

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

1-2001-244

На правах рукописи
УДК 539.1.07.074.55

ЗАМЯТИН
Николай Иванович

**РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ
ПЛАНАРНЫХ КРЕМНИЕВЫХ ДЕТЕКТОРОВ
ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ
С ВЫСОКИМИ РАДИАЦИОННЫМИ ПОТОКАМИ**

Специальность: 01.04.23 — физика высоких энергий

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Дубна 2001

Работа выполнена в Лаборатории физики частиц Объединённого института ядерных исследований.

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, профессор

Голутвин Игорь Анатольевич

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор

Никитин Владимир Алексеевич

кандидат физико-математических наук
старший научный сотрудник

Воробьёв Александр Павлович

Ведущая организация: Государственный научный центр Российской Федерации
Институт теоретической и экспериментальной физики (г.Москва).

Защита диссертации состоится “ ” 2001 г.
в часов на заседании диссертационного совета в Лаборатории физики
частиц Объединённого института ядерных исследований, г.Дубна Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЛФЧ ОИЯИ.

Автореферат разослан “ ”

2001 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета



Кривохижин Василий Геннадьевич

Общая характеристика работы

Актуальность темы

В современных физических экспериментах широко применяются полупроводниковые (п/п) детекторы ионизирующих излучений на основе различных материалов таких, как: кремний - Si, германий - Ge, теллурид кадмия - CdTe, арсенид галлия - GaAs, алмаз - C, тройные соединения - CdZnTe, CdHgTe и др. Для каждого типа детекторов существует своя область применения, где наиболее оптимально используются их преимущества. Так, для гамма-спектрометрии с высоким энергетическим разрешением применяются германиевые детекторы, но они могут работать только при охлаждении. Развитие технологии выращивания “тяжелых” монокристаллов на основе соединений теллурида кадмия позволило создать гамма-детекторы, работающие при комнатной температуре. Но особое место среди всех перечисленных п/п монокристаллов, применяемых для изготовления детекторов, занимает высокоомный кремний, или детекторный кремний, называемый обычно БЗП (бестигельно зонно-плавленый) кремний. В настоящее время кремниевые детекторы широко применяются практически во всех областях исследований, где детектируются ионизирующие излучения: ионная, гамма, рентгеновская и альфа спектрометрия; ΔE-детекторы; координатные детекторы; фотодетекторы. Только для экспериментов CMS и ATLAS, создаваемых на ускорителе LHC CERN, потребуется более 300 м² чувствительной площади кремниевых детекторов. Такого количества детекторов и необходимого для их изготовления БЗП-кремния не было произведено во всем мире за все предыдущие годы.

Применение планарных кремниевых детекторов в экспериментах с высокими радиационными потоками предъявляет специфические требования к основным параметрам этих приборов. Требования, предъявляемые к параметрам детекторов, продиктованы следующими условиями экспериментов CMS и ATLAS:

- высокий радиационный фон, как адронный (нейтроны, протоны, пионы) до 10¹⁴ см²/10 лет, так и гамма фон до 10 Мрад/10 лет в местах расположения кремниевых детекторов при светимости ускорителя 10³⁴ см⁻²×сек⁻¹;
- большая площадь кремниевых детекторов, исчисляемая десятками м²;
- высокое быстродействие детекторов, исходя из частоты столкновений ускоренных частиц 40 МГц на ускорителе LHC.

Воздействие радиации на параметры исходного кремния приводит к изменению основных характеристик детектора. Изменение концентрации свободных носителей заряда в объеме детектора под действием радиации приводит сначала (для n-типа кремния) к снижению, а после инверсии типа проводимости к росту величины напряжения полного обеднения детектора. Уменьшение времени жизни носителей заряда в объеме детектора приводит к росту объемного обратного тока и рассеиваемой мощности детектора, а также к уменьшению эффективности сбора заряда ионизации.

Поэтому, исследование радиационной стойкости исходного кремния и детекторов является важной научной задачей для их реального применения в экспериментах, а также для научного прогнозирования поведения параметров детекторов в процессе их эксплуатации при высоких радиационных потоках.

Приведенные выше положения и существующие проблемы создания и применения кремниевых детекторов в современных физических экспериментах определяют актуальность данной работы.

Цель и задачи диссертационной работы:

Целью данной работы является разработка планарных кремниевых стриповых детекторов для применения в экспериментах с высокими радиационными потоками, и в частности, для предливневой части электромагнитного калориметра эксперимента CMS.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи.

1. Провести исследования радиационной стойкости БЗП кремния, изготавливаемого разными фирмами, и выбрать материал с заданными начальными параметрами для серийного изготовления детекторов.
2. Развить экспериментальные методы для исследования основных параметров сильно облученных детекторов:
 - определение точки инверсии типа объемной проводимости;
 - измерение напряжения полного обеднения;
 - измерение эффективности сбора заряда ионизации и отношения сигнал/шум;
 - определение напряжения электрического пробоя.
3. Исследовать основные параметры опытных планарных кремниевых детекторов до и после облучения быстрыми нейтронами.
4. На основании исследований опытных детекторов разработать стриповые кремниевые детекторы с оптимальной топологией и доказать возможность их применения в предливневой части эксперимента CMS при наборе за 10 лет флюенса быстрых нейтронов $2 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$ и флюенса протонов $3 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$.
5. Разработать прототип предливневой части на основе кремниевых стриповых детекторов для электромагнитного калориметра установки CMS и исследовать его на пучке заряженных частиц.

Научная новизна работы

В диссертационной работе приведены новые результаты экспериментальных исследований радиационной стойкости БЗП кремния и планарных кремниевых детекторов.

1. Проведено исследование радиационной стойкости монокристаллов высокоомного БЗП-кремния n-типа при облучении быстрыми нейтронами со средней энергией спектра $\langle E_n \rangle = 1.35 \text{ МэВ}$. Исследованы монокристаллы кремния двух фирм-производителей: ЗТМК (г. Запорожье, СССР), Wacker (Germany) и показано, что кремний данных фирм удовлетворяет требованиям планарной детекторной технологии. Впервые обнаружено различие в результатах измерения типа проводимости кремния, облученного быстрыми нейтронами, методом Холла (при отсутствии внешнего электрического поля) и при измерении на детекторах (при наличии электрического поля) и дано объяснение этого эффекта. Измерены концентрация и типы глубоких центров как в исходном кремнии, так и после облучения быстрыми нейтронами.

