

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

*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

**АВТОРЕФЕРАТ**

Диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва – 2022

Работа выполнена в Отделе экспериментальной физики высоких энергий  
Научно-исследовательского института ядерной физики имени Д.В. Скобельцына  
Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

Научный руководитель – Меркин Михаил Моисеевич  
доктор физико-математических наук

Официальные оппоненты – Негодаев Михаил Александрович –  
доктор физико-математических наук; ФГБУН  
Физический институт имени П. Н. Лебедева РАН,  
высококвалифицированный главный научный  
сотрудник

Воробьев Александр Павлович –  
доктор физико-математических наук; ГНЦ РФ -  
Институт физики высоких энергий"  
НИЦ "Курчатовский институт", главный научный  
сотрудник

Шведунов Василий Иванович –  
доктор физико-математических наук, профессор;  
НИИЯФ имени Д.В. Скобельцына МГУ имени М.В.  
Ломоносова, главный научный сотрудник

Защита диссертации состоится 25 ноября 2022 года в 16-00 часов на заседании  
диссертационного совета МГУ.013.2(МГУ.01.11) Московского государственного университета  
имени М.В.Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы 1, строение 5 (19 корпус  
НИИЯФ МГУ), ауд. 2-15.

С диссертацией можно ознакомиться в Отделе диссертаций научной библиотеки МГУ  
им. М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д.27) и на сайте ИАС “Истина” по ссылке  
<https://istina.msu.ru/dissertations/489866496/>

Автореферат разослан "\_\_\_" октября 2022 г.

Телефон совета для справок: +7 916 8717750  
E-mail: galan\_lidiya@mail.ru

Учёный секретарь диссертационного совета  
кандидат физико-математических наук



Л.И. Галанина

## **Общая характеристика работы**

### *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 (микророскопические) 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 съёма 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 создание компактных кремниевых систем, 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 VM@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 VM@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 самотриггирующей считывающей электронике, таких как в детекторных модулях эксперимента  $BM@N$ .

### ***Объект и предмет исследования***

Объектом исследования является детекторный модуль КТС эксперимента  $BM@N$ , основными составляющими которого являются кремниевый двусторонний микростриповый сенсор и самотриггирующая 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 Р- 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 были 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 были 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 научных работах автора, в том числе в 4 публикациях в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ.

### *Структура*

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Работа содержит 127 страниц, 3 таблицы и 59 иллюстраций и содержит 75 библиографических ссылок.

### *Содержание*

**В первой главе** (обзорной) рассматриваются существующие кремниевые трековые системы экспериментов ATLAS@LHC, D0@FNAL и CLAS12@CEBAF, их детекторные модули, основанные на кремниевых сенсорах, и их основные параметры. Каждая из систем реализует преимущества кремниевых микростриповых детекторов по сравнению с другими типами детекторов – сочетание высокой скорости регистрации с компактностью и точностью, но при этом обладает своими особенностями, в зависимости от конфигурации эксперимента, к примеру двухсторонние сенсоры в случае D0 или самотриггерующаяся считывающая электроника в CLAS12 [4–7].

**Во второй главе** детально описывается проект кремниевой трековой системы эксперимента BM@N, разработанные детекторные модули, основанные на двухсторонних микростриповых кремниевых сенсорах и

самотриггирующей считывающей электронике, основанной на микросхемах STS-XYTER, и его тракт считывания и обработки данных.

Восстановление треков и импульсов частиц, образующихся в столкновениях атомных ядер, — это одна из центральных детекторных задач в экспериментах по столкновению тяжелых ионов. В эксперименте BM@N задачу по восстановлению траекторий и импульсов частиц решает гибридный трекер, частью которого является KTC (Silicon Tracking System – STS).

Эксперимент Baryonic Matter at Nuclotron (BM@N) является первой стадией проекта NICA и служит не только для изучения барионной материи, но и для тестирования оборудования проекта NICA. Этот эксперимент обладает кремниевой трековой системой, состоящей из 4 станций [8; 9]. Поскольку в BM@N ожидаются относительно небольшие загрузки, то для внутренних областей выбраны сенсоры высотой 42 мм, и 62 мм для внешних. Сенсоры 42×62 мм<sup>2</sup>, 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.

