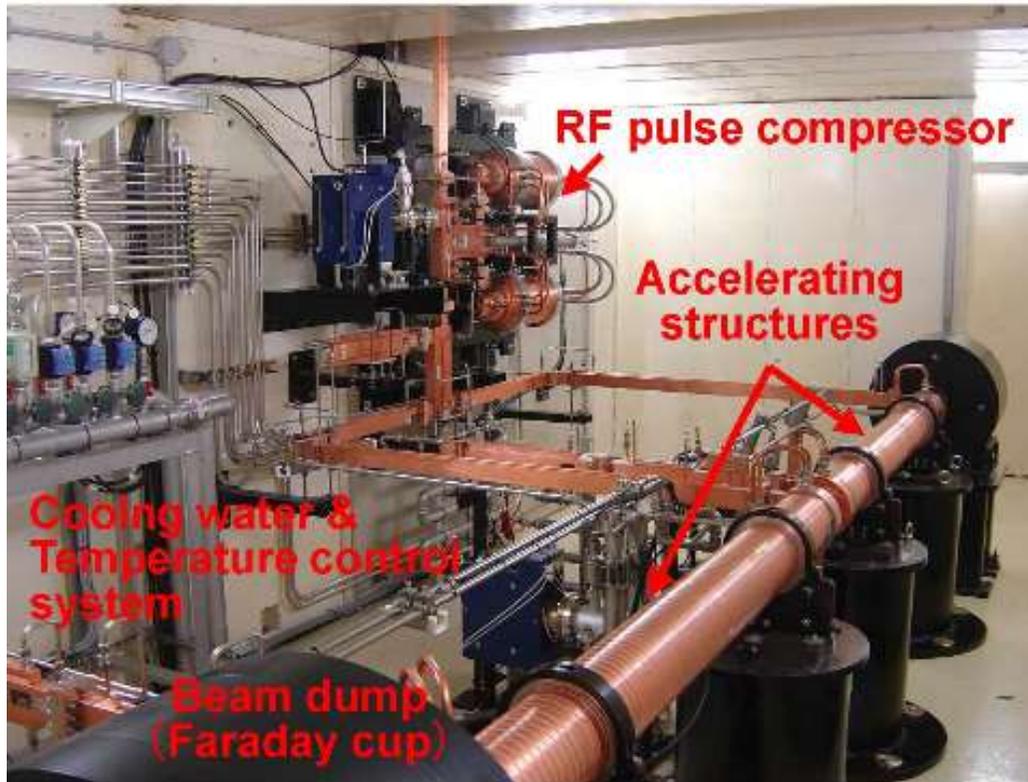
SACLA – работающий рентгеновский лазер на свободных электронах в городе Харима, Япония.



1. Термоэмиссионная пушка
2. До 415 МэВ – S-band
3. 0.415-1.45 ГэВ – C-band, ускорение +42 град от фазы максимального ускорения для приобретения энергетического разброса и группировки в чикейне BC3
4. 1.45-8 ГэВ – C-band, 52 клистрона, 104 ускоряющих структуры
5. Клистрон Canon E37202, выходная мощность 50 МВт



SACLA (Spring-8 Angstrom Compact free electron LAser)



Параметр	Значение
Частота	5712 МГц
Количество ускоряющих ячеек	100+2 связи
Темп ускорения	35 МэВ/м
Фазовый сдвиг	$2\pi/3$
Полная длина	2 м
Длина ускоряющей ячейки	17.495 мм
Толщина диафрагмы	4 мм
Диаметр апертуры	15.938-12.107 мм
Диаметр ускоряющей ячейки	43.196-41.869 мм
Шунтовой импеданс	66 МОм/м
Добротность	8900
Средняя групповая скорость	0.023с
Время заполнения	290 нс
Коэффициент затухания	0.59
Коэффициент перенапряжённости	2.6

CEPC (Circular Electron Positron Collider)

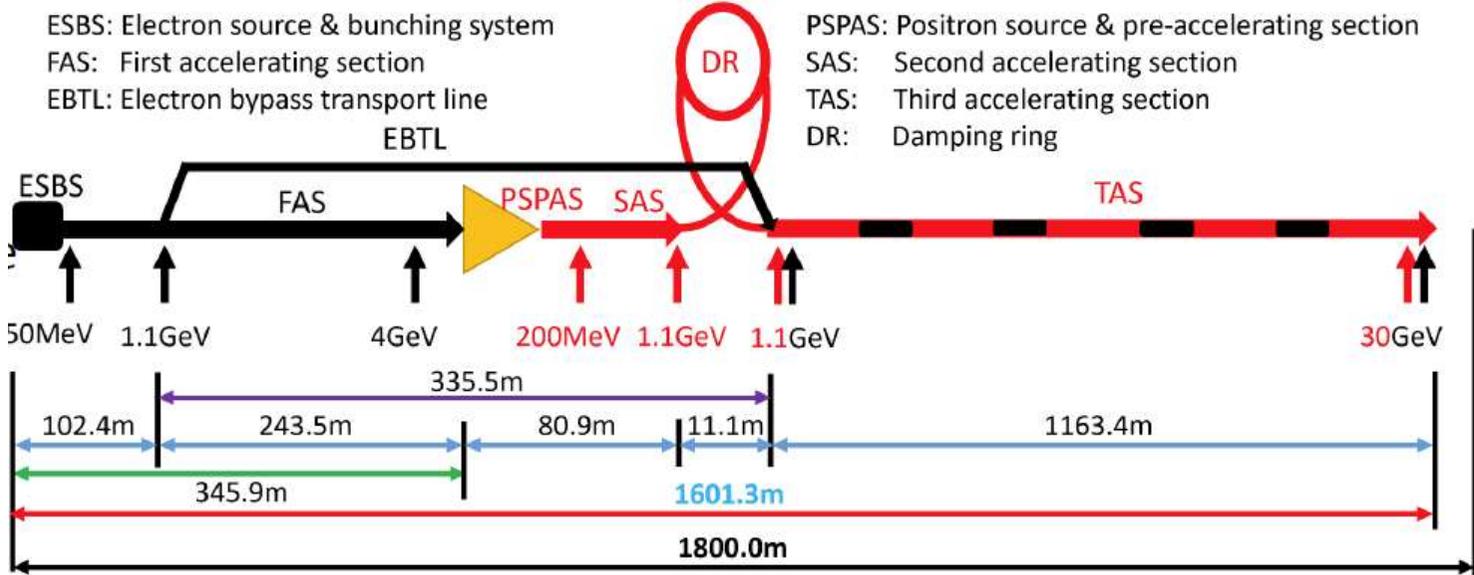
Параметр	Значение
Энергия	30 ГэВ
Частота повторения	100 Гц
Заряд в пучке	1.5 нКл
Энергетический разброс	1.5×10^{-3}
Эмиттанс	6.5 нм

S-band (1.1 ГэВ):

- Количество структур – 93
- Количество структур с повышенной апертурой после позитронной мишени – 16
- Число умножителей мощности – 33
- Темп ускорения 22-27 МэВ/м

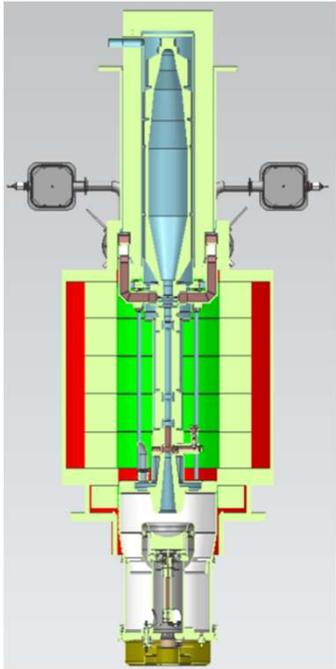
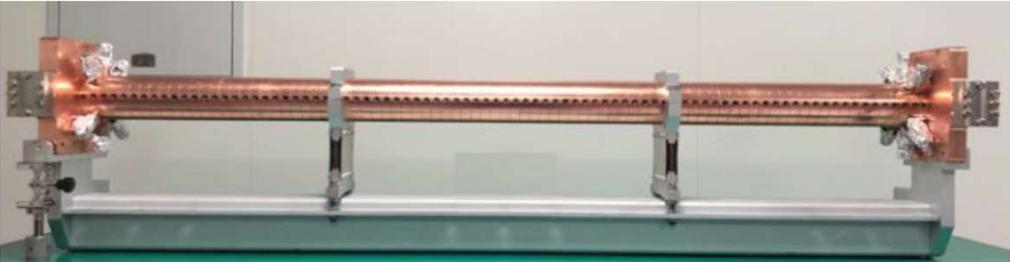
C-band (1.1-30 ГэВ):

- Количество структур – 470
- Темп ускорения -40 МэВ/м
- Число умножителей мощности - 235



CEPC (Circular Electron Positron Collider)

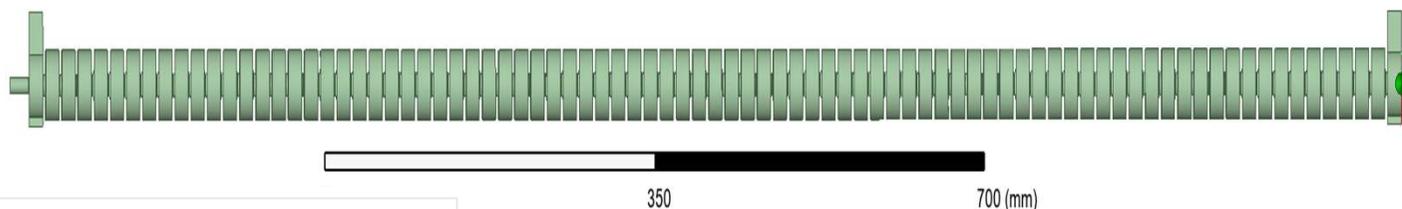
Параметр структуры	Значение
Частота	5712 МГц
Количество ускоряющих ячеек	89
Темп ускорения	40 МэВ/м
Фазовый сдвиг	$3\pi/4$
Полная длина	1.8 м
Диаметр апертуры	12-16 мм
Диаметр ускоряющей ячейки	43.196-41.869 мм
Количество структур	470
Количество клистронов	236
Мощность клистрона	50



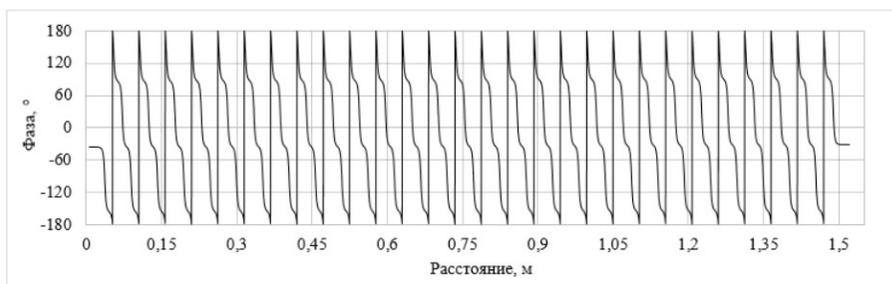
Параметр клистрона	Значение
Частота	5712 МГц
Выходная мощность	80 МВт
Длительность СВЧ импульса	3 мкс
Частота повторения	100 Гц
Усиление	54 дБ
КПД	47%
Напряжение	420 кВ
Ток пучка	403 А

На 2024 год тестирования структуры при высокой СВЧ мощности не было.