2. Исследована зависимость основных параметров опытных детекторов от флюенса протонов и быстрых нейтронов до инверсии и после инверсии типа объемной проводимости материала детекторов. Впервые предложен и проверен экспериментальный метод определения точки инверсии типа объемной проводимости материала детектора при измерении быстрыми нейтронами. Экспериментально определена величина коэффициента $\alpha_1 = 6 \times 10^{-17} \text{ А} \times \text{см}^{-1}$ (без учёта самоотжига при $+20^\circ$) для зависимости $\Delta I = \alpha_1 \times V \times \Phi$ роста объемного обратного тока (ΔI) детектора с объемом (V) от флюенса быстрых нейтронов (Φ).

3. На основании проведённых исследований опытных детекторов разработаны стриповые детекторы с чувствительной площадью 40 см^2 . Измерено распределение обратных токов и шумов по стрипам до облучения и после облучения. Не установлено корреляции между уровнем шума до облучения и после облучения, это свидетельствует о разной природе шума для необлученных и облученных детекторов. Впервые решена проблема создания детекторов толщиной 300 мкм с напряжением пробоя выше 400 В , что в несколько раз превышает напряжение полного обеднения. Экспериментально показана работа сильно облученных детекторов (после инверсии типа проводимости материала детектора) без электрического пробоя и заметного роста шумов при напряжении на детекторах до 1000 В .

4. Измерена геометрическая однородность эффективности сбора заряда ионизации (m.i.p.) для необлучённых и облучённых серийных детекторов и показано, что эффективность не зависит от места прохождения частицы через чувствительную площадь детектора. Снижение эффективности собранного заряда ионизации (m.i.p.) для облучённых детекторов составляют 8% для быстрых нейтронов и 4% для протонов (24 ГэВ) на каждые 10^{14} см^{-2} соответственно.

5. Разработаны прототипы предливневой части на основе кремниевых стриповых детекторов для электромагнитного калориметра установки CMS и исследованы на пучке электронов в диапазоне энергии $15 \div 180 \text{ ГэВ}$. Энергетическое разрешение гомогенного кристаллического калориметра (PbWO_4) совместно с предливневой частью ($2\text{Xo(Pb)/Si}+1\text{Xo(Pb)/Si}$) составляет $\sigma_E/E = 2.5\%/\sqrt{E} \oplus 0.200/E \oplus 0.5\%$, что является рекордным в настоящее время.

Практическая значимость работы

1. Результаты исследований стандартного детекторного кремния, изготовленного разными фирмами, показывают одинаковую закономерность деградации параметров материала при облучении быстрыми нейтронами, которая определяется концентрацией и типом радиационно-индуцированных глубоких уровней в энергетической запрещенной зоне кремния. Значение флюенса адронов, при котором происходит инверсия типа объёмной проводимости n-кремния, зависит от величины исходного удельного сопротивления. Практически это означает, что чем чище и совершеннее монокристаллы БЗП-кремния, тем раньше (при более низком значении флюенса) произойдёт инверсия типа проводимости. Скорость уменьшения времени жизни носителей заряда при облучении не зависит от типа проводимости и величины удельного сопротивления кремния. Возрастание объёмного обратного тока детектора, приведённого к единице объёма, с ростом флюенса адронов одинаково для любого типа кремния (БЗП, Чохральского, эпитаксиального, нейтронно-легированного). При выборе кремния для разработки и изготовления детекторов необходимо учитывать топологию детекторов и радиационные условия, в которых они будут применяться.

2. Впервые предложены и экспериментально проверены методы:

- Метод определения точки инверсии n-типа объёмной проводимости материала детектора при облучении быстрыми нейтронами. Этот метод заключается в измерении низкочастотной ($0.1\text{-}1 \text{ кГц}$) зависимости ёмкости детектора от флюенса при низком обратном напряжении. Данный метод определения значения флюенса «инверсии» можно применять для любого типа частиц с пробегами больше толщины детектора.
- Метод дистанционного экспресс-мониторинга потока быстрых нейтронов с помощью кремниевых детекторов. Данный метод состоит в измерении

линейной зависимости от времени облучения (флюенса) приращения обратного объёмного тока полностью обеднённого детектора с известным объёмом.

3. Результаты радиационных исследований опытных детекторов были применены при разработке оптимальной топологии и технологии серийных стриповых детекторов для предливневой части электромагнитного калориметра эксперимента CMS. Разработаны серийные детекторы для экспериментов с высокими радиационными потоками, где необходима работа детекторов при повышенных рабочих напряжениях после инверсии типа объемной проводимости, т.е. после превращения детекторной структуры $p^{+}nn^{+}$ в $p^{-}pn^{+}$. Экспериментальные данные исследований подтверждают, что стриповые детекторы с чувствительной площадью 40 см^2 после облучения нейтронами $2 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$ и протонами $3 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$ работают при температуре -5°C без электрического пробоя до 1000 В.

4. Экспериментально показано, что практическое применение кремниевых детекторов в экспериментальных установках при высоких радиационных потоках требует выполнения следующих основных условий:

- необходим эффективный теплоотвод рассеиваемой мощности на детекторе для исключения теплового пробоя из-за роста обратного тока детектора и рабочего напряжения с ростом флюенса;
- необходимо работать при пониженной температуре для уменьшения мощности рассеяния на детекторе (температура удвоения объёмного тока для кремния равна 7 градусам);
- необходимо применение быстрой электроники с малыми временами формирования ($<50 \text{ нс}$) для снижения вклада в шум возрастающего при облучении обратного тока детектора;
- обязательное проведение предварительных радиационных испытаний детекторов во всем диапазоне радиационных нагрузок, которые прогнозируются по результатам физического моделирования для данного эксперимента;
- необходимо экспериментальное подтверждение долговременной работы облученных детекторов без электрического пробоя и с низким уровнем шумов при рабочих напряжениях, превышающих на 200-300 В величину напряжения полного обеднения.