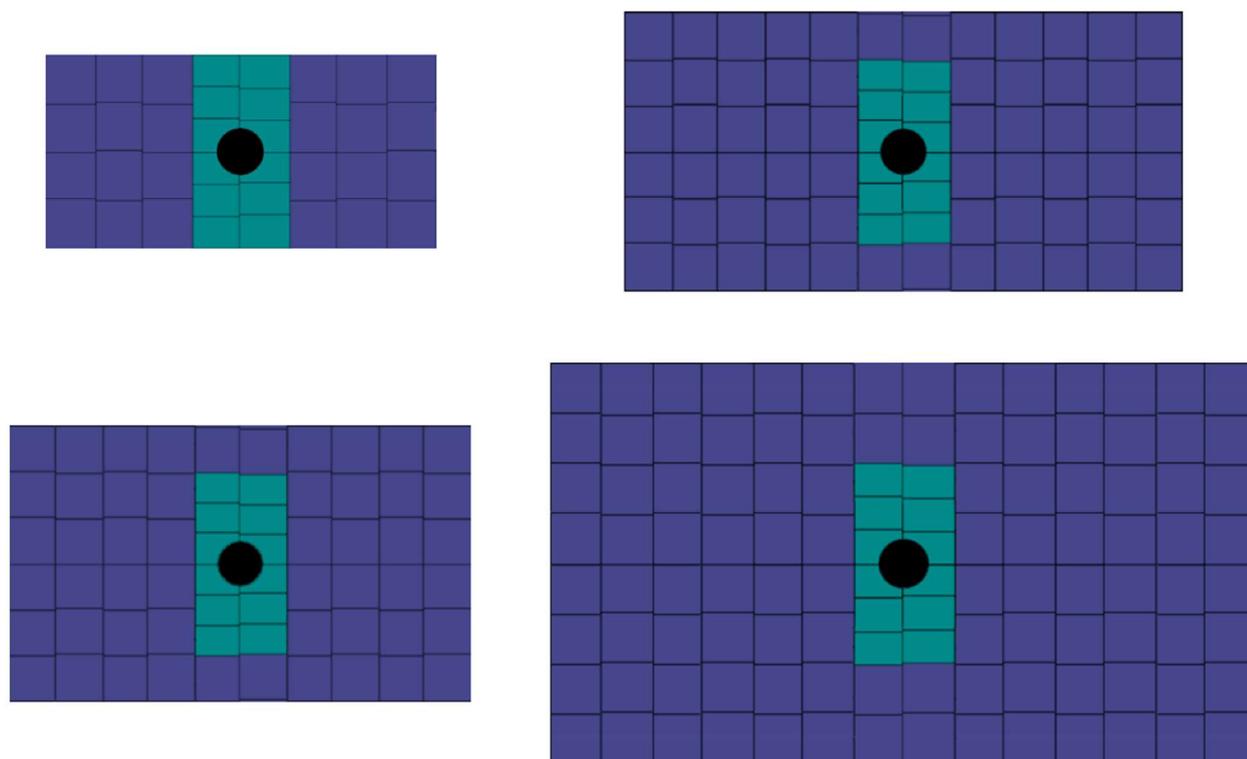
Четыре станции KTC BM@N оснащены 292 двухсторонними микростриповыми сенсорами, которые предоставляют информацию о координатах, моменте времени и энергии частиц, пересекающих сенсоры. Для эксперимента BM@N используются сенсоры толщиной  $320 \pm 15$  мкм. На каждый сенсор приходится 1024 стрипа на сторону, 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  $58/\sqrt{12} \approx 17$  мкм. В случае же анализа 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. Таким образом, 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.

