

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ имени М.В.
ЛОМОНОСОВА
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ имени
Д.В. СКОБЕЛЬЦЫНА

На правах рукописи

Харламов Петр Ильич

**Методика тестирования прототипа модуля трековой системы эксперимента
ВМ@N**

специальность 1.3.15 — Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика
высоких энергий

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
доктор физико-математических наук Меркин Михаил Моисеевич

Москва – 2022

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	4
Актуальность темы исследования	4
Степень разработанности проблемы	5
Цели и задачи	5
Научная новизна	6
Объект и предмет исследования	7
Теоретическая и практическая значимость	7
Методология и методы исследования	8
На защиту выносятся следующие положения и результаты:.....	8
Личный вклад автора	9
Степень достоверности и апробация.....	9
Структура	10
Глава 1. Кремниевые детекторы в физике частиц.....	11
1.1. Предпосылки создания кремниевых трековых детекторов	11
1.2. Важные для создания детекторов свойства полупроводников	13
1.3. Кремниевые трековые системы и детекторные модули.....	14
1.3.1. Кремниевый микростриповый трекер SMT детектора D0.....	15
1.3.2. Полупроводниковый трекер детектора ATLAS.....	18
1.3.3. Кремниевый вершинный трекер детектора CLAS12.....	24
1.4. Выводы	33
Глава 2. Кремниевая трековая система эксперимента BM@N	35
2.1. Физическая программа BM@N	35
2.2. Трековая система BM@N	40

2.3. Кремниевые сенсоры	51
2.4. Электроника считывания	55
2.5. Система сбора данных VM@N	58
2.6. Выводы	61
Глава 3. Пучковые испытания прототипа системы сбора данных	63
3.1. Прототип тракта чтения кремниевой трековой системы	64
3.2. Пучковые испытания прототипов систем сбора данных и временной синхронизации	67
3.3. Выводы	79
Глава 4. Лазерная установка для тестирования трековых модулей	80
4.1. Взаимодействие лазерного излучения с кремнием	82
4.2. Устройство установки	87
4.3. Возможности установки и результаты	97
4.4. Выводы	115
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	117
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	122

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

В основе любого эксперимента в области физики частиц лежат различные детекторы, регистрирующие и определяющие параметры частиц. Одной из важнейших задач в экспериментах физики частиц является точное определение треков и импульсов частиц и вершин их взаимодействий. Наиболее распространёнными детекторами для целей восстановления треков частиц и вершин взаимодействий на данный момент являются кремниевые стриповые (микрополосковые) детекторы. Это обусловлено их преимуществами: удобством использования, невысокими напряжениями питания, компактностью, малым количеством рабочего вещества и высоким пространственным разрешением до единиц микрометров.

Предметом настоящего исследования являются детекторные модули Кремниевой Трековой Системы (КТС) эксперимента $BM@N$, основными составляющими которых являются двухсторонние кремниевые стриповые сенсоры и микросхемы считывающей электроники. Разработка модуля и исследование их характеристик является актуальной задачей, поскольку такие детекторные модули будут использованы в эксперименте $BM@N$. Особенно важной задачей является проверка новых технологий, применяемые при их создании, в частности массовое использование нового типа считывания сигнала с кремниевых сенсоров. В эксперименте $BM@N$ впервые массово будут использованы двусторонние кремниевые детекторы и специализированная интегральная микросхема с самотриггированием, то есть с новой потоковой архитектурой, где система считывания управляется непосредственно сигналами с кремниевого детектора, и сама принимает решение о выработке внутреннего триггера индивидуально для каждого канала. С одной стороны, этот метод съема сигнала позволяет работать на высоких скоростях без потери данных и не требует внешнего сигнала запуска (триггера). С другой стороны, такая система чтения, очевидно, существенно

усложняется и требует точной настройки синхронизации по всем считывающим микросхемам трековой системы.

Степень разработанности проблемы

Координатно-чувствительные кремниевые детекторы впервые появились в физике высоких энергий в самом начале восьмидесятых годов прошлого века, когда понадобились высокоточные вершинные детекторы для измерений времён жизни очарованных частиц. Прорывом было официальное представление Дж. Кеммером планарной технологии [1], которая сделала возможным создание высококачественных детекторов на основе планарных p-n-переходов. Эксперименты NA11/NA32 в CERN [2] были первыми, в которых использовались кремниевые стриповые детекторы. Появление VLSI-электроники (Very Large Scale Integration) сделало возможным создавать компактные кремниевые системы, которые могут быть установлены в коллайдерных экспериментах [3]. С тех пор кремниевые стриповые детекторы широко использовались в экспериментах физики частиц. Поскольку каждая установка эксперимента физики частиц уникальна и обладает своей спецификой работы, то были разработаны новые подходы к детектированию заряженных частиц с помощью кремниевых детекторов. С точки зрения эксперимента BM@N наиболее перспективны разработки двухсторонних кремниевых сенсоров, применявшихся в эксперименте D0 на Tevatron, и потоковой архитектуры считывания, применяемой в CLAS12. Тем не менее, двухсторонние сенсоры с потоковой системой чтения не применялись одновременно в одном эксперименте, поэтому потребовались их дополнительные исследования.

Цели и задачи

Основной целью данной работы является разработка и исследование детекторного модуля КТС эксперимента BM@N. Задачами являлись разработка методик тестирования и проведение испытаний разработанного детекторного модуля на пучках электронов, а также создание установки и проведение испытаний

модулей с использованием тонкого луча импульсного инфракрасного лазерного источника, которые позволяют быстро оценить работоспособность модуля (кремниевый сенсор + электроника считывания) и качество сборки – число и тип неработающих каналов – при массовом производстве детекторных модулей для эксперимента VM@N.

Научная новизна

Детекторные модули создаются для КТС будущего эксперимента VM@N. Поскольку этот эксперимент ставит жесткие условия для трековой системы:

- высокая скорость съема, обработки, оцифровки и передачи сигнала;
- высокая (несколько нс) точность синхронизации всех элементов системы чтения;
- предельно малое количество материала в апертуре трековой системы;

поэтому при создании детекторных модулей использовались самые современные технологии.

В литературе не описано применение лазерного излучения для тестирования двухсторонних кремниевых трековых детекторных модулей с потоковым чтением.

В настоящем исследовании подтверждено, что воздействие инфракрасного лазерного излучения с высокой точностью имитирует прохождение частицы через детектор. Лазерный луч позволяет быстро и с высокой точностью полностью протестировать детекторные модули, как в части чувствительности каждого канала (стрипа) детектора, так и в части работоспособности всего электронного тракта.

В настоящей работе проведено тестирование на электронном пучке, создан лазерный стенд (далее – лазерная установка) и проведено сравнение результатов испытаний модулей двумя методами. *Показано*, что тестирование с помощью инфракрасного лазера может полностью заменить испытания на пучке ускорителя электронов, как в процессе отладки технологии сборки, так и, что особенно важно, при массовом производстве детекторных модулей.

Разработанная методика может эффективно применяться при тестировании трековых модулей, в том числе основанных на передовых технологиях, в частности двухсторонних микростриповых кремниевых сенсорах и самотриггерующейся считывающей электронике, таких как в детекторных модулях эксперимента VM@N.

Объект и предмет исследования

Объектом исследования является детекторный модуль КТС эксперимента VM@N, основными составляющими которого являются кремниевый двусторонний микростриповый сенсор и самотриггерующаяся считывающая электроника. Предмет исследования — физические характеристики такого модуля с точки зрения детектирования ионизирующих излучений.

Теоретическая и практическая значимость

Теоретическая значимость настоящей работы заключается в том, что расчетными методами определены параметры лазерного импульса, приводящие к такому же воздействию на кремниевые трековые детекторы, что и пролет заряженной частицы. Также экспериментально подтверждено, что лазерным излучением можно эффективно заменить пучки частиц от ускорителя и радиоактивные источники для исследования и тестирования кремниевых трековых детекторов.

Поскольку пучковые и лазерные испытания прототипов трековых модулей являются наиболее близкими к реальным условиям использования испытаниями, то их результаты важны при разработке и отладке трековых модулей, микросхем системы чтения и программного обеспечения. Разработанная методика и созданная лазерная установка позволяют проводить тестирование микростриповых детекторов и всего тракта считывания, и обладает многими достоинствами, такими как простота использования, высокая степень автоматизации и возможность простой и в то же время точной настройки параметров лазерного излучения.

Поэтому практическая значимость обусловлена тем, что полученные в ней результаты непосредственно используются в разработке КТС эксперимента $BM@N$ и могут быть использованы в других экспериментах физики частиц.

Методология и методы исследования

Экспериментальные результаты получены на установке LINAC-200 и разработанной лазерной установке для тестирования трековых модулей. Основной принцип работы лазерной установки – моделирование прохождения частиц через детектор с помощью ионизирующего лазерного излучения. Аналогичность параметров лазерного импульса заряженной частицей достигается тонкой настройкой параметров импульса и оборудования лазерной установки.

Данные тестирования обрабатываются с помощью системы мониторинга, основанной на программном пакете Root.

На защиту выносятся следующие положения и результаты:

- 1) Расчет загрузок трековых модулей позволяет унифицировать отдельные модули в рамках геометрии кремниевой трековой системы $BM@N$.
- 2) Соотношение откликов на P- и N-сторонах двухсторонних модулей с потоковым чтением на электронных пучках с энергиями 50 и 150 МэВ соответствует расчетным значениям.
- 3) Лазерная установка для тестирования трековых модулей позволяет проводить массовое тестирование и определять отклик каждого канала.
- 4) Отладка прототипа полного тракта потокового считывания проведена на лазерной установке с помощью разработанной методики тестирования.
- 5) Массовое тестирование на лазерной установке модулей трековой системы эксперимента $BM@N$ является столь же информативным и надежным, как и тестирование на пучке электронов.

Личный вклад автора

Все выносимые на защиту результаты и положения получены и сформулированы лично автором или при его определяющем участии. Автор внес существенный вклад в разработку геометрии трековой системы, принимал активное участие в проведении испытаний модулей трековой системы на пучке электронов. Автор являлся основным исполнителем в разработке, подборе компонентов, создании и сборке лазерной установки для тестирования кремниевых трековых модулей. Им разработано программное обеспечение для настройки и управления лазерной установкой. Автор лично обеспечил проведение тестов различных прототипов модулей при различных параметрах лазерного излучения, обработка результатов этих тестов, и сравнение с пучковыми испытаниями.

Степень достоверности и апробация

Достоверность подтверждается успешной эксплуатацией экспериментального оборудования и алгоритмов обработки, а также соответствие экспериментальных данных при использовании различных методов тестирования – с помощью пучка заряженных частиц и с помощью лазерного излучения.

Материалы диссертации представлены и обсуждались на международных и российских конференциях и рабочих совещаниях коллаборации BM@N и рабочих совещаниях научно-методического отдела кремниевых трековых систем ЛФВЭ ОИЯИ, в частности на:

- Международных совещаниях по физике высоких энергий и квантовой теории поля (International Workshop on High Energy Physics and Quantum Field Theory) в 2017 и 2019 гг.;
- Международной конференции молодых учёных и специалистов (International Scientific Conference of Young Scientists and Specialists) в 2017 г.;
- Конференциях Ломоносовские чтения в 2020 и 2021 гг.;
- Конференции «Гранты РФФИ в проекте NICA» (The Conference "RFBR Grants

for NICA") в 2020 г.;

- Конференциях Ломоносов-2021 и Ломоносов-2022.

Основные идеи и положения диссертации изложены в 7 ([47; 50; 57; 58; 68-70]) научных работах автора, в том числе в 4 ([50; 57; 69; 70]) публикациях в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ.

Вклад автора в вышеперечисленные публикации оценивается как: [69] – 80%, [70] – 80%, [57] – 45%, [50] – 20%.

Структура

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Работа содержит 130 страниц, 4 таблиц, 59 иллюстраций и 75 библиографических ссылок.

Глава 1. Кремниевые детекторы в физике частиц

1.1. Предпосылки создания кремниевых трековых детекторов

В экспериментах физики частиц стабильные или долгоживущие частицы, разогнанные до энергий в несколько ГэВ или даже ТэВ, сталкиваются между собой или с неподвижной мишенью, порождая новые, большей частью нестабильные, частицы. Определяя с достаточной точностью свойства полученных частиц, например массы, угловые распределения или асимметрии, можно изучать взаимодействия изначальных частиц. Но часто интересуют даже не сами взаимодействия, а состояние системы непосредственно после взаимодействия и ее поведение во времени, а также новые частицы, полученные в этом взаимодействии, такие как тяжёлые кварки, очарованные частицы, W- или Z-бозоны и пр. Рожденные частицы зачастую крайне нестабильны и практически мгновенно распадаются на вторичные частицы, которые, в свою очередь, тоже могут быть нестабильными. Конечные стабильные частицы уже могут быть точно зарегистрированы. В идеале нужно измерить множество различных величин, чтобы полностью восстановить взаимодействие или распад: тип частиц, заряд, импульс и энергию, а для короткоживущих частиц сечение их образования и вторичные вершины распадов. Однако не существует детектора, который может измерить все эти величины одновременно, детекторные системы собираются из детекторов, каждый из которых специализирован на одной или нескольких необходимых величинах. В частности, одними из основных детекторов являются вершинный и трековый детекторы.

Вершинный детектор должен определять направление трека заряженной частицы достаточно точно, чтобы дать возможность обнаружить происхождение частицы. Чтобы уменьшить ошибки экстраполяции, этот детектор должен быть как можно ближе к точке взаимодействия. С другой стороны, такие детекторы нужны только для измерений в коротком сегменте треков, так что они могут быть компактными. Поскольку в магнитном поле треки заряженных частиц

искривляются, величину искривления можно измерить с помощью трекового детектором, чтобы определить импульс частиц. Трековые детекторы и магниты должны давать только минимальные искажения траекторий заряженных частиц.

Координатно-чувствительные кремниевые детекторы впервые появились в физике высоких энергий в самом начале восьмидесятых, когда понадобились высокоточные вершинные детекторы для измерений времён жизни очарованных частиц. Времена жизни порядка пикосекунд требуют пространственного разрешения нескольких десятков микрон для того, чтобы отличить вершину распада от вторичной вершины продуктов распада. Пузырьковые камеры и эмульсии легко могли бы достигать такой точности, но никак не могли удовлетворить требованиям по скорости, как только речь зашла об исследовании редких событий. Газовые детекторы — обладают достаточной скоростью, но существенно менее точные, даже современные, например MICROMEGAS. Прорывом было официальное представление планарной технологии Дж. Кеммером [1], которая сделала возможным создание высококачественных детекторов на основе планарных р-п-переходов, заменив предложенную ранее поверхностно-барьерную технологию [4]. С точки зрения процесса изготовления кремниевые детекторы могут быть разделены на сегменты с очень высокой точностью, и уже в начале 80-х было ясно, что микроэлектронная планарная технология может обеспечить это разделение на стрипы или пиксели с существенно большей точностью, чем это необходимо для физики высоких энергий. Сегодня можно говорить, что точность определения координаты прохождения частицы ограничивается не размерами чувствительных элементов на кремниевом детекторе, а в первую очередь физическими процессами при прохождении частицы через вещество детектора, геометрией и спецификой экспериментальной установки. Эксперименты NA11/NA32 в CERN [2] были первыми, в которых использовались кремниевые стриповые детекторы. В то время использование кремниевых детекторов было ограничено экспериментами на фиксированных мишенях, поскольку в то время считывающая электроника была всё ещё громоздкой. Появление VLSI-электроники (Very Large Scale Integration) сделало возможным

создавать компактные кремниевые системы, которые могут быть установлены в коллайдерных экспериментах [3]. Таким образом, ряд достоинств кремниевых детекторов, таких как высокое пространственное разрешение, компактность, способность работы в магнитных полях и в вакууме и др., предопределили их широкое использование в экспериментах физики высоких и промежуточных энергий.

1.2. Важные для создания детекторов свойства полупроводников

Как правило, для создания этих трековых и вершинных детекторов применяются полупроводниковые (кремниевые) детекторы, поскольку по сравнению с другими материалами, полупроводники имеют уникальные свойства, которые делают их незаменимыми для детектирования ионизирующих излучений [5]. Уникальность свойств полупроводниковых материалов может лучше всего быть оценена, в сравнении их с другими широко используемыми детекторами излучений, например, газовыми. В этом сравнении будут использоваться параметры кремния, как наиболее широко используемого материала для изготовления детекторов:

- Малая ширина запрещенной зоны (1.12 эВ) обеспечивает большое количество индуцируемых носителей заряда на единицу потери энергии ионизирующей частицы. Средняя энергия создания электрон-дырочной пары (3.6 эВ) — на порядок меньше, чем энергия ионизации газов (~30 эВ).
- Высокая плотность (2.33 г/см³) ведет к большой потере энергии на длине пробега ионизирующей частицы (3.8 МэВ/см для минимальной ионизирующей частицы). Поэтому можно строить тонкие детекторы, в которых, несмотря на это, будут возникать достаточно большие индуцированные сигналы. Кроме того, очень маленький пробег δ -электронов предотвращает большие сдвиги центра тяжести первичной ионизации от координаты трека. Таким образом, возможно чрезвычайно точное измерение координаты (порядка нескольких мкм).
- Электроны и дырки имеют высокую подвижность при комнатной

температуре ($\mu_n = 1450 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$, $\mu_p = 450 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$), которая слабо зависит от степени легирования. Таким образом, заряд может быть быстро собран (за время порядка 10 нс), и детекторы могут использоваться при высоких нагрузках.

- Превосходная механическая жесткость позволяет создавать самонесущие конструкции.
- Аспект, полностью отсутствующий в газовых детекторах — возможность создания фиксированных пространственных зарядов легированием используемых кристаллов. Таким образом, возможно, создавать довольно сложные конфигурации поля, не затрудняя движение зарядов сигнала. Это позволяет создать детектирующие структуры с новыми свойствами, которые не имеют аналогов в газовых детекторах.
- Поскольку и детекторы, и электроника могут быть построены из кремния, возможна их интеграция в единое устройство.

1.3. Кремниевые трековые системы и детекторные модули

Восстановление треков и импульсов частиц, образующихся в столкновениях ускоренных частиц, — это одна из центральных детекторных задач в экспериментах физики частиц. Как правило, эту задачу выполняет трековая система; и в связи с широким распространением кремниевых детекторов они зачастую являются основным компонентом трековых систем на настоящее время.

Каждый эксперимент физики частиц уникален, и поэтому условия для работы трековых систем значительно отличаются, что приводит к заметному различию применяемых кремниевых детекторов. В качестве примера, рассмотрим кремниевые системы и трековые модули крупных экспериментов физики частиц, такие как D0 на ускорителе Tevatron, ATLAS на ускорителе LHC и CLAS12 на ускорителе CEBAF.

1.3.1. Кремниевый микростриповый трекер SMT детектора D0

Детектор D0 [6] — одна из двух детекторных установок на ускорителе Tevatron в Fermilab. Теватрон — самый большой ускоритель до запуска LHC и на нем было получено множество значимых результатов, главным из которых является открытие t-кварка [7].

В период так называемого Run I Tevatron работал в режиме циркуляции 6 пучков протонов и антипротонов с их столкновениями каждые 3500 нс с энергией центра масс 1.8 ТэВ. Во время Run II циркулировало уже по 36 пучков протонов и антипротонов, которые сталкивались каждые 132 нс с энергией в центре масс 1.96 ТэВ. В связи с ожидаемым увеличением светимости в Run II, полученным опытом эксплуатации детектора D0 и изученными данными с Run I, коллаборацией D0 было принято решение произвести усовершенствование детектора, чтобы гарантировать максимальное использование возможностей в течение Run II [8]. Наибольших изменений коснулась трековая система (см. Рисунок 1), которую мы и рассмотрим.

В детекторе D0 магнитное поле величиной 2 Т создавалось сверхпроводящим соленоидным магнитом длиной ≈ 2.6 м с внутренним радиусом ≈ 0.5 м. Внутри соленоида располагались сцинтилляционный (Центральный Оптоволоконный Трекер) и кремниевый микростриповый трекеры. Центральный Оптоволоконный Трекер (Central Fiber Tracker (CFT)) состоит из 8 концентрических баррелей сцинтиллирующих волокон с осевым и $\pm 3^\circ$ пространственно-угловым считыванием. Внутри CFT, в свою очередь, расположен Кремниевый Микростриповый Трекер (Silicon Microstrip Tracker (SMT)).

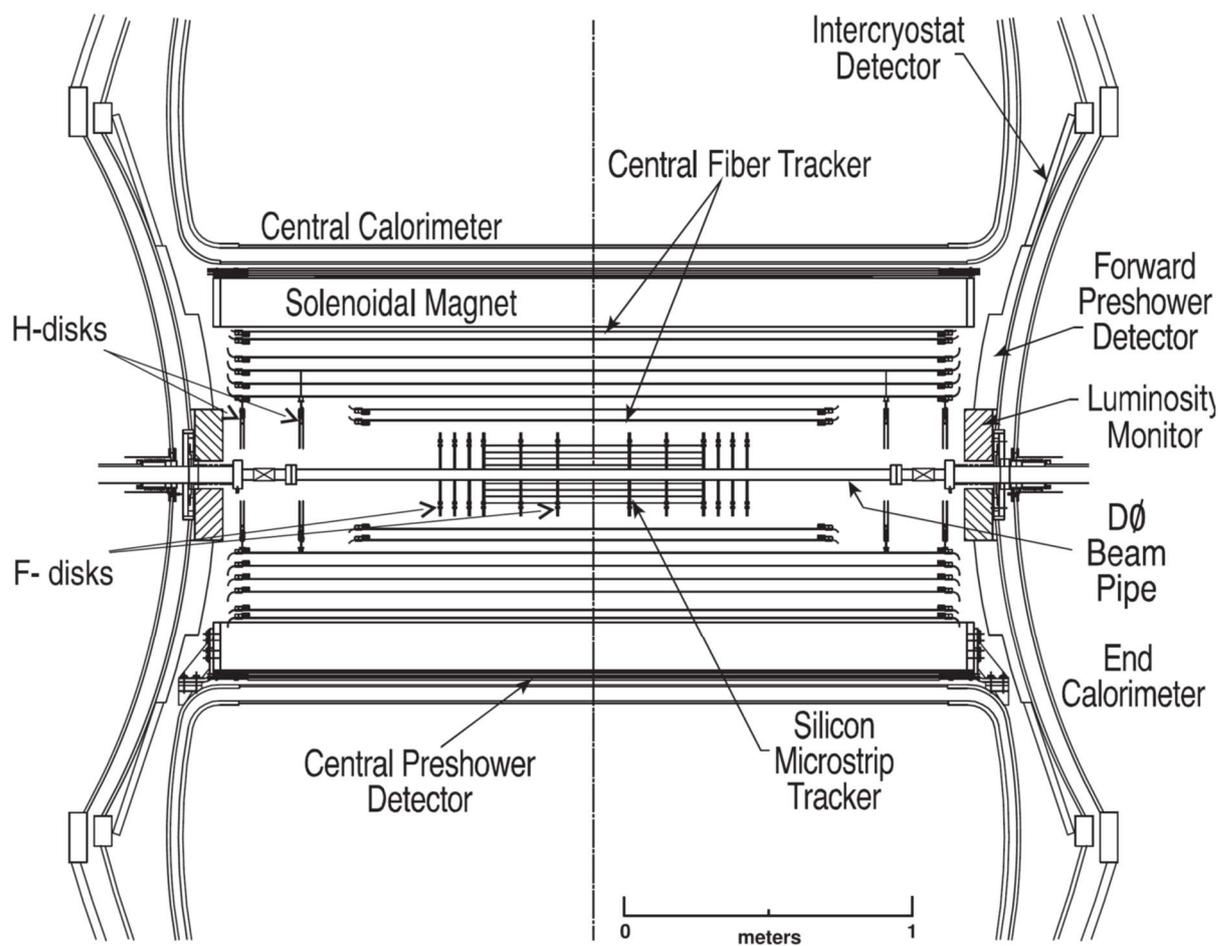


Рисунок 1. Трековая система DØ – Run IIa.

Различные параметры ускорителя сильно влияют на дизайн трековой системы. От светимости зависит радиационная нагрузка, что влияет на время жизни детектора и его рабочую температуру. Частота столкновения частиц сама по себе задает требования к системе чтения и электронике, и вместе со светимостью характеризует множественность взаимодействий. Длина области взаимодействия частиц задаёт протяженность всей трековой системы. Длина сгустка частиц (т.н. «банча») на Теватроне была более 37 см, что приводило к довольно длинной области возможных взаимодействий – примерно 50 см. В этом случае довольно сложно расположить трековые детекторы так, чтобы треки были перпендикулярны к плоскостям сенсоров для всего диапазона псевдобыстрот. Это привело к созданию гибридной системы (см. Рисунок 2), состоящей из 6 баррельных коаксиальных блоков детекторов, измеряющих в основном $r-\phi$ координаты, 4 Н-дисков и 12 F-дисков, измеряющих $r-z$ и $r-\phi$. То есть вершины взаимодействий частиц с большими

псевдобыстротами восстанавливаются дисками, а с малыми — в баррелях. Такой дизайн приводит ко многим механическим сложностям, поскольку применяется множество типов детекторов, которым необходимо пространство для кабелей и охлаждения, и в то же время необходимо минимизировать «мертвые зоны» трековой системы.

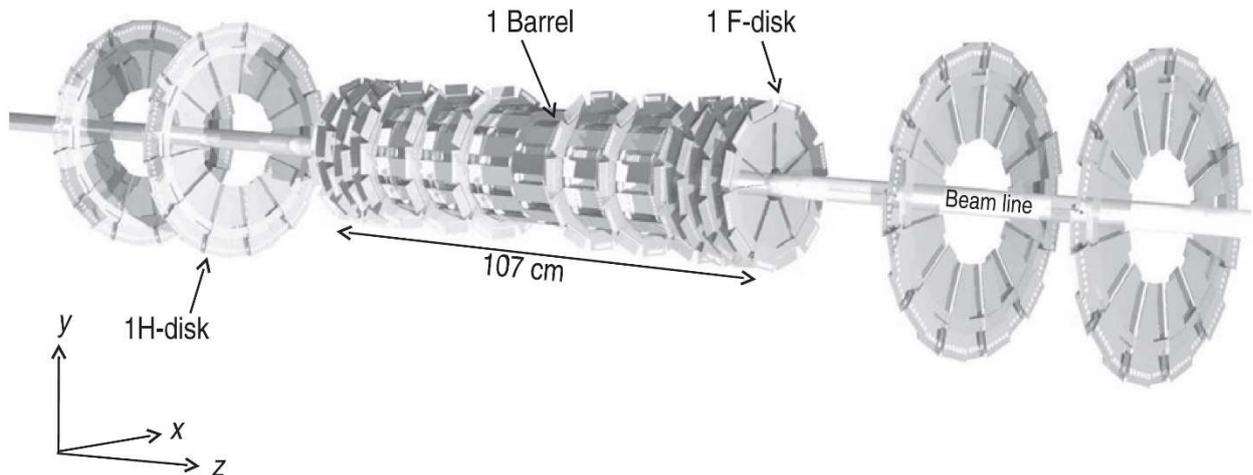


Рисунок 2. Изометрический вид кремниевого трекера D0 (Run IIa).

Дизайн SMT также находился под влиянием других требований — минимальная масса, точность расположения сенсоров и поддерживающих структур, адекватные тепловые характеристики кремниевых модулей в «баррелях» и «дисках». Также из-за дизайна «баррелей» и «дисков» считывающую и с целью уменьшения шумов и наводок электронику необходимо было размещать непосредственно рядом с сенсором. Все эти ограничения для трековых модулей, называемых «лэддерами» (от английского «ladder», «лестница»), привели к схеме базового детекторного элемента с бериллиевыми подложками с приклеенными к ним одним (в случае двухстороннего сенсора) или двумя (в случае одностороннего сенсора) кремниевыми сенсорами. На Рисунок 3 изображен баррельный трековый модуль с двухсторонним сенсором с углом между стрипами 2° . Эти бериллиевые подложки отводят тепло от сенсоров и электроники чтения к охлаждаемым и поддерживающим конструкциям. Также к бериллиевой подложке была приклеена гибкая печатная плата, несущая микросхемы считывания и пассивные электронные компоненты, называемая High Density Interconnect (HDI) (в переводе «Соединение

Высокой Плотности»). Длинный гибкий кабель-«хвост» HDI позволяет легко прокладывать его через остальные элементы конструкции. Микросхема считывания SVXIIe включает 128 каналов, каждый содержит зарядочувствительный усилитель, аналоговую память глубиной 36 ячеек и 8-битный АЦП [9].

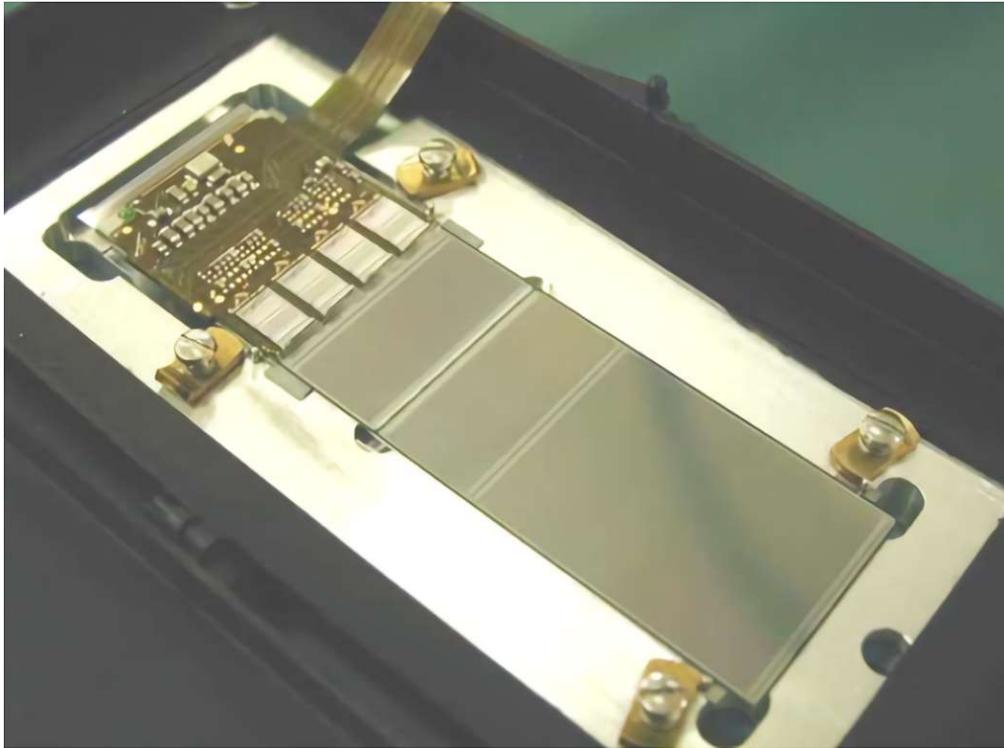


Рисунок 3. Баррельный модуль SMT с двухсторонним сенсором.

1.3.2. Полупроводниковый трекер детектора ATLAS

Детектор ATLAS — один из самых крупных детекторов широкого назначения на Большом Адронном Коллайдере и один из крупнейших детекторов в мире на данный момент [10]. Он создан для изучения процессов, происходящих в рамках Стандартной модели, открытия и измерения параметров бозона Хиггса [11], а также поиска новых частиц, предсказываемых иными теориями, например теорией суперсимметрии, в протон-протонных столкновениях при энергии до 14 ТэВ. Все эти исследования полагаются на отличную производительность системы трекинга Внутреннего Детектора (Inner Detector, ID) ATLAS. И полупроводниковый трекер (SCT – SemiConductor Tracker) — одна из основных её частей.

Схема Внутреннего Детектора приведена на Рисунок 4 [12; 13]. Детектор восстанавливает треки заряженных частиц, исходящих из зоны взаимодействия, и состоит из пиксельного детектора (Pixel), окруженного полупроводниковым трекером (SemiConductor Tracker (SCT)), который в свою очередь окружен газовым трекером переходного излучения (Transition Radiation Tracker (TRT)). Общая длина внутреннего детектора составляет 7 м и диаметр — 2.3 м. Для определения импульсов частиц используется магнитное поле индукцией 2 Тл, создаваемое сверхпроводящим соленоидом, который совмещен с криостатом с жидким аргоном электромагнитного калориметра (см. Рисунок 5) [14]. Из-за высоких энергий протон-протонных столкновений в одном взаимодействии создается большое количество частиц; и в одном пересечении пучков происходит множество взаимодействий. Поэтому требуемыми качествами ИД является возможность точно восстанавливать треки заряженных частиц в условиях наличия множества треков, способность идентификации пересечения пучков, стойкость к большим дозам излучения, использование минимального количества материала и, дополнительно, возможность идентификации электронов внутри ИД.

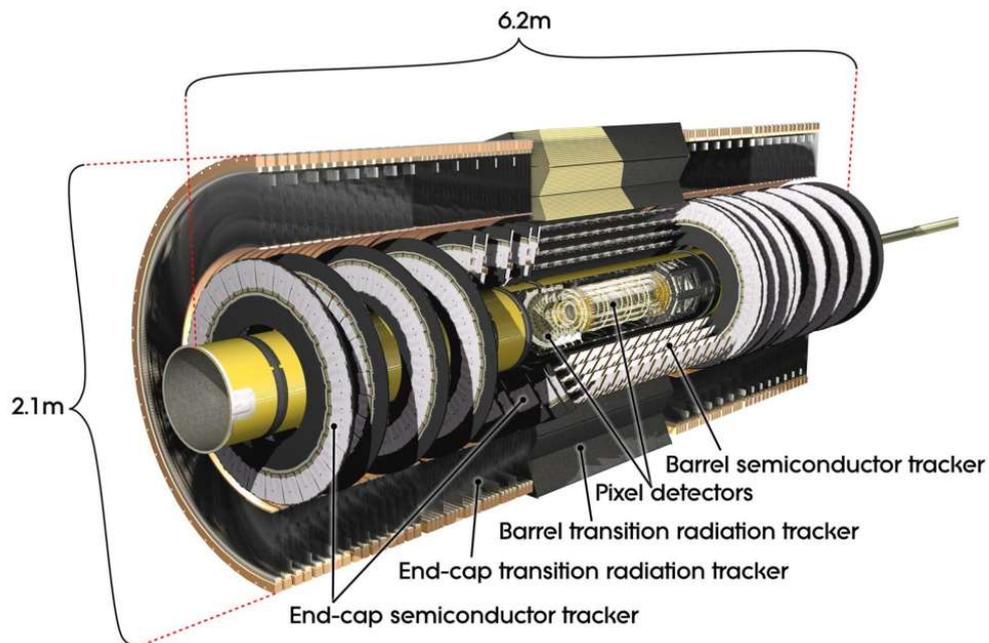


Рисунок 4. Внутренний Детектор ATLAS в разрезе.

Внутренний детектор состоит из т. н. «barrel» и «endcap» областей для минимизации количества материала, который необходимо пересечь заряженной

частице, исходящей из области взаимодействия в центре системы. «Barrel» состоит из цилиндрических (или баррельных) коаксиальных слоев — 3 слоев пискельного детектора и 4 слоев микростриповых, в то время как оба «endcap» состоят из 9 дисков каждый. Рассмотрим детальнее именно модули баррельной части, основанные на кремниевых микростриповых сенсорах.

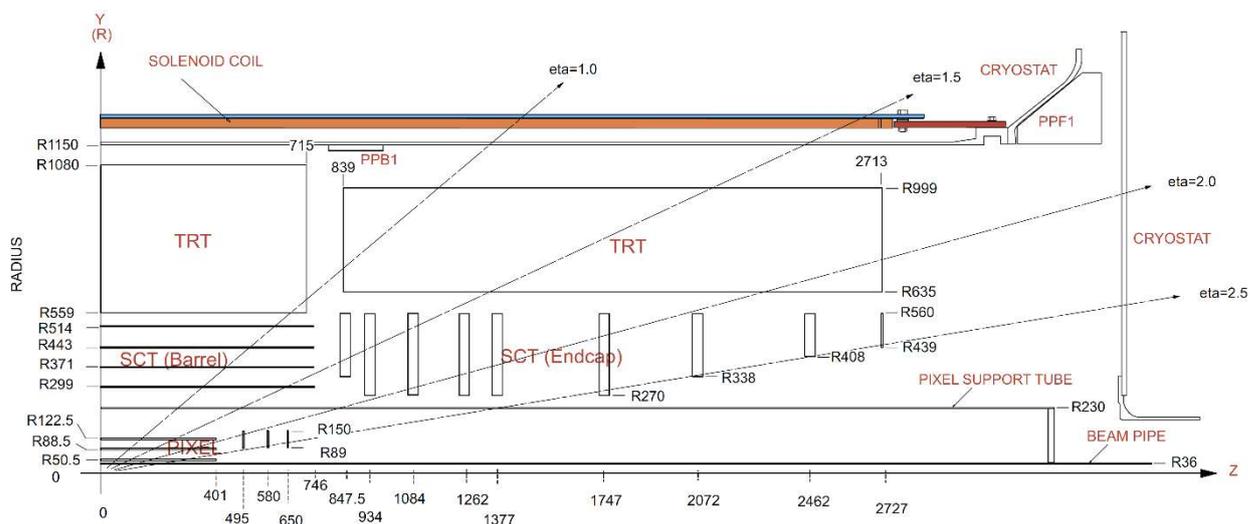


Рисунок 5. Схема одного из квадрантов Внутреннего Детектора ATLAS.

Четыре барреля полупроводникового трекера (а именно №№3, 4, 5 и 6) имеют радиусы от 299 до 514 мм и полную длину 1492 мм. Их поверхность покрыта детекторными элементами, называемыми баррельными модулями полупроводникового трекера, для полного покрытия треков частиц, вылетающих из зоны ± 76 мм от точки взаимодействия (что соответствует ± 2 стандартным отклонениям). Общее количество модулей — 2112. Баррельный модуль (см. Рисунок 6 и Рисунок 7) состоит из 4 практически квадратных кремниевых микростриповых сенсоров, 2 с верхней и 2 с нижней стороны, с гибридной считывающей электроникой посередине. Модуль сделан так, чтобы иметь минимальное количество каких-либо структур вблизи от краев, для возможности перекрытия чувствительных областей соседних модулей в барреле. Основание используется в качестве теплопроводящей и несущей механической структуры и размещается между нижними и верхними сенсорами и распространяется в боковые стороны для контакта со слоями бериллиевой керамики (BeO). Опоры гибридной считывающей электроники приклеены к подложкам BeO и предотвращают контакт

электроники с сенсорами. Модуль крепится к поддерживающей структуре в 3 точках, в 2 на большой («охлаждающей») стороне и в 1 на малой (дальней) стороне модуля. Большие стороны модулей находятся в контакте с охлаждающим элементом, который проходит вдоль всех модулей баррельного детектора.

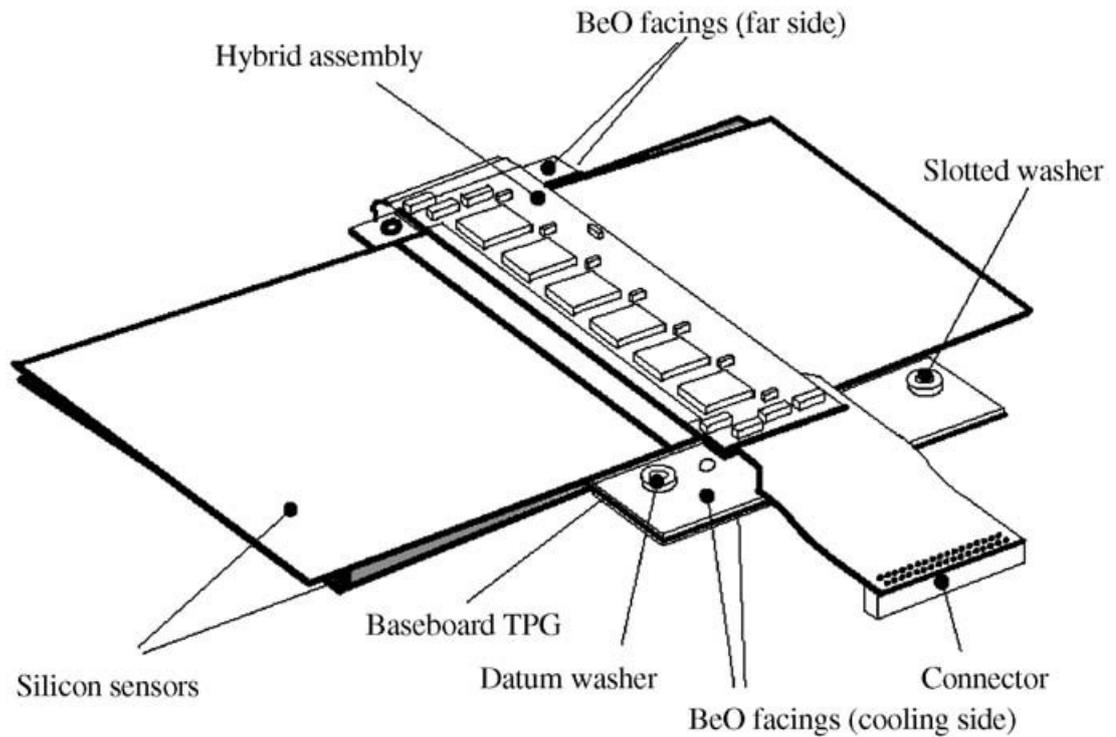


Рисунок 6. Общий вид баррельного модуля полупроводникового трекера ATLAS.