5. Разработаны прототипы предливневой части на основе кремниевых стриповых детекторов для электромагнитного калориметра установки CMS. Разработана конструкция и технология сборки детекторного модуля для предливневой части. Получены экспериментальные данные, позволившие измерить координатное и энергетическое разрешение кристаллического калориметра (PWO) вместе с предливневой частью, отвечающее требованиям CMS.

Автор защищает:

- Результаты исследований термостойкости и радиационной стойкости высокоомного БП-кремния n -типа проводимости, изготовленного разными фирмами.
- Результаты исследований радиационной стойкости опытных детекторов.
- Методы измерения параметров необлучённых и облучённых детекторов.
- Впервые предложенные экспериментальные методы:

- определение точки инверсии типа объёмной проводимости детектора;
- измерение потока быстрых нейтронов (адронов) с помощью кремниевых детекторов.
- Обоснование выбора материала для изготовления серийных детекторов.
- Конструкцию серийного стрипового кремниевого детектора для предливневой части установки CMS.
- Результаты исследований разработанных серийных стриповых детекторов.
- Результаты исследований на пучках заряженных частиц прототипов предливневой части CMS, разработанных на основе кремниевых стриповых детекторов.

Апробация работы

Основные результаты докладывались и обсуждались на следующих конференциях и совещаниях:

- V-ый проблемный семинар "Физика и техника полупроводниковых детекторов", Гатчина, ЛИЯФ, 1990г.
- "International workshop on Radiation Damage in Silicon", Oak Ridge, USA, 22-24 February 1991.
- "Large Scale Application and Radiation Hardness of Silicon Detectors", Firenze, Italy, 1991, 1992, 1993 годы.
- "Workshop on Large Scale Application and Radiation Hardness of Silicon Detectors in High Energy Physics", Минск, 1-4 October, 1991г.
- Рабочее совещание ROSE-RD48, CERN, 1995г.
- "Annual RDMS CMS Collaboration Meeting", CERN, 1995, 1996, 1997.
- 8th European Symposium on Semiconductor Detectors "New Developments on Radiation Detectors", Schloss Elmau, 14-17 June, 1998.
- 1999 IEEE "Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference", Seattle, USA, October 1999.
- 2000 IEEE "Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference", Lyon, France, 15-20 October 2000.
- CMS/ECAL/PRESHOWER "Silicon Sensors Procurement Readiness Review", CERN, July 5-6, 2001.

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 9 научных работ.

Содержание диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и библиографии. Диссертация содержит 60 рисунков, 5 таблиц, библиографию из 50 наименований и имеет общий объём 93 страницы.

Во введении излагается общий подход к проблеме применения кремниевых детекторов в условиях больших радиационных нагрузок, обоснована актуальность и сформулирована цель диссертационной работы.

Первая глава содержит литературный обзор, современные требования и основные принципы работы планарных кремниевых детекторов. Приведена история

развития полупроводниковых детекторов для применения в экспериментах по ядерной физике и по физике частиц. Показано, что бурное развитие микроэлектронной планарной технологии и полупроводникового материаловедения, в частности, создание технологии выращивания методом бестигельной зонной плавки (БЗП) монокристаллов кремния с высоким удельным сопротивлением (более 1 кОм×см) и временем жизни неосновных носителей заряда ($\tau_{\text{ннз}} > 10^{-3}$ сек), создало объективные условия для создания современной детекторной технологии и широкого применения планарных кремниевых детекторов в современных физических экспериментах.

Даны практические рекомендации при разработке детекторов по выбору основных параметров высокоомного кремния, таких как: удельное сопротивление, тип проводимости, кристаллографическая ориентация, толщина пластин, качество подготовки поверхности пластин. Рассмотрены основные эффекты, возникающие в кремнии и в детекторах при воздействии радиации. Рассмотрена эволюция взглядов на параметры детекторов в связи с современными требованиями для создаваемых экспериментов CMS и ATLAS на ускорителе LHC (CERN).

Основным требованием данных экспериментов является длительная работа (10 лет) детекторов в условиях большого радиационного фона, достигающего в самых

"горячих областях" до 5×10^{13} нейтрон/см²/год. Более подробно рассмотрены стриповые кремниевые детекторы – основные кремниевые детекторы для измерения координат частиц. На Рис.1 приведена структура (а) одностороннего стрипового детектора и его эквивалентная электрическая схема (б). На эквивалентной схеме объём детектора изображён в виде диода. Рассмотрены основные проблемы при разработке двухсторонних стриповых детекторов, основные их преимущества и недостатки для применения в радиационных условиях.

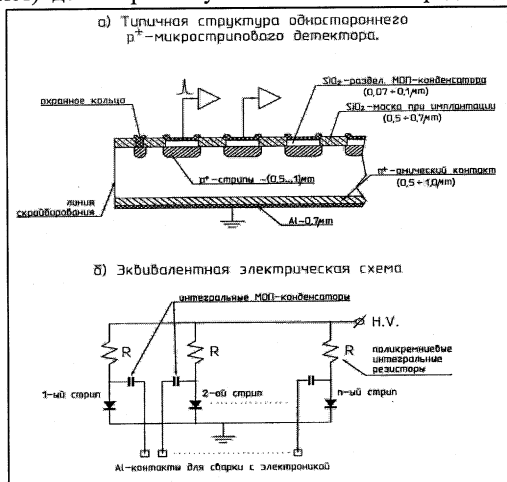


Рис.1. Структура одностороннего стрипового детектора (а) и его эквивалентная схема (б).

Во второй главе приведены экспериментальные результаты исследований высокоомного детекторного кремния до и после облучения быстрыми нейтронами. Исследовались два типа монокристаллов кремния, выращенных методом БЗП на двух фирмах: Wacker Chemitronics, (ФРГ) и ЗТМК, (СССР, Запорожье). В таблице1 приведены основные исходные параметры исследуемых материалов.

Таблица 1. Основные исходные параметры исследуемых монокристаллов.

