

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени М.В.Ломоносова

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ имени Д.В.Скобельцына

На правах рукописи

Меркин Михаил Моисеевич

Разработка, создание и применение кремниевых детекторов  
в физике высоких энергий и физике космических лучей

Специальность: 01.04.23 – физика высоких энергий

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук



Москва - 2012

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

Официальные оппоненты: **Зайцев Юрий Михайлович**  
доктор физико-математических наук  
Институт Теоретической и Экспериментальной  
Физики - ФГУП "ГНЦ РФ - ИТЭФ", начальник  
отдела

**Кекелидзе Владимир Дмитриевич**  
доктор физико-математических наук, профессор  
Объединенный институт ядерных  
исследований, Лаборатория физики высоких  
энергий им. В.И. Векслера и А.М. Балдина,  
директор

**Новиков Лев Симонович**  
доктор физико-математических наук, профессор  
НИИ ядерной физики имени Д.В.Скобельцына,  
МГУ имени М.В.Ломоносова, заведующий  
отделом

Ведущая организация: Институт физики высоких энергий (ГНЦ ИФВЭ)

Защита состоится « 5 » октября 2012 г. в 15<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д501.001.77 на базе Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу:  
119991, Москва, Ленинские горы, НИИЯФ МГУ, корпус 19, ауд. 2-15.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИИ ядерной физики имени Д.В.Скобельцына, Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова.

Автореферат разослан « 14 » \_\_\_\_\_ мая \_\_\_\_\_ 2012 г.

Ученый секретарь совета Д501.001.77  
доктор физико-математических наук,  
профессор

 Страхова С.И.

## Общая характеристика работы

### Актуальность темы

Еще чуть более 30 лет назад полупроводниковые детекторы были едва известны в физике высоких энергий (ФВЭ) и физике космических лучей (ФКЛ), в то время как сегодня это уже очень широко применяемые приборы, используемые для определения координат, энергии, типа и заряда частиц. Интенсивное развитие многоканальной высокочувствительной электроники считывания, т.н. «front-end», привело к тому, что сегодня электрические сигналы с полупроводниковых детекторов могут быть относительно легко обработаны и записаны системами сбора информации для непосредственного или последующего анализа.

Полупроводниковые детекторы сегодня обеспечивают наилучшую точность определения координаты частицы в больших детектирующих системах, способны работать в очень высоких магнитных полях, и в достаточно жестких радиационных условиях. Что особенно важно для масштабных экспериментов по изучению редких процессов, таких как, например, эксперименты на коллайдере «ТЭВАТРОН» (CDF и D0) и эксперименты на большом адроне коллайдере (БАК/LHC).

Следует отметить, что все современные экспериментальные установки включают в себя, как правило, кремниевую систему как основной и наиболее точный инструмент.

Практически все современные полупроводниковые детекторы, используемые в ФВЭ и ФКЛ, изготавливаются на пластинах монокристаллического кремния по технологиям, применяемым в микроэлектронике, и это определяет их широкое применение благодаря высокой степени разработанности технологий и повторяемости результатов.

Развитие физических экспериментов с использованием коллайдеров (LHC – большой адронный коллайдер, ILC – международный линейный коллайдер, SLHC – сверхбольшой адронный коллайдер, RHIC – коллайдер тяжелых ионов), а также экспериментов с ионными пучками требует создания очень больших систем с максимально возможной гранулярностью, что связано с огромными потоками частиц, образующихся в результате взаимодействия. Например, для эксперимента CBM при интенсивности пучка до  $10^9$  ионов золота в секунду число взаимодействий в мишени определяется как  $10^5 \div 10^7$  1/сек при средней множественности процессов около 800 вторичных частиц. Из существующих и разрабатываемых приборов только полупроводниковые детекторы способны обеспечить регистрацию частиц,

восстановление их треков и вторичных вершин распада при высокой скорости отклика. Пожалуй, единственной альтернативой полупроводниковым детекторам являются детекторы на основе искусственного алмаза, однако технологии выращивания материала и собственно изготовления детекторов еще не дают возможности использовать эти приборы в реальных установках.

С другой стороны, в физике космических лучей, где, казалось бы, радиационные загрузки на несколько порядков меньше и необходимые скорости считывания всего до десятков событий в секунду (в некоторых случаях сотен), все же существует ряд задач, требующих очень высоких или даже уникальных параметров регистрирующих приборов. Особенно это касается координатного разрешения при экстремально высокой множественности процессов. Кроме того, для ФКЛ чрезвычайно актуальна задача определения химического состава космических лучей вплоть до ионов железа и даже более тяжелых ионов. Динамический диапазон кремниевых детекторов практически не ограничен, что позволяет использовать их в системах определения заряда.

Настоящая работа посвящена актуальной проблеме разработки кремниевых детекторов для физики высоких энергий и физики космических лучей.

В России работы по созданию кремниевых детекторов начались в конце 80-х годов в НИИЯФ МГУ в рамках разработки детектирующих систем для строящегося Ускорительно-Накопительного Комплекса (УНК). Было ясно, что современный коллайдер, запуск которого планировался в конце 90-х годов, требует самых передовых в технологическом отношении экспериментальных установок и использования качественно новых технологий регистрации частиц. В начале 90-х годов были получены первые образцы кремниевых детекторов для электромагнитного калориметра УНК. Работы по созданию этих детекторов проводились совместно с НИИ космического приборостроения (НИИКП), НИИ Микроэлектроники (НИИМЭ) и НИИ Материаловедения (НИИМВ).

Отдельной проблемой было создание производства высокочистого кремния бестигельной зонной плавки (БЗП). К сожалению, достичь мирового уровня в производстве и обработке БЗП кремния не удалось; в большой степени это было связано с прекращением финансирования проекта УНК и с чисто экономическими соображениями; разработка производства БЗП кремния оказалась не целесообразной из-за ограниченного спроса на этот материал. Эта тенденция прослеживается и в мире. Производством такого типа кремния занимаются всего две фирмы: «Wacker Siltronic», Германия и

«Topsil», Швеция (и они практически полностью покрывают всю мировую потребность в этом материале).

Предлагаемая к защите диссертация охватывает цикл работ, проведенных за последние двадцать лет. В работе рассмотрены и обобщены следующие результаты, выполненные непосредственно автором и при его определяющем вкладе:

- технологическая и топологическая разработка кремниевых детекторов;
- методики измерений параметров и анализа качества кремниевых детекторов;
- разработка и применение кремниевых детекторов для ряда экспериментов в ФВЭ:
  - адрон-электронный сепаратор эксперимента ZEUS, DESY, Германия;
  - трековая система (SMT) эксперимента D0, ФермиЛаб, Батавия, США;
  - вершинный детектор эксперимента СВД-2, Протвино;
  - передний калориметр эксперимента PHENIX, Брукхевен, США;
  - прототип электромагнитного калориметра для будущего линейного коллайдера ILC;
  - ряд прототипов детекторов для задач калориметрии и трековых систем;
- разработка и применение кремниевых детекторов для ФКЛ:
  - кремниевая матрица для баллонного антарктического эксперимента АТІС;
  - зарядовая и трековая системы спутникового эксперимента НУКЛОН.

### **Цель работы и задачи исследования**

К началу работы в литературе появилось достаточно большое количество публикаций по разработке и применению первых образцов кремниевых детекторов в физике высоких энергий, в частности, работы коллаборации DELPHI по использованию кремниевой трековой системы на коллайдере LEP. Появились также первые идеи по использованию кремниевых детекторов в электромагнитной и адронной калориметрии.

С 1990 года началась интенсивная разработка и использование кремниевых детекторов в экспериментах физики высоких энергий. Целью настоящей работы является обобщение результатов по исследованиям, разработке, технологии и применению кремниевых детекторов, полученных непосредственно автором, под его руководством или при его участии.

## **Основные новые результаты, полученные в диссертации:**

1. Доказана возможность, и разработаны способы управления параметрами и свойствами кремниевых детекторов топологическими и технологическими методами. Разработаны методы геттерирования пластин, существенно (до 10 раз) увеличивающие время жизни неосновных носителей, в цикле производства. Что, соответственно, значительно улучшает токовые и шумовые характеристики кремниевых детекторов. Получены детекторы с площадями до 40 см<sup>2</sup> и предельно низкими токами утечки менее 1 нА/см<sup>2</sup>. Разработанная методика увеличения времени жизни носителей заряда, что позволила получить эффективность сбора заряда не менее 99%.
2. Разработаны и апробированы топологии структуры охранных колец кремниевых детекторов, учитывающие толщину пластины, геометрию детекторов и условия их применения. Получена оптимальная для данной технологии топология охранных колец для детекторов экспериментов: ZEUS, PHENIX, ATIC, НУКЛОН, D0, СВД-2, CLAS12. Топология обеспечивает плавное снижение потенциала от активной области к краю детектора и позволяет получить приборы с рабочим напряжением более 1000 В. В разработанной топологии значительно снижено влияние краевых нарушенных областей детектора на его активную часть.
3. Создана кластерная модель радиационных нарушений в кремниевых детекторах, описывающая деградацию параметров детекторов в процессе облучения и эволюцию дефектов после облучения, объясняющая процессы быстрого, медленного и обратного отжига. Модель основана на учете влияния сложных структурных дефектов. Показана принципиальная разница в структуре радиационных дефектов при облучении гамма-квантами и электронами от дефектов, создаваемых в результате нейтронного, протонного и другого облучения относительно тяжелыми частицами. Доказано, что основное влияние ионизирующего излучения на параметры детекторов, надежность их работы, степень деградации и зависимость параметров от интегральной дозы облучения определяется дефектообразующей компонентой.