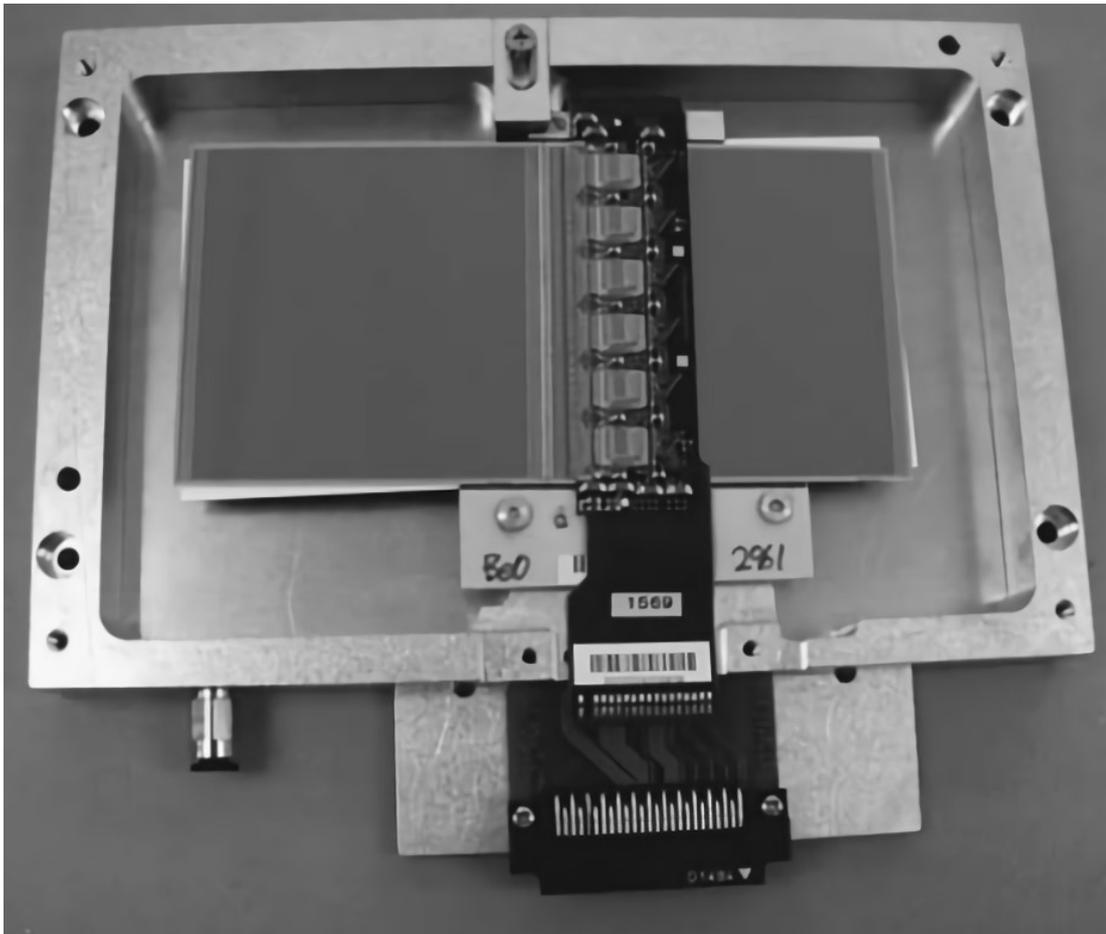


Рисунок 7. Внешний вид баррельного модуля внутри ящика для хранения.

Необходимая точность определения треков достигается с помощью микроstriповых сенсоров с шагом стрипов 80 мкм и бинарной системой чтения («on-off») [15]. Пара сенсоров в модуле, расположенные спина-к-спине, повернуты на стереоугол 40 мрад относительно друг друга. Модуль устанавливается на баррельный детектор так, чтобы его стрипы на одной стороне были параллельны оси z барреля, что приводит к точности 17 мкм по координатам r - φ и 580 мкм по координате z после аппроксимации. Механический допуск для позиционирования сенсоров должен быть менее 8 мкм в поперечном к стрипам направлении.

Высокая радиационная нагрузка на БАК сильно влияет на состояние кремниевых детекторов, вызывая рост тока утечки и инверсию типа проводимости, что приводит к необходимости охлаждения сенсоров до -7 °C. Это позволяет с одной стороны существенно (до 10 раз) снизить ток утечки детектора и, с другой стороны «заморозить» дефекты структуры в кремнии и не допустить «обратного отжига» [16]. Модули проектировались в расчете на максимальный интегральный

флюенс после 10 лет работы полупроводникового трекера порядка 2×10^{14} 1 МэВ нейтронных эквивалентов/см². Соответствующее напряжение смещения для необходимой эффективности сбора заряда составило 350 – 450 В, что приводит к полному току утечки $\sim 0,5$ мА для одного сенсора при температуре -7 °С и напряжении смещения 450 В. Ток утечки сильно зависит от температуры сенсора, удваиваясь каждые 7 °С, что в свою очередь сильно влияет на тепловыделение. Потребляемая мощность считывающих микросхем номинально составила $\sim 5,5$ Вт на один баррельный модуль и $\sim 7,5$ Вт при максимальной нагрузке, что оказалось больше, чем изначально предполагалось, что в значительной степени повлияло на общий дизайн полупроводникового трекера, и в особенности на его систему охлаждения.

Такие тепловые условия привели к дизайну модуля на основе бериллиевой керамики (BeO), теплопроводность которой больше, чем у кремния.

Для обработки сигналов от кремниевого стрипового детектора в эксперименте ATLAS используется микросхема ABCD3TA. Микросхема ABCD3TA должна обеспечивать все функции, необходимые для обработки сигналов от 128 стрипов кремниевого микрострипового детектора и передачи данных от детекторного модуля в SCT. Основные функции микросхемы следующие:

- интегрирование заряда,
- формирование импульсов,
- амплитудная дискриминация,
- регистрация данных либо в режиме определения фронта импульса, либо в режиме определения максимума,
- хранение данных в конвейере до появления триггера первого уровня (L1),
- дерандомизация и сжатие данных,
- передача данных из микросхемы через последовательные выходы, соединенные последовательно.

Подробнее эта микросхема описана в [17].

Система считывания полупроводникового трекера была разработана для работы при загрузке 0,2%-0,5%, для светимости БАК $1 \times 10^{34} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ и загрузкой до 23 взаимодействий на столкновение пучков. Микросхемы ABCD3TA, установлены на медно-полиимидных гибких печатных платах, называемых считывающими гибридами. Каждый из 128 каналов ABCD имеет предусилитель и усилитель-формирователь; выходной сигнал имеет время формирования ~ 20 нс и затем дискриминируется для обеспечения двоичного выходного сигнала. Общий порог дискриминатора применяется ко всем 128 каналам, обычно соответствуя заряду 1 фКл, и устанавливается 8-разрядным ЦАП. Для компенсации различий в пороговых значениях отдельных каналов, каждый канал имеет свой собственный 4-битный ЦАП (TrimDAC), используемый для смещения порога компаратора и обеспечения однородности отклика по всей микросхеме.

1.3.3. Кремниевый вершинный трекер детектора CLAS12

Рассеяние электронов является эффективным методом исследования размеров и внутренней структуры субатомных частиц, таких как протоны, нейтроны и атомные ядра [18]. И использование пучков высокоэнергетичных электронов привело к значительному прогрессу в понимании внутреннего состава подобных частиц. Размеры протона были впервые определены в середине 1950-х годов [19], а его внутренняя кварковая структура была обнаружена в конце 1960-х годов [20]. Используя спин-поляризованные электроны и спин-поляризованные мишени, в 1980-х годах было измерено распределение импульса внутренней кварковой спиральности, и оно как являлось в последующие десятилетия, так и является до сих пор важной темой исследований [21]. В этих экспериментах требовались только инклюзивные измерения, где регистрировались и кинематически анализировались только частицы пучка (электроны или мюоны), которые рассеивались от мишени.

В последующие десятилетия после этих открытий стало понятно, что более

детальное понимание внутренней структуры нуклонов требует полной реконструкции эксклюзивных или полуклассических процессов, и поэтому потребовались детектирование и кинематическая реконструкция дополнительных мезонов и барионов в конечном состоянии. Другие ограничения были связаны с необходимостью барионной спектроскопии для измерения полных угловых распределений, что делает необходимым использование детекторов с большим акцептансом. CEBAF (Continuous Electron Beam Accelerator Facility) [22], детектор CLAS (CEBAF Large Acceptance Spectrometer) [23] и другое экспериментальное оборудование в Лаборатории Джефферсона (JLab) были спроектированы и построены в 1990-х годах с учетом этих целей и успешно эксплуатировались более 15 лет.

Дальнейшее развитие квантовой хромодинамики (КХД) как теории взаимодействия «цветных» кварков и глюонов, в сочетании с открытием обобщенных партонных распределений (ОПР), предоставило новый способ описания структуры нуклона в трех измерениях (3D) — два в координатном пространстве и одно в импульсном пространстве. Эта разработка открыла новое направление адронных исследований, которое стало одной из передовых программ в ядерной и адронной физике. ОПР должны быть исследованы в эксклюзивных процессах, наиболее подходящим из которых является глубоко виртуальное комптоновское рассеяние. Это довольно редкий процесс, и измерения требуют работы детекторов с большим акцептансом при высокой мгновенной светимости $10^{35} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ для фиксации процесса в полном кинематическом фазовом пространстве с использованием поляризованных пучков и мишеней, а также достаточно высокой энергии пучка. Дополняющий процесс полуклассического глубокого неупругого рассеяния (semi-inclusive deep inelastic scattering, SIDIS) также представляет существенный интерес для исследования внутренней структуры нуклонов в трехмерном импульсном пространстве. Научная программа CLAS12 очень широка и включает в себя изучение структуры протона и нейтрона как в их основном состоянии, так и в их многочисленных возбужденных состояниях, а также в глубоко неупругой кинематике [24].

Для измерений функций распределения партонов в эксперименте CLAS12 требуется детектирование треков частиц с малым импульсом с разрешением по импульсу в несколько процентов и угловым разрешением около одного градуса в области больших углов. Этой цели служит центральный трекер, установленный внутри сверхпроводящего соленоидного магнита с магнитной индукцией 5 Тл, который создает однородное магнитное поле в детектирующем объеме трекера и также действует в качестве щита от меллеровского электронного рассеяния [25]. Кремниевые детекторы отлично соответствуют условиям центральной трековой системы эксперимента CLAS12, где доступно только ограниченное пространство и необходимо эксплуатировать детекторы для точных измерений параметров эксклюзивных процессов при больших передачах импульсов. Как уже упоминалось ранее, ширина запрещенной зоны кремния (1,12 эВ при комнатной температуре) достаточно велика, чтобы иметь низкий ток утечки из-за образования электронно-дырочных пар, и в то же время она достаточно мала, чтобы обеспечить производство большого числа носителей заряда на единицу энергетических потерь ионизирующих частиц. Большая потеря энергии на длину пробега ионизирующей частицы из-за высокой плотности материала приводит к получению измеримых сигналов даже в тонких детекторах. Также, из-за высокой подвижности электронов и дырок кремниевые детекторы могут использоваться в высокоскоростных средах с временем сбора заряда порядка нескольких нс. Эти характеристики являются основными решающими факторами, ведущими к широкому применению кремниевых детекторов для трековых систем. Интегральная светимость в год в CLAS12 составляет 500 фбн^{-1} . Доза излучения для сенсоров кремниевого вершинного детектора (Silicon Vertex Detector, SVT) эксперимента CLAS12 на углеродной мишени составляет 2,5 Мрад в течение 15 лет.

SVT выполняет задачи трекинга в Центральном Детекторе CLAS12 путем измерения барионов отдачи, пионов, каонов и протонов с большим углом с эффективностью трекинга более 90%, разрешением по поперечному импульсу $\delta p_T/p_T \leq 5\%$, и угловым разрешением для полярных углов $\delta\theta \leq 10 - 20$ мрад (в пределах $35^\circ - 125^\circ$) и азимутальных углов $\delta\phi \leq 5$ мрад (в пределах $\geq 90\%$ от 2π)

[26]. Центральный Детектор CLAS12 состоит из SVT в качестве внутреннего детектора, окруженного баррельным газовым трекером (Barrel Micromegas Tracker, BMT) [27], Центральной Вре́мя Пролетной системой (Central Time-Of-Flight, CTOF) [28] и Центральным Нейтронным Детектором (Central Neutron Detector, CND) [29]. Необходимое разрешение по импульсу обеспечивает SVT, а BMT улучшает разрешение по полярному углу благодаря пересечению стрипов под углом 90° . Отметим, что вместе системы SVT и BMT образуют Центральный Вершинный Трекер (Central Vertex Tracker, CVT) CLAS12. Треки сопоставляются с отсчетами в системе CTOF для идентификации частиц. SVT позволяет восстанавливать обособленные (detached) вершины, например $K_s^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$, $\Lambda \rightarrow \pi^-p$, $\Xi \rightarrow \Lambda p$, для эффективной экспериментальной программы в физике «странных» частиц.

Чтобы удовлетворить требованиям физики по импульсному разрешению, SVT должен иметь малую массу внутри области акцептанса. Допуски на положение модуля SVT должны быть в пределах 20, 500 и 100 мкм поперек модуля, вдоль модуля и вдоль пучка соответственно.

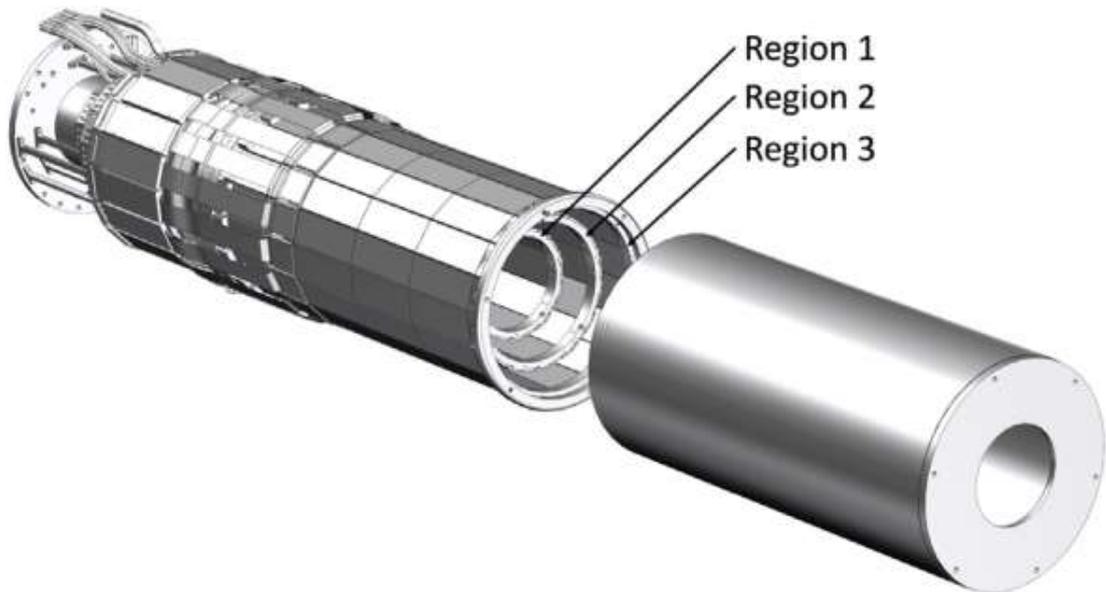


Рисунок 8. Схема детектора SVT и клетки Фарадея.

SVT состоит из 21504 чувствительных каналов триплетов односторонних кремниевых микростриповых сенсоров типа p-on-n, с емкостным съемом сигнала,

и расположенных в шести слоях. Баррель SVT образован тремя концентрическими многоугольными областями двусторонних модулей SVT, расположенных на радиусах 65, 93 и 120 мм (см. Рисунок 8). Самый внутренний слой — область 1 — содержит 10 модулей, окруженный областью 2 с 14 модулями, которая в свою очередь окружена областью 3 с 18 модулями. SVT заключен в клетку Фарадея с внутренним радиусом 57 мм и внешним радиусом 133 мм. Для минимизации многократного рассеяния была разработана уникальная конструкция модуля со сверхдлинными стрипами 33 см для сокращения количества материала до примерно 1,4% радиационной длины на каждую из областей для треков с нормальным падением частиц, что необходимо для трекинга при малых импульсах [30]. Никакие сервисные элементы модуля, такие как линии охлаждения, кабели питания, считывания и медленного контроля, не размещались в чувствительном объеме детектора. Размеры модуля составляют 41,9 см × 4,2 см × 0,39 см. Все модули SVT идентичны для минимизации производственных затрат. Смежные модули не перекрываются, а зазор между ними минимален, чтобы удовлетворить ограничениям на количество материала и акцептанс.

В SVT используются односторонние микростриповые сенсоры толщиной 320 мкм, изготовленные компанией Hamamatsu Photonics, которые установлены на каждой стороне модуля (см. Рисунок 9). Все модули имеют 3 типа датчиков: H (Hybrid, гибридные), I (Intermediate, промежуточные) и F (Far, дальние). Сенсоры изготавливались на 150 мм пластинах с высоким удельным сопротивлением 5 кОм*см для обеспечения низкого напряжения полного обеднения и с 2 сенсорами на пластину. Поверхностные дефекты минимизировались за счет использования кремния с ориентацией поверхности $\langle 100 \rangle$. Все сенсоры имеют одинаковый размер: 112 мм × 42 мм. На каждый слой приходится по три последовательно соединенных сенсора, соответственно, шесть на модуль.

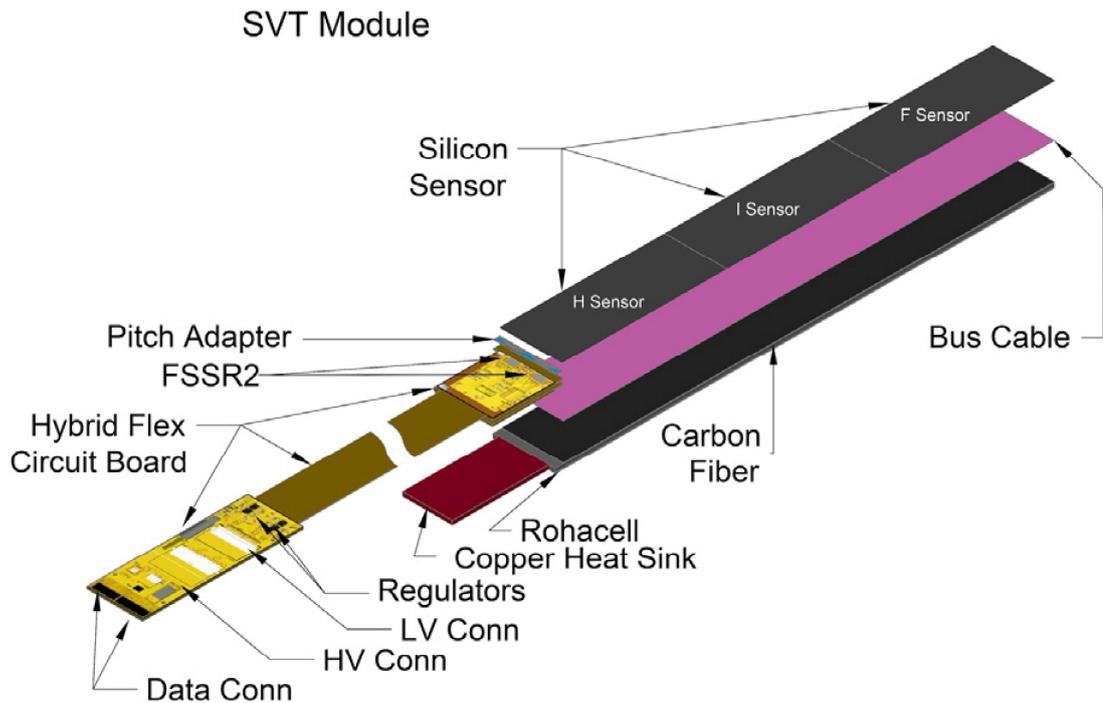


Рисунок 9. Схема детекторного модуля SVT.

В каждом слое — 256 стрипов с линейно изменяющимися углами $0^\circ - 3^\circ$ (постоянный угловой шаг составляет $1/85^\circ$) для минимизации мертвой зоны сенсора. Первый считываемый стрип параллелен продольной оси модуля; последняя считываемый стрип имеет угол 3° по отношению к этой. Из-за постоянного углового шага длина считываемых стрипов модулей варьируется от 0,5 до 33 см. Со стороны считывающей электроники шаг стрипов составляет 78 мкм и шаг считывания стрипов — 156 мкм [26].

Сенсоры установлены на подложке, специально разработанной для обеспечения высокой жесткости и малого веса. Подложка представляет собой сэндвич панель из двух слоев углепластика и слоя легкого материала Rohacell.

Обе стороны каждого модуля оснащены системой чтения, состоящей из одной гибридной гибкой печатной платы (Hybrid Flex Circuit Board, HFCB) расположенной на верхнем конце модуля (см. Рисунок 9). HFCB представляет собой единую схему, обеспечивающую все обслуживание модуля и его компонентов от контроля до считывания сигналов с модуля.

Модуль SVT крепится охлаждающей пластине, а все служебные кабели модуля проходят через прорези в ней. Конструкция жестких и гибких частей HFCB

учитывает геометрические ограничения, накладываемые компоновкой детектора. HFСВ обеспечивает напряжение смещения для кремниевых сенсоров, а также линии питания и контроля для четырех считывающих микросхем FSSR2, расположенных на краю гибридной части, по две на верхней и на нижней сторонах. Гибридная часть каждой HFСВ состоит из двух жестких плат (верхней и нижней), соединенных гибким шлейфом высокой плотности (High Density Interconnect, HDI) длиной 10 мм. Обе печатные платы электрически соединяются с модулем с помощью микросварки для сигнальных линий и смещения, а также паяных соединений для смещения детектора и заземления модуля. Сенсоры и HFСВ приклеены к обеим сторонам подложки.

На каждый модуль приходится 512 каналов, считываемых микросхемами FSSR2. Микросхема FSSR2 была разработана во FNAL для эксперимента VTeV [31]. Микросхема имеет конфигурируемую архитектуру (самотриггирующуюся и с временной меткой). Каждый из 128 входных каналов микросхемы FSSR2 имеет предусилитель, усилитель-формирователь, с регулируемым временем формирования сигнала (от 65 до 125 нс), восстановитель базовой линии (baseline restorer, BLR) и 3-битный АЦП. Период тактового генератора (clock) задает время сбора данных. Инжектированный заряд вызывает срабатывание дискриминатора канала, генерируя выходной сигнал быстрого триггера (GOTHIT), за которым следует считывание данных о попадании (OUT1) примерно через 1,4 мкс после триггера. Тактовый генератор счетчика сгустков пучка (bunch counter clock, BCOCLK) дает временную метку, с помощью которой данные маркируются.

Аналоговая секция ядра FSSR состоит из 128 каналов (см. Рисунок 10). Зарядовый предусилитель интегрирует входной заряд, генерируемый в чувствительном объеме сенсора с емкостью задней плоскости C_D и собираемый через переходную емкость C_{AC} . Прямая проводимость G_f используется для разряда емкости обратной связи C_f . Интегратор и усилитель-формирователь используются для улучшения соотношения сигнал/шум. Усилитель-формирователь использует схему CR-(RC)² с программируемым временем достижения пика сигнала 65, 85, 100

или 125 нс. Компаратор передает двоичную информацию (попадание или нет попадания) в цифровую секцию. Восстановитель базовой линии добавлен для подавления эффекта сдвига базовой линии. Коэффициент усиления предусилителя также программируется путем изменения величины емкости обратной связи [32].

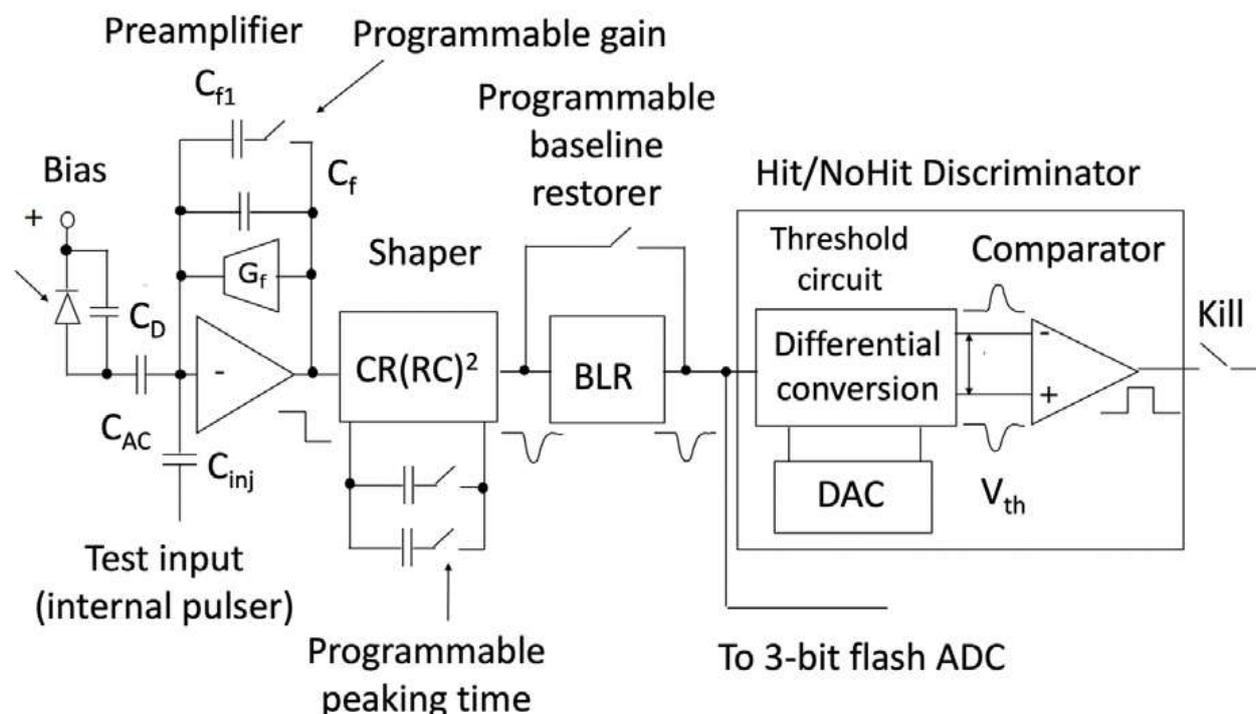


Рисунок 10. Блок-схема одного аналогового канала микросхемы FSSR2.

Если в одном из каналов обнаружен сигнал, логическая часть ядра передает информацию об амплитуде импульса, номере канала и метке времени на интерфейс вывода данных. Интерфейс вывода данных принимает данные, переданные ядром, преобразует их в последовательную форму и передает в систему сбора данных. Таким образом, нерегулярный поток данных преобразуется в данные, синхронизированные с основной тактовой частотой системы. В рабочем цикле FSSR2 не выделяется время на передачу сохраненной информации, т.е. данные поступают на выход микросхемы непосредственно после обнаружения сигнала. Принимающая сигнал электроника должна быть постоянно готова к приему данных, так как данные могут поступить в любой момент. Поэтому микросхема может работать только как часть программно-аппаратного комплекса с внешним контроллером, настроенным на режим ожидания данных (переменный во времени поток данных).

Для передачи 24-битных слов можно использовать одну, две, четыре или шесть низковольтных последовательных линий данных. Для синхронизации данных используются оба фронта 70 МГц от тактового генератора, в результате чего максимальная скорость передачи данных на выходе составляет 840 Мбит/с. Тактовый генератор считывания не зависит от тактового генератора системы сбора данных. Потребляемая мощность составляет ≤ 4 мВт на канал. Микросхема FSSR2 является радиационно-стойкой и выдерживает дозы до 5 Мрад [33]. Выбор данной считывающей микросхемы был обусловлен ее архитектурой и хорошими шумовыми характеристиками при высокой емкостной нагрузке длинных стрипов кремниевых сенсоров SVT.

Архитектура микросхемы FSSR2 такова, что она посылает 24-битные последовательности данных, если канал сработал, или 24-битную последовательность данных о состоянии, если канал не имеет сигнала (в состоянии простоя). Микросхемы FSSR2 передают эти данные по шести линиям. Сначала данные преобразуются в параллельную форму. К 24-битным последовательностям данных добавляется 8 бит для увеличения временного диапазона, и полученные 32-битные последовательности приводятся в соответствие с триггером CLAS12, который генерируется другими детекторами. Последовательности данных о состоянии скрываются для минимизации объема данных о событии и отслеживаются только для диагностики состояния отдельных микросхем FSSR2.

Каждый канал имеет ячейку памяти для записи одного события. Если данные о событии поступают в ячейку, канал отключается, и сигнал о наличии данных передается в контроллер. Контроллер опрашивает канал с обнаруженным событием и формирует последовательность данных. Данные передаются через короткий временной интервал, после чего канал снова готов к приему сигналов. При относительно низких загрузках, когда интервал между событиями больше, чем время, необходимое для считывания одного события, потери данных отсутствуют.

Четыре микросхемы FSSR2 на HFCB соединяются с модулем сбора сегментов на базе архитектуры VXS (VXS architecture-based Segment Collector

Module, VSCM) [34]. Основная задача VSCM — преобразовать сконфигурированный поток информации от FSSR2 в редкие и триггерированные события и обеспечивать таким образом совместимость потоковой архитектуры чтения данных FSSR2 с остальными системами эксперимента CLAS12. VSCM конфигурирует регистры микросхем FSSR2, подает аналоговые калибровочные импульсы на FSSR2, устанавливает/контролирует необходимые сигналы системы контроля и получает преобразованные в последовательную форму данные о событиях от микросхем FSSR2.

Столь подробное описание работы специализированной микросхемы FSSR2 приведено в этом обзоре, поскольку именно FSSR2 является первой микросхемой считывания, в которой впервые были реализованы идеи потокового считывания данных с кремниевых детекторов. Именно эти идеи нашли воплощение в микросхеме STS-XYTER, планируемой к использованию в эксперименте BM@N.

1.4. Выводы

Кремниевые детекторы зарекомендовали себя в экспериментах физики частиц своими физическими характеристиками, обеспечивающими высокую скорость регистрации, радиационную стойкость и компактность. Эти свойства позволяют их применять в условиях малого свободного пространства и практически вплотную к области взаимодействия частиц, что повышает точность физических методик, лежащих в основе эксперимента, а также долго и продуктивно работать в условиях высоких светимостей. В то же время перечисленные выше свойства кремниевых детекторов также задают высокую планку для электроники считывания и системы чтения в целом, что приводит к поиску новых подходов и решений в этой области.

Приведенные в качестве примера трековые системы подчеркивают уникальность каждой и подтверждают надежность и универсальность кремниевых микростриповых детекторов. При всем при этом в каждой системе свой подход к системе чтения, и считывающая электроника сильно отличается друг от друга. С

точки зрения исследования трековых модулей эксперимента BM@N особенно интересен подход эксперимента CLAS12 с его потоковой системой чтения кремниевого вершинного трекера, основанной на микросхеме FSSR2.

Потоковый подход к системе чтения позволяет считывать все данные, поступающие с сенсоров, независимо от остальных детекторных систем, и необходимость в этом повышается с ростом светимости и множественности событий, что в особенности относится к экспериментам по столкновению тяжелых ионов. К сожалению, это также повышает требования к электронике и ее сложность, что, как правило, ухудшает ее шумовые характеристики и приводит к высокому тепловыделению, что уже в свою очередь усложняет систему охлаждения. Также возникает необходимость временной синхронизации всех каналов считывания с «часами системы». Но несмотря на то, что данный подход сложнее, чем классический триггерный, и на данный момент мало распространен, он признается более универсальным решением для экспериментов физики высоких энергий в случае больших загрузок и, в особенности, в случае отсутствия критерия выработки сигнала запуска.

Глава 2. Кремниевая трековая система эксперимента $BM@N$

2.1. Физическая программа $BM@N$

Столкновения ядро-ядро при энергиях от единиц до десятков ГэВ на нуклон в системе центра масс открывают уникальные возможности по достижению экстремальных плотностей ядерной материи. Подобные условия хорошо подходят для исследования уравнения состояния, структуры и свойств ядерной материи, а также поисков фазовых переходов, восстановления киральной симметрии и экзотических форм материи. Ожидается, что при больших значениях барионной плотности в ядерной материи будут присутствовать критическая точка и переходы между различными фазами, таких как адронная фаза, кваркониевая фаза, кварк-глюонная плазма и, возможно, «цветная» сверхпроводящая фаза (см. Рисунок 11) [35; 36]. Экспериментальное наблюдение и изучение таких структур может быть значительным прорывом в понимании все еще не исследованных областей квантовой хромодинамики (КХД), а также в изучении сверхновых, структуры нейтронных звезд и динамики слияний нейтронных звезд.

С экспериментальной точки зрения о фазовой диаграмме КХД известно мало. Сравнение измеренных выходов частиц и античастиц с результатами расчетов тепловой модели дает так называемую температуру вымораживания как функцию барионного химического потенциала [37; 38]. Эта температура измеряется на поздней стадии столкновения, когда образовавшиеся частицы перестают взаимодействовать, а плотность падает намного ниже плотности насыщения. Однако, для энергии LHC и максимальных энергий RHIC температура вымораживания совпадает с псевдокритической температурой, предсказанной КХД, что указывает на то, что вымораживание и адронизация могут происходить одновременно. Задача экспериментов с тяжелыми ионами заключается в исследовании фазовой диаграммы КХД при более низких энергиях пучка и в области высоких плотностей барионов, где предполагается существование структур, таких как фазовый переход первого рода или новые фазы.

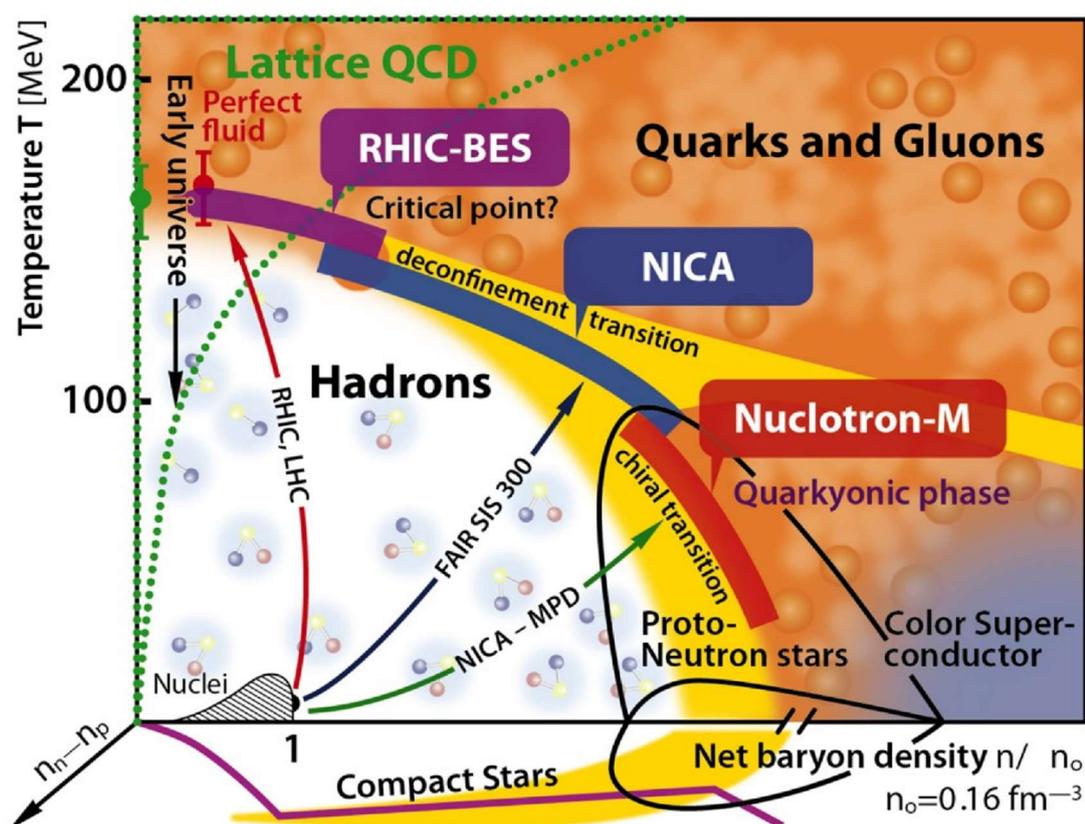


Рисунок 11. Фазовая диаграмма как функция температуры, барионной плотности и нуклонной асимметрии [39]. Также на ней отмечены области исследований различных экспериментов по столкновению тяжелых ионов.

Нуклотрон ОИЯИ в Дубне ускоряет ионы золота до кинетических энергий от 2 до 4,5 ГэВ на нуклон. Столкновения тяжелых ионов в этом диапазоне энергий хорошо подходят для создания высоких барионных плотностей (см. Рисунок 12) [40]. Согласно модельным расчетам, ожидается, что ядерный «огненный шар» уже при энергии пучка 4,5 ГэВ на нуклон будет сжат до плотности, превышающей плотность насыщения ρ_0 более чем в 4 раза. Таким образом, диапазон энергий Нуклотрона очень хорошо подходит для создания барионной материи при плотностях порядка плотности ядра нейтронной звезды.

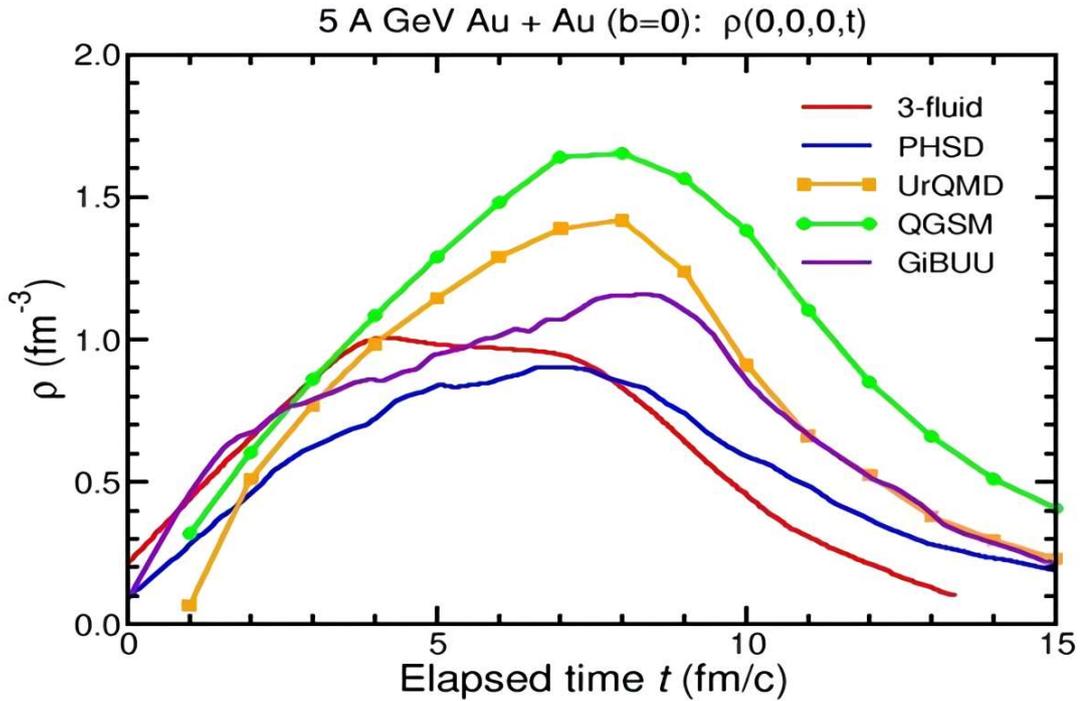


Рисунок 12. Барионная плотность в зависимости от времени, достигнутая в центральных столкновениях Au+Au при энергии пучка 5 ГэВ на нуклон [40]. Чистая плотность барионов $\rho=1 \text{ фм}^{-3}$ соответствует примерно 7-кратной плотности атомного ядра.

Наблюдается, что измеренная в столкновениях тяжелых ионов при максимальных энергиях SPS, RHIC и LHC множественность гиперонов с высокой странностью согласуется с предсказаниями статистической модели адронизации (SHM), которая характеризует материю в зоне столкновения с помощью температуры и барионного потенциала [41]. Однако уравнивание Ω -барионов не может быть описано с точки зрения адронных процессов релаксации двух тел за время жизни огненного шара. Поэтому это воспринималось как убедительное свидетельство того, что система претерпела переход от партонной фазы к адронному конечному состоянию, причем равновесие было вызвано столкновениями многих тел при высокой плотности частиц вблизи границы фазового перехода [42]. С другой стороны, при низких энергиях пучка, доступных в GSI/SIS18, было обнаружено, что множественность Ξ -гиперонов превышает предсказания SHM примерно в 249 раз [43]. Поэтому измерение гиперонов с высокой странностью в столкновениях Au+Au при различных энергиях пучка на Нуклотроне позволит исследовать момент начала уравнивания гиперонов с

высокой странностью при высоких барионных плотностях, что может быть признаком смешанной фазы кварковой материи.

Относящиеся к уравнению состояния наблюдаемые должны быть чувствительны к давлению и плотности в ядерном «огненном шаре». Коллективный поток идентифицированных частиц чувствителен к градиенту давления, создаваемого в раннем «огненном шаре», и предоставляет информацию о плотной фазе столкновения, то есть о ядерной несжимаемости. Чтобы извлечь эту величину из экспериментальных данных, их необходимо сравнить с результатами транспортных расчетов для различных уравнений состояния, которые могут быть получены из параметризации нуклон-нуклонного потенциала [44]. Поток в плоскости и эллиптический поток протонов был измерен в столкновениях Au+Au при кинетических энергиях пучка от 2 до 10А ГэВ, соответствующих плотностям насыщения от 3 до 8 ρ_0 , и были получены значения для несжимаемости ядерной материи, которые варьируются от 200 МэВ до 300 МэВ [45]. К сожалению, такой широкий диапазон значений недостаточен для нашего понимания нейтронных звезд. Чтобы уменьшить неопределенность несжимаемости в этой важной области плотностей, будущие эксперименты должны изучить коллективный поток в этом диапазоне энергий не только для протонов, но и для других барионов, к примеру, гиперонов.

Другой важной наблюдаемой, чувствительной к уравнению состояния, является подпороговое рождение частиц. В столкновениях тяжелых ионов странные частицы образуются уже при таких кинетических энергиях пучка на нуклон, которые значительно ниже пороговой энергии в столкновениях ядро-ядро. Например, производство K^+ -мезона наблюдалось в столкновениях тяжелых ионов при энергии пучка до 0,6 А ГэВ, хотя пороговая энергия рождения для процесса $p+p \rightarrow K^+ \Lambda p$ составляет 1,6 ГэВ [46]. Согласно транспортным моделям, рождение происходит через множественные столкновения внутри «огненного шара» с участием барионных резонансов и мезонов. Эти множественные столкновения усиливаются при высоких плотностях, и поэтому было обнаружено, что

предпороговое рождение каонов чувствительно к ядерной несжимаемости в районе плотности $2 \rho_0$.

Для изучения уравнения состояния при более высоких плотностях необходимы энергии пучка, значительно превышающие порог рождения K^+ -мезонов. В этом случае необходимы диагностические пробы с более высокими пороговыми энергиями, такие как Ξ^- или Ω^- -гипероны, которые образуются в нуклон-нуклонных столкновениях типа $pp \rightarrow \Xi^- K^+ K^+ p$ с пороговой энергией 3.7 ГэВ и $pp \rightarrow \Omega^- K^+ K^+ K^0 p$ с пороговой энергией 7.0 ГэВ. Однако, согласно транспортным моделям, Ω^- может быть получен в столкновениях Au+Au уже при 4А ГэВ через гиперон-гиперонные столкновения. Поэтому ожидается, что Ξ^- или Ω^- -гипероны будут чувствительными пробами плотной ядерной материи при 3–4 ρ_0 , которые могут быть достигнуты в центральных Au+Au столкновениях при энергиях пучка Нуклотрона. В качестве примера, расчеты RHQMD (проведены В. А. Киреевым) [47] были выполнены для столкновений Au+Au при кинетической энергии пучка 4А ГэВ в предположении двух различных ядерных несжимаемостей: 240 МэВ ("мягкая") и 350 МэВ ("жесткая"). Согласно этому предварительному расчету, выход многозарядных гиперонов примерно в 2 раза выше для «мягкого» уравнения состояния по сравнению с «жестким». До сих пор не существует экспериментальных данных о рождении гиперонов с высокой странностью в столкновениях тяжелых ионов в этом диапазоне энергий.

