

Стенд для проведения уникальных радиационных тестов с быстрыми нейтронами на установке БНЗТ

В.С. Бобровников

✉ v.s.bobrovnikov@inp.nsk.su

15/05/2024

ИЯФ СО РАН



Мотивация

- 1 Увеличение светимости и энергии сталкиваемых пучков – общая тенденция в ФВЭ, позволяющая получить достаточно большую статистику необходимую для проведения все более и более сложного анализа. Это как и новые планируемые эксперименты, так и модернизация существующих коллайдеров и детекторов
- 2 В частности, в рамках масштабной модернизации БАК (*LS3 2026–2029, Run4 2029–2033*), для работы с высокой светимостью модернизируются все четыре детектора, работающие на этом коллайдере, в их числе детектор CMS (Compact Muon Solenoid)
- 3 Обратная сторона медали это значительное увеличение радиационной нагрузки на системы детекторов
- 4 **Нейтронное облучение** дает один из основных вкладов в радиационную нагрузку. Быстрые нейтроны с энергией порядка МэВ фактически разрушают ядра материалов (особенно это критично для полупроводников)

Новосибирская группа CMS

- НГУ является участником коллаборации CMS ↔ лаборатория физики адронных взаимодействий
- Одной из сфер ответственности группы является система лазерной калибровки электромагнитного калориметра детектора CMS
- В данной системе используется оптоволокно для передачи света от кристаллов к фотонным детекторам. Под воздействием облучения (поток нейтронов) оптоволокно темнеет из-за разрушения его структуры, особенно в местах максимально близких к пучку, где создается наибольший радиационный фон
- Необходима проверка **радиационной стойкости** этих материалов под воздействием больших потоков нейтронного излучения, до 10^{14} neq/cm^2



Остается только решить вопрос – где взять такой поток нейтронного излучения в Новосибирске ?

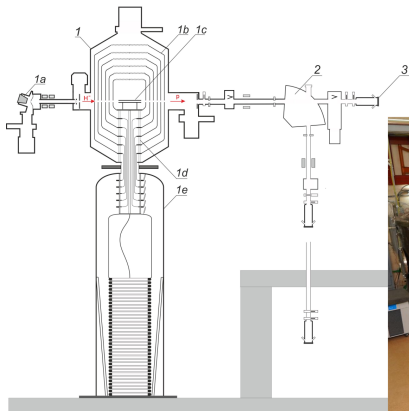


Установка БНЗТ как источник быстрых нейтронов

Бор-нейтронзахватная терапия (БНЗТ)

- 1 Избирательное уничтожение злокачественных опухолей путем накопления в них стабильного изотопа бор-10 и последующего облучения эпителивыми нейтронами (энергия 0.5 эВ ÷ 10 кэВ, реакция $p + {}^7\text{Li} \rightarrow {}^7\text{Be} + n$)
- 2 В результате поглощения нейтрона бором происходит ядерная реакция с большим выделением энергии в клетке, что приводит к ее гибели

Установка БНЗТ (VITA) в ИЯФ СО РАН



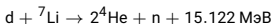
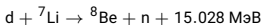
1. ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией
 - 1a. источник отрицательных ионов водорода
 - 1b. промежуточный электрод
 - 1c. аргоновая мишень
 - 1d. проходной изолятор
 - 1e. источник питания ускорителя
2. поворотный магнит
3. нейтронгенерирующая мишень



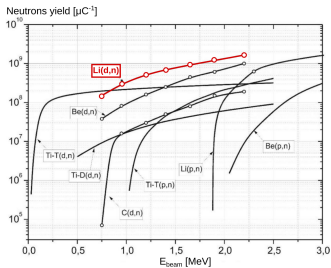


Установка БНЗТ как источник быстрых нейтронов

- Возможность генерации быстрых нейтронов была впервые продемонстрирована в октябре 2019 года
- В источнике отрицательных ионов водород был заменен на дейтерий
- Основные ядерные реакции при взаимодействии пучка дейтронов с литием