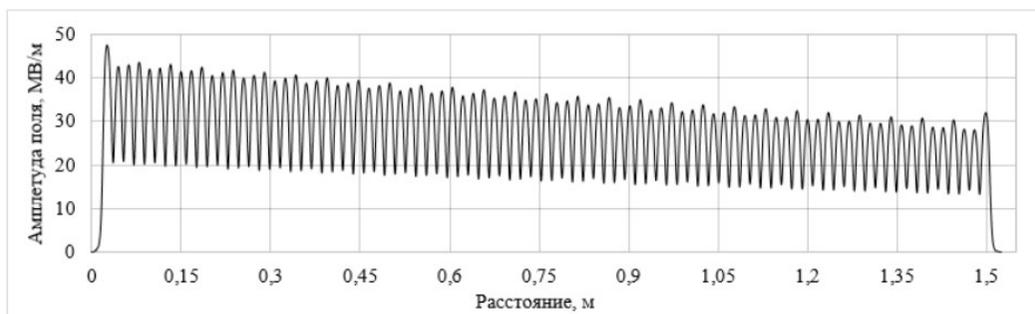
Разработка ускоряющих структур 5712 МГц в ИЯФ СО РАН



3D модель ускоряющей структуры



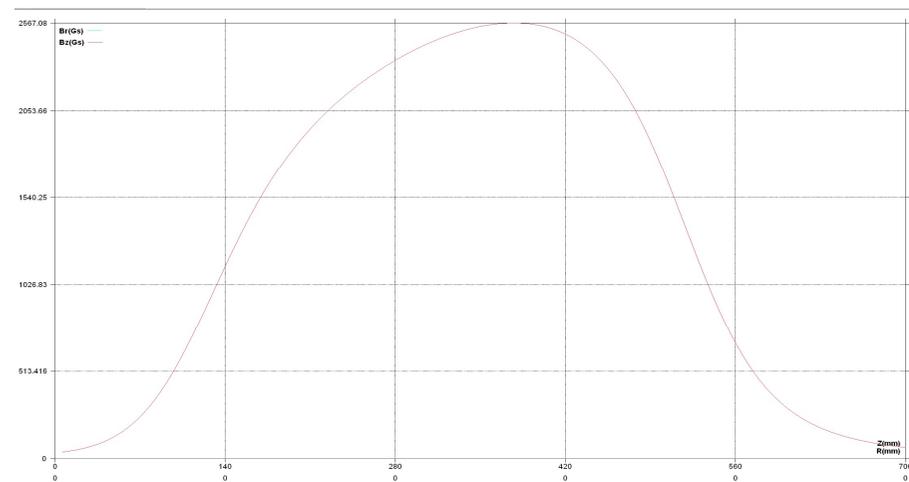
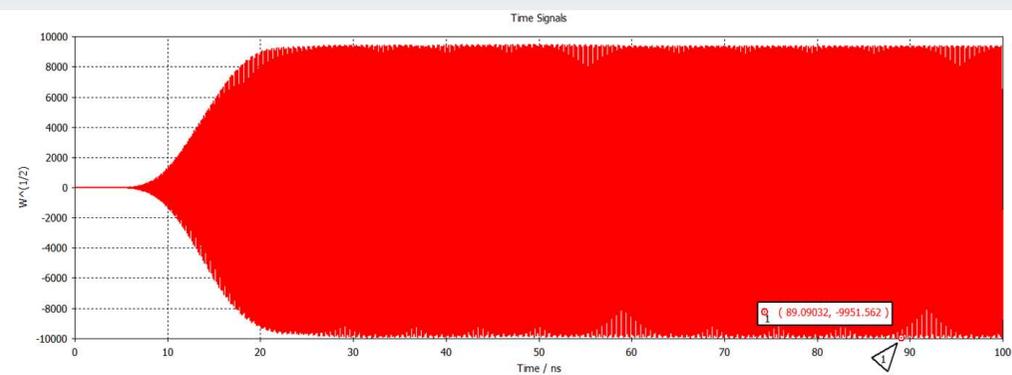
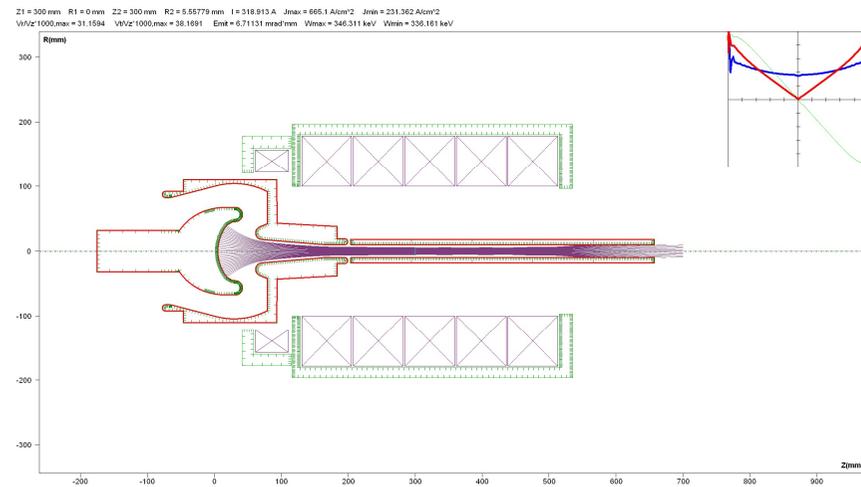
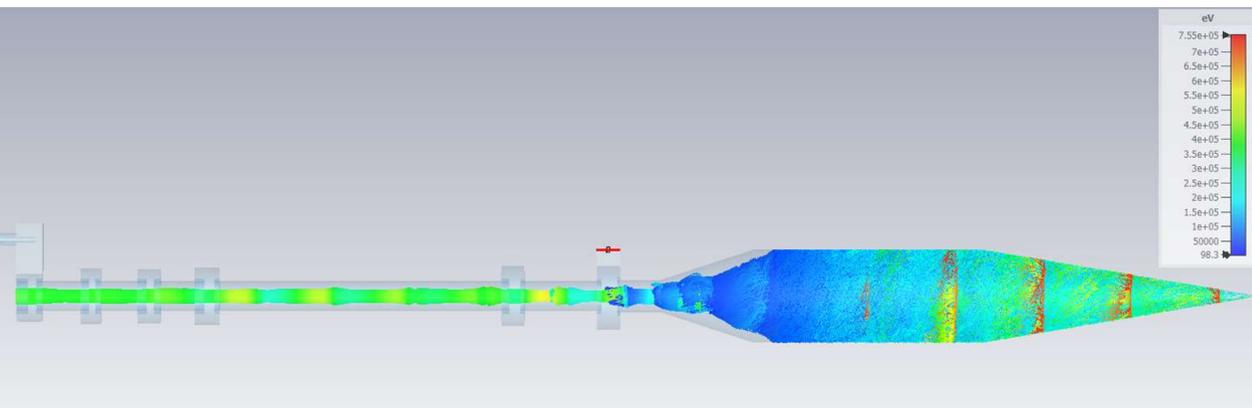
Распределение фазы электрического поля вдоль оси структуры



Распределение электрического поля на оси структуры

Параметр	Значения
Частота	5712 МГц
Вид колебания	$2\pi/3$
Уровень согласования	-29.4 дБ КСВН=1.07
Коэффициент затухания	0.27
Шунтовое сопротивление	70 МОм/м
Набор энергии	38 МэВ/м