Разработаны топологические методы повышения радиационной стойкости детекторов, обеспечивающие повышение допустимого рабочего напряжения смещения детектора за счет использования

разработанной системы охранных колец (с учетом изменения режимов работы детектора в процессе облучения). Проведена оптимизация профиля легирования  $p^+$ -области детектора, в результате которой практически исключается возникновение микропробоев по границам стрипов и на их концах. При применении сложного многоступенчатого профиля легирования возникновение микропробоев возможно только в случае нарушений технологического процесса или дефектов фотолитографии.

Разработаны радиационно-стойкие детекторы на основе оксидированного  $n$ -кремния, сохраняющие работоспособность до интегральных доз 10 МРад(Si). Применение технологии насыщения кислородом пластин кремния перед проведением технологического процесса приводит к уменьшению вдвое скорости роста напряжения полного обеднения при больших дозах дефектообразующего излучения.

4. Разработаны методы контроля параметров кремниевых детекторов и проведен анализ их корреляции с параметрами экспериментальных установок. Данный метод анализа детекторов позволяет определить проблемные места в технологическом процессе и провести «точную настройку» технологических процессов для конкретного типа детекторов и условий их применения. Разработанная методика позволяет определить минимально необходимый набор измеряемых параметров и число измерений на детекторе или партии детекторов при массовом производстве этих приборов для больших систем при полном контроле качества, гарантирующем соответствие параметров детекторов требованиям физического эксперимента.
5. Разработаны системы измерения заряда релятивистских ионов (в частности, состава космических лучей) с помощью кремниевых детекторов. Экспериментально показано, что, используя кремниевые детекторы, можно провести идентификацию ионов в диапазоне зарядов  $Z$ , по крайней мере, от  $Z=1$  до  $Z=26$ . Основные ограничения на диапазон накладываются параметрами существующей электроники считывания, а не свойствами и параметрами детекторов. Этот метод был экспериментально подтвержден на тестовом пучке в CERN и нашел широкомасштабное применение в экспериментах по исследованию состава космических лучей АТIS и НУКЛОН.

6. Разработано более 20 типов детекторов для различных экспериментальных установок как для физики высоких энергий и ядерной физики, так и для исследований энергетического спектра и состава космических лучей:
- падовые, с размером чувствительной области от 0.13 до 25 см<sup>2</sup>, достигнут уровень токов утечки менее 1 нА/см<sup>2</sup>, в частности: детекторы для адрон-электронного сепаратора эксперимента ZEUS, plug-калориметра эксперимента H1, переднего калориметра эксперимента PHENIX, экспериментов по исследованию космических лучей АТIS и НУКЛОН, прототипа электромагнитного калориметра проектируемого линейного коллайдера;
  - стриповые детекторы как с гальваническим, так и с ёмкостным съёмом сигнала с шагом стрипов от 0.2 до 1 мм: система измерения энергии, миникалориметр эксперимента НУКЛОН, активная мишень эксперимента СВД-2 и ядерно-физический эксперимент на накопительном кольце CELCIUM;
  - микростриповые детекторы с ёмкостным съёмом сигнала и интегрированными резисторами смещения, шаг стрипов от 25 до 150 мкм: передняя трековая система эксперимента D0 (H-disks), пучковый телескоп и вершинный детектор эксперимента СВД-2, кремниевый вершинный трекер эксперимента CLAS12, детекторы трековой системы эксперимента CBM.
7. Разработаны прототипы кремний-вольфрамовых калориметров для экспериментов PHENIX и коллаборации CALICE.
- Калориметр CALICE предназначен для проектируемого линейного коллайдера, и является чисто электромагнитным координатно-чувствительным калориметром. Проведены испытания на пучках различных энергий, показана работоспособность прототипа, и достигнута расчетная точность определения энергии.
- Передний калориметр эксперимента PHENIX содержит как электромагнитную, так и адронную части. Прототип прошел испытания на пучках ускорителя У-70 (ИФВЭ). Следует отметить, что это первое применение кремниевых детекторов для адронной калориметрии.

## **Научная новизна**

Научная новизна работы определяется, прежде всего, новизной объекта исследований. До начала исследований, описанных в настоящей работе, в России практически не существовало ионно-имплантированных кремниевых детекторов, изготовленных по планарной технологии. В диссертации приведены результаты разработок и исследований кремниевых детекторов, изготавливаемых практически всеми современными технологическими методами: ионной имплантацией (непосредственно в кремний и через тонкий слой окисла), плазмохимическим травлением, окислением в специальной среде, геттерированием, восстановительным отжигом в атмосфере водорода, комбинированными технологиями, использующими как биполярный процесс, так и МОП.

Впервые приводятся характеристики и параметры большого ряда кремниевых детекторов, разработанных автором или под его руководством.

Изучено влияние примеси кислорода на радиационную стойкость кремниевых детекторов, показано, что внесение дополнительной примеси кислорода приводит к значительному снижению напряжения полного обеднения для сильно облученных детекторов.

Утверждается, что разработанная и адаптированная для российских предприятий технология способна обеспечить параметры детекторов на уровне лучших мировых образцов.

## **Практическая значимость**

Практическая ценность работы и созданных автором детекторов подтверждается их успешным использованием в разработке различных систем.

Падовые детекторы большой площади (до 25 см<sup>2</sup>) были использованы для адрон-электронного сепаратора экспериментов ZEUS и H1 на коллайдере HERA. Общая площадь кремниевых детекторов, установленных в экспериментах, более 10 м<sup>2</sup>. Эксперименты завершили работу, сейчас продолжается обработка данных.

Была разработана и построена кремниевая матрица площадью 1 м<sup>2</sup> для баллонного эксперимента по исследованию космических лучей АТІС. К настоящему времени эксперимент совершил три полета вокруг южного полюса, и обработка данных продолжается, планируются следующие полеты.

Разработаны падовые детекторы для прототипа Si-W электромагнитного калориметра международного линейного коллайдера (ILC) и переднего конического калориметра эксперимента PHENIX. Детекторы смонтированы со считывающей электроникой, и прошли пучковые испытания.

Разработаны падовые детекторы для системы определения заряда космического эксперимента НУКЛОН. Проведены испытания детекторов на ионном пучке в ЦЕРН.

Разработаны стриповые детекторы для системы измерения заряда эксперимента НУКЛОН, испытания детекторов прошли успешно.

Разработаны и смонтированы в экспериментальную установку микростриповые детекторы передней части трековой системы эксперимента D0 на коллайдере «ТЭВАТРОН». Система введена в эксплуатацию в 2002 году. Набор физических данных закончен в сентябре 2011, и получены уникальные результаты по наблюдению одиночного рождения топ-кварка, В-осцилляции и уточнению массы топ-кварка.

Разработана и действует серия стриповых и микростриповых детекторов для эксперимента СВД-2 (Спектрометр с вершинным детектором). Детекторы используются в качестве активной мишени, пучкового телескопа, и собственно вершинного детектора с координатным разрешением не хуже 10 мкм.

### **Апробация работы.**

Основные результаты диссертации докладывались на семинарах НИИЯФ МГУ, ИФВЭ, на рабочих совещаниях коллабораций RD2, ATLAS, D0, ZEUS, CBM, CALICE, PHENIX, НУКЛОН, на рабочем совещании по оценке качества детекторов в ЦЕРН (1-st Workshop on Quality Assurance Issues in Silicon Detectors, CERN, Geneva). Результаты работы были доложены на международных конференциях: 27th International Cosmic Ray Conference (ICRC 2001, Hamburg, Germany, 7-15 Aug. 2001), 28th International Cosmic Ray Conferences (ICRC 2003, Tsukuba, Japan, 31 Jul - 7 Aug. 2003), IEEE Nuclear Science Symposium (Rome, Italy 16 - 22 Oct. 2004), 12th International Conference on Calorimetry in High Energy Physics (CALOR 06, Chicago, Illinois, 5-9 Jun. 2006), 30-я Российская конференция по космическим лучам (30-я РККЛ, Санкт-Петербург, 2008), Научная конференция «Ломоносовские чтения» (Москва, Апрель 2007), Научная сессия МИФИ (Москва, 2010). За часть результатов этой работы автору была присуждена премия имени М.В. Ломоносова МГУ (2007). Результаты опубликованы в 38 печатных работах.

Получено 3 Свидетельства о государственной регистрации топологии детекторов.

### **Структура диссертации**

Диссертация состоит из введения и 5 глав. Объем работы составляет 285 страниц, включая 112 рисунков, 17 таблиц, 125 ссылок на литературные источники. В Приложении приведены 38 основных публикаций по теме диссертации.

### **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** обосновывается актуальность работы, кратко излагается история развития исследований по выбранному направлению. Формулируется цель работы и задачи исследований. Описывается научная новизна и практическая ценность работы. Рассматривается общая структура диссертации.

В **первой главе** диссертации рассмотрены различные типы полупроводниковых детекторов, физические принципы их работы, современное состояние проблемы и применение в различных экспериментах в физике высоких энергий (ФВЭ) и физики космических лучей (ФКЛ). Определены общие требования экспериментов к параметрам кремниевых детекторов.