Другим важным неисследованным вопросом, касающийся свойств плотной ядерной материи в нейтронных звездах, который также связан с уравнением состояния, является так называемая «гиперонная загадка». С увеличением плотности химический потенциал нейтронов должен превышать химический потенциал гиперонов, что приводит к слабому распаду нейтронов на гипероны. Этот процесс «смягчил» бы уравнение состояния и, следовательно, предотвратил бы существование нейтронных звезд большой массы, которые, однако, наблюдались. Появление нейтронов в нейтронных звездах зависит, например, от Λ -нуклонного и Λ - Λ потенциалов, которые также играют роль в гиперядрах. Поэтому

идентификация новых Λ -гиперядер и определение времени их жизни может пролить свет на «гиперонную загадку» в нейтронных звездах. Выход гиперядер имеет максимум в диапазоне энергий между $\sqrt{s_{NN}} = 3 - 5 \text{ ГэВ}$, который находится в пределах энергий пучков Нуклотрона. Для идентификации гиперядер необходима трековая система с высоким разрешением вблизи мишени.

Таким образом, исследовательская программа $BM@N$ включает в себя:

1. Исследование перехода между адронной и партонной материей путем измерения выхода Ω^- и Ξ^- -гиперонов в столкновениях $Au+Au$ в зависимости от энергии пучка;
2. Исследование уравнения состояния симметричной ядерной материи высокой плотности путем измерения:
 - а. функции возбуждения коллективного потока идентифицированных частиц в $Au+Au$ столкновениях,
 - б. функции возбуждения Ω^- и Ξ^- -гиперонов в столкновениях $Au+Au$ и $C+C$;
3. Точное измерение выхода и времени жизни известных легких гиперядер, и поиск новых гиперядер.

2.2. Трековая система $BM@N$

Как уже было сказано, диапазон энергий от единиц до нескольких десятков ГэВ на нуклон еще не был изучен в столкновениях тяжелых ионов. Для того, чтобы исследовать эти области, создаются новые проекты в Центре по исследованию ионов и антипротонов FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research) в Дармштадте и на строящемся в рамках российского мегапроекта ионно-коллайдерном центре NICA (Nuclotron-based Ion Collider fAcility) в Дубне. Детекторы этих экспериментов предназначены для проведения координатных измерений с беспрецедентной точностью и большим количеством таких редких диагностических проб, как гипероны с большой странностью, очарованные частицы и векторные мезоны, распадающихся на лептонные пары. Большинство этих частиц будут изучены

впервые в диапазоне энергий FAIR и NICA. Для достижения необходимой точности необходимо производить измерения событий с частотой до 10 МГц. Для этого необходимы быстрые и радиационно-стойкие детекторы, оригинальная концепция чтения и анализа данных, включающая считывающую электронику с режимом потокового чтения, а также производительный вычислительный кластер для онлайн отбора событий [48].

Восстановление треков заряженных частиц, в том числе и их импульсов, является одной из центральных задач детектирования в экспериментах физики частиц. В эксперименте Compressed Baryonic Matter at FAIR (CBM@FAIR) эта задача решается Кремниевой Трековой Системой STS (Silicon Tracking System), расположенной в поле дипольного магнита. Она служит для восстановления треков и измерения импульсов всех рождаемых в мишени заряженных частиц, и состоит из 8 трековых станций [49]. Для центральных областей первых двух станций, где ожидаемая загрузка составляет 5%, были выбраны сенсоры высотой 22 мм, тогда как для периферийных областей с меньшей загрузкой можно использовать сенсоры с высотой до 62 мм, с целью уменьшения количества материала и считывающей электроники. Ширина каждого сенсора была выбрана равной 62 мм (см. Рисунок 13).

Эксперимент Baryonic Matter at Nuclotron (BM@N) [50] является первой стадией проекта NICA и служит не только для изучения барионной материи, но и для тестирования оборудования проектов CBM@FAIR и NICA. Эксперимент похож на эксперимент CBM, поэтому все сказанное выше также подходит и для его кремниевой трековой системы (КТС), за исключением меньшего количества станций — 4 вместо 8 (см. Рисунок 14) [47]. КТС в свою очередь является частью гибридного трекера, в который также входят 6 камер GEM («газовые электронные умножители») детекторов (см. Рисунок 15).

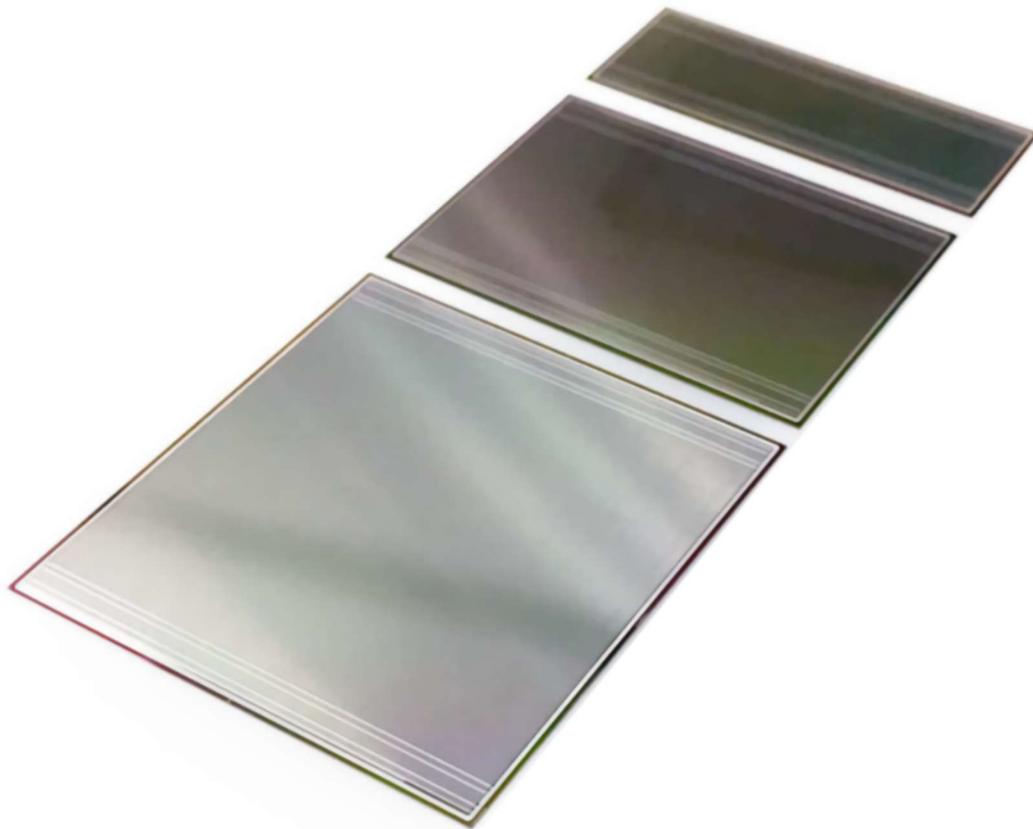


Рисунок 13. Сенсоры 22×62 , 42×62 , 62×62 мм².

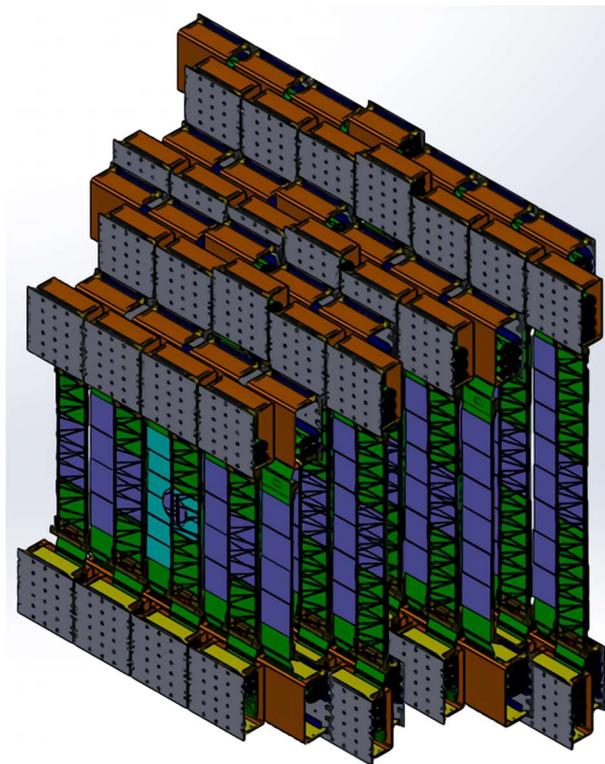


Рисунок 14. Схема КТС эксперимента ВМ@N.

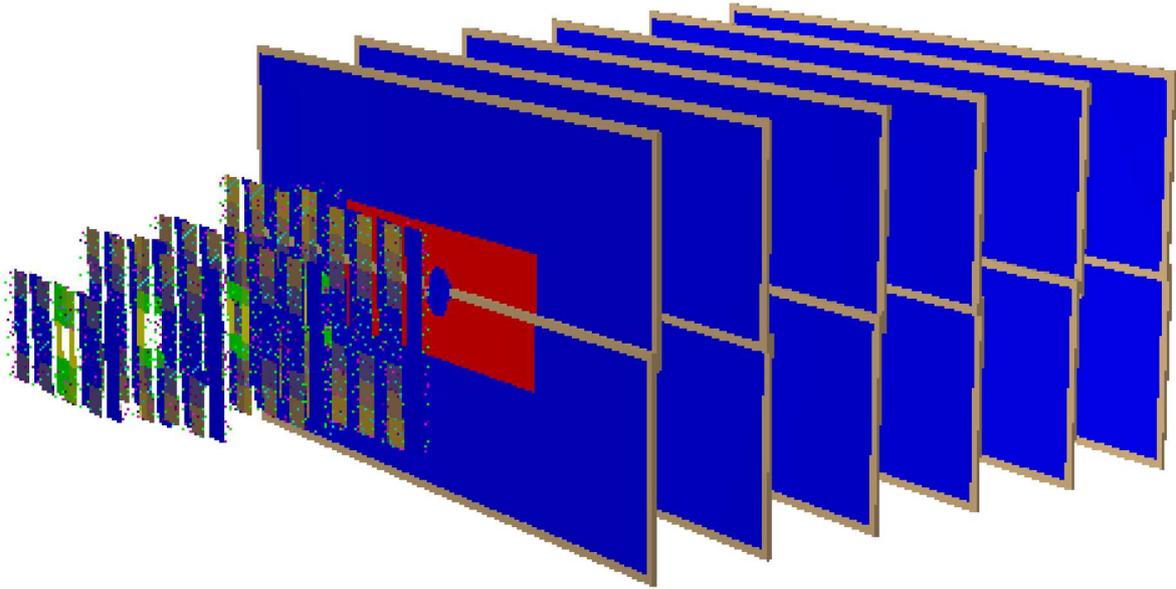


Рисунок 15. Гибридный трекер эксперимента $BM@N$. 4 станции KTC расположены на расстояниях 30, 50, 70 и 90 см после мишени, 6 станций GEM — на расстояниях от 120 до 270 см с промежутком 30 см между каждой станцией.

Поскольку в $BM@N$ ожидаются невысокие загрузки, то для внутренних областей выбраны сенсоры высотой 42 мм, и 62 мм для внешних. Сенсоры $42 \times 62 \text{ мм}^2$, примыкающие к ионопроводу, изготовлены с вырезом для того, чтобы максимально приблизить чувствительную область к ионопроводу и, кроме того, предотвратить нежелательное воздействие непроизводивавшего с мишенью пучка ионов на сенсоры, сохраняя при этом максимальное покрытие телесного угла (см. Рисунок 16).

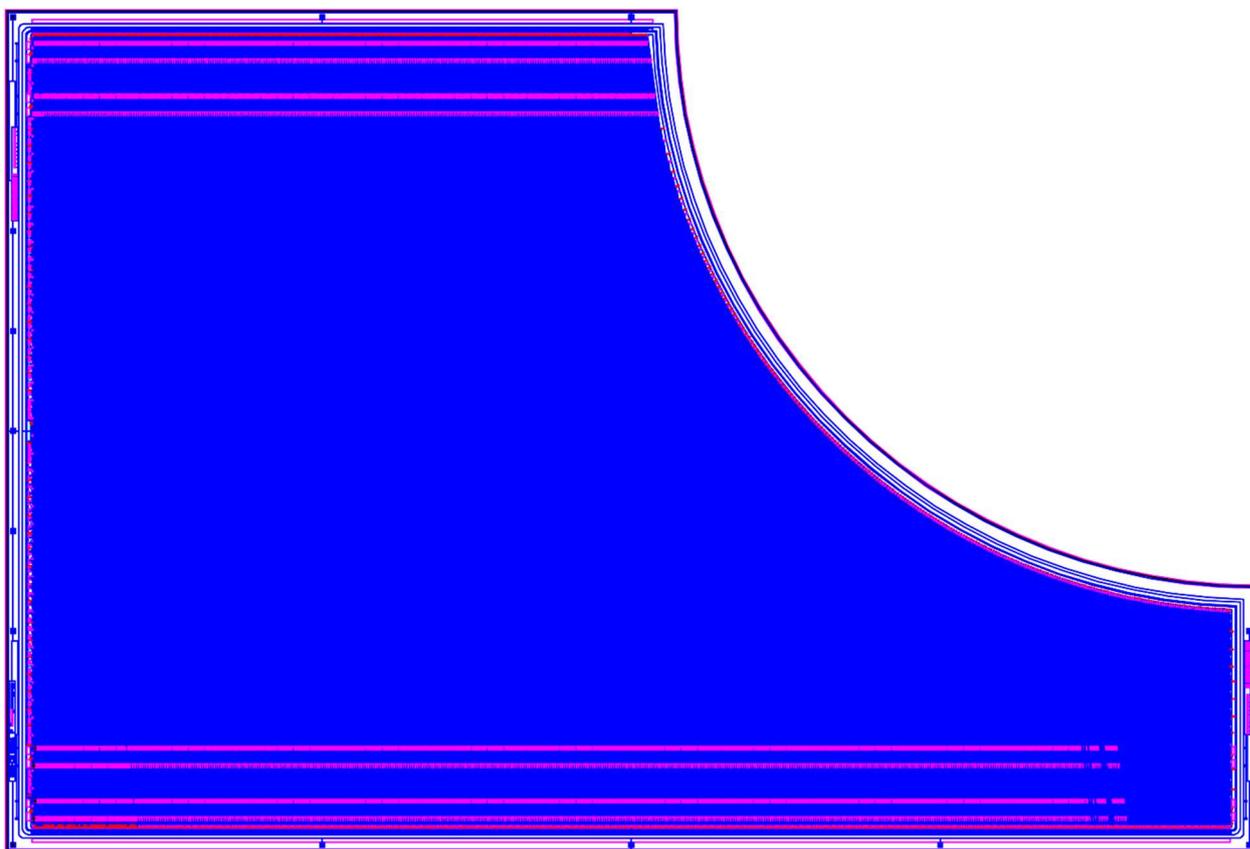


Рисунок 16. Сенсор $62 \times 42 \text{ мм}^2$ с вырезом.

Четыре станции КТС VM@N оснащены 292 двухсторонними микростриповыми сенсорами, которые предоставляют информацию о координатах, моменте времени и энергии частиц, пересекающих сенсоры. Как уже говорилось, для эксперимента VM@N используются сенсоры двух размеров — $42 \times 62 \text{ мм}^2$ и $62 \times 62 \text{ мм}^2$ — и толщиной $320 \pm 15 \text{ мкм}$. На каждый сенсор приходится 1024 стрипа на сторону, с шагом стрипов 58 мкм. Стрипы на N-стороне — прямые, а на P-стороне — повернуты на угол $7,5^\circ$ относительно стрипов на N-стороне. С точки зрения эффективного шага стрипов детекторов, эта конфигурация соответствует величинам 58 и 440,6 мкм. Шаг стрипов в 58 мкм позволяет достичь пространственного разрешения детектора порядка $58/\sqrt{12} \approx 17 \text{ мкм}$, даже без анализа амплитуд в кластере. В случае же учета амплитуд сигналов в кластере разрешение может составить единицы мкм. Двухсторонние сенсоры позволяют получить обе координаты одновременно при вдвое меньшем количестве материала в трековой системе, в сравнении с двумя односторонними. Поэтому в условиях ограниченного пространства трековой системы и невысокой энергии продуктов

взаимодействия двухсторонние сенсоры являются лучшим решением, несмотря на большую сложность в изготовлении, большую стоимость и сложность считывания разнополярных сигналов.

2048 стрипов каждого сенсора считываются одновременно с помощью 2 плат Front-End Boards (FEB), подключенных к P- и N-сторонам сенсора. Считывающая электроника подключается к стрипам сенсора с помощью алюминиевого плоского кабеля малой массы. Это позволяет разместить сложные и радиационно-чувствительные микросхемы считывающей электроники на значительном расстоянии от чувствительной области детектора, работающего в зоне высокой радиации. Каждый сенсор соединен 32 кабелями по 64 линии каждый с 16 считывающими микросхемами, считывающими каждая по 128 каналов, и которые размещены на 2 охлаждаемых FEB, каждая из которых содержит по 8 считывающих микросхем.

Эксперимент BM@N предполагает исследование столкновений Au + Au с энергиями до 4.5A ГэВ и частотой хитов до 20 кГц. Подобные измерения открывают уникальную возможность для проведения новаторских исследований фундаментальных вопросов, таких как уравнение состояния ядерной материи при высокой плотности, смешанной фазы в плотной КХД-материи и время жизни различных гиперядер. Необходимыми для этого наблюдаемыми величинами являются гипероны с высокой странностью, которые должны быть измерены в различных сценариях столкновений и при различных энергиях пучка.

Для обработки высоких плотностей и скоростей частиц требуется установка нескольких дополнительных слоев высокогранулированных кремниевых детекторов перед трековой системой, основанной на GEM. Задача подобной гибридной кремниевой-GEM трековой системы заключается в измерении траекторий заряженных частиц, возникающих при взаимодействии пучков тяжелых ионов с ядерными мишенями. Задача состоит в том, чтобы реконструировать треки более 300 заряженных частиц на одно центральное взаимодействие Au+Au с высокой эффективностью и хорошим разрешением по импульсу. Требования к

гранулярности трекового детектора и скорости считывания сигналов до 20 кГц могут быть выполнены с помощью микростриповых кремниевых детекторов.

Несколько модулей установлены на сверхлегких каркасах из углеродного волокна высоким модулем Юнга, образуя супермодуль КТС, так называемый «лэджер» (от англ. «ladder», «лестница»). Схема станций КТС показана на Рисунок 17. Сенсоры на лэждерах перекрываются на 1 мм для покрытия «мертвой» зоны на краях сенсоров.

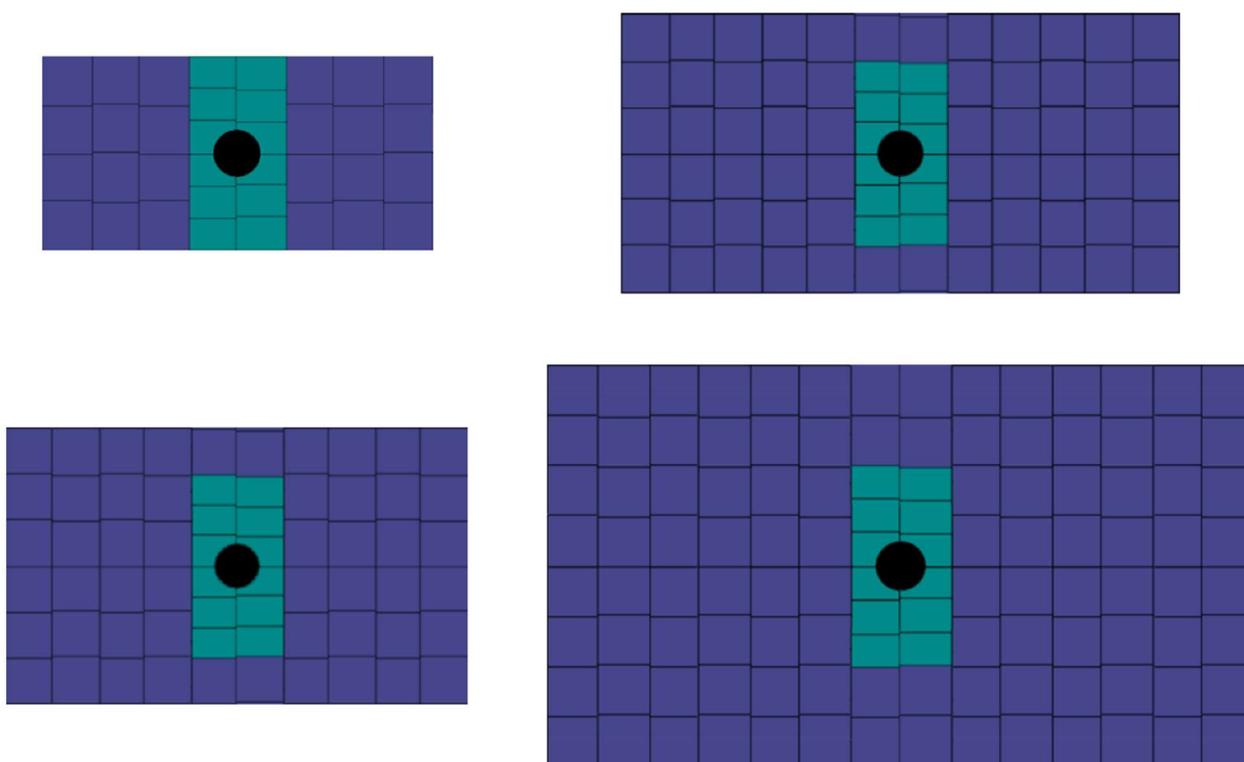


Рисунок 17. Схема станций КТС с сенсорами размером $42 \times 62 \text{ мм}^2$ (показаны зеленым цветом) и $62 \times 62 \text{ мм}^2$ (показаны синим). Активная площадь увеличивается от $24,8 \times 49,6 \text{ см}^2$ (в случае станции 1, верхней слева), $37,2 \times 62 \text{ см}^2$ (станция 2, слева внизу), $37,2 \times 74,4 \text{ см}^2$ (станция 3, справа вверху) до $49,6 \times 86,8 \text{ см}^2$ (станция 4, нижняя правая), занимая общую площадь $1,06 \text{ м}^2$.

На Рисунок 18 показана плотность хитов на см^2 и событие на 4 станции, рассчитанная для центральных столкновений Au+Au при энергии 4 А ГэВ, в предположении конфигурации КТС с относительным расстоянием между станциями 15 см. Плотность хитов составляет менее 0.02 хита/ см^2 /событие. Для центрального сенсора размером $42 \times 62 \text{ мм}^2$ это значение соответствует загрузке стрипа около $5 \cdot 10^{-4}$ на одно событие.

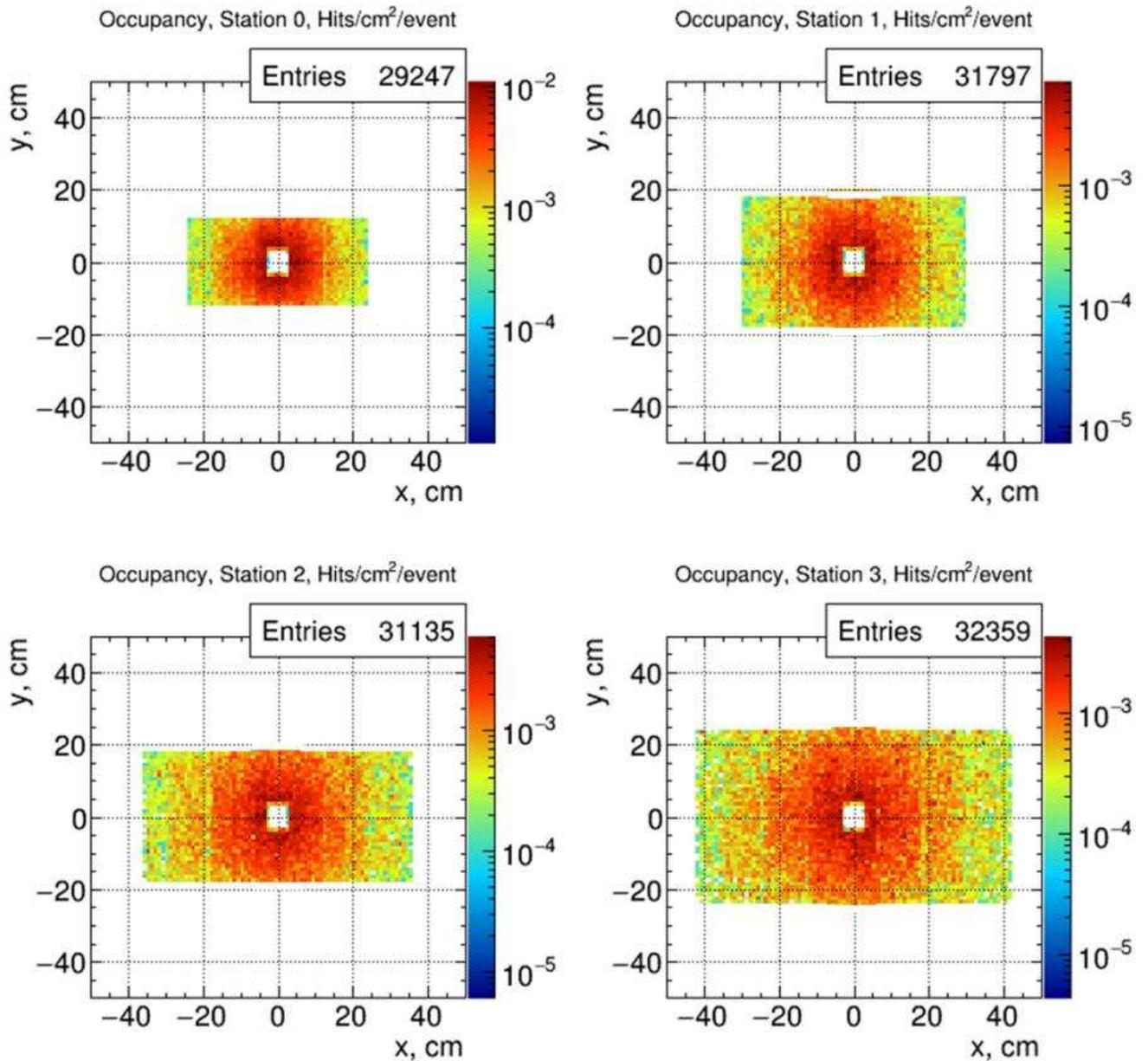


Рисунок 18. Расчет плотности хитов на см² и событие на 4 станциях с относительным расстоянием между ними 15 см [47].

Расчеты плотности треков позволили оптимизировать планировку станций, отказаться от использования сенсоров 22×62 мм² и уменьшить общее количество сенсоров до 292. Расчеты велись исходя из расположения станций на расстояниях 30, 50, 70 и 90 см от мишени. Критерием для расположения первой станции было значение плотности треков, которое не должно превышать 1,0 стрип на см². Расчеты проводились на основании моделирования центральных столкновений Au+Au при энергиях 4,5 ГэВ на нуклон в рамках внутриядерной каскадной модели (intranuclear cascade model, INC) (см. Таблица 1) [47]; расчеты проведены К. К. Гудимой.

Таблица 1. Расчеты плотности треков на основе моделирования центральных столкновений $Au+Au$ при энергиях 4,5 ГэВ на нуклон в рамках внутриядерной каскадной модели для расстояний первой станции от мишени 30, 20 и 10 см. Число треков считалось для колец шириной 2 см.

Кольцо	30 см			20 см			10 см		
	Ri / Ri+1	Число треков	Плотность треков, 1/см ²	Ri / Ri+1	Число треков	Плотность треков, 1/см ²	Ri / Ri+1	Число треков	Плотность треков, 1/см ²
0	0/2	22,0	1,75	0/2	41,4	3,29	0/2	104,0	8,28
1	2/4	40,5	1,07	2/4	62,4	1,66	2/4	93,6	2,48
2	4/6	41,4	0,66	4/6	53,0	0,84	4/6	53,9	0,86
3	6/8	36,7	0,42	6/8	40,7	0,46	6/8	31,5	0,36
4	8/10	31,1	0,28	8/10	30,7	0,27	8/10	19,5	0,17

Стоит отметить, что в случае первой станции плотность треков в области кольца №0 играет малую роль, поскольку всю эту область занимает ионопровод. Как видно из таблицы 1, под заданный критерий подходит только расстояние, равное 30 см для первой станции, которое и было выбрано.

Используя расчеты для первой станции и зная расположение последующих, можно посчитать плотности треков и для остальных станций. Предполагая, что угол полета частиц в среднем не меняется, и поэтому сохраняется число треков в каждом кольце, можно рассчитать размеры колец в других станциях. Ширина кольца меняется пропорционально расстоянию от мишени, а площадь, соответственно, пропорционально квадрату отношения радиусов границ колец. То есть:

$$r_j = r_0 \cdot \frac{l_j}{l_0}, \quad (1)$$

где r_j — это ширина кольца для станции j , r_0 — ширина кольца для станции 0 (первой станции), которая составляет 2 см, l_j — расстояние станции j от мишени, l_0 — расстояние станции 0 от мишени, которое составляет 30 см; и для площадей

$$\frac{S_{ji}}{S_{0i}} = \left(\frac{l_j}{l_0} \right)^2, \quad (2)$$

где S_{ji} — это площадь кольца i станции j , S_{0i} — площадь кольца i станции 0. Для станций 1, 2, 3 на расстояниях 50, 70, 90 см от мишени ширина колец составит 3,33, 4,67, 6,00 см соответственно, и площадь колец увеличивается в 2,78, 5,44, 9,00 раз по сравнению с кольцами с тем же порядковым номером на станции 0 (см. Таблица 2). Отметим, что часть частиц, проходящих через кольцо 0 на станции 0, уже будет детектироваться на последующих станциях в ближайших к ионопроводу сенсорах, поэтому повышенная радиационная нагрузка в них сохраняется. На Рисунок 19 изображена схема четверти станции №0.

Таблица 2. Расчетные плотности треков и радиусы колец для станций КТС.

Кольцо		Станция 0 (30 см)		Станция 1 (50 см)		Станция 2 (70 см)		Станция 3 (90 см)	
№	Ri / Ri+1	Число треков	Плотность треков, 1/см ²	Ri / Ri+1	Плотность треков, 1/см ²	Ri / Ri+1	Плотность треков, 1/см ²	Ri / Ri+1	Плотность треков, 1/см ²
0	0/2	22,0	1,75	0/3,3	0,63	0/4,7	0,32	0/6	0,20
1	2/4	40,5	1,07	3,3/6,7	0,39	4,7/9,3	0,20	6/12	0,12
2	4/6	41,4	0,66	6,7/10	0,24	9,3/14	0,12	12/18	0,07
3	6/8	36,7	0,42	10/13,3	0,15	14/18,7	0,08	18/24	0,05
4	8/10	31,1	0,28	13,3/16,7	0,10	18,7/23,4	0,05	24/30	0,03

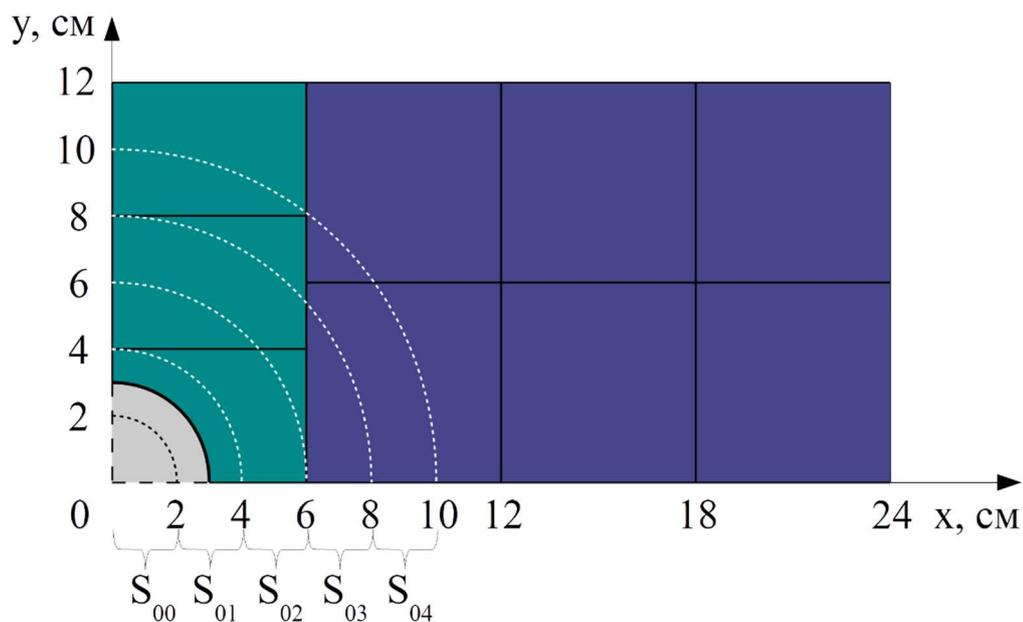


Рисунок 19. Схема четверти станции №0. Ось Oy — ось вдоль лэддеров, ось Ox — ось перпендикулярно лэддерам в плоскости станции. Пунктирными дугами окружностей обозначаются окружности-границы колец с радиусами R_i ; S_{0i} обозначаются кольца, в пределах которых рассчитываются плотности треков. Серая область в пределах четверти круга с радиусом 3 см соответствует ионопроводу.

Как видно, плотность треков на последующих станциях значительно падает из-за увеличения площади проекций колец на дальних станциях. Расчеты показали, что можно обходиться без использования сенсоров $22 \times 62 \text{ мм}^2$, но тем не менее необходимо использование сенсоров с вырезом под ионопровод для наиболее центральных сенсоров, поскольку значительная часть частиц может быть зарегистрирована именно там. Также в центральной области первых станций плотность треков все еще высока и заметно превышает периферийные области, что вызывает необходимость в использовании сенсоров $42 \times 62 \text{ мм}^2$. Поэтому для прилегающих к ионопроводу сенсоров разработаны сенсоры $42 \times 62 \text{ мм}^2$ с вырезом, и для сохранения одинаковой длины лэддеров для каждой станции в центральных лэддерах также использовалось по 4 сенсора $42 \times 62 \text{ мм}^2$ без выреза. Для всех периферийных областей из-за невысоких нагрузок используются сенсоры $62 \times 62 \text{ мм}^2$ (см. Таблица 3). Таким образом станции 0, 1, 2 и 3 состоят из 24, 52, 64 и 104 модулей с сенсорами размером $62 \times 62 \text{ мм}^2$, в центральной части каждой станции

расположены 8 модулей с сенсорами размером $42 \times 62 \text{ мм}^2$, а также 4 модуля с сенсорами размером $42 \times 62 \text{ мм}^2$ с вырезами вблизи ионопровода.

Таблица 3. Число и размер сенсоров в каждой станции КТС.

№ станции	Число сенсоров	Размер сенсоров, мм ²
0	24	62×62
	8	42×62
	4	42×62 (с вырезом)
1	52	62×62
	8	42×62
	4	42×62 (с вырезом)
2	64	62×62
	8	42×62
	4	42×62 (с вырезом)
3	104	62×62
	8	42×62
	4	42×62 (с вырезом)

2.3. Кремниевые сенсоры

Все сенсоры выполнены по планарной технологии. Для изготовления сенсоров использованы пластины кремния бестигельной зонной плавки с двухсторонней полировкой. Толщина пластин $300 \pm 15 \text{ мкм}$, удельное сопротивление от 5000 до 8000 Ом·см. На обеих сторонах пластины сформированы стрипы (микророски) с шагом 58 мкм. Кроме самих стрипов в сенсор интегрированы поликремниевые резисторы смещения и разделительные конденсаторы для каждого стрипа. Питание на каждый стрип подается от общей шины смещения через поликремниевые резисторы каждого стрипа. Сигнал со стрипов считывается через разделительные конденсаторы, обеспечивающие отсутствие напряжения питания на входах усилителей при прохождении полезного

сигнала с другой стороны.

Стрипы имеют ширину около 20 мкм и расположены с шагом 58 мкм. Длина стрипа определяется высотой сенсора, так для сенсора высотой 42 мм длина стрипа составляет 40 мм, а для сенсора высотой 62 мм – 60 мм соответственно. В принципе имеет смысл говорить об активной области сенсора, например для сенсора 62 x 62 мм² составляет 60 x 60 мм², 1 мм по периметру детектора оставлен для размещения шины смещения и системы охранных колец, обеспечивающих отсутствие поверхностных токов от активной области сенсора к его краю. На N-стороне стрипы расположены параллельно вертикальному краю сенсора. На P-стороне стрипы наклонены на 7,5°, образуя угол по отношению к стрипам N-стороны, так что при детектировании частиц могут быть определены 3 координаты точки их падения (X и Y координаты от двух сторон сенсора и Z координата определяется расположением станции). Шаг стрипов и сетка стрипов определяют пространственное разрешение в направлениях, поперечных оси пучка. В данной модульной концепции КТС сенсоры считываются только с одного края. В случае коротких угловых стрипов на P-стороне, которые не достигают стороны считывания, они соединяются с помощью второго слоя металлизации с соответствующими угловыми стрипами в противоположной стороне сенсора (см. Рисунок 20). Такая конфигурация P-стороны несколько усложняет обработку сигнала, однако позволяет сохранить фиксированное число (1024) каналов считывания на обеих сторонах сенсора.

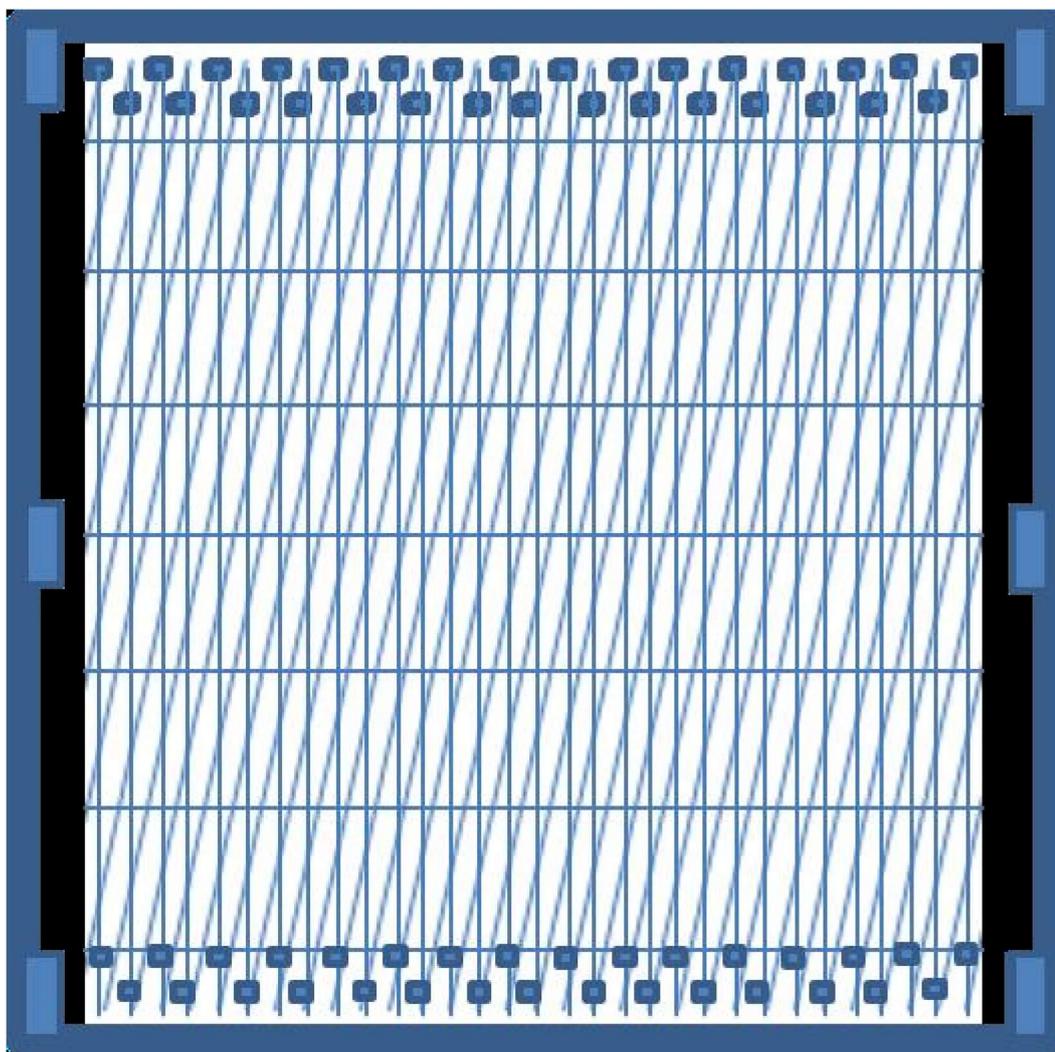


Рисунок 20. Схематичный вид двухстороннего кремниевого микрострипового сенсора. Вертикальные линии соответствуют стрипам на N-стороне, наклонные — на P-стороне. Горизонтальные линии — это второй слой металлизации, соединяющие короткие угловые стрипы со считывающими площадками на верхнем краю, куда подключаются микрокабели и электроника. На каждой стороне находится по 1024 стрипа.

Сенсоры изготовлены двумя производителями — CiS Forschungszentrum für Mikrosensorik, Германия, и Hamamatsu Photonics, Япония, их фотографии крупным планом показаны на Рисунок 21. Толщина пластин кремния составляет 285 мкм у CiS и 320 мкм у Hamamatsu. Хотя все положения контактных площадок для считывания сигнала (видимые две двойные строки) и смещения (площадки рядом с окружающими защитными кольцами) идентичны у обоих производителей, расположение внешнего охранного кольца (колец в случае CiS) и шины смещения отличаются и зависят от технологического процесса.