Kononov V., Bokhovko M., Kononov O. Accelerator Based Neutron Sources for Medicine // Proc. of Intern. Symp. on Boron Neutron Capture Therapy. Novosibirsk, 2004



Особенность эксперимента с мощными потоками быстрых нейтронов

- Оценка уровня дозы непосредственно в зоне генерации быстрых нейтронов дает значение в несколько десятков Зв/ч (*летальная доза > 15 Зв ⇒ смерть в течение 1–5 суток*)
- С целью обеспечения необходимой безопасности генерация нейтронов производится на отметке –4 метра в отдельном помещении, стены и потолок которого облицованы экранирующим полиэтиленом (NEUTROSTOP C3)

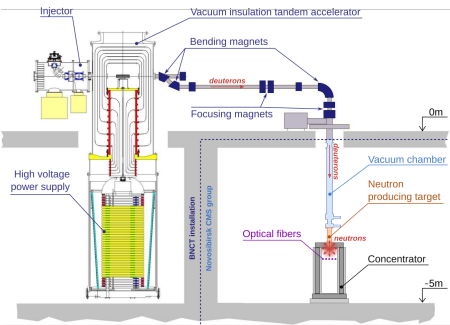
Для создания стенда нужно было решить следующие задачи

- 1 Определить методику проведения эксперимента по облучению материалов (оптоволокна)
- 2 Разработать и изготовить необходимое оборудование
- 3 Научиться определять значение потока эквивалентных нейтронов (neq/cm^2)

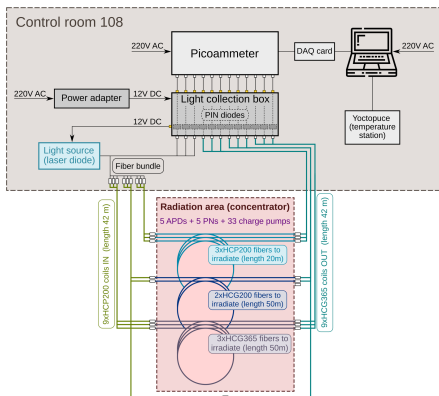


Стенд для исследования радиационного старения материалов

Схема стенда в составе установки БНЗТ



Методика исследования прозрачности оптоволоконна

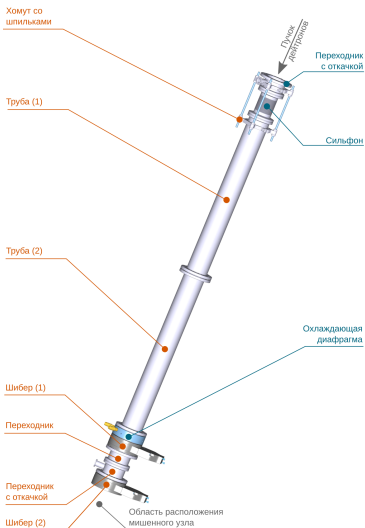


- Для реализации стенда были изготовлены: часть вакуумной камеры, мишенный узел и концентратор
- Предварительно были проведены исследования остаточной активации различных материалов с целью оценки пригодности их использования в конструкции концентратора
- Измерительное оборудование находится в защищенном месте, свет в радиационно опасную зону передается и возвращается посредством транспортного оптоволоконна
- Для оценки уровня возможной деградации транспортного оптоволоконна использовалось непосредственное соединение двух транспортных волокон (IN+OUT)
- В общей сложности на стенде исследовалось три типа оптического волокна (HCP200, HCG365 и HCG200), каждый тип волокна представлен в трех экземплярах

