

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
Лаборатория ядерных проблем им. В. П. Дзелепова

Проект
Новые полупроводниковые детекторы для
фундаментальных и прикладных исследований

Отчет и предложение по продлению

Руководитель проекта: Г. А. Шелков

Зам. руководителя проекта: А. С. Жемчугов

Участники проекта

ЛЯП: С. Абу Эль-Азм, А. Л. Гонгадзе, М. И. Госткин, А. В. Гуськов,
М. А. Демичев, Д. В. Дедович, В. Г. Кручонок, Н. К. Кузнецов, С. А. Котов,
А. В. Лапкин, А. Лейва, А. А. Ноздрин, В. Н. Павлов, С. Ю. Пороховой,
Д. А. Кожевников, П. И. Смолянский, В. А. Токарева

ЛФВЭ: А. В. Аверьянов, А. М. Короткова, Д. О. Кривенков, Ю. Лукстиныш,
А. Максимчук, С. В. Старикова

ЛЯР: С. В. Митрофанов

г. Дубна

2017 г.

Оглавление

1	Цели проекта	3
2	Научно-методические исследования полупроводниковых детекторов	7
2.1	Основные результаты 2015-2017 г.	9
2.1.1	Исследование радиационной стойкости детекторов на основе арсенида галлия	9
2.1.2	Создание калориметра FCAL для экспериментов на будущих электрон-позитронных коллайдерах	13
2.1.3	Рентгеновские детекторы изображений большой площади	15
2.1.4	Гибридные пиксельные детекторы на основе микросхемы Timerix	18
2.1.5	Пиксельные детекторы как элементы трековых систем	24
2.2	Программа исследований на 2018-2020 г.	24
2.2.1	Поиск путей повышения радиационной стойкости детекторов на основе арсенида галлия	24
2.2.2	Идентификация частиц в гибридных пиксельных детекторах	25
2.2.3	Регистрация нейтронов	26
2.2.4	Изучение отклика гибридных пиксельных детекторов на прохождение тяжелых заряженных частиц	28
2.2.5	Применение пиксельных детекторов в экспериментах с гиперядрами и релятивистскими ионами на Нуклотроне	29
3	Исследовательская инфраструктура в ЛЯП ОИЯИ	31
3.1	Основные результаты 2015-2017 г.	31
3.1.1	Измерительный стенд “Калан”	31
3.1.2	Испытательный стенд на основе зондовой станции	31
3.1.3	Стенд для измерения эффективности сбора заряда	32
3.1.4	Установка для ультразвуковой микросварки	33
3.1.5	Проработка ТЭО участка для сборки детекторов	35
3.1.6	Участок микротомографии	37
3.2	Программа развития на 2018-2020 г.	40
3.2.1	Участок для изучения характеристик пиксельных детекторов	40

3.2.2	Участок микротомографии	40
3.2.3	Разработка электроники считывания на основе микросхемы Medipix4 .	41
4	Прикладные исследования	44
4.1	Основные результаты 2015-2017 г.	44
4.1.1	Исследование рентгеноконтрастных веществ. Изучение возможности идентификации контрастных веществ по спектральной информации. .	44
4.1.2	Исследование нативных препаратов для анализа атеросклеротическо- го повреждения сосудов	45
4.1.3	Исследование нативных препаратов для анализа аневризмы брюшной аорты	46
4.1.4	Анализ состава руд и минерального сырья	47
4.1.5	Проведение исследований керна нефтегазоносных пород	49
4.2	Программа исследований на 2018-2020 г.	50
5	Публикации за 2015-2017 г.	52
6	План реализации проекта	54
6.1	Смета затрат по проекту	54
6.2	Список оборудования	55
6.3	Научное сотрудничество	56

Аннотация

Начиная с 2006 г. в ЛЯП ведутся исследования и разработки по созданию полупроводниковых детекторов для фундаментальных и прикладных исследований на основе нового материала – компенсированного хромом арсенида галлия (GaAs:Cr), производимого в Лаборатории функциональной электроники Томского государственного университета. За эти годы, в том числе за три последних года осуществления предлагаемого к продлению Проекта, было разработано и произведено больше сотни опытных образцов сенсоров из GaAs:Cr для полупроводниковых детекторов, используемых в самых различных областях науки и техники – от физики высоких энергий до компьютерной томографии; была создана инфраструктура для измерения характеристик и изучения свойств полупроводниковых материалов и детекторов на их основе; были установлены научные связи с мировыми центрами, ведущими аналогичные исследования, и проведен ряд совместных исследовательских работ.

Накопленный в ЛЯП опыт производства и эксплуатации полупроводниковых детекторов на основе модифицированного арсенида галлия позволяет перейти как к решению более сложных задач на выбранных направлениях исследований, так и к поиску новых областей применения для данных детекторов.

В ходе дальнейшего развития Проекта, предполагается проведение новых научно-методических исследований, в частности, поиск путей повышения радиационной стойкости детекторов на основе арсенида галлия, идентификация частиц по виду кластера в гибридных пиксельных детекторах, разработка пиксельных детекторов для экспериментов с гиперядрами и релятивистскими ионами на Нуклотроне. Также предполагается усовершенствование существующей исследовательской инфраструктуры в ЛЯП, в том числе, создание стенда и освоение методики релаксационной спектроскопии глубоких уровней (DLTS), создание в составе участка микротомографии второго микротомографа с неподвижным детектором и вращающимся образцом, способного достичь пространственного разрешения 5-7 мкм за счет геометрического увеличения, создание полнофункционального блока электроники считывания для съема данных с микросхемы Medipix-4. Будет продолжено развитие программного обеспечения для моделирования и реконструкции томограмм, с акцентом на повышение качества изображений, использование быстрых алгоритмов обработки больших объемов томографических данных и новых аппаратных возможностей.

В области прикладных исследований методами спектральной микротомографии будут продолжены, в частности, изучение возможности прогнозирования развития

атеросклероза сосудов на основе исследования тонкой структуры отложений кальция в стенках атеросклеротически пораженных сонных артерий и аневризм аорты, идентификация жировой ткани животных по сочетанию плотности и энергетической зависимости линейного коэффициента ослабления (ЛКО), изучение возможности выделения рентгеноконтрастных веществ в организме для доставки лекарств в нужную ткань с использованием рентгеноконтрастных маркеров, идентификация минеральных фаз в руде и минеральном сырье. Также будет изучена возможность создания микродозиметрических зондов на основе детекторов Тімеріх для измерения эквивалентной дозы облучения.

Запрашиваемый объем финансирования для выполнения работ по Проекту составляет 450 тысяч долларов США за три года.

Глава 1

Цели проекта

Успех научного эксперимента ключевым образом зависит от используемой аппаратуры. Прогресс в понимании физической картины мира, который произошел за последнее столетие, в большой степени был обеспечен технологическими достижениями, позволившими создавать все более совершенные экспериментальные установки и улучшать методы обработки полученных данных. Научно-методические исследования по созданию новых типов детекторов являются необходимым условием дальнейшего развития экспериментальной физики атомного ядра и элементарных частиц. Конечно, подобные исследования успешно ведутся в ходе подготовки каждого крупного эксперимента, поскольку каждая новая физическая задача предъявляет собственные требования к установке. Однако такой подход, нацеленный на ближнюю перспективу, зачастую не позволяет развивать перспективные, но еще не вполне совершенные методы детектирования частиц и вести поисковые работы, ориентированные на потребности экспериментов завтрашнего дня.

Подготовка экспериментов на ускорителях нового поколения (ILC¹, CLIC², HL-LHC³) требует разработки новых типов детекторов, способных работать в условиях высокой загрузки и обеспечить при этом требуемую точность и надежность регистрации. Однако создание новых типов детекторов элементарных частиц важно не только для физики высоких энергий. Будущее таких наук, как биология, материаловедение, геофизика и медицина сегодня тесно связано с исследованиями с помощью источников синхротронного, рентгеновского излучения и других ядерно-физических методов. В ближайшее десятилетие ожидается не только начало исследований на ком-

¹International Linear Collider, Международный линейный коллайдер [1].

²Compact Linear Collider, Компактный линейный коллайдер [2].

³High Luminosity Large Hadron Collider, Большой адронный коллайдер высокой светимости [3].

плексе XFEL⁴, но и запуск центров ELI⁵, создаваемых в странах-участницах ОИЯИ в рамках программы ESFR1⁶. Для проведения экспериментов на этих установках потребуются регистрирующие системы, и в первую очередь, детекторы изображений с высокой разрешающей способностью. Разработка подобных детекторов сегодня в немалой степени опирается на опыт, накопленный в ядерной физике и физике высоких энергий.

Полупроводниковые детекторы давно зарекомендовали себя как регистрирующие элементы, которые позволяют создавать калориметрические и координатные подсистемы физических установок с хорошим быстродействием, высоким пространственным и энергетическим разрешением. Однако требования, предъявляемые к детекторам при планировании экспериментов следующего поколения (на ILC, CLIC, HL-LHC, мюонном коллайдере и т.д.), заметно превышают достигнутые сегодня характеристики полупроводниковых детекторов и требуют проведения дополнительных исследований и совершенствования аппаратуры. Список требований включает в себя высокое быстродействие и скорость считывания, высокую степень сегментации и, что немаловажно, разумную стоимость, поскольку речь часто идет о больших установках с сотнями и тысячами отдельных детектирующих элементов. Однако, в отличие от экспериментов на LEP⁷, Тэватроне и LHC⁸, на первое место среди требований вышла радиационная стойкость, что обусловлено как длительным временем работы проектируемых установок, так и гораздо более высокой, по сравнению с существующими ускорительными комплексами, загрузкой вследствие высокой энергии пучков и светимости будущих ускорителей.

Модернизация экспериментов на LHC на этапе Phase-2 и проекты экспериментов на ILC предусматривают работу детекторов при дозе ионизирующего излучения до 1 МГр и флюенсе неионизирующего излучения до $2 \times 10^{16} n_{eq}/\text{см}^2$ (n_{eq} - 1-МэВ нейтронный эквивалент). Все существующие кремниевые детекторы становятся неработоспособными при накоплении на порядок меньшей дозы. Единственным известным способом эксплуатации кремниевых детекторов при такой радиационной нагрузке является понижение рабочей температуры на несколько десятков градусов. Однако такой путь существенно усложняет конструкцию детектора и выдвигает трудновыполнимые требования по выделяемой тепловой мощности. Последнее соображение тем более важно, что высокие загрузки сильно затрудняют работу триггера и требуют

⁴European X-ray Free Electron Laser, Европейский рентгеновский лазер на свободных электронах [4].

⁵Extreme Light Infrastructure, Инфраструктура источников экстремальных световых полей [5].

⁶European Strategy Forum on Research Infrastructures [6].

⁷Large Electron-Positron collider, Большой электрон-позитронный коллайдер

⁸Large Hadron Collider, Большой адронный коллайдер

довольно сложной обработки сигнала непосредственно в детекторе, включая измерение времени, поиск кластеров и корреляций между сигналами в соседних пикселях. Поскольку единственной альтернативой является частая, трудоемкая и дорогостоящая замена поврежденных радиацией детектирующих элементов, основным подход к решению задачи по созданию таких установок сегодня заключается в разработке нового поколения радиационно-стойких детекторов, опирающихся на современные достижения технологии и использование новых материалов.

Развитие полупроводниковых детекторов во многом определяется технологическими достижениями промышленности. Для нужд физики высоких энергий непосредственно в лабораториях практически нигде самостоятельно не выращиваются кремниевые кристаллы, не производятся микросхемы считывания и т.д., поскольку все это оборудование гораздо проще, дешевле и качественнее изготавливается на предприятиях электронной индустрии. В большинстве центров физики высоких энергий основной акцент перенесен с собственно производства на формулировку требований к детекторам, проектирование и иногда сборку опытных или мелкосерийных образцов из промышленно изготовленных элементов. Важнейшее место в цикле разработки новых детекторов занимает изучение их характеристик, которое обеспечивает обратную связь с изготовителем чувствительных элементов. Изучение характеристик включает в себя как „входной контроль“ достижения заданных характеристик материала или конструкции, так и измерение непосредственно детектирующих свойств. Ключевыми являются испытания на пучках различных элементарных частиц, которые позволяют провести исследования в условиях, максимально приближенных к эксплуатационным. В части, касающейся определения радиационной стойкости, данные испытания имеют решающее значение. ОИЯИ имеет в этом важное преимущество, поскольку обладает большим числом установок, позволяющих провести испытания детекторов на пучках различных частиц, от протонов и нейтронов до ускоренных тяжелых ионов. Хорошие научные связи практически со всеми мировыми центрами физики высоких энергий позволяют, при необходимости, провести такие испытания на испытательном пучке любого ускорителя мира.

Разработка полупроводниковых детекторов на основе нового, радиационно-стойкого материала - модифицированного арсенида галлия производства Томского государственного университета (ТГУ) ведется в ЛЯП с 2006 года. Установлены научные связи с мировыми центрами, ведущими аналогичные исследования, проведен ряд совместных исследовательских работ с ТГУ по созданию чувствительного элемента с требуемыми свойствами, накоплен опыт производства и эксплуатации таких детекторов (как падовой, так и пиксельной геометрии), изучены их характеристики. Полученный опыт позволяет перейти к решению более сложных задач и продвигать-

ся одновременно в нескольких направлениях, которые составляют основу предлагаемого Проекта:

1. развитие имеющегося научно-технического задела по проектированию и созданию полупроводниковых радиационно-стойких детекторов на основе новых материалов и гибридных пиксельных детекторов высокого разрешения для экспериментов на будущих ускорителях, а в перспективе – развитие ряда необходимых для этого, но отсутствующих в настоящее время в ЛЯП возможностей: механической и химической обработки полупроводников, сборки пиксельных детекторов и разработки электроники считывания;
2. развитие имеющейся измерительной базы и создание стендов, позволяющего проводить исследование свойств детекторов, создаваемых в ОИЯИ и лабораториях стран-участниц, в сочетании с испытаниями на пучках частиц, получаемых на базовых установках ОИЯИ и других ускорительных центров;
3. проведение совместных научных работ в сотрудничестве с исследовательскими группами из других научных центров с целью изучения возможности применения разработанных детекторов и технологий в других областях науки и техники, включая исследования в области здравоохранения и горной промышленности с использованием микротомографа MARS, созданного с применением новых детекторов и использующего современную электронику считывания Medipix.

Далее представлены основные результаты по каждому из направлений, которые были получены в ходе выполнения Проекта 2015-2017 г. и предлагаемый план работ на 2018-2020 г.

Глава 2

Научно-методические исследования полупроводниковых детекторов

Основой работы полупроводникового детектора является образование неравновесных носителей заряда (электронов и дырок) при прохождении ионизирующей частицы. Если в полупроводнике создано электрическое поле, дрейф неравновесных зарядов порождает импульс тока в цепи детектора, который может быть усилен и зарегистрирован. Для производства полупроводниковых детекторов традиционно применяются кремний и германий, причем последний находит основное применение в прецизионной спектрометрии. Большой интерес представляют другие полупроводниковые материалы, пригодные для изготовления детекторов, такие как ХПО-алмаз, карбид кремния, нитрид галлия и арсенид галлия.

Последний материал особенно интересен тем, что он давно и успешно применяется в микроэлектронной промышленности при производстве приборов и интегральных схем для сверхскоростной и СВЧ-электроники. В связи с этим в мире существует промышленная технология изготовления арсенида галлия и свойства его достаточно хорошо изучены. В мировой практике обычно применяется слиточный полуизолирующий арсенид галлия (LEC-GaAs). Однако, слиточный арсенид галлия имеет существенные недостатки, которые ограничивают его применение в качестве материала для изготовления детекторов элементарных частиц. Главной проблемой является невозможность создания детекторного материала с низким содержанием примесей. В результате, максимальное значение глубины проникновения электрического поля в образце составляет 200 – 250 мкм, что и ограничивает толщину чувствительного слоя LEC SI-GaAs-структур. В результате, несмотря на многочисленные попытки, до последнего времени в мире не получалось создать на основе полуизолирующего арсенида галлия полупроводниковые детекторы ионизирующего излучения хорошего качества.

Прогресс за последние годы в создании детекторного материала связан с работами томской научной школы под руководством О. П. Толбанова, профессора Томского государственного университета. Была разработана технология компенсации слоёв GaAs электронного типа проводимости в процессе диффузии глубокой акцепторной примеси хрома (GaAs:Cr). Экспериментальные значения удельного сопротивления структур составляют $\geq 1 \times 10^9$ Ом*см, что более чем на порядок превышает сопротивление структур на основе LEC SI-GaAs. Это обуславливает переход от структур барьерного типа к структурам резистивного типа. К таким структурам формируются омические контакты, что способствует однородному распределению напряженности электрического поля по всей толщине детектора. К настоящему времени в ТГУ были получены образцы арсенида галлия с толщиной чувствительного слоя до 1 мм [12].

Одним из наиболее сложных технических вопросов при создании полупроводникового детектора является считывание сигнала. Если в падовом или микрополосковом детекторе задача решается относительно легко, то в пиксельном детекторе считывание сигнала представляет значительно более сложную проблему. С уменьшением размера отдельного пикселя до сотен и десятков микрон и увеличением числа пикселей до нескольких тысяч или десятков тысяч, не остается других путей кроме создания специализированной микросхемы считывания, содержащей необходимое число каналов электроники. Таким образом, получаются гибридные пиксельные детекторы, состоящие из чувствительного слоя - монокристалла полупроводника (сенсора) и микросхемы считывания, соединенных между собой при помощи микропайки (рис. 1).

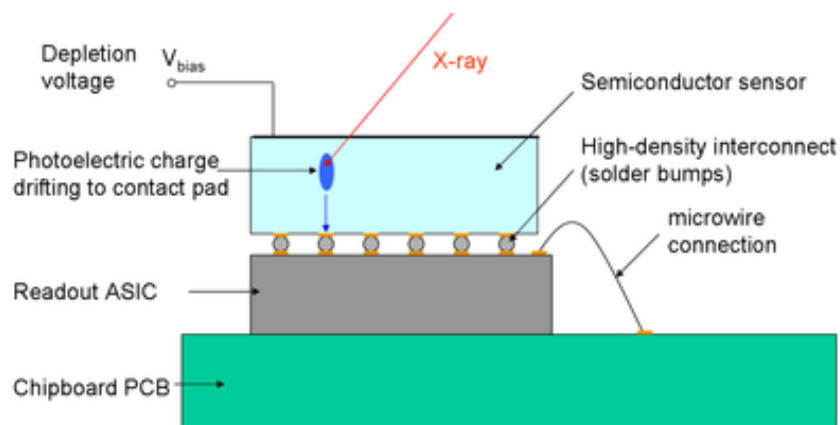


Рис. 1: Типичная схема гибридного пиксельного детектора.