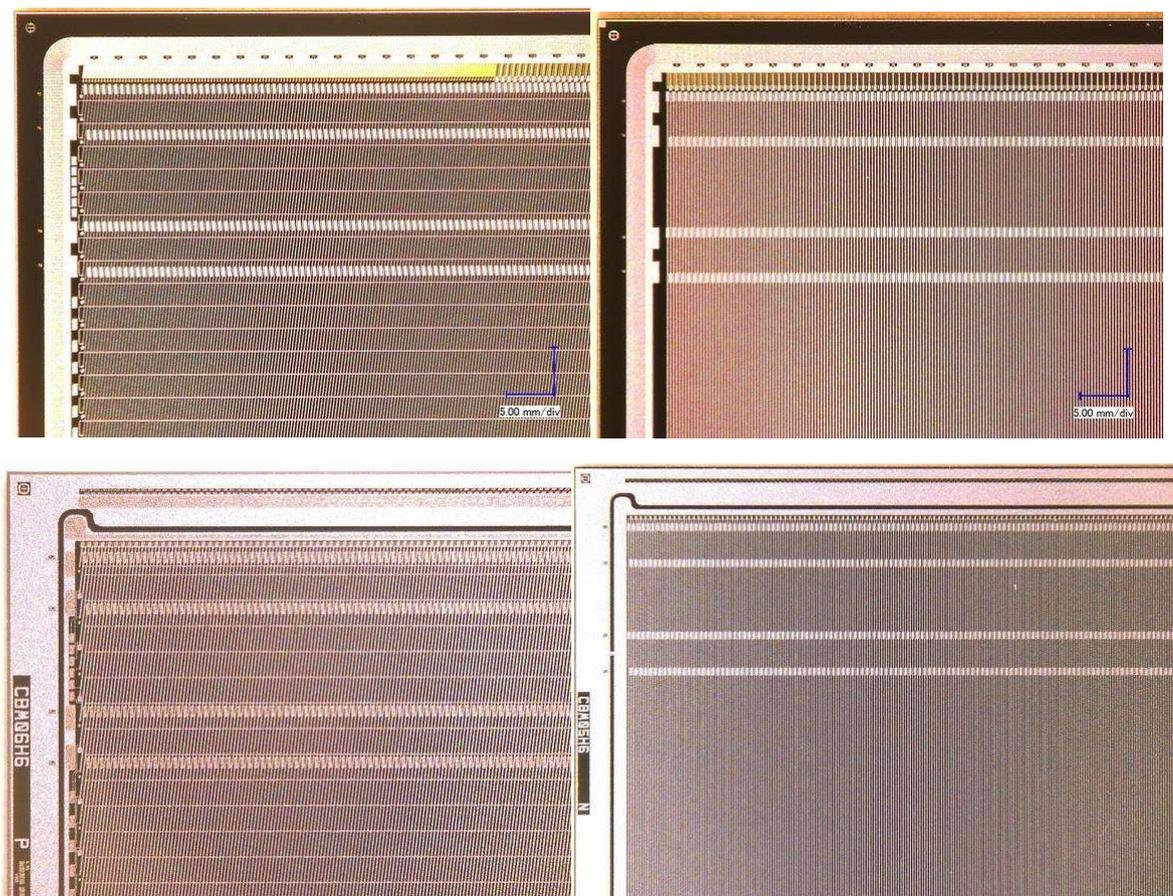


Рисунок 21. Вид P- (слева) и N-сторон (справа) прототипов сенсоров производства CiS, Германия, (сверху) и Hamamatsu, Япония (снизу).

Сенсоры проходят проверку качества поставщиком, при этом регистрируются общие параметры (вольтамперная и вольтфарадная характеристики), а также проводятся измерения каждого стрипа. Эти данные дают значение напряжения полного обеднения, токов сенсора в зависимости от приложенного напряжения смещения, а также количество дефектных стрипов (короткие замыкания на соседние стрипы, короткие замыкания разделительного конденсатора или обрывы металлизации стрипов). Однако на этапе создания прототипов сенсоров критерии приема продукции были менее строгими, чтобы можно было выявить эффекты, снижающие качество. Также не все сенсоры имеют полную информацию о всех проверках, или диапазон измерений (например, напряжение смещения) был ограничен у производителя. Во время транспортировки, распаковки и работы с сенсором также могут возникнуть дополнительные повреждения. Поэтому проверка качества перед отбором в модули имеет важное значение. Для этого использовалась зондовая установка проверки качества. Она позволяет проводить

электрический контроль общих параметров сенсора и индивидуальных параметров стрипа и описана в [51].

Также для тестирования трековых модулей создана лазерная установка, о которой написано в главе 4. Несмотря на то, что она работает в первую очередь для проверки всего трекового модуля, сенсор является частью модуля, и поэтому его дефекты тоже эффективно определяются с помощью лазерного излучения.

2.4. Электроника считывания

КТС эксперимента $BM@N$ концептуально наследует систему сбора данных STS CBM, который в настоящее время разрабатывается для FAIR. Это полностью конфигурируемая система сбора данных, основанная на самотриггирующейся электронике считывания, которая тем не менее будет связана с триггером установки $BM@N$.

По принципу работы, можно выделить два класса считывающей электроники — триггерная и самотриггирующаяся. Триггерная электроника работает по внешнему сигналу запуска — триггеру, тогда как самотриггирующаяся электроника сама генерирует сигнал запуска процедуры чтения сигнала индивидуально в каждом канале, что позволяет считывать сигналы с детекторов с меньшими потерями в случае больших загрузок или неизвестного времени взаимодействия частиц. Но при этом самотриггирующаяся электроника обладает некоторыми существенными недостатками — бóльший шум по сравнению с триггерной электроникой, высокое энергопотребление и, соответственно, тепловыделение, а также необходимость общей временной синхронизации всех каналов считывания с «часам системы». Но, в целом, такая считывающая электроника признается сегодня более универсальным решением для экспериментов физики высоких энергий в случае больших загрузок и, тем более, в случае отсутствия критерия выработки сигнала запуска. В случае эксперимента CBM, где ожидаются высокие радиационные загрузки, и к тому же сама концепция эксперимента предполагает чтение и запись всех данных, для последующей их обработки в

высокопроизводительном вычислительном кластере, поэтому была выбрана потоковая система чтения с самотриггерующейся электроникой. В случае эксперимента VM@N ожидаются небольшие загрузки, поэтому в данном случае выбор менее критичен.

Для VM@N наследование STS эксперимента CBM проявляется в первую очередь в использовании микросхемы считывания STS-XYTER. Эта микросхема позволяет считывать 128 стрипов сенсора. Входная часть каждого канала считывания микросхемы представляет собой зарядово-чувствительный усилитель, обеспечивающий сбор заряда, образовавшегося в чувствительном объеме сенсора, и преобразовании его в импульс напряжения. Далее сигнал проходит через два тракта — быстрый и медленный. Быстрый тракт оптимизирован для создания временных меток событий и использует CR-RC усилитель-формирователь (УФ) со временем формирования сигнала около 30 нс, дискриминатор и устройство формирования 14-битной временной метки в коде Грея. Медленный тракт состоит из CR-(RC)³ усилителя-формирователя, 5-битного быстрого АЦП и пикового детектора, позволяющего зафиксировать значение максимума амплитуды и оптимизировать шумовые характеристики канала. Блок-схема STS-XYTER представлена на Рисунок 22. Более детально работа STS-XYTER описана в работах [52; 53].

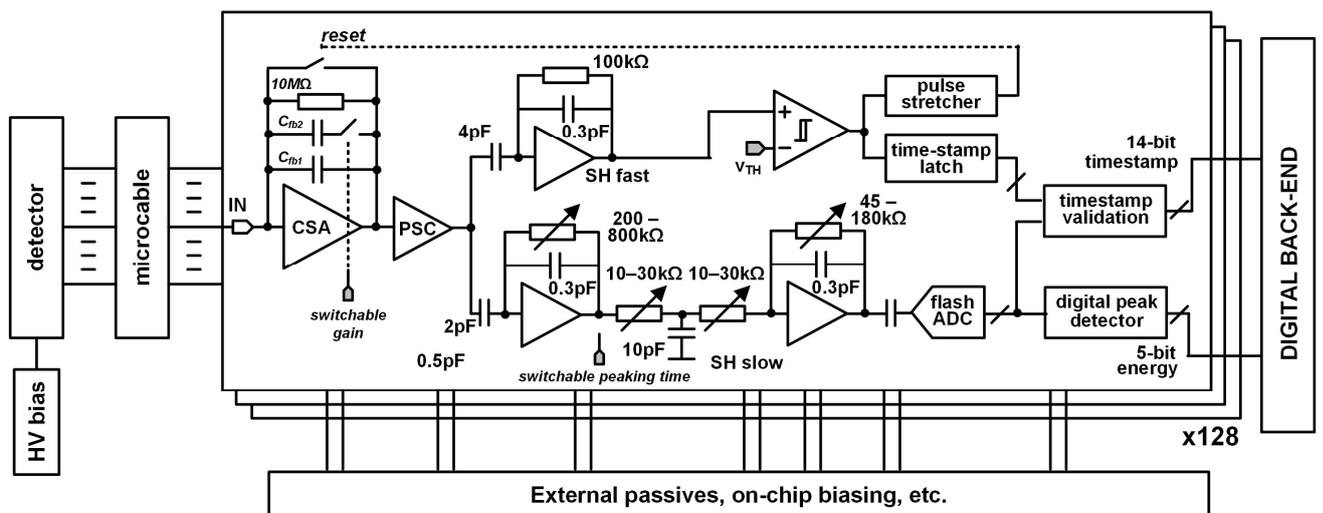


Рисунок 22. Блок-схема каналов считывания микросхемы STS-XYTER.

Каждая микросхема STS-XYTER способна передавать данные с частотой до 50 МГц. Поскольку для чтения каждой стороны сенсора необходимо 8 микросхем STS-XYTER, то в каждом модуле считывающие микросхемы смонтированы на 2 платах FEB-8 (Front-End Board) (см. Рисунок 23), по 8 микросхем STS-XYTER на каждую. Плата FEB-8 обладает возможностью передачи данных со скоростью до 10 МГц от каждой микросхемы, что дает общую скорость передачи данных для детекторного модуля до 160 МГц.

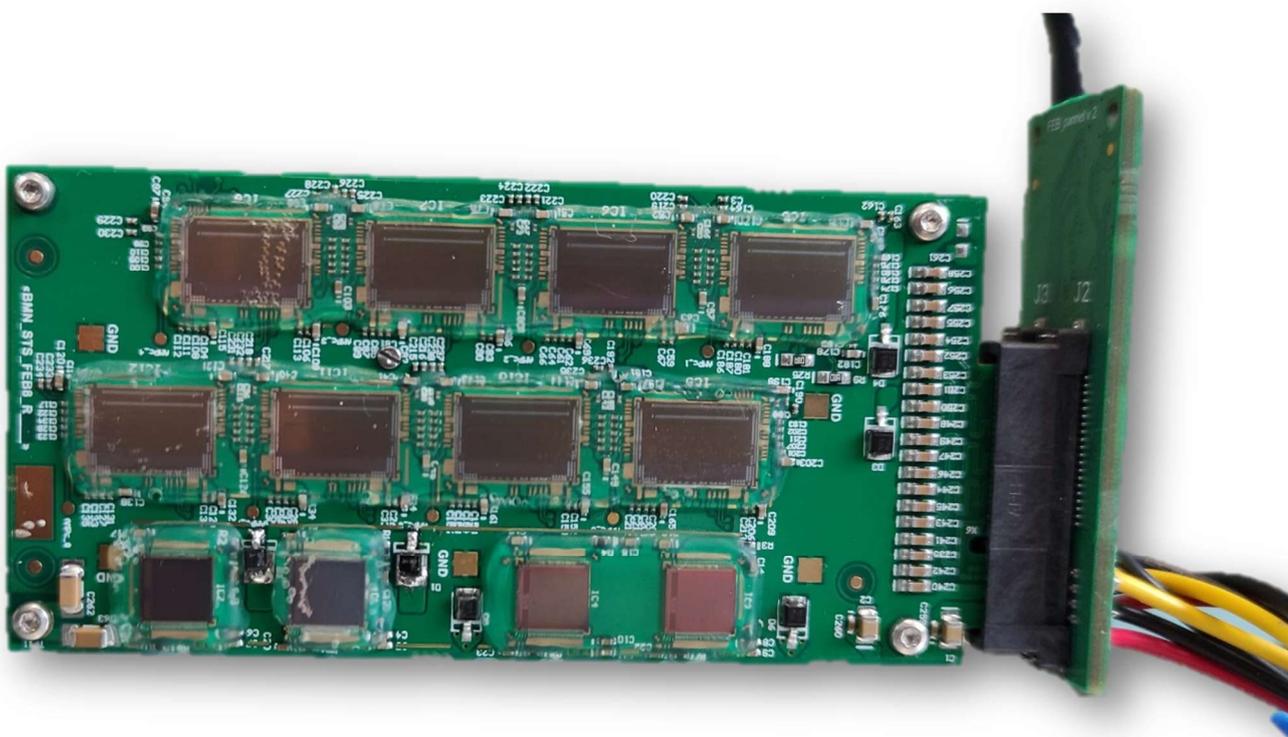


Рисунок 23. Прототип платы FEB-8. На фотографии в правой части платы виден разъем со вспомогательной платой со входами питания для двух плат FEB-8 и разъемом для подключения кабеля для передачи данных. Платы симметричны, что обеспечивает подключение вспомогательной платы с одной стороны.



Рисунок 24. Полный детекторный модуль со снятым экраном.

2.5. Система сбора данных VM@N

Микросхемы связываются со всей системой сбора данных через программируемый многоканальный интерфейс e-link, который обеспечивает от одной до пяти восходящих линий передачи данных и принимает команды через одну нисходящую линию связи типа e-link. Как восходящие, так и нисходящие линии связи определяются протоколами, описанными в [54].

В эксперименте SVM@FAIR микросхемы считывания подключаются к радиационно-стойкому модулю цифровой обработки данных GBTx, который служит для преобразования данных в последовательную форму 14 восходящих каналов данных с пропускной способностью 320 Мбит/с в один оптический канал 4,8 Гбит/с [55]. Микросхема GBTx представляет собой радиационно-устойчивую микросхему, разработанную в ЦЕРН. Учитывая ее радиационно-стойкий характер, она считается товаром двойного назначения и поэтому не может поставляться в Россию. Поэтому возникла необходимость в разработке более универсального решения для VM@N. И наиболее экономически эффективным и универсальным решением в данной ситуации является эмуляция необходимой функциональности GBTx в коммерчески доступной архитектуре ПЛИС.

GBTx выполняет функции передачи данных систем сбора данных (Data Acquisition, DAQ), медленного контроля (Slow Control, SC), управления таймингом

и триггером (Timing and Trigger Control, TTC) через один полнодуплексный физический оптический канал (Versatile Link). В принципе, GBTx служит для передачи данных с 14 каналов e-link в регистр шириной 14 бит на принимающем устройстве ПЛИС, где они могут быть обработаны. Несмотря на то, что в этой процедуре осуществляется сложное преобразование данных в последовательную форму, шифрование и защита от потери данных, канал GBTx можно рассматривать как прозрачную передачу данных со входов каналов e-link на приемный регистр шириной 14 бит, и наоборот в случае с нисходящими каналами связи. В этом отношении нет необходимости настаивать на точной реализации передачи 14 каналов e-link при эмуляции функциональности GBTx. Вместо этого можно предусмотреть произвольное отображение данных в соответствии с физической доступностью соединений и пропускной способностью передачи данных на конкретной ПЛИС и ее каналах.

По сравнению с СВМ, в КТС ВМ@N скорость взаимодействия на порядки ниже. Поэтому функциональность GBTx может быть эмулирована ПЛИС. В то время, как GBTx предназначен для передачи данных 14 каналов e-link, работающих на скорости 320 Мбит/с, чтобы заполнить всю доступную полосу пропускания оптической линии 4.375 Гбит/с, эмулятор обеспечивает 48 восходящих линий связи, работающих на скорости 80 Мбит/с. 56 каналов e-link можно было бы реализовать, но это не соответствует реальным потребностям, в то время как 48 каналов e-link могут служить для 6×8 восходящих соединений и, следовательно, для 6 плат считывания FEB-8, что соответствует считыванию данных с 3 полных детекторных модулей. Поскольку системы сбора данных других детекторов эксперимента ВМ@N работают по триггеру, будет возможность интегрировать высокоскоростные кольцевые буферы с возможностью обслуживания FIFO на уровне платы эмуляции GBTx, чтобы минимизировать поток данных от считывающей электроники КТС и связывать события на основе данных триггерного сигнала. Тем не менее, система сбора данных КТС также будет иметь возможность работать в режиме потоковой передачи, в этом случае метка времени будет использоваться для связывания событий от различных подсистем.

Для передачи считанных данных в вычислительный кластер необходим интерфейс PCIe, который принимает оптические сигналы плат эмуляторов GBTx. В дальнейшем эта функциональность будет называться GERI (General Emulator Readout Interface). В принципе, некоторая обработка также может быть реализована на этом уровне ПЛИС. Например, данные могут быть отсортированы по времени на «микросрезы». Тем не менее, синхронными и отсортированными могут считаться только те данные, которые относятся непосредственно к соответствующим платам GERI. Для синхронизации нескольких плат эмуляторов GBTx используется дополнительная плата ПЛИС. Предлагаемое аппаратное решение для этой платы ПЛИС — плата AMC FMC Carrier Kintex 7 (AFCK) [56]. К одной плате GERI подключаются 7 оптических линий данных от 7 плат эмуляторов GBTx. Восьмая оптическая линия будет использоваться для ввода данных синхронизации и «часов» системы. Схема тракта считывания КТС эксперимента BM@N показана на Рисунок 25.

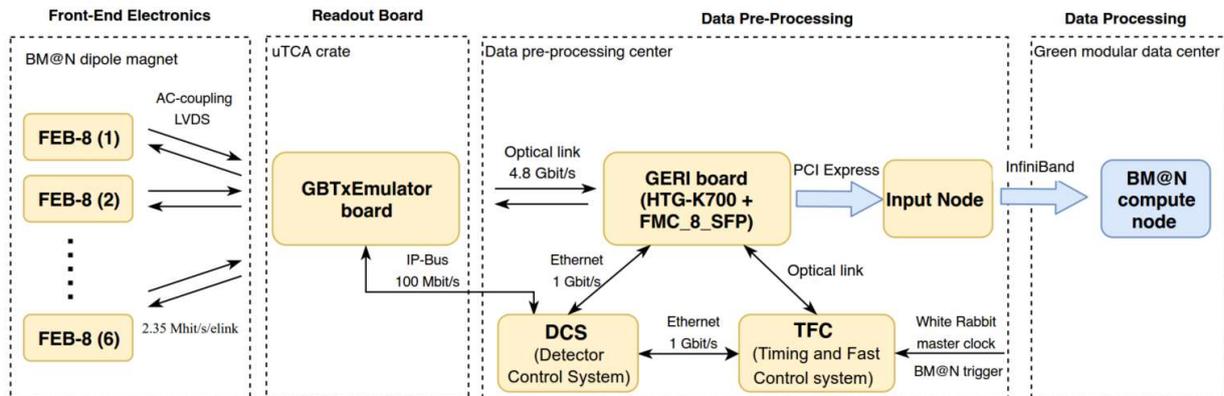


Рисунок 25. Блок-схема тракта считывания КТС эксперимента BM@N.

Тракт считывания данных КТС BM@N основан на потоковой концепции. Таким образом, объединение потокового чтения данных КТС и триггерного режима BM@N является одной из основных задач разработки. Все подсистемы эксперимента BM@N синхронизированы через систему White Rabbit, поэтому для связи событий из разных потоков можно использовать метку времени. Однако для онлайн обработки данных, полученных при потоковом чтении, необходима большая вычислительная мощность и большие объемы для хранения данных. В связи с этим в системе чтения КТС BM@N реализована возможность работы в

триггерном режиме. Дополнительные кольцевые буферы системы FIFO на уровне устройств эмуляторов GBTx используются для хранения данных в течение времени ожидания прихода триггера $BM@N$. Распределение триггера $BM@N$ в системе чтения КТС будет выполнено на базе системы Timing and Fast Control (TFC), которая служит для обработки сигнала триггера $BM@N$.

2.6. Выводы

Кремниевая трековая система эксперимента $BM@N$ инновационна для физики столкновения тяжелых ионов и обладает рядом особенностей, из которых в первую очередь можно выделить следующие.

Во-первых, она основана на двухсторонних кремниевых микростриповых сенсорах, которые до этого времени применялись редко, и которые позволяют получать одновременно две координаты при том же используемом объеме кремния, что особенно важно при невысоких энергиях продуктов взаимодействия и в условиях недостатка пространства в чувствительном объеме детектора.

Во-вторых, самотриггирующаяся считывающая электроника, основанная на микросхемах STS-XYTER, обладает высокой степенью параллелизма и независимости от внешних систем. Это позволяет считывать максимальное количество информации с сенсоров в условиях высоких радиационных нагрузок и невозможности качественного выбора внешнего критерия выработки сигнала запуска. В дополнение к этому, данная считывающая электроника имеет возможность также работать в триггерном режиме, что позволяет ее применять гибко в более широком спектре задач.

В-третьих, в КТС используется потоковая система сбора данных с последующей обработкой данных «на лету» в режиме онлайн, основанная на вышеуказанной самотриггирующейся считывающей электронике, которая обеспечивает сбор и обработку максимального количества данных от сенсоров, а также управляет электроникой и синхронизируется с остальными детекторными системами, что необходимо, поскольку остальные системы в $BM@N$ не являются

потокowymi и работают по триггеру. Как видно из предыдущей главы, нельзя сказать, что вышеуказанное оборудование является абсолютно новым и построенным на неизвестным до этого принципам, но при этом также видно, что оно применялось весьма ограниченно и не одновременно в одной системе.

Поскольку КТС основана на уникальном оборудовании, которое до этого времени применялось ограниченно и в других условиях, необходимо тщательное и как можно более всестороннее тестирование детекторных модулей и тракта чтения КТС. Несмотря на то, что и сенсоры, и считывающая электроника, и оборудование системы сбора данных можно протестировать на специальном оборудовании или с помощью внутренних калибровочных цепей, отдельное их тестирование не является всесторонним.

Глава 3. Пучковые испытания прототипа системы сбора данных

Как уже было сказано ранее, испытания на пучке частиц из ускорителя являются наиболее корректным методом тестирования, поскольку условия тестирования наиболее близки к реальному эксперименту. И, хотя все компоненты трековых модулей и системы сбора данных возможно протестировать по отдельности, это не гарантирует правильную работу всех компонентов вместе в реальных режимах работы. В то же время детектирование пучков частиц позволяет проверить как сами модули, так и системы сбора и обработки данных в условиях, максимально близким к эксперименту.

Тем не менее, этот метод — дорогостоящий, времязатратный и трудоемкий. Ускорители — уникальное оборудование, и по своим параметрам для целей тестирования трековых детекторов подходит не каждый ускоритель. Исследовательские ускорители, как правило, загружены работой и не имеют свободного доступа в любое время. К тому же, для тестирования трековых детекторов необходимы точная настройка мощности, коллимации и фокусировки пучка и запуск ускорителя — это все требует постоянной работы высококвалифицированного персонала, и, вероятно, долгой работы. Тем не менее, тестирование на ускорителе позволяет не только проверять саму работу всего тракта чтения детекторов от сенсоров до конечных данных для обработки, но также работу в условиях повышенного радиационного и электромагнитного фона.

Для целей тестирования, в первую очередь, прототипов системы сбора данных и системы временной синхронизации для КТС эксперимента $BM@N$ проводились испытания [57; 58] на экспериментальной установке на электронном ускорителе ЛИНАК-200 [59].

В состав линейного ускорителя могут быть включены от 2 до 12 ускорительных станций, состоящих из двух ускоряющих секций на бегущей волне 2856 МГц, длиной 7.3 м и средним темпом ускорения 5 МэВ/м, запитанных от одного клистрона с одним модулятором (см. Рисунок 26).



Рисунок 26. Ускорительная секция электронного ускорителя ЛИНАК-200.

3.1. Прототип тракта чтения кремниевой трековой системы

Блок-схема тракта считывания прототипа КТС показана на Рисунок 27 [60]. В качестве электроники съема сигнала с детекторов используется конфигурируемая самотриггирующаяся специализированная микросхема STS-XYTER, установленная на интерфейсных платах Front-End Boards (FEB). Следующей частью тракта являются Платы Считывания (ReadOut Boards, ROB), которые принимают данные с нескольких FEB по дифференциальным линиям, а затем концентрируют их в высокоскоростной оптический канал. ROB для эксперимента CBM@FAIR будет основан на чипсете GBTx, разработанном в CERN [55; 61]. GBTx является радиационнстойкой микросхемой и позиционируется как микросхема двойного назначения, поэтому запрещена к экспорту в Россию. В качестве замены GBTx в эксперименте BM@N используется эмулятор, построенный на ПЛИС. Эта часть системы состоит из Плат Обработки Данных (Data Processing Boards, DPB) на базе платформы AMC FMC Carrier Kintex (AFCK) [56]. Основное назначение DPB — считывание данных, последующая сортировка, мультиплексирование прочитанных данных и упаковка в автономные контейнеры, называемые

«микросрезами» (Micro-Slices, μS). Медленный контроль и конфигурация детекторной электроники осуществляется через DPB по протоколу IPBus, который основан на стандарте Ethernet. Затем данные в виде микросрезов передаются по оптическому каналу связи на конечную аппаратную часть тракта считывания — PCIe платы на базе ПЛИС, расположенных в серверных компьютерах. Они используются в качестве входа для Селектора Событий Первого Уровня (First Level Event Selector, FLES). Эта плата называется FLES Input Board (FLIB). FLES — это вычислительная система, используемая для объединения и онлайн обработки полученных данных с целью обнаружения, реконструкции и выделения событий [62].

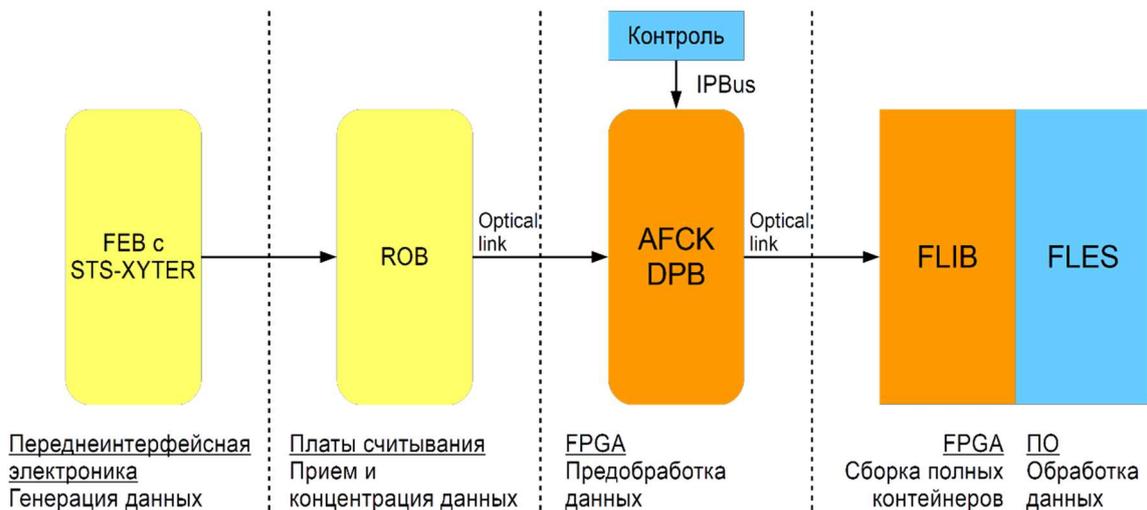


Рисунок 27. Блок-схема прототипа системы чтения KTC эксперимента CBM@FAIR.

По оптическим каналам между DPB и FLIB передаются данные от детекторов в виде микросрезов. Микросрез содержит все данные для одного DPB за определенный промежуток времени. Поэтому контейнер-микросрез имеет фиксированную временную длину, но может варьироваться по размеру данных. Базовое значение времени используется при генерации микросреза и синхронизировано во всем эксперименте. На Рисунок 28 верхняя диаграмма иллюстрирует стандартное содержимое микросреза. Заголовок также содержит индекс микросреза, который представляет собой счетчик, работающий параллельно во всех DPB. Этот счетчик, наряду с синхронизированным по установке базовым

значением времени, позволяет впоследствии сопоставить соответствующие триггеру микросрезы триггера и построить полные контейнеры данных, называемые «временными срезами» (Time-Slices, tS).

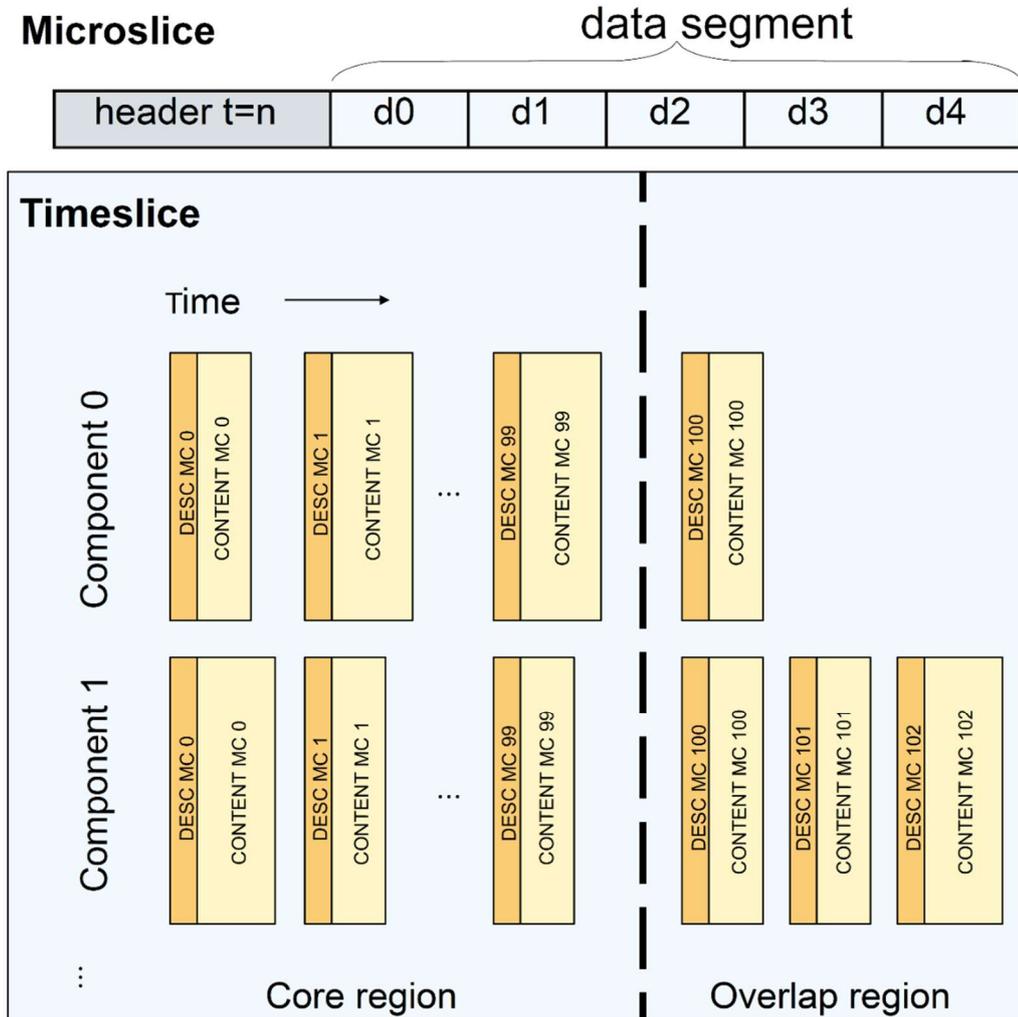


Рисунок 28. Содержание микросрезов (вверху) и временных срезов (внизу) [62].

На Рисунок 28 нижняя диаграмма представляет собой типичное содержание временных срезов. Временные срезы — это двумерные коллекции микросрезов. Первое измерение — это время, представленное инкрементальным индексом микросреза. Второе измерение — это компоненты, которые создают микросрезы, в большинстве случаев это DPB. Временной срез содержит основные микросрезы, в которых происходит поиск событий, и некоторые перекрывающиеся микросрезы. Область перекрытия позволяет независимо обрабатывать временной срез: данные, принадлежащие событиям, находящимся вблизи границы основной части

временного среза, могут быть найдены без обращения к предыдущему или следующему временному срезу.

Следует отметить, что в настоящее время на смену вышеописанной концепции предложено использование Общего Интерфейса Считывания (Common Readout Interface, CRI), который позволяет объединить функциональность как DPB, так и FLIB в одной плате на базе более современной и мощной ПЛИС [63]. Тем самым будет достигнуто уменьшение звеньев цепочки чтения и количества оптических линий, а также увеличение надежности и скорости системы контроля сбора данных в рамках предложенной ранее концепции.

3.2. Пучковые испытания прототипов систем сбора данных и временной синхронизации

Основными целями проведенных пучковых испытаний являлись тестирование считывающей электроники, систем сбора данных (DAQ) и временной синхронизации между станциями, а также сбор данных в потоковом режиме работы считывающей электроники. Как уже было написано ранее, испытания проводились на электронном ускорителе ЛИНАК-200. С хорошей точностью можно предположить, что потери энергии при прохождении электронов через кремниевый сенсор будут близки к потерям энергии от минимально ионизирующей частицы (minimum ionizing particle, MIP), что соответствует большинству детектируемых частиц в эксперименте BM@N. Тем не менее, поскольку релятивистские электроны теряют энергию в веществе преимущественно за счет тормозного излучения, которое тоже детектируется кремниевыми сенсорами, метод тестирования на пучке электронов является неидеальным для проверки трековых детекторов и систем сбора данных. Но из-за доступности ускорителей электронов было решено проводить испытания на пучке электронов.

Экспериментальная установка состояла из двух детекторных станций на основе демонстраторов с сенсорами размером $14,9 \times 14,9$ мм² с 256 стрипами на каждую сторону с углом 90° между стрипами на разных сторонах. К каждому

прототипу через цифровые разъемы с увеличенным шагом выводов подключены 4 платы детекторной электроники FEB_V (прототипа FEB-8, к которой подключается одна микросхема STS-XYTER, см. Рисунок 29) с микросхемами STS-XYTER v.2.0 (см. Рисунок 30 и Рисунок 31). Станции располагались по оси пучка ускорителя на расстояниях 30 см и 65 см от конца ионопровода.

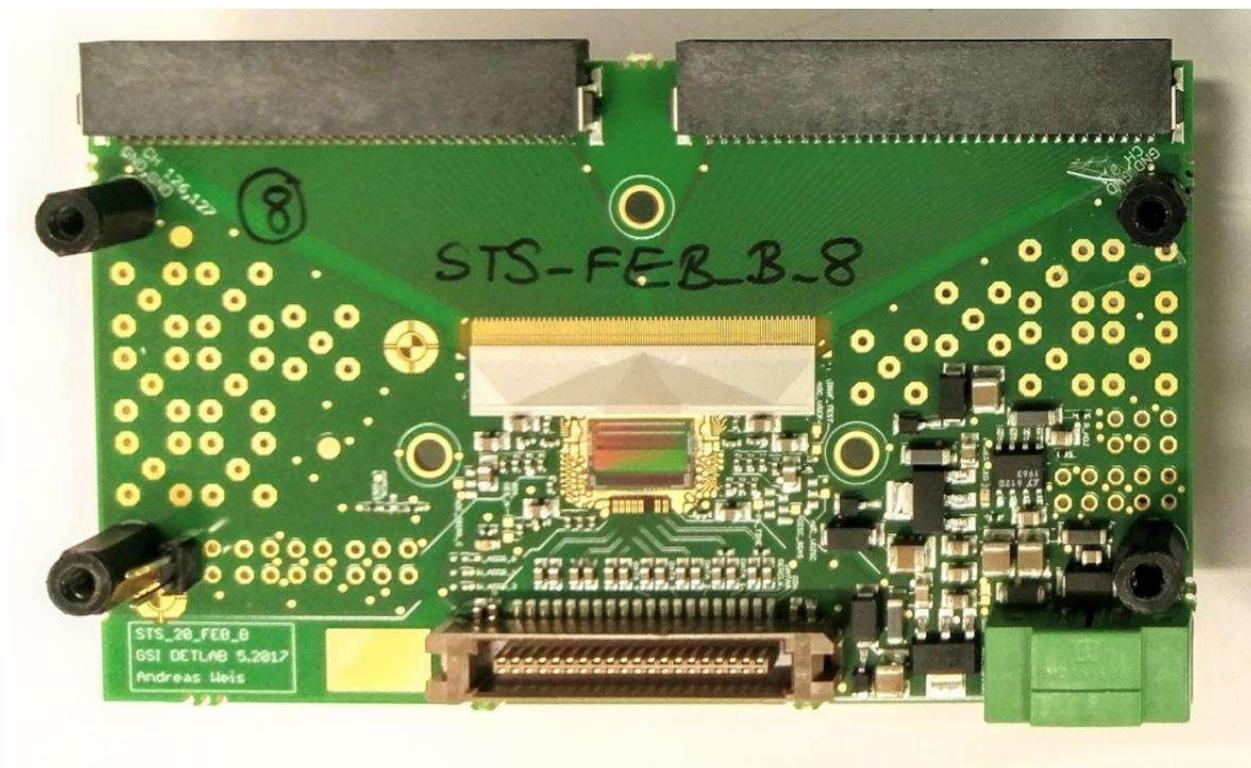


Рисунок 29. Плата считывающей электроники FEB_V с одной микросхемой STS-XYTER.

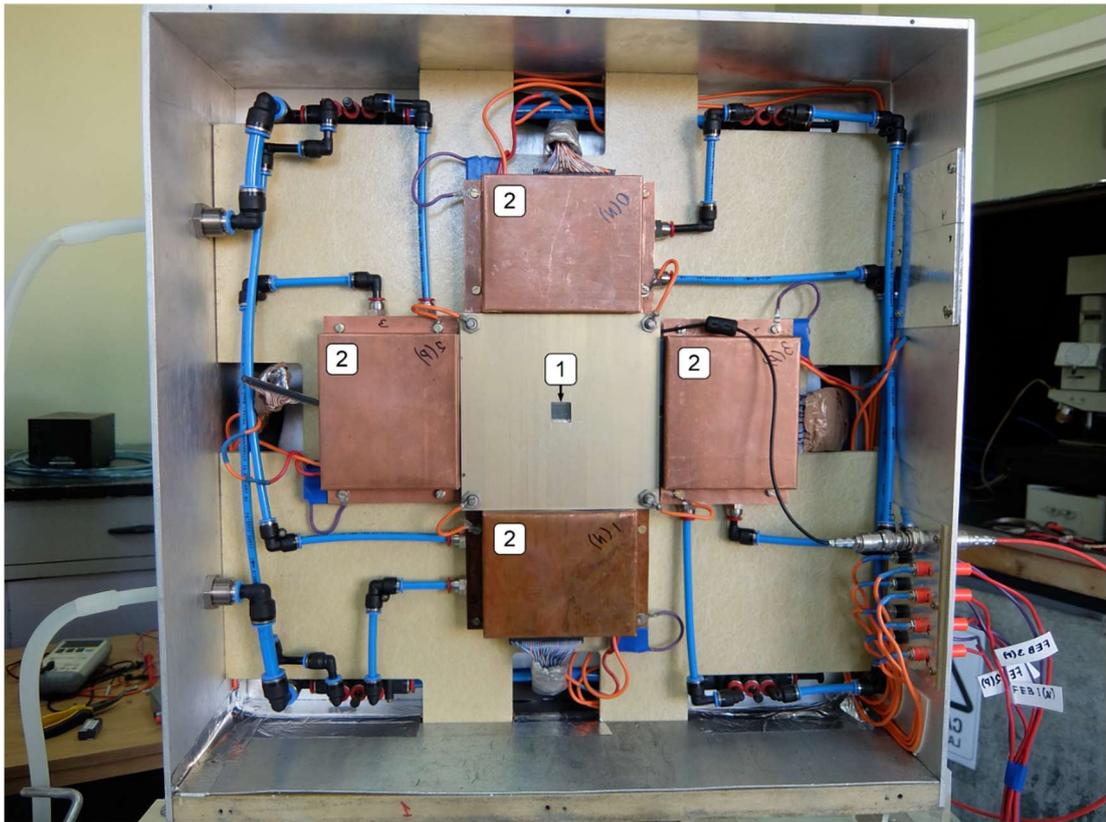


Рисунок 30. Тестовая станция с сенсором (1) и 4 платами FEB со считывающей электроникой под медными экранами (2).

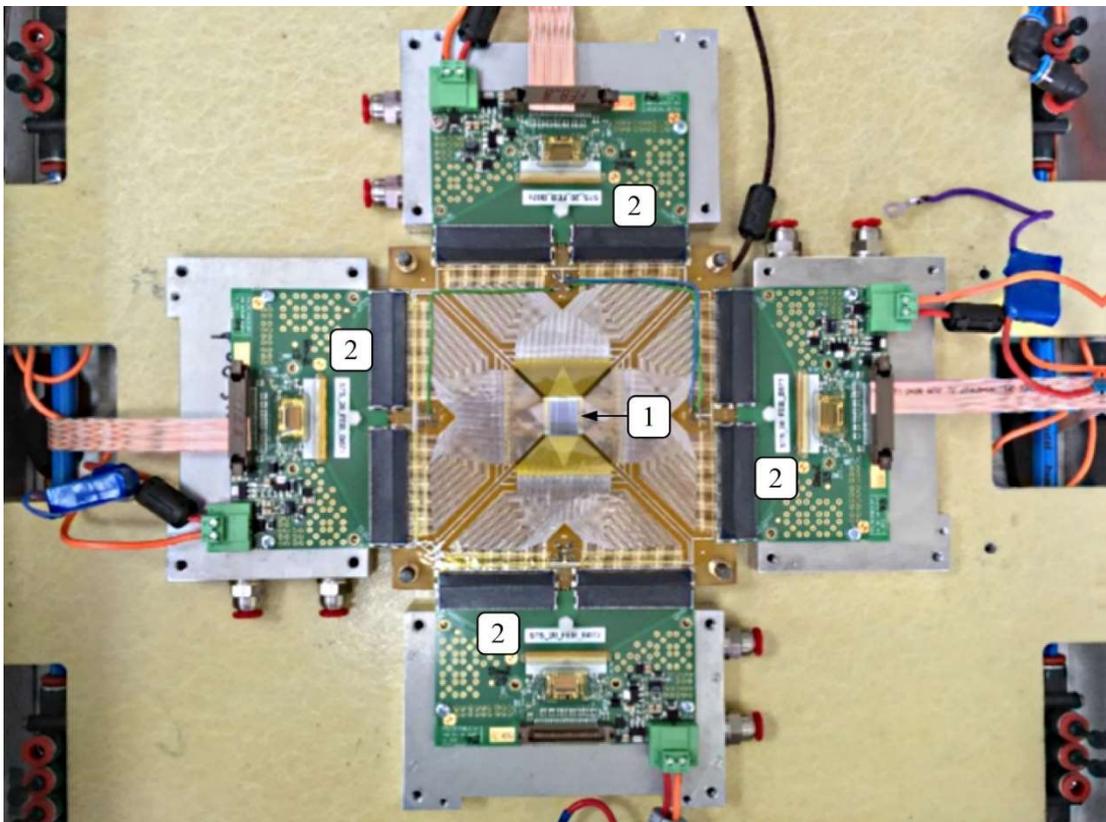


Рисунок 31. Тестовая станция с сенсором размером $14,9 \times 14,9 \text{ мм}^2$ (1) и 4 платами FEB со считывающей электроникой (2) со снятыми экранами.