Кратко рассмотрены технологические аспекты разработки и производства кремниевых детекторов. Здесь же отмечено, что основной задачей разработки было использование стандартных для микроэлектроники технологических процессов при производстве детекторов, и в большинстве случаев стандартного оборудования, только таким образом можно было получить прибор с необходимыми параметрами и за разумную цену. Применены технологические процессы изготовления биполярных и МОП приборов. Надо отметить что технология изготовления кремниевых детекторов, не является простой компиляцией различных известных технологических процессов – это абсолютно новый технологический процесс, учитывающий особенности кремниевого детектора. Более того, некоторое стандартное оборудование было существенно модифицировано для обеспечения особенностей технологического процесса и повышения процента выхода годных детекторов. Одно из основных отличий кремниевого детектора от микросхем и других изделий электронной техники,

изготавливаемых по планарной технологии, - это то, что рабочим объемом детектора является весь объем кристалла. В то время как для стандартных приборов основная часть толщины пластины используется лишь как подложка, обеспечивающая механические свойства и прочность, а рабочей областью является только несколько микрон у поверхности. Вторая, может быть, не менее существенная особенность - это «громадные» с точки зрения микроэлектроники размеры самого детектора, как правило, размер детектора практически совпадает с размером пластины. Кроме того, следует отметить, что во многих случаях требования задач физического эксперимента к толщине детектора звучат как: «минимально возможная толщина». И, по-видимому, разумным компромиссом между требованиями эксперимента и возможностями технологии для трековых систем являются толщины в интервале 250 – 350 мкм, в то время как стандартные толщины микроэлектронных приборов 475 – 525 мкм для пластин диаметром 100 мм.

Геометрия детектора определяется, вообще говоря, задачами и геометрией физической установки, но, как правило, это опять звучит как: «детектор должен иметь технологически максимально допустимый размер». Для используемых пластин максимальный размер активной области детектора составляет  $60 \cdot 60 \text{ мм}^2$ , в то время как размеры микросхемы редко превышают  $5 \cdot 5 \text{ мм}^2$ . Такие требования вынуждают использовать т.н. контактную фотолитографию вместо широко применяемой проекционной, что в свою очередь накладывает очень жесткие требования на качество фотошаблонов, т.е. на размеры и количество допустимых дефектов.

Еще одной существенной особенностью технологического процесса является необходимость коррекции свойств материала пластины, что, в принципе, невозможно при производстве микросхем. Использование специальных процессов геттерирования и отжига улучшает электрофизические параметры начальной пластины. Так, одним из основных макропараметров, характеризующий качество детектора, является темновой ток или ток утечки детектора при обратном смещении. Темновой ток определяется только двумя параметрами: объемом активной области (что, как правило, определяется физической задачей) и временем жизни неосновных носителей заряда в объеме детектора:

$$I_{gen} = q \frac{n_i}{2\tau_0} d \times S,$$

где  $q$  – элементарный заряд,  $n_i$  – число носителей,  $\tau_0$  – время жизни,  $d$  и  $S$  – толщина и площадь детектора соответственно.

Технологический процесс построен таким образом, что за счет термообработок, глубокого легирования задней стороны и использования

шлифованной задней стороны пластины происходит вытягивание примеси из рабочего объема детектора в основном на заднюю сторону. Практически это дополнительная очистка материала пластины, что приводит к увеличению удельного сопротивления материала и к существенному увеличению времени жизни носителей. Изменение удельного сопротивления не является критическим, в то время как изменение времени жизни с  $2 \div 4$  мс до  $10 \div 15$  мс приводит к существенному снижению тока утечки и, кроме того, значительно улучшает эффективность сбора заряда из объема детектора. Как было установлено, основное влияние на время жизни носителей оказывает концентрация т.н. «глубокой» примеси, а также наличие электрически не активной примеси, например, примеси IV группы. Процесс построен именно так, чтобы вывести из объема детектора глубокую примесь. Детали процесса: температурные режимы, состав атмосферы, длительность, и др. представляют собой «know how» и, в принципе, не являются задачей настоящего исследования, хотя и разработаны в течение последних 20-ти лет при непосредственном участии автора в НИИЯФ МГУ и НИИ Материаловедения (НИИМВ) г. Зеленоград. Следует также отметить, что идет постоянное совершенствование технологического процесса, так, например, средний уровень токов утечки пиковых детекторов в 1992 – 1993 годах был на уровне  $10 - 15$  нА/см<sup>2</sup>, в то время как у последних образцов детекторов для прототипов электромагнитных калориметров ИС и PHENIX и детекторов для эксперимента НУКЛОН величина токов утечки, как правило, не превышает  $1 - 2$  нА/см<sup>2</sup>.

В этой же главе описаны исследования по разработке и оптимизации конструкции (дизайна) детекторов. Разработаны общие принципы построения детекторов, рассмотрены внутренняя структура и топология детекторов. Проведены исследования по оптимизации структуры охранных колец. Найдены общие принципы разработки детекторов для конкретной задачи физического эксперимента.

Проведены исследования по оптимизации топологии детекторов, в частности:

- влияние числа и структуры охранных колец на параметры детекторов: объемный ток утечки и поверхностные токи;
- моделирование структуры электрического поля на поверхности и внутри детектора, результаты моделирования применены для оптимизации;
- рассмотрены топологические методы увеличения допустимого рабочего напряжения детекторов, разработаны способы уменьшения величин локальных электрических полей внутри детектора;

- изучены особенности работы детекторов при высоких (до 1000 В и более) рабочих напряжениях.

Во **второй главе** рассмотрены методы тестирования детекторов. Тестирование детекторов условно можно разделить на две группы по поставленным задачам.

- Тестирование опытных образцов детекторов с анализом технологических процессов изготовления, анализом возможных ошибок и выработкой рекомендаций по изменению технологии и топологии детекторов. Такое тестирование включает в себя самый широкий комплекс измерений электрофизических параметров детекторов и тестовых структур. Эти исследования весьма трудоемки и проводятся, как правило, на опытных партиях детекторов выборочно на отдельных пластинах (1 ÷ 2 %) или, в случае резкого ухудшения параметров детекторов в промышленной партии, с целью определения возникших проблем в технологическом процессе.
- Массовое тестирование с целью отбраковки детекторов, не удовлетворяющих требованиям эксперимента. В этом случае количество измерений ограничено необходимым минимумом. Однако следует отметить, что именно определение этого необходимого минимума было одной из задач работы.

Во второй главе исследована корреляция результатов измерений электрофизических параметров детекторов и параметров системы «детектор-считывающая электроника». Анализ проведен на примере микростриповых детекторов передней части трековой системы эксперимента D0 и микростриповых детекторов эксперимента СВД-2.

**Третья глава** посвящена проблемам радиационной стойкости кремниевых детекторов. Здесь рассмотрено влияние различных видов ионизирующего излучения на кремниевые детекторы. Следует отметить, что общие принципы влияния ионизирующего излучения на полупроводниковые приборы хорошо известны и были описаны в литературе задолго до появления первых кремниевых детекторов. Однако еще раз хотелось бы отметить, что кремниевые детекторы представляют собой нестандартный прибор, как с точки зрения геометрических размеров, так и с точки зрения внутренней структуры и материала, используемого для производства детекторов. Использование высокочистого кремния бестигельной зонной плавки (БЗП) существенно влияет на радиационные свойства детекторов. Кроме того, литературные данные ни в коей мере не могут учитывать

особенности технологического процесса и, естественно, необходимы исследования радиационной стойкости конкретных приборов и систем «детектор-считывающая электроника».

В этой главе описаны исследования по изучению радиационной стойкости детекторов, разработанных автором или под его непосредственным руководством и изготовленных в НИИМВ. Испытания проводились в Национальной лаборатории им. Э.Ферми (FermiLab, Batavia, IL, USA) на протонном пучке 8 ГэВ, Бостонском университете на нейтронном пучке с энергией 1МэВ и Канзасском государственном университете на пучке протонов с энергией  $18 \div 30$  МэВ.

Исследованы процессы отжига облученных детекторов. Разработана модифицированная кластерная модель образования и трансформации дефектов при облучении тяжелыми частицами (протонами и нейтронами).

Разработаны методы повышения радиационной стойкости детекторов.

Основная проблема при применении кремниевых детекторов в тяжелых радиационных условиях – это значительное повышение напряжения полного обеднения (и, соответственно, необходимого рабочего напряжения смещения) с увеличением интегральной дозы облучения. Известно, что на первом этапе облучения уменьшается эффективная концентрация активной донорной примеси, за счет связывания доноров (в нашем случае фосфора) в Е-центры (комплекс – донорная примесь+вакансия) и за счет возникновения в объеме детектора радиационных нарушений (которые в кремнии всегда аналогичны по электрическим свойствам глубокой акцепторной примеси), компенсирующих проводимость n-типа. Далее, после достижения точки инверсии типа проводимости, т.е. состояния, когда число оставшихся донорных центров равно числу, созданных облучением, акцепторных центров удельное сопротивление кремния становится очень большим и близко к собственному, начинается рост напряжения полного обеднения из-за постоянного увеличения концентрации акцепторных радиационно-индуцированных центров. Иными словами рабочая область детектора уже имеет поведение близкое к поведению полупроводника p-типа. Показано, что детекторы сохраняют работоспособность и в точке инверсии, и далее до значительных интегральных доз. Основная проблема здесь - не работоспособность детекторов вообще, а возможность его работы при подаче высокого напряжения смещения, иногда в несколько раз превышающего начальное рабочее напряжение, чтобы обеспечить достаточную эффективность сбора заряда.

Как показано в третьей главе, эта задача может быть решена комплексно двумя способами.

Топологически. Изначально детектор должен разрабатываться с учетом возможной работы при напряжении смещения до 1000 В (и более), т.е. должна использоваться специальная система охранных колец, дополнительные охранные кольца n-типа и легирование периферии детектора высокой концентрацией n-типа (фосфором или мышьяком), чтобы избежать появления высоких потенциалов на краю детектора. Разработана также топология детекторов с применением дополнительного многоступенчатого ионного легирования, для уменьшения локальных напряженностей электрических полей в областях боковых границ p<sup>+</sup>-n-переходов и в области концов стрипов (это особенно актуально для микростриповых детекторов). Такие детекторы были разработаны для модернизации трековой системы эксперимента D0 (условное название проекта – RunIIb). И эта топология детекторов была использована для детекторов самого внутреннего слоя L0 кремниевого трека (SMT) установки D0.