Обычная электроника, применяемая для съема сигнала с пиксельного детектора, сначала усиливает электрический сигнал и затем интегрирует его, чтобы получить величину собранного заряда. При этом сигнал неизбежно складывается с собственны-

ми шумами сенсора, что приводит к ухудшению качества изображения и снижению энергетического разрешения. Однако за последние 10 лет успехи микроэлектроники позволили реализовать принципиально новый подход, в котором спектрометрический тракт собран непосредственно в пикселе. Это позволяет осуществлять в пикселе не только усиление, но и амплитудную дискриминацию и оцифровку сигнала. Высокое быстродействие позволяет производить эти операции независимо для каждой частицы, в результате чего на выходе вместо аналогового сигнала, пропорционального собранному заряду, выдается цифровой сигнал - количество частиц с энергией выше определенного порога, заданного значением дискриминатора. Такой подход был назван режимом счета отдельных фотонов (single photon counting), поскольку впервые он был реализован для фотоприемников.

Работы по созданию подобных микросхем считывания ведутся тремя группами: в PSI (Швейцария, проект PILATUS [14]), в CPPM-IN2P3 (Франция, проект XPAD [15]) и коллаборацией MEDIPIX (CERN, проекты Medipix2, Timerix, Medipix3 [16]). По своим характеристикам (размер и число пикселей, возможности электроники считывания) микросхемы семейства Medipix заметно превосходят аналоги, разработанные в двух других группах.

2.1 Основные результаты 2015-2017 г.

2.1.1 Исследование радиационной стойкости детекторов на основе арсенида галлия

Радиационная стойкость слиточного арсенида галлия была изучена довольно давно в ходе эксперимента RD8 в CERN [9]. Было показано, что детекторы из некомпенсированного арсенида галлия способны выдержать флюенс $3 \cdot 10^{14}$ протонов, $2 \cdot 10^{14}$ пионов и $6 \cdot 10^{14}$ нейтронов на см^2 . Для компенсированного полуизолирующего арсенида галлия была установлена схожая радиационная стойкость, а также показано, что доза 100 кГр, накопленная при облучении фотонами с энергией 660 кэВ, приводит лишь к незначительному ухудшению детектирующих свойств [10]. Исследования, проведенные с помощью гамма-квантов с энергией 1,17 и 1,33 МэВ от радиоактивного источника ^{60}Co показали, что значительных радиационных повреждений не образуется при накоплении дозы вплоть до 1 МГр [11]. Испытания радиационной стойкости падовых детекторов из GaAs:Cr, изготовленных в ОИЯИ, которые были проведены в рамках коллаборации FCAL на пучке электронов с энергией 8,5-10 МэВ на ускорителе S-DALINAC в Дармштадте, показали, что детекторы сохраняют работоспособность вплоть до накопления дозы в 1,5 МГр [13]. Однако, хотя и было

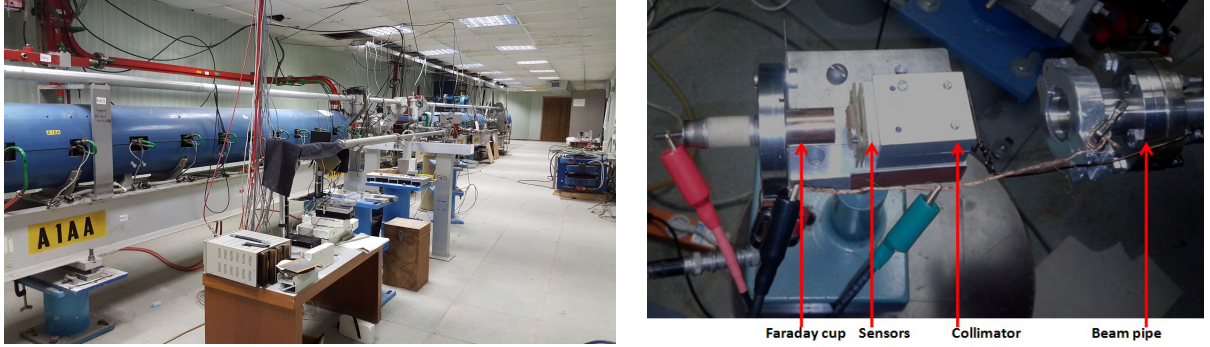


Рис. 2: Канал вывода пучка ускорителя Линак-200 и установка для облучения пэд-овых детекторов.

показано, что арсенид галлия довольно перспективен как материал для детекторов с высокой радиационной стойкостью, до последнего времени отсутствовали систематические измерения радиационной стойкости детекторов из GaAs:Cr в сравнении с кремниевыми, а также на пучках нейтронов. Кроме того, исследования радиационной стойкости барьерных π -структур на пучках электронов вообще никогда не проводились.

В рамках данного Проекта осенью 2016 г. были проведены систематические испытания радиационной стойкости 2-х типов арсенидогаллиевых пэд-овых детекторов (барьерных π -структур и высокорезистивных структур) и детекторов из кремния n -типа на пучке электронов с энергией 20 МэВ. Испытания проводились на ускорителе Линак-200 в ОИЯИ (рис. 2). Детекторы площадью 5 мм × 5 мм облучались с шагом по дозе от 50 кГр до 200 кГр вплоть до достижения общей поглощенной дозы в 1.5 МГр. После каждого шага измерялись вольт-амперная характеристика (ВАХ) и эффективность сбора заряда при комнатной температуре.

В результате проведенных испытаний было показано, что радиационные повреждения по-разному влияют на работоспособность кремниевых и арсенидогаллиевых детекторов. Для кремния характерно быстрое нарастание темнового тока, вплоть до 4 порядков при облучении дозой 1.5 МГр. Это делает невозможным использование кремниевых детекторов без охлаждения при облучении дозой более 0.5 МГр, несмотря на постоянно высокую эффективность сбора заряда. Что касается GaAs:Cr, то темновой ток возрастает умеренно, втрое для резистивного материала и в 4-5 раз для барьерных структур. Однако для арсенида галлия характерно снижение эффективности сбора заряда. Следует отметить, что эффективность сбора заряда в GaAs:Cr резко (в 5 раз) снижается при облучении дозой 0.5 МГр, и затем продолжает медленно снижаться с дальнейшим ростом дозы, оставаясь на уровне 10% при

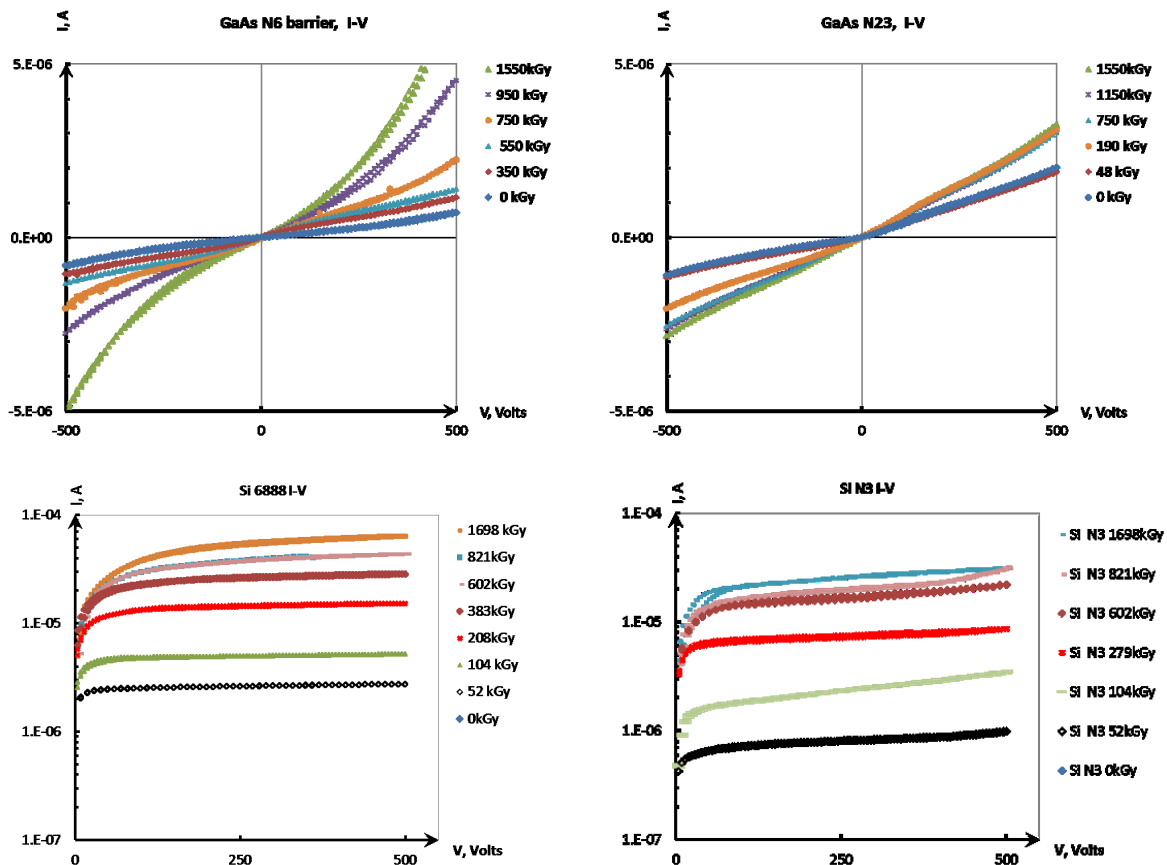


Рис. 3: Вольт-амперные характеристики детекторов после облучения. Верхний ряд - арсенидогаллиевые детекторы (резистивные структуры слева, барьерные структуры справа), нижний ряд - кремниевые детекторы (слева - детекторы из кремния p-типа производства USCS (США), справа - детекторы от группы Н.И.Замятина).

дозе 1.5 МГр, что вполне достаточно для работоспособности детектора. Зависимости вольт-амперных характеристик, эффективности сбора заряда и примеры спектров показаны на рис. 3,4,5.

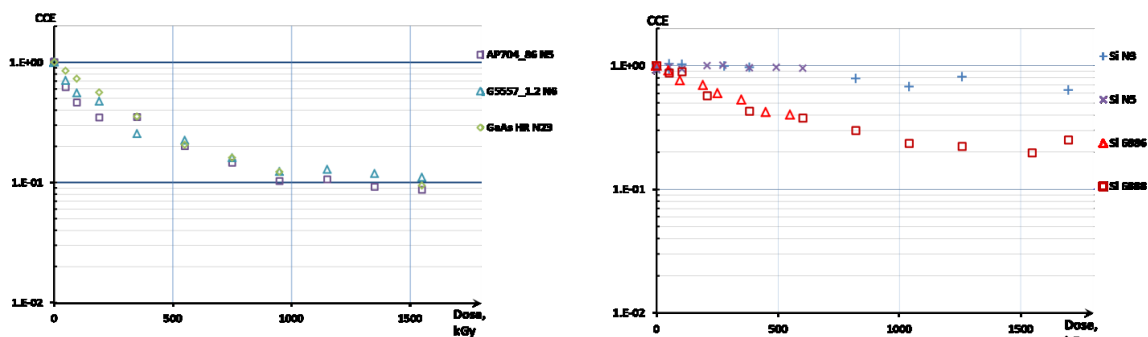


Рис. 4: Зависимость эффективности сбора заряда от поглощенной дозы. Слева - арсенидогаллиевые детекторы, справа - кремниевые детекторы.

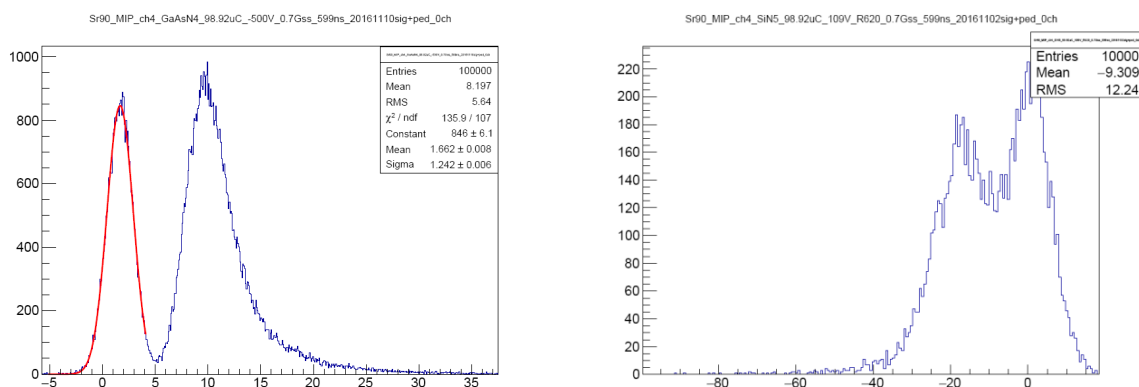


Рис. 5: Спектры, полученные на арсенидогаллиевом (слева) и кремниевом (справа) детекторах после облучения дозой 0.5 МГр, при комнатной температуре.

Сходные результаты получены при облучении нейтронами на пучках реактора ИБР-2М (рис. 6). Испытания проводились в ноябре 2016 для двух типов детекторов на основе GaAs:Cr и кремниевом детекторе n-типа, при трех значениях флюенса $5,5 \cdot 10^{11}$, $2 \cdot 10^{12}$ и $4,5 \cdot 10^{13}$ н/см².

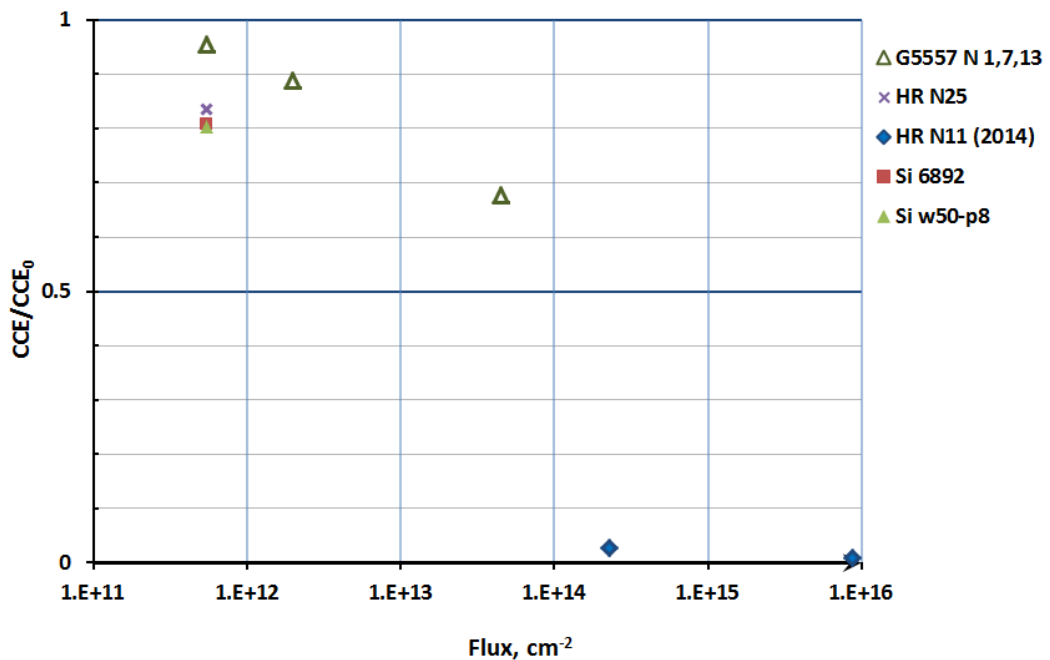


Рис. 6: Зависимость относительной эффективности сбора заряда от флюенса нейтронов для кремниевых и арсенидогаллиевых детекторов.

2.1.2 Создание калориметра FCAL для экспериментов на будущих электрон-позитронных коллайдерах

Подготовка экспериментов на будущих электрон-позитронных коллайдерах высокой светимости (ILC, CLIC, FCC, CEPC) потребовала проведения дополнительных исследований по созданию специальных калориметров для околопучковой области. Эти калориметры должны быть компактными, обладать высоким пространственным разрешением для разделения ливней, иметь высокую геометрическую точность позиционирования и высокое быстродействие. Поскольку околопучковые области подвергаются наибольшей радиационной нагрузке, эти детекторы должны иметь беспрецедентную радиационную стойкость. В зависимости от угловой апертуры и назначения различают калориметры Pair Monitor, BeamCal, LumiCal [17, 18]. Калориметр BeamCal имеет наименьшую угловую апертуру, и соответственно, подвержен наибольшей радиационным нагрузкам. Он предназначен для измерения большого количества мягких электрон-позитронных пар, образованных в результате конверсии тормозного излучения, и электронов высокой энергии, для облегчения настройки параметров пучка. Разработка этих детекторов ведется международной коллаборацией FCAL. Для достижения требуемых характеристик был предложен вариант компакт-

ного сэндвич-калориметра с высокой степенью сегментации, состоящего из вольфрамового поглотителя и регистрирующих плоскостей, в качестве которых используются полупроводниковые детекторы.

Помимо проведения исследований радиационной стойкости детекторов на основе арсенида галлия, необходимых для выбора оптимального материала для чувствительного элемента компактного сэндвич-калориметра FCAL, в ОИЯИ были проведены работы по изготовлению пластин вольфрамового поглотителя для полномасштабного прототипа модуля переднего калориметра. Основная сложность заключается в чрезвычайно высоких требованиях на плоскостность пластин - не хуже 20 микрон для финального варианта калориметра. В 2015-2016 г. были размещены заказы на изготовление пробных партий вольфрамовых пластин у двух российских поставщиков и проведены измерения геометрических параметров изготовленных пластин с использованием трехосевой координатно-измерительной машины Zeiss Eclipse, установленной в чистом помещении НЭОВП ЛЯП ОИЯИ (рис. 7).



Рис. 7: Измерение геометрических параметров пластин вольфрамового поглотителя FCAL с использованием трехосевой координатно-измерительной машины Zeiss Eclipse.

Всего было изготовлено 5 вольфрамовых пластин одним поставщиком и 2 пластины вторым поставщиком. Для контроля качества была разработана методика измерений, позволяющая достичь повторяемости результатов в пределах 1.5-2 мкм. В результате измерений был выбран один поставщик, который сумел обеспечить

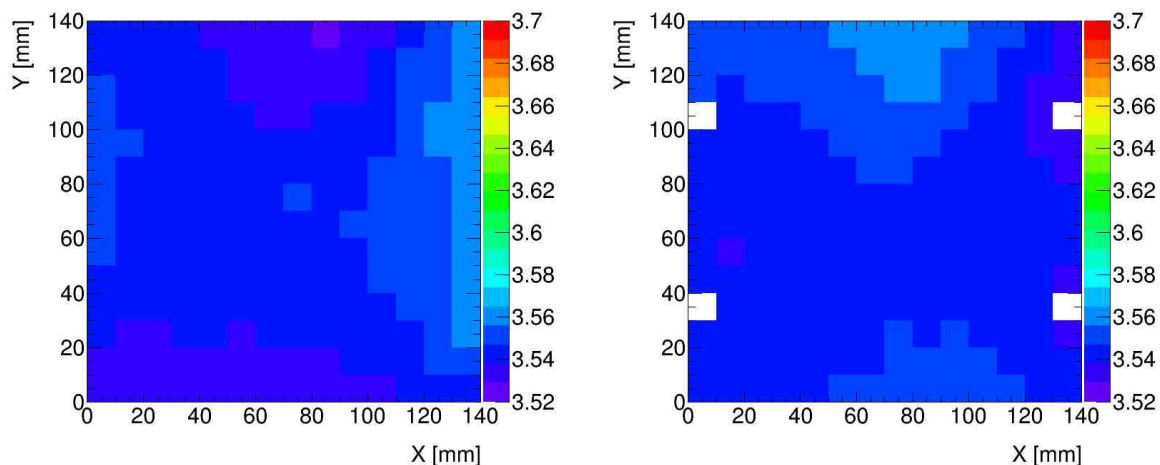


Рис. 8: Результаты измерения формы поверхности пластин вольфрамового поглотителя FCAL. Показано расстояние до поверхности пластины в мм относительно плоскости основания для двух сторон поглотителя.