Система сбора данных в пучковых испытаниях похожа на описанную выше. Однако из-за того, что ROV находилась на этапе разработки и рассчитана на полноразмерные модули, ее функционал был реализован и протестирован на базе DPB. Это являлось возможным по причине использования прототипов с меньшим количеством каналов на сенсорах, но схожих по параметрам с реальными детекторами. Так в прототипе не использовалась программная часть FLES, также находящаяся в стадии разработки.

Для обработки данных использовались две платы AFCK (AMC FMC Carrier Kintex, где AMC – это Advanced Mezzanine Card, и FMC – это FPGA Mezzanine Card) с мезонинной gDPB (Data Processing Board) FMC. Одна AFCK позволяет подключить до 6 плат FEB по дифференциальным линиям стандарта LVDS с развязкой по постоянному току. Дополнительная плата AFCK с двумя мезонинными платами FMC tDPB использовалась в качестве мастер-платы синхронизации для синхронизации временной отметки на платах DPB [64]. Мастер-плата генерирует тактовый сигнал с частотой 40 МГц и сигнал PPS (Pulse Per Second), передаваемые по Ethernet кабелям CAT6. При помощи специального алгоритма временная система обеспечивает синхронизацию плат DPB и детекторной электроники детектора с наносекундной точностью. При этом компенсируются все задержки линий и обеспечивается стабильность синхронизации во времени.

Сбор данных осуществлялся на серверном узле через плату FLIB, данные с которой архивируются в памяти компьютера и обрабатываются на онлайн мониторе по шине PCIe с применением технологии прямого доступа к памяти (DMA).

Для привязки ко времени использовался стартовый импульс от ускорителя, который запускает внешний генератор импульсов, подающий трапецеидальный импульс на две дополнительных FEB. Эти платы подключались к двум различным AFCK, что позволяет нам также контролировать синхронизацию по времени. Блок-схема системы сбора данных тестовой установки показана на Рисунке 32.

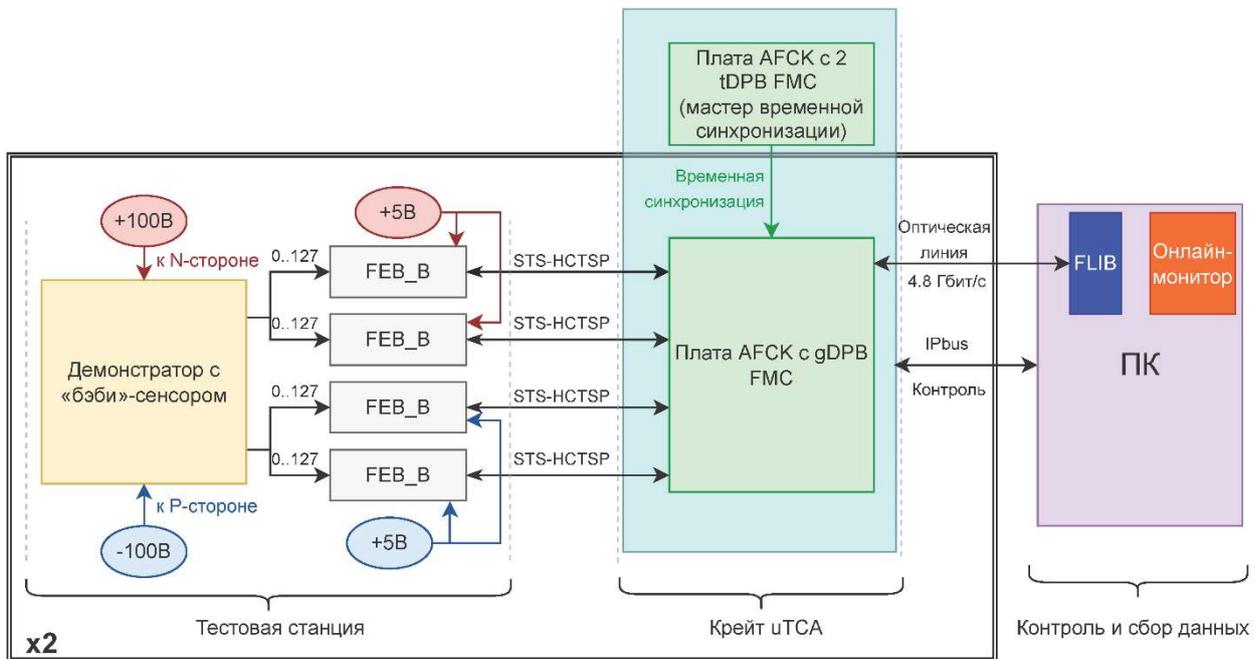


Рисунок 32. Блок-схема системы сбора данных тестовой установки.

Испытания проводились при энергиях электронов 50 и 150 МэВ. Внешний вид и схема установки показаны на Рисунок 33 и Рисунок 34 соответственно. Измеренный профиль пучка показан на Рисунок 35, на котором цветовым градиентом в логарифмической шкале показано количество событий в зависимости от номера канала по N- и P-стороне. Событием считается одновременный (в пределах заданного временного интервала <20 нс), и близкий по координате, в нашем случае < 50 мкм, сигнал на стрипах на двух сторонах. Высокоэнергетичные электроны теряют энергию в веществе преимущественно за счет тормозного излучения. Это объясняет, почему амплитуды сигналов достаточно высоки по сравнению с типичными сигналами МIP. Также это позволяет использовать более высокие пороги сигналов в электронике, чтобы минимизировать вклад шумов. Примеры сигналов от электронов с энергиями 150 и 50 МэВ показаны на Рисунок 36.

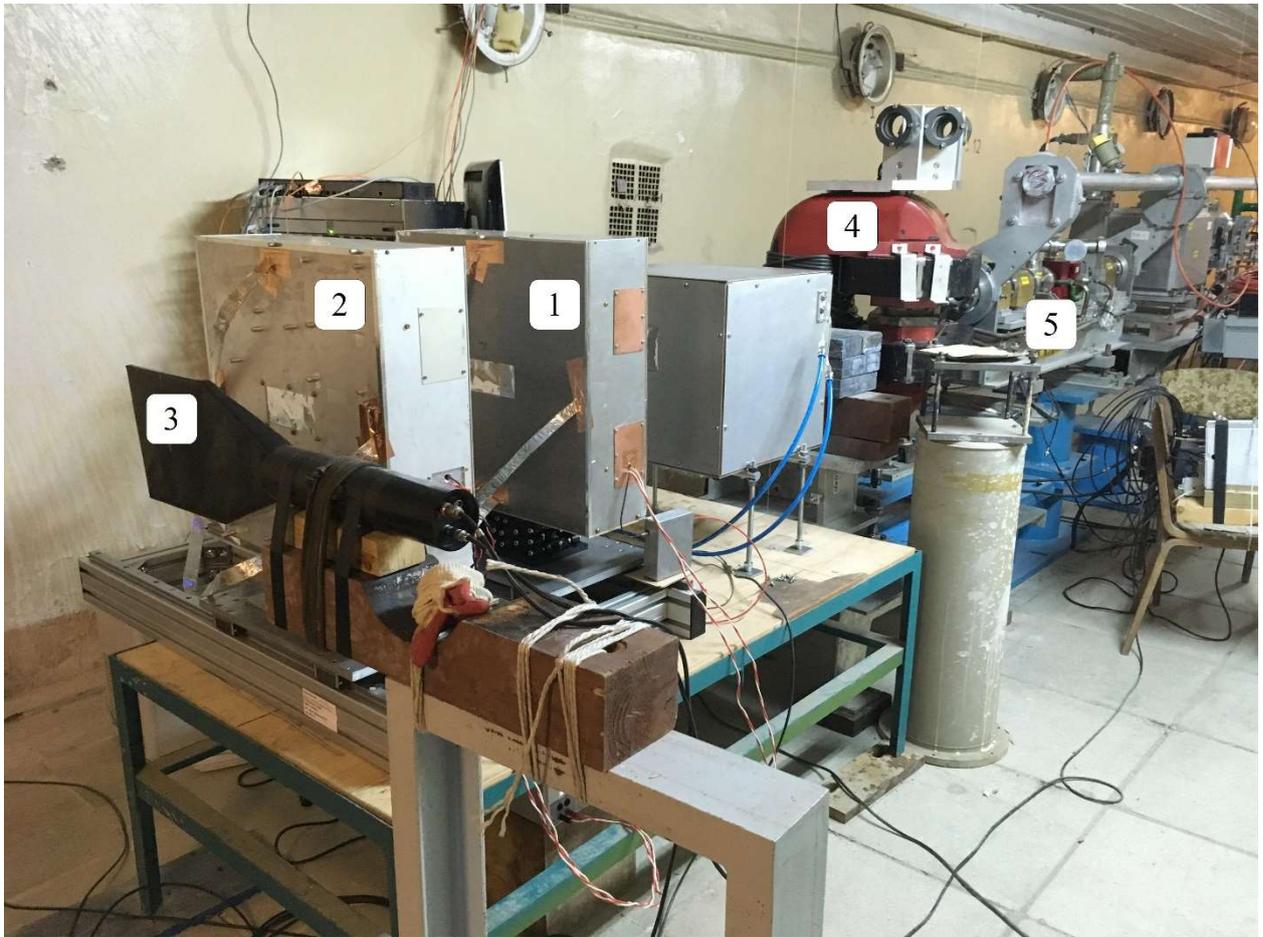


Рисунок 33. Внешний вид установки. Она состоит из станций №1 (1) и №2 (2). Также видно сцинтиллятор, используемый в качестве монитора пучка (3), дипольный магнит (4) на выходе из ионопровода ускорителя, и магнитная фокусирующую систему ускорителя (5).

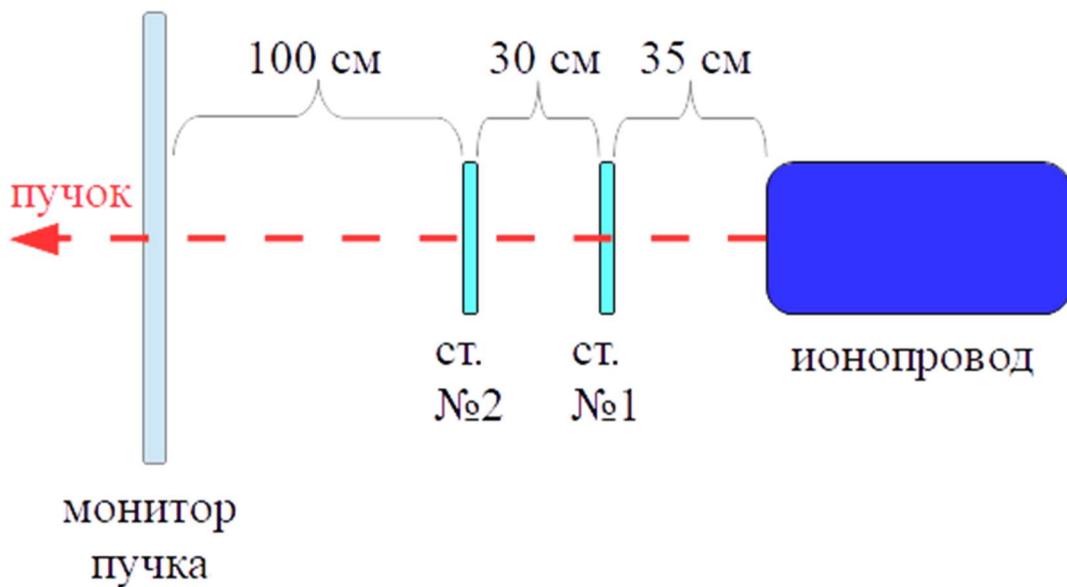


Рисунок 34. Схема экспериментальной установки.

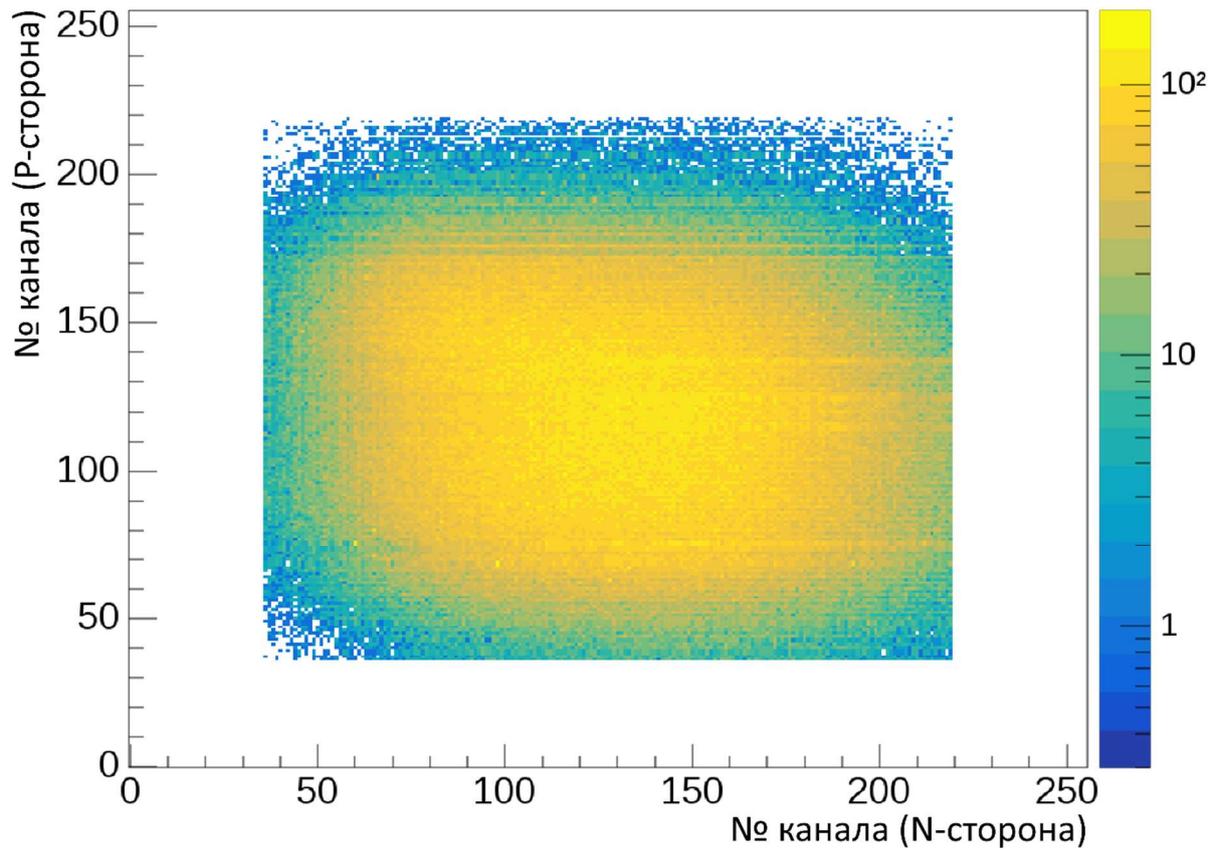


Рисунок 35. Профиль пучка на станции 1. Цветовая логарифмическая шкала отражает количество событий.

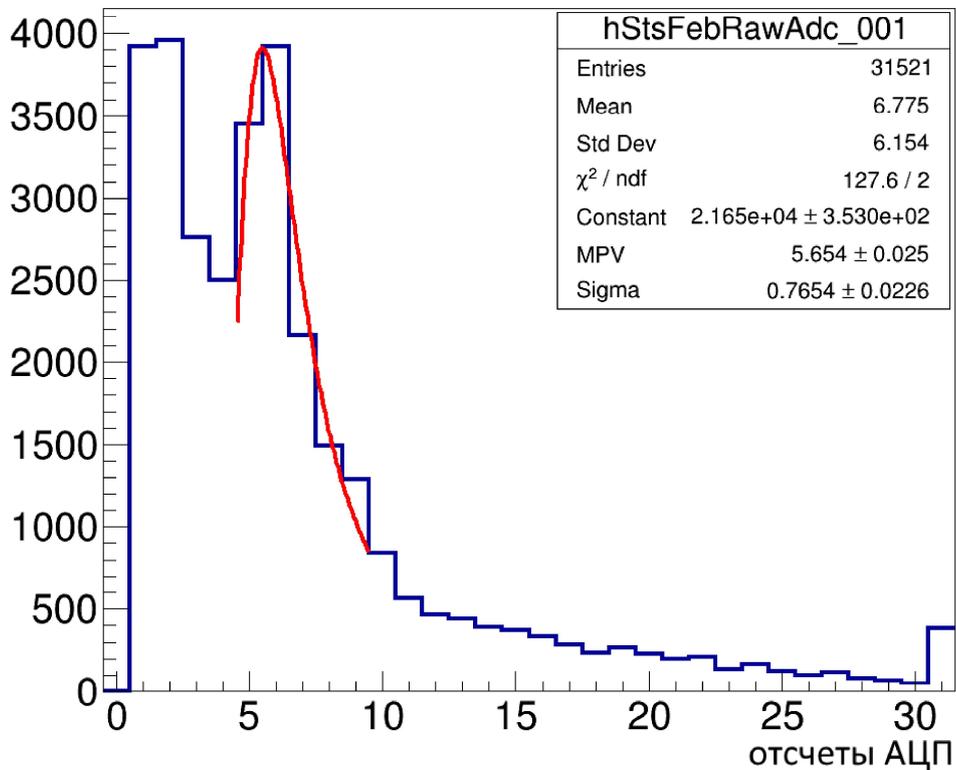
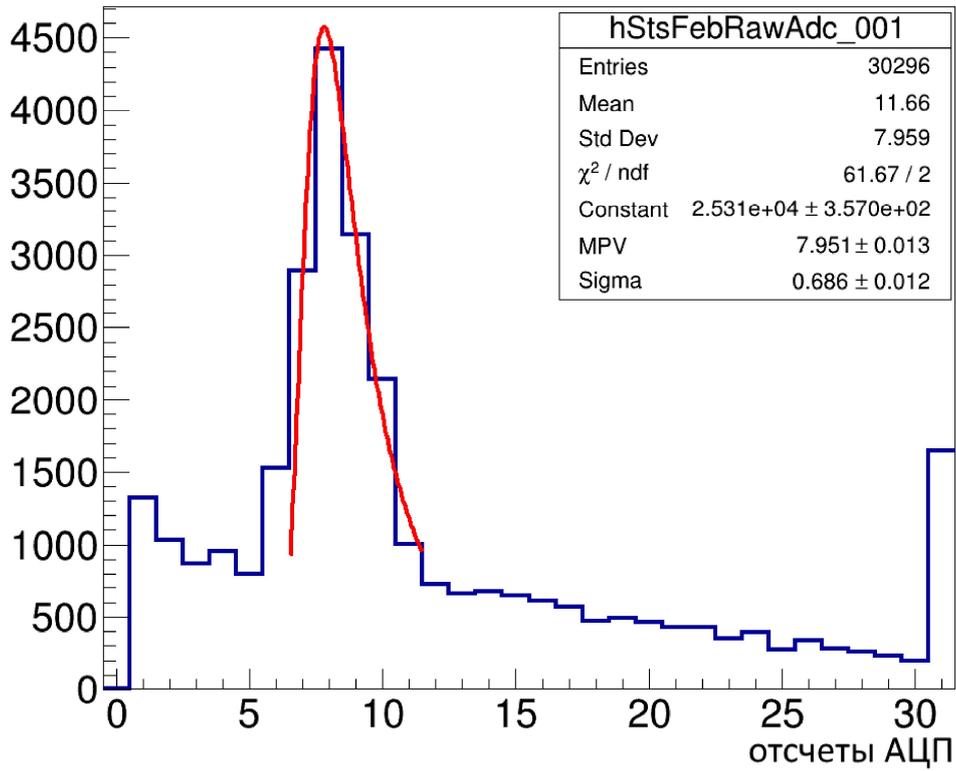


Рисунок 36. Амплитуды сигналов от электронов с наиболее вероятной энергией 150 МэВ (сверху) и 50 МэВ (снизу). Собранный заряд составил $11,5 \pm 0,1$ фКл для 150 МэВ электронов и $6,10 \pm 0,06$ фКл для 50 МэВ электронов.

Для релятивистских электронов энергетические потери складываются, в основном, из двух компонент — ионизационные потери и потери на тормозное излучение (радиационные). Именно поэтому сигнал от электрона не будет полностью соответствовать МIP. У каждого материала есть свое значение так называемой критической энергии, при которой потери электронов на ионизацию и тормозное излучение равны. Для кремния критическая энергия составляет $\varepsilon = 40 \text{ МэВ}$ [65; 66].

В ультрарелятивистском случае отношение удельных потерь электронов в веществе на ионизацию и тормозное излучение:

$$\frac{\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{рад}}}{\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{ион}}} \approx \frac{E}{\varepsilon}, \quad (3)$$

Где E — энергия электронов [67].

При $E = \varepsilon$ радиационные и ионизационные потери равны. Также известно, что

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{рад}} = \frac{E}{X_0}. \quad (4)$$

Тогда для релятивистских электронов с энергией, равной критической

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{ион}} = \frac{\varepsilon}{E} \cdot \left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{рад}} = \frac{\varepsilon}{E} \cdot \frac{E}{X_0} = \frac{\varepsilon}{X_0}. \quad (5)$$

Соответственно полные энергетические потери на единицу радиационной длины составят

$$X_0 \left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{рад}} + X_0 \left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{ион}} = E + \varepsilon = 2\varepsilon. \quad (6)$$

В нашем случае наиболее вероятные энергии составляют 50 МэВ и 150 МэВ, что соответствует ультрарелятивистским электронам. В первом случае энергия электронов близка к критической 40 МэВ, так что в первом приближении можно

использовать соотношение (6). Во втором случае с высокой точностью будут 100% радиационные потери. Поэтому отношение энергетических потерь между первым и вторым случаем

$$\frac{E_2}{\varepsilon + E_1} \approx \frac{150}{2 \times 40} \approx 1.9. \quad (7)$$

Такой приблизительный расчет соответствует полученным результатам, полученным выше (см. Рисунок 36).

По этой причине электроны не являются идеальным решением для тестирования кремниевых детекторов, поскольку при энергиях, значительно больших критической, потери и, соответственно, сигналы растут линейно с энергией электронов, а при энергиях, близких к критической, вмешиваются другие механизмы потерь.

Таким образом, был протестирован прототип электронного тракта эксперимента СВМ и система синхронизации времени на основе плат AFCK, на основе которых будут построены соответствующие системы эксперимента VM@N. Испытания показали, что синхронизация времени между несколькими микросхемами, подключенными к разным платам AFCK, была стабильной, и что она может работать в течение как минимум 10 часов. Время рассинхронизации составило менее 10 нс, что меньше, чем стандартное время сбора заряда в кремниевых сенсорах порядка 20 нс. Разница во времени между сигналами с Р- и N-сторон сенсоров показана на Рисунок 37, а между сигналами с двух сенсоров — на Рисунок 38.

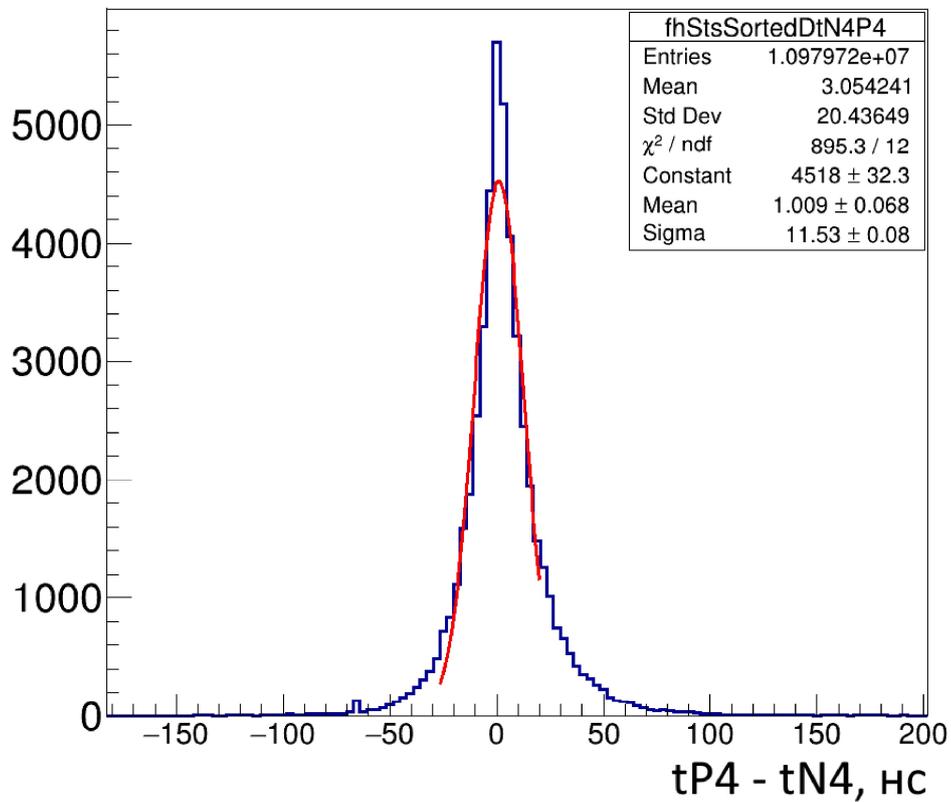
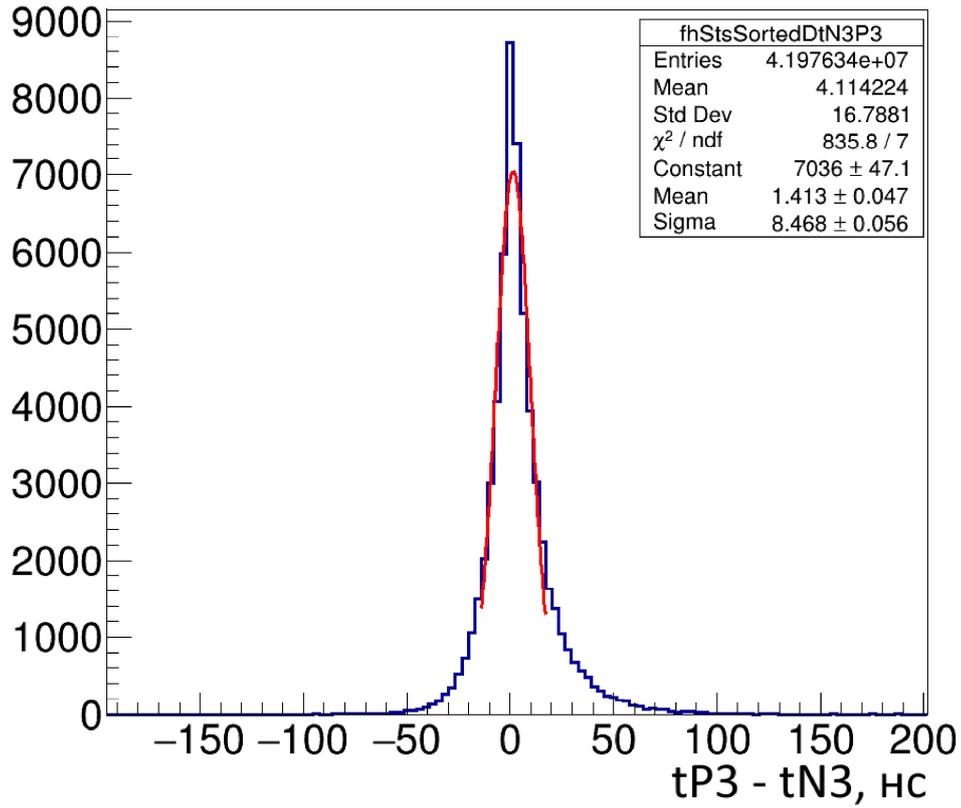


Рисунок 37. Разница во времени между сигналами на N- и P-сторонах сенсоров на станциях 1 (сверху) и 2 (снизу).

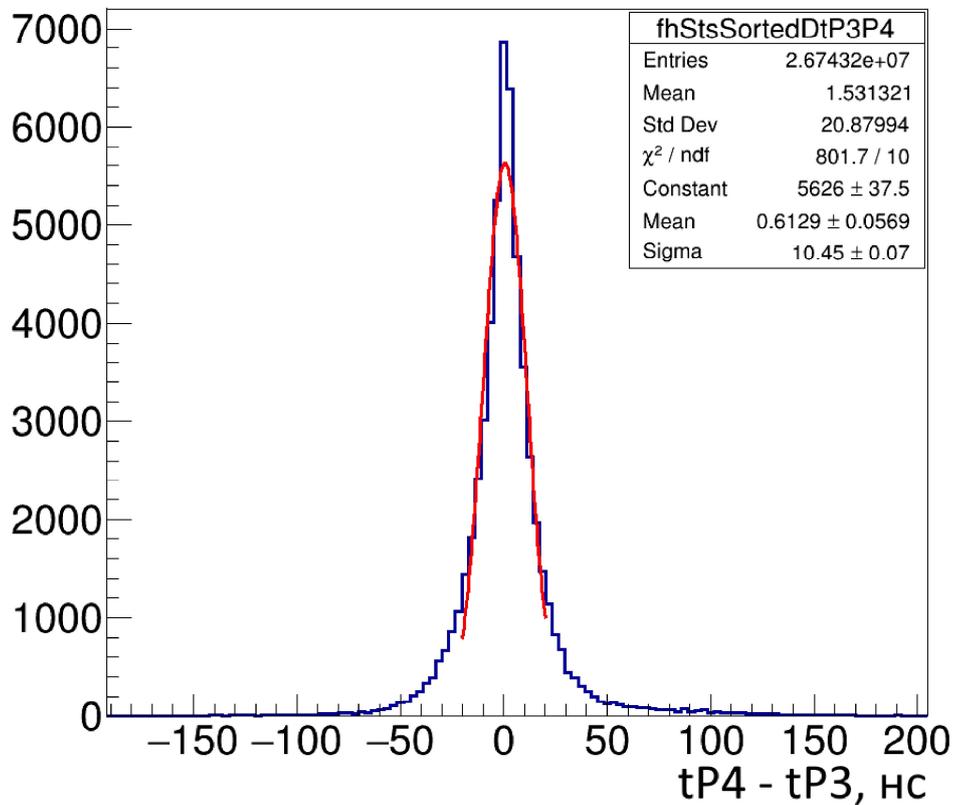
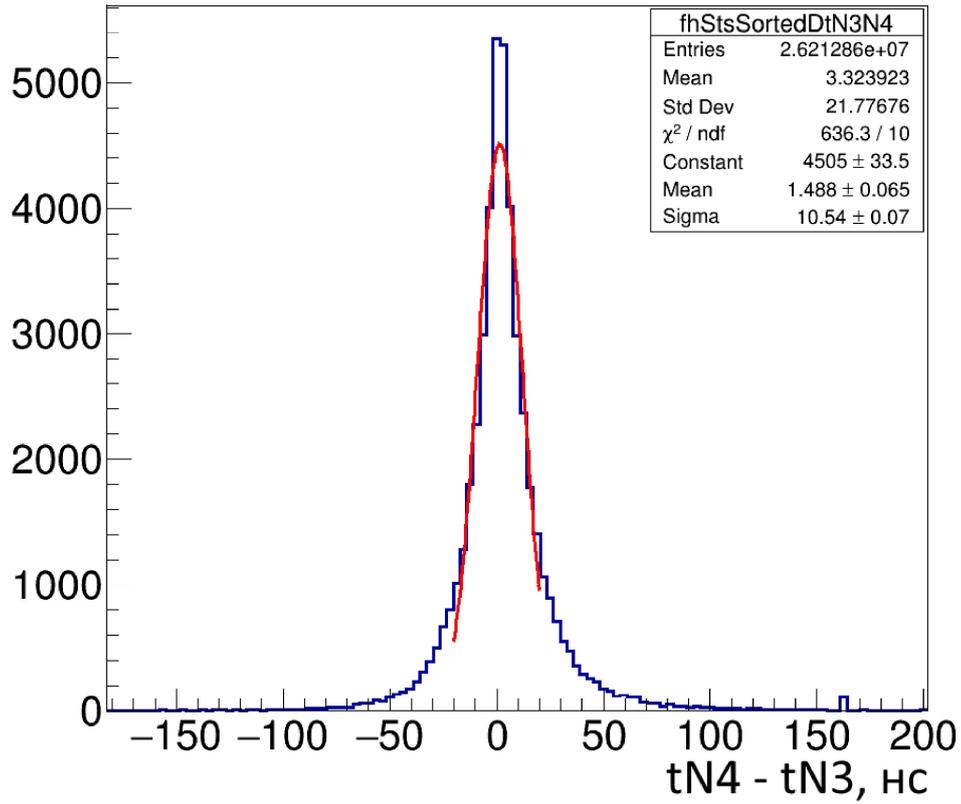


Рисунок 38. Разница во времени между сигналами на N-сторонах сенсоров обеих станций (сверху) и на P-сторонах сенсоров обеих станций (снизу).

3.3. Выводы

В ходе пучковых испытаний протестированы системы синхронизации времени и сбора данных на основе плат AFCK и микросхем STS-XYTER v.2.0. На основе полученных результатов разработана новая версия микросхемы STS-XYTER v.2.1, с оптимизированными шумовыми характеристиками, дополнительным функционалом мониторинга параметров и исправлениями ошибок в работе цифровой части микросхемы.

Синхронизация времени между несколькими микросхемами электроники считывания, подключенными к разным платам AFCK, была стабильной. Также протестирована работа системы считывания в потоковом режиме сбора данных.

Наиболее корректным методом тестирования является проверка на пучке частиц в условиях, максимально приближенным к условиям эксперимента BM@N. Но в тот же время этот метод является дорогим и ресурсоемким по времени и трудозатратам. Также можно тестировать на радиоактивном источнике, но, хоть этот метод и проще, чем тестирование на ускорителе, это требует обращения с радиоактивными материалами и поиска достаточно интенсивных источников. В качестве альтернативы этим методам, для КТС создан лазерный стенд для тестирования трековых модулей, который имитирует с помощью лазерного излучения прохождение частицы через кремниевый сенсор.

Глава 4. Лазерная установка для тестирования трековых модулей

Высокое разрешение и, как следствие, высокая гранулярность кремниевых координатно-чувствительных детекторов требует большого количества каналов считывающей электроники, а также сложной архитектуры системы сбора данных с каналов детектора. Высокая плотность каналов, как правило, требует использования технологии ультразвуковой микросварки, применяемой для монтажа бескорпусной микроэлектроники. Все это не только делает процедуру сборки кремниевых детекторных модулей дорогостоящей и сложной процедурой, но и из-за большого количества соединений возможны ошибки монтажа. Плотность трековых систем в большой степени затрудняет ремонт или замену отдельных элементов. Поэтому для того, чтобы убедиться в качестве детекторных модулей перед установкой в трековую систему, необходимо проводить процедуру тестирования и сертификации компонентов (сенсоров, микросхем, печатных плат и др.) и конечно же готовых изделий — в случае КТС ВМ@N это модули и лэддеры.

Процедура сертификации детекторных модулей включает в себя как функциональные тесты, необходимые для определения работоспособности устройства, так и долговременные тесты в условиях периодических перезагрузок питания и термоциклирования. Для проведения ряда испытаний необходим источник для генерации сигналов детектора. Для быстрых функциональных тестов и долговременных испытаний, чаще всего используется внутренний генератор самих микросхем. Но такое тестирование не дает полной информации о качестве и даже о работоспособности модуля. Требуется инжектировать сигнал непосредственно в сенсор, только такое тестирование может гарантировать работоспособность системы «сенсор-считывающая электроника». В качестве источника такого «правильного» сигнала могут использоваться радиоактивные источники [68], выведенные пучки ускоренных заряженных частиц, а также лазерные импульсы. Применение лазерных диодов имеет ряд существенных преимуществ по сравнению с другими методами. В отличие от радионуклидов, где излучение носит стохастический характер, параметры лазерного импульса хорошо

известны и могут быть отрегулированы в широком диапазоне. Кроме того, время прихода лазерного импульса всегда точно известно, что особенно важно для настройки электроники считывания детектора. Время тестирования на лазерной установке существенно меньше, чем с помощью пучков частиц или радиоактивных источников и можно даже имитировать загрузки сенсоров при высокой светимости. Так, например, не представляет труда инжектировать до миллиона импульсов в секунду, и, в принципе, время сканирования всех каналов модуля определяется только скоростью движения стола с закрепленным модулем. С другой стороны, оборудование для лазерной установки стоит относительно недорого и может применяться для серийного тестирования, в отличие от сложных в обслуживании и дорогостоящих ускорителей частиц.

Подробнее модуль КТС ВМ@N описан в главе 3. Основным компонентом модуля является двусторонний микростриповый кремниевый сенсор с шагом стрипов 58 мкм, общее количество стрипов на каждой стороне сенсора составляет 1024. Считывающая электроника модуля включает в себя восемь специализированных интегральных микросхем STS-XYTER, установленных на специализированной плате, для чтения каждой из сторон сенсора. Считывающая электроника соединяется с сенсором при помощи специализированных сверхлегких алюминиевых кабелей (шлейфов) на полиамидной основе с шириной сигнальной линии 100 микрометров [47]. Длина кабеля при этом может составлять до 30 см.

Принцип работы установки [69; 70] состоит в имитации при помощи лазерного излучения прохождения ионизирующей частицы через кремниевый сенсор детекторного модуля. Основной задачей установки является проведение пострипового сканирования сенсора лазерными импульсами с целью определения отклика от каждого канала. Причиной неработающего канала при этом может являться как отсутствие электрического контакта между стрипом сенсора и входом считывающего канала микросхемы STS-XYTER, так и неработающий канал микросхемы. Кроме того, тестирование позволяет определить состояния металлизации стрипа и разделительного конденсатора, наличие замыканий как по

имплантации, так и по металлизации. Поскольку установка тестирует весь тракт считывания, она может использоваться и для отладки систем сбора и обработки данных, как на аппаратном, так и на программном уровне. Отдельной задачей ставилось определение возможности использования лазерного стенда для калибровки АЦП каналов микросхем STS-XYTER, а также определение разброса коэффициентов усиления каналов чтения.

4.1. Взаимодействие лазерного излучения с кремнием

Свет от лазерного диода характеризуется в первую очередь своей энергией фотонов, которую можно выразить через длину волны излучения. Если выразить энергию фотона в электрон-вольтах и если длина волны выражается в нанометрах, то энергию можно получить по упрощённому выражению:

$$E_{ph}[\text{эВ}] = \frac{1240[\text{эВ} \cdot \text{нм}]}{\lambda[\text{нм}]} \quad (8)$$

Поглощение фотона происходит, если его энергия по крайней мере равна минимальному кванту энергии, который частица вещества может поглотить. В случае монокристаллического кремния (который является рабочим веществом трекового сенсора) минимальная величина энергии соответствует ширине запрещённой зоны, а именно 1.12 эВ. Для фотонов с энергией меньше 1.12 эВ кремний прозрачен. То есть, по вышеуказанному соотношению, для того чтобы излучение лазерного диода взаимодействовало с сенсором, длина волны излучения должна быть менее 1107 нм. Тем не менее, поглощение фотонов с энергией меньшей ширины запрещённой зоны всё ещё возможно, если в запрещённой зоне есть уровни, образованные дефектами кристаллической решётки или примесями.

Стоит отметить, что средняя энергия образования электронно-дырочной пары в кремнии при прохождении заряженной частицы существенно больше ширины запрещенной зоны и составляет 3.6 эВ, это связано с множественным рассеянием на колебаниях решетки. В случае фотона с энергией больше 1.12 эВ избыточная энергия, полученная электроном так же, будет, в конечном счете переходить в тепло.

Количество родившихся электрон-дырочных пар определяется только количеством фотонов, а не их энергией, как это и следует из законов фотоэффекта.

Тем не менее, даже фотоны с энергией более 1.12 эВ не обязательно поглощаются кремнием. Вероятность этого взаимодействия зависит от того, насколько энергия фотона превышает ширину запрещённой зоны и определяется коэффициентом поглощения, зависящим от длины волны излучения и материала, который определяет, какой процент фотонов, падающих на материал толщиной 1 см, будет поглощён. Можно также определить так называемую длину поглощения (или глубину проникновения) — толщину материала, необходимую чтобы поглотить $1/e$ (примерно 37%) падающего излучения. В данной лазерной установке используются лазерные диоды двух длин волн — 635 и 1064 нм. Длина проникновения кремния для излучения с длиной волны 635 нм составляет 3.17 мкм, с 1064 нм — 1040 мкм (см. Рисунок 39) [71].

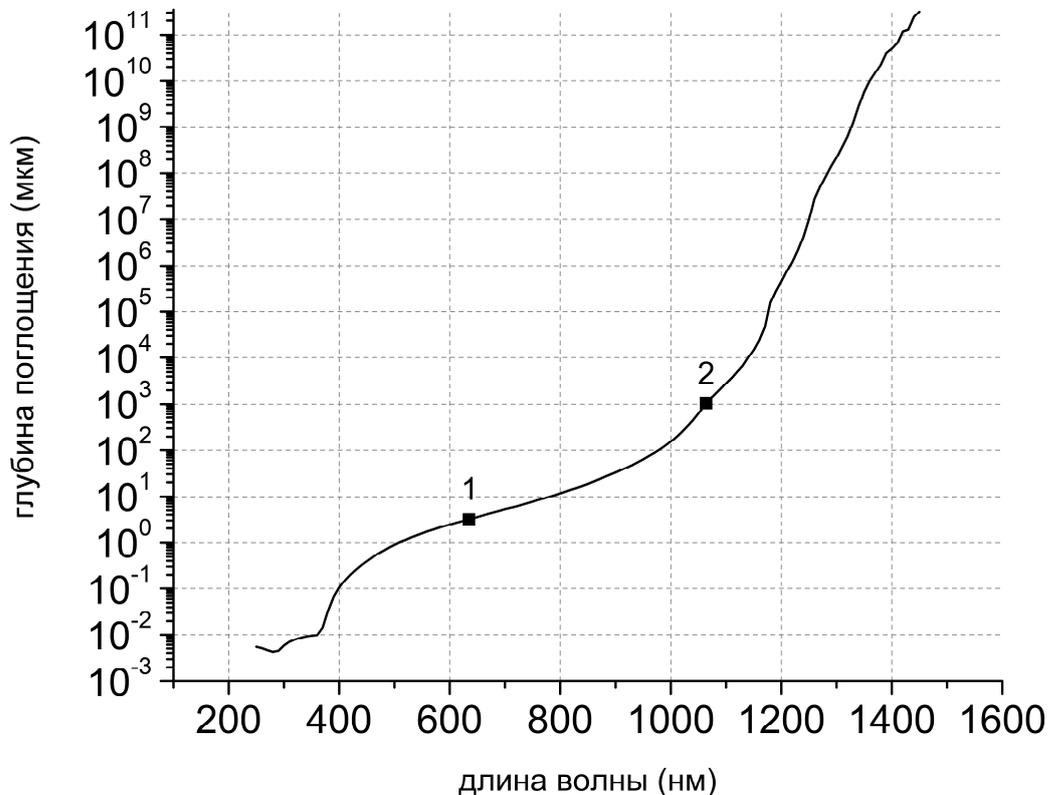


Рисунок 39. Длина поглощения в кремнии. (Точка 1 — длине волны 635 нм соответствует длина поглощения 3.17 мкм, точка 2 — 1064 нм соответствует

1040 мкм)

В таком случае, при поглощении фотона с энергией больше, чем ширина запрещённой зоны, его энергия тратится на перенос электрона из валентной зоны на один из незаполненных уровней в зоне проводимости, таким образом создавая электронно-дырочную пару, которая затем и регистрируется детектором.