Фирма-изготовитель	ρ_n , кОм×см	τ_p , сек	Ориентация кристалла	Диаметр, мм
Wacker	4 - 6	$(2 - 4) \times 10^{-3}$	<111>	100
ЗТМК	2 - 3	$(0.8 - 1) \times 10^{-3}$	<111>	76

Наличие структурных микродефектов оценивалось при селективном травлении кремниевых образцов в модифицированном Sirtl-травителе. Было установлено, что оба типа кристаллов свободны от дефектов типа дислокаций и свирл-дефектов. Известно, что структурные микродефекты являются стоками для примесей и быстро диффундирующие примеси, собираясь на микродефектах, увеличивают размеры фигур травления. На поверхности (111) для Wacker-кристаллов фигуры травления можно было обнаружить только с помощью интерференционного микроскопа. Для ЗТМК кремния фигуры травления были видны на оптическом металлографическом микроскопе. Наблюдалось однородное распределение фигур травления по образцу, что соответствует так называемым D-дефектам (вакансии). Концентрация вакансий оценивалась с помощью просвечивающего электронного микроскопа и составляла $10^{13} \div 10^{14} \text{ см}^{-3}$. Кремний, изготовленный на указанных фирмах, является высокочистым материалом, свободным от структурных дефектов типа дислокаций и свирл-дефектов и пригодным для изготовления детекторов.

Исследование термостабильности высокоомного кремния проводилось на детекторах различной площади 4 см^2 и 0.25 см^2 , изготовленных в НИИМВ (г. Зеленоград). Детекторы изготавливались на пластинах толщиной 400 мкм (ЗТМК и Wacker) по двум вариантам технологии создания p+ омического контакта:

- имплантационная технология;
- диффузионная технология.

Исследовались два варианта создания p+ омического контакта, потому что эта область требует значительно более высоких ионных доз при легировании. Известно, что имплантация более дорогой процесс и медленный по сравнению с диффузией. При диффузионных процессах всегда возникает проблема чистоты вещества (диффузанта), из которого идёт легирование фосфором. Результаты исследований подтверждают возможность изготовления детекторов с высокими параметрами (обратные токи $< 50 \text{ нА/см}^2$ при 200 В) как методом имплантации фосфора, так и методом диффузии фосфора при создании омического p+ контакта.

Измерения концентрации глубоких центров в необлучённом кремнии проводились методом Холла и методом DLTS и показали, что при существующей технологии дополнительно возникают два (типичных для температур 1000°C) глубоких уровня с энергией активации $E_{a1} = E_c - 0.56 \text{ эВ}$ и $E_{a2} = E_c - 0.26 \text{ эВ}$ и концентрацией $3 \times 10^8 \div 4 \times 10^{10} \text{ см}^{-3}$. При таких небольших концентрациях глубоких центров, образующихся в объёме кремния при изготовлении детекторов, характеристики детекторов определяются только исходными параметрами материала.

Методом Холла проводились исследования образцов кремния до и после облучения быстрыми нейтронами. Температурная зависимость (обратная шкала температур) концентрации свободных носителей показана на Рис.2. Исследовались три типа образцов кремния: 1-необлучённый материал, 2-после облучения флюенсом нейтронов (до инверсии), 3-после облучения флюенсом нейтронов в области точки инверсии типа проводимости. Впервые экспериментально установлено, что при дальнейшем увеличении флюенса нейтронов до $5 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$ измерения методом Холла показывали n-тип проводимости. С другой стороны, измерения C-V характеристик показывали, что концентрация свободных электронов падает с ростом флюенса и в области $(4 \div 8) \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$ происходит инверсия типа объёмной проводимости, а затем начинается рост концентрации свободных носителей, но уже дырок. Возникает вопрос – почему метод Холла не показывает изменение типа проводимости. Для ответа на этот вопрос были подготовлены холловские образцы из облучённых и измеренных детекторов, которые по измерениям C-V показывали, что они имеют объём p-типа

(после инверсии). В результате измерений методом Холла этих образцов было установлено, что они имеют n-тип проводимости.

Это противоречие можно объяснить так: радиационно-индуцированные акцепторные центры распределены однородно по объёму и частично сосредоточены в виде кластеров в повреждённых областях кристалла. Из-за высокой концентрации дефектов в области кластера энергетические уровни искривлены и образуют потенциальный барьер. При измерениях методом Холла напряжение на образце низкое и поэтому потенциальный барьер кластеров не может быть устранён. Дырки находятся внутри кластера и не участвуют в проводимости, при этом возникает ситуация, когда свободных дырок меньше, чем электронов от равномерно распределённых в объёме доноров.

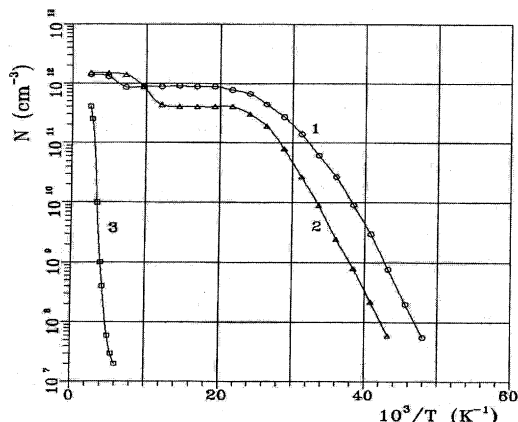


Рис.2. Температурная зависимость концентрации свободных носителей заряда (электронов) для детектора до облучения (1) и после облучения : (2) $1 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$; (3) $3.3 \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$.

Измерена зависимость уменьшения времени жизни носителей заряда от флюенса быстрых нейтронов и определена константа повреждений $K_{\text{gen}}^{\tau} = 2 \times 10^{-8} \text{ см}^2 \text{ с}^{-1}$ для быстрых нейтронов. Величина, обратная времени жизни, линейно зависит (растет) от флюенса, это означает, что и термогенерационный объёмный ток также будет линейно увеличиваться с ростом флюенса $(\tau_{\text{gen}})^{-1} = K_{\text{gen}}^{\tau} \times \Phi$. В таблице 2 приведены измеренные времена жизни электронов и дырок для разных величин нейтронного флюенса.