Расчеты плотности треков позволили оптимизировать планировку станций, отказаться от использования сенсоров  $22 \times 62 \text{ мм}^2$  и уменьшить общее количество сенсоров до 292. Схема станций КТС показана на Рисунке 1. Плотность треков на второй и 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 близких к нему 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 были 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 загрузок используются сенсоры  $62 \times 62 \text{ мм}^2$ . 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.

Система сбора данных КТС эксперимента VM@N является полностью конфигурируемой, основанной на самотриггерующейся электронике считывания, которая также будет связана с триггером установки VM@N. Поэтому в случае КТС VM@N используется самотриггерующаяся считывающая

электроника, основанная на специализированной микросхеме STS-XYTER — многоканальной бестриггерной считывающей микросхеме [10; 11]. Каждая такая микросхема может считывать 128 каналов с сенсора. Один двухсторонний сенсор в трековом модуле имеет 1024 стрипа на каждой стороне и, соответственно, 2048 каналов считывания, что соответствует 16 микросхемам STS-XYTER смонтированным на двух платах Front-End Board-8 (FEB-8).



*Рисунок 1. Схема станций КТС с сенсорами размером  $42 \times 62 \text{ мм}^2$  и  $62 \times 62 \text{ мм}^2$ . 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  $1,06 \text{ м}^2$ .*

Тракт считывания данных КТС ВМ@N основан на потоковой концепции считывания сигналов с сенсоров. Все подсистемы эксперимента ВМ@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 ВМ@N реализована возможность работы в

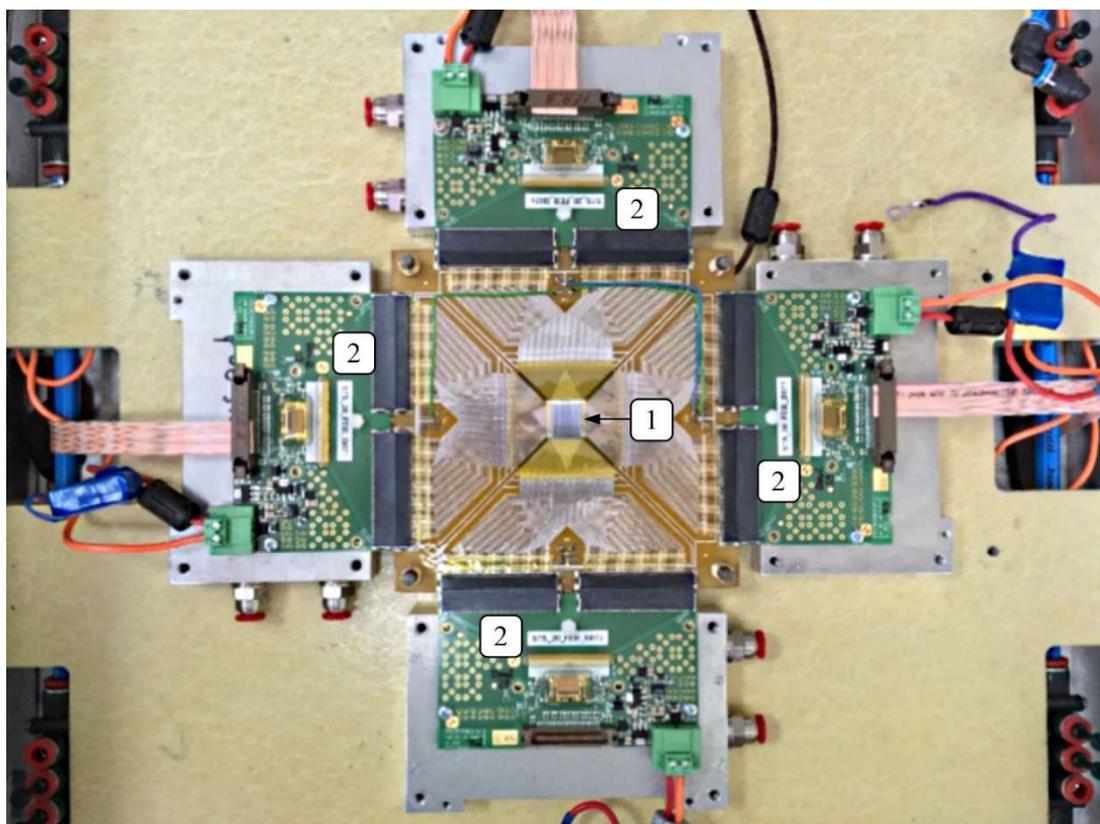
триггерном режиме.