Трековый детектор рассчитан на детектирование релятивистских частиц, сигнал от которых близок к сигналу от минимально ионизирующей частицы (MIP), поэтому тестирование трековых модулей предполагает моделирование процесса пролёта такой частицы. Поэтому необходимо провести расчёты энергии лазерного импульса, чтобы число электрон-дырочных пар примерно соответствовало однозарядной релятивистской частице (минимально ионизирующей частице – MIP), и произвести соответствующую настройку оборудования.

В литературе встречаются разные значения количества электрон-дырочных пар, выделяющегося в кремнии толщиной 300 мкм от пролёта MIP, — от 20000 до 25000. Для оценки необходимой энергии лазерного импульса здесь будем считать, что это число равно 22500 пар электрон-дырка.

Поскольку в установке используются лазерные диоды с длинами волн 635 и 1064 нм, то соответствующие им энергии квантов будут 1.95 и 1.17 эВ по соотношению (8). Предположим, что эффективность регистрации равна 100% и потери в оптической системе пока учитывать не будем. Тогда полные энергии лазерных импульсов, соответствующих MIP, будут равны:

$$\begin{aligned} E_{635} &= 1,95 \text{ эВ} \times 22500 = 43,875 \text{ кэВ} = 7,0 \cdot 10^{-15} \text{ Дж}, \\ E_{1064} &= 1,17 \text{ эВ} \times 22500 = 26,325 \text{ кэВ} = 4,2 \cdot 10^{-15} \text{ Дж}. \end{aligned} \quad (9)$$

Красный лазерный импульс полностью поглотится кремнием, а поглощение инфракрасного необходимо рассчитать.

В данном случае мы считаем ту часть светового пучка, падающего отвесно на сенсор, которая не попадает на металлизацию стрипов, поскольку попавший на них свет полностью отражается. Коэффициент отражения для ИК излучения 1064 нм

составляет 0,3 суммарно для разделов сред воздух/оксид кремния и оксид кремния/кремний (см. Рисунок 40) [71–73]. По закону поглощения при прохождении всей толщины 300 мкм кремния интенсивность светового пучка равна

$$\Phi_1 = \Phi_0 \cdot \exp(-\alpha_{Si} \cdot l) = \Phi_0 \cdot \exp\left(-\frac{300_{\text{мкм}}}{1040_{\text{мкм}}}\right) = 0,75 \cdot \Phi_0, \quad (10)$$

где Φ_1 — это интенсивность прошедшего толщю кремния светового пучка, Φ_0 — это интенсивность вошедшего в сенсор светового пучка, α_{Si} — коэффициент поглощения (обратен длине проникновения), l — расстояние, пройденное световым пучком (300 мкм).

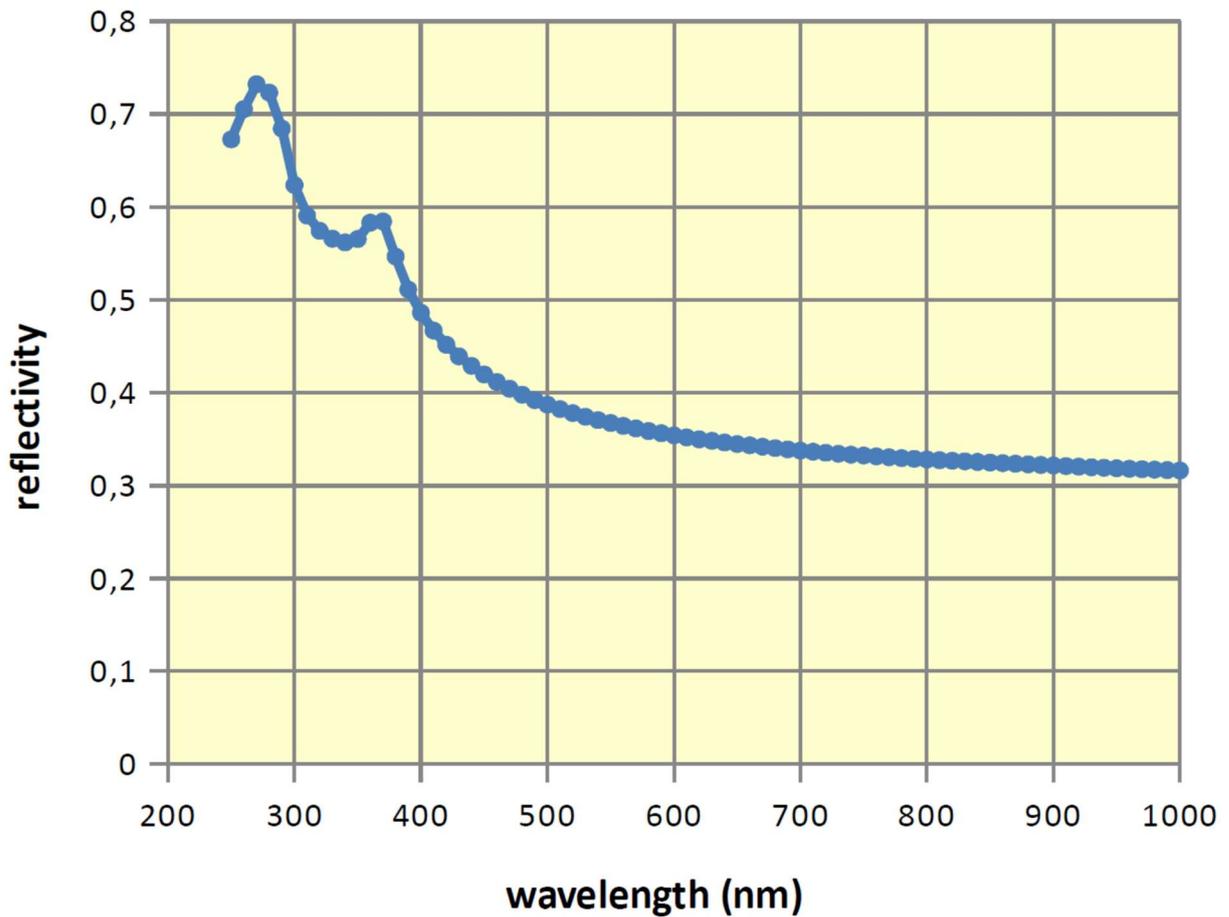


Рисунок 40. Измеренные величины коэффициента отражения R для кремния.

Далее для светового пучка есть 2 сценария.

В первом случае пучок может попасть на металлизацию стрипов и полностью отразиться; при этом стрипы окружает область высокого уровня легирования N^+ или P^+ в для P^- и N^- стороны соответственно глубиной 1–1,5 мкм. Коэффициент

поглощения составляет $\sim 70 \text{ см}^{-1}$ для N+ кремния и $\sim 90 \text{ см}^{-1}$ для P+ кремния [74] (см. Рисунок 41), что значительно больше, чем для «чистого» кремния ($\sim 10 \text{ см}^{-1}$), но из-за небольшой толщины слоя его вклад остается малым даже с учетом прохождения через него дважды. В соответствии с (10) интенсивность после прохождения высоколегированной области составит 0,98 и 0,97 для N+ и P+ соответственно. Примем этот коэффициент за 0,98.

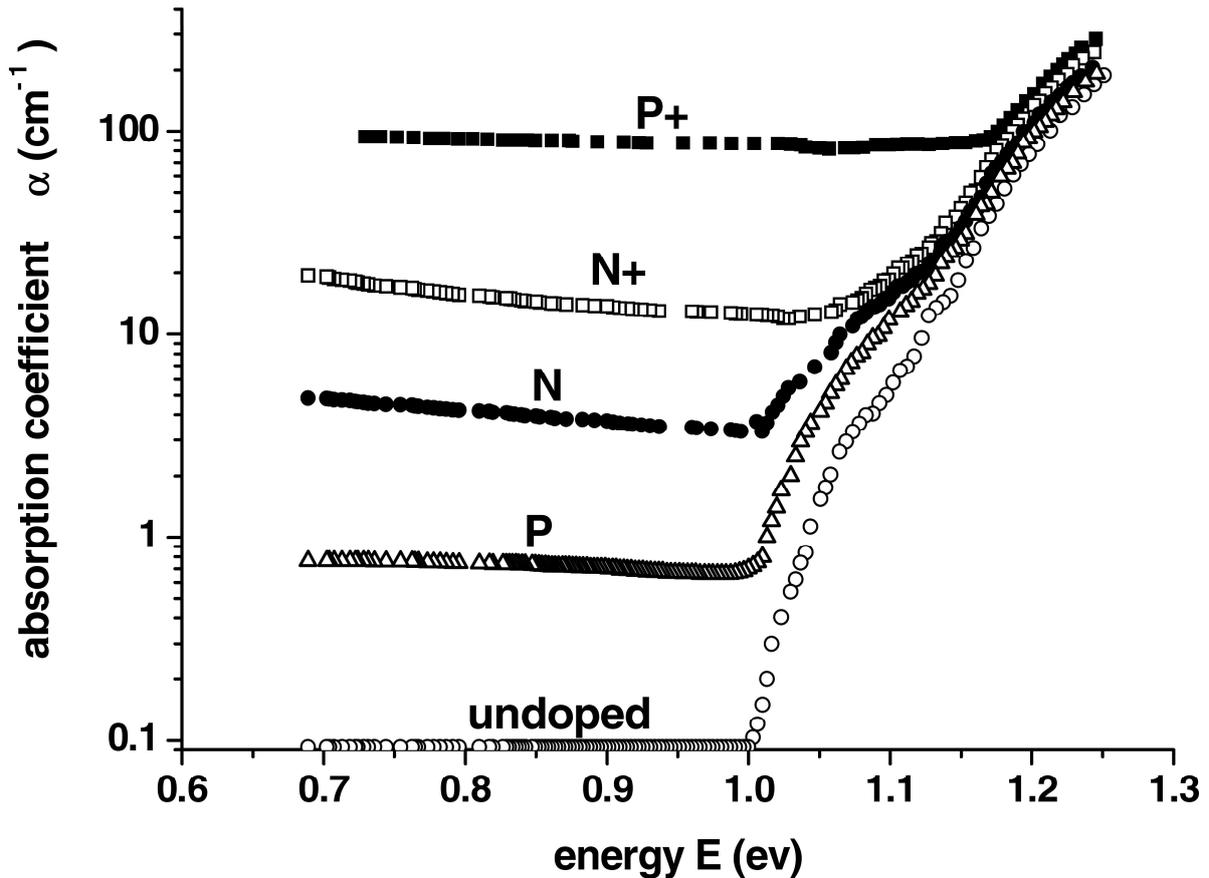


Рисунок 41. Зависимость коэффициента поглощения в зависимости от энергии падающих фотонов и степени легирования кремния [74].

Во втором случае световой пучок попадает между стрипов и частично отражается с показателем отражения 0,3.

Вероятность и, соответственно, весовой коэффициент для первого случая составляет $20/58$, и для второго — $38/58$. Таким образом, суммарно:

$$\Phi_2 = \left(\frac{20}{58} \cdot 0,98 + \frac{38}{58} \cdot 0,3 \right) \cdot \Phi_1 = (0,34 + 0,20) \cdot \Phi_1 = 0,54 \cdot \Phi_1 = 0,4 \cdot \Phi_0, \quad (11)$$

где Φ_2 — интенсивность отраженной части светового пучка Φ_1 .

Аналогично происходит и при последующих внутренних отражениях. Воспользовавшись формулой для суммы ряда геометрической прогрессии со знаменателем 0,4 и первым членом 25%, получим, что поглотится 41,7% светового пучка, попавшего в кремниевый сенсор. Поэтому, аналогично (11), только 19,2% от светового пучка, выпущенного из оптической системы лазерного стенда, будет поглощено кремниевым сенсором.

Кроме того, в оптоволоконных линиях и узлах всегда есть некоторые небольшие потери (обычно порядка 0,3 дБ), часть лазерного луча отразится от металлизации или оксида кремния на поверхности (54%, в соответствии с (11)) и задней плоскости сенсора — приблизительный учёт этих эффектов потерь показывает, что энергию импульса нужно повысить на порядок. Но даже в таком случае энергия 10^{-14} Дж слишком мала даже для маломощных лазерных диодов, поэтому необходимо использование аттенюаторов.

4.2. Устройство установки

Основные составляющие части стенда следующие: оптическая система с закрепленным лазерным светодиодом, система позиционирования тестируемого модуля, а также система чтения и управления трековым модулем. Блок-схема лазерного стенда показана на Рисунок 42. Компоненты стенда, помещенные в светозащитном экранирующем кожухе, имеющем внутреннее черное матовое покрытие, показаны на Рисунок 43.

Фокусирующая головка 1 формирует пятно света, приходящего по оптическому волокну 2 от лазерного светодиода через переменный аттенюатор 3. В качестве фокусирующей головки используется конденсор PS-2 “СоларЛС”, который может фокусировать свет из оптоволоконной линии в пятно диаметром 50 мкм (полная энергия) и имеет фокусное расстояние 4 см. Поскольку расстояние между стрипами в используемых сенсорах равно 58 мкм, это позволяет сфокусировать лазерный луч между стрипами и получить сигнал, похожий на

сигнал от попадания одной ионизирующей частицы. Система фокусировки специально выбиралась длиннофокусной, чтобы обеспечить достаточный зазор между исследуемым модулем и оптической системой для уменьшения вероятности повреждения модуля и удобства работы. Атенюаторы VOA630-FC и VOA1064-FC фирмы “Thorlabs” обеспечивают ослабление до 50 дБ.

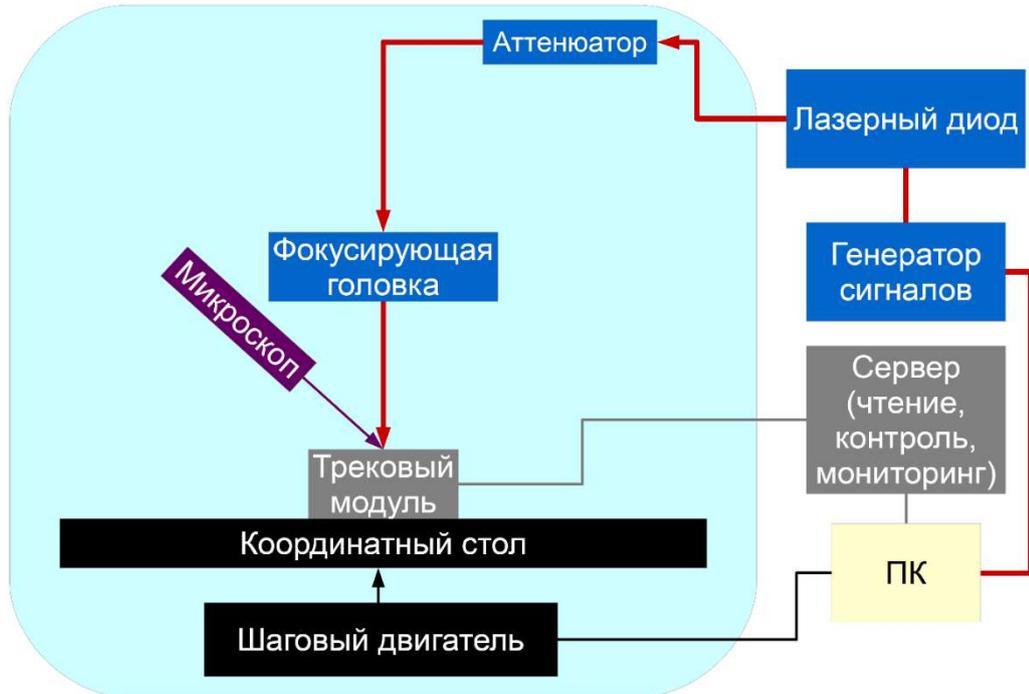


Рисунок 42. Блок-схема лазерного стенда.

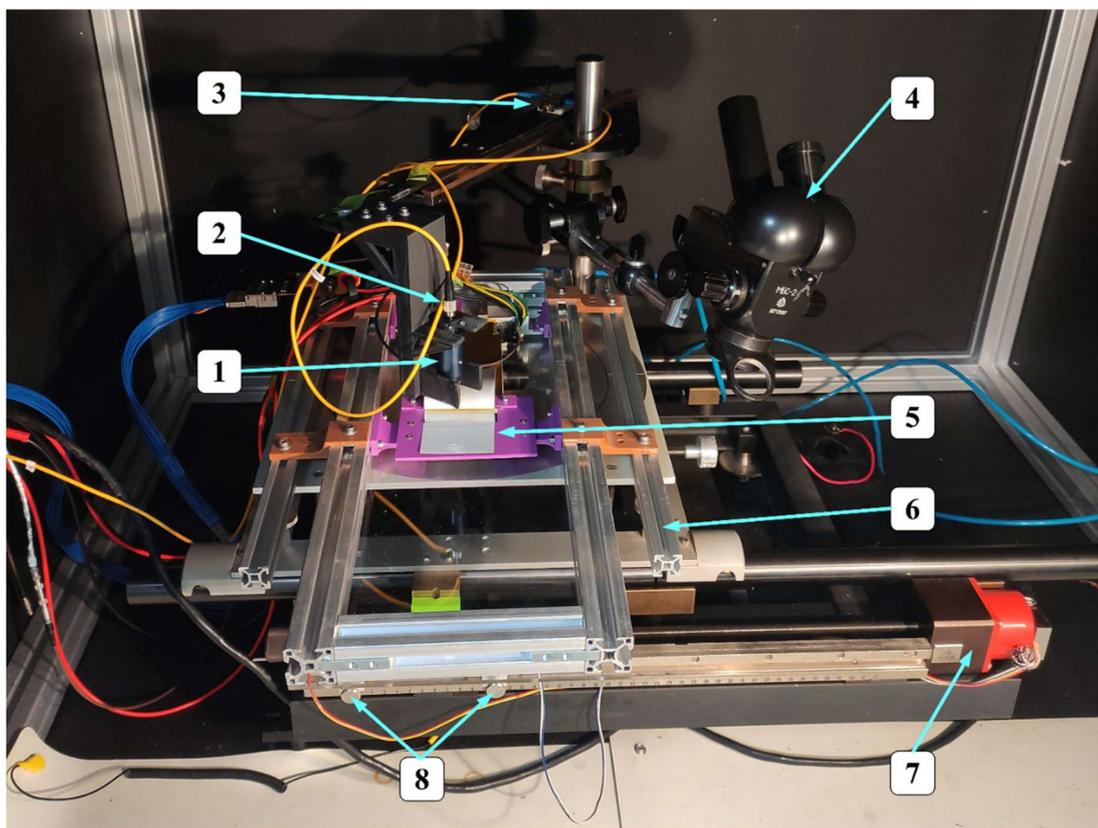


Рисунок 43. Фотография компонентов стенда внутри экранирующего кожуха. 1 – фокусирующая головка; 2 – выход светового излучения от диода из оптоволоконного кабеля; 3 – аттенюатор; 4 – микроскоп для настройки; 5 – исследуемый детектор и электроника в лабораторной оснастке; 6 – стол с креплениями; 7 – двигатель; 8 – концевые датчики.

В качестве лазерных светодиодов использовались светодиоды “Нолатех” двух видов, оба мощностью 1 мВт. Диод марки FPL-1064-14BF-1 генерирует инфракрасный свет длиной волны 1064 нм и глубиной проникновения в кремний 1040 мкм [71], что позволяет наиболее полно воспроизвести прохождение минимально ионизирующих частиц через исследуемые детекторы с типичной толщиной 300 мкм. Диод марки FPL-635-14BF-1 генерирует красный свет длиной волны 635 нм, а глубина его проникновения в кремний $\approx 3,17$ мкм. Преимуществом диода данного вида является удобство использования видимого глазом света для настройки работы стенда при помощи микроскопа 4 с цифровой камерой, которая подключается через конвертор видеосигнала RCA в VGA к внешнему монитору. Микроскоп используется только для дополнительной настройки остальных подсистем, и подсветка не работает во время тестирования, чтобы исключить дополнительные шумы.

Источник питания диода размещен снаружи кожуха, в качестве источника используется генератор импульсов, управляемый персональным компьютером по локальной сети Ethernet. Генератор Tektronix AFG3052C может обеспечивать последовательности прямоугольных импульсов длиной от 12 нс и с временами нарастания и спада сигнала 7 нс в широком диапазоне амплитуд и частот. Таким образом, можно создавать импульсы длительностью, сопоставимой с типичным временем сбора заряда в сенсоре ~ 20 нс.

Энергия лазерного импульса при генерации источником питания прямоугольных импульсов длиной 12 нс и при мощности 1 мВт лазерных диодов:

$$1\text{ мВт} \times 12\text{ нс} = 10^{-3} \frac{\text{Дж}}{\text{с}} \times 12 \cdot 10^{-9} \text{ с} = 1,2 \cdot 10^{-11} \text{ Дж}. \quad (12)$$

Из сравнения рассчитанных величин (12) и (9) видно, что максимальное ослабление необходимо не более чем в 10^5 раз, поэтому и были выбраны соответствующие аттенюаторы с ослаблением до 50 дБ.

Каждый исследуемый полупроводниковый детектор с электроникой считывания размещен в индивидуальной лабораторной оснастке 5.

На Рисунок 43 также отображены следующие компоненты системы позиционирования: координатный стол 6 с креплениями для детекторного модуля (трековый модуль в оснастке для тестирования показан на Рисунок 44); шаговый двигатель 7 ДШИ-200-2 с валом для перемещения координатного стола; а также пара концевых выключателей 8. Также в эту систему входят управляющий блок (драйвер) двигателя, подключенный к последовательному порту персонального компьютера через концентратор последовательных портов RS-232, и источник питания двигателя, размещенные снаружи кожуха. Блок схема драйвера шагового двигателя показана на Рисунок 45.

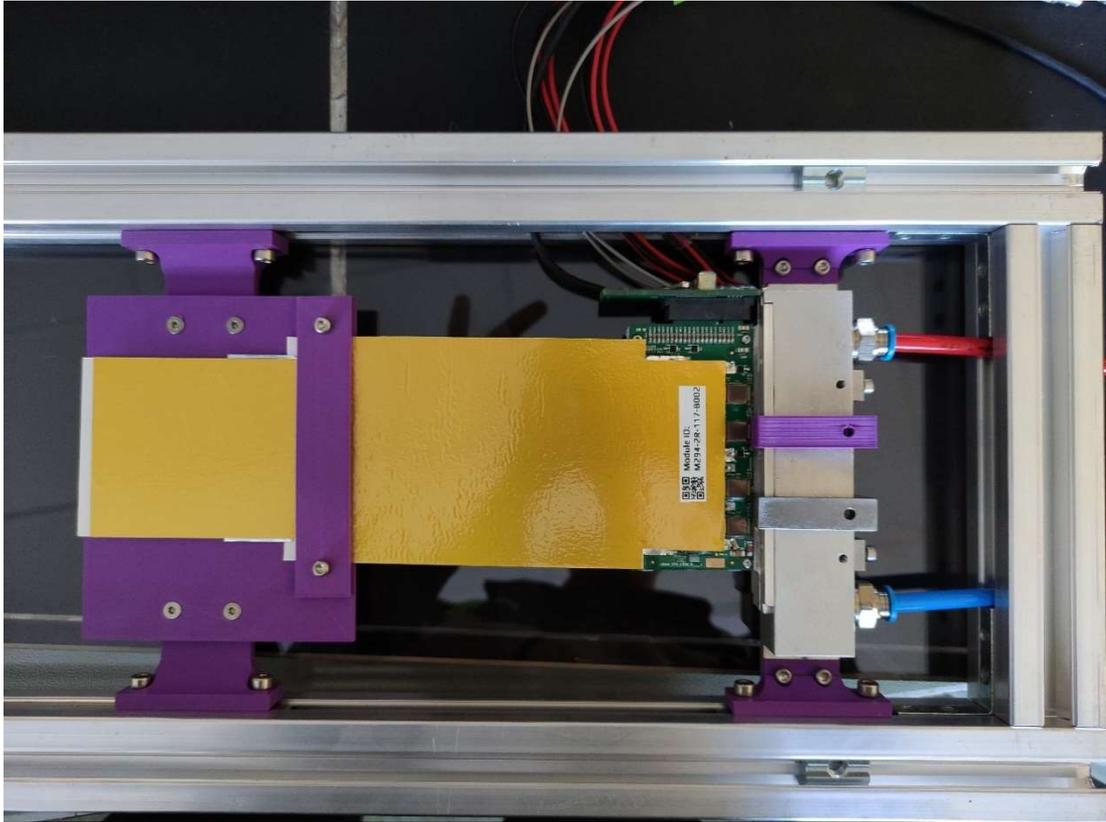


Рисунок 44. Трековый модуль в оснастке для тестирования.

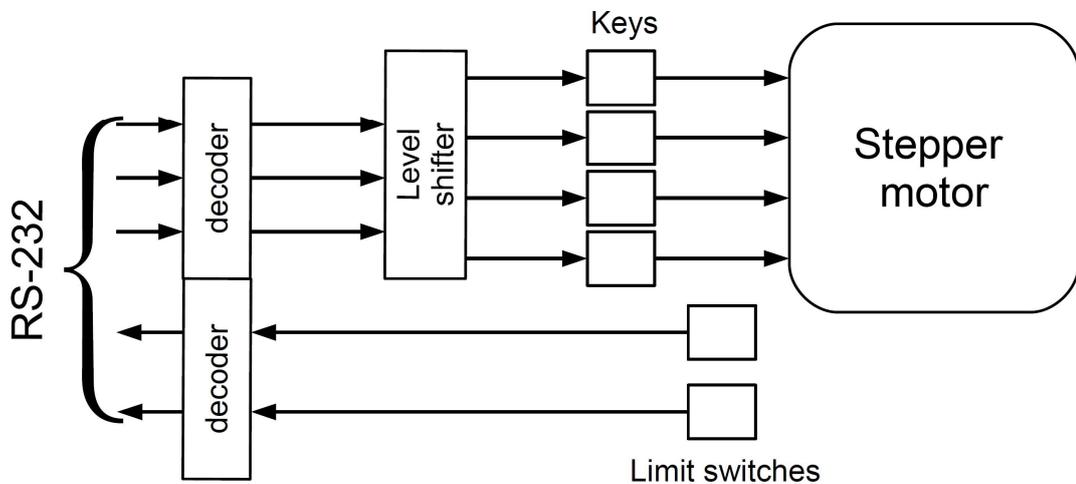


Рисунок 45. Блок-схема драйвера шагового двигателя.

Программное управление системой позиционирования написано на высокоуровневом языке программирования Python на основе библиотеки pyserial. Драйвер управляет питанием обмоток двигателя с помощью логических ключей и схем сдвига уровней. Движение координатного стола ограничивается концевыми выключателями 8, информация об их состоянии также передается через последовательный порт.

Помимо генератора сигналов и лазерного диода за пределами кожуха находятся все системы чтения, контроля и мониторинга детекторного модуля. Для чтения аналоговых сигналов с каждой стороны сенсора используются 8 микросхем STS-XYTER v.2.1, установленных на платах Front-End Board (FEB-8).

Микросхемы считывания связываются со всей системой через программируемый многоканальный интерфейс e-link, который обеспечивает от одной до пяти восходящих линий передачи данных и принимает команды через одну нисходящую линию связи типа e-link. Как восходящие, так и нисходящие линии связи определяются протоколами, описанными в [54].

Наиболее экономически эффективным и универсальным решением для эксперимента VM@N в данной ситуации является эмуляция необходимой функциональности GBTx в коммерчески доступной архитектуре ПЛИС.

GBTx выполняет функции передачи данных систем сбора данных (Data Acquisition, DAQ), медленного контроля (Slow Control, SC), управления таймингом и триггером (Timing and Trigger Control, TTC) через один полнодуплексный физический оптический канал (Versatile Link). В принципе, GBTx служит для передачи данных с 14 каналов e-link в регистр шириной 14 бит на принимающем устройстве ПЛИС, в котором они могут быть обработаны дальше. Несмотря на то, что в этой процедуре осуществляется сложное преобразование данных в последовательную форму, шифрование и защита от потери данных, канал GBTx можно рассматривать как прозрачную передачу данных со входов каналов e-link на приемный регистр шириной 14 бит, и наоборот в случае с нисходящими каналами связи. В этом отношении нет необходимости настаивать на точной реализации передачи 14 каналов e-link при эмуляции функциональности GBTx. Вместо этого можно предусмотреть произвольное отображение данных в соответствии с физической доступностью соединений и пропускной способностью передачи данных на конкретной ПЛИС и ее каналах.

По сравнению с экспериментом CBM, в КТС VM@N скорость взаимодействия на порядки ниже, именно поэтому функциональность GBTx может

быть эмулирована ПЛИС. В то время, как GBTx предназначен для передачи данных 14 каналов e-link, работающих на скорости 320 Мбит/с, чтобы заполнить всю доступную полосу пропускания оптической линии 4,375 Гбит/с, эмулятор GBTx (см. Рисунок 46) обеспечивает 48 восходящих линий связи, работающих на скорости 80 Мбит/с. 56 каналов e-link можно было бы реализовать, но это не соответствует реальным потребностям, в то время как 48 каналов e-link могут служить для 6×8 восходящих соединений и, следовательно, для 6 плат считывания FEB-8, что соответствует считыванию данных с 3 полных детекторных модулей. Поскольку системы сбора данных других детекторов эксперимента VM@N работают по триггеру, то будет возможность интегрировать высокоскоростные кольцевые буферы с дисциплиной обслуживания FIFO на уровне платы эмуляции GBTx, чтобы минимизировать поток данных от считывающей электроники КТС и связывать события на основе данных триггерного сигнала. Тем не менее, система сбора данных КТС также будет иметь возможность работать в режиме потоковой передачи, в этом случае метка времени будет использоваться для связывания событий от различных подсистем.



Рисунок 46. Плата эмулятора GBTx.

Для передачи считанных данных в вычислительный кластер необходим интерфейс PCIe, который принимает оптические сигналы от различных плат

эмуляторов GBТх и сбрасывает данные в буфер прямого доступа. В дальнейшем эта функциональность будет называться GERI (General Emulator Readout Interface). В принципе, некоторая обработка также может быть реализована на этом уровне ПЛИС. Например, данные могут быть отсортированы по времени на «микросрезы» (см. Главу 3). Тем не менее, синхронными и отсортированными могут считаться только те данные, которые относятся непосредственно к соответствующим GERI. К одной плате GERI подключаются 7 оптических линий данных от 7 плат эмуляторов GBТх. Восьмая оптическая линия будет использоваться для ввода данных синхронизации и «часов» системы. На данном этапе для синхронизации нескольких плат эмуляторов GBТх используется дополнительная ПЛИС — Плата Обработки Данных (Data Processing Boards, DPB) на базе платформы AMC FMC Carrier Kintex (AFCK) (см. Рисунок 47) [56]. DPB установлены в крейтах архитектуры микро-ТСА. Основное назначение DPB — считывание данных, последующая сортировка, мультиплексирование прочитанных данных и упаковка в автономные контейнеры, называемые «микросрезами» (Micro-Slices, μS). Медленный контроль и конфигурация детекторной электроники осуществляется через DPB по протоколу IPBus, который основан на стандарте Ethernet.

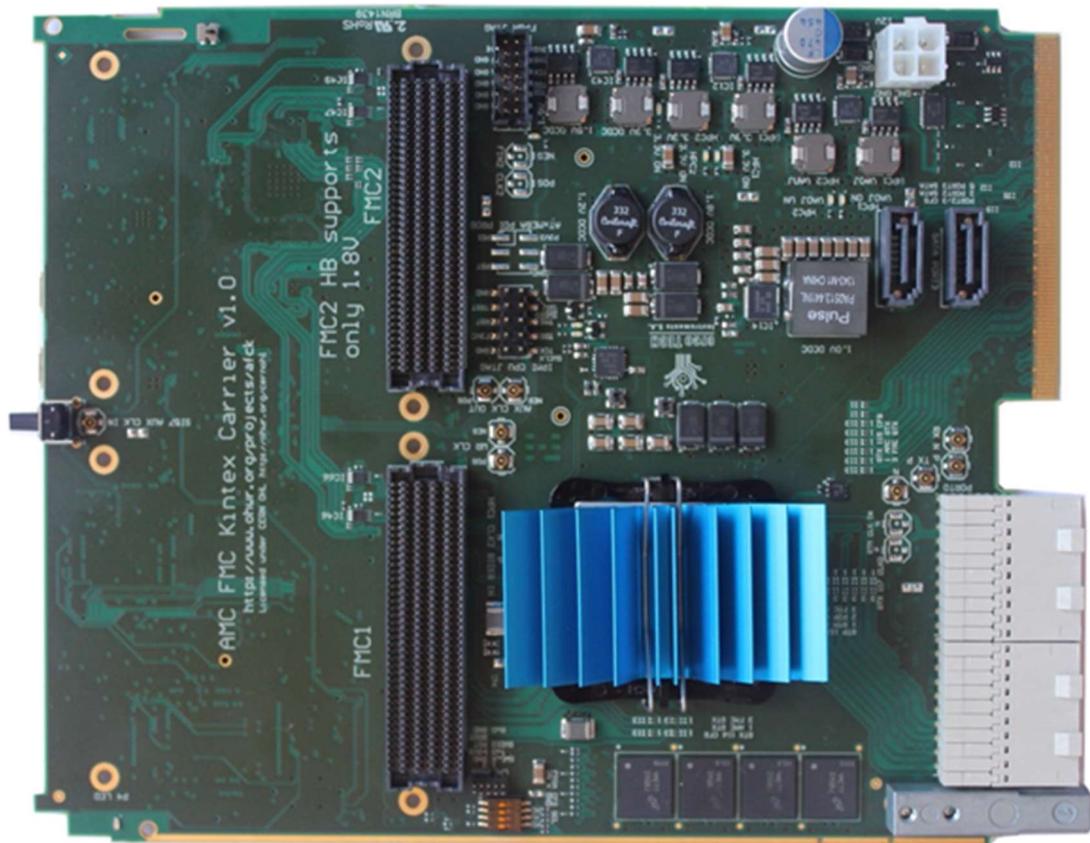


Рисунок 47. Плата Обработки Данных DPB на основе AFCK.

Затем данные в виде микросрезов передаются по оптическому каналу связи на конечную аппаратную часть тракта считывания — PCIe платы на базе ПЛИС, расположенных в серверных компьютерах. Они используются в качестве входа для Селектора Событий Первого Уровня (First Level Event Selector, FLES). Эта плата называется FLES Input Board (FLIB) (см. Рисунок 48). FLES — это вычислительная система, используемая для объединения и онлайн обработки полученных данных с целью обнаружения, реконструкции и выделения событий. Блок-схема используемого прототипа системы считывания показана на Рисунок 49.

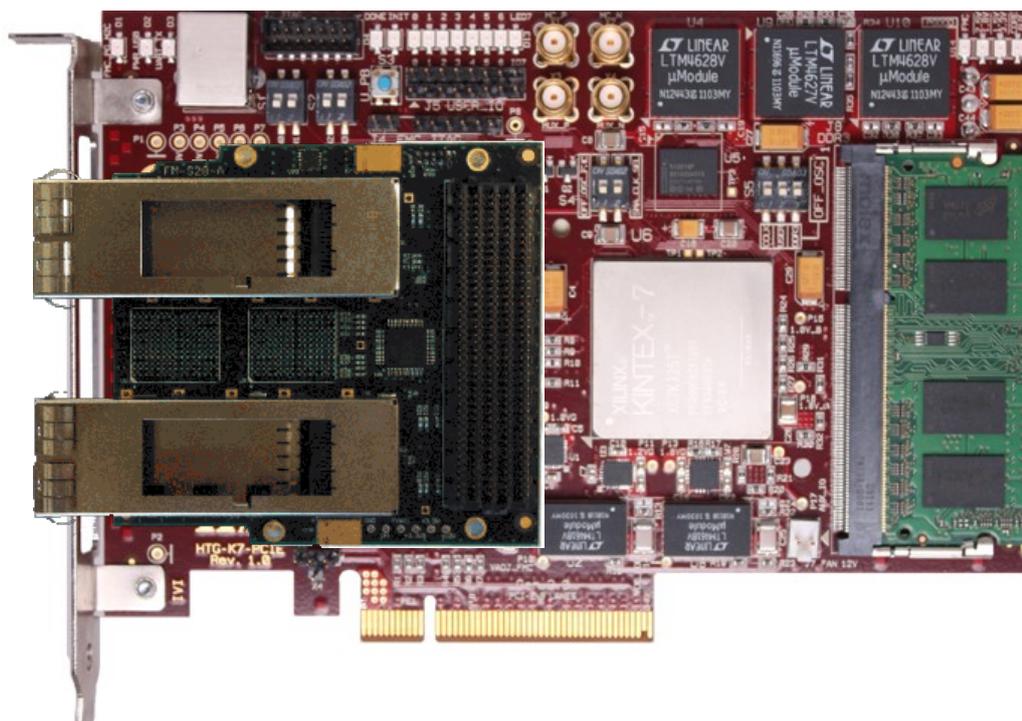


Рисунок 48. Входная Плата Селектора Событий Первого Уровня (FLIB).

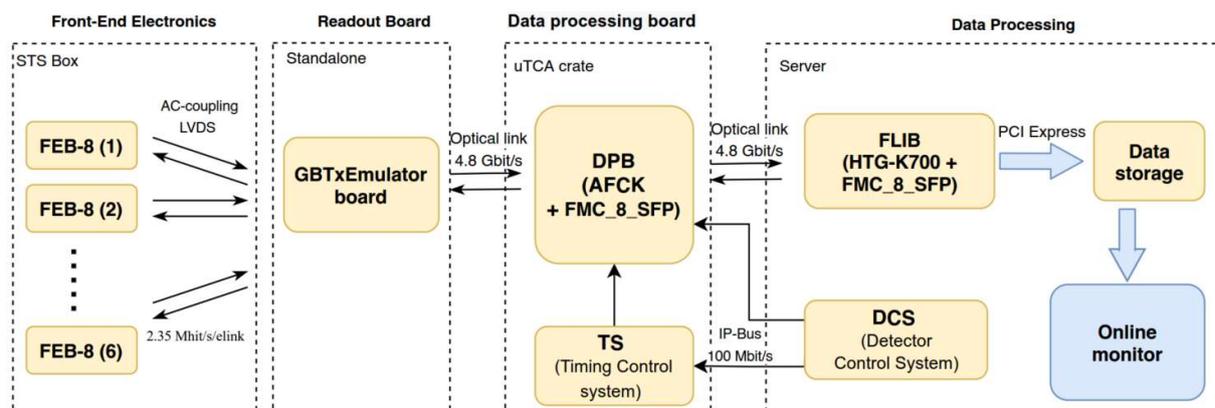


Рисунок 49. Блок-схема прототипа системы считывания.

Измеренные параметры лазерного стенда соответствуют запланированным. Постоянство частоты и энергии импульсов обеспечивается:

- качеством генератора импульсов;
- хорошим теплоотводом, поскольку лазерные диоды обладают малой мощностью и смонтированы в довольно большой металлический корпус, поэтому даже при длительной работе нет значительного нагрева диодов, что значительно уменьшает нестабильность импульсов.

Также при тестах используется статистически значимое число (обычно не менее 1000) импульсов на стрип для того, чтобы усреднить результаты, поэтому влияние нестабильности импульсов незначительно.

Поскольку трек ионизирующей частицы имеет малый радиус, то было бы лучше фокусировать лазерные импульсы в пятно как можно меньшего диаметра. Теоретически, возможно фокусировать лазерный луч из оптоволокна в пятно с диаметром, равным диаметру оптоволокна (в нашем случае 4,5 и 5,6 мкм). На практике, подобные фокусирующие системы очень громоздки и дорогие. Так что 50 мкм фокусировка, предоставляемая использующейся фокусирующей головкой, достаточна для проведения тестирования трековых модулей, поскольку лазерные импульсы могут быть сфокусированы между стрипов. На самом деле, тесты фокусирующей системы показали, что импульсы могут быть сфокусированы даже в пятно с эффективным диаметром примерно 40 мкм, так как гало может быть отрезано как фон.

4.3. Возможности установки и результаты

Одним из ключевых параметров стенда является размер (или диаметр) лазерного пятна в области регистрации. Под этим понятием мы понимаем диаметр окружности, равный двойному среднеквадратическому отклонению распределения зарегистрированной энергии от количества сработавших стрипов, которое имеет вид нормального распределения. Минимальный диаметр пучка не должен превышать ширину зоны между соседними стрипами, которая свободна от металлизации. Металлизация наносится на каждый стрип для съема сигнала, т.е. сбора выделившегося заряда в веществе сенсора. При попадании лазерного луча на область металлизации происходит отражение, как показано, например, в статье [75]. Для сенсоров КТС VM@N ширина свободной от металлизации зоны на поверхности сенсора составляет 38 мкм, поэтому минимальный размер пятна нашего стенда может быть около 40 – 50 мкм. Однако в ряде случаев, когда, например, требуется имитировать события с большим кластером сработавших

стрипов, размер лазерного пятна нужно увеличить. Этого эффекта можно добиться использованием расфокусированного пучка. При дефокусировке полная мощность лазерного пучка не меняется, но при этом лазерный стенд позволяет регулировать мощность путем изменения параметров питания, поэтому можно получать сигналы как в формате «1 МIP в кластере», так и «1 МIP в каждом стрипе кластера».

На Рисунок 50 и Рисунок 51 показаны распределения амплитуд сигналов на каждой из сторон сенсора в случае использования расфокусированного красного лазера. Уширение сигнала в кремниевом сенсоре возникает, в первую очередь, из-за перетекания заряда на соседние стрипы за счет паразитной емкости как самих стрипов, так и используемого кабеля для передачи сигналов от детектора к считывающей электронике и, во вторую очередь, из-за диффузии носителей заряда, эффект которой в нашем случае невелик по причине полного обеднения сенсора и высокой скорости сбора заряда. Для пострипового сканирования использовалось сфокусированное пятно лазера размером 50 мкм.