Таблица 2. Эффективное время жизни электронов и дырок для разных значений флюенса быстрых нейтронов.

Флюенс, н/см ²	Тип проводимости	Время жизни дырок, μs	Время жизни электронов, μs
$3.3 \cdot 10^{12}$	n	0.44	1.1
$1.6 \cdot 10^{13}$	p	0.11	0.13
$8.0 \cdot 10^{13}$	p	0.55	0.015

Методом DLTS определены параметры (энергия активации, сечение захвата носителей заряда) основных радиационных дефектов и рассчитано их влияние на время жизни носителей заряда (таблица 3).

Таблица 3. Параметры глубоких уровней, индуцированных быстрыми нейтронами.

Тип уровня	Энергия активации уровня, эВ	Сечение захвата σ_n , см ²
E1	$E_c - 0.18$	2.0×10^{-14}
E2	$E_c - 0.22$	2.0×10^{-16}
E3	$E_c - 0.40$	2.0×10^{-16}
H1	$E_v + 0.33$	9.0×10^{-14}
H2	$E_v + 0.40$	3.0×10^{-14}

В третьей главе приведены экспериментальные методы и результаты исследований необлучённых и облучённых опытных кремниевых детекторов.

Измерены зависимости изменения параметров детекторов (напряжение полного обеднения, обратный ток, ёмкость) при облучении быстрыми нейтронами и определён коэффициент $\alpha_1 = 6 \times 10^{-17}$ А/см при +20°C без самоотжига. На Рис.3 показана экспериментальная зависимость увеличения обратного тока от флюенса быстрых нейтронов для двух детекторов. Один детектор облучался без электрического поля (1) и напряжение 100 В подавалось только на несколько секунд при измерении тока.

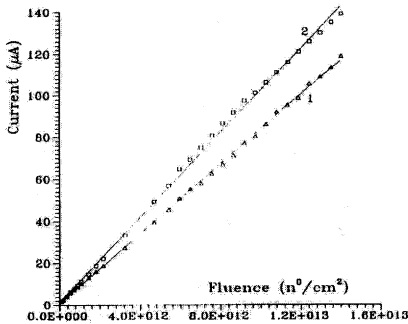


Рис.3. Зависимость роста обратного тока детектора с размерами (20×20×0.4) мм³ от флюенса быстрых нейтронов при +20°C: 1-детектор без напряжения, 2-детектор при напряжении 100 В.

Второй детектор (2) облучался при постоянном обратном напряжении 100 В, которое было больше напряжения полного обеднения. Различие возрастания обратного тока от флюенса быстрых нейтронов для детектора с электрическим полем и без поля объясняется образованием областей повреждения - кластеров. При наличии электрического поля внутри детектора более эффективно происходит термогенерация носителей из области кластеров. Следует заметить, что после самоотжига при +20°C обратные токи детекторов стали одинаковыми, это подтверждает, что количество образовавшихся дефектов не зависит от наличия обратного напряжения на детекторе в момент облучения.

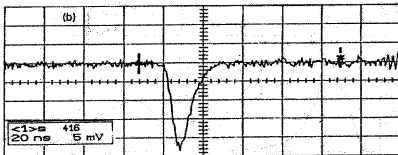
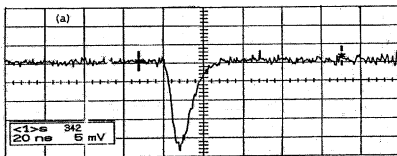
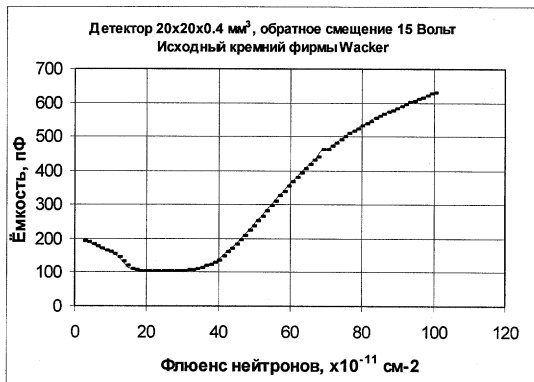


Рис.4. Импульсы тока ионизации от m.i.p. (¹⁰⁶Ru) для детектора: а) необлучённого, б) облучённого $\Phi = 4 \times 10^{13}$ н/см².

Установлено, что быстродействие детекторов при $+20^{\circ}\text{C}$ после облучения до 2×10^{14} н/см² не изменяется при регистрации сигналов от минимально ионизирующих частиц (¹⁰⁶Ru). Этот положительный факт означает, что облучённые детекторы могут работать со временем формирования электроники меньше 50 нс. Короткие времена формирования электронного канала являются необходимым условием работы облучённого детектора для того, чтобы понизить вклад в шумы растущего с флюенсом тока утечки детектора. На Рис.4 показаны формы импульсов тока ионизации m.i.p. для необлучённого (а) и облучённого (б) детекторов.

Впервые предложен и проверен прямой метод определения точки инверсии типа объёмной проводимости материала детектора при облучении быстрыми нейтронами. Сущность метода состоит в измерении зависимости ёмкости $C_d=f(\Phi)$ необлучённого полностью детектора от флюенса быстрых нейтронов. На Рис.5 представлена



измеренная зависимость ёмкости детектора от флюенса при обратном напряжении 15 В. Сначала, с ростом флюенса нейтронов ёмкость детектора уменьшается, так как растёт удельное сопротивление кремния из-за компенсации донорной примеси радиационными дефектами акцепторного типа.

Рис. 5. Зависимость ёмкости детектора при постоянном напряжении 15 В от флюенса нейтронов.

Затем наступает полное обеднение детектора и ёмкость детектора становится минимальной и не зависит от флюенса при данном напряжении 15 В. Точка инверсии для данного детектора находится в области 3×10^{12} н/см². После точки инверсии объём детектора становится р-типа проводимости, удельное сопротивление кремния продолжает уменьшаться за счёт роста концентрации глубоких центров и ёмкость детектора растёт. Детекторы с более высоким начальным удельным сопротивлением кремния достигают инверсии при меньшем значении флюенса.