Технологически. Был разработан метод дополнительного легирования пластин перед изготовлением детекторов высокой ( $10^{18}$  см<sup>-3</sup> и более) концентрацией кислорода. Такое легирование приводит к уменьшению скорости выведения доноров и далее, после инверсии типа проводимости, скорости введения акцепторов. Механизм этого процесса в упрощенном виде выглядит следующим образом. В результате облучения тяжелыми частицами с высокой энергией (протоны, нейтроны, осколки, ядра) образуются т.н. кластеры дефектов – множественные смещения атомов кристаллической решетки. Большая часть дефектов рекомбинирует за очень короткое время, а часть - образует стабильные дефекты (например, дивакансии, тривакансии и тетравакансии):



Эти сложные дефекты становятся подвижными только при температурах выше комнатной, и потому именно они, оставаясь замороженными в объеме полупроводника, приводят к возникновению акцепторных уровней, поскольку все указанные дефекты структуры имеют, как правило, несколько глубоких акцепторных уровней. Наличие же атомов кислорода с высокой концентрацией приводит к образованию электрически нейтральных А-центров (комплексов вакансия – кислород:  $V+O$ ), которые также являются стабильными при комнатной температуре, а кроме того могут захватывать свободные вакансии, создавая более сложные дефекты:  $V_2+O$ ,  $V_3+O$ ,  $V_4+O$ . Такие кислородо-содержащие дефекты имеют уже существенно другие свойства и могут быть электрически не активными, т.е. не давать уровней в запрещенной зоне кремния. Конечно, наличие таких дефектов приводит к

уменьшению времени жизни неосновных носителей и, соответственно, к увеличению токов утечки детекторов, но парциальный вклад этих комплексов существенно меньше вклада  $V_2$  и  $V_4$  центров.

**В четвертой главе** рассматриваются падовые детекторы. В первую очередь, это детекторы для адрон-электронного сепаратора экспериментальной установки ZEUS (DESY, Гамбург). Исторически, это были первые детекторы разработанные автором для применения в большом эксперименте и, с этих детекторов было начато массовое производство кремниевых планарных детекторов в России. Общее количество детекторов изготовленных в 1992 – 1996 гг. – более 17000.

Более 12 м<sup>2</sup> таких детекторов было смонтировано в установке ZEUS. Для адрон-электронного сепаратора автором и при его участии были разработаны кремниевые детекторы, гибридные предусилители, усилители-формирователи, уникальные печатные платы длиной более 5 м и другая электроника. Группа НИИЯФ МГУ отвечала за разработку полного электронного тракта считывания сигнала и мониторинга состояния адрон-электронного сепаратора (HES).

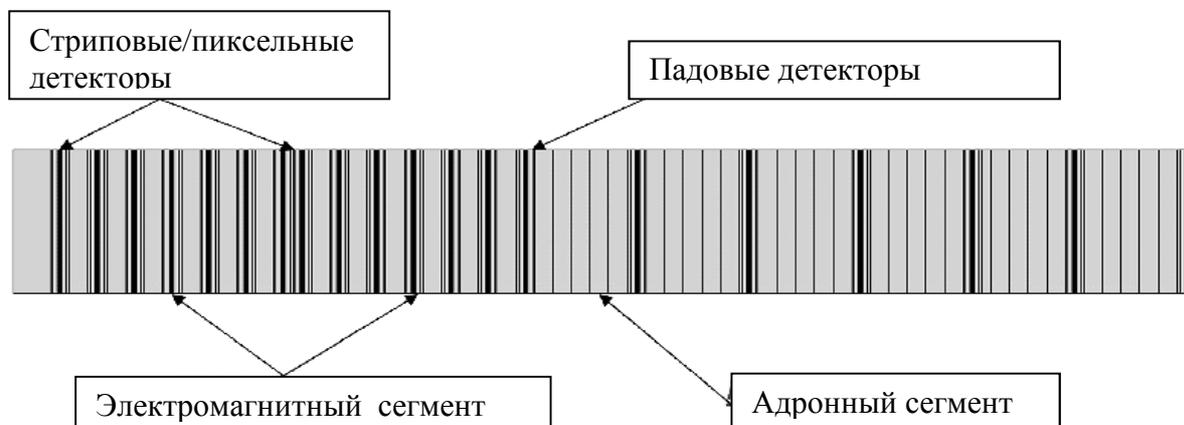
Детектор для установки HES представляет собой диод размером 34.0 • 30.5 мм<sup>2</sup>. Площадь такого диода более 10 см<sup>2</sup>, что уже создавало сложности при разработке, проектировании и изготовлении как самих детекторов, так и считывающей электроники для них. Сложность в изготовлении падовых детекторов большой площади на микроэлектронном производстве определяется самой идеологией производства, которое, в принципе, не предназначено для изготовления приборов такой площади (максимально допустимый размер прибора для современных установок проекционной фотолитографии 20 • 20 мм<sup>2</sup>). Для таких размеров приборов единственно возможный путь – использование установок контактной фотолитографии с масштабом 1:1. Другая проблема, которая немедленно возникает в этом случае, – наличие дефектов на самом фотошаблоне. Лучшие образцы заготовок для изготовления фотошаблонов имеют паспортную дефектность не более 0.5 дефектов/см<sup>2</sup>, очевидно, что в таких условиях производство детекторов с большой площадью с разумным выходом годных просто невозможно. И если в случае микростриповых детекторов (Глава 5) допустимо некоторое количество дефектных каналов, то для падовых детекторов такой площади это приводит к нулевому выходу годных.

Было разработано два решения этой проблемы.

1. После изготовления фотошаблонов производится контроль дефектности и если дефектность стекол не превышает заявленную производителем ( $0.5$  дефекта/ $\text{см}^2$ ), проводится «лечение» имеющихся дефектов. Возможно два типа дефектов:
  - темная точка на светлом фоне; такой дефект уничтожается с помощью лазерного луча;
  - светлая точка (прокол) на темном фоне; здесь проводится локальное магнетронное напыление никеля. Точность этого метода ограничена, поэтому далеко не все дефекты подобного типа могут быть исправлены, это, в частности, касается дефектов в области охранных колец и краев активной области.
2. Другой используемый метод – применение двух идентичных фотошаблонов для проведения фотолитографии с полужасветкой при использовании специальных фоторезистов. Очевидно, что вероятность совпадения положения дефектов на двух фотошаблонах близка к нулю и более того если это и происходит, поскольку дефекты на фотошаблонах могут возникать и в процессе использования, то один из фотошаблонов заменяется.

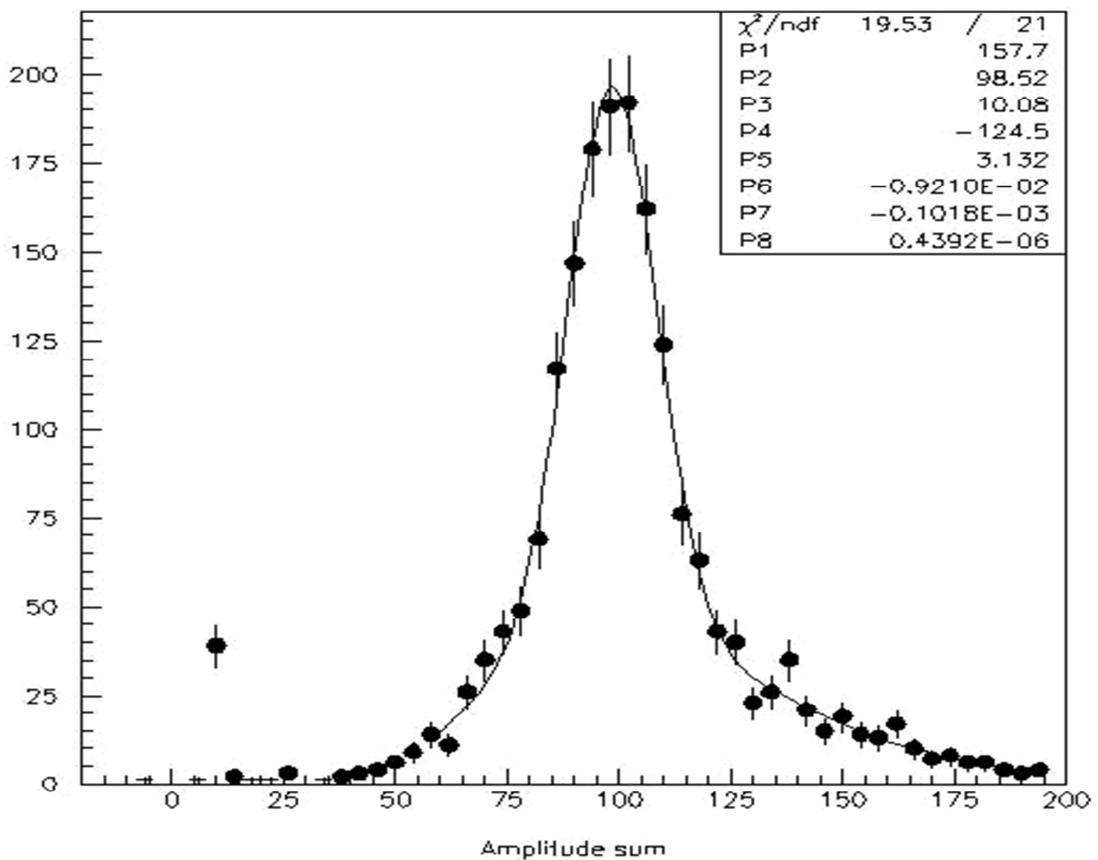
Далее в главе описаны исследования калориметрических детекторов для эксперимента PHENIX и электромагнитного калориметра прототипа проектируемого линейного коллайдера (ILC). Разработаны геометрия, определены параметры и условия работы детекторов. Созданы и протестированы прототипы каждой из систем.