плоскостность в пределах 35 мкм (рис. 8), что вполне достаточно для изготовления прототипа модуля переднего калориметра. В течение 2017-2019 запланированы изготовление и поставка для коллаборации FCAL около 30 пластин вольфрамового поглотителя.

2.1.3 Рентгеновские детекторы изображений большой площади

Использование гибридных пиксельных детекторов производит революцию в области регистрирования фотонов на источниках синхротронного излучения и лазерных источниках на свободных электронах. По общему мнению, они являются детекторами будущего, поскольку дают значительное улучшение качества изображения по сравнению с текущими детекторами на основе ПЗС-камер. Примерами являются детекторы большой площади на микросхемах Pilatus, Medipix и XPad, разработанные в различных институтах в Европе. При наличии источников высокоэнергетического рентгеновского излучения спрос на эффективный материал для сенсоров стремительно растет в течение последних трех-пяти лет. Наиболее перспективными материалами для этой области энергий рентгеновских лучей являются GaAs и Cd(Zn)Te. Промышленность медицинской визуализации инвестирует главным образом в Cd(Zn)Te, так как для их основных приложений (сканирование человека) требуются высокие энергии фотонов, выше 100 кэВ, что, в свою очередь, требует сенсоров из материала с высоким Z . В области исследований на источниках синхротронного излучения есть большой и растущий акцент на энергии в диапазоне до 80 кэВ, для которых

наилучшим образом подходит GaAs.

Как продолжение успешного проекта GALAPAD (2011-2013 годов) по развитию технологии производства гибридных пиксельных детекторов на основе GaAs типа “Неха” (сборка 3×2 из 6 микросхем на общем сенсоре), в 2014 году был начат совместный российско-германский проект GALAPAD-2. Целью проекта является разработка пиксельных детекторов большой площади с размером активной области 82×28 мм² типа “Double Неха” (сборка 6×2 из двенадцати микросхем). В этом проекте участвует ОИЯИ (с соисполнителем - ТГУ) и с немецкой стороны - DESY, Технологический институт Карлсруэ и Фрайбургский центр материаловедения. С российской стороны проект поддержан в рамках ФЦП “Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 – 2020 годы”, с объемом финансирования 47 млн. руб. в 2014-2017 г¹.

Для решения поставленной задачи требуется разработать технологию производства арсенидогаллиевых пластин размером 4”, разработать методы контроля качества пластин, улучшить технологию монтажа микросхем на пластины и разработать высокоскоростную электронику считывания. Детекторы будут иметь малый размер нечувствительной области на краю сенсорной пластины, что позволит использовать подобные детекторы в качестве элементов детектирующих систем произвольно большой площади. Детекторные модули будут протестированы на синхротронном источнике ANKA в KIT и PETRA-III в DESY. Будут проведены дополнительные эксперименты, чтобы оценить GaAs в качестве материала детекторов для лазеров на свободных электронах - в частности, способность GaAs детекторов выдерживать высокий мгновенный поток, появляющийся на высоких частотах повторения.

В ходе выполнения проекта GALAPAD-2 в ОИЯИ совместно с ТГУ были получены следующие основные результаты:

- в ОИЯИ создан и введен в эксплуатацию современный испытательный стенд на основе зондовой станции Cascade Microtech EPS150TESLA для изучения свойств полупроводниковых материалов;
- в ТГУ изготовлены 40 сенсорных пластин диаметром 76 мм (по одному сенсору типоразмера Неха на каждой пластине) из модифицированного арсенида галлия GaAs:Cr для отработки технологии резки с малым размером нечувствительной области на краю сенсорной пластины. В ОИЯИ было проведено визуальное обследование под микроскопом полученных сенсорных пластин: у одиннадцати из сорока пластин были обнаружены либо дефекты металлизации, либо механические повреждения. На испытательном стенде были прове-

¹Соглашение о предоставлении субсидии с Минобрнауки от 17 сентября 2014г. № 14.618.21.0001.

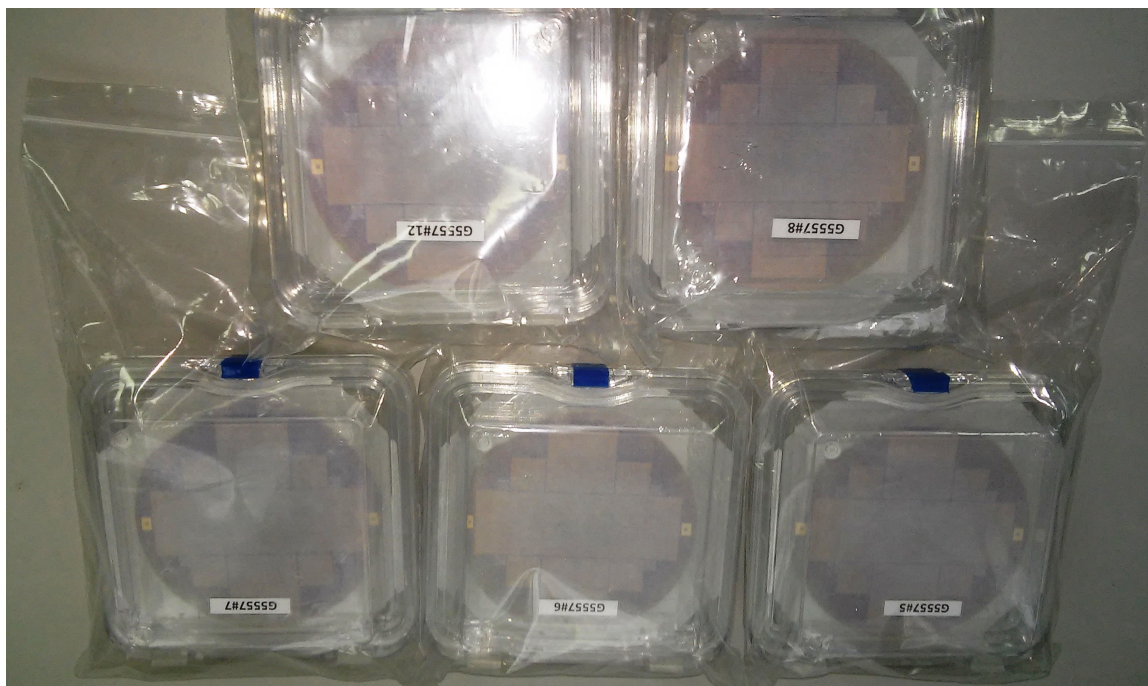


Рис. 9: Опытные образцы сенсорных пластин диаметром 102 мм, изготовленные в рамках проекта GALAPAD-2.

дены измерения характеристик всех сенсорных пластин с целью выбраковки пластин, не подходящих для последующего использования в качестве сенсоров в гибридных пиксельных детекторах;

- в ТГУ освоена технология производства пластин из детекторного арсенида галлия диаметром 102 мм, к настоящему времени изготовлены 17 сенсорных пластин типоразмера Double-Неха (рис. 9);
- ОИЯИ стал полноправным участником международной коллаборации Medipix-4;
- ОИЯИ подана заявка № 2016150633 от 22.12.2016 на изобретение “Полупроводниковый матричный детектор заряженных сильно ионизирующих частиц (многозарядных ионов)” и проведены патентные исследования.

В Германии ведется разработка технологии одновременного соединения 12 микросхем с общим сенсором и резки с малой нечувствительной областью на краю сенсора, а также разработка скоростной электроники считывания Lambda с частотой кадров 1000 кадров/с. После завершения работ один из детекторных модулей Lambda с сенсором Double-Неха будет поставлен в ОИЯИ.

Проект GALAPAD-2 должен завершиться в конце 2017 г.

Помимо сотрудничества в рамках проекта GALAPAD-2, в рамках отдельной совместной научно-исследовательской работы в сотрудничестве ОИЯИ-DESY-ТГУ в течение 2015 г. было изготовлено и протестировано 50 пиксельных сенсоров большой площади (28x42) мм² общей площадью 600 см² необходимых для создания пиксельного детектора большой площади для использования на пучках XFEL.

2.1.4 Гибридные пиксельные детекторы на основе микросхемы Timex

Разработка процедуры попиксельной энергетической калибровки детекторов Timex

Для энергетической калибровки детектора Timex с сенсором из GaAs:Cr была разработана процедура попиксельной калибровки с помощью характеристических линий в спектрах рентгеновского излучения, которые были прецизионно измерены спектрометром на основе германиевого детектора (LEGe Canberra GL0515R). К преимуществам использования рентгеновского характеристического излучения стоит отнести высокую скорость набора необходимой статистики (рассмотренную процедуру можно повторить с использованием набора эталонных радиоактивных γ -источников, но время сбора данных при этом увеличивается на порядок).

Благодаря применению попиксельной калибровки удалось достичь хорошего энергетического разрешения детектора Timex с сенсором из GaAs:Cr: 8.5 % на 57 кэВ. Показано, что дальнейшего улучшения качества калибровки в низкоэнергетической части спектра (5-15 кэВ) можно добиться увеличением в этой области числа реперных точек, по которым проводятся калибровочные кривые. В случае, если разброс параметров детекторов на основе микросхемы Timex невелик, т.е. детекторы дают схожие ToT^2 спектры при одинаковых настройках ЦАП и стабилизированной температуре сенсора, попиксельная калибровка детекторов проводится в максимально автоматизированном режиме. Для выполнения этой задачи было разработано специальное программное обеспечение. Эта возможность особенно актуальна для установок с большим числом детекторов Timex.

Исследование пиксельного детектора Timex с арсенидогаллиевым сенсором толщиной 1 мм

В 2015 году в ОИЯИ совместно с ТГУ и ЧТУ (Прага) был изготовлен первый детектор Timex с арсенидогаллиевым сенсором толщиной 1 мм. Качество сборки оказалось высоким (99.9% работоспособных пикселей). В качестве электроники считыва-

²Time-over-Threshold – длительность сигнала над порогом, пропорциональная энерговыделению в сенсоре

ния использовалась плата RelaxD³. Энергетическая попиксельная калибровка была проведена согласно методике, разработанной в ОИЯИ. Энергетическое разрешение детектора составляет 12% на энергии 20 кэВ и 7% на энергии 60 кэВ (рис. 10). Точность энергетической шкалы составляет менее 1% для гамма-квантов с энергией ниже 100 кэВ. На рис. 11 показан спектр излучения источника ¹³⁷Cs, измеренный данным детектором. Видно, что энергетическое разрешение составляет 4.8% на энергии 660 кэВ.

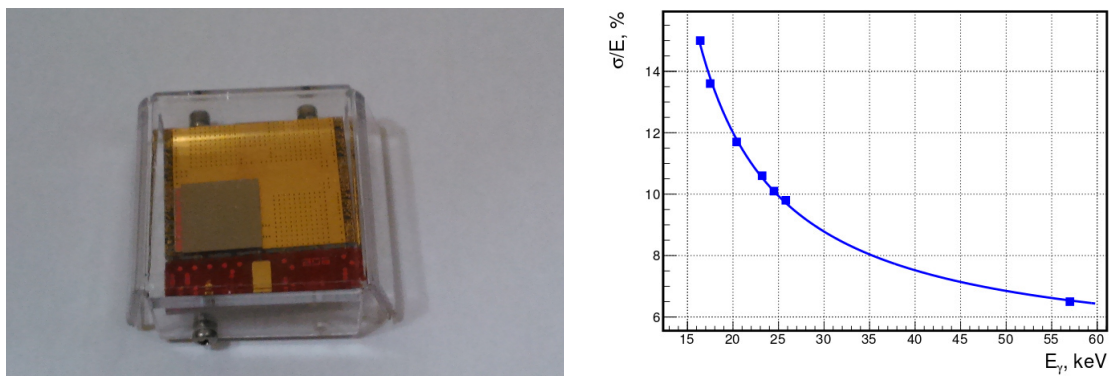


Рис. 10: Общий вид и энергетическое разрешение пиксельного детектора Timerix с арсенидогаллиевым сенсором толщиной 1 мм.

Исследование долговременной стабильности

В середине 2015 г. была начата программа измерения долговременной стабильности детектора Timerix с арсенидом галлия. Измерения производились следующим образом. Стандартный радиоактивный источник ²⁴¹Am был размещен на расстоянии 1 см от поверхности детектора. Измерения энергетического спектра источника продолжались в течение года, при этом анализировалось изменение положения фотопика, определяемое как для всех пикселей в целом, так и для отдельных зон сенсора. Было показано что положение фотопика изменялось в течение года менее чем на 1 промилле (см. рис. 12). Одновременная регистрация температуры позволила параллельно провести измерения температурной зависимости отклика детектора (см. рис. 13). Полученные результаты позволяют сделать вывод, что спектрометрические свойства арсенидогаллиевого детектора Timerix отличаются высокой стабильностью.

³Производитель - компания Amsterdam Scientific Instruments, Нидерланды.

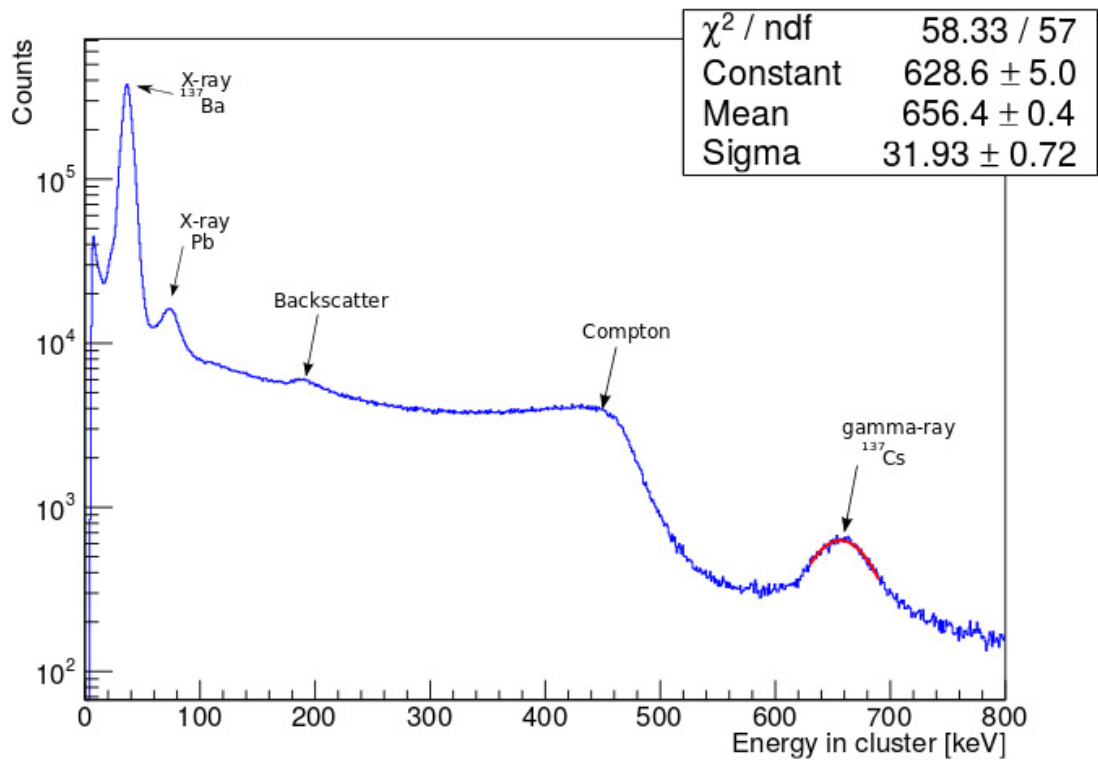


Рис. 11: Спектр ^{137}Cs после энергетической попиксельной калибровки детектора Timerix с арсенидогаллиевым сенсором толщиной 1 мм.

Измерение транспортных характеристик сенсора в пиксельном детекторе

Важной характеристикой, определяющей сбор зарядов в полупроводниковом детекторе, является произведение времени жизни неравновесных носителей τ на их подвижность μ . В ходе выполнения Проекта был разработан метод определения $\mu\tau$ электронов в арсениде галлия для пиксельных детекторов, основанный на применении бета-сепаратора – источника моноэнергетических электронов. Действие бета-сепаратора основано на селекции с помощью коллиматора электронов заданной энергии из широкого спектра β -электронов, образующихся в радиоактивном распаде ^{90}Sr . Полученные зависимости показаны в таб. 2.1. Следует отметить, что возможность надежно детектировать сигнал от электронов с энергией 100 кэВ показывает, что в арсениде галлия толщина “мертвого” слоя составляет не более 24 мкм - длину пробега электронов данной энергии.

Использование рентгеновской флюоресценции на циркониевой фольге позволяет измерить величину $\mu\tau$ отдельно для каждого пикселя. Пробег гамма-квантов с энергией 15.7 кэВ (линия K_α циркония) в арсениде галлия составляет менее 25 мкм,

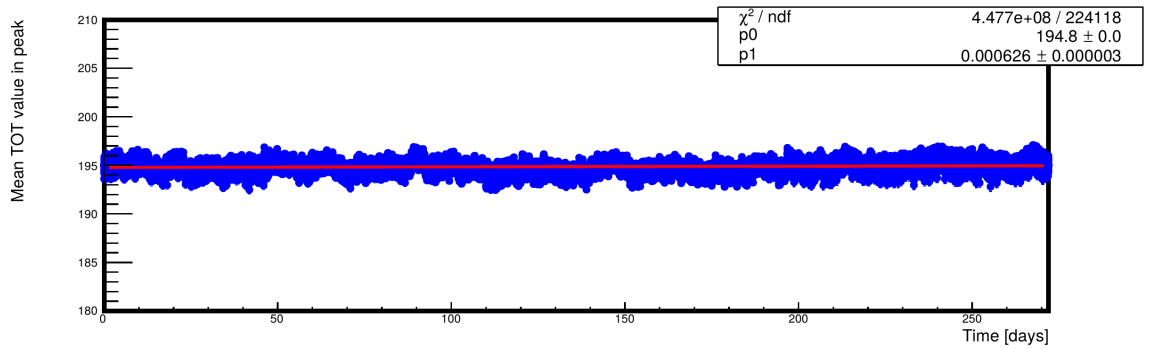


Рис. 12: Изменение положения фотопика источника ^{241}Am в зависимости от времени.