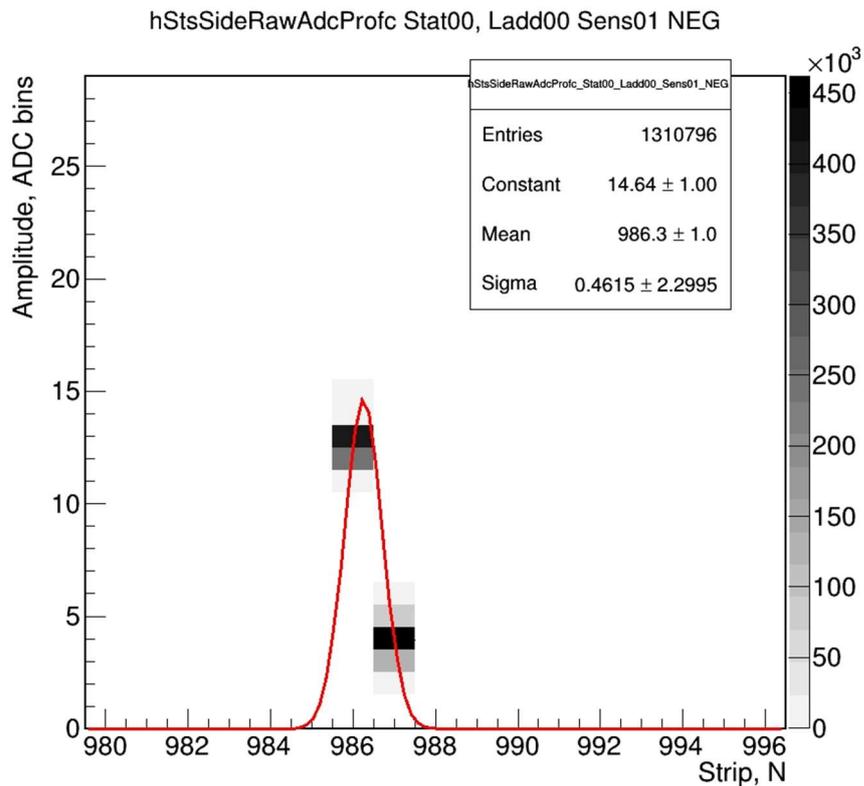
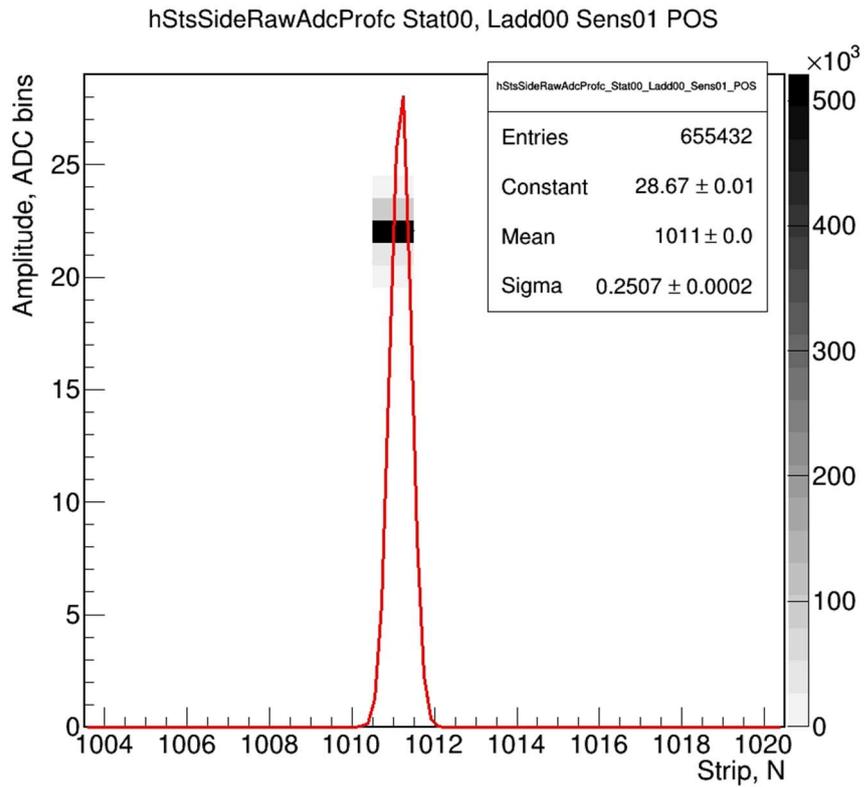


Рисунок 50. Распределения амплитуд сигналов относительно порядковых номеров сработавших стрипов для сфокусированного лазера — то есть диаметра пятна лазера, соответствующей 1 стрипу: сверху — для P-стороны, снизу — для N-стороны.

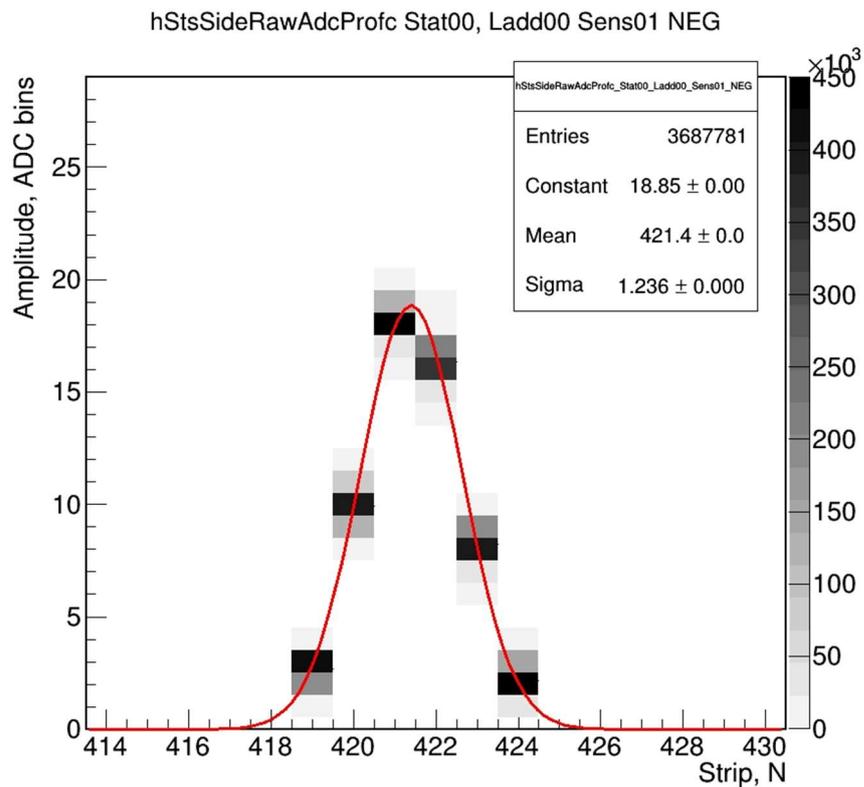
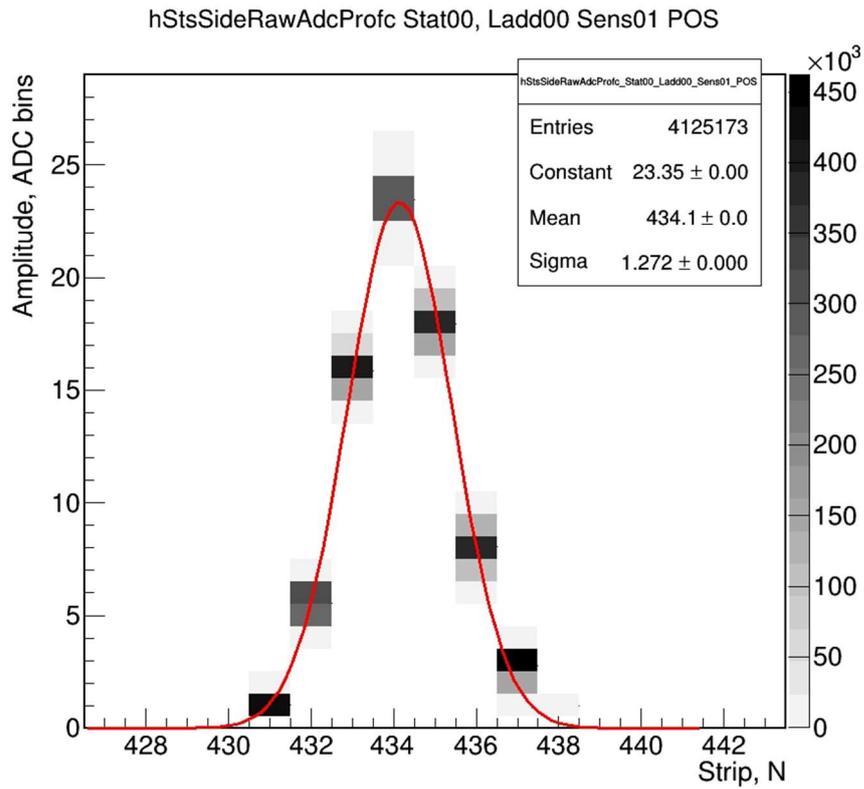


Рисунок 51. Распределения амплитуд сигналов относительно порядковых номеров сработавших стрипов для расфокусированного лазера — то есть диаметра пятна лазера, соответствующей 7 стрипам: сверху — для P-стороны, снизу — для N-стороны.

Свободные носители заряда, образующиеся при взаимодействии фотонов лазерного излучения с кремнием, делятся, как правило, между несколькими соседними стрипами. Группу стрипов, сработавших от одного лазерного импульса, принято называть кластером. На Рисунок 52 представлен восстановленный кластер одновременно сработавших каналов на одной стороне сенсора — количество стрипов в нем и распределение суммарных амплитуд сигналов. Процедура определения кластеров используется для восстановления координат попадания частиц в сенсор и подсчета ее суммарных энергетических потерь. Для включения хита в кластер применяются два критерия: 1) одновременность срабатывания (± 20 нс); 2) локальность (хит должен находиться не более чем в 5 стрипах от центра рассматриваемого кластера).

Пример пострипового сканирования сенсора показан на Рисунок 53. Так как угол между стрипами составляет 7.5° , это позволяет проводить тестирование стрипов на обеих сторонах сенсора при перемещении вдоль одной координаты.

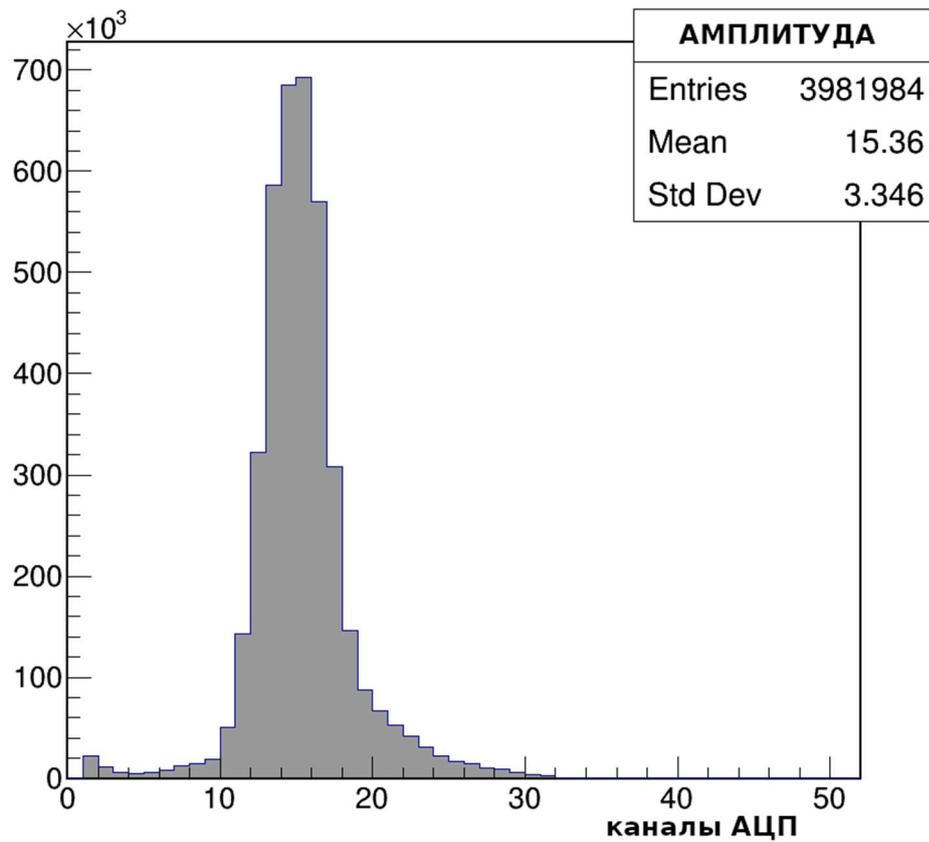
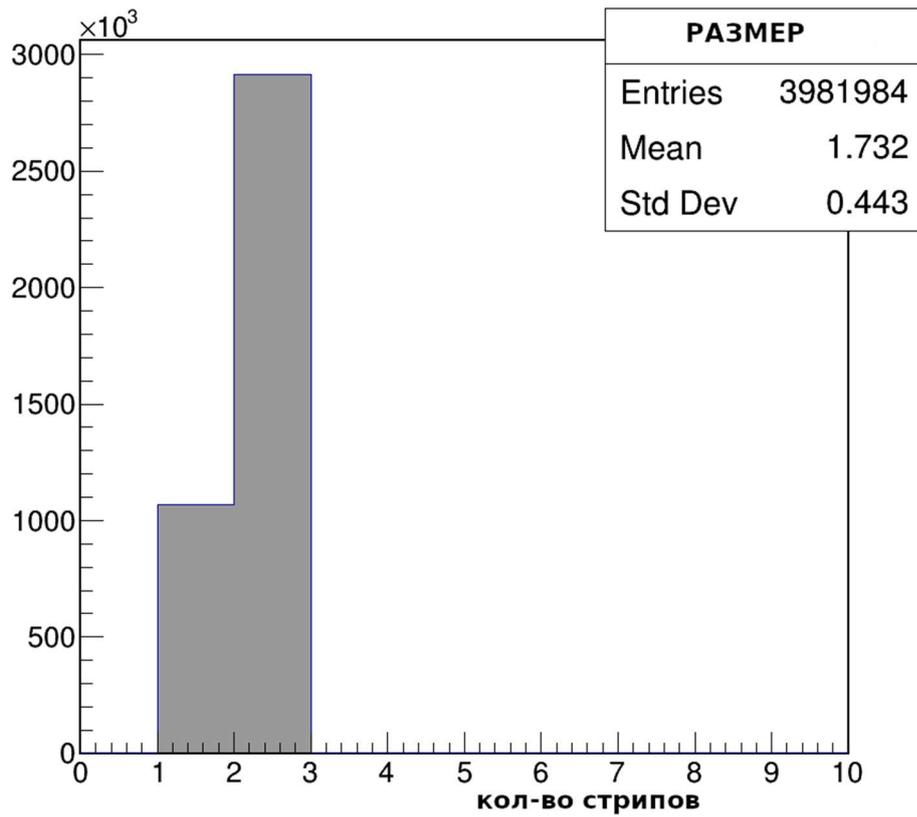


Рисунок 52. Распределение размера восстановленного кластера сработавших стрипов (сверху) и суммарная амплитуда кластера (снизу).

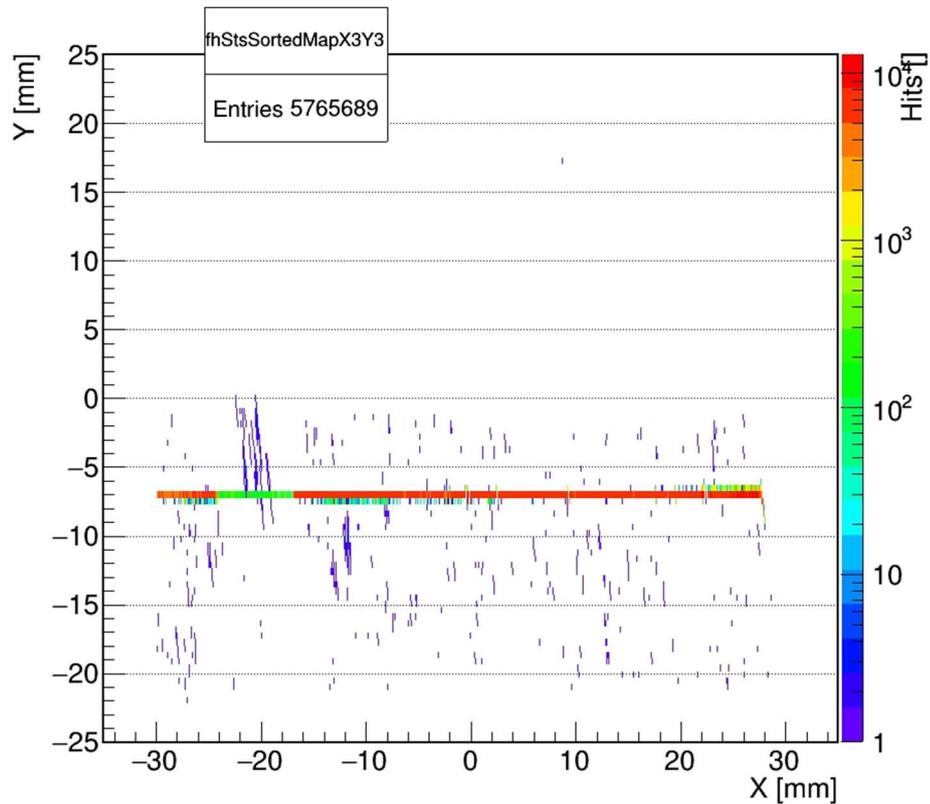
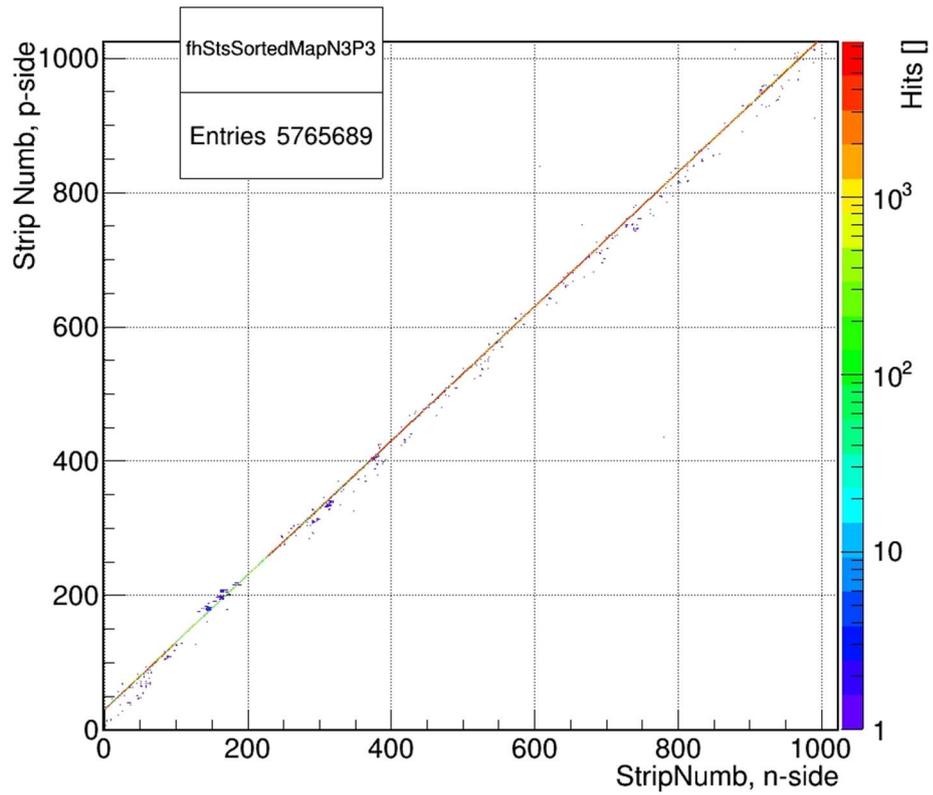


Рисунок 53. Сканирование пучком вдоль поверхности сенсора: сверху — отношение номеров работавших стрипов на N- и P-стороне; снизу — вертикальные и горизонтальные координаты пятна.

Проведено сравнение двух вариантов режима работы шагового двигателя, перемещающего координатный стол с модулем относительно фокусирующей головки лазера: режим полного шага, соответствующий перемещению на 20 мкм, и четверти шага — на 5 мкм. Поскольку шаг стрипов кремниевого сенсора составляет 58 мкм, то при сканировании модуля лазерным излучением (для попадания луча между поверхностной металлизацией стрипов) необходимо вносить поправки в ход координатного стола. Например, в случае режима полного шага процедура перемещения между соседними стрипами состоит из трех шагов (60 мкм), при этом каждый 15-й шаг пропускается из-за необходимости компенсации отклонения положения фокусирующей головки лазера. Тем не менее, из-за несовпадения дискретности движения лазера и ширины стрипа, при сканировании всех 1024 каналов сенсора возникает картина систематического смещения лазерного пятна как в зону металлизации, так и в пограничную зону между соседними стрипами. Результатом является «крестообразное» распределение амплитуд сигнала (Рисунок 54, верхний), вызванное делением заряда между соседними стрипами в разном соотношении. В данном случае лазер был дефокусирован таким образом, чтобы на R-стороне возникали трехстриповые кластеры и, изредка, двухстриповые. Амплитуда сигнала «центрального» стрипа в кластере была около 15 отчетов АЦП, и двух «боковых» — от 2 до 12 (события с амплитудой 1 отсекаются вместе с шумами). Крестообразное распределение амплитуд возникает именно из-за повторяющегося смещения лазерного пятна относительно центра кластера и соответствующего чередующегося возрастания амплитуды сигнала в одном «боковом» стрипе и убывания в другом.

В случае использования режима четверти шага — более сложного и медленного — вносится более точная поправка 5 мкм, что дает более равномерную картину распределения амплитуды сигнала (Рисунок 54, нижний). В этом случае значительного смещения лазерного пятна относительно центра кластера не происходит, и наблюдаются приблизительно симметричные трехстриповые кластеры с амплитудами сигналов «боковых» стрипов около 5 отчетов АЦП. Этот эффект также служит косвенным свидетельством того, что трековый модуль

чувствителен к смещению лазера на 20 мкм и обладает хорошим пространственным разрешением. Кроме того, на Рисунок 54 наблюдаются два неработающих канала: № 44 и № 75. Причиной отсутствия сигналов на этих каналах является отсутствие электрического контакта между стрипом детектора и каналом считывающей микросхемы. Можно также заметить повышенный уровень сигнала на соседних с ними стрипах вследствие отсутствия эффекта деления заряда между соседними каналами.

Таким образом, сканирование модуля на лазерном стенде позволяет получить информацию о неработающих и шумящих стрипах. В частности, у исследованного опытного сенсора на Р-стороне оказалось 11 неработающих стрипов (1%), а на N-стороне — 13 стрипов (1.3%) (см. Рисунок 55 и Таблица 4). Из-за различий в положении базовой линии, коэффициента передачи и калибровки каждой считывающей микросхемы при сканировании модуля в различных областях сканирования наблюдаются двухстриповые и одностриповые кластеры, поэтому на Рисунок 55 в некоторых областях гистограмма заполнена до 4000 событий (одностриповые) и 8000 (двухстриповые), поскольку в случае двухстриповых кластеров события считаются два раза для двух шагов сканирования. Но для целей поиска неработающих стрипов это не имеет значения, поскольку критерием является отсутствие сигнала в стрипе.

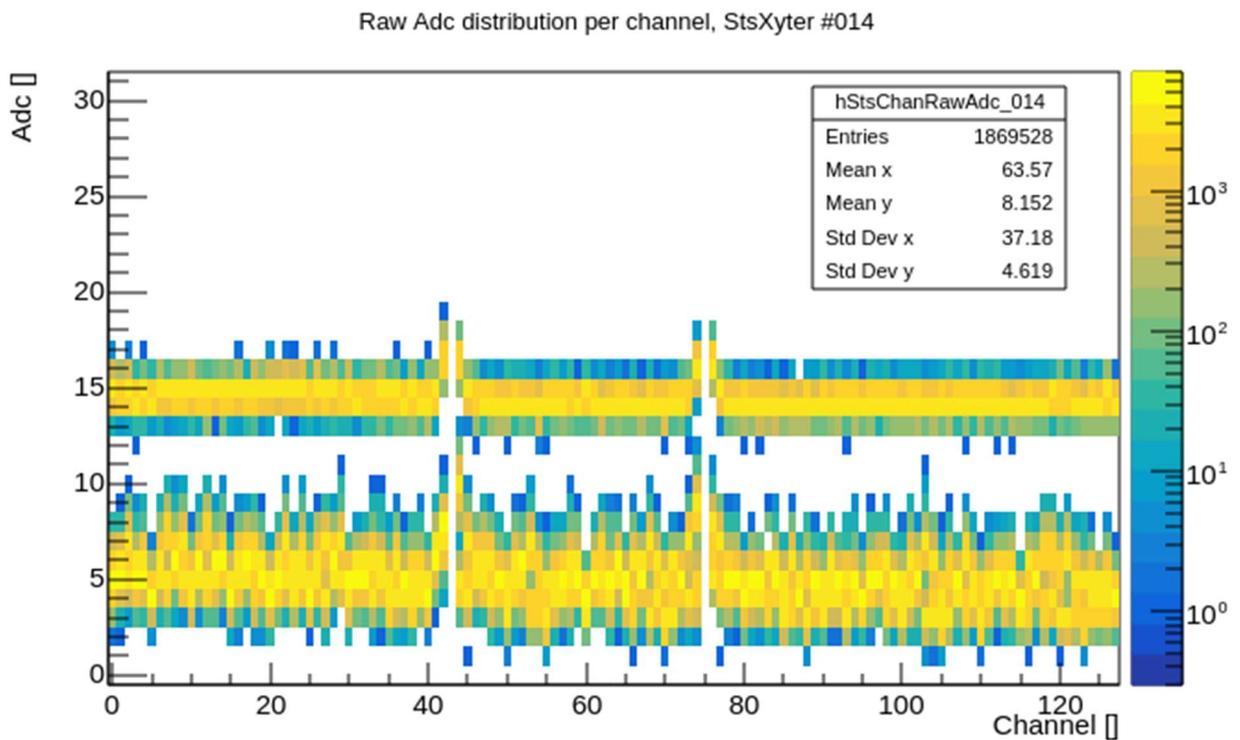
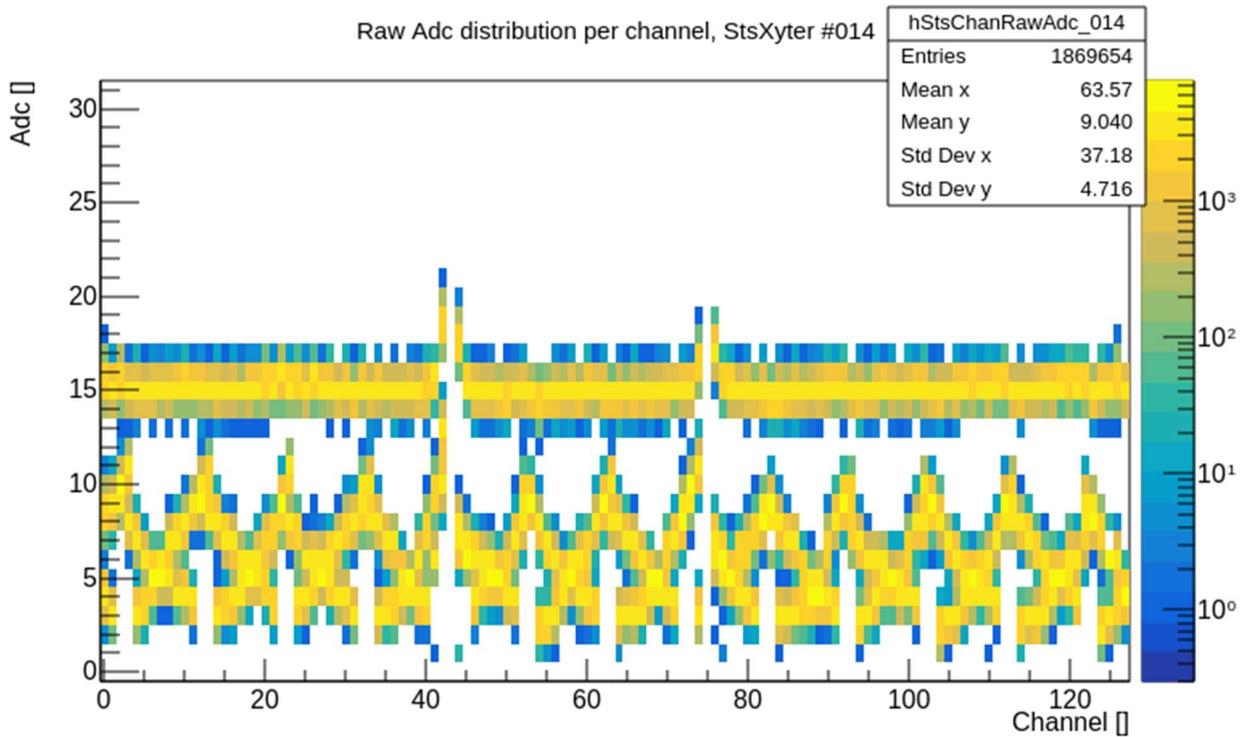
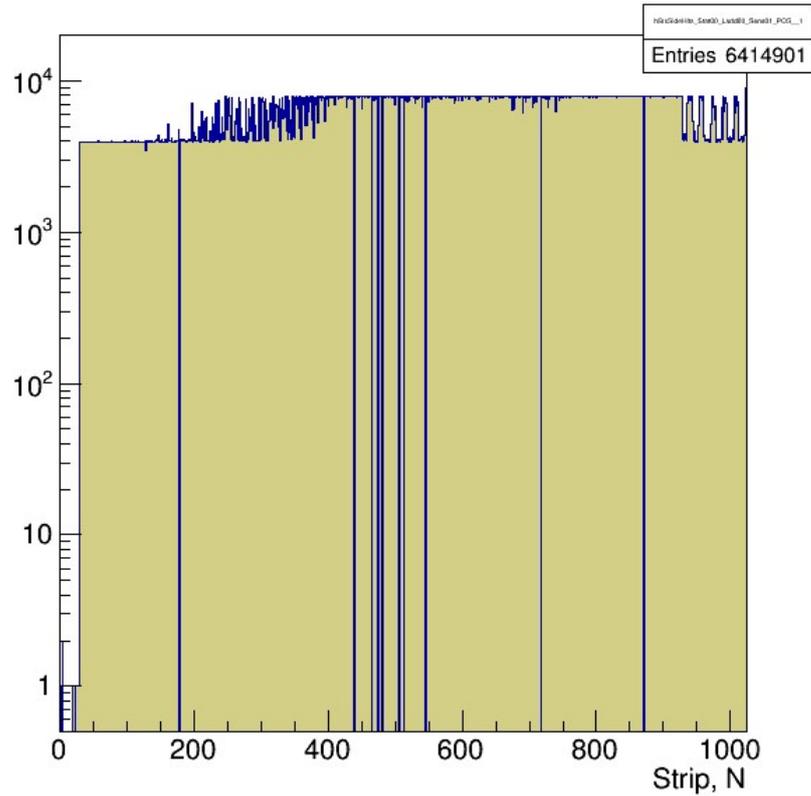


Рисунок 54. Сравнение режимов сканирования для шага перемещения 20 мкм (сверху, а) и 5 мкм (снизу, б). Слева — гистограммы количества хитов в каналах микросхемы считывания, справа — их амплитуды сигналов. На верхнем изображении видны «крестообразные» структуры, возникающие преимущественно из-за деления заряда между соседними стрипами в разном соотношении.

hStsSideHits Stat00, Ladd00 Sens01 POS



hStsSideHits Stat00, Ladd00 Sens01 NEG

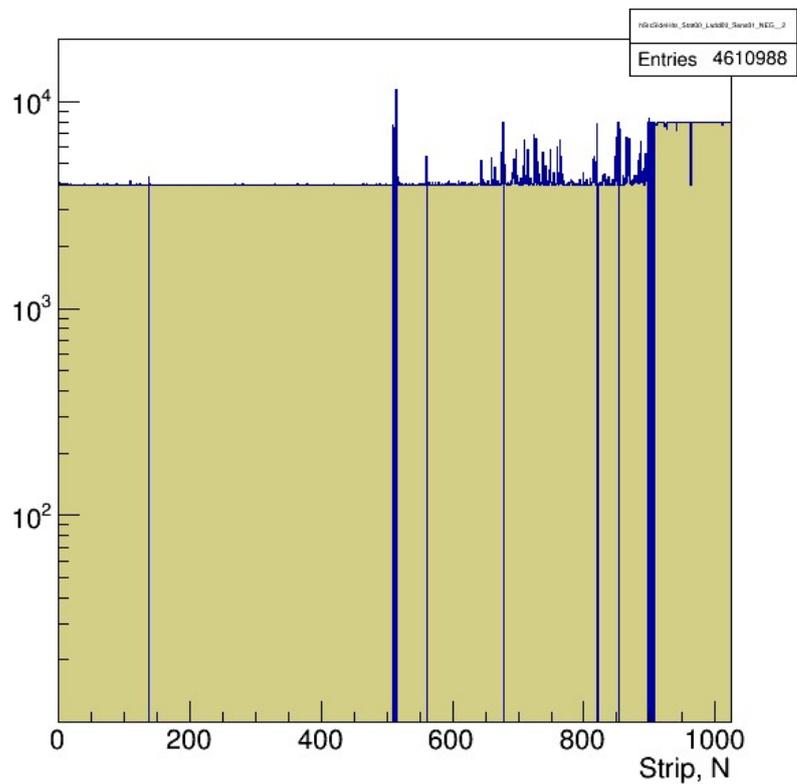


Рисунок 55. Гистограммы количества событий при полном постриповом сканировании для P-стороны (сверху) и N-стороны (снизу). Заполнение гистограммы до 8000 событий соответствует двухстриповому кластеру, до 4000 — одностриповому.

Таблица 4. Таблица неработающих каналов в тестовом образце.

№	Микросхема	E-link	Канал	Стрип	Сторона
1	1	4	50	178	pos
2	3	5	53	439	pos
3	3	5	79	465	pos
4	3	5	89	475	pos
5	3	5	95	481	pos
6	3	5	119	505	pos
7	3	5	121	507	pos
8	3	5	127	513	pos
9	4	2	31	545	pos
10	5	6	78	718	pos
11	6	3	101	871	pos
1	8	4	0	0	neg
2	9	0	118	138	neg
3	11	1	2	510	neg
4	12	6	127	513	neg
5	12	6	125	515	neg
6	12	6	79	561	neg
7	13	2	90	678	neg
8	14	7	75	821	neg
9	14	7	43	853	neg
10	15	3	126	898	neg
11	15	3	122	902	neg
12	15	3	119	905	neg
13	15	3	118	906	neg

Помимо поиска неработающих стрипов, лазерный стенд использовался для отладки и калибровки считывающей электроники детектора. Каждая микросхема считывания имеет 128 независимых каналов. Каждый канал имеет аналоговый тракт, состоящий из зарядочувствительного усилителя, усилителя формирователя и аналого-цифрового преобразователя, а также других элементов. Для аналогового тракта каждого канала используется встроенная в каждую микросхему внутренняя калибровочная цепочка. Однако параметры этой калибровочной цепочки могут варьироваться в разных микросхемах в связи с технологическими допусками на производстве. При этом разброс коэффициентов усиления составляет менее 3%, однако существенный вклад в уровень сигналов дает разница в положении базовой линии для разных калибровочных цепей. На Рисунок 56 показаны восстановленные амплитуды кластеров на обеих сторонах сенсора при проведении пострипового сканирования. Распределение амплитуд кластеров в виде «ступеней» вызвано разницей в калибровках между разными микросхемами, используемыми для чтения сигналов с одной из сторон сенсора.

Для введения поправок, компенсирующих этот эффект, использовался следующий алгоритм: 1) определение положений пиков сигналов в стрипах; 2) вычисление среднего для каждой микросхемы считывания положения пиков сигналов; 3) вычисление индивидуального коэффициента пересчета функций отклика для каждой микросхемы, корректирующего к средней для всего модуля амплитуде. В результате для исследованного модуля среднеквадратичное отклонение амплитуд кластеров (σ) сократилось на 20% на N-стороне и на 30% на P-стороне (см. Рисунок 57, Рисунок 58 и Рисунок 59).

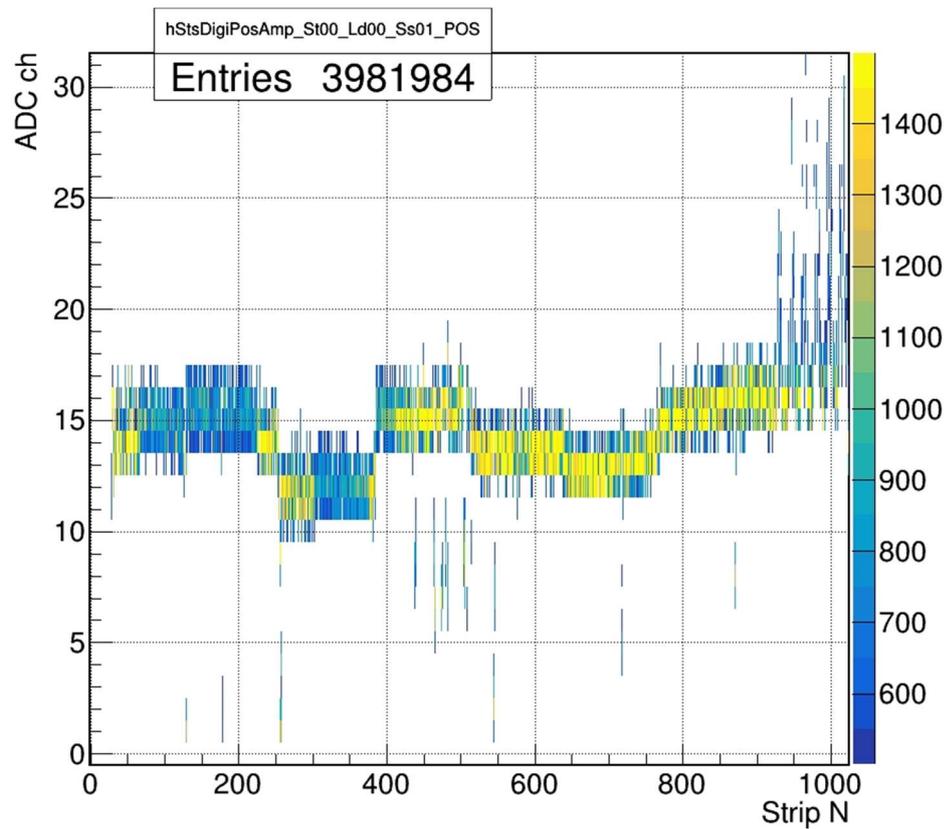
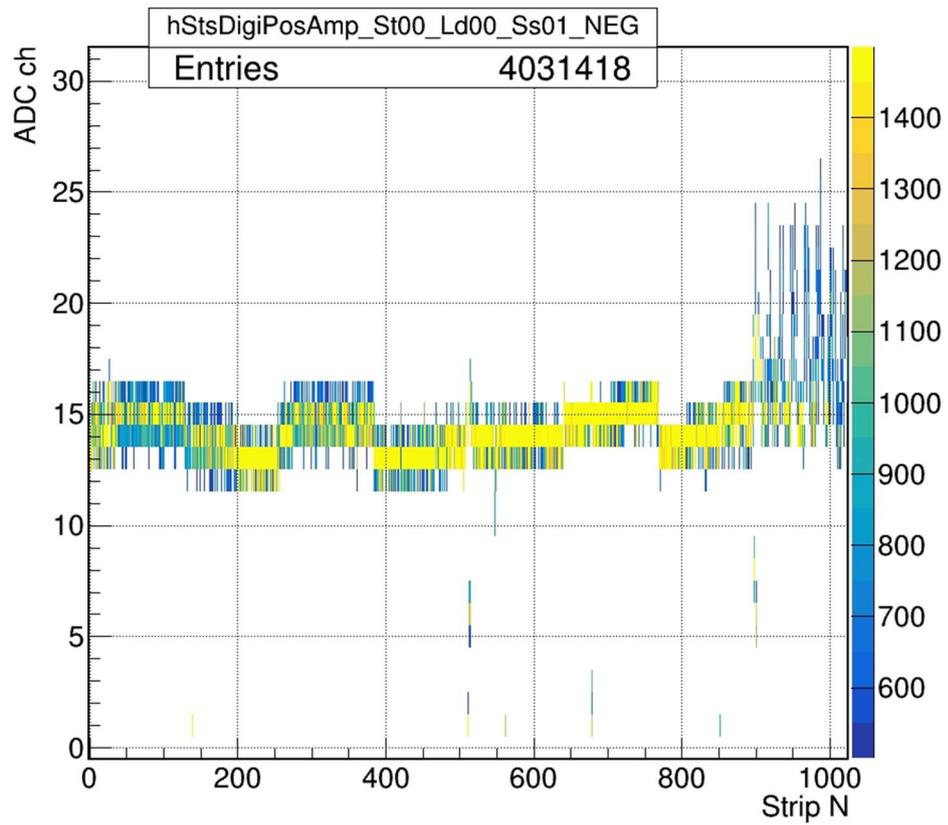


Рисунок 56. Амплитуды сигналов (суммарная амплитуда кластера) на обеих сторонах сенсора в зависимости от номера стрипов, за который принимается центр кластера.

