

На правах рукописи

Рогожин Станислав Вадимович

**СОЗДАНИЕ ПРОТОТИПА КРЕМНИЕВОГО ВЕРШИННОГО ДЕТЕКТОРА
ЭКСПЕРИМЕНТА CLAS12**

Специальность 01.04.16 - физика атомного ядра и элементарных частиц

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва
2012

Работа выполнена на кафедре общей ядерной физики физического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Научный руководитель:

Меркин Михаил Моисеевич
кандидат физико-математических наук
Отдел экспериментальной физики высоких энергий
НИИЯФ МГУ, заведующий лабораторией

Официальные оппоненты:

Воробьёв Александр Павлович
доктор физико-математических наук
ГНЦ Институт физики высоких энергий,
г. Противно, начальник лаборатории

Подорожный Дмитрий Михайлович
кандидат физико-математических наук
Отдел космических излучений
НИИЯФ МГУ, заведующий лабораторией

Ведущая организация:

Лаборатория физики высоких энергий
им. В.И. Векслера и А.М. Балдина, ОИЯИ, г. Дубна

Защита состоится 01 июня 2012 г. в 13 часов на заседании диссертационного совета Д501.001.77 при Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова по адресу: 119234, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 5 («19-й корпус НИИЯФ МГУ»), ауд. 2-15.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИИЯФ МГУ.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2012 г.

Ученый секретарь
совета Д501.001.77,
доктор физ.-мат. наук, профессор

Страхова С. И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Национальная Ускорительная Лаборатория им. Т. Джефферсона (TJNAF, США) является одним из научных центров, исследующих кварковую структуру нуклонов, динамику кварков и глюонов. В настоящий момент лаборатория проходит масштабную модернизацию. В ходе модернизации энергия пучка Ускорительной установки на непрерывном электронном пучке (Continuous Electron Beam Accelerator Facility - CEBAF) увеличивается с 6 до 12 ГэВ. Повышение энергии пучка позволит наблюдать реакции в уникальном динамическом диапазоне больших значений виртуальности Q^2 и скейлинговой переменной x ; для обеспечения регистрации продуктов реакций соответствующие изменения претерпевают и три экспериментальных зала лаборатории: А, В и С; также строится четвёртый экспериментальный зал D.

На основе действующего в зале В детектора CLAS (CEBAF Large Acceptance Spectrometer) создаётся новый детекторный комплекс CLAS12. Ключевым элементом комплекса CLAS12 является новый кремниевый вершинный детектор (Silicon Vertex Tracker, SVT). SVT расширяет доступный диапазон телесных углов детектора почти до 4π в системе центра масс, что позволяет наблюдать эксклюзивные процессы. Высокий ток (90 мкА) пучка ускорителя CEBAF и, как следствие, высокая светимость (10^{35} 1/с·см²), а также его непрерывный характер ставят особые требования к электронике считывания. В кремниевом вершинном детекторе используется микросхема FSSR2 архитектуры нового поколения «data-driven», не требующая внешнего сигнала запуска для считывания. Уникальность детекторного комплекса CLAS12 и важная роль кремниевого детектора определяют **актуальность диссертационной работы**. В настоящей работе рассмотрены все аспекты разработки прототипа кремниевого детектора: разработка конструкции детектора, создание и испытания сенсоров, испытания считывающей электроники, сборка и тестирование прототипов модулей детектора.

Целью диссертационной работы являются:

1. Разработка конструкции кремниевого вершинного детектора, обеспечивающего регистрацию продуктов реакции в большом диапазоне телесных углов, определение оптимального расположения и параметров используемых сенсоров.
2. Разработка, изготовление и испытания кремниевых сенсоров.
3. Создание программно-аппаратного комплекса для работы со считывающей микросхемой FSSR2, демонстрация её применимости в эксперименте CLAS12 и определение оптимальных параметров микросхемы.

4. Разработка рабочего прототипа кремниевого вершинного детектора и изготовление полной системы считывания.

В диссертации получены следующие новые научные результаты:

1. Разработана оригинальная конструкция кремниевого вершинного детектора, обеспечивающая в эксперименте с фиксированной мишенью регистрацию продуктов реакции в углах от 5° до 135° в лабораторной системе координат с пространственным разрешением не хуже 40 мкм.
2. Разработана топология кремниевых сенсоров, учитывающая физические задачи и условия эксперимента CLAS12. Сенсоры имеют 256 каналов считывания с промежуточным стрипом, шаг стрипов 150 мкм, что обеспечивает требуемое разрешение 50 мкм; угол относительно оси детектора $1,5^\circ$. Параметры изготовленных сенсоров подтверждены испытаниями.
3. Создана система тестирования для работы с микросхемой FSSR2 и результаты исследования микросхемы FSSR2. Полученные условия применимости микросхемы для задач CLAS12, практические соотношения сигнал:шум и быстродействие логики микросхемы.
4. Разработаны и изготовлены прототипы модуля кремниевого вершинного детектора.

Научная новизна работы определяется как особенностями эксперимента CLAS12, так и характеристиками считывающей электроники.

1. Впервые кремниевый детектор используется на непрерывном пучке в отсутствие внешнего сигнала запуска. Непрерывный электронный пучок ускорителя CEBAF обладает уникальными параметрами и позволит наблюдать реакции в ранее недоступной области импульсов и энергий.
2. Впервые требуется обеспечение близкого к 4л акцептанса в эксперименте с фиксированной мишенью. По этой причине конструкция SVT нетипична для экспериментов такого рода и ближе к кремниевым детекторным системам экспериментов на встречных пучках.
3. Кремниевый вершинный детектор является первой установкой, в которой считывание осуществляется в реальном времени микросхемами архитектуры «data-driven».

Практическая ценность работы:

1. Расчёты многократного рассеяния определили оптимальную конструкцию детектора, количество детектирующих плоскостей и параметры сенсоров.

2. Проведённые испытания доказали, что микросхема FSSR2 удовлетворяет требованиям эксперимента CLAS12, вследствие чего именно она была выбрана для кремниевого вершинного детектора.
3. Впервые в России создана система считывания на основе микросхемы архитектуры «data-driven». Полученный опыт работы с микросхемами такой архитектуры может быть использован в других экспериментах физики высоких энергий: так, например, в настоящий момент изучается возможность использования её в эксперименте CBM (GSI, Германия).

Личный вклад автора:

Все результаты, представленные в диссертации, получены автором лично или при его непосредственном участии:

- Автор принимал участие в разработке и оптимизации конструкции трекера. С учётом эффектов многократного рассеяния было показано, что при заданной кинематике детектор может обеспечить координатное разрешение не лучше 40 мкм, вследствие чего был выбран шаг стрипов 150 мкм. Также было определено оптимальное количество детектирующих плоскостей: три в передней части детектора и четыре в центральной.
- При участии автора разработан комплект фотошаблонов и изготовлены кремниевые сенсоры. Изготовленные сенсоры протестированы и удовлетворяют требованиям.
- Разработан комплекс программ для испытаний микросхемы FSSR2. Изучение шумовых характеристик показало, что микросхема может обеспечить соотношение сигнал:шум 8:1 при длине стрипа 30 см. Создана программа, моделирующая работу логики микросхемы, на основе результатов программы показано, что быстродействие микросхемы достаточно для ожидаемых в эксперименте загрузок. Изучение различных режимов работы микросхемы позволило определить оптимальный.
- Создан работающий прототип модуля детектора, включающий в себя линейку кремниевых сенсоров, считывающие микросхемы, обрабатывающую электронику и управляющую программу. Прототип успешно испытан как на тестовом стенде, так и на пучке ускорителя.

Апробация работы

Результаты работы докладывались на российских и международных конференциях:

- XII Международный Семинар по электромагнитным взаимодействиям ядер (EMIN-2009)
- X Межвузовская школа молодых специалистов "Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине" (Москва, 2009)
- XI Межвузовская школа молодых специалистов "Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине" (Москва, 2010)

а также на семинарах НИИЯФ МГУ и коллаборации CLAS12.

Основные результаты опубликованы в 3 статьях в российских рецензируемых журналах.