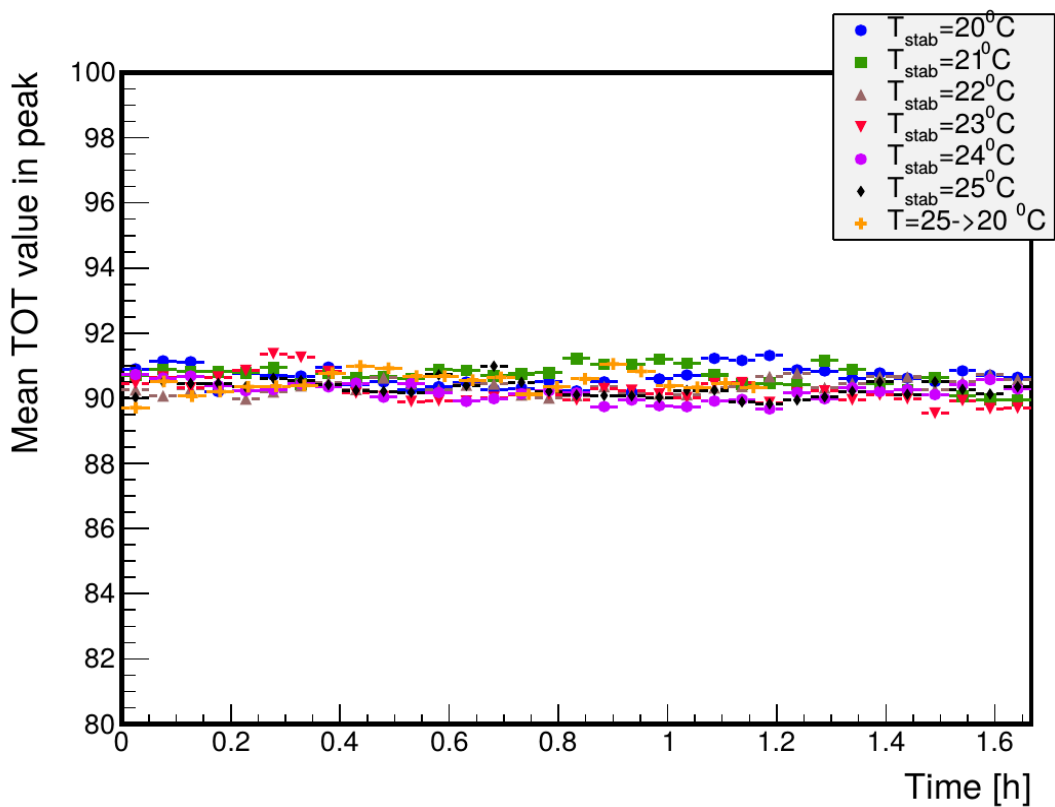


Рис. 13: Стабильность положения фотопика источника ^{241}Am при различной температуре.

E_e [keV]	Range [μm]	$\mu_e\tau_e$ [cm^2/V]
100	24	$(1.2 \pm 0.05) \times 10^{-4}$
300	143	$(1.4 \pm 0.05) \times 10^{-4}$
780	450	$(1.9 \pm 0.02) \times 10^{-4}$
1700	881	$(2.7 \pm 0.06) \times 10^{-4}$

Таблица 2.1: Изменение значения $\mu\tau$ по толщине сенсора. Глубина проникновения электронов определяется их энергией.

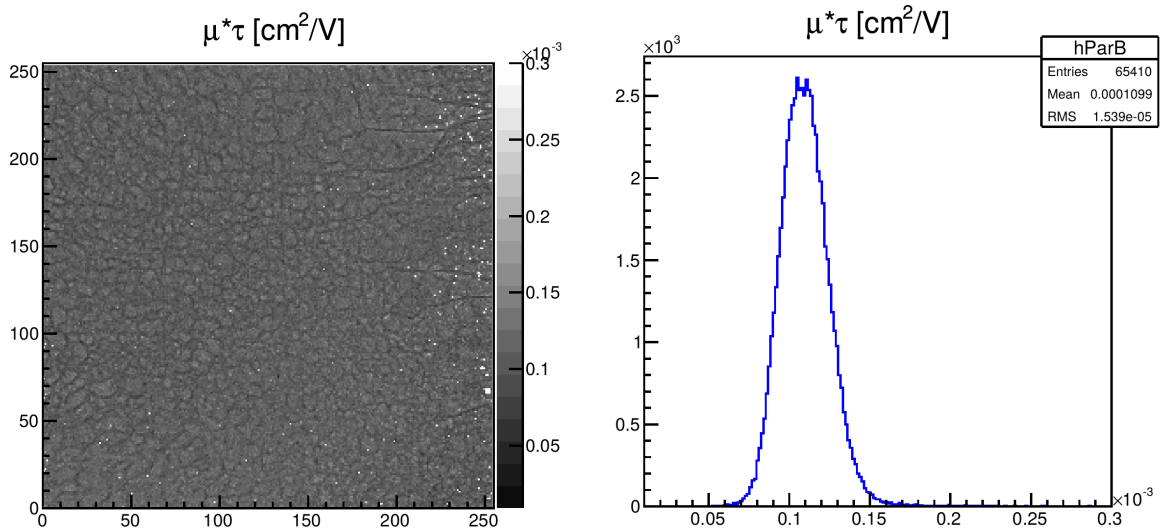


Рис. 14: Величина $\mu\tau$ в зависимости от положения пикселя (слева); распределение значений $\mu\tau$ в детекторе.

что позволяет предположить что большинство взаимодействий происходит непосредственно вблизи катода. Измерение зависимости положения фотопика от напряжения смещения для каждого пикселя и аппроксимация ее кривой Хехта позволяет определить величину $\mu\tau$ [23]. Результаты представлены на рис. 14. Средняя величина произведения $\mu\tau$ для электронов в сенсоре равна $1.1 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{V}$, дисперсия составляет $1.5 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{V}$.

Изучение отклика пиксельного детектора с помощью синхротронного излучения

В 2016 г. были проведены сеансы измерений на пучке синхротронного излучения ускорителя ВЭПП-3М (ИЯФ СО РАН, г.Новосибирск). Это позволило экспериментально исследовать поведение арсенидогаллиевых пиксельных детекторов при вы-

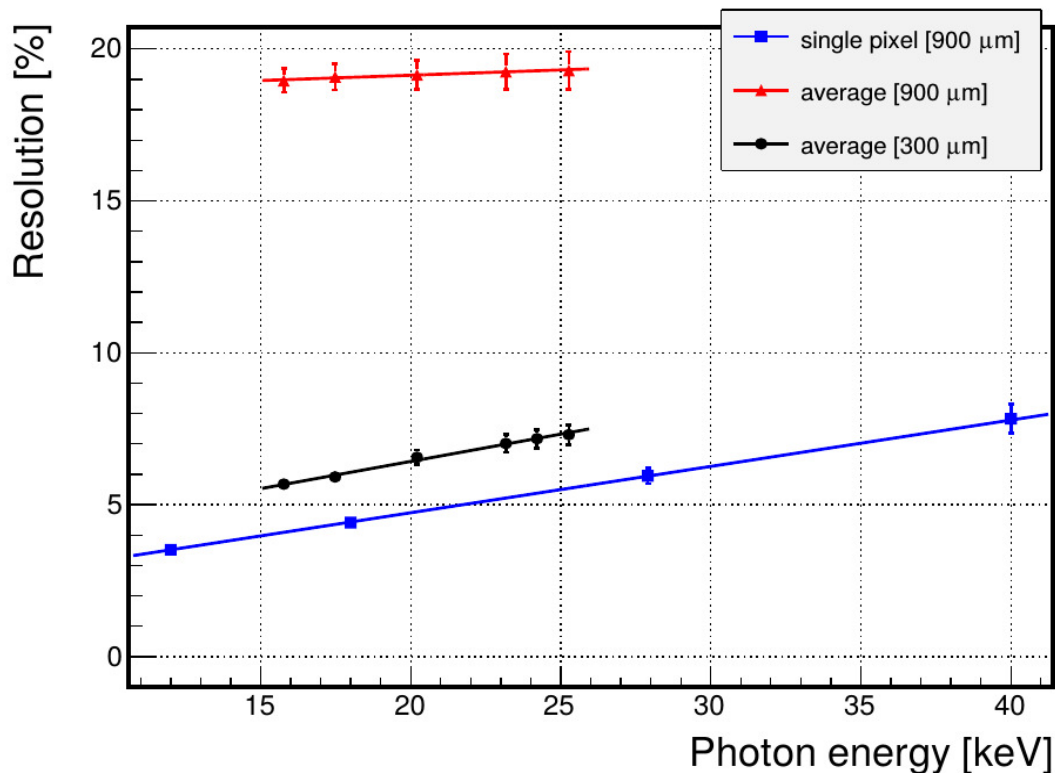


Рис. 15: Зависимость энергетического разрешения детектора (выраженная в процентах от измеренной энергии) от энергии фотона.

соких загрузках, а также провести измерения характеристик детектора в режиме Medipix⁴ с помощью коллимированного монохроматического пучка фотонов. Эксперимент проводился на синхротронной станции “Томография и микроскопия” с монохроматическими фотонами, энергия которых варьировалась в диапазоне 6 – 40 кэВ с разбросом $dE/E=0.072\%$. Использование коллиматора позволяло получить параллельный пучок с поперечным размером 10 мкм × 10 мкм. Точное позиционирование детектора позволяло направлять пучок в требуемую часть пикселя.

Зависимость энергетического разрешения детектора от энергии фотона показана на рис. 15 в трех случаях – если фотоны попадают в геометрический центр пикселя и в среднем для детекторов с толщиной сенсора 300 мкм и 900 мкм. Наилучший результат – 4.5% при 18 кэВ – достигается если фотоны попадают в центр пикселя.

⁴режим счета отдельных фотонов

2.1.5 Пиксельные детекторы как элементы трековых систем

Пиксельные кремниевые детекторы - перспективный инструмент для создания трековых систем, который уже активно используется в физике высоких энергий. Одно из возможных применений – исследование электромагнитной диссоциации изотопа углерода ^{12}C , определение вероятности фрагментации в три ^3He . В ЛФВЭ подготовлена оснастка для телескопа из 4 кремниевых детекторов на основе микросхемы Timerix. При этом первый детектор повернут почти параллельно пучку, поэтому служит одновременно и трековым детектором, и мишенью. При таком угле поворота видны входящие частицы и возможна идентификация ^{12}C , видна точка взаимодействия и уходящие треки. В экспериментах ЛФВЭ было измерено сечение взаимодействия углерода с кремнием, поэтому можно оценить, что в детекторе на 1000 входящих частиц можно ожидать одно взаимодействие. Основные задачи этого направления - это освоение методики работы с детекторами, изучение кулоновской диссоциации радиоактивных ядер и их фрагментации. Точность восстановления трека в телескопе зависит от формы кластера и может достигать 2-3 микронной точности. Следует отметить, что с помощью этого метода можно исследовать ряд процессов, изучение которых было доступно только с помощью фотоэмульсий. Основным ограничивающим фактором, препятствующим применению телескопа в эксперименте, является низкая скорость считывания электроники, поэтому крайне желательна замена электроники на более быстродействующую.

В ходе выполнения Проекта было проведено испытание детекторов Timerix на пучке ядер углерода ^{12}C с энергией 1.2 ГэВ/нуклон на Нуклотроне ОИЯИ. Были получены распределения размеров кластера и потерь энергии. Проведено относительное выравнивание детекторов Timerix в телескопе. Измерение числа δ -электронов на длине детектора Timerix показало, что методы, применяемые при работе с фотоэмульсиями для определения заряда ядер по числу δ -электронов, не могут быть непосредственно перенесены на пиксельные детекторы и нуждаются в доработке.

Данная работа выполняется в сотрудничестве с группой Чешского технического университета (г.Прага).

2.2 Программа исследований на 2018-2020 г.

2.2.1 Поиск путей повышения радиационной стойкости детекторов на основе арсенида галлия

Полученные в 2016 г. данные по измерению радиационной стойкости детекторов будут использованы для разработки модели радиационных повреждений GaAs:Cr и в

перспективе, для поиска путей повышения их устойчивости к облучению. Основной причиной ухудшения детекторных свойств арсенида галлия является образование дефектов кристаллической решетки, причем различные типы облучения приводят к различным повреждениям и скорости их появления. В качестве мер увеличения радиационной стойкости обычно рассматривается введение легирующих примесей, компенсирующих влияние дефектов на сбор заряда. Поскольку этот метод (компенсация хромом) является основой производства высоко-резистивного арсенида галлия, то есть определенная надежда повысить радиационную стойкость данного материала путем изменения технологии компенсации хромом или введением дополнительных примесей. Однако для этого требуются количественные измерения скорости образования различных типов дефектов при различных видах облучения и мощности дозы. Существующие методы измерений – вольт-амперные и вольт-фарадные характеристики, измерение эффективности сбора заряда – естественно, дают определенную информацию, однако не позволяют различить типы образующихся дефектов. Для решения этой задачи планируется создание в ЛЯП в течение 2018-2019 г. стенда для проведения измерений методом релаксационной спектроскопии глубоких уровней (DLTS).

При выполнении этих исследований планируются дополнительные сеансы облучения образцов на электронном пучке ускорителя Линак-200, нейтронных пучках реактора ИБР-2М и, возможно, других источников радиации.

Данные работы будут проводиться в сотрудничестве с ТГУ и Институтом космических исследований (Бухарест-Магуреле, Румыния).

2.2.2 Идентификация частиц в гибридных пиксельных детекторах

Отличия в характере взаимодействия заряженных частиц различного типа с веществом (различный пробег, вероятность рассеяния, количество выделяемой энергии) приводят к видимому различию формы кластеров и величины сигнала на пиксельных детекторах (рис. 16). Эти различия могут быть использованы для идентификации частиц по их отклику.

В ходе выполнения Проекта на пучках установок ОИЯИ и CERN были проведены наборы статистики с детектором Timerix для разных типов частиц: рентгеновских и высокоэнергетических гамма-квантов, электронов, протонов, альфа-частиц, нейтронов, дейтронов и тяжелых ионов различной энергии. В результате был разработан новый способ идентификации частиц для разделения взаимодействий в сенсоре, имеющих электромагнитную и ядерную природу. Для разделения используются два параметра D1 и D2. Параметр D1 вычисляется как отношение площади кластера к его периметру и характеризует форму кластера. Параметр D2 вычисляется как число

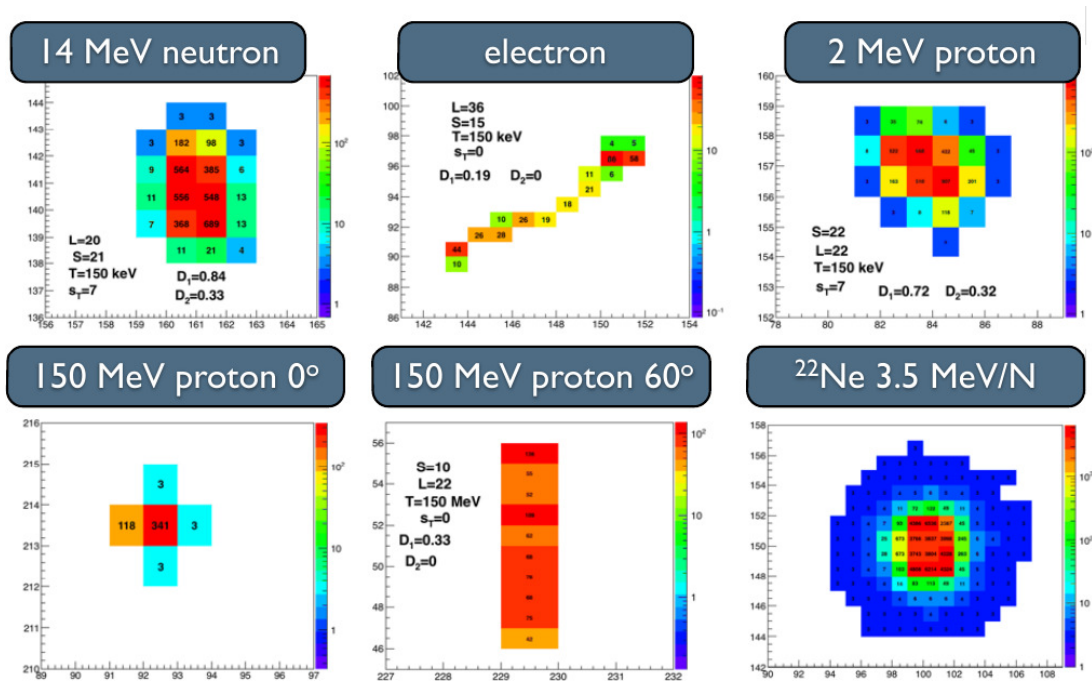


Рис. 16: Типичные кластеры, образуемые в детекторах Timex различными типами частиц.

пикселей с энерговыделением выше определенного порога к полному числу пикселей в кластере и характеризует ионизационные потери частиц. Пример разделения показан на рис. 17.

В ходе выполнения Проекта в 2018-2020 г. планируется улучшить процедуру идентификации частиц и получить численные оценки эффективности и чистоты получаемого разделения.

2.2.3 Регистрация нейтронов

Большое практическое значение имеет регистрация нейтронов и определение их спектра с помощью детекторов Timex. Хотя в случае тепловых нейтронов возможность их регистрации с использованием различных конвертеров была успешно продемонстрирована в работах [20, 24, 25], регистрация и определения спектра быстрых нейтронов является более сложной задачей.