В эксперименте PHENIX использованы падовые детекторы с активной площадью  $60 \cdot 60 \text{ мм}^2$  и размерами отдельного элемента  $15 \cdot 15 \text{ мм}^2$ , т.е. на детекторе расположено 16 отдельных падов с индивидуальным считыванием. Калориметр же представляет собой многослойную структуру Si-W, схема которой приведена на рис. 1.



**Рис. 1. Структура переднего калориметра эксперимента PHENIX.**

В рамках исследований по возможности использования такого калориметра для определения энергетического и пространственного разрешения был разработан и построен прототип такого калориметра. Испытания проводились в ИФВЭ на ускорителе У-70. В качестве калибровочной частицы, дающей сигнал эквивалентный минимально ионизирующей частице, были использованы протоны с энергией 50 ГэВ. Далее для исследования энергетического разрешения прототипа использовался пучок позитронов со средней энергией 10 ГэВ. Результаты испытаний прототипа приведены на рис.2.



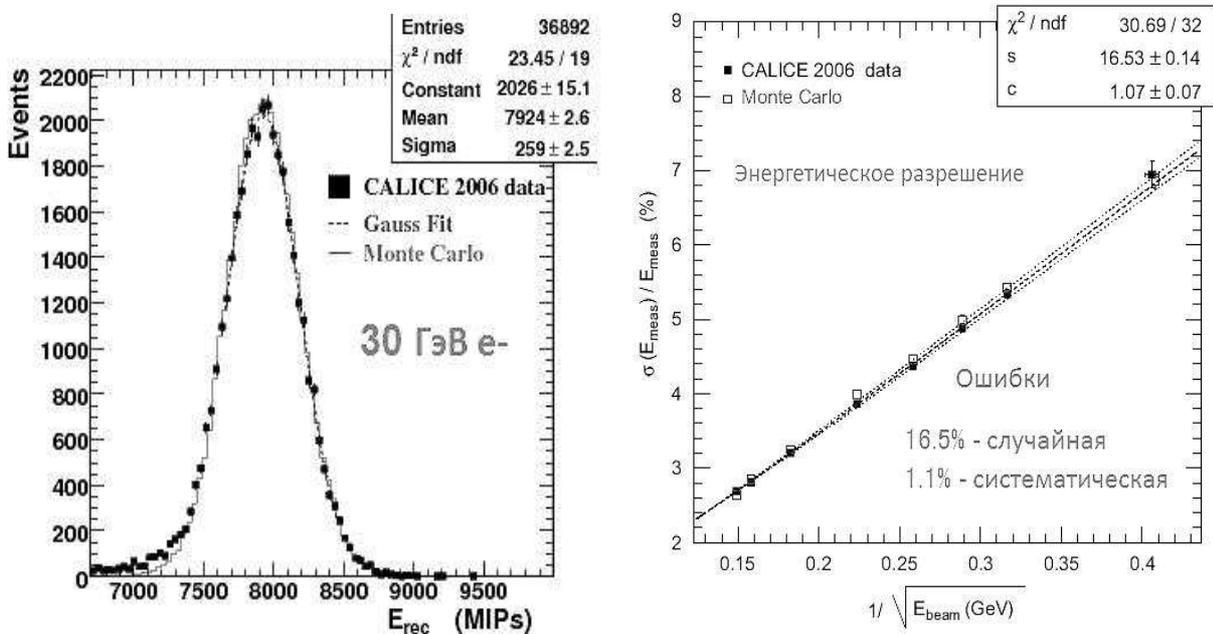
**Рис.2. Восстановленная энергия в прототипе калориметра PHENIX.**

В прототипе калориметра PHENIX были впервые использованы кремниевые падовые детекторы для адронной калориметрии.

Калориметр для линейного коллайдера также представляет собой структуру Si-W, однако, поскольку в этом случае требуется более высокое как пространственное, так и энергетическое разрешение, число слоев кремниевых детекторов увеличено при соответствующем уменьшении толщины вольфрамовых поглотителей. Для обеспечения более высокого пространственного разрешения, т.е. в данном случае, для устойчивого разрешения двух близких ливней, размеры пада были выбраны  $10 \cdot 10 \text{ мм}^2$ .

Это решение, конечно, значительно увеличивает число каналов считывания, однако полностью оправдано поставленной физической задачей.

Проведены испытания прототипа электромагнитного калориметра на пучках в DESY, CERN и FNAL. В результате испытаний особенно на больших энергиях получено несколько интересных результатов.



**Рис.3. Восстановленная энергия и разрешение калориметра.**

Восстановленная энергия электронного пучка и зависимость энергетического разрешения от энергии приведены на рис. 3. Энергетическое разрешение описывается выражением:

$$\frac{\Delta E}{E} = \left[ \frac{16.5 \pm 0.1}{\sqrt{E [GeV]}} \oplus (1.1 \pm 0.1) \right] \%.$$

Если по энергетическому разрешению калориметр вполне удовлетворяет поставленным задачам, то пространственное разрешение оказалось недостаточным для идентификации двух соседних ливней при больших импульсах и требуется разработка нового детектора для этой задачи с размером чувствительного элемента (пада) до  $5 \cdot 5 \text{ мм}^2$  или даже до  $3 \cdot 3 \text{ мм}^2$ . Это решение еще более увеличит число каналов считывающей электроники и может привести к значительному увеличению стоимости калориметра. Так совершенно очевидно, что число каналов считывания увеличивается с 36 до 400 на каждый детектор. Вообще говоря, это может привести не только к увеличению стоимости системы за счет увеличения числа каналов считывания, но и к значительным чисто технологическим сложностям при монтаже детекторов со считывающей электроникой. Автором предложено, как кажется, более простое решение проблемы, а именно – использование

стриповых детекторов вместо падовых. Это возможно только в случае достаточно большого числа слоев детекторов и небольшой толщины поглотителей. Все эти условия хорошо выполняются для электромагнитного калориметра линейного коллайдера. Замена падов на стрипы с ориентацией X в нечетных слоях и ориентацией Y в четных соответственно позволяет в значительной степени улучшить пространственное разрешение системы при сохранении общего числа каналов электроники. Так легко заметить, что для той же геометрии детектора и том же числе каналов – 36 на детекторе, шаг стрипов будет около 170 мкм, что обеспечивает пространственное разрешение не хуже 50 мкм. Для сравнения: разрешение падовых детекторов с размером пада  $3 \cdot 3 \text{ мм}^2$  – около 1 мм. Очевидным недостатком стриповой системы является сложность восстановления индивидуального ливня при наличии двух и более ливней в одном детекторе одновременно. Для пространственного восстановления ливня в калориметр необходимо ввести несколько слоев падовых детекторов с достаточно высоким пространственным разрешением, например, не хуже 1 мм. Общее число каналов при этом меняется не существенно, а возможности системы по пространственному разрешению существенно возрастают, поскольку в этом случае возможна однозначная идентификация каждого процесса, и обеспечивается корреляция X и Y координат.

Далее в главе рассмотрено применение кремниевых детекторов в физике космических лучей.

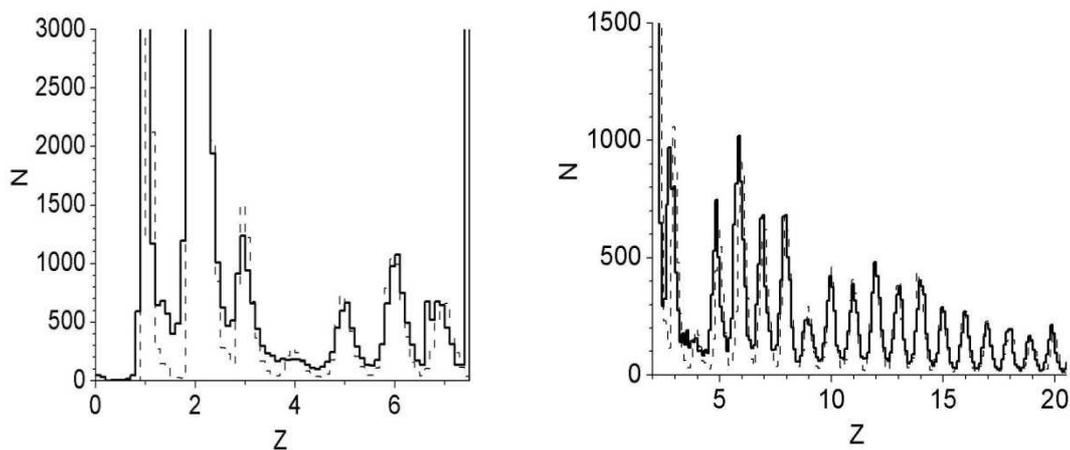
Автором разработаны детекторы для баллонного эксперимента АТЭС и спутникового эксперимента НУКЛОН.

Эксперимент АТЭС был первым широкомасштабным использованием кремниевых детекторов в качестве детектора заряда в ФКЛ.

Эксперимент НУКЛОН представляет собой новое поколение аппаратуры для изучения спектра и состава космических лучей. Это первый российский эксперимент, где все задачи регистрации и анализа состава частиц решены с помощью кремниевых детекторов. Исключение составляет только система выработки быстрого триггера, выполненная на сцинтилляторах. Эксперимент НУКЛОН имеет в своем составе две большие кремниевые системы: систему измерения заряда и систему измерения энергии. Система измерения заряда представляет собой четыре слоя падовых детекторов. Практически, как показали испытания на пучке, для определения заряда пролетевшей частицы можно ограничиться и одним слоем детекторов, но для компенсации возможных флуктуаций зарядовыделения, особенно при наклонном прохождении частиц, согласно проведенному моделированию, выбрано именно 4 слоя. Кроме того, при некоторой гранулярности

детекторов системы измерения заряда это дает возможность грубо определить траекторию или, по крайней мере, направление входящей частицы. Что дает возможность учесть изменение величины зарядовыделения при наклонном входе частиц в систему, и повышает точность измерения величины заряда. Усреднение энерговыделения по четырем слоям позволяет практически полностью скомпенсировать флуктуации, что особенно важно для тяжелых ядер ( $Z > 20$ ), когда разница в энерговыделении (от  $Z$  и  $Z+1$ ) становится менее 10%.