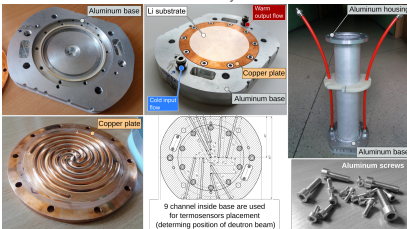


Основные элементы стэнда: вакуумная камера, мишень и концентратор

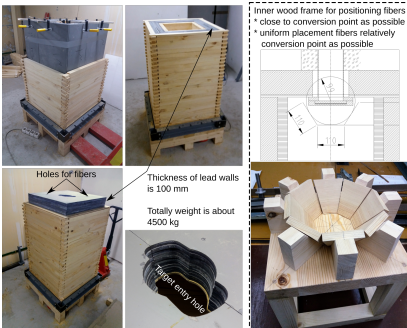
Схема вакуумной камеры



Мишеный узел



Свинцовый концентратор





Определение потока эквивалентных нейтронов

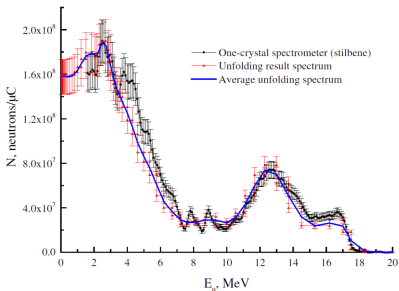
Прямое измерение потока нейтронов невозможно по причине больших доз порядка 100 Зв/ч, по крайней мере нам не известен такой прибор работающий в таких условиях и измеряющий энергетический спектр

Пакет FLUKA (<http://www.fluka.org/fluka.php>) использовался для выполнения всех расчетов, начиная с оценок для выбора оптимального варианта выполнения эксперимента (концентратор), так и последующей обработки данных

Модель генерации нейтронного излучения

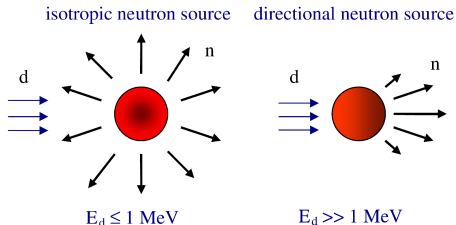
- В качестве исходного спектра нейтронов в моделировании применялись экспериментальные данные полученные на тонких мишенях

K. Mitrofanov et al. The energy spectrum of neutrons from $7\text{Li}(d,n)^8\text{Be}$ reaction at deuteron energy 2.9MeV, EPJ Web of Conferences 146, 11041 (2017)



- Угловое распределение

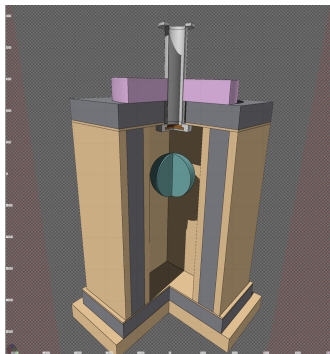
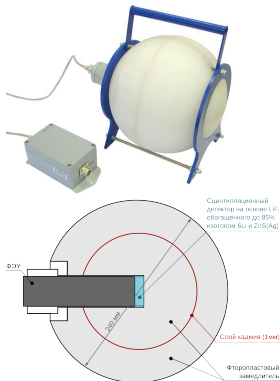
Neutron production from $7\text{Li}(d,xn)$ nuclear fusion reactions driven by high-intensity laser-target interactions, Published 19 March 2010, Plasma Physics and Controlled Fusion, Volume 52, Number 4