Структура и объём диссертации:

Диссертация состоит из введения, 5 глав и заключения, содержит 134 страницы, включая 108 рисунков, 11 таблиц и 54 библиографических ссылки.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность проблемы, сформулированы цели работы, показана новизна и практическая ценность диссертации. Приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены некоторые современные эксперименты, использующие кремниевые детекторы, продемонстрированы особенности экспериментов с фиксированной мишенью и на встречных пучках. Описан существующий экспериментальный комплекс TJNAF и элементы его модернизации, рассмотрены физические задачи эксперимента CLAS12, сформулированы основные требования к новому детекторному комплексу и описаны его компоненты.

Полупроводниковые детекторы используются в физике высоких энергий уже более пятидесяти лет, основным материалом для сенсоров сейчас является кремний. Кремниевые трековые детекторные системы можно разделить на две группы по конфигурации. В случае стационарной мишени основная часть продуктов реакции вылетает в небольшом диапазоне полярных углов относительно направления пучка. Поэтому в таких экспериментах детектор обычно представляет собой набор плоскостей, расположенных за мишенью; иногда часть детекторной системы размещается перед мишенью для регистрации налетающих частиц. Примерами таких установок могут служить кремниевые детекторы экспериментов WA89 (ускоритель SPS, CERN), NA60 (также SPS, CERN) и HERA-B (ускоритель HERA, DESY). В

экспериментах на встречных пучках необходима другая конфигурация: продукты реакции разлетаются в полном диапазоне углов, поэтому детектор должен полностью окружать мишень – например, кремниевые детекторные системы экспериментов D0 (Tevatron, FNAL), ATLAS (LHC, CERN) и CMS (LHC, CERN).

Эксперимент CLAS12 проводится в экспериментальном зале В TJNAF и является продолжением эксперимента CLAS. В составе комплекса TJNAF работают три экспериментальных зала: А, В и С. В настоящий момент проводится модернизация всего комплекса [1]. В рамках модернизации будут установлены дополнительные ускоряющие и поворотные секции, что позволит повысить энергию пучка до 12 ГэВ. Соответствующие изменения претерпят и экспериментальные залы, также будет построен четвёртый экспериментальный зал D.

Эксперимент CLAS12 решает ряд физических задач, связанных с изучением внутренней структуры нуклона. Главной задачей эксперимента является получение так называемых обобщённых партонных распределений (ОПР) – принципиально нового способа описания внутренней структуры нуклона, предложенного в работах [2], [3], [4]. ОПР объединяют распределения кварков по поперечной координате (форм-факторы) и продольному импульсу, представляя собой плотность кварков, имеющих определённый импульс и одновременно с этим определённую поперечную координату.

ОПР зависят от кинематических переменных x и ξ , доли импульса нуклона, которую переносят партоны, и разности доли продольного импульса, переносимого взаимодействующим партоном в начальном и конечном состояниях (2ξ), соответственно. ОПР могут быть экспериментально определены в эксклюзивных процессах: глубоко-виртуальном Комптоновском рассеянии (ГВКР) и глубоко-виртуальном рождении мезонов (ГВРМ). В эксперименте CLAS12 станет возможным изучение реакций ГВКР и ГВРМ в ранее недоступном регионе больших значений виртуальности фотона Q^2 и скейлинговой переменной x . Необходимыми условиями для наблюдения этих реакций являются обеспечение эксклюзивности и высокая светимость.

Форм-факторы являются первыми моментами ОПР по x , т.е. их значения являются своего рода «граничными условиями». В эксперименте CLAS12 станет возможным измерение протонных форм-факторов G_{Ep} и G_{Mp} в диапазоне до 14 ГэВ² и нейтронных форм-факторов G_{En} и G_{Mn} в диапазоне до 14 и 5 ГэВ², соответственно.

Определение ОПР также поможет в разрешении так называемой «спиновой загадки». Вклад спинов кварков в формирование спина протона составляет порядка 25-30%, причём значительную часть спина вносят странные морские кварки [5]. В [3] выведено правило сумм, которое связывает ОПР с долей спина нуклона, которая определяется спином и

угловым моментом конститuentных кварков. Таким образом, определение ОПР позволит уточнить вклад углового орбитального момента кварков в спин нуклона и приблизиться к решению спиновой загадки.

Ещё одним направлением исследований в программе эксперимента CLAS12 является изучение механизмов формирования возбуждённых состояний нуклона N^* [6]. В настоящее время отсутствуют экспериментальные данные об электровозбуждении N^* при $Q^2 > 5 \text{ ГэВ}^2$. Увеличение энергии ускорителя CEBAF позволит исследовать структуру и механизмы формирования N^* в диапазоне Q^2 до 14 ГэВ^2 . Сочетание непрерывного пучка, высокого тока и близкого к 4π акцептанса создаст идеальные условия для изучения механизмов образования возбуждённых состояний нуклона.

С учётом изложенных физических задач можно сформулировать следующие требования к модернизированной экспериментальной установке CLAS12. Во-первых, необходимо увеличение энергии пучка. Модернизация ускорителя позволит получить непрерывный электронный пучок энергией 11 ГэВ (в залах А, В и С; 12 ГэВ в Зале D). Во-вторых, стоит задача достичь светимости $10^{35} \text{ 1/с}\cdot\text{см}^2$. Светимость будет достигнута после повышения тока непрерывного электронного пучка до 90 мкА . Одновременно с этим считывающая электроника должна быть рассчитана на соответствующее быстродействие и режимы работы. В-третьих, комплекс детекторов должен обеспечивать надёжную регистрацию и идентификацию всех продуктов реакции для наблюдения эксклюзивных процессов; требуется увеличить акцептанс установки, доведя его практически до 4π в системе центра масс.

Детектор эксперимента CLAS12 (Рис. 1) состоит из передней детектирующей системы (FD), чувствительной к заряженным частицам и фотонам, вылетающим под углами от 5° до 35° , и центрального детектора (CD), перекрывающего угловой диапазон от 5° до 135° [1].