Был изготовлен прототип системы измерения заряда. Испытания проводились на ионном пучке ускорителя SPS в ЦЕРН. Результаты этих испытаний приведены на рис. 4. Нетрудно видеть, что уже для прототипа без всякой специальной электроники считывания достигнуто уверенное разделение ядер по величине энерговыделения ( $E \sim Z^2$ ).



**Рис.4. Отклик системы измерения заряда в зависимости от заряда иона.**

В пятой главе рассмотрена разработка микроstriповых детекторов на примере детекторов передней части трековой системы SMT эксперимента D0 и вершинного детектора эксперимента СВД-2.

Микроstriповый (микрополосковый) детектор - значительно более сложный прибор по сравнению с падовым детектором. Если число фотолитографий для изготовления падового детектора обычно 4 или 5, то для микроstriповых минимальное число фотолитографий - 7. В некоторых случаях можно сократить число фотолитографий и, соответственно, технологических операций, однако это допустимо для детекторов, работающих в условиях с минимальными радиационными нагрузками. Надежность таких приборов согласно литературным данным несколько

меньше. Такие упрощенные детекторы в настоящей работе не рассматриваются, и автором не разрабатывались.

Микростриповый детектор представляет собой множество длинных и узких диодов, сформированных на одной пластине, окруженных общими охранными кольцами и системой подачи смещения. Как правило, шаг стрипов (полосок) лежит в интервале от 25 мкм до 250 мкм. Нижняя граница в большой степени определяется чисто технологическими возможностями присоединения выводов к детектору и задачами эксперимента. Верхняя граница чисто условна, и детекторы с относительно большим шагом называют стриповыми.

Стандартная схема считывания сигнала с детектора подразумевает наличие резистора смещения и разделительного конденсатора (для изоляции входа усилителя от высокого напряжения смещения) для каждого канала считывания. Современная микроэлектроника предлагает интегральные полузаказные усилители, способные считывать сигнал с микрострипового детектора с хорошим (до 30) соотношением сигнал/шум (S/N). Такие усилители, как правило, работают с небольшими входными ёмкостями нагрузки и, в принципе, специально разрабатываются для микростриповых кремниевых детекторов. На одной бескорпусной микросхеме располагается до 128 каналов усиления. Разместить на кристалле микросхемы 128 конденсаторов и резисторов с высоким напряжением пробоя в современных технологиях практически невозможно. В этом случае совершенно естественным выглядит интеграция цепей смещения и съема сигнала в детектор – это значительно усложняет структуру детектора и увеличивает его стоимость, но, тем не менее, полностью оправдано, с точки зрения использования свободного места и стоимости системы в целом.

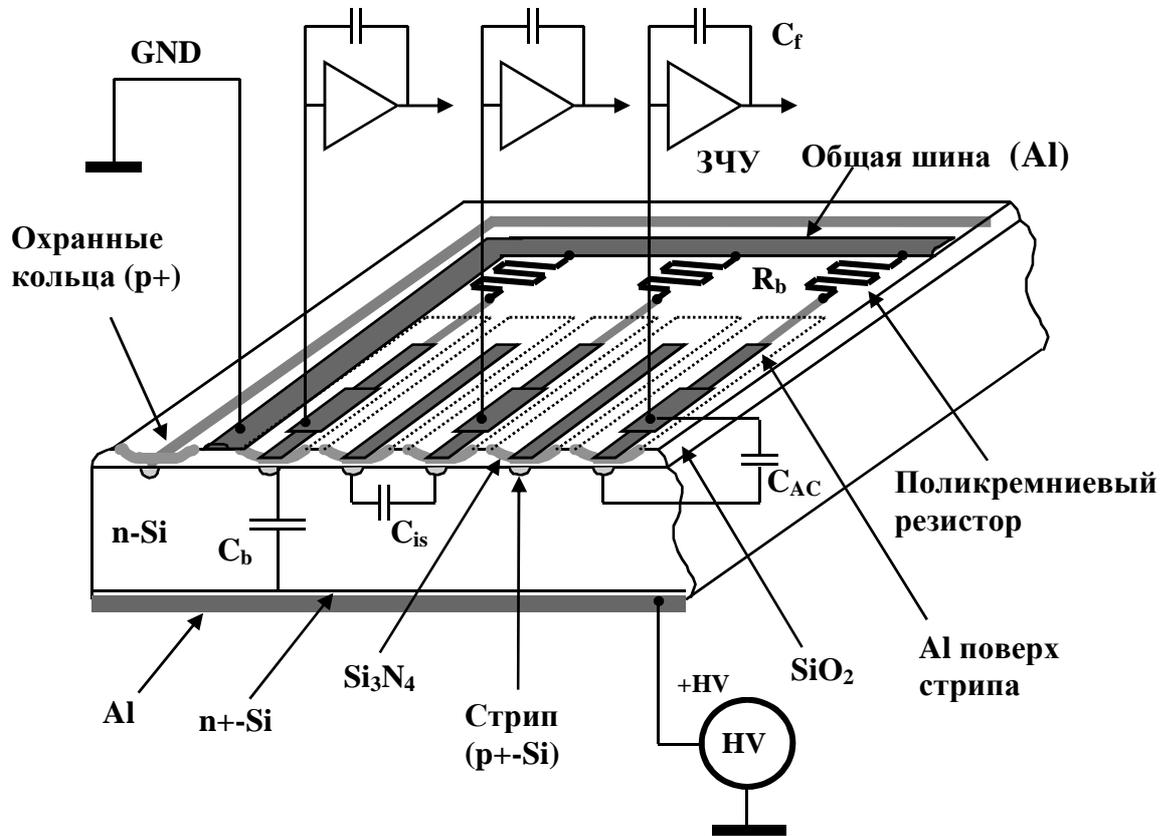
Структурная схема микрострипового детектора с ёмкостным съемом сигнала приведена на рис.5. Топология такого детектора относительно проста: по периферии детектора размещаются резисторы смещения, величиной  $0.5 \div 3$  МОм, выполненные из поликристаллического кремния и объединенные общей шиной подачи смещения. Конденсаторы формируются над самим диодом (стрипом), нанесением двойного изолирующего слоя  $\text{SiO}_2 + \text{Si}_3\text{N}_4$ .

В главе рассмотрена разработка геометрии детектора с учетом требований эксперимента D0 к геометрии и электрофизическим параметрам детектора.

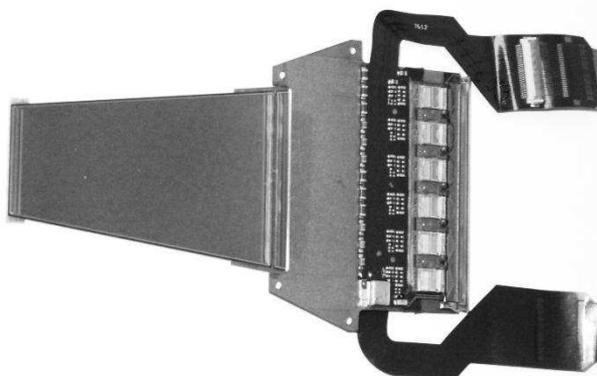
Здесь было применено считывание сигнала «через стрип», что тоже накладывает дополнительные требования на параметры детекторов, такие как межстриповое сопротивление, межстриповая ёмкость, чтобы избежать

потерь индуцированного заряда и обеспечить необходимое пространственное разрешение.

В главе рассмотрены не только сами детекторы и их разработка, производство и тестирование, но и разработанные методы монтажа



*Рис. 5. Структурная схема микрострипового детектора.*



*Рис.6. Модуль передней части трековой системы.*



*Рис.7. H-диск в сборе.*

детекторов со считывающей электроникой. На рис.6 показан готовый модуль, который впоследствии использовался для сборки диска (рис.7).

В этой же главе рассмотрены требования к точности сборки самих дисков, т.е. отдельных крупных элементов трековой системы SMT.

Общее число каналов считывания на каждом диске – 36864. Было собрано и установлено в эксперимент D0 четыре таких диска. Кратко приведены первые результаты работы дисков в эксперименте D0.

Продолжением этих работ было создание трековой системы эксперимента СВД-2. Трековая система СВД-2 представляет собой целый комплекс различных детекторов:

- детекторы пучкового телескопа – микростриповые с ёмкостным съёмом сигнала и шагом стрипов 25 мкм; эти же детекторы использованы в первых наиболее прецизионных частях системы восстановления треков;
- детекторы активной мишени – для различных задач эксперимента и, соответственно, условий работы триггерной системы; было создано 3 типа стриповых и пиксельных детекторов с числом активных элементов от 8 до 32, которые позволяют организовать триггер 2-го уровня на основе различных алгоритмов в зависимости от физической задачи;
- два типа детекторов собственно трековой системы: шаг стрипов 50 мкм с ёмкостным съёмом сигнала и числом каналов на детекторе 640 и 1024, соответственно.