*В третьей главе* описываются испытания ранних прототипов трековых модулей, систем считывания и синхронизации времени между модулями на пучках электронов ускорителя ЛИНАК-200 и полученные результаты; также обосновывается необходимость альтернативных методов тестирования.

Испытания на пучке частиц из ускорителя являются наиболее корректным методом тестирования, поскольку условия тестирования наиболее близки к реальному эксперименту. 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 реальному эксперименту.

Основными целями проведенных испытаний являлись тестирование считывающей электроники, систем сбора данных (DAQ) и временной синхронизации между станциями, а также сбор данных в потоковом режиме работы считывающей электроники. Испытания проводились на электронном ускорителе ЛИНАК-200 [12]. 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 VM@N.

Экспериментальная установка состояла из двух детекторных станций на основе демонстраторов с сенсорами размером  $14,9 \times 14,9$  мм<sup>2</sup> 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 с микросхемами STS-XYTER v.2.0 (Рисунок 2). Станции располагались по оси пучка ускорителя на расстояниях 30 см и 65 см от конца ионопровода.



*Рисунок 2. Тестовая станция с сенсором размером  $14,9 \times 14,9$  мм<sup>2</sup> (1) и 4 платами FEB со считывающей электроникой (2) со снятыми экранами.*

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 [13]. 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 (FLES

Input Board, где FLES – First Level Event Selector), 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 были подключены к двум различным AFCK, что позволяет нам также контролировать синхронизацию по времени. Блок-схема системы сбора данных тестовой установки показана на Рисунке 3.