Исследование эффективности собираемого заряда для облучённых детекторов показало, что величина потерь собранного заряда для m.i.p. зависит от следующих факторов:

- толщины детектора;
- времени сбора заряда (время формирования);
- напряжения на детекторе;
- величины флюенса.

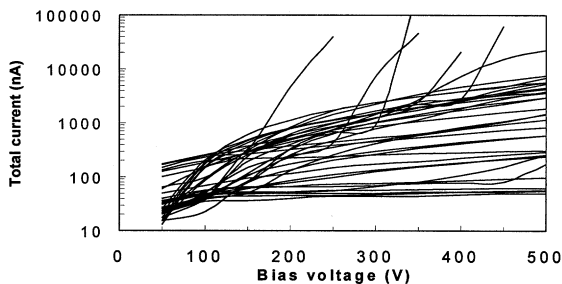
Результаты измерений эффективности сбора заряда на детекторах толщиной 400 мкм дают величину потерь эффективности 10% при облучении быстрыми нейтронами на каждые 10^{14} см⁻².

Четвёртая глава посвящена разработке и исследованию серийных стриповых детекторов. Проблема разработки и выбора оптимального варианта детектора для применения в экспериментах с высокими радиационными потоками (CMS и ATLAS) заключается в следующем:

- Во всех предыдущих экспериментах с применением кремниевых детекторов не предъявлялись требования к работоспособности детекторов после инверсии типа объемной проводимости под действием радиации. Обычно детекторы работают при напряжении полного обеднения. Для стандартной толщины детектора 300 микрон и удельного сопротивления кремния 5 кОм·см величина рабочего напряжения детектора не превышает 60 В. Режим работы с напряжением на детекторе в несколько раз превышающем величину полного обеднения обычно не рассматривались.
- Радиационно повреждаемые детекторы не могут быть частично восстановлены с помощью низкотемпературного отжига (до 180 градусов) из-за сложности конструкции установки и самих детекторных модулей, поэтому разработанные детекторы должны быть работоспособны в течение длительного времени с накоплением радиационных дефектов на поверхности (в диэлектрических слоях) и в объёме детектора.

При разработке детекторов для предливневой части установки CMS было изучено влияние толщины имплантированного p+ слоя на обратной стороне детектора, который выполняет функцию омического контакта до момента инверсии типа проводимости. После больших значений флюенса нейтронов порядка $(3\pm 6)\times 10^{12}\text{см}^{-2}$, когда произойдет инверсия типа проводимости объёма, это контакт становится инжектирующим (выпрямляющим). Почему было обращено внимание на обратную сторону детектора? В мире накоплен большой опыт исследований детекторов, где было замечено, что при создании детекторов с высокими пробивными напряжениями, ограничение наступает при напряжениях выше полного обеднения. Это указывает, что p+ сторона выдерживает большие напряженности, а когда электрическое поле доходит до обратного контакта, происходит увеличение обратного тока, т.е. возникает инжекция дырок (неосновных носителей) с обратного p+ контакта.

Опытные детекторы изготавливались с тонким омическим контактом (0.3-1) мкм и для большинства этих детекторов напряжение пробоя было ниже 300 В, потому что после полного обеднения детектора возникает инжекция дырок с p+ контакта. При тонком (0.3-1) мкм p+ слое дырки, инжектированные с дефектов, за счёт диффузии могут достигать области электрического поля и давать вклад в ток утечки. Известно,



что время жизни носителей заряда и диффузионная длина сильно зависят от степени легирования данной области, это связано с механизмом Оже рекомбинации.

Рис.6. Вольт-амперные характеристики (ВАХ) серийных детекторов.

На Рис.6 приведены ВАХ детекторов, изготовленных по серийной технологии p+ контакта с толщиной 3 мкм. Для большинства детекторов напряжение пробоя выше 400 В. Для измерения толщины омического p+ контакта была разработана методика измерений «мёртвых» слоёв детектора с помощью альфа источника. Данная методика позволяет измерять неразрушающим методом эффективную толщину всех «мёртвых» слоёв детектора (p+, n+, SiO₂, Al).

На этапе входного контроля детекторов обычно измеряют вольт-амперные характеристики стрипов и по ним прогнозируют уровень шумов детектора, полагая зависимость шума как корень квадратный из величины произведения тока стрипа и времени формирования усилителя.

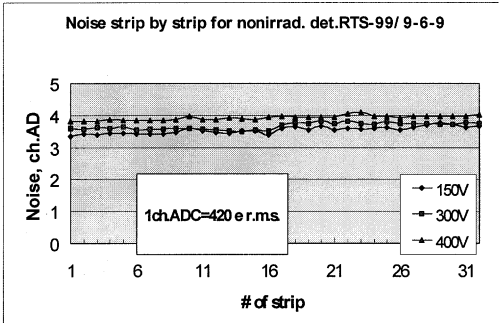
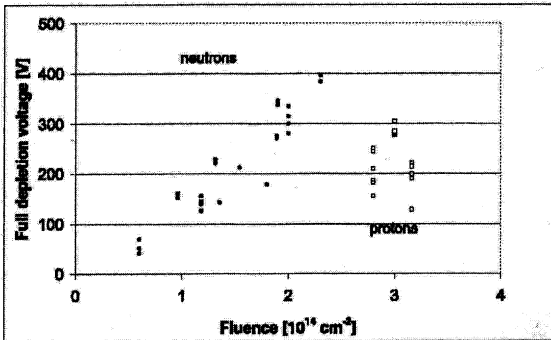


Рис.7. Распределение шума по стрипам для необлученного детектора для трёх значений напряжения: 150 В, 300 В, 400 В.

Такой подход справедлив, если ток стрипа состоит только из объёмной термогенерационной компоненты и отсутствует поверхностный ток утечки. На Рис.7 приведены результаты измерений распределения шумов по стрипам для необлучённого детектора при разных напряжениях. Величина измеренных шумов включает собственный шум измерительного электронного тракта без детектора. Собственный шум электроники был равен 2 каналам АЦП (900 e).