Осенью 2015 г. в ходе выполнения Проекта отклик детекторов Timex на прохождение нейтронов был исследован на нейтронном пучке n_TOF в CERN. Детекторы с сенсором из кремния и арсенида галлия облучались нейтронами с энергией от 1 эВ до 1 МэВ. Используя информацию о времени пролета был восстановлен спектр нейтронов, зарегистрированных этими детекторами (рис. 18). Для этого детекторы Timex

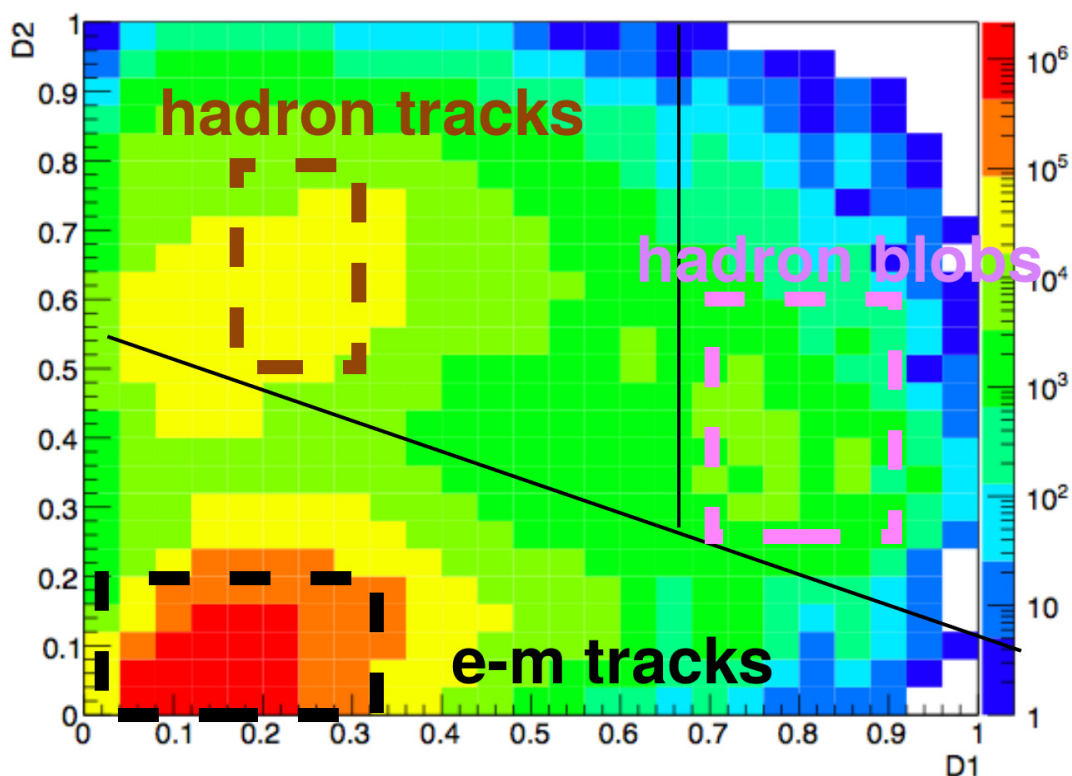


Рис. 17: Разделение типов кластеров в детекторе Timerix на основе параметров D1 и D2.

были настроены на работу в смешанном режиме (каждый 9-й пиксель измерял не амплитуду сигнала, а время от начала сигнала до конца кадра).

В течение 2018-2020 г. планируется провести дополнительные измерения и экспериментально определить зависимость эффективности регистрации нейтронов арсенидогаллиевыми детекторами от энергии нейтронов, а также изучить использование нескольких конвертеров с различным порогом нейтрон-индуцированных реакций для определения спектра быстрых нейтронов.

Результаты этой работы будут особенно полезны при анализе и интерпретации данных, поступающих с установленной в шахте эксперимента ATLAS на LHC системы мониторинга радиационного фона GaAsPix [26].

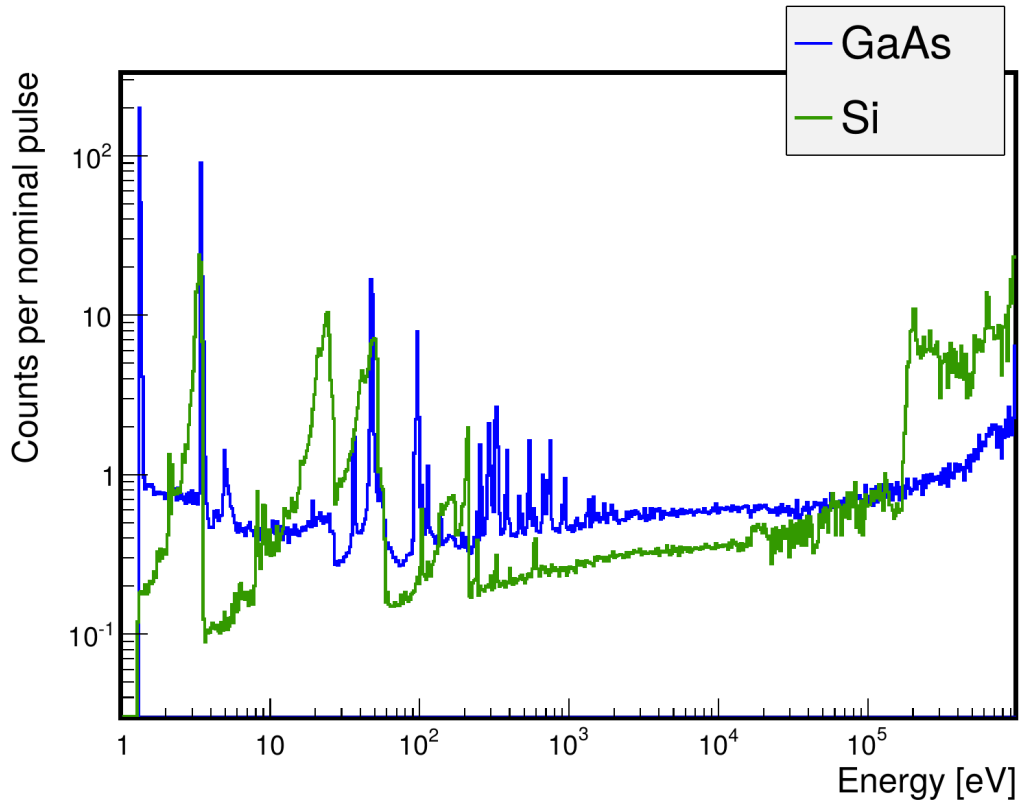


Рис. 18: Спектр нейтронов в детекторах Timex с сенсорами из кремния и арсенида галлия.

2.2.4 Изучение отклика гибридных пиксельных детекторов на прохождение тяжелых заряженных частиц

Хотя отклик кремниевых детекторов Timex на прохождение тяжелых ионов изучался несколькими группами [27, 28], до настоящего времени отсутствовала информация об отклике на тяжелые ионы подобных детекторов с арсенидогаллиевым сенсором. В частности, применение кремниевых детекторов Timex для регистрации тяжелых ионов показало наличие так называемого “вулкан-эффекта” – деформации профиля кластера в области максимального энерговыделения (рис. 19).

В ходе выполнения Проекта была проведена серия измерений на пучках ускорителя У-400М ЛЯР, при которой детекторы Timex с кремниевыми и арсенидогаллиевыми сенсорами облучались различными тяжелыми ионами при разной энергии пучка. В результате этих измерений было показано что в арсенидогаллиевых детекторах “вулкан-эффект” отсутствует (рис. 19), но существует большая нелинейность при измерении энергии, связанная как с насыщением предусилителя электроники считывания, так и с физическими процессами в самом сенсоре, которая затрудняет

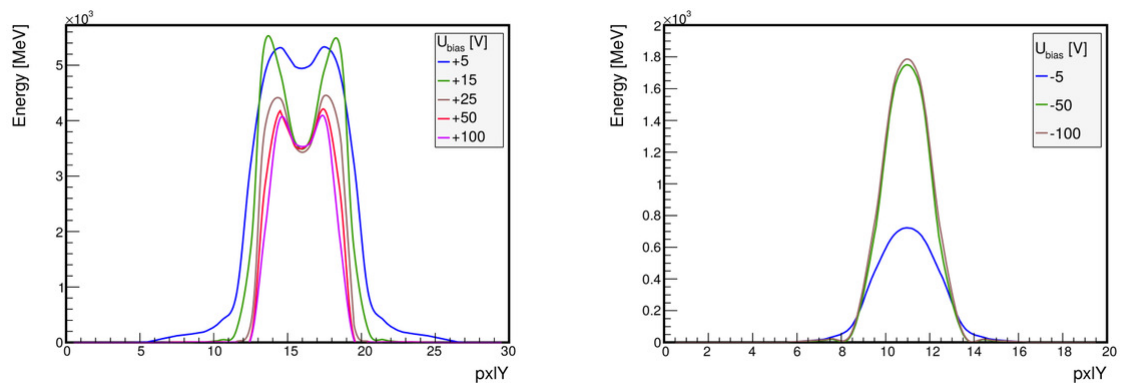


Рис. 19: “Вулкан-эффект” в кремниевом (слева) и арсенидогаллиевом (справа) детекторе Timerix при облучении ионами неона с энергией 158 МэВ.

калибровку детекторов и осложняет точное измерение энергии иона.

В течение 2018-2020 г. планируется подробно изучить механизм формирования отклика детектора Medipix при прохождении тяжелых заряженных частиц с большим энерговыделением и разработать надежные методы измерения энергии и координаты взаимодействия частиц. Следует отметить, что большой размер кластера (несколько десятков одновременно сработавших пикселей) позволяет существенно увеличить пространственное разрешение детектора за счет нахождения центра тяжести пикселей в кластере.

Разработка и верификация методик регистрации характеристик (интенсивность, профиль, идентификация частицы по энергии) пучков тяжелых ионов с помощью детектора Medipix в диапазоне энергий от 5 кэВ до 10 МэВ на нуклон будут полезны для создания аппаратуры диагностики пучка тяжелых ионов, в частности для измерения энергии падающего на детектор пучка и создания позиционно чувствительных матриц для контроля и визуализации профиля пучка тяжелых ионов.

2.2.5 Применение пиксельных детекторов в экспериментах с гиперядрами и релятивистскими ионами на Нуклотроне

Для экспериментов на Нуклотроне необходимо изготовление нового поляриметра для источника поляризованных дейтронов. Поляризация пучка должна измеряться как непосредственно за линейным ускорителем ЛУ-20, так и в кольце Нуклотрона. Измерение поляризации производится посредством определения асимметрии “лево-право” при рассеянии ионов при заданный угол. Предлагается использовать в качестве чувствительного элемента нового поляриметра детектор Timerix. Интен-

сивность рассеянных частиц составляет порядка 100 Гц, что вполне приемлемо для такого детектора. По сравнению с существующей электроникой, способной работать лишь при интенсивности потока не выше 10 Гц, новая система позволит на порядок сократить время измерений и одновременно повысить точность за счет более высокого пространственного разрешения матрицы Timerix. Новый поляриметр на основе детектора Timerix планируется изготовить и установить в течение 2017-2019 г.

Глава 3

Исследовательская инфраструктура в ЛЯП ОИЯИ

3.1 Основные результаты 2015-2017 г.

3.1.1 Измерительный стенд “Калан”

Измерительный стенд “Калан” предназначен для калибровки и изучения отклика детекторов с помощью рентгеновских лучей и, в будущем, закрытых радиоактивных источников излучения. Стенд состоит из рентгенозащищенной камеры, оборудованной системой автоматической блокировки при открытии дверей, в которой устанавливается источник излучения и исследуемый детектор, соединенный с системой сбора данных и источником высокого напряжения (рис. 20). В качестве источника излучения используются микрофокусные рентгеновские аппараты РАП-150МН или SourceRay SB-120 с рабочим напряжением до 150 и 120 кВ, управляемые с помощью ПК, а также радиоактивные источники.

3.1.2 Испытательный стенд на основе зондовой станции

В 2015 году был создан и введен в эксплуатацию испытательный стенд на основе зондовой станции Cascade Microtech EPS150TESLA для изучения свойств полупроводниковых материалов. Предварительно были проведены ремонтные работы в чистом помещении, где установлен испытательный стенд: был укреплен пол, обновлена система вентиляции, прочищены системы подачи сжатого воздуха и вакуума, улучшен контур заземления. Эти мероприятия призваны обеспечить поддержание в чистом помещении нужных условий окружающей среды для нормального функционирования зондовой станции. В чистом помещении на двух бетонных опорах бы-

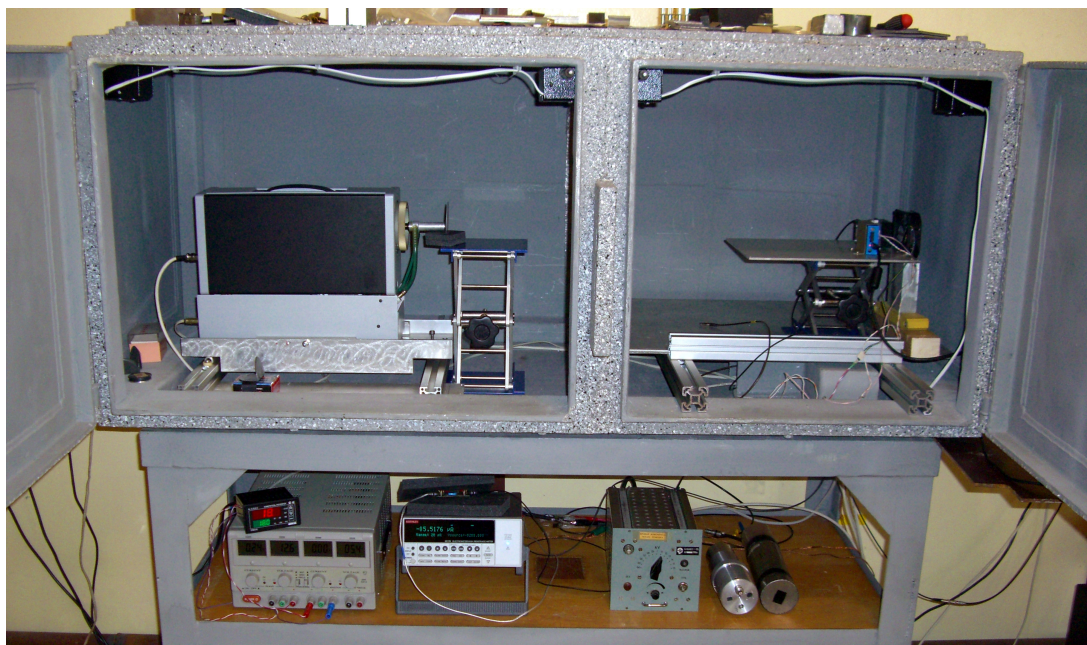


Рис. 20: Измерительный стенд “Калан”.

ла установлена металлическая рама, покрытая 5 мм стальным листом, в качестве основания для монтажа зондовой станции. Все компоненты испытательного стенда (сама зондовая станция, модуль для подачи высокого напряжения, пикоамперметр Keithley 2400, измеритель емкости Keysight (Agilent) E4981, регулятор температуры) были смонтированы в течение 2015 года. На рис. 21 показан общий вид созданного испытательного стенда.

Стенд позволяет проводить измерения вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик исследуемых образцов на участках размером вплоть до $5 \text{ мкм} \times 5 \text{ мкм}$. Диапазон измеряемых токов составляет от 0.1 нА до 100 мА при напряжении смещения до 1 кВ , точность измерения составляет не хуже 5% .

3.1.3 Стенд для измерения эффективности сбора заряда

Для измерения эффективности сбора заряда был разработан и создан специальный стенд. Работа стенда основана на прохождении коллимированного пучка электронов от радиоактивного β -источника ^{90}Sr с последующим съемом и анализом сигнала в исследуемом детекторе с помощью модуля DRS4. Триггерный сигнал формируется на основе отклика двух сцинтилляционных счетчиков, что дает возможность измерять эффективность сбора зарядов вплоть до крайне низких величин (менее 1%) благодаря подавлению фоновых случайных срабатываний. На этом же стенде воз-

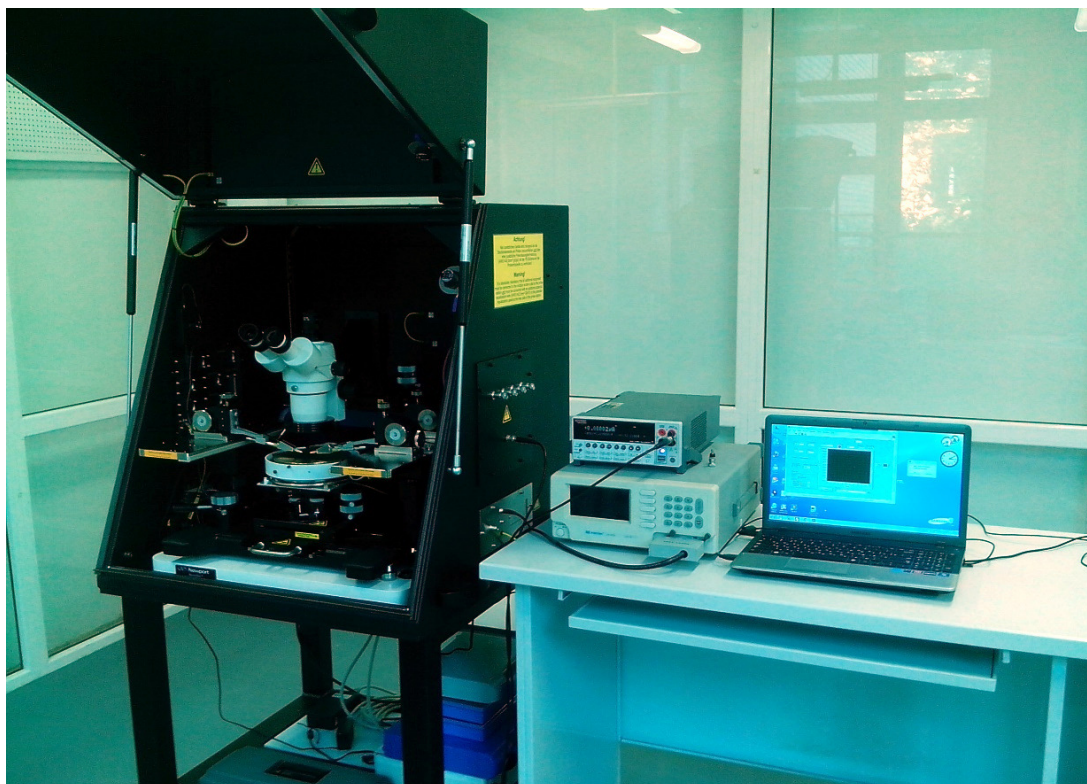


Рис. 21: Испытательный стенд на основе зондовой станции Cascade Microtech EPS150TESLA для изучения свойств полупроводниковых материалов.

можно измерение вольт-амперных характеристик детектора. Измерения происходят достаточно быстро: время измерения эффективности сбора заряда обычно составляет около 15 минут, время снятия вольт-амперной характеристики - около 10 минут. На стенде возможно проведение измерений характеристик детекторов, не закрепленных на печатной плате.

Схема устройства и фотография стенда показаны на рис. 22.

3.1.4 Установка для ультразвуковой микросварки

Детектор семейства Medipix принципиально состоит из микросхемы считывания и полупроводникового сенсора, соединенных методом „перевернутого кристалла“. Такая сборка устанавливается на плате считывания, подключенной к электронике считывания. Формирование электрического соединения между контактными площадками платы и выводами микросхемы Medipix проводится с помощью проволочных перемычек. Аналогичным образом производится монтаж пэдových детекторов.