**В заключениях** к каждой главе кратко приведены результаты и выводы исследований.

**ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. А.П.Воробьев, Ю.В.Роднов, А.М.Сасов, Г.Л.Башинджагян, **М.М.Меркин**, Д.Е.Карманов Электромагнитный калориметр с полупроводниковыми детекторами. //Приборы и техника эксперимента. - 1997. - №2. - С.24 -28.
2. Г.Л.Башинджагян, Д.Е.Карманов, Н.А.Короткова, В.М.Мананков, **М.М.Меркин** Моделирование диффузионно-дрейфового переноса носителей заряда в кремниевых микростриповых детекторах. // Приборы и техника эксперимента. - 1999. - №2. - С. 63 - 67.
3. J.H. Adams Jr., Г.Л.Башинджагян, В.И. Зацепин, **М.М. Меркин**, М.И Панасюк, Г.А. Самсонов, Н.В. Сокольская, Л.А. Хейн Матрица кремниевых детекторов как детектор заряда в эксперименте АТІС. // Приборы и техника эксперимента. 2001. - №4. - С. 38 - 44.
4. J. Adams, G. Bashindzhagian, P. Bashindzhagian, A. Chilingarian, J. Donnelly, L. Drury, N. Egorov, S. Golubkov, V. Grebenyuk, A. Kalinin, N. Korotkova, W. Menn, **M. Merkin**, H. Nanjo, M. Panasyuk, I.H. Park, D. Podorozhnyi, E. Postnikov, T. Roganova, O. Saavedra, A. Sadovsky, A. Sidorov, M. Simon, L. Sveshnikova, A. Thompson, L. Tkachev, A. Turundaevsky, A. Voronin Polar Balloon Experiment for the Astrophysics Research (POLAR BEAR). // Prepared for 27th International Cosmic Ray Conference (ICRC 2001), Hamburg, Germany, 7-15 Aug 2001. Published Hamburg 2001, Cosmic ray\* P. 2147 – 2149.
5. J. Adams, G. Bashindzhagian, P. Bashindzhagian, A. Chilingarian, J. Donnelly, L. Drury, N. Egorov, S. Golubkov, V. Grebenyuk, A. Kalinin, N. Korotkova, W. Menn, **M. Merkin**, H. Nanjo, M. Panasyuk, I.H. Park, D. Podorozhnyi, E. Postnikov, T. Roganova, O. Saavedra, A. Sadovsky, A. Sidorov, M. Simon, L. Sveshnikova, A. Thompson, L. Tkachev, A. Turundaevsky, A. Voronin The NUCLEON-Mission for Cosmic Rays Investigation. // Prepared for 27th International Cosmic Ray Conference (ICRC 2001), Hamburg, Germany, 7-15 Aug 2001. Published Hamburg 2001, Cosmic ray.- P. 2188 – 2191.
6. J. Adams, G. Bashindzhagian, P. Bashindzhagian, A. Chilingarian, J. Donnelly, L. Drury, N. Egorov, S. Golubkov, V. Grebenyuk, A. Kalinin, N. Korotkova, W. Menn, **M. Merkin**, H. Nanjo, M. Panasyuk, I.H. Park, D. Podorozhnyi, E. Postnikov, T. Roganova, O. Saavedra, A. Sadovsky, A. Sidorov, M. Simon, L. Sveshnikova, A. Thompson, L. Tkachev, A.

- Turundaevsky, A. Voronin // The KLEM high-energy cosmic ray collector for the NUCLEON satellite mission. Prepared for 27th International Cosmic Ray Conference (ICRC 2001), Hamburg, Germany, 7-15 Aug 2001. PublisheHamburg 2001, Cosmic ray\* P. 2185 – 2187.
7. Г.Л.Башинджагян, А.Г. Воронин, П.Ф.Ермолов, Д.Е. Карманов, Н.А.Короткова, Е.Н.Кузнецов, **М.М.Меркин**, А.А.Савин Аналоговый тракт адрон-электронного сепаратора эксперимента ZEUS (DESY). // Приборы и техника эксперимента. -2002. - №1. - С. 26 - 33.
  8. П.Ф.Ермолов, Е.Г.Зверев, Д.Е.Карманов, А.К.Лефлат, **М.М.Меркин**, Е.К.Шабалина. Методика и сравнительный анализ результатов тестирования модулей кремниевого трекера для колайдерного эксперимента D0(FNAL). // Приборы и техника эксперимента. – 2002. - №2. - С. 42 - 53.
  9. П.Ф. Ермолов, А.Г. Воронин, Е.Г.Зверев, Д.Е. Карманов, Е.Н.Кузнецов, А.К.Лефлат, **М.М.Меркин**, Е.К.Шабалина Методика массового тестирования односторонних микростриповых детекторов. // Приборы и техника эксперимента. - 2002. - №2. - С.54 - 67.  
A.Leflat, **M.Merkin**, S.Rouzin, R.Lipton, L.Spiegel, D.Joffee-Minor. First Results from MSU Silicon Strip Detectors. // D0 Note # 001709, FERMILAB, Apr. 1993, 6pp.  
Bean A., Demarteau M., Demina R., Gerber C., Karmanov D., Korjanevski S., Lehner F., Lipton R., Mao M., **Merkin M.**, McCarthy R.L. and Smith R.P. Silicon Sensor Quality Assurance for the D0 RunIIb Silicon Detector: Procedures and Equipment // FermiLab , 2003. – 37 p. (Препринт D0 Note № 004120)
  - 10.П.Ф. Ермолов, Д.Е. Карманов, В.М. Мананков. **М.М.Меркин** Нейтронно-наведенные эффекты в зонном кремнии, обусловленные дивакансионными кластерами с тетравакансионным ядром. // Физика и техника полупроводников. - 2002. – Т. 36. - №10. - С. 1194 - 1201.  
A.Bean, J. Gardner, C. Gerber, H. Haggerty, Z. Ke, S. Korjanevsky, S. Lager, A. Leflat, F. Lehner, R. Lipton, J. Lucky, **M. Merkin**, P. Rapidis, V. Rykalin, L. Shabalina, L. Spiegel, L. Stutte, B. Webber Studies on the Radiation Damage to Silicon Detectors For Use in the D0 Run2b Experiment. // D0 Note # 003958, Mar.2002  
J. Gardner, C. Gerber, Z. Ke, S. Korjanevsky, A. Leflat, F. Lehner, R. Lipton, J. Lackey, **M. Merkin**, P. Rapidis, V. Rykalin, L.Shabalina, L. Stutte, B. Webber Results from Irradiation Tests on D0 Run2a Silicon Detectors at the Radiation Damage Facility at Fermilab. // D0 Note # 003962, Mar.2002

- T. Bolton, K. Carnes, R. Demina, T. Gray, D. Karmanov, K. Kitten, S. Korjenevski, M. Litos, **M. Merkin**, A. Rankin. Radiation Hardness Tests of Prototype ELMA L0 Sensors for D0 Run IIb. // D0 Note # 004029, Sep.2002
- 11.G. Bashindzhagian, J.H. Adams, P. Bashindzhagian, N. Baranova, M. Christl, A. Chilingarian, I. Chupin, J. Derrickson, L. Drury, V. Eganov, N. Egorov, V. Ezhov, S. Golubkov, V. Grebenyuk, N. Hasebe, L. Howell, A. Kalinin, D. Karmanov, M. Korolev, N. Korotkova, Y. Kozlov, Z. Krumshstein, M.H. Lee, A. Mashkantcev, **M. Merkin**, H. Nanjo, A. Nozdrin, D. Nozhnin, A. Pakhomov, M.I. Panasyuk, I.H. Park, A. Podorolsky, D. Podorozhnyi, E. Postnikov, T. Roganova, A. Romanov, O. Saavedra, A. Sadovsky, A. Sidorov, M. Simon, L. Sveshnikova, A. Thompson, L. Tkachev, A. Turundaevsky, A. Voronin, J. Watts NUCLEON satellite mission. Status and plans. // 28th International Cosmic Ray Conferences (ICRC 2003), Tsukuba, Japan, 31 Jul - 7 Aug 2003. Published in \*Tsukuba 2003, Cosmic Ray\* P. 2205-2208.
- 12.G. Bashindzhagian, J.H. Adams, P. Bashindzhagian, N. Baranova, M. Christl, A. Chilingarian, I. Chupin, J. Derrickson, L. Drury, V. Eganov, N. Egorov, V. Ezhov, S. Golubkov, V. Grebenyuk, N. Hasebe, L. Howell, A. Kalinin, D. Karmanov, M. Korolev, N. Korotkova, Y. Kozlov, Z. Krumshstein, M.H. Lee, **M. Merkin**, H. Nanjo, A. Nozdrin, D. Nozhnin, A. Pakhomov, M.I. Panasyuk, I.H. Park, A. Podorolsky, D. Podorozhnyi, E. Postnikov, T. Roganova, O. Saavedra, A. Sadovsky, A. Sidorov, M. Simon, L. Sveshnikova, A. Thompson, L. Tkachev, A. Turundaevsky, A. Voronin, J. Watts Jul 2003. Accelerator tests of the KLEM prototypes. // 28th International Cosmic Ray Conferences (ICRC 2003), Tsukuba, Japan, 31 Jul - 7 Aug 2003. Published in \*Tsukuba 2003, Cosmic Ray\* P. 2209-2212.
- 13.F.Campabadal, .... **M.Merkin** и др. Beam tests of ATLAS SCT silicon strip detector modules. // Nucl.Instrum.Meth. – 2005. -V. A538. – P.384-407.
- 14.Алеев А.Н., ... **Меркин М.М.** и др. Наблюдение узкого барионного резонанса, распадающегося по каналу  $pK^0$  в pA-взаимодействиях при 70 ГэВ/с на установке СВД-2 // Ядерная физика. - 2005. - Т. 68. - № 6. - С. 1012-1019.
- 15.Г.Л.Башинджагян, А.Г. Воронин, С.А. Голубков, В.М.Гребенюк, Н.Н.Егоров, А.М.Калинин, Д.Е.Карманов, К.А. Коньков, Н.А.Короткова, Ю.Ф.Козлов, З.В.Крумштейн, **М.М. Меркин**, М.И. Панасюк, А.Ю. Пахомов, Д.М.Подорожный, Е.Б. Постников, Т.М. Роганова, А.Б. Садовский, Л. Г. Свешникова, А.И. Сидоров, Л.Г. Ткачев, А.Н. Турундаевский Новый метод определения энергии