Разработка клистрон 5712 МГц в ИЯФ СО РАН

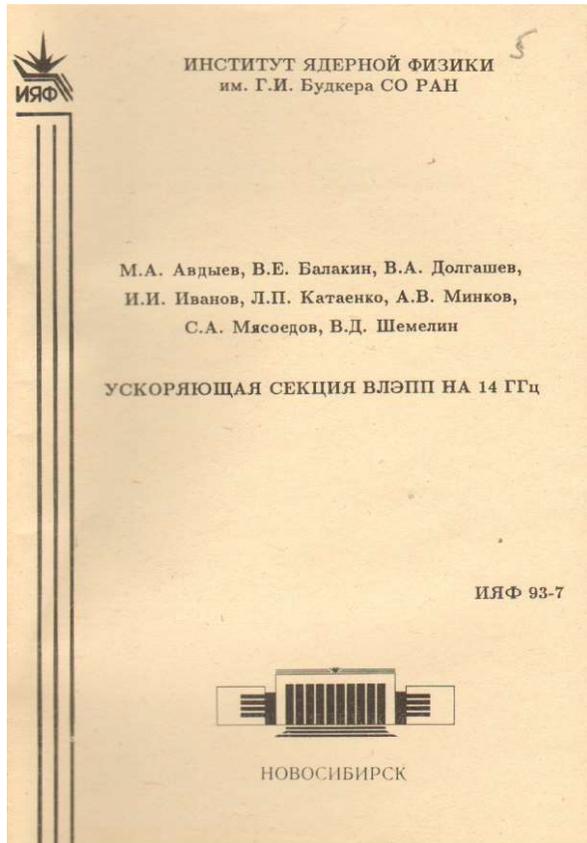


- Напряжение 380 кВ
- Ток 320 А
- Входная СВЧ мощность 230 Вт
- Выходная 50 МВт

X - диапазон

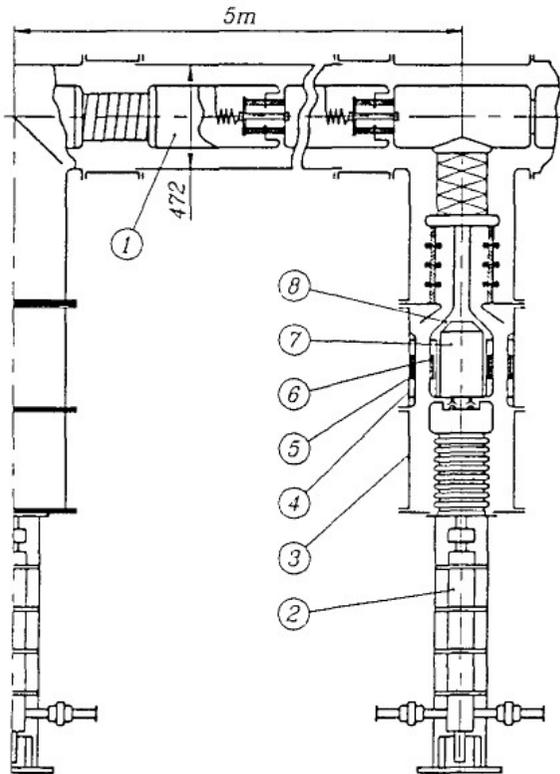


Ускоряющая структура на 14 ГГц в ИЯФ СО РАН

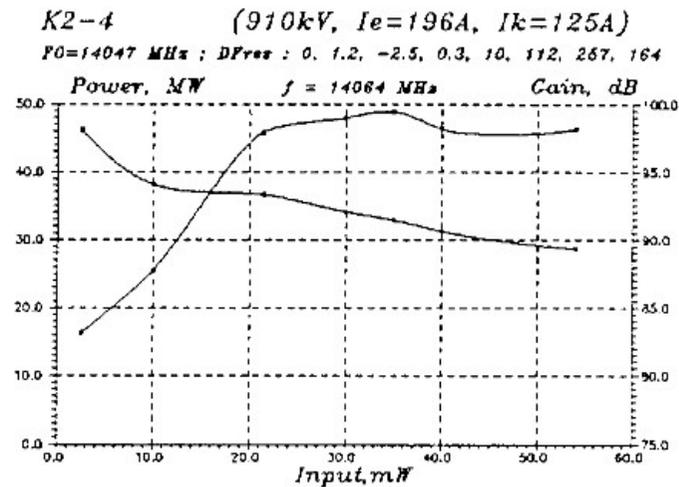


Параметр	Значения
Частота	14 ГГц
Вид колебания	$2\pi/3$
Групповая скорость	0.03с
Коэффициент затухания	0.8
Шунтовое сопротивление	110 МОм/м
Набор энергии	100 МэВ/м
Длина	1м

Клистрон на 14 ГГц в ИЯФ СО РАН



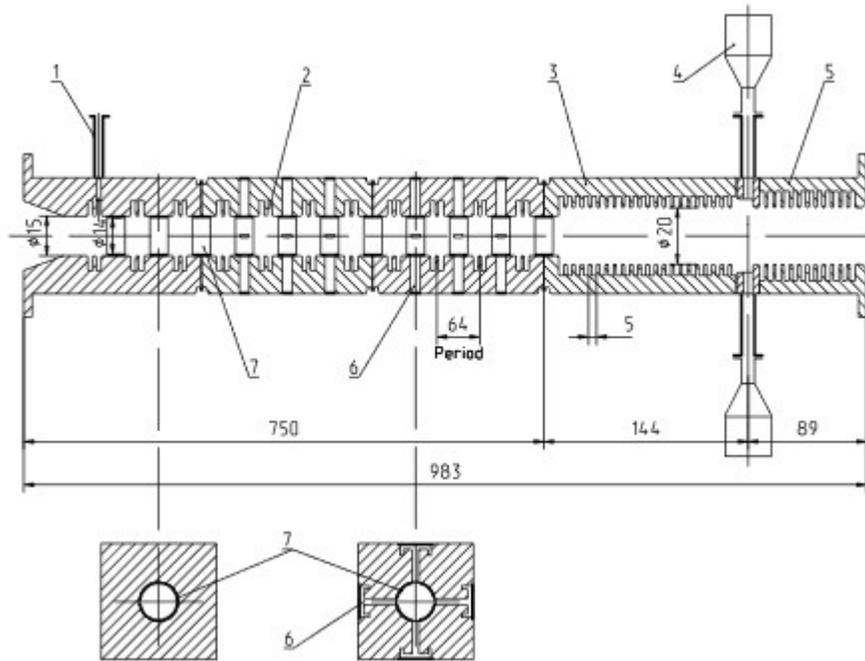
1- формирующая линия, 2 – клистрон, 3- корпус клистрона, 5 – корпус трансформатора, 6 – вторичная обмотка трансформатора, 7 - пушка, 8 – высоковольтный ввод



Из-за самовозбуждения не удалось поднять ток до номинала, что привело к выходной СВЧ мощности 50 МВт

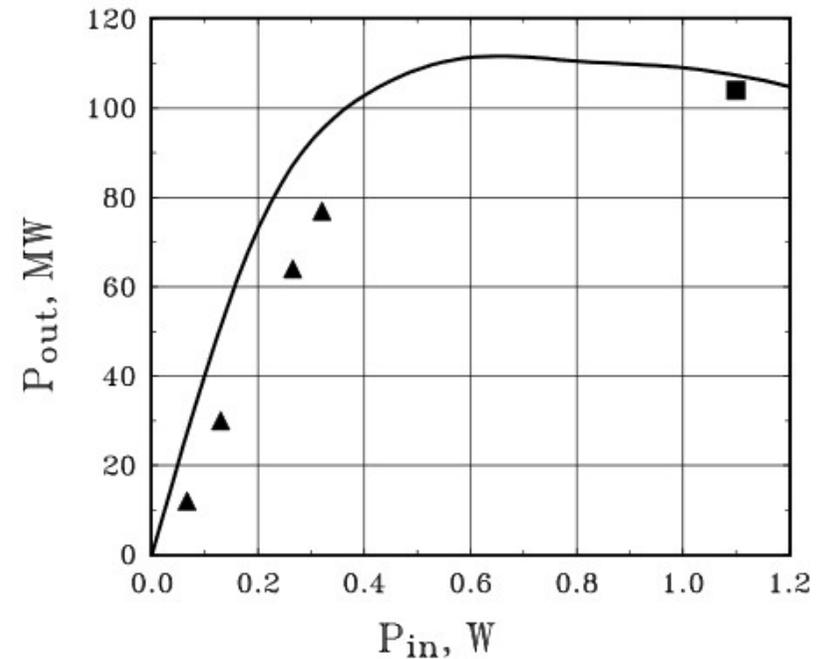
Параметр	Значение
Частота	14 ГГц
Напряжение	1 МВ
Ток пучка	300 А
Длительность импульса	0.5 мкс
Выходная СВЧ мощность	150 МВт
Усиление	80 дБ
КПД	50%
Магнитная система на основе постоянных магнитов	4.5 кГс
Диаметр канала группировки	15 мм
Выходная структура	Бегущая волна
Длина выходной стр.	110 мм
Диаметр выходной стр.	20 мм

Клистрон на 14 ГГц в ИЯФ СО РАН



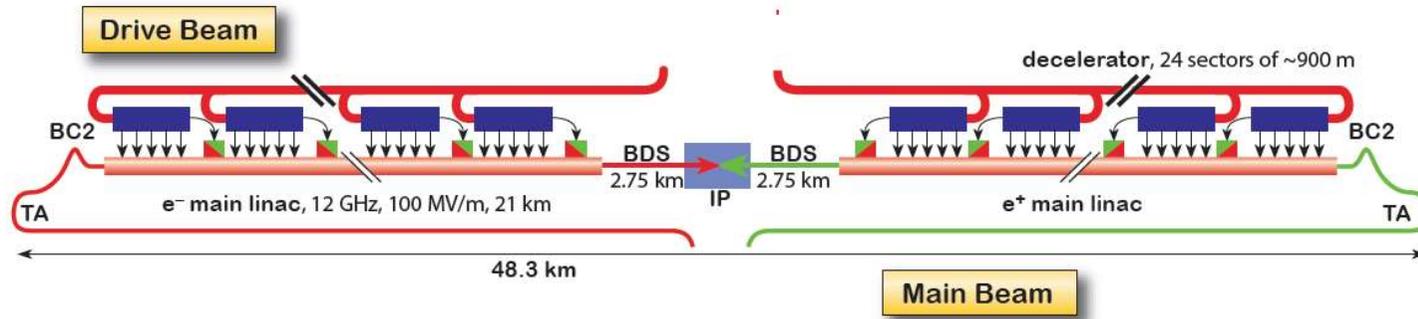
1- входной волновод, 2 – канал группировки, 3 –
 выходная структура, 4 – волноводная нагрузка, 5 –
 фильтр моды E01, 6 – фильтр моды H11, 7 – СВЧ
 абсорбер

G.V. Dolbilov, N.I. Azorsky, A.A. Fateev et al. STUDY OF 14 GHZ VLEPP KLYSTRON WITH RF
 ABSORBING DRIFT TUBES. Particle accelerator conference. 1995.

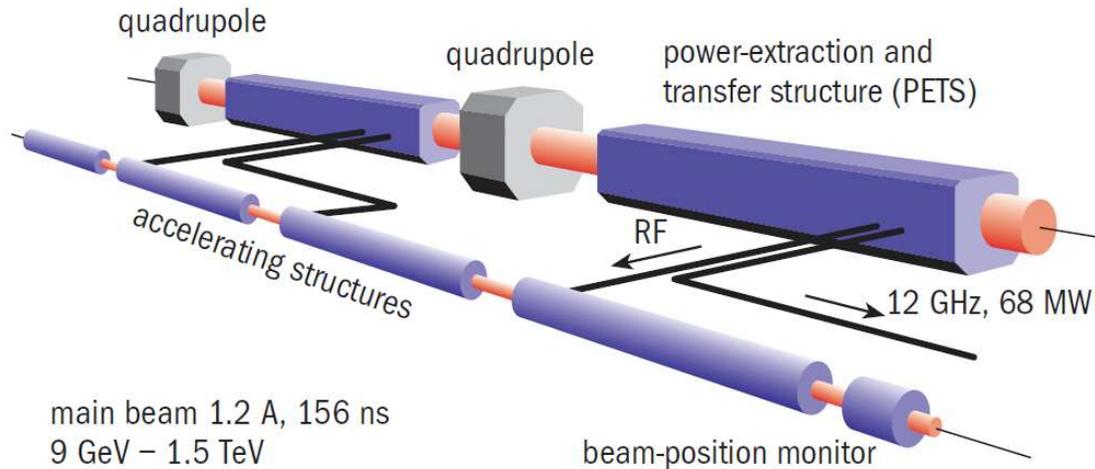


Выходная мощность vs входной мощности:
 ▲ - длительность импульса 250 нс, ■ -
 длительность импульса 50 нс