Для монтажа детекторов на печатные платы и мелкого ремонта имеющихся де-

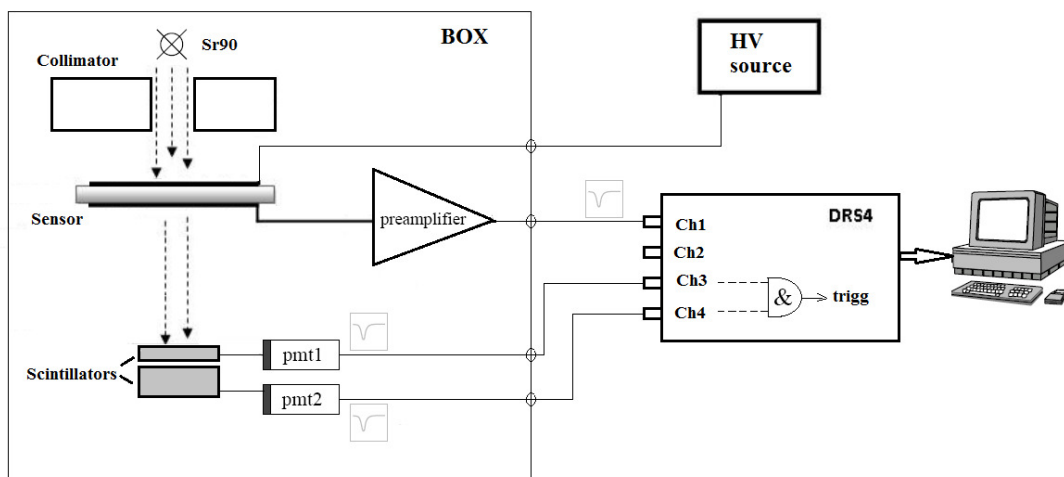
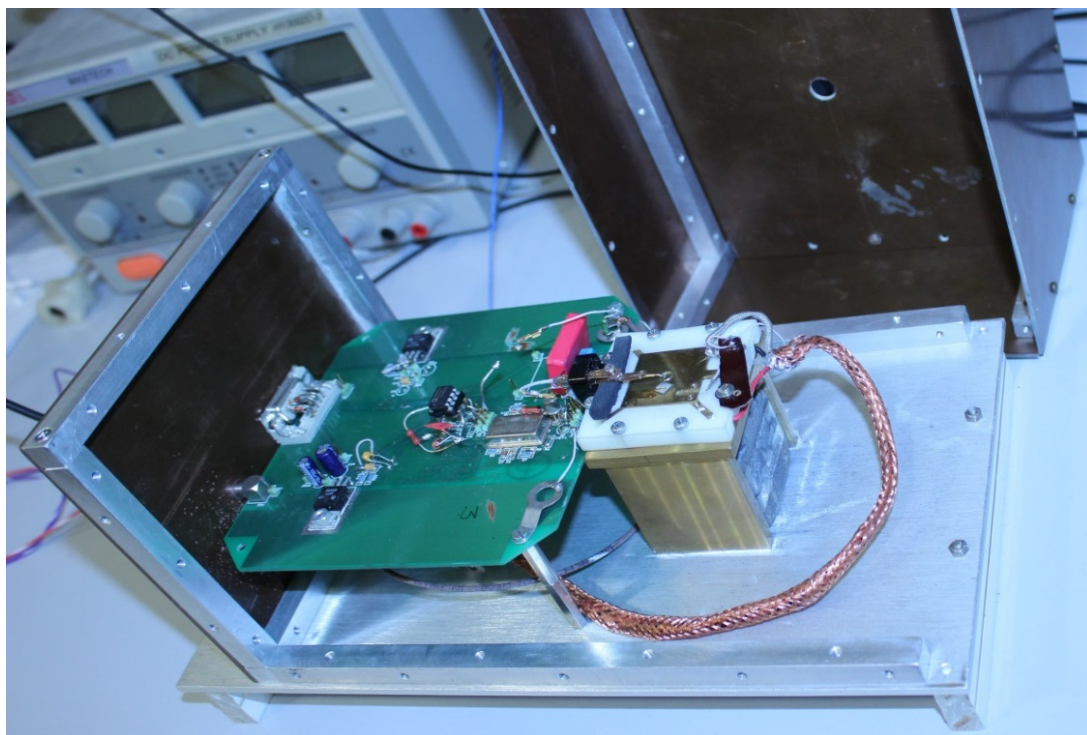


Рис. 22: Стенд для измерения эффективности сбора заряда.



Рис. 23: Установка для ультразвуковой микросварки

текторов в 2015 г. была приобретена и введена в эксплуатацию полуавтоматическая установка ультразвуковой микросварки ТРТ НВ-16 (рис. 23). Для каждого материала (Ni, Al, Cu) подложки подобраны режимы термозвуковой микросварки с помощью алюминиевых проволок диаметром 20-25 мкм (рис. 24). Данная установка является универсальной и может применяться при сборке других детекторов (например, микрополосковых, педовых), для других лабораторий ОИЯИ и стран участниц. Для обеспечения качества сборки детекторов установка ТРТ НВ-16 размещена в чистом производственном помещении классом 10000 по стандарту 209D. Помещение использовалось ранее при производстве дрейфовых детекторов мюонного спектрометра установки ATLAS в 2000-2003 гг. В ходе выполнения данного Проекта чистое помещение было модернизировано: произведена замена напольного покрытия, замена элементов системы вентиляции и очистки воздуха, замена автоматики поддержания температуры, кроме того создана система мониторинга климата внутри чистого помещения.

3.1.5 Проработка ТЭО участка для сборки детекторов

В соответствии с первоначальными целями Проекта, в которые входило создание в ЛЯП специализированной лаборатории, позволяющей проводить сборку опытных

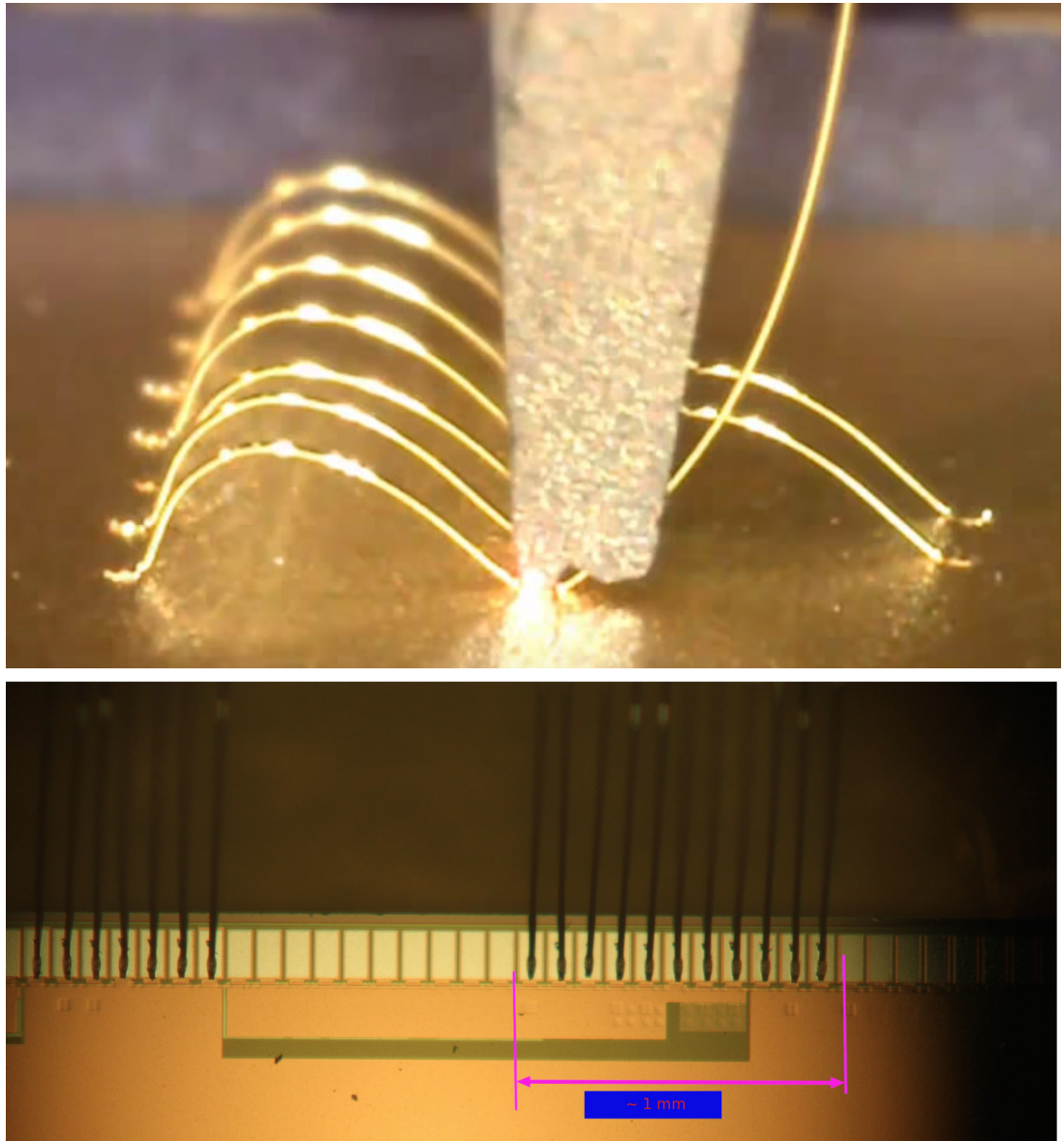


Рис. 24: Пример создания микропроволочных соединений методом “клин-клин” (вверху) и пример соединений микросхемы Medipix с платой считывания.

образцов, в течение 2015 г. был проработан вариант создания сборочного участка, дающего возможность мелкосерийного производства пиксельных детекторов в ОИЯИ, а также, в случае кооперации с ТГУ и ИФВЭ, позволяющего реализовать полную технологическую цепочку по производству подобных детекторов на территории Российской Федерации.

В полном варианте лаборатория для сборки детекторов включает в себя:

- участок химической обработки и фотолитографии (очистка пластин, экспонирование пластин, травление)
- магнетронную установку для нанесения подслоя металлизации
- установку для формирования микроконтактов (бампов)
- установку для резки пластин
- установку для высокоточного совмещения и монтажа

Для размещения оборудования планировалось выделить в существующем чистом помещении рабочую зону с классом чистоты 100 площадью ок. 30 м². Химическая обработка должна проводиться в отдельном помещении. Контроль качества может производиться с помощью существующего измерительного участка.

В результате проведенной работы было подобрано соответствующее оборудование, подготовлены технико-экономическое обоснование и план развертывания участка. Полная стоимость создания подобного участка оценивается в 1,98 MUSD (цены 2015 г.).

В связи с достаточно высокой стоимостью решение по созданию участка было отложено до появления необходимости в мелкосерийном производстве пиксельных детекторов в ОИЯИ. Планируется, что в рамках данного Проекта будет развиваться в основном измерительный участок и отдельные установки для мелкого ремонта существующих детекторов (например, установка для ультразвуковой микросварки и, в будущем, для BGA-монтажа). Производство самих детекторов будет по-прежнему проводиться сторонними организациями, используя сложившуюся международную кооперацию.

3.1.6 Участок микротомографии

В ходе выполнения Проекта были проведены работы по совершенствованию рентгеновского микротомографа MARS, причем наибольшие усилия были приложены для развития программного обеспечения.

Программное обеспечение для управления томографом было существенно улучшено, что позволило значительно повысить надежность работы и гибкость в использовании имеющейся аппаратуры.

Для повышения качества томографических изображений было разработано программное обеспечение для предварительной обработки получаемых проекций, включающее в себя:

1. сшивку больших проекций из отдельных кадров;
2. нормировку на открытое поле;
3. фильтрацию шумящих и неадекватно работающих пикселей по открытому и темному полю;
4. вычисление попарных разностных проекций для последовательных порогов по энергии;
5. преобразование данных из проекций в синограммы;
6. фильтрацию кольцевых артефактов по синограммам.

Наряду с использованием коммерческого ПО Octopus¹ в ОИЯИ была создана собственная реализация алгоритма приближенной реконструкции для конусно-лучевой томографии FDK (Feldkamp, Davis, and Kress, 1984) для обработки полученных проекций и восстановление сечений объекта. Простота алгоритма делает его широко применимым в КТ, однако ввиду вычислительной сложности, восстановление срезов изображения занимает значительное время. Приоритетной задачей является уменьшение времени обработки проекций и восстановления изображений образца без потери качества реконструкции. В связи с этим были разработаны параллельные реализации FDK для проведения расчетов на гетерогенных вычислительных системах с применением технологии OpenMP. Была использована архитектура с управлением задачами (механизм OpenMP tasks) для организации оптимального распределения заданий между потоками и доступными устройствами (многопроцессорными ЦПУ и со-процессорами Intel Xeon Phi). Представлены результаты расчетов эффективности и ускорения, проведен сравнительный анализ разработанных параллельных реализаций. Показано сравнение реализаций между собой и с коммерческими аналогами по эффективности использования памяти и времени работы. Использование параллельных вычислений позволило ускорить работу алгоритма до 34 раз, сделав

¹<https://octopusimaging.eu>

реализацию алгоритма сопоставимой с коммерческими аналогами. Расчеты проводились на гетерогенном кластере HybriLIT Лаборатории информационных технологий ОИЯИ.

Кроме того, была проведена алгоритмическая оптимизация алгоритма реконструкции, позволяющая минимизировать память и уменьшить количество вычислений с $O(N^4)$ до $O(N^{3.5})$, реализован алгоритм компании Instarecon, позволяющий уменьшить сложность реконструкции до $O(N^3 \log(N))$. Ведется работа над улучшением качества реконструкции с помощью быстрых алгоритмов.

Для решения прикладных задач было разработано программное обеспечение для сегментации объемных изображений спектральной томографии и последующего гранулометрического анализа, позволяющего подсчитать такие величины как объем, площадь поверхности, среднюю интенсивность (рентгеновскую плотность), СКО интенсивности, ориентацию, сферичность и др.

Развитие методов спектральной рентгеновской микротомографии, важным преимуществом которой является возможность разделения веществ, требует детального моделирования прохождения рентгеновских лучей через вещество. Для решения этой задачи было разработано программное обеспечение на основе программного пакета Geant4 [22]. Моделирование микротомографа включало в себя моделирование спектра рентгеновского источника, прохождения излучения через исследуемый образец с учетом зависимости линейного коэффициента ослабления от энергии рентгеновских лучей и регистрации полученного теневого изображения в пиксельном детекторе. Поскольку моделирование микротомографа методом Монте-Карло требует значительных вычислительных ресурсов, для расчетов был использован облачный сервис Amazon AWS. Предварительно были проведены оценки производительности и затрат на моделирование в зависимости от типа инстанса. Было показано, что использование более дорогих инстансов не приводит к существенному сокращению времени вычислений. Эту особенность можно объяснить тем, что приложения, основанные на программном пакете Geant4 имеют крайне невысокую эффективность использования ресурсов на вычислительных узлах с многоядерными ЦПУ. Следует отметить, что разработанные методы и программное обеспечение могут использоваться для моделирования методом Монте-Карло при решении других ядерно-физических задач.

Кроме того, была разработана процедура механической юстировки микротомографа, позволившая существенно улучшить качество получаемых изображений (рис. 25), которая неоднократно применялась при смене детектора и рентгеновского источника.

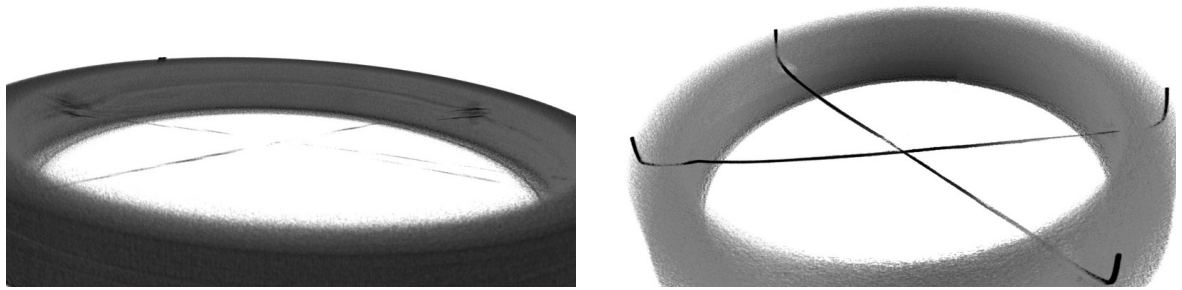


Рис. 25: Пример реконструированного изображения до (слева) и после (справа) юстировки.

3.2 Программа развития на 2018-2020 г.

3.2.1 Участок для изучения характеристик пиксельных детекторов

Основным улучшением на участке для изучения характеристик пиксельных детекторов является создание стенда и освоение методики релаксационной спектроскопии глубоких уровней (DLTS).

Кроме того, запланированы усовершенствования существующих стендов: улучшение системы питания стенда “Калан” и установка высоковольтного соединения на зондовую станцию, что позволит проводить на ней снятие вольт-фарадных характеристик при высоких напряжениях.

Для проведения измерений с детекторами Timex, в том числе на ускорителях, требуется приобретение нескольких низкоскоростных блоков электроники считывания.

3.2.2 Участок микротомографии

Основной трудностью при проведении сканирования на микротомографе MARS является большая продолжительность сканирования крупных образцов. В первую очередь это связано с малым размером детектора в камере (в настоящее время камера содержит один детектор Medipix размером 14 мм×14 мм). В связи с этим в ходе выполнения Проекта планируется совершенствование камеры микротомографа, в частности установка в микротомограф одного или двух детекторов типоразмера Quad (т.е. состоящих из 4 микросхем Medipix). Кроме того, в связи с выработкой ресурса рентгеновской трубки, в ближайшие один-два года потребуется замена рентгенаппарата в томографе.

Опыт работы с микротомографом MARS показал, что для ряда задач достигнутое пространственное разрешение ~ 50 мкм недостаточно. В первую очередь это касает-

ся исследования тонкой структуры стенки атеросклерозных бляшек и исследования пористости нефтегазовых кернов. В связи с этим планируется создание в составе участка микротомографии второго микротомографа с неподвижным детектором и вращающимся образцом, способного достичь пространственного разрешения 5-7 мкм за счет геометрического увеличения. Для достижения лучшего качества изображения в микротомографе будет использован рентгеновский аппарат Hamamatsu с размером фокусного пятна 15 мкм и детектор Lambda D-NeXa, который будет изготовлен в рамках проекта GALAPAD-2.

Будет продолжено развитие программного обеспечения для моделирования и реконструкции томограмм. Особое внимание будет уделяться повышению качества изображений, использованию быстрых алгоритмов обработки больших объемов томографических данных и использованию новых аппаратных возможностей (многоядерные процессоры, графические ускорители и т.п.)