Определение потока эквивалентных нейтронов

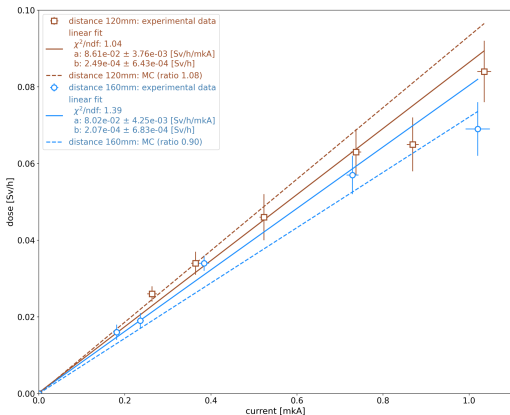
- С целью проверки моделирования перед облучением материалов был выполнен специальный эксперимент – устройство детектирования медленных нейтронов (УДМН-100) помещалось непосредственно внутрь концентратора для измерения **мощности амбиентного эквивалента дозы** нейтронного излучения $H^*(10)$ (МАЭД)
- Использовались пучки дейтронов с токами на уровне ≈ 1 мкА (рабочий ток больше в 1000 раз) по причине ограничения связанного с уровнем максимально измеряемой дозиметром дозы 0.1 Зв/ч
- В моделировании величина МАЭД определялась следующим образом: считалась эквивалентная доза в сфере, которая затем пересчитывалась с использованием коэффициентов АМВ74 (рекомендованный способ). Дополнительно оценка МАЭД была сделана путем подсчета числа нейтронов пересекающих поверхность сферы, для перевода в дозу использовались коэффициенты ИЗО и ПЗ (НРБ-99/2009)
- Внешний вид УДМН-100 и его схема (слева), пример описания геометрии во FLUKA (справа)





Определение потока эквивалентных нейтронов

- Сравнение МАЭД [Зв/ч] измеренной в эксперименте (точки – данные, сплошные линии – подгонка полиномом первого порядка) с расчетом (пунктирные линии) на расстояниях 120 и 160 мм



- Результаты МАЭД [Зв/ч] для пучка дейтронов с $E_d = 1.011$ МэВ и $I_d = 0.5$ мкА

Расстояние	АМВ74	ИЗО	ПЗ	УДМН-100
120 мм	0.047	0.037	0.072	0.044
160 мм	0.036	0.028	0.057	0.040



Разница между экспериментом (УДМН-100) и моделированием (АМВ74) составила 10%



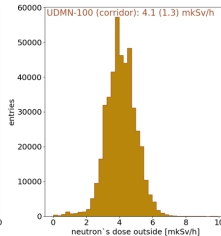
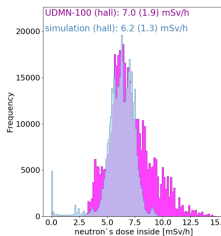
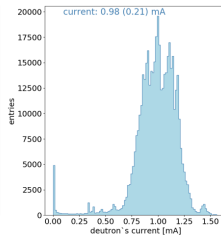
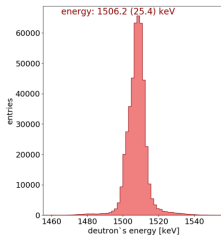
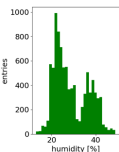
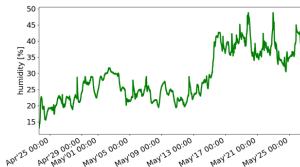
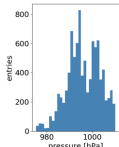
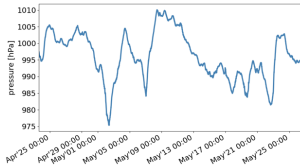
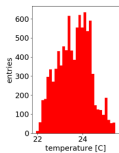
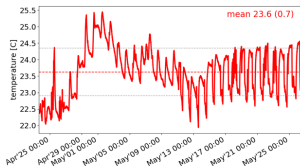
Эксперимент: продолжительность 1 месяц (25/04/2022 – 25/05/2022)





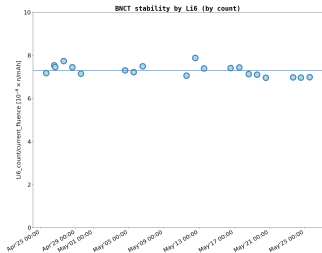
Эксперимент: условия и параметры в течение набора

- Все 18 смен работали на энергии дейтронов 1.5 МэВ со средним током 1 мА
- Микроклимат в пультной с оборудованием из Saclay (слева) и основные параметры установки БНЗТ (справа)