- частиц в интервале  $10^{11}$  -  $10^{15}$  эВ. Результаты пучкового теста при 180 ГэВ/с. // Приборы и техника эксперимента. – 2005. - №1. - С. 46 – 51.
16. V. Bonvicini, A. Vacchi, V. Dzhordzhadze, R. Seto, E. Kistenev, J. Lajoie, **M. Merkin** Silicon-tungsten calorimeter for the forward direction in the PHENIX experiment at RHIC. // IEEE Trans.Nucl.Sci. - 2005. V. 52.- P. 874 – 878.
17. Turundaevskiy, A., ..., **M. Merkin**; et al. The NUCLEON Instrument Prototype Beam Tests and Detailed Simulation // Proceedings of the 29th International Cosmic Ray Conference. August 3-10, 2005, Pune, India. Edited by B. Sripathi Acharya, Sunil Gupta, P. Jagadeesan, Atul Jain, S. Karthikeyan, Samuel Morris, and Suresh Tonwar. Mumbai: Tata Institute of Fundamental Research, 2005. Volume 3, p.365- 368
18. Podorozhnyi, D., ..., **M. Merkin**; et al. NUCLEON Satellite Mission. Present status. // Proceedings of the 29th International Cosmic Ray Conference. August 3-10, 2005, Pune, India. Edited by B. Sripathi Acharya, Sunil Gupta, P. Jagadeesan, Atul Jain, S. Karthikeyan, Samuel Morris, and Suresh Tonwar. Mumbai: Tata Institute of Fundamental Research, 2005. Volume 3, p.361- 364
19. V.M. Abazov, ..., **M.M. Merkin** et al. The Upgraded D0 detector. // Nucl.Instrum.Meth. – 2006. – V. A565. - P.463 - 537.
20. Ahmed S.N., ..., Merkin M.M., et al. The D0 Silicon Microstrip Tracker. // Nucl.Instrum.Meth. – 2011. – V. A634. – P. 8 – 46
21. V.M. Abazov, ..., **M.M. Merkin**, et al. Observation of Single Top-Quark Production // Physical Review Letters. 2009. T. 103. № 9. С. 092001-1 – 092001-7.
22. С.Г. Базиладзе, Г. А. Богданова, М. В. Васильев, В. Ю. Волков, А.П. Воробьев, А. Г. Воронин, П. Ф. Ермолов, Е. Г. Зверев, Д. Е. Карманов, Л. Л. Курчанинов, А. К. Лефлат, **М. М. Меркин**, В.А. Сенько, М. М. Солдатов, Е. А. Усенко, Ю. П. Цюпа Электронная аппаратура съема и регистрации сигналов с микрострипового вершинного детектора установки СВД-2. // Приборы и техника эксперимента. - 2006. - №3. - С. 52 - 60.
23. С.Г. Базиладзе, Г. А. Богданова, В. Ю. Волков, А. П. Воробьев, А. Г. Воронин, П. Ф. Ермолов, Л. Л. Курчанинов, А. К. Лефлат, **М. М. Меркин**, В. А. Сенько, М. М. Солдатов, Ю. П. Цюпа, Н. А. Шаланда, В. И. Якимчук Электронная аппаратура обработки и сбора данных с микрострипового вершинного детектора установки СВД-2. // Приборы и техника эксперимента. - 2006. - №3. - С.61 - 72.

24. E. O'Brien, V. Dzhordzhadze, D. Karmanov, E. Kistenev, Z. Li, A. Litvinenko, **M. Merkin**, I. Nakagawa, V. Peresedov, R. Seto, A. Taketani, A. Sukhanov, V. Volkov, A. Voronin, V. Vrba, L. Zolin Silicon-tungsten tracking calorimeters for the forward direction in the PHENIX experiment at RHIC. // Prepared for 12th International Conference on Calorimetry in High Energy Physics (CALOR 06), Chicago, Illinois, 5-9 Jun 2006. AIP Conf. Proc.867: 122-131, 2006. «Chicago 2006, Calorimetry in high energy physics»
25. E. O'Brien, V. Dzhordzhadze, D. Karmanov, E. Kistenev, Z. Li, A. Litvinenko, **M. Merkin**, I. Nakagawa, V. Peresedov, R. Seto, A. Sukhanov, V. Volkov, A. Voronin, V. Vrba, L. Zolin Performance of the PHENIX NCC Prototype. // Prepared for 12th International Conference on Calorimetry in High Energy Physics (CALOR 06), Chicago, Illinois, 5-9 Jun 2006. AIP Conf. Proc.867:132-138,2006. «Chicago 2006, Calorimetry in high energy physics»
26. А. Г. Воронин, В. М. Гребенюк, Д. Е. Карманов, Н. А. Короткова, З. В. Крумштейн, **М. М. Меркин**, А. Ю. Пахомов, Д. М. Подорожный, А. Б. Садовский, Л. Г. Свешникова, Л. Г. Ткачев, А. Н. Турундаевский Тестирование прототипа установки НУКЛОН на пионном пучке ускорителя SPS (CERN). // Приборы и техника эксперимента. - 2007. - №2. - С. 39 - 49.
27. А. Г. Воронин, В. М. Гребенюк, Д. Е. Карманов, Н. А. Короткова, З. В. Крумштейн, **М. М. Меркин**, А. Ю. Пахомов, Д. М. Подорожный, А. Б. Садовский, Л. Г. Свешникова, Л. Г. Ткачев, А. Н. Турундаевский Тестирование прототипа зарядовой системы установки НУКЛОН. // Приборы и техника эксперимента. - 2007.- №2. - С. 50 – 58.
28. Е. Н. Ардашев, ..., **М. М. Меркин**, и др. Вершинный микростриповый детектор установки СВД для экспериментов на ускорителе ИФВЭ. // Приборы и техника эксперимента. - 2007. - №5. - С. 75 - 92.
29. Д. М. Подорожный, В. Л. Булатов, Н. В. Баранова, А. В. Власов, А. Г. Воронин, Н. Н. Егоров, С. А. Голубков, В. М. Гребенюк, Д. Е. Карманов, М. Г. Королев, Н. А. Короткова, З. В. Крумштейн, Е. Г. Лянной, **М. М. Меркин**, А. Ю. Павлов, А. Ю. Пахомов, А. В. Романов, А. Б. Садовский, Л. Г. Свешникова, Л. Г. Ткачев, А. В. Ткаченко, А. Н. Турундаевский Эксперимент НУКЛОН: современное состояние. // Известия РАН, сер. физ. – 2007. - Т. 71. - №4. - С. 500 – 502.
30. Yu. Murin, Yu. Babain, M. Chubarov, Yu. Tuboltsev, V. Pljushev, M. Zubkov, P. Nomokonov, A. Voronin, **M. Merkin**, V. Kondratiev, N. Olsson, J. Blomgren, L. Westerberg, C. Ekström, A. Kolozhvari, H.

- Jäderström, B. Jakobsson, P. Golubev, Chr. Bargholz, L. Gerén, P.-E. Tegnér, I. Zartova, A. Budzanowski, B. Czech, I. Skwirczynska and H.H.K. Tang A detector system for studying nuclear reactions relevant to Single Event Effects. // Nucl.Instrum.Meth. – 2007. - V. A578. - № 2. - P. 385-398.
31. C. Adloff, Y. , ..., **M.M. Merkin**, et.al. Response of the CALICE Si-W electromagnetic calorimeter physics prototype to electrons. // Nucl.Instrum.Meth. – 2009. – V. A608. - №2. – P. 372 – 383.
32. J.Repond, ..., **M. Merkin**, et. al. Design and Electronics Commissioning of the Physics Prototype of a Si-W Electromagnetic Calorimeter for the International Linear Collider. // **arXiv:0805.4833** JINST3:P08001,2008 Subjects: Instrumentation and Detectors
33. Д.М.Подорожный, Э.В. Аткин, Л. С. Бурилов, А. Г. Воронин, Н. В. Кузнецов, **М. М. Меркин**, Р. А. Мухамедшин, А. Ю. Павлов, А. В. Романов, Л. Г. Свешникова, Л. Г. Ткачев, А. Н. Турундаевский, и А. П. Чубенко Проект ОЛВЭ для исследования первичного космического излучения высоких энергий. // Известия РАН. Серия физическая. – 2009. - Т.73. - № 5. - С. 632 – 635.
34. S. Valkar, ..., **M. Merkin**, et. al. A calorimeter for the e+ e- TESLA detector: Proposal for R & D. // DESY-PRC-RD-01-02, 2001. 23pp. 29.
35. Воронин А.Г., Карманов Д.Е., **Меркин М.М.** Падовый калориметрический сенсор. // Свидетельство о государственной регистрации топологии интегральной микросхемы № 2012630017. – Зарегистрировано в Реестре топологий интегральных микросхем 10 января 2012 г.
36. Воронин А.Г., Карманов Д.Е., **Меркин М.М.** Стриповый сенсор. // Свидетельство о государственной регистрации топологии интегральной микросхемы № 2012630019. – Зарегистрировано в Реестре топологий интегральных микросхем 10 января 2012 г.
37. А.Г. Воронин, **М.М. Меркин**, А.С. Силаев Spice модель кремниевого микрополоскового детектора. // Научная сессия МИФИ - 2010. Сборник научных трудов. - 2010. - Т.1. - С. 157 - 158.
38. 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. - 2010. - № 6. - С. 34 - 41.