3.2.3 Разработка электроники считывания на основе микросхемы Medipix4

В 2016 г. была создана коллаборация Medipix-4, в состав которой в настоящее время входят Национальная лаборатория Беркли, CEA, CERN, Чешский технический университет, DESY, синхротронный центр Diamond, ОИЯИ, NIKHEF, университеты Хьюстона, Кентербери и Маастрихта. Основной задачей коллаборации является разработка нового поколения микросхем семейства Medipix, опирающегося на технологический процесс 65 нм. Одновременно будут разрабатываться две микросхемы - Medipix4 и Timerix4. Ключевые характеристики новых микросхем представлены в таблице 3.1.

	Medipix4	Timerix4
Размер пикселя	50 мкм	35 мкм
Полярность собираемого заряда	±	±
Уровень шума	≤ 75e ⁻ rms (SPM)	≤ 75e ⁻ rms
Время формирования сигнала	25 нс, 50 нс, 100 нс	–
Состыковываемость	4-сторонняя	3-сторонняя
Точность временной метки	–	< 1 нс
Число порогов	4,16	–

Таблица 3.1: Ключевые характеристики микросхем Medipix-4 и Timerix-4.

Благодаря применению технологии TSV (Through-Silicon-Via) микросхема

Medipix4 будет первой микросхемой для считывания пиксельных сенсоров с 4-сторонней состыковываемостью, что позволит делать детекторы большой площади без зон нечувствительности. Кроме того, микросхема может быть адаптирована к сенсорам с различным шагом пиксельной матрицы, в соответствии с требованиями к материалу выбранного датчика и целевому диапазону энергии рентгеновских лучей. Микросхема Timerix4 будет измерять время регистрации частиц с точностью 1 нс или лучше, на пиксельной матрице с предельно малым шагом. Следует отметить, что различные характеристики могут быть изменены в процессе разработки, как следствие меняющихся требований коллаборации Medipix-4 или в результате технологических ограничений на этапе разработки.

Поскольку ОИЯИ является полноправным участником коллаборации Medipix-4 и получит доступ как к опытным образцам микросхем, так и к научно-технической документации по их использованию, представляется вполне естественным заранее подготовиться к разработке аппаратуры на их основе. В первую очередь это касается освоения технологии монтажа микросхем на плату считывания и разработки электроники считывания.

Если монтаж микросхем Timerix4 будет осуществляться уже известным и освоенным методом ультразвуковой микросварки, то применение технологии TSV в микросхемах Medipix4 требует освоения пайки методом BGA. В связи с этим в ходе выполнения Проекта в 2018-2020 г. планируется приобретение установки для BGA-монтажа и подбор оптимальных режимов пайки шариками.

В ходе выполнения Проекта в 2016-2017 г. был разработан собственный прототип электроники считывания для семейства детекторов Medipix, который состоит из отладочной платы с ПЛИС Altera Cyclone 5 SoC и платы-переходника с VHDCI разъемом (рис. 26). Для данного прототипа было разработано программное обеспечение: прошивка ПЛИС, процессора и графический интерфейс для ПК. Передача данных на ПК осуществляется по сети Ethernet. Преобразование псевдослучайного счета детектора производится в ПЛИС. Данные из детектора хранятся в сдвиговом регистре (3584 бита — строка). По мере наполнения регистра данные преобразуются из псевдослучайного вида в обычный по одному пикселю (14 бит). Готовые данные остаются в памяти ПЛИС, откуда считываются процессором и передаются на ПК.

В 2018-2020 г. планируется создание полнофункционального блока электроники считывания, ориентированного на низкоскоростной съем данных с микросхемы Medipix-4 и проработка технических решений по высокоскоростному съему данных и одновременному считыванию данных с нескольких (до 8) микросхем на прототипах.

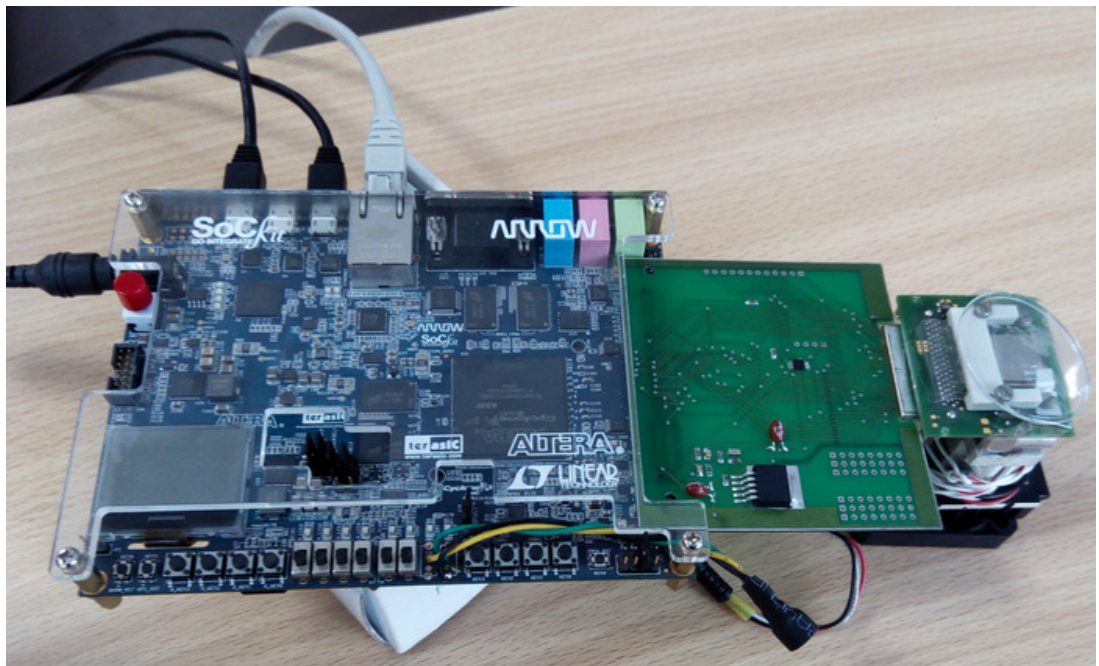


Рис. 26: Прототип электроники считывания для детектора семейства Medipix.

Глава 4

Прикладные исследования

Прикладные исследования в рамках данного Проекта проводятся в сотрудничестве с исследовательскими группами из других научных центров с целью изучения возможности применения разработанных детекторов и технологий в других областях науки и техники (в первую очередь, в области здравоохранения и горной промышленности) на базе микротомографа MARS, созданного с применением новых детекторов и использующего современную электронику считывания Medipix. Список исследовательских центров, с которыми установлено научно-техническое сотрудничество, приведен в разделе 6.3

4.1 Основные результаты 2015-2017 г.

4.1.1 Исследование рентгеноконтрастных веществ. Изучение возможности идентификации контрастных веществ по спектральной информации.

Изучение возможностей идентификации контрастных веществ проводилось на фантоме, содержащем водный раствор хлорида золота (концентрация золота 2 и 8 мг/мл), водный раствор CaCl_2 (концентрация кальция 240 мг/мл), водный раствор MultiHance (концентрация гадолиния 2 и 8 мг/мл), водный раствор Omnipaque 300 (концентрация йода 18 мг/мл), а также дистиллированную воду и растительное масло. Сканирования проводились на трех детекторах:

1. GaAs 500мкм с микросхемой Medipix 3.1 – не позволяет измерить зависимость линейного коэффициента ослабления (ЛКО) от энергии из-за очень плохого энергетического разрешения, связанного с проблемами в электронике Medipix 3.1

2. GaAs 1000 мкм с микросхемой Timerix

3. GaAs 300 мкм с микросхемой Timerix

Кривые поглощения позволяют идентифицировать различные вещества, если они представлены крупными кластерами. Разработана программа, позволяющая сегментировать изображение на основе энергетической информации и построить кривые поглощения для каждого сегмента (рис. 27). Полученные кривые могут быть сопоставлены с кривыми поглощения для эталонных образцов (рис. 28).

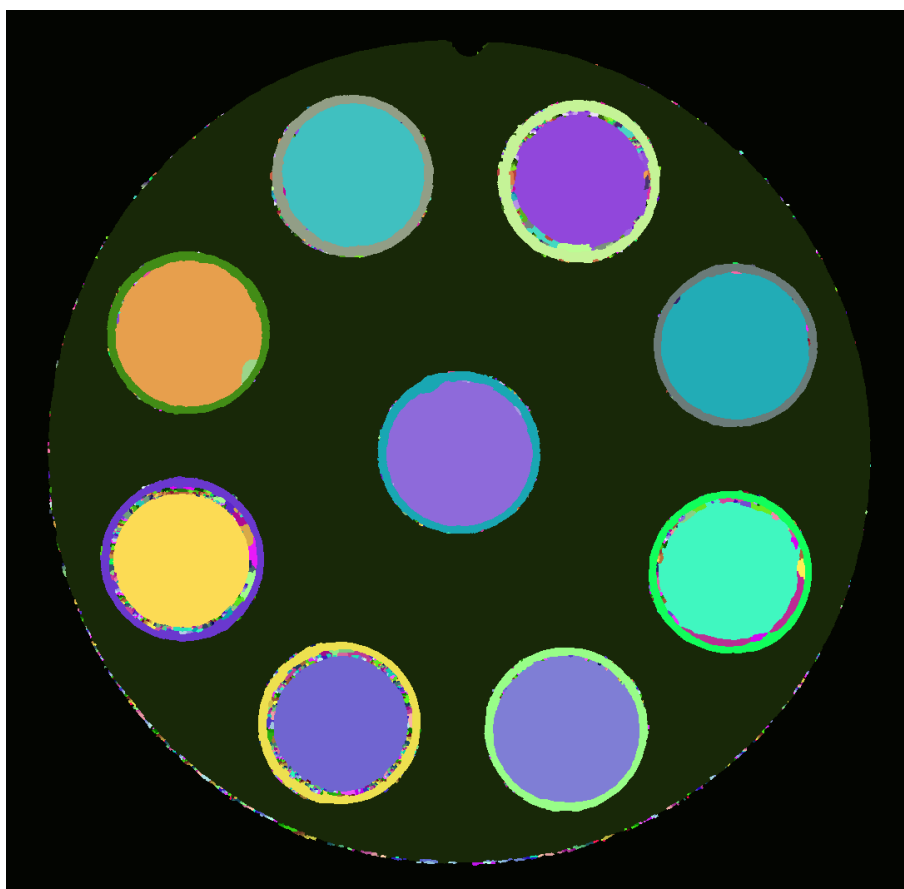


Рис. 27: Сегментированное поперечное сечение фантома по 9 порогам.

4.1.2 Исследование нативных препаратов для анализа атеросклеротического повреждения сосудов

Было проведено исследование микро и макроструктуры двух препаратов атеросклеротических бляшек сонных артерий человека, полученных при выполнении операций

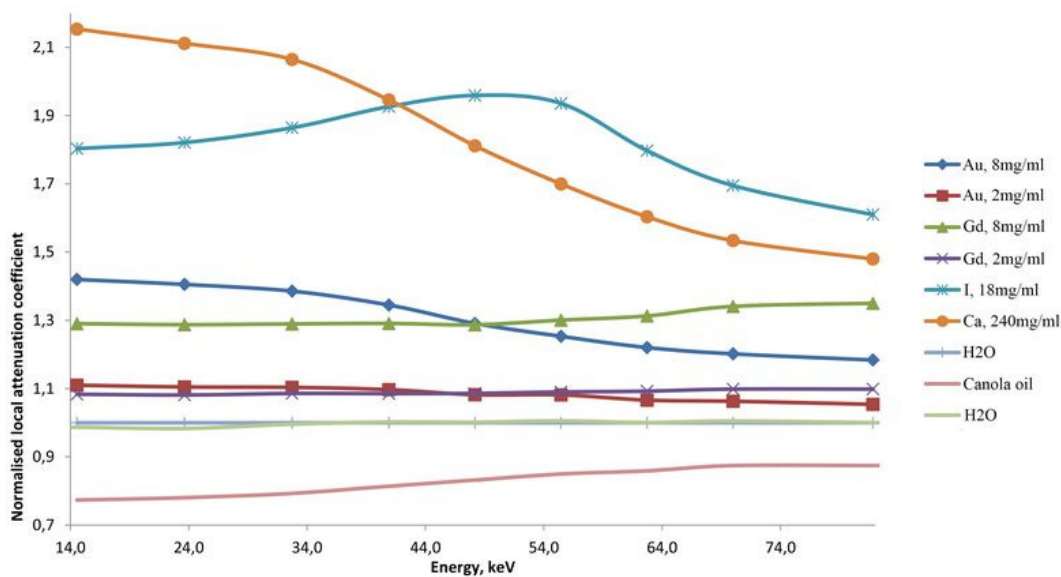


Рис. 28: Зависимость ЛКО от энергии для различных веществ (ЛКО отнормирован на ЛКО воды)

эндатерэктомии. Исследование препаратов *ex vivo* направлено на исследование рентгенологической структуры атеросклеротических бляшек, что до последнего времени было невозможно из-за недостаточного разрешения обычных методов компьютерной томографии. Получены данные о структуре бляшек и размерах и форме микрокальцинов (рис. 29).

4.1.3 Исследование нативных препаратов для анализа аневризмы брюшной аорты

Было проведено исследование микро и макроструктуры более 10 препаратов аневризмы брюшной аорты. Результаты сканирования показали наличие микрокальцинов во всех образцах от крупных агрегатов кальцинов до мелких, размером порядка 100 мкм (рис. 30). Дополнительное исследование с помощью рамановского микроскопа показало наличие кальцинов размером порядка нескольких микрометров. Эти данные дают возможность количественной оценки влияния плотных образований на прочность стенки сосуда и в перспективе могут привести к разработке метода предсказания вероятности разрыва аневризмы.

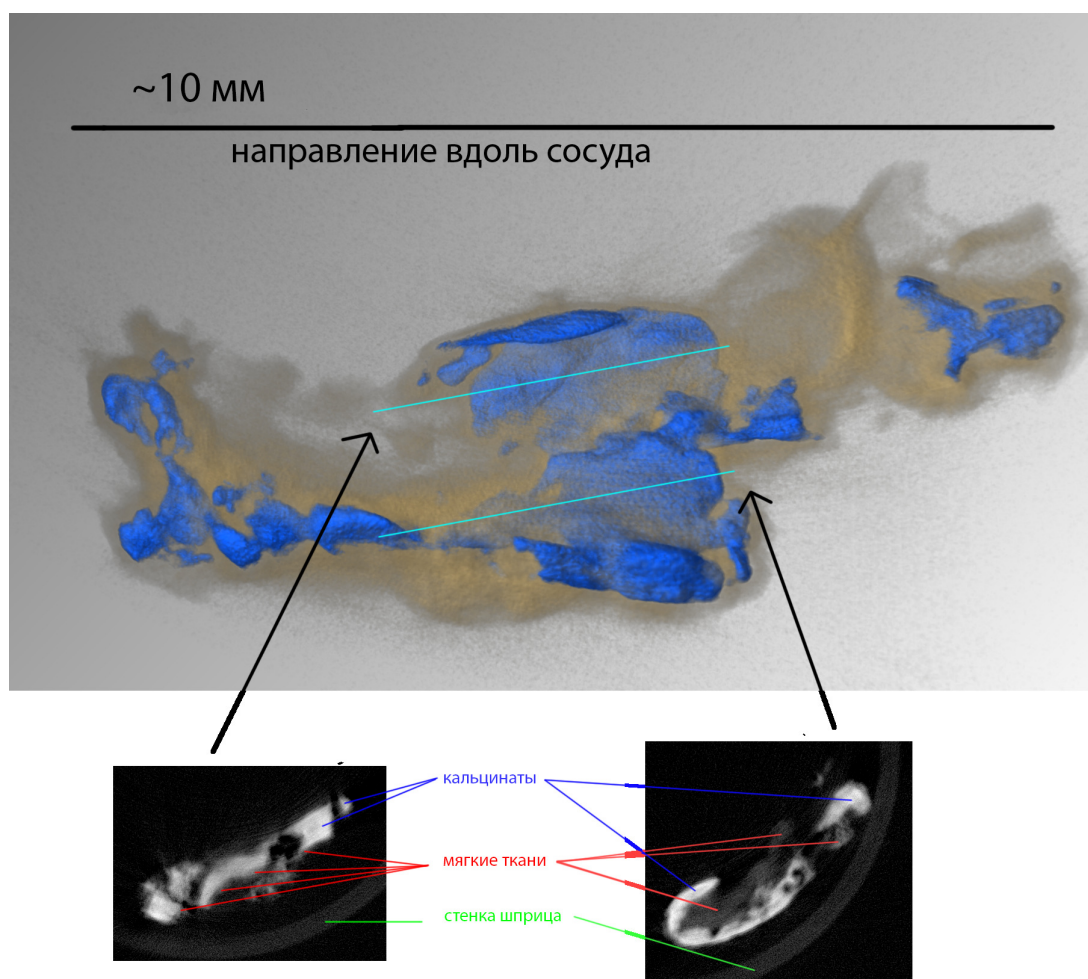


Рис. 29: Томографическое изображение атеросклеротической бляшки сонной артерии человека. Синим цветом показаны микрокальцинаты.

4.1.4 Анализ состава руд и минерального сырья

Для воспроизводства минерально-сырьевой базы, достоверной оценки запасов, геологического обоснования оптимального режима освоения месторождений и разработки инновационных технологий их переработки сегодня необходимо всестороннее детальное изучение вещественного состава и морфоструктурных параметров природного и техногенного сырья в целях получения наиболее полной и достоверной информации о минеральном составе, который определяет качество сырья, особенности, характеристики и поведение минеральных фаз в технологические процессы. Важно иметь технологии, которые позволяют оперативно и экономично проводить прогнозную оценку качества сырья.