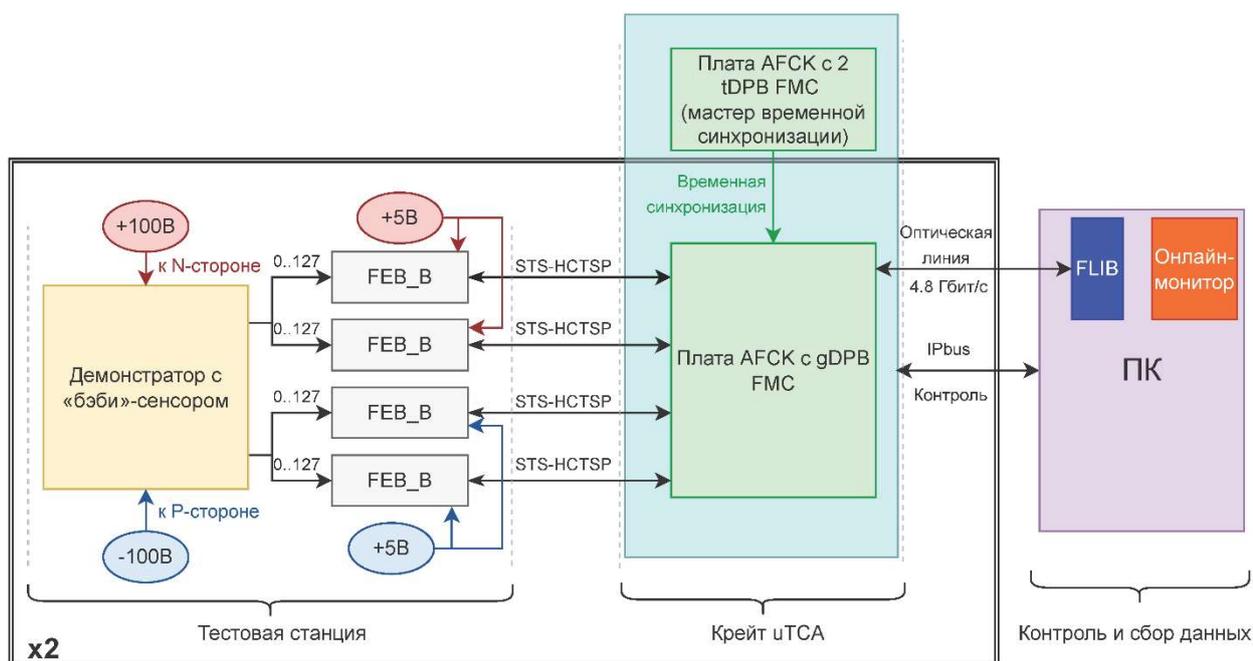


Рисунок 3. Блок-схема системы сбора данных тестовой установки.

Испытания проводились при энергиях электронов 150 и 50 МэВ. 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 MIP. Также это позволяет использовать более высокие пороги сигналов в электронике, чтобы минимизировать вклад шумов.

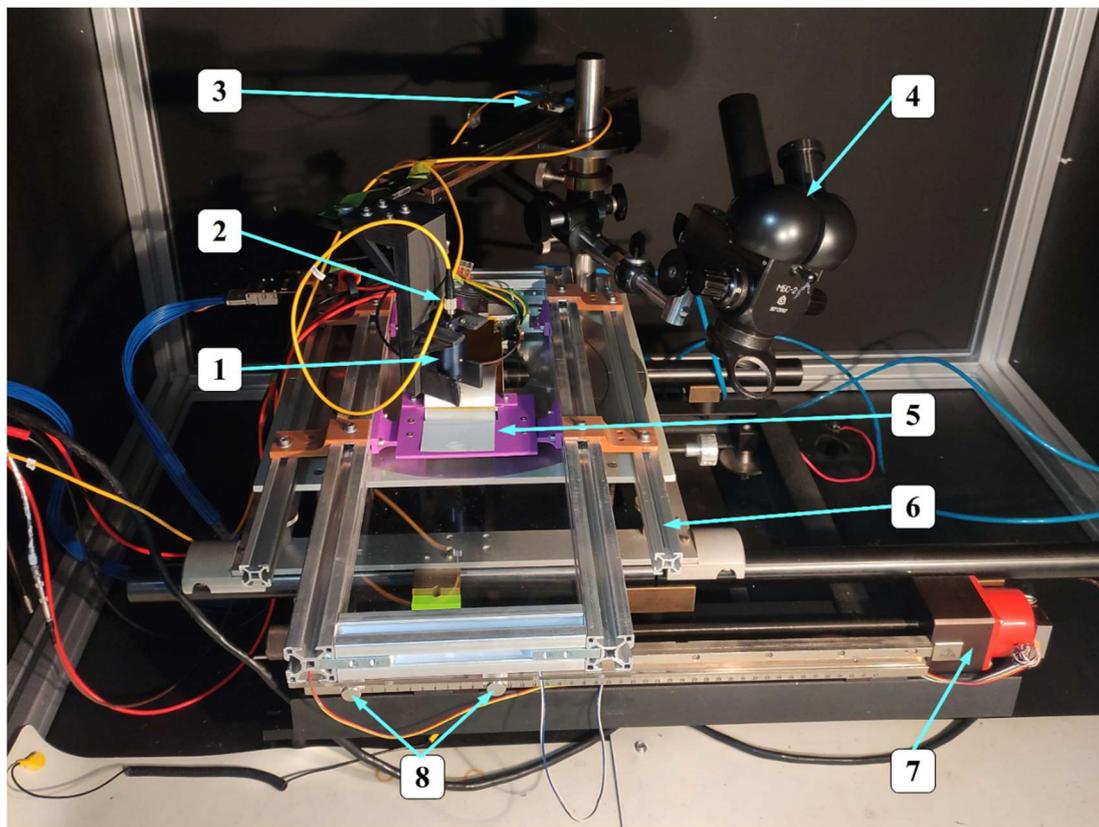
В результате пучковых испытаний был протестирован прототип электронного тракта и система синхронизации времени на основе плат AFCK, на основе которых будут построены соответствующие системы эксперимента VM@N. Испытания показали, что синхронизация времени между несколькими микросхемами, подключенными 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.