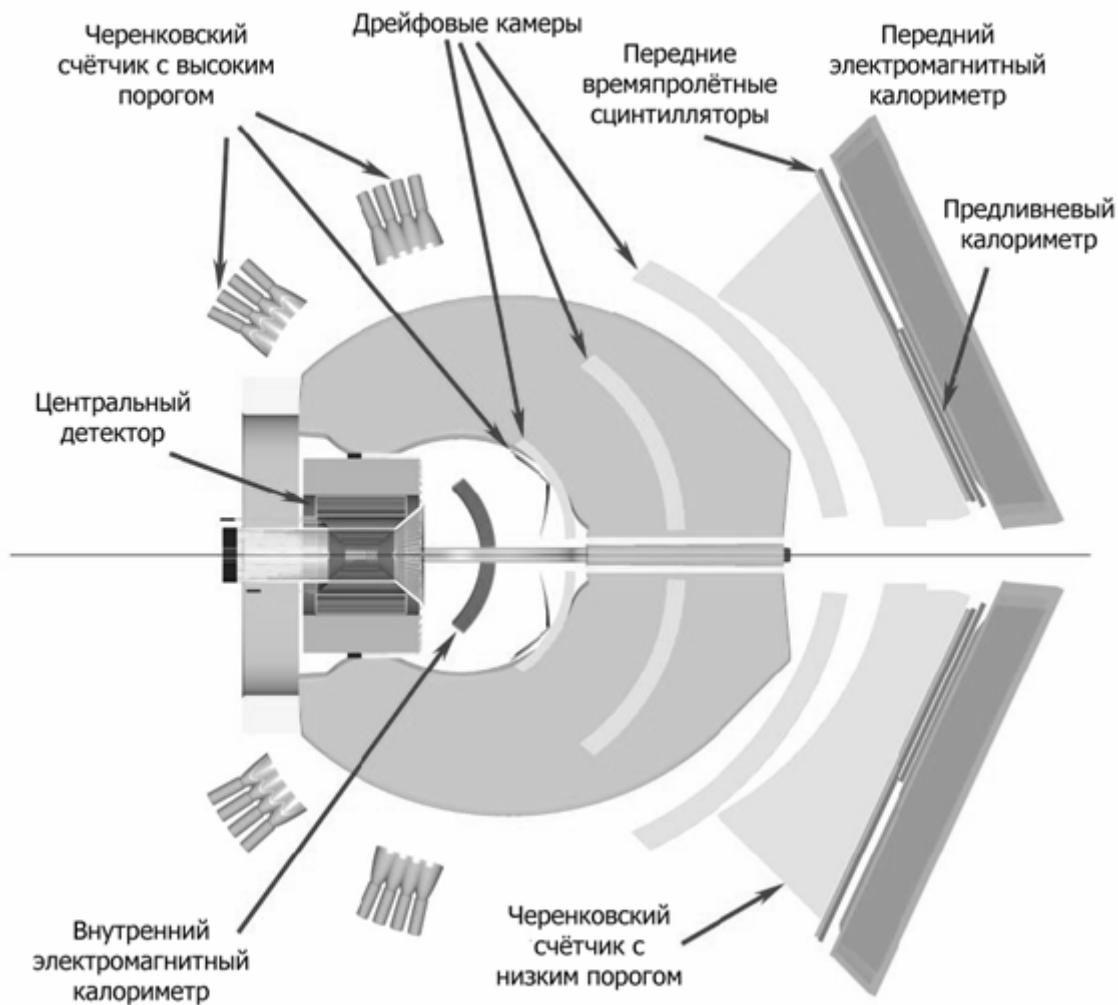


Рис. 1. Схема детектора CLAS12 [1].

Передний детектор включает в себя:

- дрейфовые камеры (разрешение 200 мкм);
- черенковский счётчик с высоким порогом (рабочее вещество – CO_2 при атмосферном давлении);
- черенковский счётчик с низким порогом (рабочее вещество C_4F_{10});
- времяпролётные детекторы (разрешение 50 пс);
- два передних калориметра и внутренний калориметр.

Ключевым элементом модернизации детекторного комплекса CLAS12 является новый центральный детектор. Он должен обеспечить регистрацию продуктов реакции в диапазоне полярных углов больше 35° , недоступном для переднего детектора. Центральный детектор расположен внутри сверхпроводящего соленоидального магнита. Детектор состоит из кремниевой трековой системы, времяпролётных сцинтилляторов и центрального

электромагнитного калориметра. Кремниевый вершинный детектор (Silicon Vertex Tracker, SVT) является единственным источником координатной информации в центральном детекторе.

Во второй главе на основе результатов моделирования и расчётов определена оптимальная конструкция кремниевого вершинного детектора, сформулированы требования к сенсорам.

Несмотря на то, что эксперимент CLAS12 проводится на фиксированной мишени, геометрия кремниевого вершинного детектора имеет больше общего с трековыми системами экспериментов на встречных пучках. Как показывает моделирование [1][7][8], большинство рассеянных электронов и рождённых гамма-квантов с большими импульсами будет регистрироваться в передней части детектора (полярные углы до 35°), в то время как протоны отдачи с импульсами порядка 1 ГэВ/с вылетают под углами до 135° и попадают в центральный детектор.

Для обеспечения регистрации продуктов в диапазоне от 5° до 135° кремниевый вершинный детектор состоит из двух частей: барреля и дисков (Рис. 2). Дисковая часть работает в диапазоне углов от 5° до 35° , что согласуется с диапазоном других детекторов передней части. В диапазоне от 35° до 135° детектирование осуществляет баррель.

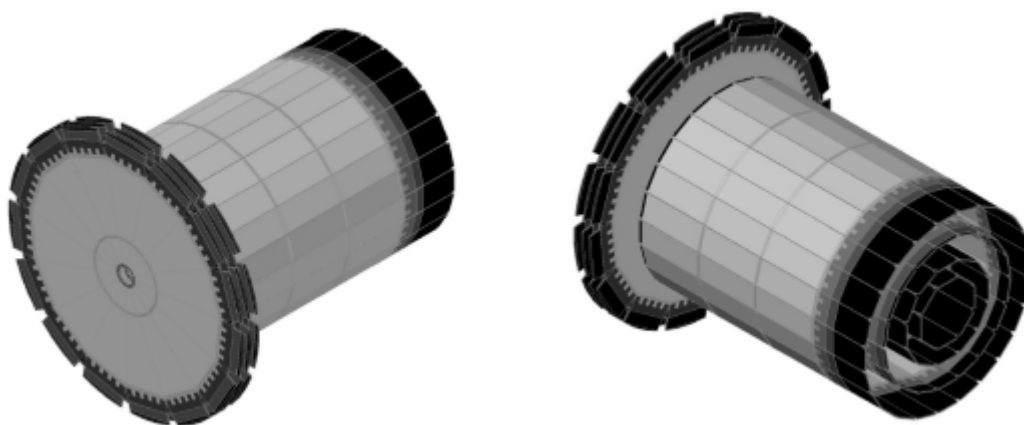


Рис. 2. Две изометрические проекции кремниевого вершинного детектора.

Важным вопросом геометрии трекера является необходимое количество детектирующих плоскостей. В соленоидальном магнитном поле траектории частиц представляют собой спирали; для их восстановления необходимо минимум четыре точки, или – при использовании односторонних сенсоров – четыре так называемых «суперслоя»: двух сенсоров, стрипы которых пересекаются, образуя «сетку» для определения двух координат; положение слоя в пространстве задаёт третью координату и, таким образом,

точку в пространстве. С учётом «мёртвых зон» в конструкции трекера, а также возможных сбоев в электронике считывания целесообразно увеличивать количество детектирующих плоскостей для более надёжного восстановления траекторий.

Но в то же время каждая детектирующая плоскость (как и любой материал, находящийся на пути частиц) вносит свои искажения в траекторию. Эти искажения объясняются многократным рассеянием в материале плоскости. Среднеквадратичный угол отклонения рассеянного электрона или заряженного мезона с импульсом 5 ГэВ/с после прохождения одного суперслоя (учтён материал сенсоров и механической основы) составляет $3 \cdot 10^{-4}$ рад. В следующем сенсоре, расположенном на расстоянии 5 см, это приведёт к ошибке определения координаты порядка 15 мкм. Для протона отдачи с импульсом 1 ГэВ/с один слой вносит отклонение $1,6 \cdot 10^{-3}$ рад, что соответствует погрешности в определении координаты порядка 80 мкм. После прохождения трёх суперслоёв суммарная вносимая погрешность составит 45 мкм и 240 мкм, соответственно. Это – нижняя граница разрешения сенсоров, поэтому целесообразным является выбор шага считывания 150 мкм (точность восстановления координаты составляет $d / \sqrt{12}$, где d – шаг стрипов).

Исходя из этого, было принято решение ограничиться в дисковой части детектора тремя суперслоями, чтобы не ухудшать разрешение других детекторов передней части. За цилиндрической частью кремниевого трекера нет каких-либо внешних детекторов, поэтому возможно без негативных последствий добавить для повышения надёжности четвёртый цилиндрический слой. Дальнейшее увеличение количества слоёв представляет сложности в связи с ограниченным пространством внутри соленоидального магнита.

Для большей точности определения координаты суперслои должны располагаться равномерно. При заданных размерах сенсоров оптимально следующее их расположение. Четыре суперслоя цилиндрической части состоят из 8, 12, 18 и 24 секторов, соответственно, и имеют радиусы 5, 7,8, 11,9 и 16 см. Каждый из трёх суперслоёв дисковой части разделён на 15 секторов. Диски расположены на расстояниях 23,8, 25,3 и 26,8 см от мишени. Внешний радиус чувствительной кремниевой области дисковой части – 17,5 см, внутренний – 1,9 см. Платы со считывающей электроникой увеличивают радиус дисков до 23,7 см.