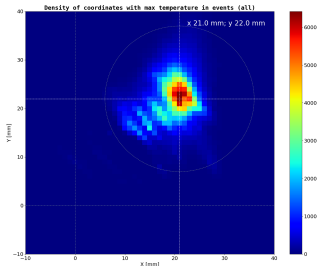


Стабильность генерации нейтронов



- Использовался детектор нейтронов с литий содержащим сцинтиллятором GS20 (производства Saint-Gobain) – в режиме счета
- Мишенный узел (литиевое напыление) не деградировал, точность оценки около 10%

Положение пучка дейтронов относительно оси мишени

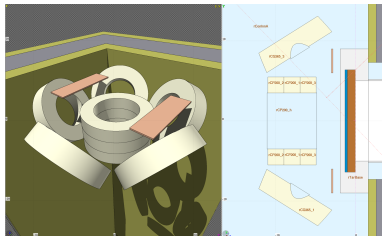
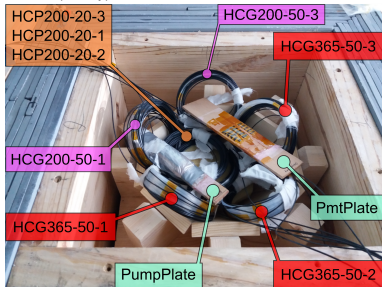


- Для определения положения пучка дейтронов относительно мишенного узла использовались измерения температуры в девяти точках
- Полученные значения центра (x=21 мм, y=22 мм) пучка дейтронов относительно геометрического центра концентратора в дальнейшем использовались для расчета среднего потока эквивалентных нейтронов для облучаемых объектов

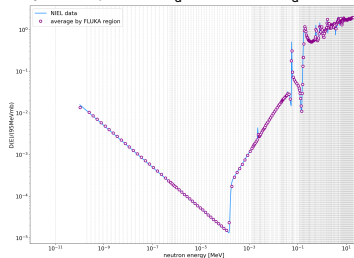


Эксперимент: расчет потока эквивалентных нейтронов (neq/cm^2)

- Средний поток neq/cm^2 рассчитывался для каждой из восьми облучаемых катушек, а также для полупроводниковых ФЭУ и DC/DC преобразователей.
- Схема расположения объектов внутри концентратора (вверху) и описанная геометрия во FLUKA (внизу)



- Результаты расчета: $E_d = 1.5 \text{ МэВ}$ и $I_d = 1.0 \text{ mA}$

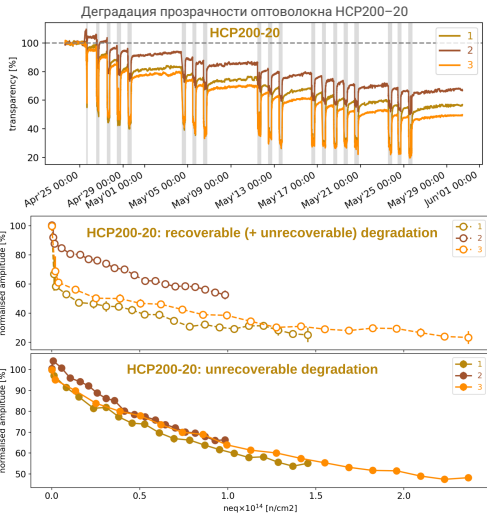
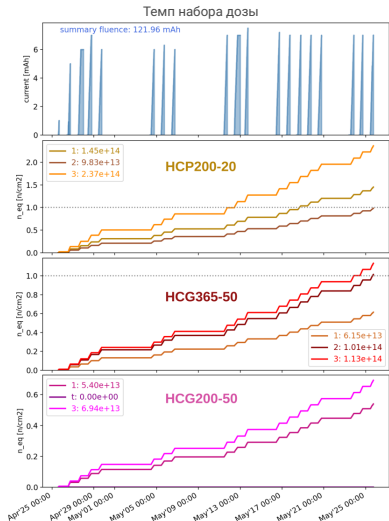