*В четвертой главе* описывается созданная лазерная установка для тестирования трековых модулей, ее характеристики и функционал и приводятся результаты тестирований новых прототипов трековых модулей, которые также использовались для отладки программного обеспечения считывающей электроники и систем мониторинга, чтения и контроля.

Принцип работы установки 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 также 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.

Основные составляющие части стенда следующие: оптическая система с

закрепленным лазерным светодиодом, система позиционирования тестируемого модуля, а также система чтения и управления трековым модулем. Компоненты стенда, помещенные в светозащитном экранирующем кожухе, имеющем внутреннее черное матовое покрытие, показаны на Рисунке 4.



*Рисунок 4. 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.*

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

попадания одной ионизирующей частицы.

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, 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, глубина его проникновения в кремний составляет приблизительно 3,17 мкм. Преимуществом красного лазерного диода 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 в широком диапазоне амплитуд и частот, что позволяет создавать лазерные импульсы длительностью, сопоставимой с типичным временем сбора заряда в сенсоре порядка 20 нс.

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

На Рисунке 5 также отображены следующие компоненты системы позиционирования: координатный стол 6 с креплениями для детекторного модуля; 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 компьютера, и источник питания двигателя,

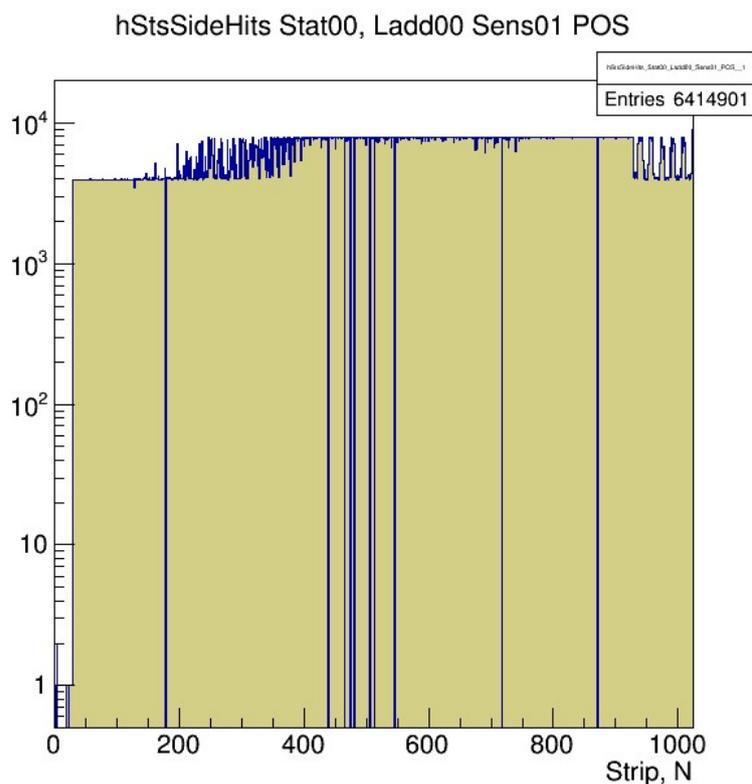
размещенные снаружи кожуха. Движение координатного стола ограничивается концевыми выключателями  $\delta$ , информация об их состоянии также передается через последовательный порт.

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).