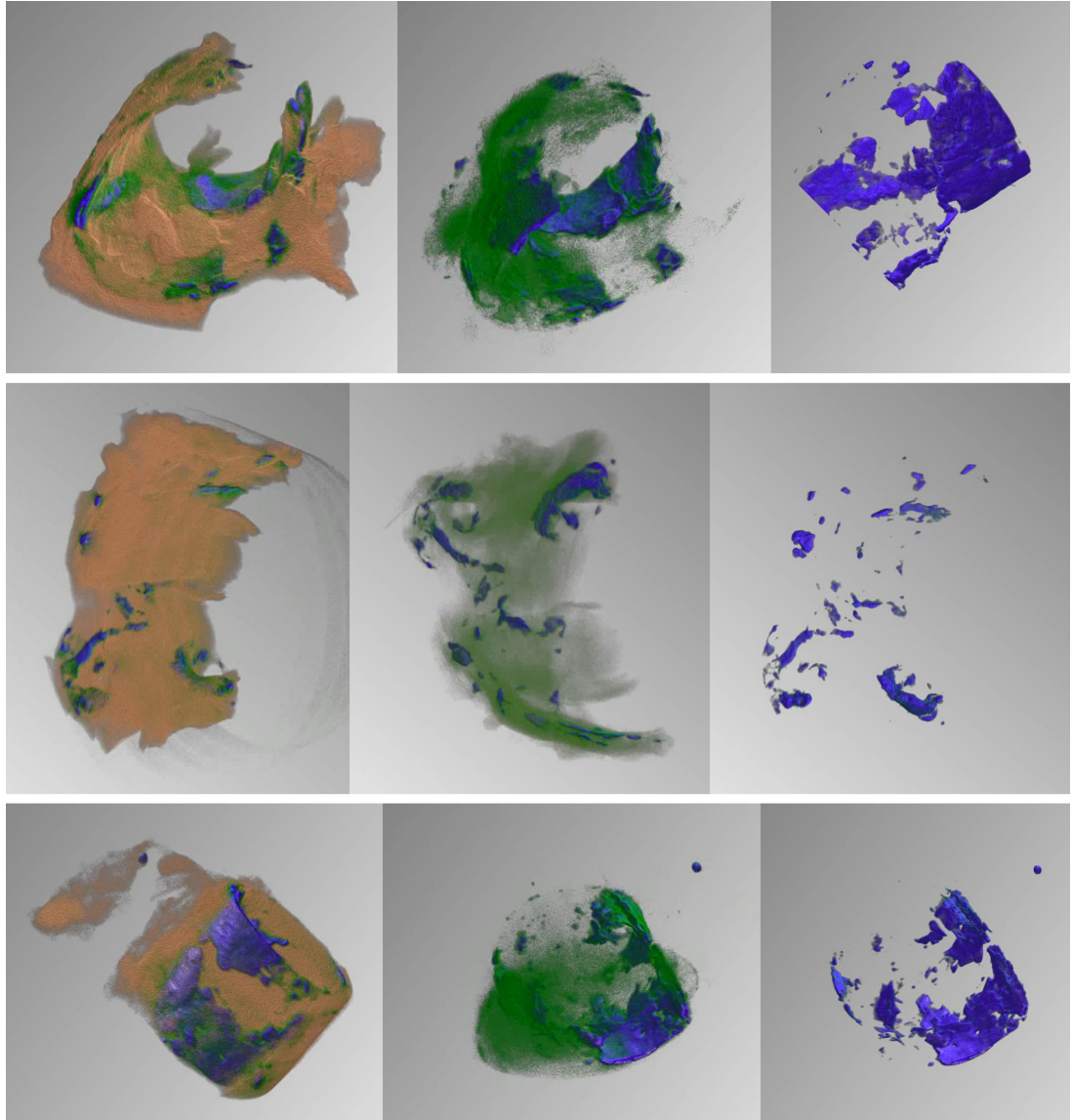


Рис. 30: Томографическое изображение образцов аневризмы брюшной аорты. Синим цветом показаны микрокальцинаты, желтым - мягкие ткани, зеленым - более плотные ткани.

В ходе сканирования нескольких образцов руд и минералов на микротомографе MARS была показана возможность получения данных о морфоструктурных особенностях минерального вещества, по которым можно прогнозировать качество, технологические свойства сырья и его поведение в процессах переработки. В частности, исследование образцов марганцевой руды показало возможность легкого выделения хромитовых зерен и определения их характеристик (размер, количество и т.д. - см. рис. 31).

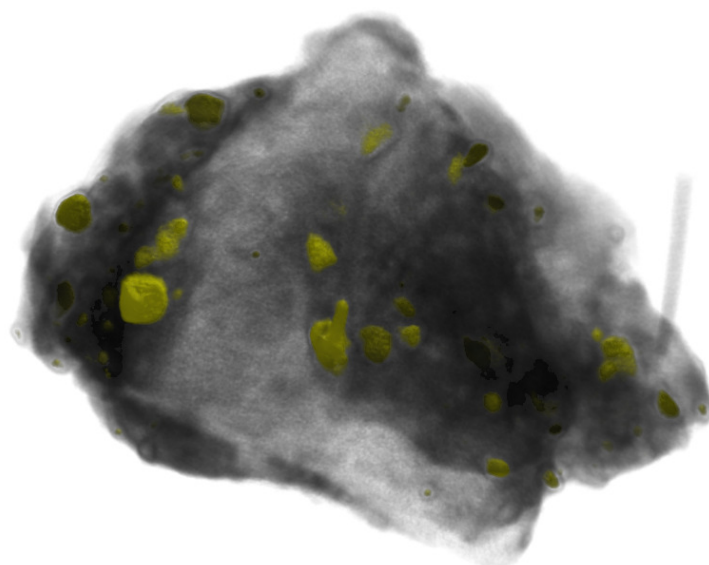


Рис. 31: Хромиты в марганцевой руде.

4.1.5 Проведение исследований керна нефтегазоносных пород

Пробные сканирования показали возможность определить репрезентативные участки полноразмерного керна, однако в настоящее время на измерение 1 см длины уходит время порядка 10 часов, что не подходит для серийных измерений. Однако это не исключает применение микротомографии с использованием арсенидогаллиевых детекторов на основе микросхемы Medipix для серийных измерений при условии доработки конструкции томографа.

Проведение количественных измерений пористости на малых образцах оказалось нецелесообразным из-за недостаточного пространственного разрешения 50мкм, в то

время как требуется разрешение $<10\text{мкм}$.

4.2 Программа исследований на 2018-2020 г.

В течение следующих трех лет предполагается выполнить прикладные исследования по следующим направлениям.

1. Исследование тонкой структуры отложений кальция в стенках атеросклеротически пораженных сонных артерий и аневризм аорты. Речь идет о том, что кальциевые отложения могут представлять собой а) тонкую микросетчатую структуру, которая свидетельствует об укреплении сосудистой ткани и б) грубые конгломераты, которые, наоборот, могут быть связаны с локальным воспалением, формированием тромбов и способствовать деструкции тканевый элементов. Это дает возможность прогнозирования развития атеросклерозного поражения сосудов.
2. Идентификация жировой ткани мелких животных. Существует проблема определения количества жировой ткани у лабораторных животных, что усложняет медицинские исследования связанные с ожирением. Спектральная микротомография дает возможность выделения липидов по сочетанию плотности и энергетической зависимости ЛКО.
3. Изучение возможности выделения рентгеноконтрастных веществ в организме по энергетической зависимости ЛКО. Одним из возможных приложений является изучение доставки лекарств с использованием рентгеноконтрастных маркеров. Другим возможным применением является обнаружение в организме одновременно нескольких рентгеноконтрастных веществ.
4. Изучение принципиальной возможности создания аппаратуры на основе детекторов Medipix, пригодной для применения в клинической практике. Наряду с диагностическими возможностями, будет проведена оценка таких параметров, как время сканирования, величина поглощенной дозы в зависимости от качества получаемого изображения.
5. Возможность идентификации типов частиц и измерения энерговыделения открывает перспективу использования детекторов Timerix для измерения эквивалентной дозы. В ходе выполнения Проекта будет изучена возможность создания микродозиметрических зондов на основе этих детекторов.

6. Будет продолжено исследование руд и минерального сырья, определение потенциала спектральной микротомографии для идентификации минеральных фаз.

Создание второго томографа с более высоким пространственным разрешением (до 5-7 мкм) может значительно расширить круг решаемых задач.

Глава 5

Публикации за 2015-2017 г.

1. A. Butler, P. Butler, S. Bell, G.A. Chelkov, D.V. Dedovich, M.A. Demichev, V.G. Elkin, M.I. Gostkin, S.A. Kotov, D.A. Kozhevnikov, U.G. Kruchonak, A.A. Nozdrin, S.Yu. Porokhovoy, I.N. Potrap, P.I. Smolyanskiy, M.M. Zakhvatkin, A.S. Zhemchugov. Measurement of the Energy Resolution and Calibration of Hybrid Pixel Detectors with GaAs:Cr Sensor and Timepix Readout Chip. // *Physics of Particles and Nuclei Letters*, Vol. 12, No. 1, 2015
2. A.P. Butler, P.H. Butler, S.T. Bell, G. Chelkov, M. Demichev, A. Gongadze, S. Kotov, D. Kozhevnikov, U. Kruchonak, I. Potrap, A. Zhemchugov. Alignment and resolution studies of a MARS CT scanner // *Particles and Nuclei Letters*, Vol. 12, No. 1, 2015
3. FCAL collaboration. Performance of fully instrumented detector planes of the forward calorimeter of a Linear Collider detector // *JINST 10 P05009*, 2015
4. A. Guskov, G. Shelkov, P. Smolyanskiy, A. Zhemchugov. On the possibility to use semiconductive hybrid pixel detectors for study of radiation belt of the Earth. // *J. Phys.: Conf. Ser.* 675 032018, 2016
5. S.M. Abu Al Azm, G. Chelkov, D. Kozhevnikov, A. Guskov, A. Lapkin, A. Leyva Fabelo, P. Smolyanskiy and A. Zhemchugov. Response of Timepix Detector with GaAs:Cr and Si Sensor to Heavy Ions. // *Physics of Particles and Nuclei Letters*, Vol. 13, No. 3, pp. 363–369, 2016
6. P. Smolyanskiy, G. Chelkov, A.Guskov, D.Dedovich, D.Kozhevnikov, U.Kruchonak, A.Leyva, A.Zhemchugov. Characterization of GaAs:Cr-based Timepix detector using synchrotron radiation and charged particles, // *J. Inst.* 11, C12070, 2016

7. D. Kozhevnikov, G. Chelkov, M. Demichev, A. Gridin, P. Smolyanskiy, A. Zhemchugov. Performance and applications of GaAs:Cr-based Medipix detector in X-ray CT, // J. Inst. 12, C01005, 2017
8. Svetlikov A.V., Zhemchugov A.S., Kozhevnikov D.A., Gurevich V.S., Shelkov G.A., Khubulava G.G., Evaluation of human ruptured infrarenal aorta aneurysm by new high resolution microtomography // European Heart Journal, 37. (Suppl). 270. P.1477, 2016
9. Zhemchugov A., Svetlikov F., Kozhevnikov D., Shelkov G., Urazgildeeva S., Gurevich V., Usage of novel hybrid pixel detectors for native atherosclerotic plaque imaging by high resolution x-ray computed tomography // Atherosclerosis, 252. e215, 2016
10. Andriyashen V., Gerasimov A., Provorov A., Demichev M., Kozhevnikov D., Geant4-based simulation of a micro-CT scanner using cloud resources // Proceedings of the 7th International Conference “Distributed Computing and Grid-technologies in Science and Education (GRID 2016), Dubna, Russia. CEUR Workshop Proceedings (CEUR-WS.org), 2017, p.502-506
11. Tokareva V., Gridin A., Kozhevnikov D., Streltsova O., Zuev M., Parallel implementations of image reconstruction algorithms for X-ray microtomography // Proceedings of the 7th International Conference “Distributed Computing and Grid-technologies in Science and Education (GRID 2016), Dubna, Russia. CEUR Workshop Proceedings (CEUR-WS.org), 2017, p.481-485

Глава 6

План реализации проекта

6.1 Смета затрат по проекту

№	Наименование статей затрат	Полная сумма	2018	2019	2020
	Прямые расходы на проект				
1	Материалы	60	20	20	20
	детекторный арсенид галлия	30	10	10	10
	реактивы и электронные компоненты	30	10	10	10
2	Оборудование	350	117	117	116
	измерительный участок	77	67	5	5
	участок микротомографии	180	30	90	60
	сборочный участок и разработка электроники считывания	33	0	2	31
	лабораторное и измерительное оборудование	45	15	15	15
	вычислительная техника	15	5	5	5
3	НИОКР (подготовка материалов и т.д.)	10	3	3	4
	Командировочные расходы	30	10	10	10
	а) в страны нерублёвой зоны	24	8	8	8
	б) в страны рублевой зоны	6	2	2	2
	Итого по прямым расходам:	450	150	150	150

Таблица 6.1: Смета затрат по проекту (kUSD).

6.2 Список оборудования

В ходе выполнения Проекта в 2018-2020 г. планируется приобретение и установка в ЛЯП следующего оборудования:

на измерительном участке:

1. крейт с источниками высоковольтного и низковольтного питания для стенда “Калан”;
2. низкоскоростная электроника считывания Medipix (Widepix или аналоги);
3. высоковольтное соединение для CV измерений на зондовой станции;
4. установка для DLTS-измерений;

на участке микротомографии:

1. компактный микрофокусный рентгеновский аппарат - 2 шт.;
2. высокоскоростная электроника считывания (Lambda или SPIDR) - 2 шт.;
3. механика и позиционирование для нового микротомографа;

на сборочном участке:

1. установка для тестирования микросхем Medipix4;
2. установка для BGA-монтажа.

Для выполнения поставленных задач также потребуется приобретение лабораторного и измерительного оборудования: источников питания, осциллографов и т.п.

Кроме того, планируется приобретение лицензионного ПО для программирования ПЛИС и разводки печатных плат, а также вычислительной техники (портативных ПК для сеансов набора данных на ускорителях и высокопроизводительного сервера для реконструкции микротомограмм).

6.3 Научное сотрудничество

Работы по направлениям исследований в рамках Проекта планируется проводить совместно со следующими странами и международными организациями:

Германия

- DESY, г.Гамбург, г.Цойтен, Германия

Куба

- Институт развития прикладных ядерных технологий (CEADEN), г.Гавана

Новая Зеландия

- Университет Отаго, г.Крайстчерч

Россия

- Национальный исследовательский Томский государственный университет, Научно-образовательный центр „Физика и электроника сложных полупроводников“, г.Томск
- Санкт-Петербургский государственный университет, Медицинский факультет, Институт высоких медицинских технологий, Научно-клинический и образовательный центр „Кардиология“, отдел атеросклероза, г. Санкт-Петербург
- Северо-западный государственный медицинский университет им. И.И.Мечникова, г. Санкт-Петербург
- Федеральное государственное бюджетное учреждение здравоохранения Клиническая больница № 122 им. Л.Г.Соколова Федерального Медико-биологического агентства МЗ РФ, Центр сосудистой хирургии, г. Санкт-Петербург
- Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, Факультет фундаментальной медицины, г.Москва
- Международный университет природы, общества и человека „Дубна“, г.Дубна
- Российский научный центр хирургии РАМН им. акад. Б. В. Петровского

Румыния

- Институт космических исследований, г.Бухарест

Чехия

- Чешский технический университет в Праге, Институт технической и экспериментальной физики, г. Прага

Швейцария

- Европейская организация ядерных исследований (CERN), г.Женева

Литература

- [1] URL: <http://www.linearcollider.org>
- [2] URL: <http://clic-study.web.cern.ch>
- [3] URL: <http://www.cern.ch/HL-LHC>
- [4] URL: <http://www.xfel.eu>
- [5] URL: <http://www.eli-laser.eu/>
- [6] URL: <http://cordis.europa.eu/esfri/>
- [7] ATLAS Collaboration, “Letter of Intent for the Phase-II Upgrade of the ATLAS Experiment” // CERN-2012-022/LHCC-I-023 January, 2013
- [8] G. Lindström, M. Moll and E. Fretwurst, “Radiation hardness of silicon detectors — a challenge from high-energy physics” // Nucl. Instrum. Meth. A 426 (1999) 1
- [9] RD8 collaboration, R.L. Bates et al., “The effects of radiation on gallium arsenide radiation detectors” // Nucl. Instrum. Meth. A 395 (1997) 54.
- [10] V. Chmill, “Radiation tests of semiconductor detectors” // Ph.D. Thesis, Stockholm Sweden (2006)
- [11] T. Ly Anh, A. Perd’ochov’a, V. Nečas and V. Pavlico’va, “Radiation resistance study of semi-insulating GaAs-based radiation detectors to extremely high gamma doses” // Nucl. Phys. Proc. Suppl. B 150 (2006) 402.
- [12] A. V. Tyazhev et al., “GaAs radiation imaging detectors with an active layer thickness up to 1 mm” // Nucl. Instrum. and Meth. A509 (2003) 34–39
- [13] K. Afanaciev et al., “Investigation of the radiation hardness of GaAs sensors in an electron beam” // JINST 7 (2012) P11022

- [14] P. Kraft et al. “Performance of single-photon-counting PILATUS detector modules” // J. Synchrotron Radiat. 16 (2009) 368
- [15] P. Pangaud et al., “XPAD3: A new photon counting chip for X-ray CT-scanner” // Nucl. Instrum. and Meth. A571 (2007) 321
- [16] R. Ballabriga et al., “The Medipix3 prototype, a pixel readout chip working in single photon counting mode with improved spectrometric performance” // IEEE Trans. Nucl. Sci. 54 (2007) 1824
- [17] H. Abramowicz et al., Instrumentation on the very forward region of a linear collider detector // IEEE Trans.Nucl.Sci., vol 51, year 2004, 2983:2989
- [18] C. Coca et al., Expected electromagnetic and neutron doses for the BeamCal at ILD // Rom. J. Phys, vol. 55, numb. 7-8, (2010)687-707
- [19] L. Tlustos, G. Shelkov, O. Tolbanov, “Characterisation of a GaAs:Cr Medipix2 hybrid pixel detector” // Nucl. Instrum. and Meth. A 633(2011) S103
- [20] J. Jakubek, S. Pospisil, J. Uher “Neutron detector based on TimePix pixel device with micrometer spatial resolution” // Proc. SPIE 7449, Hard X-Ray, Gamma-Ray, and Neutron Detector Physics XI, 744910 (September 11, 2009)
- [21] Zainon, R. et al., “Construction and Operation of the MARS-CT Scanner” // Bandung, Indonesia: International Conference on Instrumentation, Control and Automation (ICA 2009), 20-22 Oct 2009.
- [22] S. Agostinelli et al. [GEANT4 Collaboration], “GEANT4: A Simulation toolkit” // Nucl. Instrum. Meth. A 506 (2003) 250.
- [23] U. Lachish, Electron lifetime determination in semiconductor gamma detector arrays // arxiv:1701.03459
- [24] J. Jakubek et al. Neutron imaging with Medipix-2 chip and a coated sensor // Nucl.Instrum.Meth. A560 (2006) 143-147
- [25] J. Bouchami et al. Estimate of the neutron fields in ATLAS based on ATLAS-MPX detectors data Neutron imaging with Medipix-2 chip and a coated sensor // JINST 6 (2011) C01042
- [26] D. Dedovich et al. Proposal to Measure Radiation Field Characteristics, Luminosity and Induced Radioactivity in ATLAS with TIMEPIX detectors having GaAs:Cr sensors : Project GaAsPix // ATLAS Note ATL-COM-GEN-2016-001

- [27] Granja C., Jakubek J., Koster U., Platkevic M., Pospisil S. Response of the pixel detector Timepix to heavy ions // Nucl. Inst. and Meth. A. 2011, V.633, P.155-158.
- [28] Hoang S., Vilalta R., Pinsky L., Kroupa M., Stoffle N., Idarraga J. Data Analysis of Tracks of Heavy Ion Particles in Timepix Detector // J. Phys.: Conf. Ser., 2014, V.523, P.012026