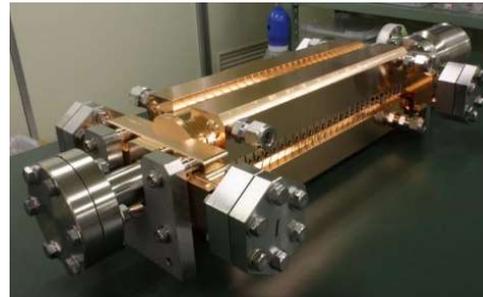
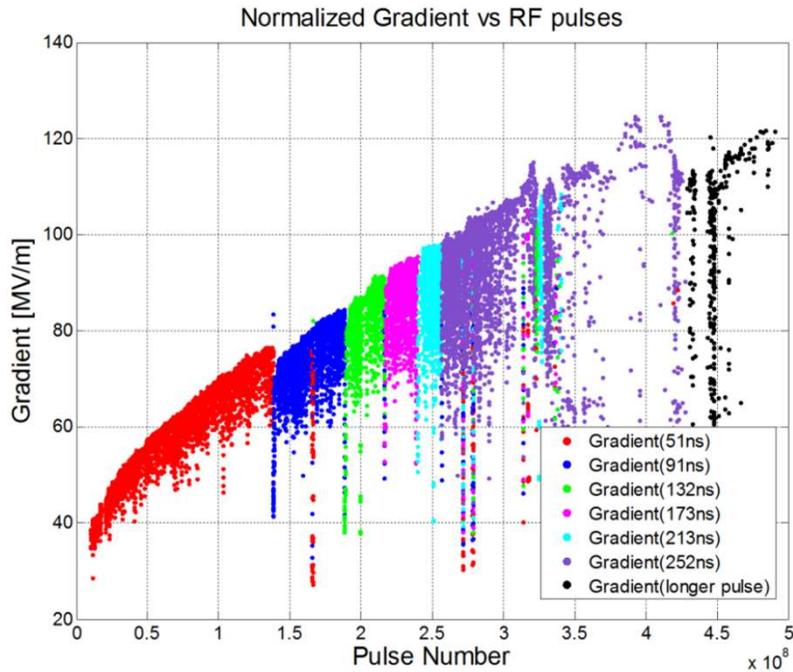
CLIC (Compact Linear Collider)



drive beam 100 A, 239 ns
2.38 GeV – 240 MeV



CLIC (Compact Linear Collider)



Параметр	Значение
Частота	12 ГГц
Количество ускоряющих ячеек	26+2 ячейки связи
Темп ускорения	100 МэВ/м (61.3 МВт)
Фазовый сдвиг	$2\pi/3$
Полная длина	230 мм
Длина ускоряющей ячейки	17.495 мм
Толщина диафрагмы	1.67 мм
Диаметр апертуры	3.15-2.35 мм
Шунтовой импеданс	81-103 МОм/м
Добротность	5536
Средняя групповая скорость	0.0165с-0.0083с
Время заполнения	67 нс
Максимальное поле на поверхности	230 МВ/м

V. Dolgashev. High gradient, X-band and above, metallic RF structures. 15 September, 2015 2nd European Advanced Accelerator Concepts Workshop (EAAC 2015)
https://agenda.infn.it/event/8146/contributions/71603/attachments/51963/61378/Dolgashev_EAAC2012_High_gradient_metallic_structures_final_14Sep2015.pdf

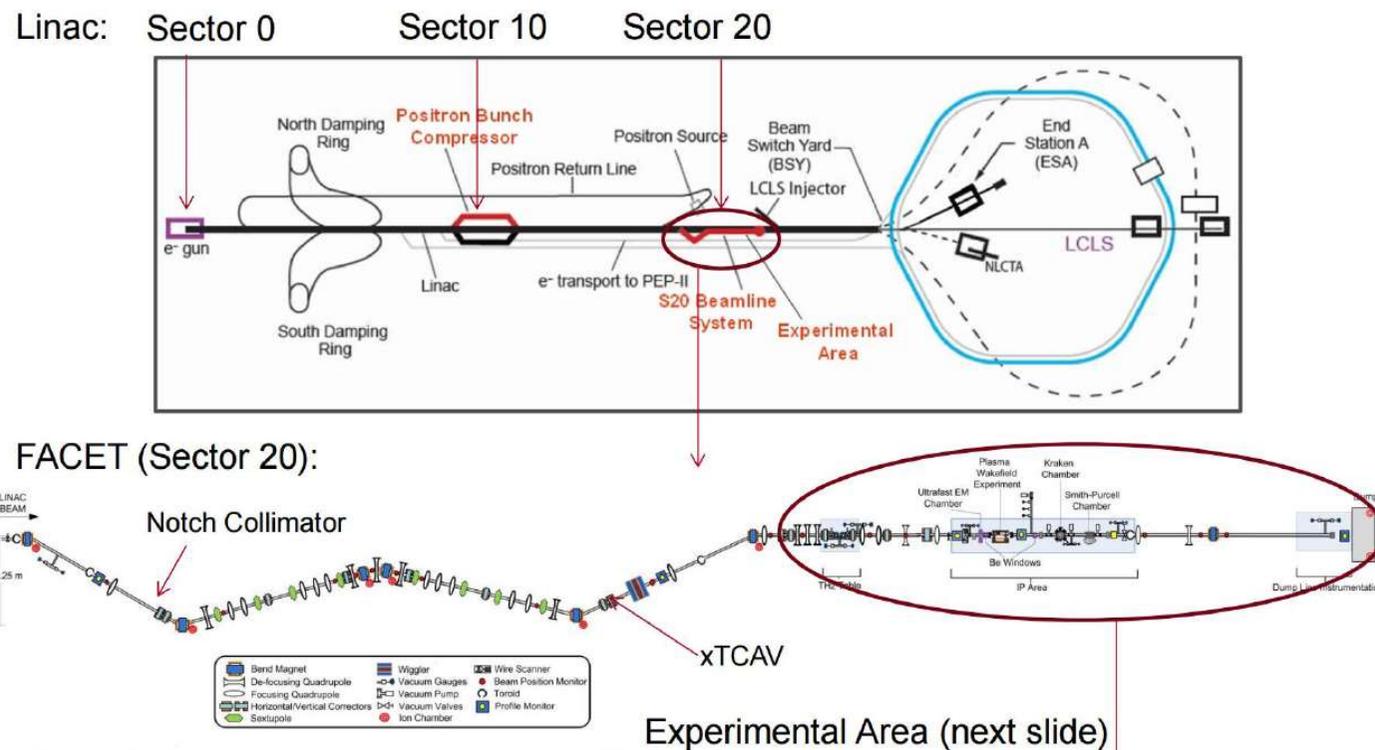
A. Grudiev, W. Wuensch. DESIGN OF THE CLIC MAIN LINAC ACCELERATING STRUCTURE FOR CLIC CONCEPTUAL DESIGN REPORT. Proceedings of Linear Accelerator Conference LINAC2010, Tsukuba, Japan

W - диапазон



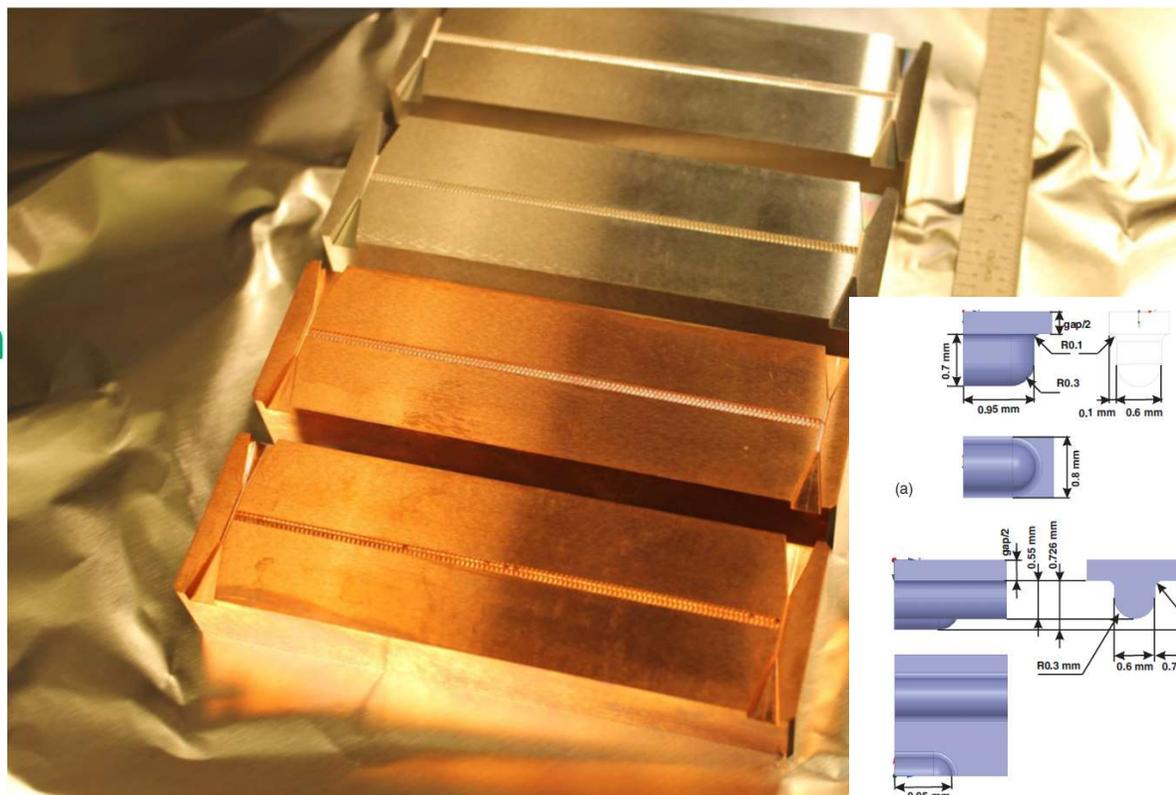
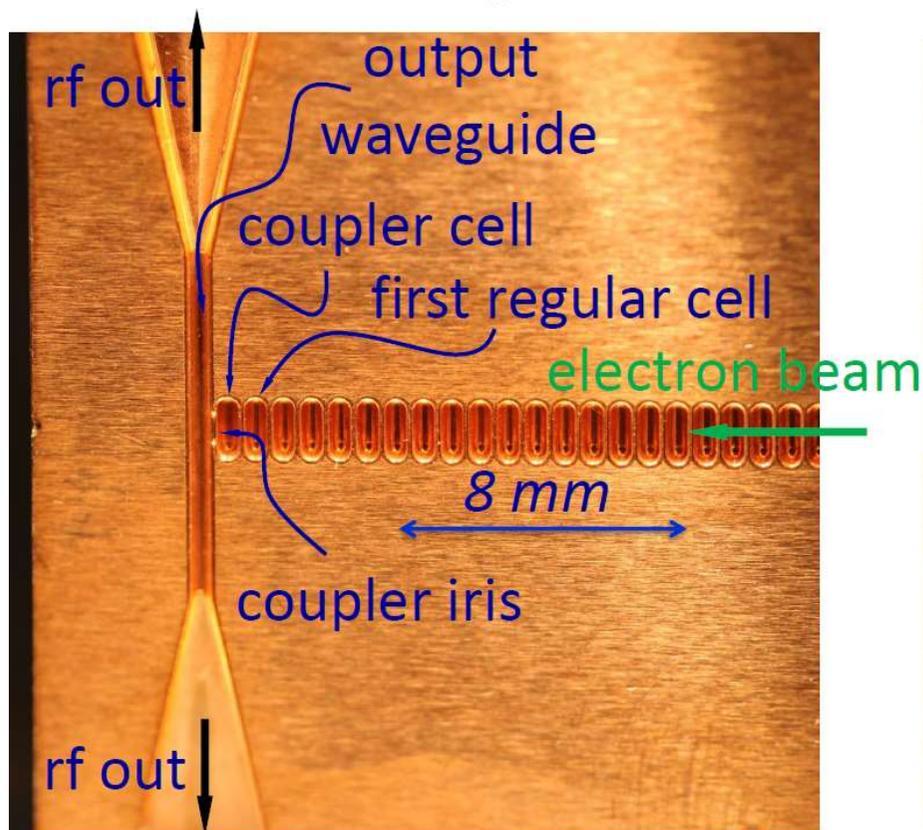
FACET (SLAC) - Facility for Advanced Accelerator Experimental Tests