Размеры сенсоров определяются кремниевыми пластинами, из которых они изготавливаются: было принято решение использовать пластины диаметром 150 мм. Для упрощения и удешевления конструкции целесообразно минимизировать число шаблонов и использовать одинаковые сенсоры в каждом слое. Исходя из этого, были определены оптимальные размеры сенсоров. Один модуль баррельной части составлен из трёх соединённых последовательно сенсоров. Сенсоры имеют размер 111,625 x 42 мм² и

располагаются на пластине по два. Угол стрипа на сенсоре изменяется от 0° (стрип 1) до 3° (стрип 512), таким образом, стрипы одного суперслоя пересекаются под углом 3° . Точность измерения координаты в плоскости детекторов в направлении поперёк стрипов составляет $40 \text{ мкм}/\cos(1,5^\circ) \approx 43 \text{ мкм}$; в направлении вдоль стрипов - $40 \text{ мкм}/\sin(1,5^\circ) \approx 1,5 \text{ мм}$. Используются три типа сенсоров: Hybrid (ближний к считывающей электронике), Intermediate (промежуточный), Far (дальний), один стрип по прямой продолжается на всех трёх сенсорах. Параметры всех трёх типов сенсоров приведены в таблице (Таблица 1). Шаг стрипов на дальнем сенсоре увеличивается до 108 мкм, шаг считывания, соответственно, до 216 мкм.

Таблица 1. Параметры трёх типов сенсоров для баррельной части кремниевого вершинного детектора.

| Тип сенсора | Количество стрипов в начале сенсора | Количество стрипов в конце сенсора | Шаг стрипов, мкм | |
|--------------|-------------------------------------|------------------------------------|------------------|--------------|
| | | | минимальный | максимальный |
| Hybrid | 512 | 496 | 75 | 86 |
| Intermediate | 492 | 396 | 86 | 97 |
| Far | 396 | 356 | 97 | 108 |

Сенсоры дисковой части невозможно целиком изготовить из одной пластины, поэтому они сделаны составными: на пластине расположены две трапеции высотой 126 мм и 43 мм, которые состыковываются и образуют модуль дисковой части. Угол между стрипами дискового суперслоя – 24° .

Третья глава посвящена кремниевым сенсорам. Описываются разработка шаблонов, изготовление и методика тестирования сенсоров. Приведены результаты испытаний сенсоров.

Разработанные и изготовленные для испытаний прототипа сенсоры несколько отличаются от тех, которые планируется использовать в кремниевом вершинном детекторе. Прототипы сенсоров для испытаний были изготовлены на кремниевых пластинах диаметром 100 мм. На каждом сенсоре расположено 512 параллельных стрипов, расположенных под углом $1,5^\circ$ к стороне сенсора. Длина стрипа на сенсоре – 7,5 см. На Рис. 3 приведён фрагмент чертежа сенсора. На подложке из высокоомного кремния расположены узкие параллельные полосы р-областей (4), а на обратной стороне формируется сильнолегированная n-область. К шине смещения (1) через поликремниевые резисторы (2), соединяющиеся с р-областями с помощью контактных площадок (3) к р-областям прикладывается напряжение обратного смещения, достаточное для создания зоны обеднения на всей толщине кремния.

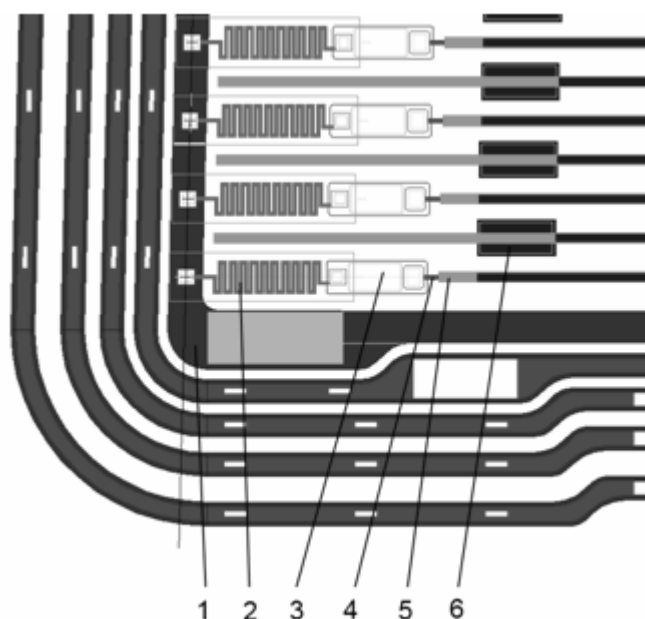


Рис. 3. Фрагмент чертежа сенсора.

Над p-областями формируется переходной конденсатор (5): обкладками конденсатора являются p-область и металлизация, а в качестве изолятора используется двойной слой оксида кремния (SiO_2) и нитрида кремния (Si_3N_4). Поверх этих разделительных ёмкостей расположены алюминиевые стрипы с контактными площадками (6), к которым с помощью ультразвуковой микросварки подключается считывающая электроника.

Сенсоры изготовлены в НИИ Материаловедения (г. Зеленоград) на пластинах монокристаллического p-кремния высокой степени очистки, полученного методом бестигельной зонной плавки, фирмы «Wacker Siltronic» по следующим параметрам (Таблица 2). Изготовлены две партии сенсоров: 19 на пластинах толщиной 250 мкм и 24 на пластинах толщиной 300 мкм.

Таблица 2. Параметры кремниевых сенсоров.

| Характеристика | Значение |
|----------------------------|------------------|
| Тип | p |
| Толщина | 250 мкм, 300 мкм |
| Ширина имплантации | 9 мкм |
| Глубина имплантации | 2 мкм |
| Ширина алюминиевых стрипов | 15 мкм |
| Шаг стрипов | 75 мкм |
| Шаг считывания | 150 мкм |

После изготовления каждый сенсор был подвергнут ряду испытаний для проверки качества по методике, описанной в [9]. В процессе контроля качества сенсоров определялись следующие параметры:

1. Напряжение полного обеднения;
2. Зависимость общего тока сенсора от приложенного напряжения;
3. Ток утечки каждого стрипа при рабочем напряжении;
4. Ёмкость и ток утечки конденсатора развязки стрипа.

Таблица 3. Ожидаемые и измеренные параметры кремниевых сенсоров.

| Характеристика | Ожидаемое значение | Партия 1 (250 мкм) | Партия 2 (300 мкм) |
|---|--------------------|--|---|
| Напряжение полного обеднения | < 100 В | $80 \text{ В} < V_{\text{п. об.}} < 100 \text{ В}$ | $20 \text{ В} < V_{\text{п. об.}} < 30 \text{ В}$ |
| Общий ток утечки | < 3 мкА | 600 нА | 1 мкА |
| Средний ток утечки стрипа | <10 нА | 1 нА | 1 нА |
| Средняя ёмкость проходного конденсатора | 140 пФ | 120 пФ | 100 пФ |

Необходимые значения параметров и результаты измерений для обеих партий приведены в таблице (Таблица 3). Сенсоры толщиной 300 мкм благодаря большему удельному сопротивлению демонстрируют меньшее значение напряжения полного обеднения (20-30 В против 80-100 В), в остальном характеристики обеих партий близки. В результате испытаний из 19 сенсоров первой партии только 9 оказались пригодными; остальные показали слишком высокий ток утечки. Во второй партии из 24 сенсоров 20 удовлетворяли требованиям. Доля бракованных стрипов составила 0,97%, в том числе 0,66% – пробитые конденсаторы, 0,05% – закороченная металлизация, 0,26% – высокий ток утечки. Сенсоры из партии на пластинах 300 мкм использованы в дальнейшем для изготовления прототипов модуля детектора.

Четвёртая глава посвящена микросхеме FSSR2: приведено описание её работы, описан программно-аппаратный комплекс для работы с микросхемой и все проведённые с ней испытания. Результаты испытаний подтверждают возможность использования микросхемы FSSR2 в кремниевом вершинном детекторе.

Микросхема FSSR2 [10] изготовлена компанией TSMC (Тайвань) по 0,25 мкм CMOS технологии. В микросхеме используется архитектура data-driven [11]. В data-driven архитектуре, если сигнал в одном из каналов превышает заданный порог, микросхема, не ожидая внешнего сигнала запуска, регистрирует и обрабатывает событие и инициирует передачу данных.