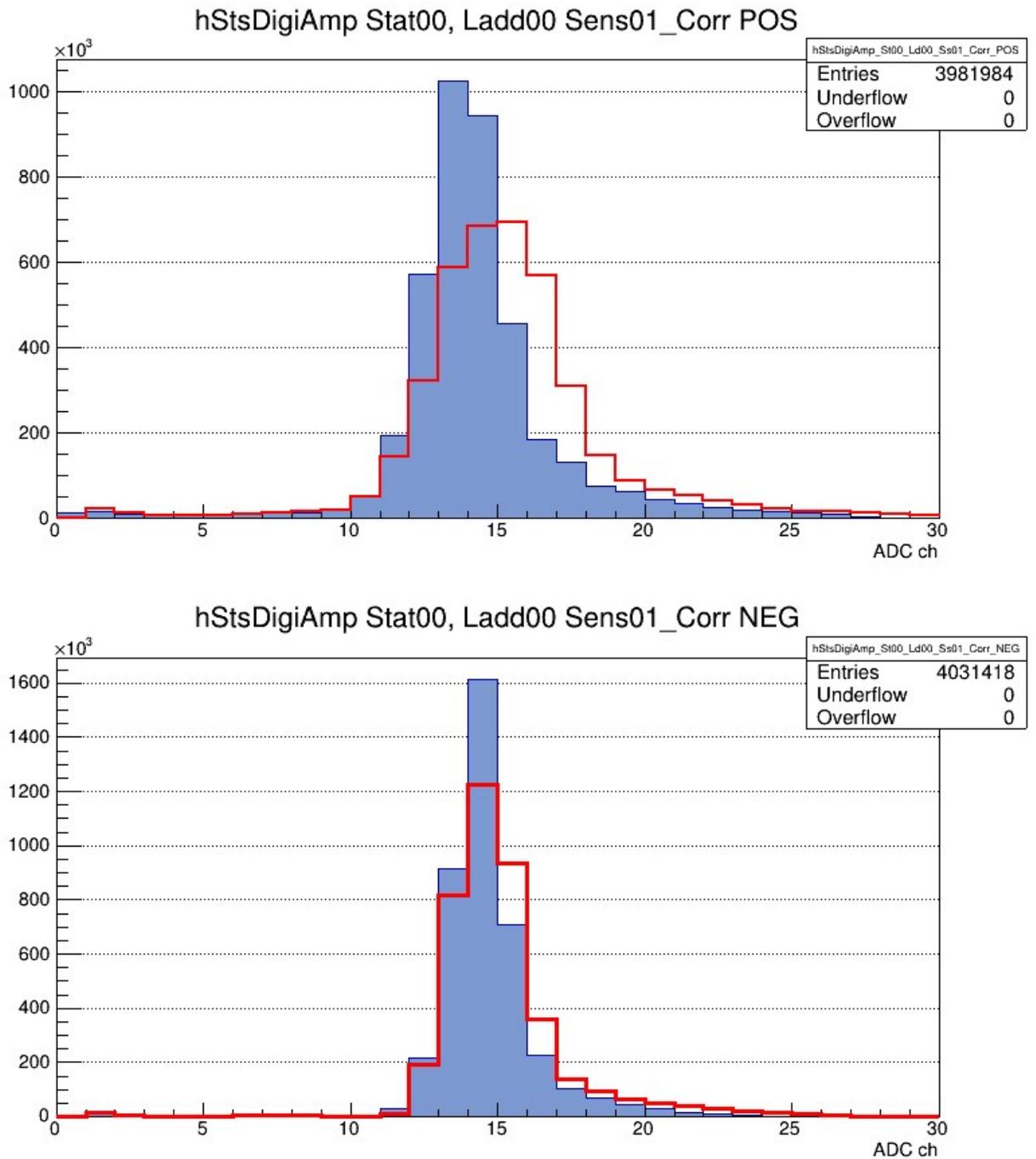


Рисунок 57. Распределения амплитуд сигналов в кластерах P-стороны (вверху) и N-стороны (снизу): после корректировки (синяя заполненная гистограмма) и до корректировки (гистограмма красной линией).

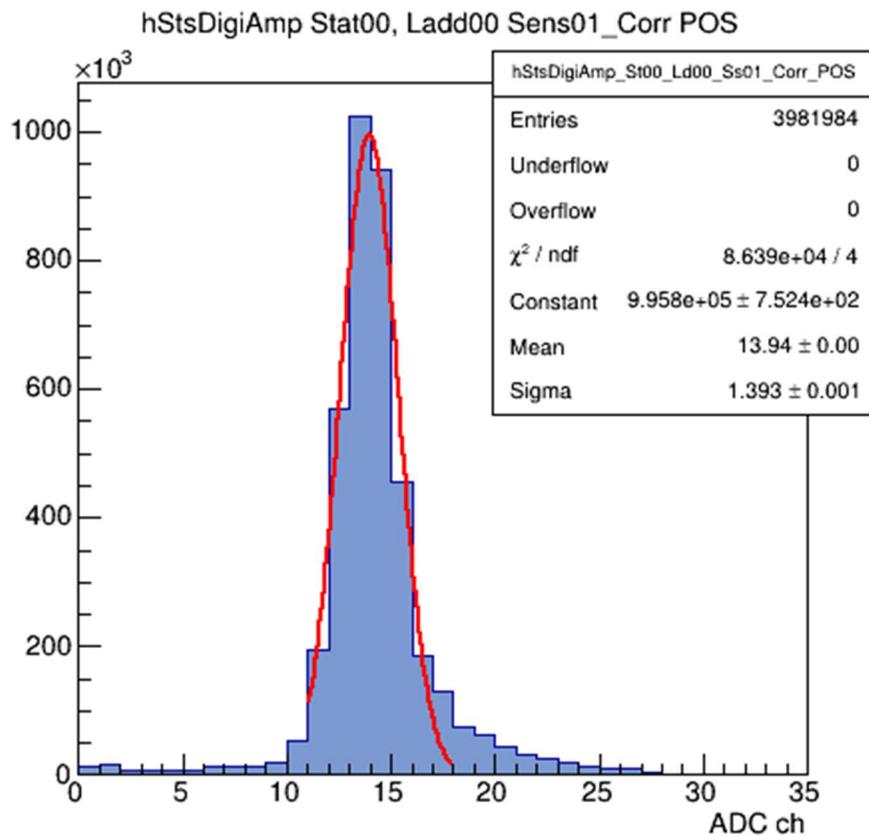
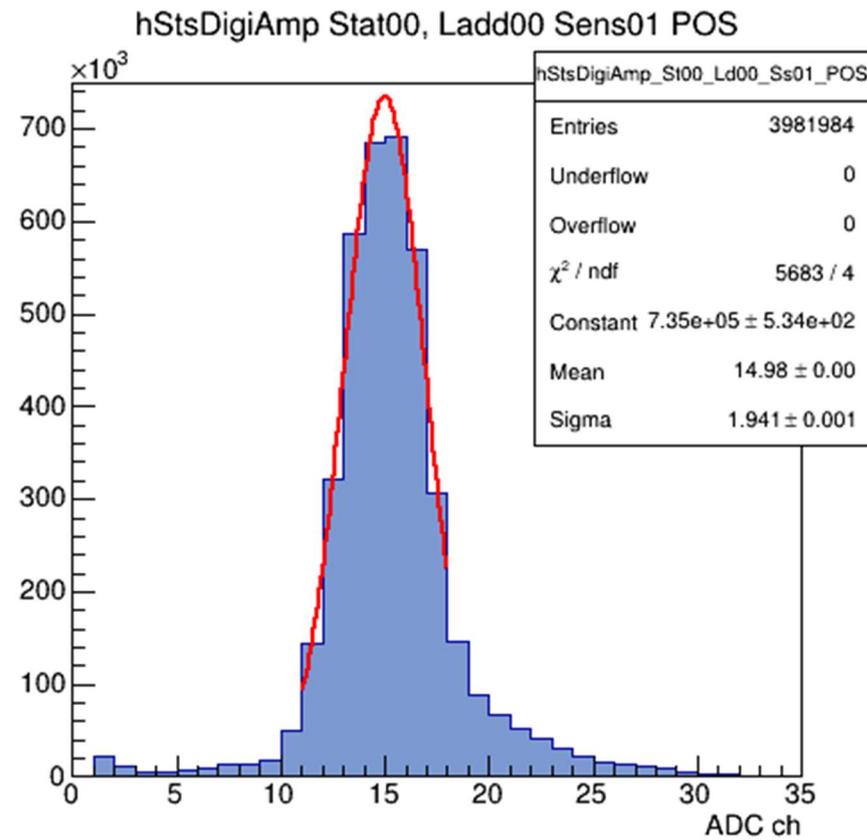


Рисунок 58. Распределение амплитуд кластеров на P-стороне (синяя заполненная гистограмма) и его аппроксимация (красная линия) до корректировки (сверху) и после корректировки (снизу).

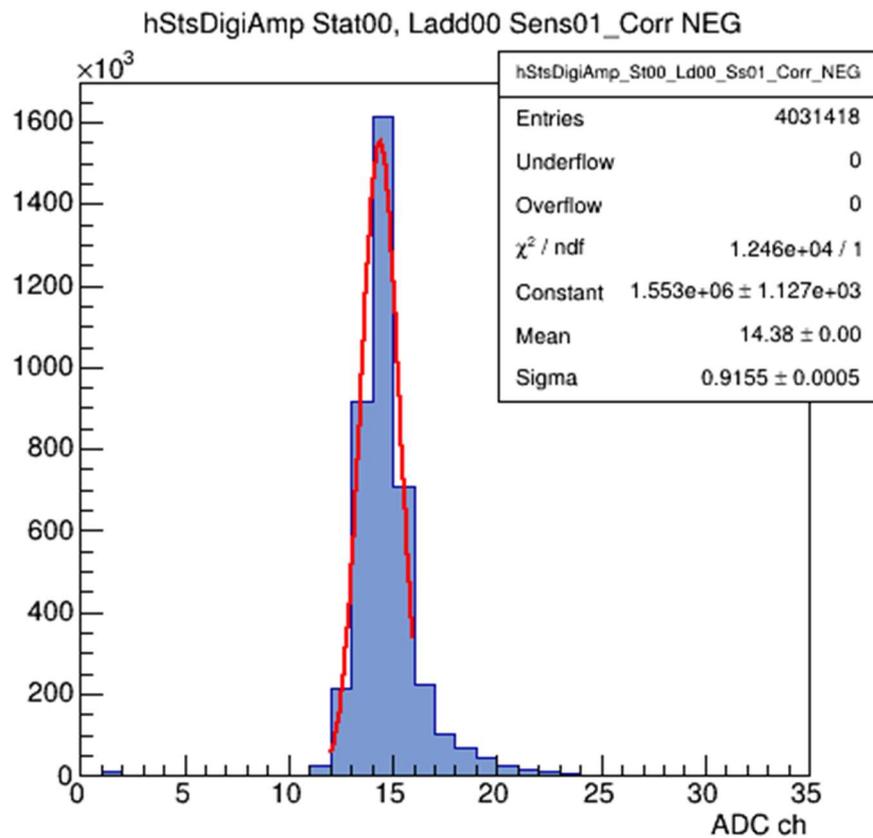
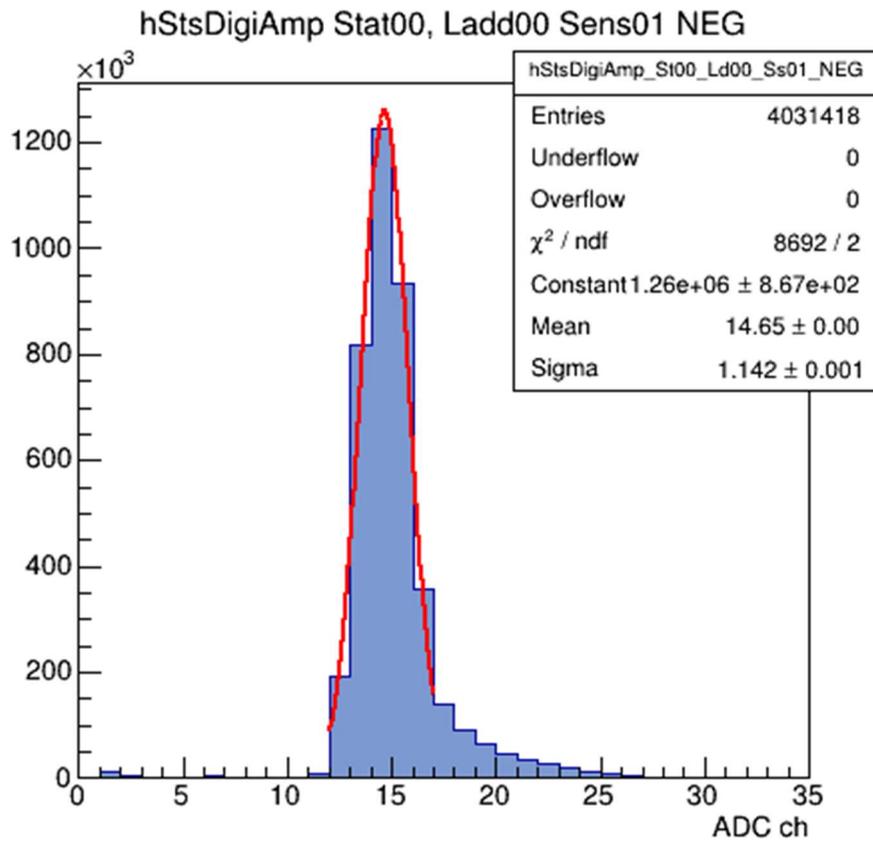


Рисунок 59. Распределение амплитуд кластеров на N-стороне (синяя заполненная гистограмма) и его аппроксимация (красная линия) до корректировки (сверху) и после корректировки (снизу).

Благодаря характеристикам стенда и широте возможности настройки параметров лазера, стенд чувствителен не только к «физическим» неисправностям трековых модулей, но и к неисправностям в тракте считывания. Лазерный стенд уже положительно зарекомендовал себя при отладке ПО для систем считывания, обработки данных и мониторинга.

Спектр встречавшихся неисправностей довольно широк, приведем несколько примеров.

Помимо нерабочих каналов считывания, которые являются самой распространенной «физической» неисправностью трековых модулей, также могут встречаться ошибки сборки модулей и заводской брак компонентов. К примеру, при полном скане, показанном на Рисунок 53, был подтвержден брак считывающей микросхемы, подключенной к стрипам 128 – 255, по провалам в количестве событий.

С этой точки зрения в тракте считывания больше всего неисправностей было связано с первичной сортировкой данных. Например, происходила всех потеря данных если одновременно со всех e-link поступает менее двух событий, в частности при крайне удачной фокусировке лазера, когда срабатывают по одному стрипу на сторону, или при неисправности стрипов или микросхем считывания. Или, в качестве другого примера, наблюдались провалы в скорости счета событий при периоде лазерных импульсов, кратном периоду внутреннего тактового генератора DPB (см. Рисунок 60), из-за чего некорректно присваивалась временная метка.

Hits per second & channel in StsXyter #004

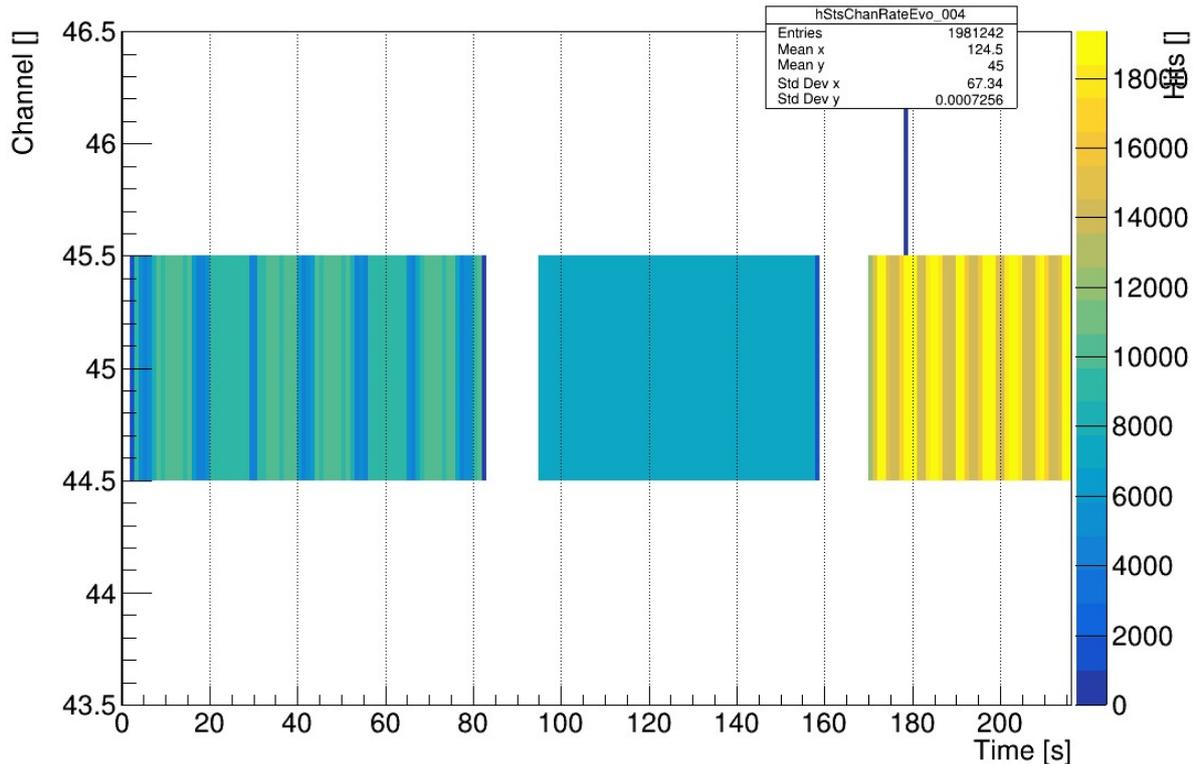


Рисунок 60. Скорость счета событий в течение времени. Лазер был сфокусирован на один стрип и стоял на месте. 0-82 секунд: скорость счета при периоде импульсов 102.4 мкс, равном периоду микрослайсов, наблюдаются провалы каждые 12 с. 95-155 секунд: промежуточная частота (период 112.4 мкс), провалы не наблюдаются. 170-230 секунд: скорость счета при периоде импульсов 51.2 мкс, наблюдаются провалы.

4.4. Выводы

В качестве замены дорогостоящим ускорителям и радионуклидным источникам было решено использовать лазерное излучение. Лазерная установка для тестирования кремниевых трековых модулей для КТС эксперимента VM@N полностью собрана, все ее компоненты протестированы и откалиброваны.

Набранные данные позволяют судить о правильной работе методики. Стенд позволяет варьировать в широких пределах следующие характеристики лазерного излучения: частоту (от 1 Гц до 1 МГц), размер пятна засветки, энергию сигнала с помощью аттенюатора, амплитуды и длительности импульса тока. Таким образом, лазерный стенд имитирует прохождение ионизирующих частиц через полупроводниковый детектор с широкими возможностями по настройке сигнала.

Стенд оптимизирован для проведения тестирования трековых модулей кремниевой трековой системы VM@N. Продемонстрирована возможность идентификации неработающих каналов, а также проведения калибровки считывающей электроники детектора при помощи лазерных импульсов.

Возможность широкой настройки позволяет тестировать трековые модули и системы чтения и обработки данных в нестандартных условиях, выявляя также уязвимости и устойчивость работы как электроники, так и ПО.

Также несмотря на то, что установка ориентирована на тестирование модулей КТС VM@N, она принципиально подходит и для тестирования других кремниевых детекторов с сопоставимыми габаритными размерами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Кремниевые детекторы хорошо зарекомендовали себя в экспериментах физики частиц своими физическими характеристиками, обеспечивающими высокую скорость регистрации, радиационную стойкость и компактность. Эти свойства позволяют их применять в условиях даже крайне ограниченного свободного пространства и наиболее близко к области взаимодействия частиц, что повышает точность физических методик, лежащих в основе эксперимента, а также долго и продуктивно работать в условиях высоких светимостей, что незаменимо в современных крупных экспериментах физики высоких энергий. В то же время вышесказанные свойства кремниевых детекторов также задают высокую планку для электроники считывания и системы чтения в целом, что приводит к поиску новых подходов и решений в этой области.

Каждая трековая система каждого вышеуказанного эксперимента физики частиц является уникальной, и в каждой из них применяются специально разработанные кремниевые микростриповые детекторы, что подтверждает их надежность и универсальность. При всем при этом в каждой системе свой подход к системе чтения, и считывающая электроника сильно отличается друг от друга. Но особенно интересен потоковый подход к системе чтения, как в эксперименте CLAS12 с его потоковой системой чтения кремниевого вершинного трекера, основанной на микросхеме FSSR2, или экспериментах CBM@FAIR и BM@N.

Потоковый подход к системе чтения позволяет считывать все данные, поступающие с сенсоров, независимо от остальных детекторных систем, и необходимость в этом повышается с ростом светимости и множественности событий, что в особенности относится к экспериментам по столкновению тяжелых ионов. К сожалению, это также повышает требования к электронике и ее сложность, что, как правило, ухудшает ее шумовые характеристики и приводит к высокому тепловыделению, что уже в свою очередь усложняет систему охлаждения. Также возникает необходимость временной синхронизации всех каналов считывания с «часами системы». Но несмотря на то, что данный подход

сложнее, чем классический триггерный, и на данный момент мало распространен, он признается более универсальным решением для экспериментов физики высоких энергий в случае больших загрузок и, тем более, в случае отсутствия критерия выработки сигнала запуска.

Кремниевая Трековая Система эксперимента $BM@N$ инновационна для физики столкновения тяжелых ионов и обладает рядом особенностей, из которых в первую очередь можно выделить следующие.

Во-первых, она основана на двухсторонних кремниевых микростриповых сенсорах, которые до этого времени применялись редко, и которые позволяют получать одновременно две координаты при том же используемом объеме кремния, что особенно важно при невысоких энергиях продуктов взаимодействия и в условиях недостатка пространства в чувствительном объеме детектора.

Во-вторых, самотриггирующаяся считывающая электроника, основанная на микросхемах STS-XYTER, обладает высокой степенью параллелизма и независимости от внешних систем, что позволяет считывать максимальное количество информации с сенсоров в условиях высоких радиационных загрузок и невозможности качественного выбора внешнего критерия выработки сигнала запуска. В дополнение к этому, данная считывающая электроника имеет возможность также работать в триггерном режиме, что позволяет ее применять гибко в более широком спектре задач. В-третьих, потоковая система сбора данных с последующей обработкой данных «на лету» в режиме онлайн, основанная на вышеуказанной самотриггирующейся считывающей электронике, которая обеспечивает сбор и обработку максимального количества данных от сенсоров, а также управляет электроникой и синхронизируется с остальными детекторными системами, что необходимо, поскольку остальные системы в $BM@N$ не являются потоковыми и работают по триггеру. Как видно из предыдущей главы, нельзя сказать, что вышеуказанное оборудование является абсолютно новым и построенным на новых принципах, но при этом также видно, что оно применялось весьма ограниченно и не одновременно в одной системе.

Поскольку КТС основана на уникальном оборудовании, которое до этого времени применялось ограниченно и в других условиях, необходимо тщательное и как можно более всестороннее тестирование детекторных модулей и тракта чтения КТС. Несмотря на то, что и сенсоры, и считывающая электроника, и оборудование системы сбора данных можно протестировать на специальном оборудовании или с помощью внутренних калибровочных цепей, отдельное их тестирование не является всесторонним. Наиболее корректным методом тестирования является проверка на пучке частиц в условиях, максимально приближенным к условиям эксперимента $VM@N$. Но в тот же время этот метод является дорогим и ресурсоемким по времени и трудозатратам. Также можно тестировать на радиоактивном источнике, но, хоть этот метод и проще, чем тестирование на ускорителе, это требует обращения с радиоактивными материалами и поиска достаточно интенсивных источников. В качестве альтернативы этим методам, для КТС создан лазерный стенд для тестирования трековых модулей, который имитирует с помощью лазерного излучения прохождение частицы через кремниевый сенсор.

На раннем этапе прототипирования трековых модулей и систем чтения и синхронизации КТС $VM@N$ проведены их испытания на пучках электронов. Релятивистские электроны не идеально подходят в качестве частиц для тестирования, поскольку они теряют энергию путем нескольких механизмов, в основном ионизационным и радиационным. Это приводит к сильным различиям сигналов в кремниевых детекторах в зависимости от энергии падающих электронов. Но при этом электроны относительно легко накапливать и легко ускорять в ускорителях, что приводит к их доступности.

В ходе пучковых испытаний протестированы системы синхронизации времени и сбора данных и микросхем STS-XYTER v.2.0 в условиях повышенного радиационного фона. На основе полученных результатов разработана новая версия микросхемы STS-XYTER v.2.1, с оптимизированными шумовыми характеристиками, дополнительным функционалом мониторинга параметров и исправлениями ошибок в работе цифровой части микросхемы.

Синхронизация времени между несколькими микросхемами электроники считывания, подключенными к разным платам синхронизации, была стабильной. Также протестирована работа системы считывания в потоковом режиме сбора данных.

Для сокращения времени и затрат на проведение испытаний принято решение о моделировании прохождения частиц через детектор другими способами, что потребовало создания лазерной установки для проверки трековых модулей.

Лазерная установка для тестирования кремниевых трековых модулей для КТС эксперимента VM@N полностью собрана, все ее компоненты протестированы и откалиброваны.

Набранные данные позволяют судить о правильной работе методики. Стенд позволяет варьировать в широких пределах следующие характеристики лазерного излучения: частоту (от 1 Гц до 1 МГц), размер пятна засветки, энергию сигнала с помощью аттенюатора, амплитуды и длительности импульса тока. Таким образом, лазерный стенд имитирует прохождение ионизирующих частиц через полупроводниковый детектор с широкими возможностями по настройке сигнала.

Стенд оптимизирован для проведения тестирования трековых модулей кремниевой трековой системы VM@N. Продемонстрирована возможность идентификации неработающих каналов, а также проведения калибровки считывающей электроники детектора при помощи лазерных импульсов.

Возможность широкой настройки позволяет тестировать трековые модули и системы чтения и обработки данных в нестандартных условиях, выявляя также уязвимости и устойчивость работы как электроники, так и программного обеспечения.

Также несмотря на то, что установка ориентирована на тестирование модулей КТС VM@N, она принципиально подходит и для тестирования других кремниевых детекторов с сопоставимыми габаритными размерами.

Таким образом, в результате проведения исследований создано

универсальное оборудование для тестирования кремниевых трековых модулей и всего тракта чтения, обработки данных и мониторинга. Лазерная установка уже использовалась для тестирования модулей, но также ее широкие возможности настройки использовались для менее стандартных проверок, что было особенно важно для тестирования программного обеспечения тракта чтения. Полученные при помощи лазерного стенда данные уже внесли вклад в разработку как программного, так и аппаратного обеспечения систем чтения, обработки данных и мониторинга трековых модулей кремниевой трековой системы эксперимента $BM@N$.

Благодарности

Автор считает своим долгом выразить глубокую признательность своему научному руководителю доктору физико-математических наук М. М. Меркину за руководство, поддержку и помощь на всех этапах выполнения работы.

Соискатель хотел бы выразить свою благодарность коллективу научно-методического отдела кремниевых трековых систем Лаборатории физики высоких энергий имени В. И. Векслера и А. М. Балдина Объединенного Института Ядерных Исследований за оказанную помощь и поддержку, в особенности Д. В. Дементьеву, М. О. Шитенкову и В. В. Леонтьеву за ценные обсуждения в ходе совместных работ, А. Д. Шереметьеву и А. Л. Воронину за советы при сборке экспериментальной установки.

Также автор выражает благодарность коллективу лаборатории детекторных систем и электроники отдела экспериментальной физики высоких энергий Научно-исследовательского института ядерной физики имени Д. В. Скобельцына Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, в особенности Д. Е. Карманову, М. Г. Королеву и А. Г. Воронину за ценные обсуждения и советы при создании экспериментальной установки.

Соискатель отдельно хотел бы поблагодарить преподавательский состав кафедры общей ядерной физики физического факультета МГУ за формирование у автора современных представлений о ядерной физике.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kemmer J. Fabrication of low noise silicon radiation detectors by the planar process / J. Kemmer // Nuclear Instruments and Methods. – 1980. – Vol. 169. – № 3. – P. 499-502.
2. A silicon counter telescope to study short-lived particles in high-energy hadronic interactions / B. Hyams, U. Koetz, E. Belau [et al.] // Nuclear Instruments and Methods In Physics Research. – 1983. – Vol. 205. – № 1-2.
3. Performance of the DELPHI detector / P. Abreu, W. Adam, T. Adye [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 1996. – Vol. 378. – № 1-2.
4. Live target performances in coherent production experiment / G. Bellini, M. Di Corato, P. F. Manfredi, G. Vegni // Nuclear Instruments and Methods. – 1973. – Vol. 107. – № 1. – P. 85-93.
5. Lutz G. Semiconductor Radiation Detectors / G. Lutz // Semiconductor Radiation Detectors. – 2007. – Semicond. Radiat. Detect.
6. The D0 silicon microstrip tracker / S. N. Ahmed, R. Angstadt, M. Aoki [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2011. – Vol. 634. – № 1.
7. Observation of the top quark / S. Abachi, B. Abbott, M. Abolins [et al.] // Physical Review Letters. – 1995. – Vol. 74. – № 14.
8. The upgraded DØ detector / V. M. Abazov, B. Abbott, M. Abolins [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2006. – Vol. 565. – № 2. – P. 463-537.
9. A Beginners guide to the SVXII / R. Yarema, I. Kipnis, S. Kleinfelder [et al.]. – Batavia, IL, 1994. – 32 p.
10. The ATLAS experiment at the CERN large hadron collider / G. Aad, E. Abat, J. Abdallah [et al.] // Journal of Instrumentation. – 2008. – Vol. 3. – № 8.

11. Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC / G. Aad, T. Abajyan, B. Abbott [et al.] // *Physics Letters, Section B: Nuclear, Elementary Particle and High-Energy Physics*. – 2012. – Vol. 716. – № 1.
12. Operation and performance of the ATLAS semiconductor tracker / G. Aad, B. Abbott, J. Abdallah [et al.] // *Journal of Instrumentation*. – 2014. – Vol. 9. – № 8.
13. The ATLAS Inner Detector commissioning and calibration / The ATLAS Collaboration, G. Aad, B. Abbott [et al.] // *European Physical Journal C*. – 2010. – Vol. 70. – № 3.
14. The barrel modules of the ATLAS semiconductor tracker / A. Abdesselam, T. Akimoto, P. P. Allport [et al.] // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. – 2006. – Vol. 568. – № 2.
15. The silicon microstrip sensors of the ATLAS semiconductor tracker / A. Ahmad, Z. Albrechtskirchinger, P. P. Allport [et al.] // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. – 2007. – Vol. 578. – № 1.
16. Radiation hard silicon detectors - Developments by the RD48 (ROSE) collaboration / G. Lindström, M. Ahmed, S. Albergo [et al.] // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. – 2001. – Vol. 466.
17. Design and performance of the ABCD3TA ASIC for readout of silicon strip detectors in the ATLAS semiconductor tracker / F. Campabadal, C. Fleta, M. Key [et al.] // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. – 2005. – Vol. 552. – № 3.
18. The CLAS12 Spectrometer at Jefferson Laboratory / V. D. Burkert, L. Elouadrhiri, K. P. Adhikari [et al.] // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. – 2020. – Vol. 959.

19. McAllister R. W. Elastic scattering of 188-Mev electrons from the proton and the alpha particle / R. W. McAllister, R. Hofstadter // *Physical Review*. – 1956. – Vol. 102. – № 3. – P. 851-856.
20. Observed behavior of highly inelastic electron-proton scattering / M. Breidenbach, J. I. Friedman, H. W. Kendall [et al.] // *Physical Review Letters*. – 1969. – Vol. 23. – № 16.
21. Kuhn S. E. Spin structure of the nucleon-status and recent results / S. E. Kuhn, J. P. Chen, E. Leader // *Progress in Particle and Nuclear Physics*. – 2009. – Vol. 63. – № 1.
22. Leemann C. W. The continuous electron beam accelerator facility: CEBAF at the jefferson laboratory / C. W. Leemann, D. R. Douglas, G. A. Krafft // *Annual Review of Nuclear and Particle Science*. – 2001. – Vol. 51. – № 1.
23. The CEBAF large acceptance spectrometer (CLAS) / B. A. Mecking, G. Adams, S. Ahmad [et al.] // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. – 2003. – Vol. 503. – № 3.
24. Burkert V. D. Jefferson Lab at 12 GeV: The science program / V. D. Burkert // *Annual Review of Nuclear and Particle Science*. – 2018. – Vol. 68.
25. The CLAS12 superconducting magnets / R. Fair, N. Baltzell, R. Bachimanchi [et al.] // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. – 2020. – Vol. 962.
26. The CLAS12 Silicon Vertex Tracker / M. A. Antonioli, N. Baltzell, S. Boyarinov [et al.] // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. – 2020. – Vol. 962.
27. The CLAS12 Micromegas Vertex Tracker / A. Acker, D. Attié, S. Aune [et al.] // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. – 2020. – Vol. 957.
28. The CLAS12 Central Time-of-Flight system / D. S. Carman, G. Asryan, V. Baturin [et al.] // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators,*

Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2020. – Vol. 960.

29. The CLAS12 Central Neutron Detector / P. Chatagnon, J. Bettane, M. Hoballah [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2020. – Vol. 959.

30. Gotra Y. Silicon Vertex Tracker for CLAS12 experiment / Y. Gotra // Proceedings of Science. – 2016. – Vol. 287.

31. FSSR2, a self-triggered low noise readout chip for silicon strip detectors / V. Re, M. Manghisoni, L. Ratti [et al.] // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 2006. – Vol. 53.

32. Dinardo M. A New Micro-Strip Tracker for the New Generation of Experiments at Hadron Colliders / Dinardo M. – Milan : Universita Degli Studi di Milano, 2005. – 158 p.

33. Radiation hardness test of FSSR, a multichannel, mixed signal chip for microstrip detector readout / L. Ratti, M. Manghisoni, V. Re [et al.] // Proceedings of the European Conference on Radiation and its Effects on Components and Systems, RADECS. – 2005.

34. The CLAS12 Trigger System / B. Raydo, S. Boyarinov, A. Celentano [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2020. – Vol. 960.

35. Chiral and deconfinement aspects of the QCD transition / A. Bazavov, T. Bhattacharya, M. Cheng [et al.] // Physical Review D - Particles, Fields, Gravitation and Cosmology. – 2012. – Vol. 85. – № 5.

36. Fukushima K. The phase diagram of dense QCD / K. Fukushima, T. Hatsuda // Reports on Progress in Physics. – 2011. – Vol. 74. – № 1.

37. Decoding the phase structure of QCD via particle production at high energy / A. Andronic, P. Braun-Munzinger, K. Redlich, J. Stachel // Nature. – 2018. – Vol. 561. – № 7723.

38. Hadron formation in relativistic nuclear collisions and the QCD phase diagram / F. Becattini, M. Bleicher, T. Kollegger [et al.] // Physical Review Letters. – 2013. – Vol. 111. – № 8.

39. NICA - Nuclotron-based Ion Collider fAcility. – URL: <https://nica.jinr.ru/physics.php> (date accessed: 04.06.2022). – Text : electronic.
40. Dynamical phase trajectories for relativistic nuclear collisions / I. C. Arsene, L. V. Bravina, W. Cassing [et al.] // *Physical Review C - Nuclear Physics*. – 2007. – Vol. 75. – № 3.
41. Braun-Munzinger P. Chemical freeze-out and the QCD phase transition temperature / P. Braun-Munzinger, J. Stachel, C. Wetterich // *Physics Letters B*. – 2004. – Vol. 596. – № 1-2. – P. 61-69.
42. Andronic A. The horn, the hadron mass spectrum and the QCD phase diagram - the statistical model of hadron production in central nucleus-nucleus collisions / A. Andronic, P. Braun-Munzinger, J. Stachel // *Nuclear Physics A*. – 2010. – Vol. 834. – № 1-4.
43. pp and $\pi\pi$ intensity interferometry in collisions of Ar+KCl at 1.76A GeV / G. Agakishiev, A. Balanda, B. Bannier [et al.] // *The European Physical Journal A* 2011 47:5. – 2011. – Vol. 47. – № 5. – P. 1-8.
44. Fuchs C. Modelization of the EOS / C. Fuchs, H. H. Wolter // *European Physical Journal A*. – 2006. – Vol. 30.
45. Danielewicz P. Determination of the equation of state of dense matter / P. Danielewicz, R. Lacey, W. G. Lynch // *Science*. – 2002. – Vol. 298. – № 5598.
46. Evidence for a soft nuclear equation-of-state from kaon production in heavy-ion collisions / C. Sturm, I. Böttcher, M. Dębowski [et al.] // *Physical Review Letters*. – 2001. – Vol. 86. – № 1.
47. Technical design report the Silicon Tracking System as part of the hybrid tracker of the BM@N experiment / A. V. Baranov, D. Dementev, V. Elsha [et al.]. – Dubna : Издательский отдел ОИЯИ Дубна, 2020. – 101 p.
48. Challenges in QCD matter physics --The scientific programme of the Compressed Baryonic Matter experiment at FAIR / T. Ablyazimov, A. Abuhoza, R. P. Adak [et al.] // *European Physical Journal A*. – 2017. – Vol. 53. – № 3.
49. Technical Design Report for the CBM Silicon Tracking System (STS) - GSI

Repository / J. Heuser, W. Müller, V. Pugatch [et al.]. – 2013. – 167 p.

50. The Silicon Tracking System as a Part of Hybrid Tracker of BM@N Experiment / D. Dementev, A. Baranov, V. Elsha [et al.] // *Physics of Particles and Nuclei*. – 2022. – Vol. 53. – № 2. – P. 197-202.

51. Status of STS module assembly at JINR / A. Sheremetev, N. Sukhov, D. Dementev [et al.] // *CBM Progress Report*. – 2020. – P. 33.

52. Kasinski K. Front-end readout electronics considerations for Silicon Tracking System and Muon Chamber / K. Kasinski, R. Kleczek, R. Szczygiel // *Journal of Instrumentation*. – 2016. – Vol. 11. – № 02. – P. C02024.

53. Characterization of the STS/MUCH-XYTER2, a 128-channel time and amplitude measurement IC for gas and silicon microstrip sensors / K. Kasinski, A. Rodriguez-Rodriguez, J. Lehnert [et al.] // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. – 2018. – Vol. 908. – P. 225-235.

54. A protocol for hit and control synchronous transfer for the front-end electronics at the CBM experiment / K. Kasinski, R. Szczygiel, W. Zabolotny [et al.] // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. – 2016. – Vol. 835. – P. 66-73.

55. Moreira P. The GBT, a proposed architecture for Multi-Gb/s data transmission in high energy physics / P. Moreira, A. Marchioro, K. Kloukinas // *Proceedings of the Topical Workshop on Electronics for Particle Physics, TWEPP 2007*. – Geneva, 2007. – P. 332–336.

56. Zabolotny W. M. Data processing boards design for CBM experiment / W. M. Zabolotny, G. Kasprowicz // *Proc. SPIE 9290, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2014*. – 2014. – Vol. 9290. – P. 590-600.

57. Kharlamov P. Beam test results of STS prototype modules for the future accelerator experiments FAIR/CBM and NICA/MPD projects / P. Kharlamov, D. Dementev, M.

Shitenkov // EPJ Web of Conferences. – 2017. – Vol. 158.

58. Tests of CBM STS module prototypes with electron beam at Linac-200 / D. Dementev, P. Kharlamov, Y. Murin, A. Voronin // CBM Progress Report 2018. – 2018. – P. 23-24.

59. Ноздрин М. А. Комплекс аппаратно-программных средств управления и диагностики для ускорителя электронов Линак-200 и прототипа фотоинжектора ОИЯИ / М. А. Ноздрин. – Дубна : ОИЯИ, 2018. – 115 p.

60. The prototype readout chain for CBM using the AFCK board and its software components / P.-A. Loizeau, D. Emscherman, J. Lehnert [et al.] // Proc. SPIE 9662, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2015. – 2015. – Vol. 9662. – P. 801-811.

61. GBT based readout in the CBM experiment / J. Lehnert, A. P. Byszuk, D. Emschermann [et al.] // Journal of Instrumentation. – 2017. – Vol. 12. – № 02. – P. C02061.

62. Hutter D. CBM First-level Event Selector Input Interface Demonstrator / D. Hutter, J. De Cuveland, V. Lindenstruth // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – Vol. 898. – № 3. – P. 032047.

63. CRI board for CBM experiment: preliminary studies / W. M. Zabołotny, A. P. Byszuk, M. Gumiński [et al.] // Proc. SPIE 10808, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2018. – 2018. – Vol. 10808. – P. 1184-1191.

64. A signal distribution board for the timing and fast control master of the CBM experiment / L. Meder, M. Dreschmann, O. Sander, J. Becker // Journal of Instrumentation. – 2016. – Vol. 11. – № 02. – P. C02001.

65. Atomic and nuclear properties of materials: Silicon (Si). – URL: https://pdg.lbl.gov/2009/AtomicNuclearProperties/HTML_PAGES/014.html (date accessed: 05.06.2022). – Text : electronic.

66. Review of particle physics / J. Beringer, J. F. Arguin, R. M. Barnett [et al.] //

Physical Review D - Particles, Fields, Gravitation and Cosmology. – 2012. – Vol. 86. – № 1.

67. Мурзина Е. А. Взаимодействие излучения высокой энергии с веществом / Е. А. Мурзина. – Москва : МГУ им. М.В. Ломоносова, 2007. – 97 р.

68. Dementyev D. Thermal tests of CBM STS prototype modules on CF-frames / D. Dementyev, M. Shitenkov, P. Kharlamov // Compressed Baryonic Matter Experiment at FAIR - Progress Report 2016. – 2017. – P. 51.

69. Лазерный стенд для тестирования кремниевых микростриповых детекторов / П. И. Харламов, М. О. Шитенков, Д. В. Дементьев [et al.] // Приборы и техника эксперимента. – 2022. – № 3. – P. 21-28.

Laser Setup for Testing Silicon Microstrip Detectors / P. I. Kharlamov, M. O. Shitenkov, D. V. Dementev [et al.] // Instruments and Experimental Techniques 2022 65:3. – 2022. – Vol. 65. – № 3. – P. 386-392.

70. Харламов П. И. Лазерная установка для проверки качества трековых модулей для эксперимента BM@N / П. И. Харламов, М. О. Шитенков // Физика элементарных частиц и атомного ядра. – 2021. – Vol. 52. – № 4. – P. 965-973.

Kharlamov P. Laser Setup for Quality Assurance of the BM@N Silicon Tracking Modules / P. Kharlamov, M. Shitenkov // Physics of Particles and Nuclei 2021 52:4. – 2021. – Vol. 52. – № 4. – P. 761-765.

71. Green M. A. Optical properties of intrinsic silicon at 300 K / M. A. Green, M. J. Keevers // Progress in Photovoltaics: Research and Applications. – 1995. – Vol. 3. – № 3. – P. 189-192.

72. Green M. A. Self-consistent optical parameters of intrinsic silicon at 300 K including temperature coefficients / M. A. Green // Solar Energy Materials and Solar Cells. – 2008. – Vol. 92. – № 11. – P. 1305-1310.

73. Near-infrared free carrier absorption in heavily doped silicon / S. C. Baker-Finch, K. R. McIntosh, D. Yan [et al.] // Journal of Applied Physics. – 2014. – Vol. 116. – № 6. – P. 063106.

74. Abroug S. Optical and thermal properties of doped semiconductor / S. Abroug, F. Saadallah, N. Yacoubi // The European Physical Journal Special Topics 2008 153:1. – 2008. – Vol. 153. – № 1. – P. 29-32.
75. Laser tests of silicon detectors / Z. Doležal, C. Escobar, S. Gadomski [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2007. – Vol. 573. – № 1-2. – P. 12-15.