A.Vasilescu and G.Lindstroem Displacement damage in Silicon, <http://sesam.desy.de/~gunnar/Si-dfuncs>

Object	$10^8 \times \text{neq}/\text{cm}^2/\text{sec}$
HCP200-20-1	3.31
HCP200-20-2	2.24
HCP200-20-3	5.39
HCG365-50-1	1.40
HCG365-50-2	2.31
HCG365-50-3	2.58
HCG200-50-1	1.23
HCG200-50-3	1.58
PmtPlate	4.57
PumpPlate	1.31



Эксперимент: набранная доза и пример деградации волокна



- Такой-же эффект быстро и медленного падения прозрачности оптоволоконна наблюдался непосредственно в процессе эксперимента на CMS в зависимости от наличия светимости на БАК
- В течении 5 суток после облучения проводилось измерения восстановления прозрачности волокна



Результаты исследования деградации прозрачности оптоволокна

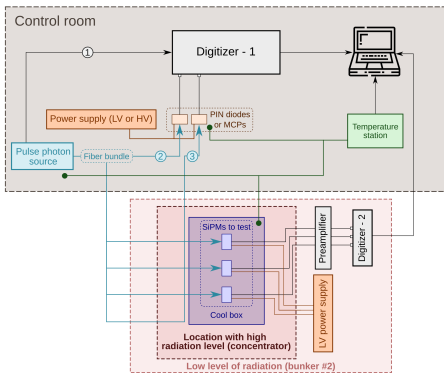
	HCP200-20			HCG365-50			HCG200-50		
	3	1	2	3	2	1	3	t	1
Ⓐ $10^{14} \times n_{\text{eq}}/\text{cm}^2$	2.37	1.45	0.98	1.13	1.02	0.61	0.69	≈ 0	0.54
Ⓑ degradation [%]	-51.4	-44.3	-34.4	-22.4	-23.6	-18.2	-14.3	2.5	-11.7
Ⓑ/Ⓐ	-21.7	-30.5	-35.0	-19.8	-23.2	-29.7	-20.6	-	-21.7

- Уровень деградации прозрачности оптоволокон варьируется от 20% до 35% при пересчете на поток эквивалентных нейтронов $10^{14} \text{ neq}/\text{cm}^2$
- Это не вызывает опасения со стороны команды лазерной калибровки калориметра детектора CMS (CERN), поскольку такое падение амплитуды калибровочного сигнала может быть нивелировано повышением уровня амплитуды источника света при калибровке
- Надеемся, уникальные измерения прозрачности оптоволокна в процессе набора дозы позволят в дальнейшем лучше понять процесс старения
- Интегральный поток neq/cm^2 для полупроводниковых ФЭУ и DC/DC преобразователей составил 2.01×10^{14} и 0.57×10^{14} , соответственно
- Также в рамках текущего эксперимента быстрыми нейтронами облучались
 - алмазный детектор нейтронов и пластины из карбида бора для Международного термоядерного реактора ИТЭР
 - неодимовые магниты для мощного линака Института теоретической и экспериментальной физики (Москва)
 - газовые сенсоры на основе фталоцианинов титанила для НГУ



Модернизация стенда для исследования твердотельных детекторов

Принципиальная схема стенда



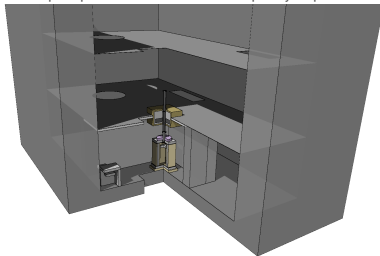
- ① Synchronization line
- ② The control stability of light source
- ③ The control transparency of optical fiber

Отличие в необходимости размещать оцифровывающее оборудование как можно ближе к ТФЭУ для минимизации уровня наводки