Микросхема состоит из аналоговой и цифровой частей. Аналоговая часть отвечает за приём и усиление сигнала, цифровая – за приём управляющих сигналов, установку параметров, кодирование и передачу информации. Для минимизации наводок аналоговая и цифровая часть используют отдельные источники питания. Рабочее напряжение питания микросхемы – 2,5 В; потребляемый ток – 0,2 А (4 мВт на канал). Для работы микросхеме требуются два синхроимпульса: быстрый (RCLK, частота 70 МГц) и медленный (BCO, период 132 нс). Управление микросхемой и приём данных происходит по низковольтным дифференциальным линиям (LVDS).

FSSR2 содержит 128 аналоговых входных каналов, которые подключаются к кремниевым детекторам. Аналоговый канал FSSR2 (Рис. 4) содержит:

- Зарядочувствительный усилитель с изменяемым коэффициентом усиления: 6,5 и 10 мВ/фКл. Динамический диапазон предусилителя достаточно широк: линейность предусилителя сохраняется при уровне сигнала на входе до 120 фКл
- CR-(RC)²-фильтр с переключаемым временем формирования. Доступны четыре значения времени формирования: 65, 85, 100 и 125 нс. В зависимости от выбранного времени формирования общий коэффициент усиления меняется от 60 до 80 мВ/фКл. Динамический диапазон микросхемы ограничен именно формирователем: при сигнале на входе выше 5 фКл появляется нелинейность, а при 10 фКл формирователь уже близок к насыщению.
- Отключаемый каскад восстановления базовой линии (BLR - BaseLine Restorer)
- Параллельный трёхразрядный аналого-цифровой преобразователь (АЦП), первый дискриминатор (компаратор) которого определяет наличие сигнала в канале. Порог каждого из восьми дискриминаторов определяется восьмидбитным регистром. Регистры принимают значения от 0 до 255, соответствующий порог может быть установлен с точностью 3,5 мВ.
- 8-разрядные цифроаналоговые преобразователи (ЦАП), при помощи которых изменяются постоянные смещения аналоговых каскадов и пороги компараторов.
- Калибровочный вход, подключённый к конденсатору ёмкостью 40 фФ и внутреннему генератору с изменяемой амплитудой

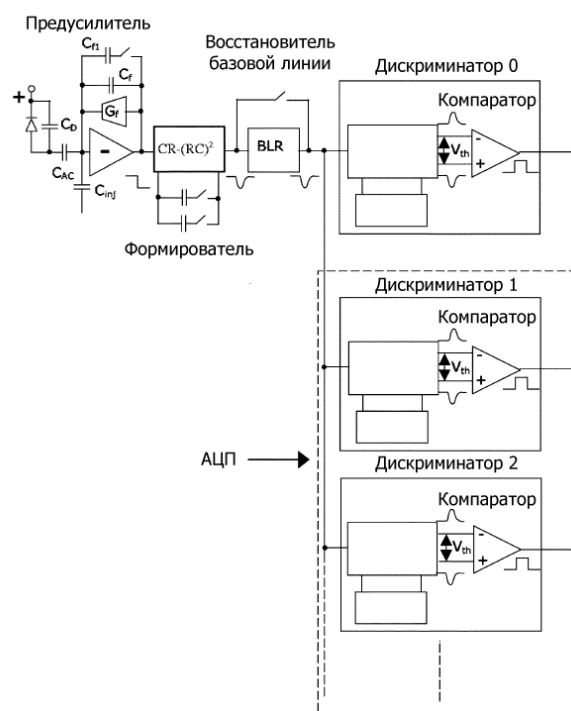


Рис. 4. Аналоговый канал микросхемы FSSR2 [10].

Один шаг порога дискриминатора соответствует приблизительно $200 e^-$, в то время как минимально ионизирующая частица (м.и.ч.) создаёт в 300 мкм кремния сигнал величиной 3,6 фКл или $22500 e^-$, что соответствует приблизительно 100 отсчётам ЦАП. Общий диапазон усилительного каскада составляет около 3 м.и.ч.. Нелинейность усиления необходимо учитывать при измерениях.

Чтобы избежать наводок, цифровая часть микросхемы выполнена насколько это возможно изолированно от аналоговой. Управление микросхемой осуществляется через интерфейс программирования. Инструкция, передаваемая микросхеме, состоит из номера микросхемы (5 бит), номера регистра (5 бит) и команды (3 бит).

Единица передаваемых микросхемой данных – слово – состоит из 24 бит. В состоянии без сигнала микросхема непрерывно передаёт слово статуса. Слово статуса содержит информацию о номере и некоторых параметрах микросхемы. Для каждого события формируется слово данных. Слово данных содержит информацию о номере канала, амплитуде и времени события. Счётчик времени увеличивается каждый такт ВСО и изменяется от 0 до 255. Номер канала передаётся двумя кодами: столбца и строки. Передаваемые микросхемой данные могут быть распараллелены на 1, 2, 4 и 6 линий.

Микросхема FSSR2 имеет псевдопиксельную архитектуру: 128 входных каналов разбиты на 16 групп – «столбцов» – по 8 каналов в каждой. Каждый канал является самостоятельным логическим элементом и обладает собственной ячейкой памяти. Если

сигнал в канале превышает установленный порог, он сигнализирует блоку логики своего столбца о наличии данных, сохраняет амплитуду пришедшего сигнала в своей ячейке памяти и прекращает приём сигналов. Блок логики столбца добавляет к данным об амплитуде метку времени и выставляет флаг готовности данных. Контроллер микросхемы опрашивает все столбцы на предмет наличия данных и, если один из столбцов готов к передаче, отправляет данные на интерфейс передачи данных. Канал может снова принимать сигналы только после того как данные из его ячейки памяти будут переданы.

Прототип системы считывания данных представляет собой две карты: Programmable Mezzanine Card (PMC) [12] и PCI Test Adapter (PTA) [13]. К карте PMC подсоединяются платы с размещёнными на них микросхемами FSSR2; она отвечает за взаимодействие с микросхемами. Карта PTA подключается к слоту PCI обычного ПК, её функция – обеспечить PMC взаимодействие с ПК и сохранение переданных микросхемами данных. На плате PTA размещены два модуля памяти ёмкостью 1 МБ (131 072 события) каждый. Для обеспечения непрерывной работы запись производится только в один модуль. После заполнения первого модуля памяти поток данных перенаправляется во второй, в то время как первый модуль считывается и информация с него сохраняется на жёсткий диск ПК.

Для испытаний микросхемы FSSR2 были разработаны и изготовлены несколько плат с посадочными площадками для микросхем и набором тестовых входов и выходов:

- плата HT2 для испытаний и определения параметров микросхемы [14];
- плата HT3 для подключения к полноразмерной (2 микросхемы, 256 считываемых каналов) линейке сенсоров;
- плата HFСВ для создания прототипа двустороннего модуля с четырьмя микросхемами и 512 каналами считывания [15].

Перед сборкой прототипа модуля был проведён ряд стендовых испытаний микросхемы FSSR2. Два основных вопроса, которые было необходимо решить: может ли микросхема обеспечить требуемое соотношение сигнал:шум при ожидаемой длине стрипа и достаточно ли быстродействия микросхемы для регистрации всех продуктов реакции при ожидаемой высокой светимости.

Обычно величину шума экспериментально определяют по ширине амплитудного распределения сигналов при фиксированной величине калибровочного сигнала. Однако низкое разрешение АЦП FSSR2 (3 бита) не позволяет использовать этот метод. В то же время порог дискриминатора устанавливается с точностью 8 бит, поэтому была использована другая методика: измерение зависимости темпа счёта от порога дискриминатора при постоянной величине входного сигнала. Сигнал на входе микросхемы с наложенным на него

шумом подчиняется распределению Гаусса, параметры μ и σ которого определяются величиной входного импульса и шумами усилителя, соответственно.

Шум ЗЧУ ENC_C пропорционален полной ёмкости на входе усилителя; его зависимость от ёмкости нагрузки C_d линейна и обычно записывается в таком виде:

$$ENC_C = a + b \cdot C_d \quad (1)$$

Параметр a – уровень шума при нулевой подключённой ёмкости учитывает паразитную ёмкость на входе усилителя.