Такой подход справедлив, если ток стрипа состоит только из объёмной термогенерационной компоненты и отсутствует поверхностный ток утечки.



При облучении детектора происходит изменение параметров кремния, которое приводит к изменению эксплуатационных параметров детектора.

Рис.8. Зависимость напряжения полного обеднения Ufd от флюенса нейтронов и протонов.

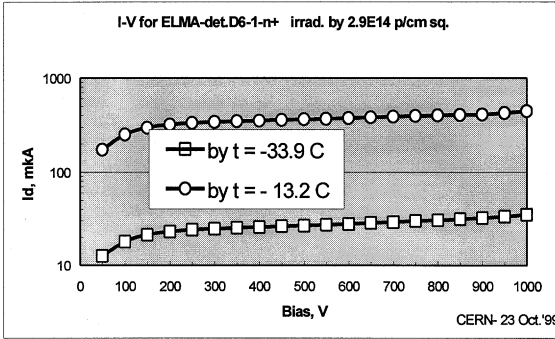
В кремнии n-типа проводимости происходит сначала уменьшение концентрации свободных электронов за счёт компенсации радиационно-индуцированными глубокими центрами акцепторного типа и, следовательно, Ufd (напряжение полного обеднения) снижается практически до Ufd=0В, это соответствует точке инверсии типа объёмной проводимости. Для стандартного детекторного кремния с $\rho=3+5$ кОм×см инверсия типа проводимости объёма детектора в указанном выше диапазоне температур происходит после облучения флюенсом быстрых нейтронов $(4+8) \times 10^{12}$ см⁻². После инверсии при облучении происходит дальнейшее увеличение радиационно-индуцированных глубоких центров акцепторного типа, и удельное сопротивление p-типа в объёме детектора начинает снижаться, что ведёт к возрастанию Ufd. На Рис.8 показана зависимость напряжения полного обеднения детекторов толщиной 320 мкм от флюенса для нейтронов и протонов.

В кремнии n-типа проводимости происходит сначала уменьшение концентрации свободных электронов за счёт компенсации радиационно-индуцированными глубокими центрами акцепторного типа и, следовательно, Ufd (напряжение полного обеднения) снижается практически до Ufd=0В, это соответствует точке инверсии типа объёмной проводимости.

Радиационный фон в области, где будут расположены кремниевые детекторы предливневой части электромагнитного калориметра установки CMS при высокой светимости ускорителя ($L=10^{34}$ см⁻²×с⁻¹) будет таков, что инверсия проводимости объёма детектора произойдёт после первых двух лет работы. Поэтому важнейшим параметром для облучённых детекторов является высокое напряжение пробоя.

После инверсии при облучении происходит дальнейшее увеличение радиационно-индуцированных глубоких центров акцепторного типа, и удельное сопротивление p-типа в объёме детектора начинает снижаться, что ведёт к возрастанию Ufd. На Рис.8 показана зависимость напряжения полного обеднения детекторов толщиной 320 мкм от флюенса для нейтронов и протонов.

Проведённые исследования серийных детекторов показали надёжную и стабильную во времени работу сильно облучённых детекторов при напряжении до 1000 В. На Рис.9



показаны вольт-амперные характеристики облучённого протонами $2,9 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$ детектора.

Рис.9. ВАХ облучённого протонами $2,9 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$ детектора, измерения при двух значениях температуры: $-33,9^\circ\text{C}$ и $-13,2^\circ\text{C}$.

Так как стриповые детекторы в составе предливневой части ЭМ-калориметра измеряют кроме координаты ливня ещё и видимую часть энергии, то важно знать соответствие измеряемого заряда потерям энергии в повреждаемых кремниевых детекторах. Известно, что эффективность сбора заряда ионизации падает с ростом флюенса. Были проведены измерения эффективности сбора заряда ионизации от мюонов для детекторов, предварительно облучённых разными значениями флюенса быстрых нейтронов. Потери эффективности собранного заряда для серийных детекторов составляют 8% для быстрых нейтронов и 4% для протонов (24 ГэВ) на каждые 10^{14} см^{-2} .

В пятой главе рассмотрено физическое назначение и конструкция предливневой части (ПЧ) электромагнитного калориметра установки CMS. Основное назначение ПЧ – это подавление гамма фона от нейтральных пионов (π^0) при поиске Хиггс бозона с массой меньше $130 \text{ GeV}/c^2$ в реакции $H \rightarrow \gamma\gamma$. Чтобы различать два фоновых фотона от распадов π^0 , калориметр должен обладать хорошей гранулярностью (размер элемента детектирования), позволяющей различать фоновые фотоны. Для этой цели в торцевой части калориметра необходим предливневый детектор - ПЧ с координатным разрешением не хуже одного миллиметра. Электромагнитный калориметр CMS является гомогенным и основан на применении тяжёлых сцинтилирующих монокристаллов PbWO_4 ($X_0 = 0.96 \text{ см}$).

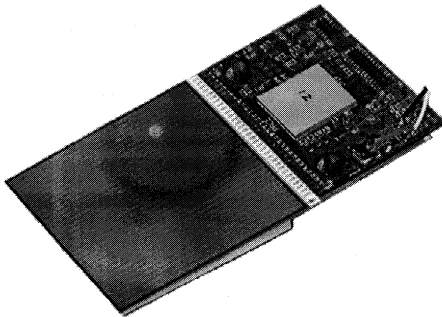
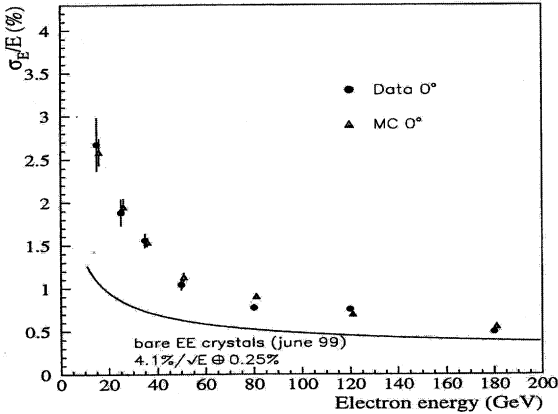


Рис.10. Внешний вид детекторного модуля.