FACET (Facility for Advanced Accelerator Experimental Tests) — это новый пользовательский центр в Национальной ускорительной лаборатории SLAC. Первый запуск начался весной 2012 года с использованием электронных пучков с энергией 20 ГэВ и зарядом 3 нКл. Центр предназначен для получения коротких (20 мкм) пучков с малым (20 мкм в ширину) поперечным размером, что позволяет создавать уникальные мощные пучки. FACET поддерживает исследования во многих областях, но в частности, в области плазменного кильватерного ускорения, диэлектрического кильватерного ускорения и высокочастотных ускоряющих структур. FACET также является источником ТГц-излучения для материаловедения. В будущем планируется получение позитронов.



C. Hast, SLAC Electron Beam Test Facilities 5 MeV to 20 GeV, SLAC SiD Workshop, Oct. 15th, 2013

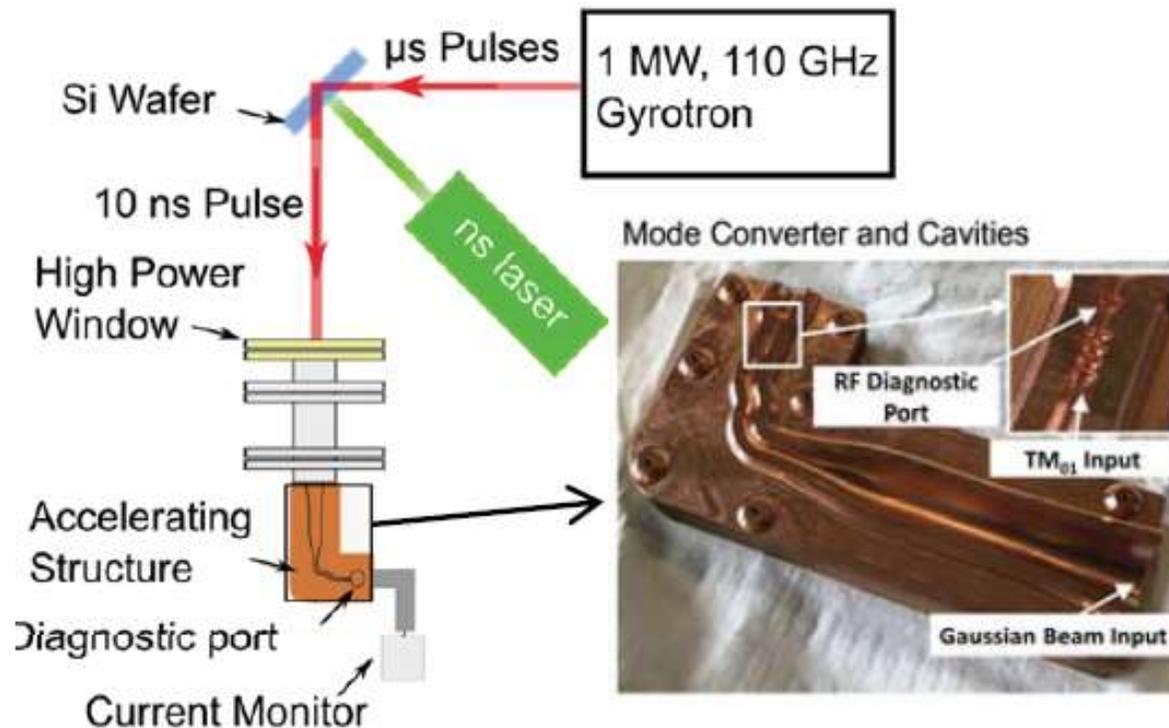
Ускоряющие структуры с частотой 100 ГГц в пользовательском центре FACET



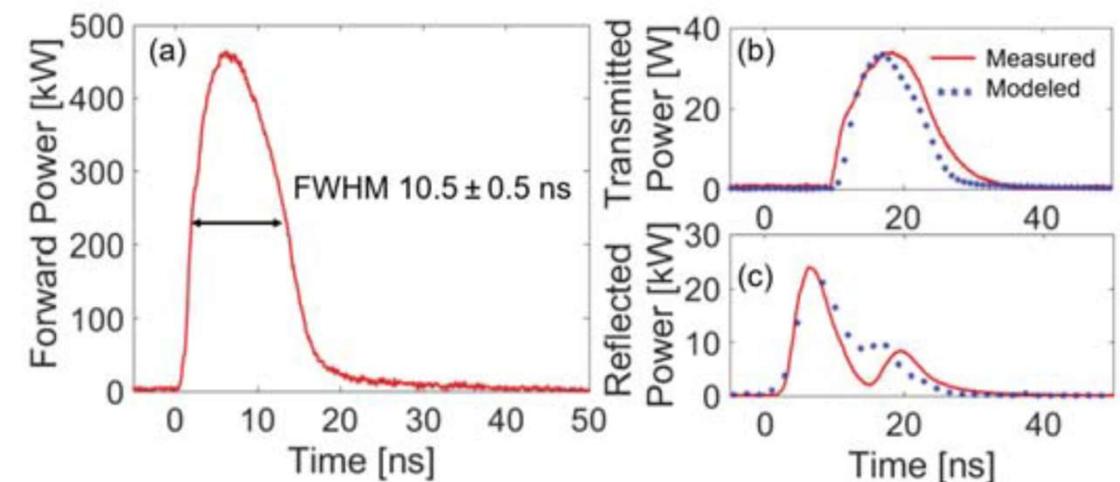
V. Dolgashev. High gradient, X-band and above, metallic RF structures. 15 September, 2015 2nd European Advanced Accelerator Concepts Workshop (EAAC 2015)
https://agenda.infn.it/event/8146/contributions/71603/attachments/51963/61378/Dolgashev_EAAC2012_High_gradient_metallic_structures_final_14Sep2015.pdf

Измерения одиночного резонатора с частотой 100 ГГц (центр FACET)

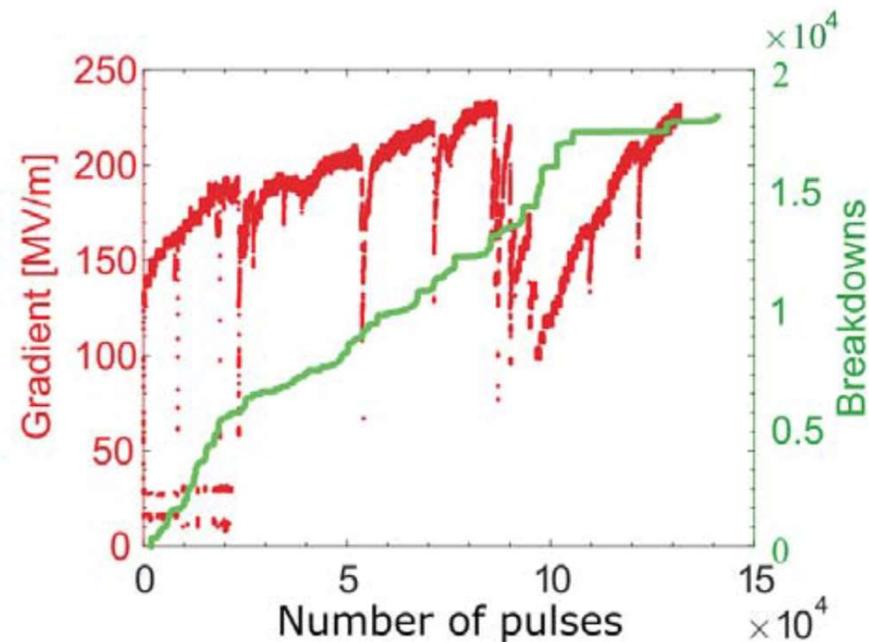
Гиротрон генерирует импульсы длительностью 3 мкс с частотой повторения 1 Гц. Для уменьшения длительности импульса используется одиночная кремниевая пластина. Лазерный импульс с длиной волны 532 нм и длительностью 8 нс облучает кремниевую пластину, которая в обычном состоянии прозрачна для СВЧ мощности. Поглощенные фотоны увеличивают эффективную проводимость кремния за счет фотопроводимости пока кремниевая пластина не станет эффективным СВЧ-отражателем с коэффициентом отражения более 70%. Модулированный мощный импульс с частотой 110 ГГц подается в ускоряющий резонатор с шириной импульса на полувысоте (FWHM) 10 нс. Частота колебаний резонатора регулируется термически, чтобы выровнять её с частотой гиротрона.