Измерения были проведены на двух платах: НТ2 и НТ3. На НТ2 проводились испытания с различными временами формирования для определения оптимального режима работы. Получено, что увеличение времени формирования снижает уровень шума, в то время как использование восстановителя базовой линии увеличивает его. Минимальные шумы обеспечивает режим работы со временем формирования 125 нс и отключённым формирователем базовой линии.

Испытания были проведены также на плате НТ3 с большей статистикой для режима работы с минимальным шумом. Получены коэффициенты:

$$\begin{aligned} a &= 700 \pm 50 \text{ e}^- \\ b &= 50 \pm 2 \text{ e}^-/\text{пФ} \end{aligned} \quad (2)$$

Ёмкость линейки сенсоров длиной 30 см с учётом ёмкостей перемычек и адаптеров составляет около 45 пФ, следовательно, ожидаемый уровень шума – 2800 e⁻ на полной длине стрипа, что обеспечивает соотношение сигнал:шум 8:1.

С учётом высокой светимости важным вопросом является быстродействие считывающей электроники. Для моделирования производительности микросхемы была разработана программа, имитирующая работу логики FSSR2. С помощью этой программы была оценена доля потерянных событий в зависимости от частоты событий на входе микросхемы.

Работа микросхемы была смоделирована с расчётными частотами: период ВСО 132 нс, частота синхроимпульса передачи данных 70 МГц. Как видно на Рис. 5, при частоте событий около 1 МГц на микросхему доля потерянных событий менее 1%.

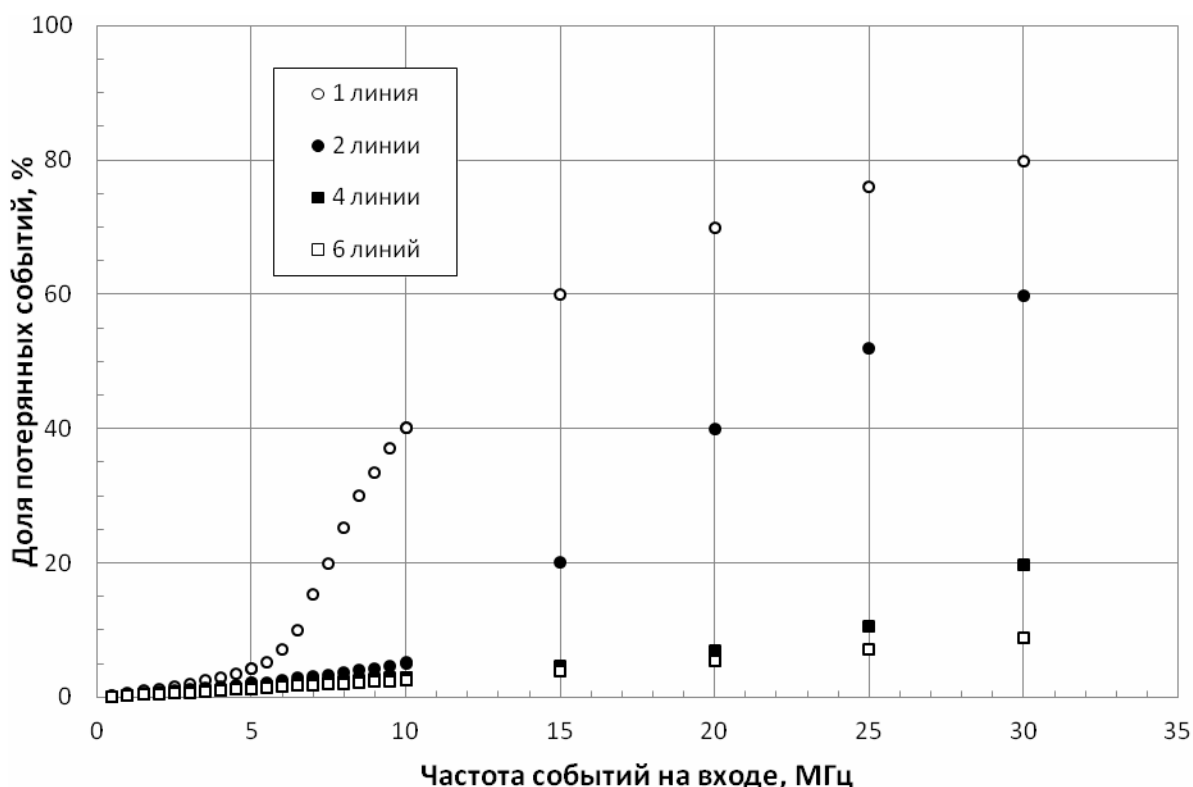


Рис. 5. Доля потерянных событий в зависимости от частоты событий на входе микросхемы при разном количестве линий передачи данных.

Как показывает моделирование в GEANT4, при величине порога регистрации 0,2, 0,4 и 0,6 м.и.ч. общая частота событий во внутреннем барреле составляет 42, 15 и 10 МГц, соответственно. Внутренний баррель считывается 16 микросхемами, в пересчёте на одну микросхему частота событий в зависимости от установленного порога составляет 2,6, 0,9 и 0,6 МГц. Частота шумовых срабатываний при уровне шума $2800 e^-$ составляет при тех же значениях порога 23 МГц, 11 кГц, 0,3 Гц на микросхему, то есть при пороге 0,2 м.и.ч. частота шумовых срабатываний почти в 10 раз превышает частоту физических событий. При этом по причине задержек в логике считывания теряются около 10% событий даже при использовании шести линий передачи данных, что сравнимо с долей физических событий и, следовательно, неприемлемо. При повышении порога регистрации до 0,4 м.и.ч. шумовые загрузки уменьшаются на три порядка и, как следствие, доля потерянных событий снижается до 1% даже при использовании одной линии передачи данных.

В пятой главе описан процесс создания прототипа модуля. Приведены расчёты ожидаемого шума при подключённой линейке сенсоров, результаты испытаний модуля на стенде и пучковых испытаний.

Были разработаны, изготовлены и протестированы несколько прототипов модуля кремниевого вершинного детектора. Прототип 1 собран на плате NT2. К одной микросхеме FSSR2 подсоединены 32 канала на четырёх сенсора, соединённых последовательно. Из 32

каналов 8 каналов соединены с одним сенсором, 16 с тремя и 8 с четырьмя сенсорами. Таким образом, подключённые группы стрипов имеют длины 7,5, 22,5 и 30 см для изучения влияния длины стрипа на уровень шума. Измерения шума проводились по описанной в предыдущей главе методике определения зависимости частоты регистрируемых сигналов от порога дискриминатора при постоянной частоте сигнала на входе. Прототип 1 показал принципиальную возможность использования микросхемы FSSR2 со стрипами длиной 30 см, но уровень шума в системе при такой длине стрипа был недопустимо высок ($5500 \pm 1000 \text{ e}^-$). В конструкции прототипа были найдены два недостатка: высокая паразитная ёмкость платы НТ2 и неудовлетворительное качество питч-адаптеров, также имеющих высокую ёмкость.

Прототип 2 включает в себя две микросхемы, к которым подключены четыре соединённых последовательно сенсора. Все подключённые стрипы имеют длину 30 см. Для уменьшения ёмкостной нагрузки питч-адаптеры не используются, поэтому на каждой микросхеме задействованы 64 канала. На прототипе 2 определено реальное соотношение сигнал:шум. Измерения уровня шума проведены тремя способами: с помощью лазера, с использованием внутреннего калибровочного генератора микросхемы, с использованием внешнего генератора, подключённого к калибровочному входу микросхемы.