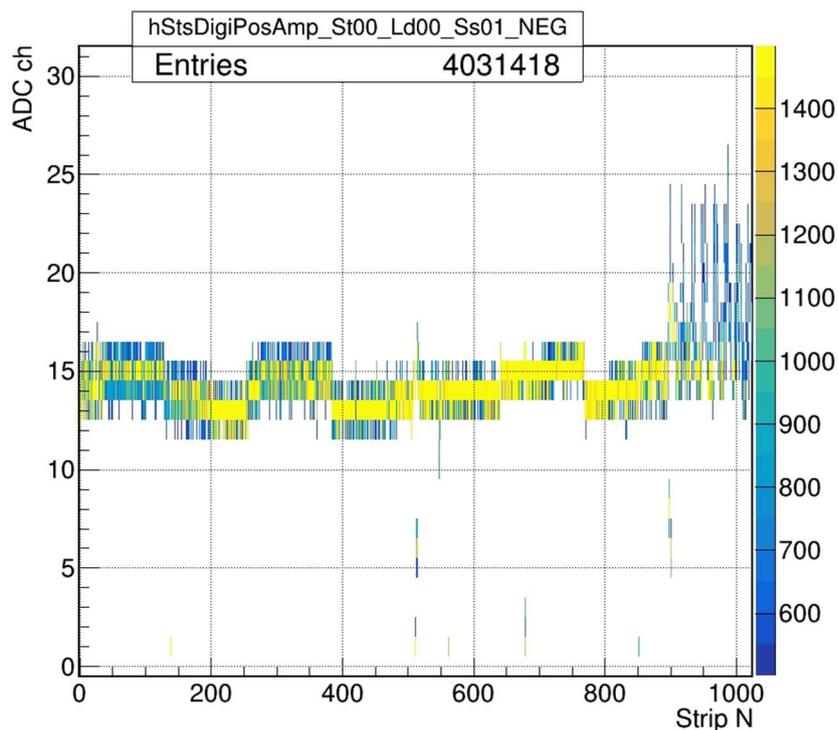
Сканирование модуля на лазерном стенде позволяет получить информацию о неработающих и шумящих стрипах. К примеру, у одного из исследованных опытных сенсоров на Р-стороне оказалось 11 неработающих стрипов (1%) (см. Рисунок 6). Из-за различий в положении базовой линии, коэффициента передачи и калибровки каждой считывающей микросхемы при сканировании модуля в различных областях сканирования наблюдаются двухстриповые и одностриповые кластеры, поэтому на Рисунке 7 в некоторых областях гистограмма заполнена до 4000 событий (одностриповые) и 8000 (двухстриповые), так как в случае двухстриповых кластеров события считаются два раза для двух шагов сканирования. При этом для целей поиска неработающих стрипов это не имеет значения, поскольку критерием является отсутствие сигнала в стрипе.

Помимо поиска неработающих стрипов, лазерный стенд был использован для отладки и калибровки считывающей электроники детектора. Каждая микросхема считывания имеет 128 независимых каналов. Каждый канал имеет аналоговый тракт, состоящий из зарядочувствительного усилителя, усилителя формировавателя 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%, причем существенный вклад в

уровень сигналов дает разница в положении базовой линии для разных калибровочных цепей. На Рисунке 7 показаны восстановленные амплитуды кластеров на N-стороне 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.



*Рисунок 6. Гистограммы количества событий при полном постриповом сканировании для P-стороны. Заполнение гистограммы до 8000 событий соответствует двухстриповому кластеру, до 4000 — одностриповому.*



*Рисунок 7. Амплитуды сигналов (суммарная амплитуда кластера) на N-стороне сенсора в зависимости от номера стрипов, за который принимается центр кластера.*

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.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

КТС эксперимента VM@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 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 нагрузок и невозможности качественного выбора внешнего критерия выработки сигнала запуска.

В-третьих, потоковая система сбора данных с последующей обработкой данных «на лету» в режиме онлайн, основанная на рассматриваемой самотриггирующейся считывающей электронике, 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 ВМ@N не являются потоковыми и работают по триггеру.

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. Наиболее корректным методом такого тестирования является проверка на пучке частиц в условиях, максимально приближенным к условиям эксперимента ВМ@N. Но этот метод является дорогим и ресурсоемким по времени и трудозатратам. В качестве альтернативы 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 ВМ@N проведены их испытания на пучках электронов. В ходе пучковых испытаний протестированы системы синхронизации времени и сбора данных и микросхем STS-XYTER v.2. На основе полученных результатов разработана новая версия микросхемы STS-XYTER v.2.1. 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 трудозатрат 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. 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 считывания, а также проведения калибровки считывающей электроники детектора при помощи лазерных импульсов.