Измерения одиночного резонатора с частотой 100 ГГц (центр FASET)



(a) Падающая СВЧ мощность в районе 470 кВт. (b) Прошедшая и (c) отраженная мощности

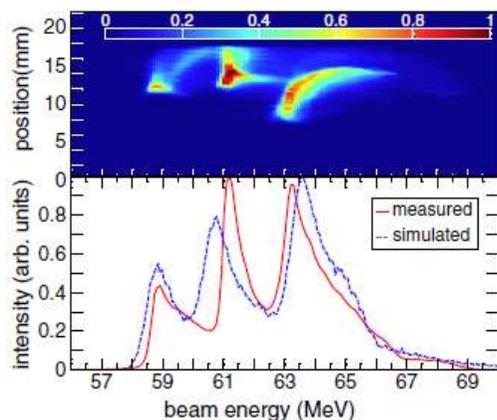
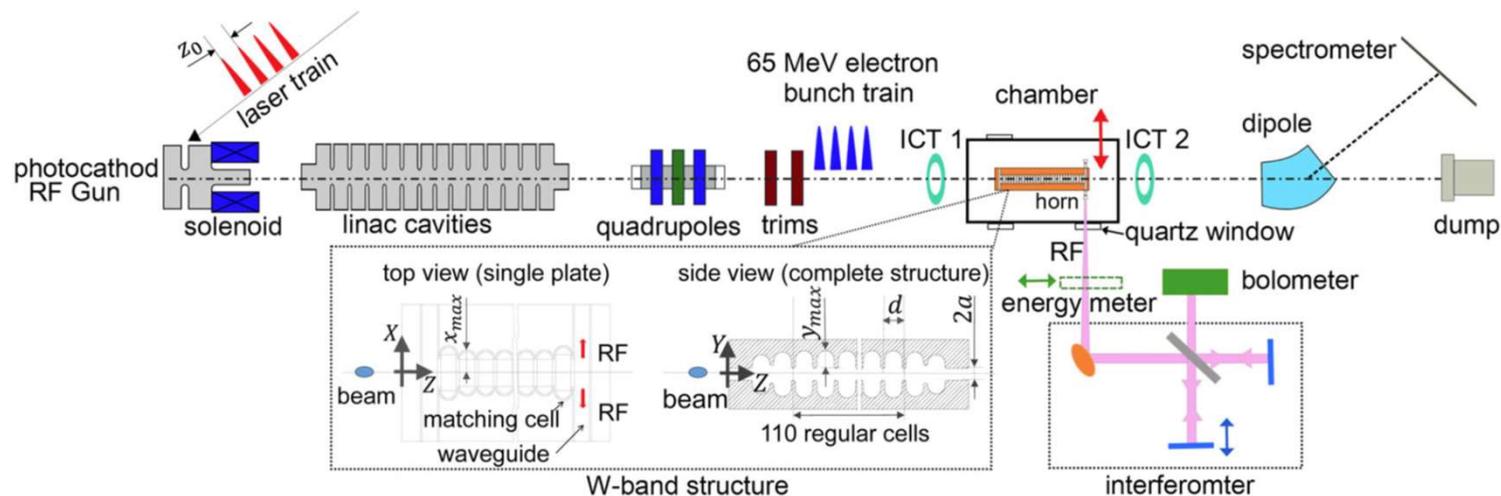


Красная кривая — пиковый градиент поля в резонаторе, **зеленая кривая** — накопленные значения пробоя

Возбуждение структуры 100 ГГц последовательностью сгустков (центр FASSET)

- Последовательность пучков генерировалась из СВЧ фотопушки с частотой 1.3 ГГц.
- Количество лазерных импульсов варьировалось от 1 до 4.
- Частота планарных ускоряющих резонаторов 91 МГц с модой колебания $2\pi/3$, длина – 123 мм.
- Энергия инжектированных электронов – 65 МэВ.
- Заряд одного сгустка изменялся от 0.1 нКл до 4 нКл.
- RMS длительность пучка 0.1-0.6 мм (0.3-2 пс).

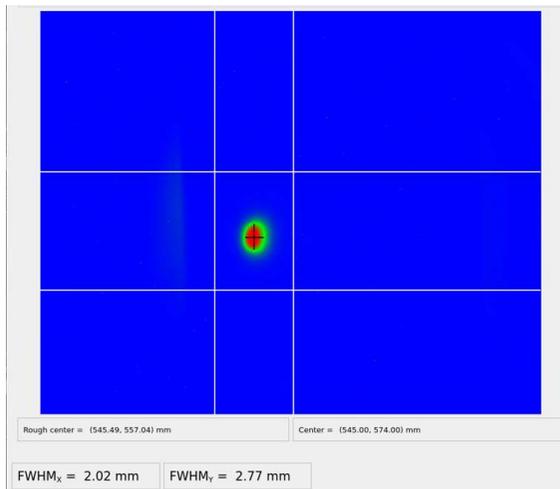
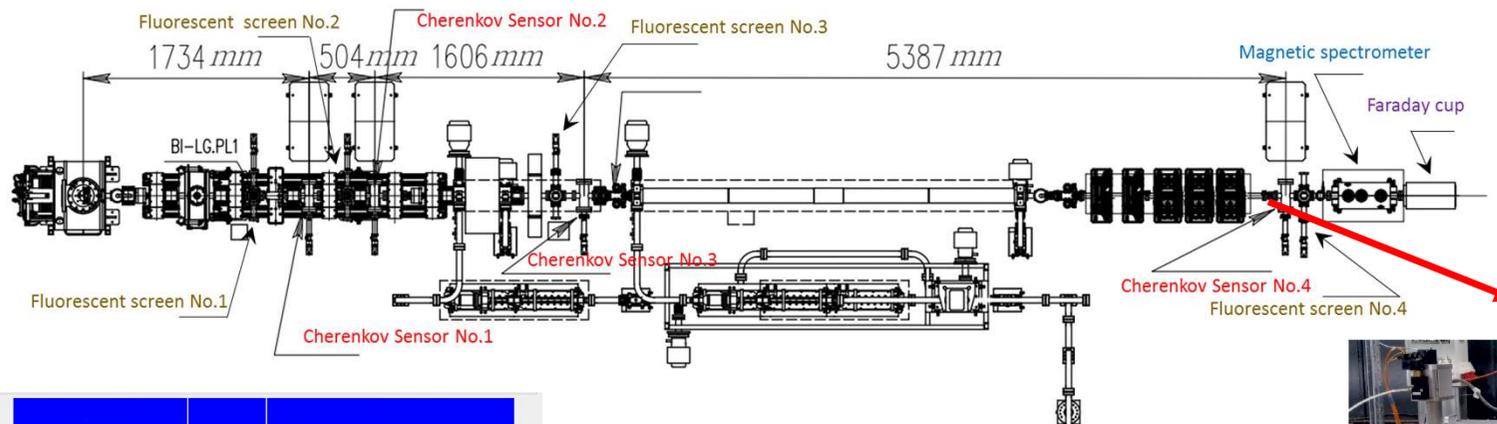
Возбуждаемый СВЧ сигнал проходил через антенну и кварцевое окно в детектирующую систему. Измерения энергии происходило фотоакустическим методом. Дополнительно измерялась энергия прошедших электронов с помощью спектрометра.



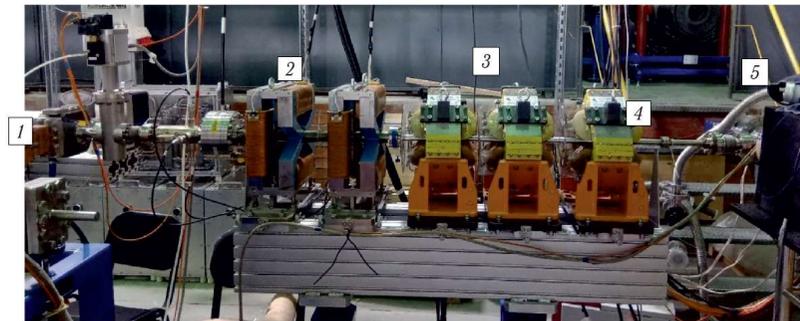
Измерения энергетического спектра последовательности сгустков, проходящих через структуру. Три пучка с зарядом по 2 нКл каждый. **Результаты измерений позволили заключить о достигнутом градиенте ускорения 85 МВ/м**

D. Wang, S. Antipov, C. Jing, V. Dolgashev et al. Interaction of an Ultrarelativistic Electron Bunch Train with a W-Band Accelerating Structure: High Power and High Gradient. PRL 116, 054801 (2016) PHYSICAL REVIEW LETTERS

Разработка мм-структуры в ИЯФ СО РАН



Параметры используемого пучка	Значения
Энергия пучка	35 МэВ
RMS относительный энергетический разброс	1%
Длительность (ШПВ)	20 пс
Поперечный эмиттанс	40 мм мрад
Заряд	200 пКл



Миллиметровая структура на стенде линейного ускорителя: 1 — ускоряющая структура 2856 МГц; 2 — двухкоординатные дипольные корректоры; 3 — квадрупольные линзы; 4 — миллиметровая структура; 5 — люминофорный датчик (на фото закрыт защитным экраном)

Прошедший пучок 20 пКл через мм-структуру на люминофорном датчике

М.В.Арсентьева, А. Е.Левичев, Е.В.Лидер, О.И.Мешков, Д.А.Никифоров. Изготовление и тестирование структуры резонаторов миллиметрового диапазона длин волн. Письма в ЭЧАЯ. 2025. Т. 22, № 3(260). С. 478–491