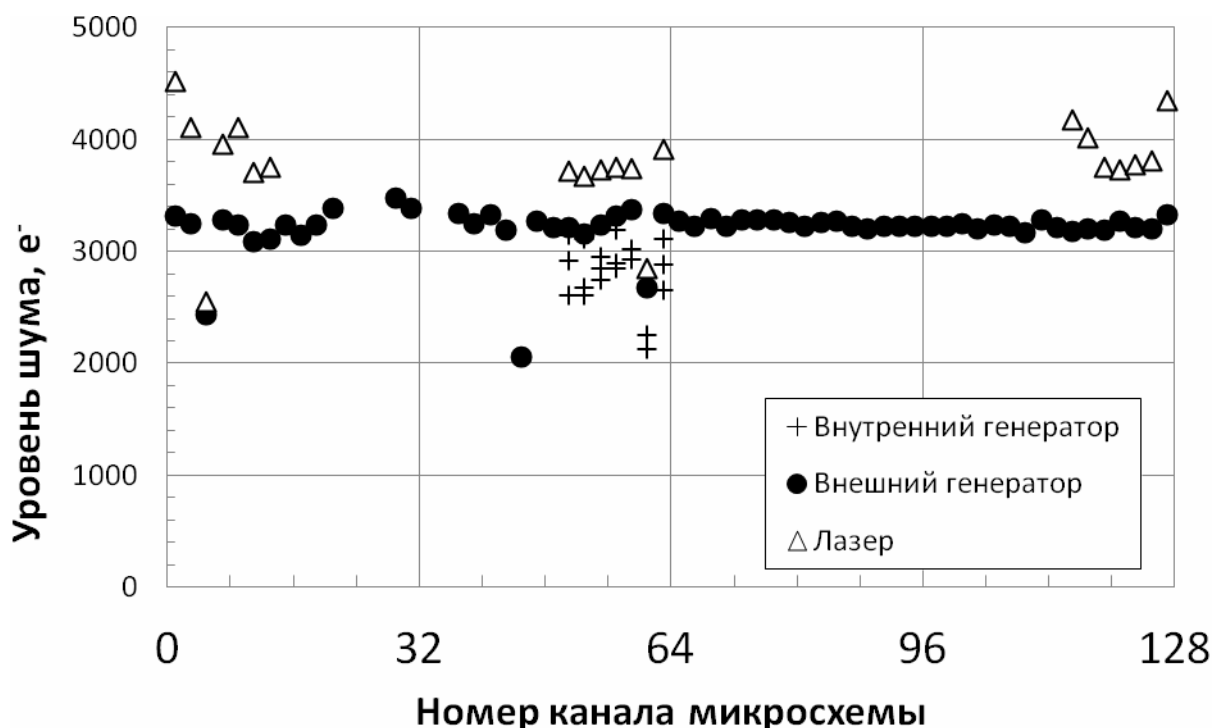


Рис. 6. Уровень шума на прототипе 2.

Данные измерений приведены на Рис. 6. Средние значения шума для разных методов таковы:

- лазер: $3900 \pm 400 \text{ e}^-$;
- внешний генератор: $3200 \pm 200 \text{ e}^-$;
- внутренний генератор: $2800 \pm 300 \text{ e}^-$;

Лазер ожидаемо показывает максимальные значения и разброс уровня шума, т.к. вносит свои помехи. Внутренний генератор показывает минимальные значения шумов, однако его использование достаточно трудоёмко в связи с малой частотой. Результаты измерений с использованием внешнего генератора несколько завышены. При уровне шума 2800 e^- достигается соотношение сигнал: шум 8:1.

Прототип 3 собран на основе платы HFСВ с четырьмя микросхемами FSSR2. Микросхемы подсоединены к линейкам, включающим в себя от 1 до 3 сенсоров. Используются сенсоры, изготовленные компанией HAMAMATSU (Япония) по шаблонам, разработанным совместно НИИЯФ МГУ и TJNAF. Толщина сенсоров составляет 300 мкм, а размер - $6 \times 100 \text{ мм}^2$. Угол стрипов относительно оси детектора меняется от 0° до 3° , поэтому шаг стрипов изменяется от 75 мкм до 95 мкм и часть стрипов короче сенсора. Упрощенный чертеж прототипа до перегибания HFСВ приведен на Рис. 7, общий вид прототипа в рабочем состоянии - на Рис. 8.

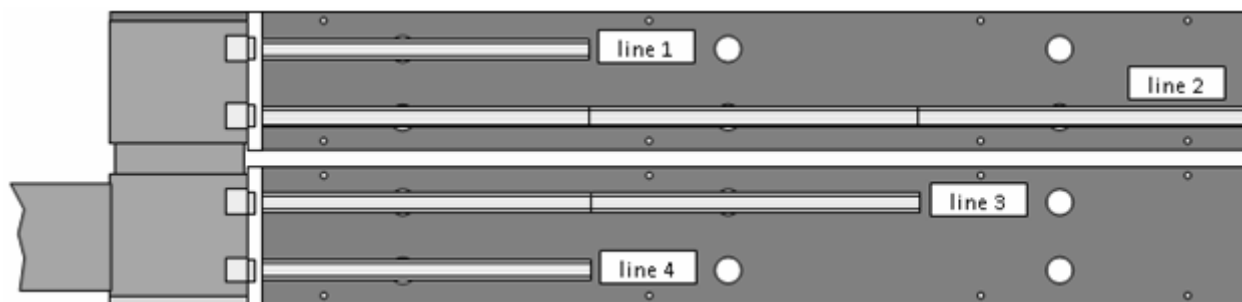


Рис. 7. Схема прототипа 3.

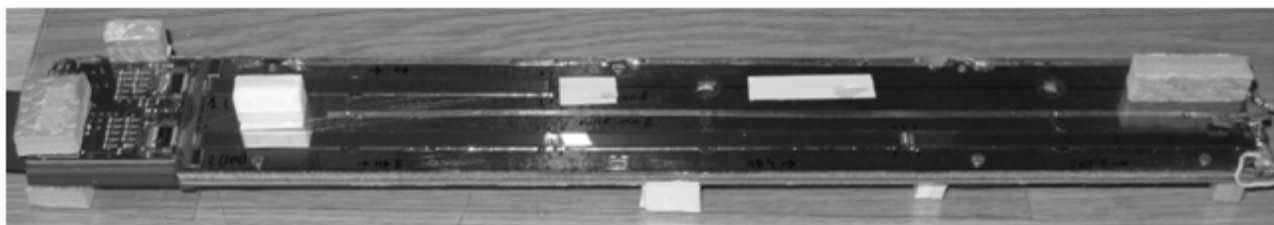


Рис. 8. Фотография прототипа 3. Отображены линейки 1 и 2 (1 и 3 сенсора).

Прототип модуля был установлен на выведенном протонном пучке ускорителя У-70 (ИФВЭ, Протвино). Энергия протонов составляла 50 ГэВ, количество частиц в сбросе

длительностью $1\text{ с} - 3\cdot 8\cdot 10^5$. Периодичность сбросов составляла 10 с. Диаметр пучка в районе прототипа составлял приблизительно 6 мм. Активная область сенсоров имеет ширину около 3,5 мм, поэтому в детекторах прототипа наблюдалась только часть профиля пучка, в зависимости от положения прототипа.

Для определения амплитуды сигнала от м.и.ч. проведена калибровка методом обратной функции ошибок для одного из каналов микросхемы U2, находившегося в области максимума пучка. Полученное распределение (Рис. 9) представляет собой свёртку распределения Ландау с распределением Гаусса.