Возможность широкой настройки параметров лазерного излучения 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.

Таким образом, в результате проведения исследований создано универсальное оборудование для тестирования кремниевых трековых модулей и всего тракта чтения, обработки данных и мониторинга. Полученные при помощи лазерного стенда данные внесли вклад в разработку как программного, так и аппаратного обеспечения систем чтения, обработки данных и мониторинга трековых модулей кремниевой трековой системы эксперимента VM@N.

## Список основных публикаций

В рецензируемых журналах, индексируемых Web of Science, SCOPUS и RSCI:

[1] **Харламов П.И.**, Шитенков М.О., Дементьев Д.В., Леонтьев В.В., Меркин М.М. Лазерный стенд для тестирования кремниевых микростриповых детекторов. *ИТЭ*, № 3, с. 21-28 (2022). <http://dx.doi.org/10.31857/S003281622204005X> (RSCI – 0.622)

**Kharlamov P.I.**, Shitenkov M.O., Dementev D.V., Leontyev V.V., Merkin M.M. Laser Setup for Testing Silicon Microstrip Detectors. *Instrum and Exp Tech*, Vol. 65, № 3, pp. 386-392 (2022) <http://dx.doi.org/10.1134/s0020441222040054> (IF- 0.573)

[2] **Харламов П.И.**, Шитенков М.О. Лазерная установка для проверки качества трековых модулей для эксперимента BM@N. *ЭЧАЯ*, том 52, № 4, с. 965-973, (2021). (RSCI – 0.515)

**Kharlamov P.**, Shitenkov M. Laser Setup for Quality Assurance of the BM@N Silicon Tracking Modules. *Phys. Part. Nuclei* **52**, 761–765 (2021). <https://doi.org/10.1134/S1063779621040316> (IF - 0.691)

[3] D. Dementev, A. Baranov, V. Elsha, **P. Kharlamov**, E. Lavrik, M. Merkin, Yu. Murin, A. Senger, P. Senger, A. Sheremetev, M. Shitenkov & N. Sukhov. The Silicon Tracking System as a Part of Hybrid Tracker of BM@N Experiment. *Phys. Part. Nuclei* **53**, 197–202 (2022). <https://doi.org/10.1134/S1063779622020265> (IF - 0.691)

[4] **P. Kharlamov**, D. Dementev, M. Shitenkov. Beam test results of STS prototype modules for the future accelerator experiments FAIR/CBM and NICA/MPD projects. *EPJ Web of Conferences* **158**, 06003 (2017). <https://doi.org/10.1051/epjconf/201715806003> (SJR - 0.194)

В остальных журналах:

[5] Baranov A.V., ... , **Kharlamov P.I.**, *et al.* The Silicon Tracking System as Part of the Hybrid Tracker of the BM@N Experiment: Technical Design Report (JINR, Dubna, 2020). ISBN 978-5-9530-0541-8, 101 с.

[6] Dementyev D., Shitenkov M., *Kharlamov P.* Thermal tests of CBM STS prototype modules on CF-frames, Compressed Baryonic Matter Experiment at FAIR - Progress Report 2016, (2017), <https://repository.gsi.de/record/201318>

[7] D. Dementev, **P. Kharlamov**, Yu. Murin and A. Voronin. Tests of CBM STS module prototypes with electron beam at Linac-200. CBM Progress Report 2018, p. 23-24 (2019), doi:10.15120/GSI-2019-01018

### Список цитируемой 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. 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.
5. Operation and performance of the ATLAS semiconductor tracker / G. Aad, B. Abbott, J. Abdallah [et al.] // Journal of Instrumentation. – 2014. – Vol. 9. – № 8.
6. 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.
7. 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.
8. Conceptual Design Report BM@N — Baryonic Matter at Nuclotron / T. O. Ablyazimov, P. G. Akishin, V. P. Akishina [et al.]. – 2013. – P. 170.
  9. 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.
  10. 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.
  11. 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.
  12. 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 с.
  13. 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.