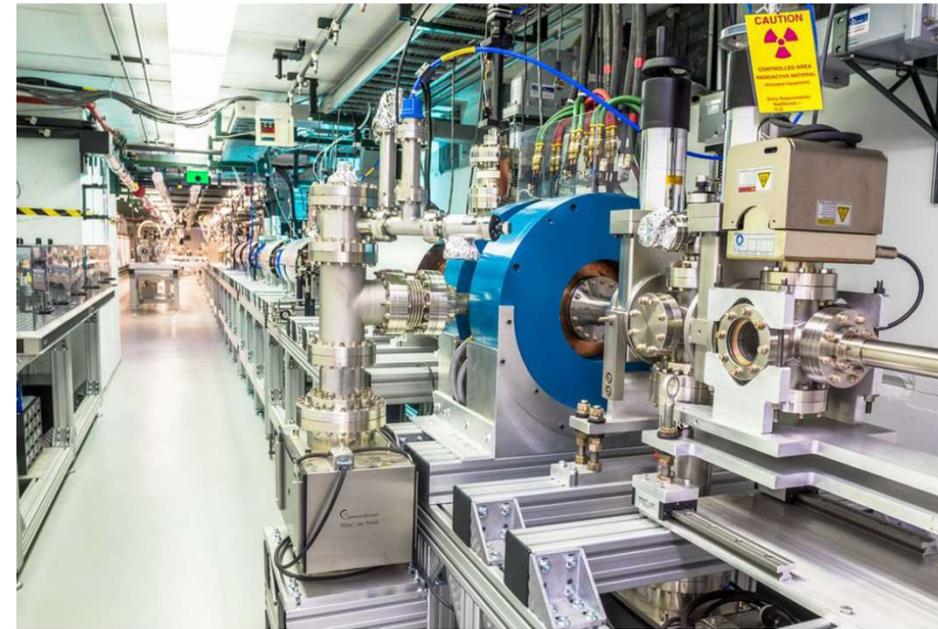
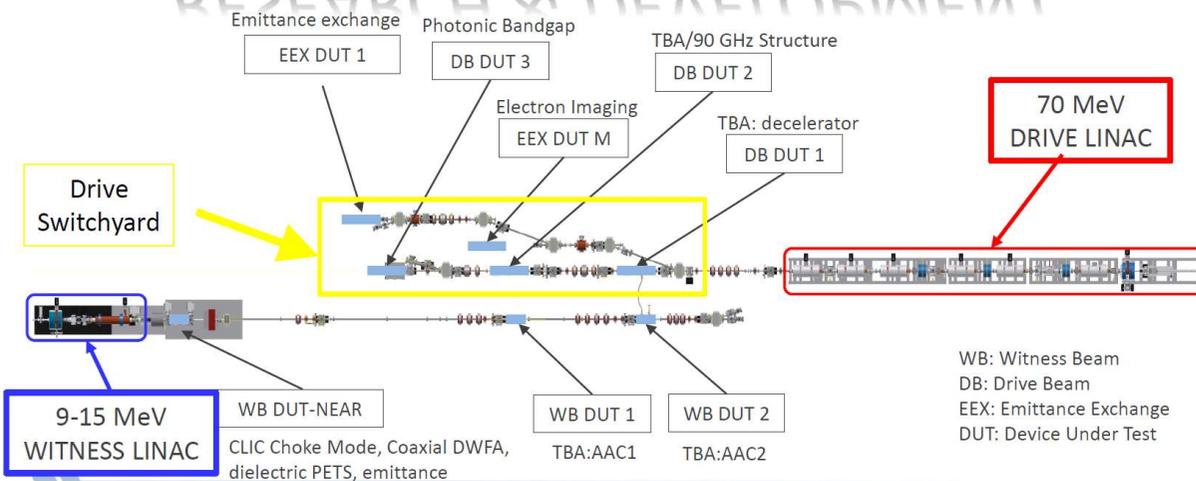
Диэлектрические ускоряющие структуры

Argonne Wakefield Accelerator Facility (AWA)

- Два СВЧ фотоинжектора (1.3 ГГц)
- Три экспериментальных канала
- Несколько площадей для экспериментов

EXPERIMENTS

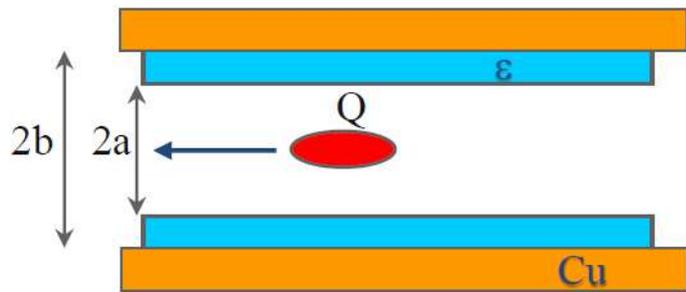
FACILITY FOR ADVANCED ACCELERATOR RESEARCH & DEVELOPMENT



J. Power. WAKEFIELD ACCELERATION AT THE AWA FACILITY HIGH ENERGY PHYSICS DIVISION ARGONNE NATIONAL LABORATORY. HG2016 Workshop.

https://indico.cern.ch/event/637370/contributions/2581775/attachments/1458562/2252141/20170512_power_JohnPower_Monday_HG2016-7.pdf

Диэлектрические ускоряющие структуры



$$W_z \approx \frac{Q}{a^2} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{2\pi\sigma_z}{\lambda}\right)^2\right) \cos(kz)$$

Схема с пучком драйвером

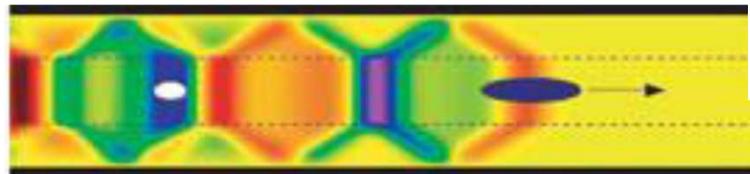
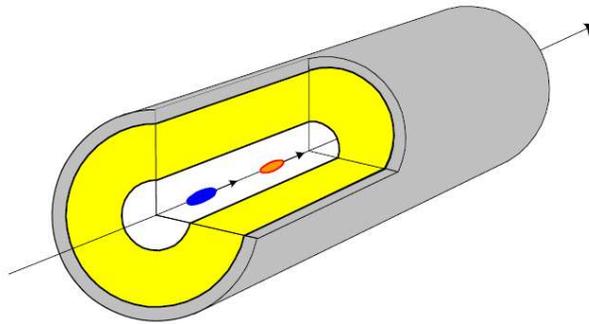
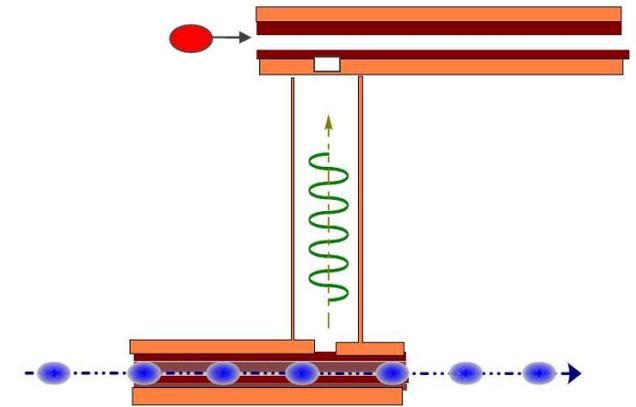


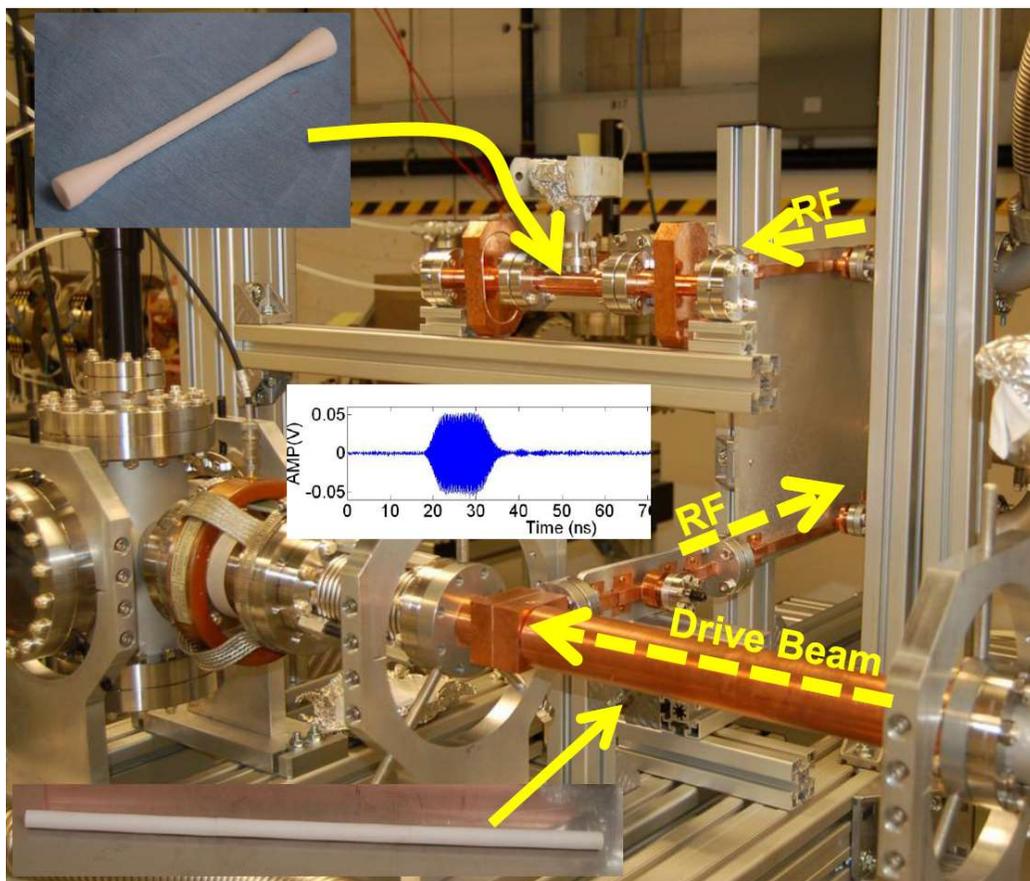
Схема с двумя структурами



Кварц, кордиерит...