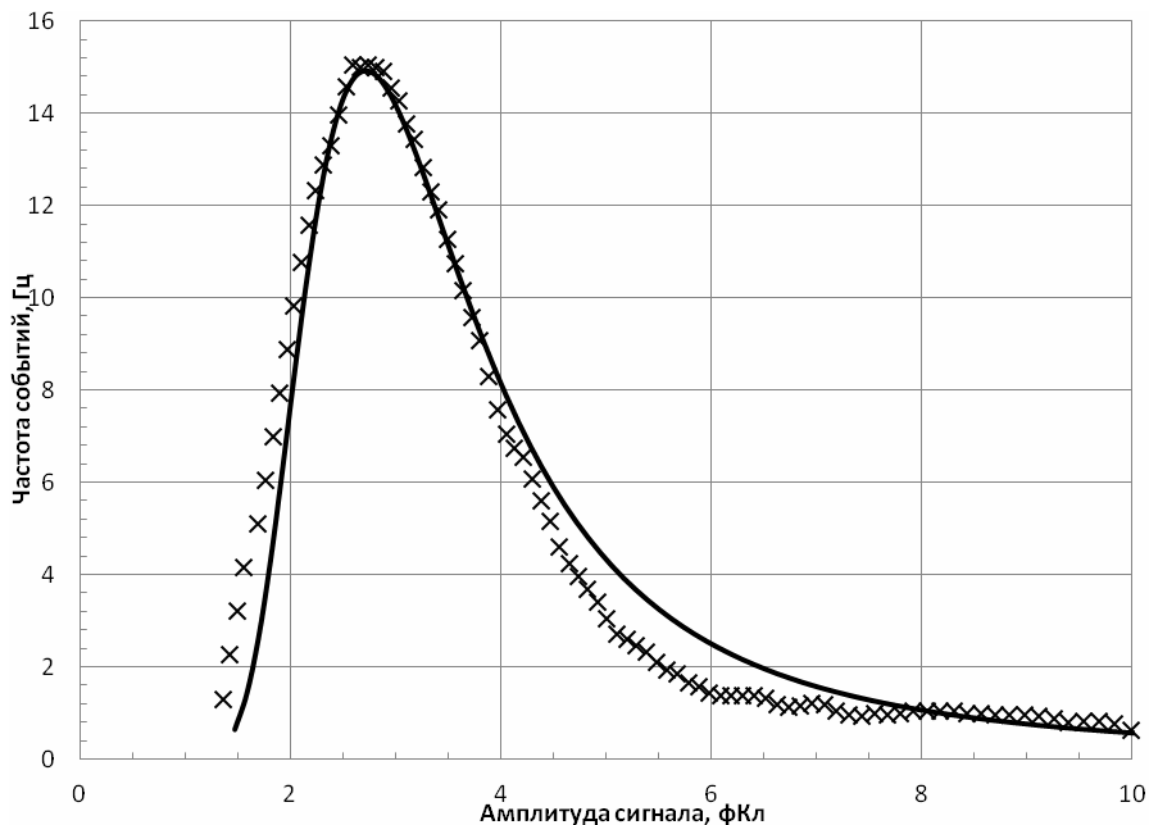


Рис. 9. Распределение сигналов от минимально ионизирующих частиц по амплитуде.

Параметры распределения: наиболее вероятное значение $17100\pm 60\text{ е}^- (2,71\pm 0,01\text{ фКл})$, ширина распределения $6600\pm 100\text{ е}^- (1,05\pm 0,01\text{ фКл})$. Амплитуда ниже ожидаемого для такой толщины сенсора значения (3,6 фКл) на 24%. Это различие может быть объяснено делением заряда между стрипами. При этом на каждом из двух соседних стрипов собирается около 10% заряда, и микросхема FSSR2 не в состоянии зарегистрировать такой сигнал. При создании сенсоров для кремниевого вершинного детектора необходимо увеличить ёмкость разделительного конденсатора и уменьшать межстриповую ёмкость для минимизации этого эффекта.

В заключении сформулированы основные выводы диссертации.

Список литературы

- [1] *The Hall B Collaboration*. The Hall B 12 GeV Upgrade Preconceptual Design Report. Jefferson Lab, 2006.
- [2] *D. Mueller et al.* Wave Functions, Evolution Equations and Evolution Kernels from Light-Ray Operators of QCD // *Fortschr. Phys.* 1994. – V. 42. – P. 101.
- [3] *X. Ji*. Gauge-Invariant Decomposition of Nucleon Spin // *Phys. Rev. Lett.* 1997. – V. 78. – Pp. 610-613.
- [4] *A.V. Radyushkin*. Scaling limit of deeply virtual Compton scattering // *Phys. Lett. B.* 1996. – V. 380. – Pp. 417-425.
- [5] *B.-Q. Ma, I. Schmidt, J.-J. Yang*. Understanding the Proton Spin 'Puzzle' with a New 'Minimal' Quark Model // *Eur. Phys. J. A.* 2001. – V. 12. – Pp. 353-359.
- [6] *Буркерм В. Д., Мокеев В. И.* Структура возбуждённых состояний нуклона. – М., 2009. – 15 с. (Препринт НИИЯФ МГУ № 11/855).
- [7] *P. Stoler et al (The CLAS12 Collaboration)*. Hard exclusive electroproduction of π^0 and η with CLAS 12. – Jefferson Lab, 2006. – 65 pp. (Proposal to PAC30 E12-06-108).
- [8] *M. Battaglieri et al. (The CLAS12 Collaboration)*. Meson Spectroscopy with low Q^2 electron scattering in CLAS12. – Jefferson Lab, 2011. – 65 pp. (Proposal to PAC37 E12-11-005).
- [9] *П.Ф. Ермолов и др.* Методика массового тестирования односторонних микроstriповых детекторов // *ПТЭ.* 2002. – №2 – С. 54-67.
- [10] *V. Re et al.* FSSR2, a self-triggered low noise readout chip for silicon strip detectors // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 2006. – V. 53. – № 4. – Pp. 2470-2476.
- [11] *Аткин Э.В. и др.* Метод и интегральная микросхема для обработки нерегулярного во времени потока данных в многоканальной аппаратуре физического эксперимента // *ПТЭ.* 2010. – №4. – С. 61-67.
- [12] *P. Bonneau et al.* Research and Development Status Report for Fiscal 2007. – Jefferson Lab, 2007. – 4 pp. (CLAS-Note 2007-014).
- [13] *P. Bonneau et al.* FY06 R&D Status Report. – Jefferson Lab, 2006. – 2 pp. (CLAS-Note 2006-010).
- [14] *B. Eng et al.* FSSR2 ASIC Test Board for the Silicon Vertex Tracker. – Jefferson Lab, 2008. – 2 pp. (CLAS-Note 2008-022).
- [15] *P. Bonneau et al.* Design of the Hybrid Circuit Board for the Silicon Vertex Tracker. – Jefferson Lab, 2010. – 2 pp. (CLAS-Note 2010-004).

Основные материалы диссертации опубликованы в работах:

1. *A.G. Voronin, D.E. Karmanov, M.M. Merkin, S.V. Rogozhin*. Silicon Vertex Tracker for the TJNAF Hall B Upgrade. Proceedings of the XII International Seminar on Electromagnetic Interactions of Nuclei EMIN-2009.
2. *Воронин А.Г., Карманов Д.Е., Меркин М.М., Рогожин С.В.* Первые результаты исследований электроники считывания кремниевой трековой системы для модернизации эксперимента CLAS12 // Приборы и Техника Эксперимента, №6, С. 34-41 (2010).
S. Rogozhin. Loopback tests for the PMC. – Jefferson Lab, 2007. – 5 pp. (CLAS-Note 2007-021)
M.A. Antonioli, P. Bonneau, B. Eng, M. Leffel, M. McMullen, S. Rogozhin, W. Teachey, A. Yegneswaran. Readout Architecture of the Silicon Vertex Tracker's FSSR2 ASIC. Jefferson Lab, 2008. – 3 pp. (CLAS-Note 2008-024).
M.A. Antonioli, P. Bonneau, B. Eng, M. Leffel, M. McMullen, S. Rogozhin, W. Teachey, A. Yegneswaran. Data Rate Handling Capability of the FSSR2 ASIC-based Data Acquisition System of the Silicon Vertex Tracker. Jefferson Lab, 2008. – 1 pp. (CLAS-Note 2008-028).
3. *Карманов Д.Е., Меркин М.М., Рогожин С.В.* Модуль кремниевого трекового детектора эксперимента CLAS12 // Приборы и Техника Эксперимента, №1, С. 35-39 (2012).
Рогожин С.В. Кремниевый вершинный детектор как часть проекта модернизации эксперимента CLAS12. «Труды Межвузовской научной школы молодых специалистов «Концентрированные потоки энергии в космической технике электронике, экологии и медицине». Москва, 2009, КДУ.
4. *Курбатов Е.О., Меркин М.М., Рогожин С.В.* Расчёт быстрогодействия кремниевого вершинного детектора эксперимента CLAS12 // Вестник Московского Университета, Серия 3, №3 (2012).