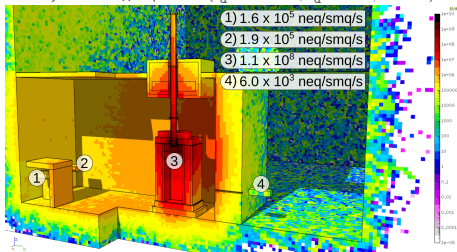
Допустимый уровень дозы 10^6 neq/cm²/s ⇔ информация от CAEN

Оценка интегрального уровня дозы (FLUKA)

Пример полного описания геометрии бункера #2



Результаты моделирования ($E_d = 1.5$ MeV, $I_d = 1$ mA, $t = 1$ s)

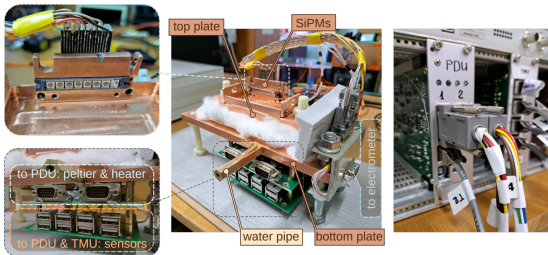




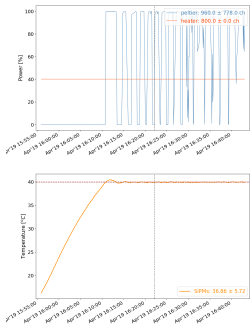
Модернизация стенда для исследования твердотельных детекторов

- Все элементы камеры находятся внутри теплоизоляционного кожуха (плотный пенопласт толщиной 50 мм)
- Конструктивно камера состоит из двух медных пластин (верхняя и нижняя), между которыми размещается двухкаскадный элемент Пельте
- На верхней пластине располагается быстросъемная кювета с ТФЗУ (SiPM)
- Достигнута стабильность температуры на уровне $\pm 0.05^\circ\text{C}$

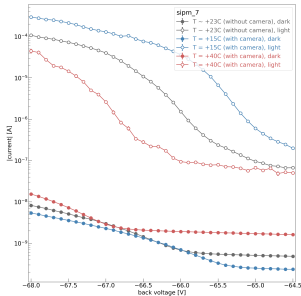
Общий вид камеры и блоков управляющей электроники (кожух снят)



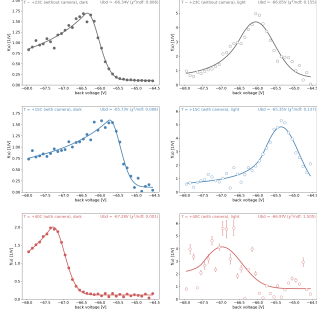
Пример выхода на режим $+40^\circ\text{C}$



I-V характеристика ТФЗУ от температуры



Напряжение пробоя ТФЗУ от температуры





- В целом установка БНЗТ обеспечивает возможность набора 10^{14} neq/cm² за разумные сроки (\approx 110 часов), что вполне достаточно для проверки радиационной стойкости материалов, планируемых для использования в области ФВЭ
- Впервые продемонстрировано, что в ИЯФ СО РАН можно работать с такими дозами на ускорительном источнике нейтронов
- Уникальность заключается в том, что в отличие от облучения на реакторах мы можем достаточно точно контролировать уровень набранной дозы и проводить оценку старения в процессе эксперимента
- Разработанная математическая модель и созданный стенд могут быть использованы в дальнейшем для проведения подобных экспериментов на базе установки БНЗТ
- В настоящее время завершается модернизация стенда для возможности проведения исследований радиационного старения твердотельных детекторов
- После модернизации данный стенд может быть востребован для проведения широкого круга экспериментов с полупроводниковыми детекторами, используемыми в настоящее время в различных сферах где имеются достаточно большие радиационные нагрузки: физика высоких энергий, астрофизика, контроль радиационной активности на АЭС и так далее