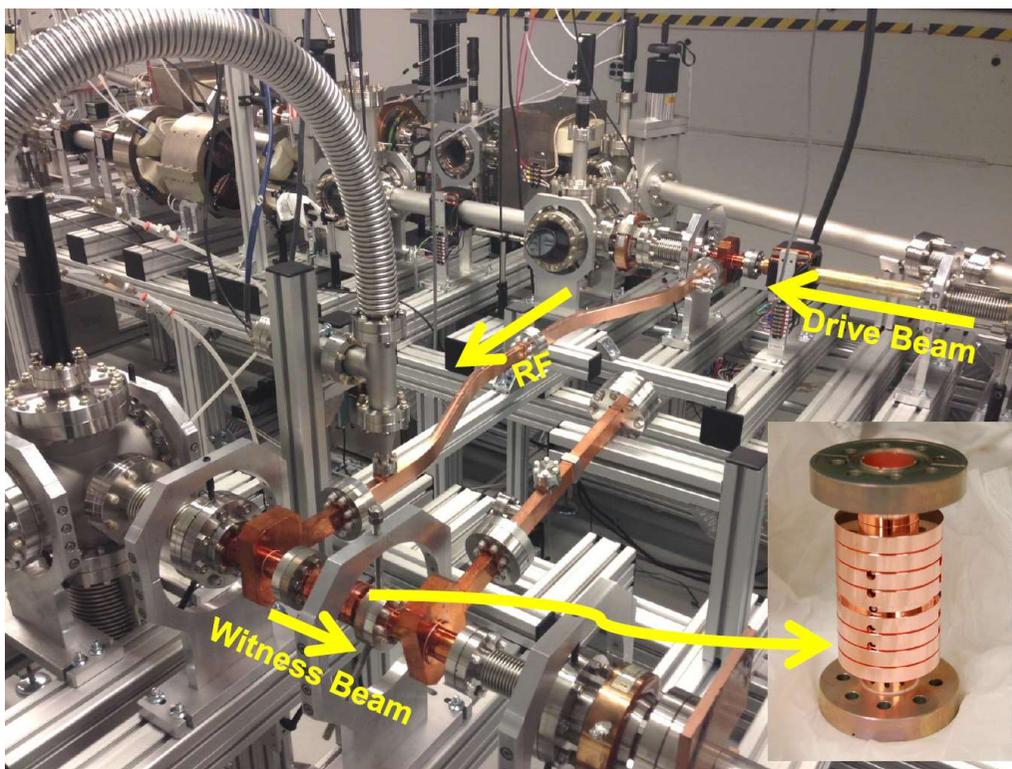
Установка с двумя диэлектрическими структурами с частотой 26 ГГц (центр AWA)



- Измеренная мощность соответствует 37 МВт
- Эффективный градиент 54 МВ/м
- Отсутствие пробоев
- Длительность СВЧ импульса 5-15 нс, зависит от длительности последовательностей сгустков заряда

Перспектива – достичь мощности 300 МВт и темпа ускорения 150 МэВ/м

Установка с двумя металлическими структурами с частотой 11.7 ГГц



Замедлитель



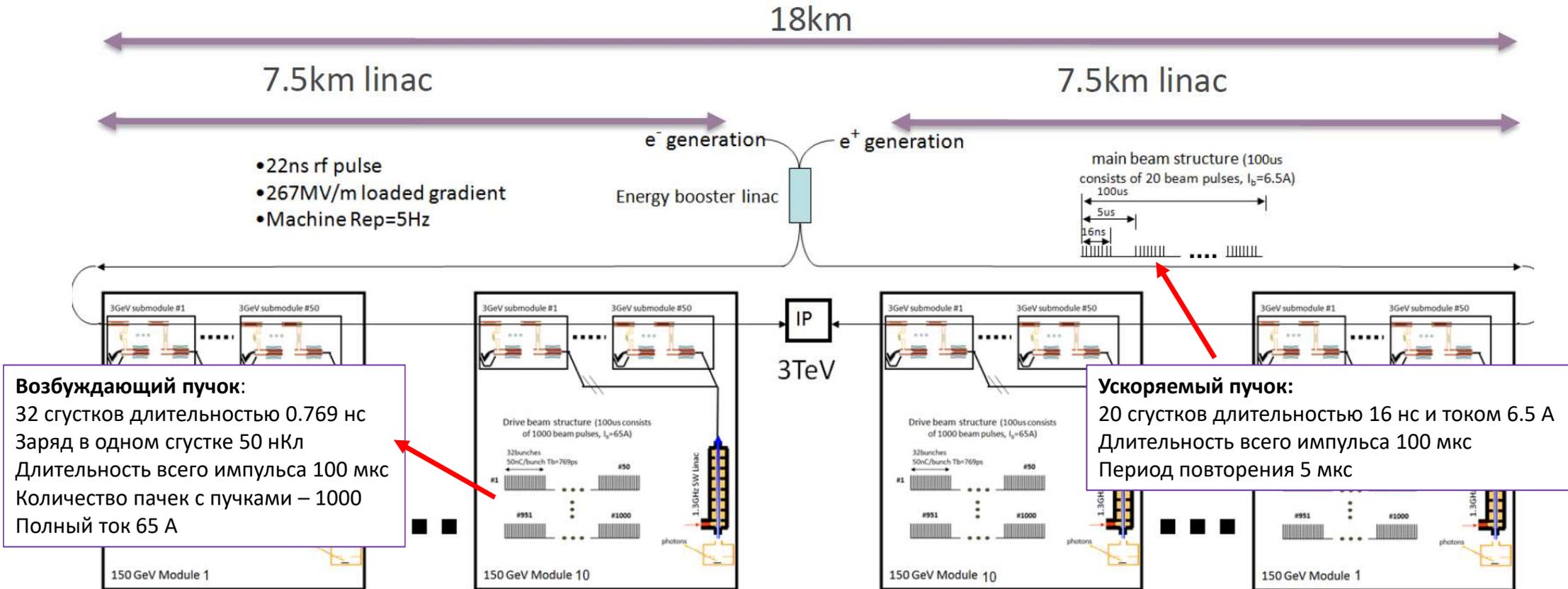
Ускоритель



Параметр	Значение
Частота	11.7 ГГц
Мода	$2\pi/3$
Апертура	17.6 мм
Длина	300 мм
Заряд	8 x 20 нКл
СВЧ мощность	55 МВт

Параметр	Значение
Частота	11.7 ГГц
Мода	$2\pi/3$
Апертура	6 мм
Длина	30 мм
Входная мощность	50 МВт
Градиент	100 МВ/м

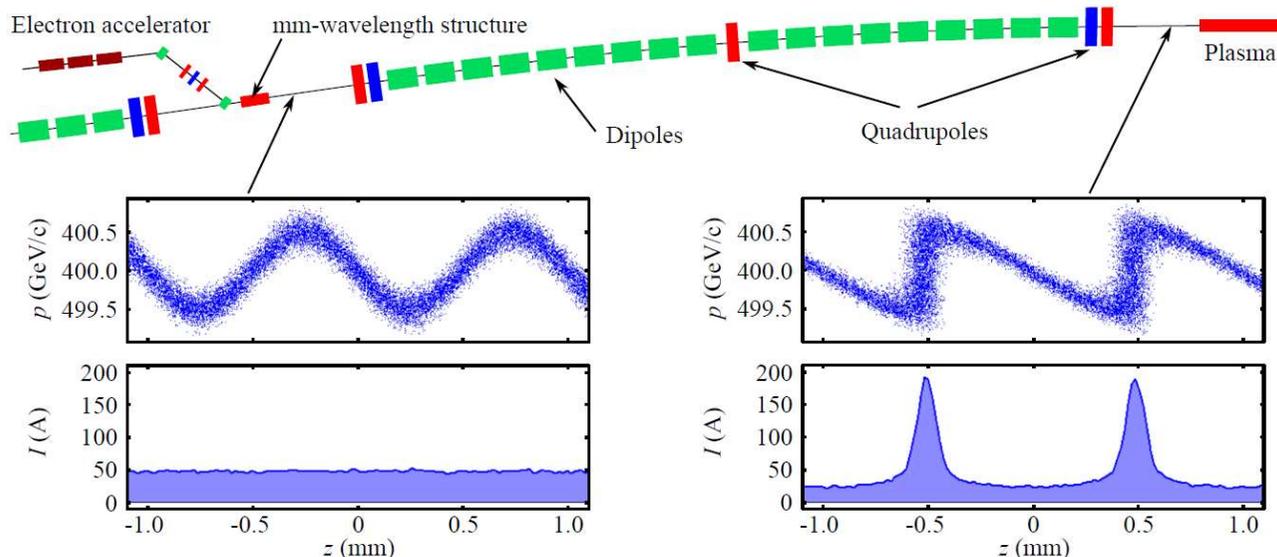
Линейный коллайдер Аргонской Лаборатории



- Разработанные технологии и дешевые в производстве диэлектрических структурах
- Короткий СВЧ импульс (20 нс) для эффективного градиента 200 МэВ/м
- Модульная схема

Группировка пучка протонов в диэлектрической структуре

Схема модуляции протонного пучка для проекта AWAKE: протонный пучок из SPS с энергией 400 ГэВ проходит через диэлектрическую структуру, возбуждаемую электронным пучком. Требуемый энергетический разброс протонного пучка ± 500 МэВ



Модуляция энергии протонного пучка и тока до и после ахромата

Параметр	Значение
Частота	300 ГГц
Темп ускорения	100 МВ/м
Внутренний радиус керамики	1мм
Толщина керамики	0.061 мм
Материал	кварц
Диэлектрическая проницаемость	3.75
Заряд электронов	5 нКл
Энергия электронов	600 МэВ
Длина электронного пучка (сигма)	0.1 мм

I. Sheinman*, Petrenko**. HIGH-ENERGY MICRO-BUNCHER BASED ON THE MM-WAVELENGTH DIELECTRIC STRUCTURE. Proceedings of RuPAC2016, St. Petersburg, Russia

* Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

**Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН

Заключение

1. Увеличение частоты ускорителей позволяет уменьшить размер установок и увеличить темп ускорения частиц
2. Переход к частотам 100 ГГц и более не выглядит утопической задачей
3. Исследования в данной области проводятся в авторитетных ускорительных центрах
4. В России есть хорошие возможности создания ускорителей с высокими рабочими частотами

Гиротроны Института прикладной физики (Нижний Новгород)

<https://www.ipfran.ru/science/high-power-electronics/gyroresonance/the-gyrotrons-for-UTS>

	Установка	Частота, ГГц	Мощность, кВт
Токамак ASDEX-Up	IPP, Германия	140	500/700
		140/105	900/700
Токамак FTU	ENEA, Италия	140	500
Токамак TCV	Ecole Polytechnique, Швейцария	84	500
Токамак ITER	Международный проект Цель/результат 2006	170	1000/640
Токамак ASDEX-U	Совместный проект (Россия – Германия) системы с многочастотными гиротронами	105–140 (4–6 частот)	1000

Спасибо за внимание



Гироклистрон с частотой 91.392 ГГц и мощностью 10 МВт



В 2015 году компания Calabazas Creek Research, Inc. совместно с Университетом Мэриленда разработала гироклистрон с мощностью 10 МВт и частотой 91,392 ГГц для исследований в области ускорителей W-диапазона. Устройство предназначено для генерации импульсов длительностью 1 микросекунда на частоте 120 Гц с КПД 40% и коэффициентом усиления 55 дБ. Пучок с током 55 А при напряжении 500 кВ. Шесть группирующих резонаторов + схема удвоения частоты. Сверхпроводящий магнит создает магнитное поле 28 кГс в области пушки.

V.A. Dolgashev, P. Emma, M. Dal Forno, A. Novokhatski, S. Weathersby. Attosecond Diagnostics of Multi-GeV Electron Beams Using W-Band Deflectors. FEIS-2: Femtosecond Electron Imaging and Spectroscopy Michigan State University

https://www.bmtdynamics.org/FEIS-2/talks/FEIS-2_Dolgashev.pdf