На основе серийно изготавливаемых кремниевых стриповых детекторов разработаны, изготовлены и исследованы прототипы ПЧ для CMS. На Рис.10 показана конструкция одного детекторного модуля (микромодуля) для прототипа предливневой части калориметра, который исследовался на пучках заряженных частиц. Основное назначение микромодуля - это позиционирование стрипового детектора на плоскости с

точностью 200 мкм и обеспечение хорошего теплового контакта между охлаждающей плоскостью и кремниевым детектором. Для этой цели детектор приклеивается электропроводящим клеем на основе серебра на ситалловую (Al_2O_3) печатную плату. После сборки детектора и электроники на ситалловой плате каждый стрип детектора соединяется 30-ти микронной Al-проволочкой со входами электроники методом ультразвуковой разварки.

В результате проведённых исследований на пучке электронов в интервале энергий 15-180 ГэВ получено пространственное и энергетическое разрешение, полностью удовлетворяющее требованиям эксперимента CMS. Энергетическое



разрешение электромагнитного калориметра на основе кристаллов PWO вместе с предливневой частью составляет $\sigma_E/E = 2.5\%/\sqrt{E} \oplus 0.200/E \oplus 0.5\%$, что является рекордным в настоящее время.

Рис.11. Зависимость энергетического разрешения прототипа кристаллического калориметра вместе с прототипом ПЧ: Δ моделирование, \bullet измерение калориметр+ПЧ, — калориметр без ПЧ.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы:

1. Проведены исследования радиационной стойкости БЗП кремния n-типа и опытных детекторов, изготовленных на его основе:
 - определены типы структурных дефектов в исходном кремнии;
 - исследованы глубокие центры, образующиеся при высокотемпературных технологических операциях и при облучении быстрыми нейтронами;
 - впервые обнаружено различие в результатах измерения типа проводимости кремния, облучённого нейтронами, методом Холла (при отсутствии внешнего электрического поля) и при измерении на детекторах (при наличии электрического поля) и дано объяснение этого эффекта;
 - впервые предложен и проверен прямой метод определения «точки инверсии» типа объёмной проводимости кремния в процессе облучения быстрыми нейтронами, основанный на измерении ёмкости детектора;
 - для проведения разработки, исследования и сборки кремниевых детекторов в ЛФЧ ОИЯИ создана технологическая лаборатория с классом чистоты 100 и разработаны методы и аппаратура контроля параметров кремниевых детекторов.
2. На основе проведённых исследований и разработок опытных образцов разработаны стриповые кремниевые детекторы площадью 40 см² для предливневой части установки CMS. Освоено изготовление детекторов в опытном производстве НИИМВ (г. Зеленоград). К настоящему времени

суммарная чувствительная площадь изготовленных детекторов составляет более 2 м^2 .

3. Проведены полномасштабные исследования серийно изготавливаемых детекторов:
 - экспериментально установлено, что серийные детекторы после облучения нейтронами и протонами при флюенсе свыше 10^{14} см^{-2} работают без электрического пробоя до 1000 В;
 - величина обратного тока стрипа определяется объёмной компонентой термогенерационного тока и линейно зависит от флюенса;
 - измеренный уровень шумов облучённых детекторов при постоянной времени формирования 35 нс даёт отношение сигнал/шум, равное 8 для m.i.p., что обеспечивает калибровку энергетической шкалы предливневой части калориметра с помощью мюонов во время набора данных;
 - геометрическая однородность эффективности сбора заряда по всей площади облучённых детекторов для m.i.p. составляет 97% и показано, что 3% неоднородности в межстриповой области связаны с уменьшением соотношения сигнал/шум в 2 раза из-за распределения заряда между двумя стрипами.
4. На основе серийно изготавливаемых кремниевых стриповых детекторов созданы и исследованы прототипы предливневой части для установки CMS. Энергетическое разрешение электромагнитного калориметра на основе кристаллов PWO вместе с предливневой частью составляет $\sigma_E/E = 2.5\%/\sqrt{E} \oplus 0.200/E \oplus 0.5\%$, что является рекордным в настоящее время.

Диссертация основывается на следующих опубликованных работах:

1. A.E.Chermukhin et al., "Investigation of silicon planar detectors for collider experiments", preprint E13-94-247, Dubna 1994.
2. I.A.Golutvin et al., "Radiation hardness of silicon detectors for collider experiments", preprint E14-95-97, Dubna 1995.
3. T.Angelescu et al., "Radiation hardness studies on silicon detectors in fast neutron fields", NIM, A357 (1995) 55-63.
4. Т.И.Балалыкина и др., "Чистая зона" для разработки полупроводниковых детекторов в ЛСВЭ ОИЯИ", сообщение ОИЯИ, Дубна, P13-98-6.
5. P.Bloch et al., "High voltage performance of silicon detectors irradiated under bias", NIM, vol.A 439 344-348 (2000).
6. P.Aspel et al., "Energy and spatial resolution of a Shashlik calorimeter and a silicon preshower detector", NIM, A376 (1996) 17-28.
7. P.Aspel et al., "Beam test results of a Shashlik calorimeter in a high magnetic field", NIM, A376 (1996) 361-367.
8. A.D.Avezov et al., "The Muons Registration Efficiency of the CMS ECAL Preshower in the Integrated Test", сообщение ОИЯИ, Дубна, E1-2000-6.
9. Ph.Bloch et al., "Investigation of the charge collection for strongly irradiated silicon strip detectors of the CMS ECAL Preshower", Particles and Nuclei, Letters, 2001, 4(107)-2001, p.25.

Рукопись поступила в издательский отдел
12 ноября 2001 года.

Макет Н.А.Киселевой

Подписано в печать 13.11.2001
Формат 60 × 90/16. Офсетная печать. Уч.-изд. л. 1,5
Тираж 100. Заказ 52946

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
Дубна Московской области