

На правах рукописи

ФАДЕЕВА НАДЕЖДА НИКОЛАЕВНА

**РАДИАЦИОННАЯ ДЕГРАДАЦИЯ
ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КОЛЬЦЕВЫХ СТРУКТУР
В КРЕМНИЕВЫХ ДЕТЕКТОРАХ ЯДЕРНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ**

специальность 01.04.10 – физика полупроводников

Автореферат

диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург

2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)», кафедра микро- и наноэлектроники.

Научный руководитель: Доктор технических наук, профессор
Теруков Евгений Иванович,
заведующий лабораторией физико-химических свойств полупроводников
ФТИ им. А.Ф. Иоффе

Официальные оппоненты: Доктор физико-математических наук, профессор
Серегин Павел Павлович,
профессор кафедры физической электроники РГПУ им. А.И. Герцена

Кандидат физико-математических наук
Рожков Александр Владимирович,
старший научный сотрудник лаборатории полупроводниковой
люминесценции и инжекционных излучателей ФТИ им. А.Ф. Иоффе

Ведущая организация:
Открытое акционерное общество «Научно-исследовательский институт
технической физики и автоматизации»

Защита состоится «10» октября 2013 г. в 14 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.238.04 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» по адресу 197376, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)».

Автореферат разослан «6» сентября 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д.ф.-м.н., профессор

Мошников В.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Одним из стимулов интенсивного развития кремниевых детекторов ядерных излучений являются новые задачи экспериментальной физики высоких энергий. Так, исследование фундаментальных процессов, происходивших на ранней стадии развития Вселенной, моделирование предельно конденсированного состояния материи в нейтронных звездах, поиски бозона Хиггса и ряд других глобальных проектов возможны при использовании специальных кремниевых детекторов. Уже созданные крупнейшие экспериментальные установки, такие как Большой Адронный Коллайдер (БАК) в ЦЕРНе (Швейцария), ТЭВАТРОН в лаборатории Ферми (США) используют сотни квадратных метров кремниевых стриповых и пиксельных детекторов. Кремниевые детекторы должны обеспечивать радиационную стойкость до доз $\sim 10^{15}$ см⁻² в эквиваленте нейтронов с энергией 1 МэВ в существующих экспериментах и до 10^{16} см⁻² при последующей модернизации экспериментов БАК. Данные эксперименты требуют от детекторов длительной стабильной работы на протяжении всего периода эксплуатации, который может составлять несколько лет без возможности их замены. Поэтому прогнозирование работы детекторов на основе физических моделей является важнейшим условием разработки таких детектирующих систем. По этой причине последние 15 лет проводились интенсивные исследования, которые фокусировались на деградации транспортных свойств чувствительной области, в то время как вопрос деградации элементов детекторов, таких как кольцевых структур, в его связи с изменением свойств объема детектора под действием облучения фактически выпал.

В настоящей работе исследуется влияние облучения нейтронами вплоть до доз $5 \cdot 10^{15}$ экв.нейтр./см² на свойства кольцевых структур, окружающих чувствительную область детектора и предназначенных для плавного снижения потенциала от центральной чувствительной области к периферии детектора. Это позволяет избежать образования областей с высоким электрическим полем у чувствительного к излучению контакта, протекания поверхностных и периферийных токов и тем самым стабилизировать работу прибора. Исследования входят в программу работ по созданию детекторов для модернизации экспериментов на БАК, а также являются актуальными для создания установок, включающих кремниевые

детекторы, в рамках программы FAIR в исследовательском центре GSI (Германия).

Цель работы заключалась в исследовании радиационных эффектов в кольцевых структурах детекторов, изготовленных на основе высокоомного кремния.

Для достижения данной цели решались следующие **задачи**:

1. исследование механизма распределения потенциала по кольцевой структуре необлученных детекторов, изготовленных на основе высокоомного кремния;
2. экспериментальное исследование влияния радиационного облучения на распределение потенциала по кольцевой структуре;
3. создание модели влияния профиля электрического поля на распределение потенциала по кольцевой структуре;
4. сопоставление и анализ экспериментальной модели распределения электрического поля по кольцевой структуре с результатами, полученными путем компьютерного моделирования;
5. проецирование закономерностей функционирования кольцевых структур в $p^+ - n - n^+$ детекторах на $n^+ - p - p^+$ детекторы.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Развита модель распределения потенциала по кольцевой структуре кремниевых детекторов, учитывающая протекание генерационного тока в объеме детектора.
2. Показано, что инверсия знака пространственного заряда под действием облучения в детекторах на основе n -Si не влияет на распределение потенциала по кольцевой структуре.
3. Установлено, что критическим фактором, обеспечивающим функционирование кольцевых структур в кремниевых детекторах с высокой концентрацией глубоких уровней, является двухпиковое распределение электрического поля (DP) в объеме детектора.
4. При дозе облучения больше $1 \cdot 10^{15}$ экв.нейтр./см² начинает доминировать токовый механизм распределения электрического поля в объеме детектора, что приводит в эквипотенциальности колец, при этом вольт-амперная характеристика стабилизируется за счет эффекта тока, ограниченного пространственным зарядом.

Научная и практическая значимость работы сводится к следующему:

1. Развита механизмы, определяющие функционирование кольцевой структуры кремниевых детекторов до дозы облучения $5 \cdot 10^{15}$ экв.нейтр./см².

2. Показано, что инверсия знака пространственного заряда не нарушает работы детекторов, однако изменяет характер распределения потенциала по кольцевой структуре.

3. Определена максимальная доза облучения эффективного функционирования кольцевой структуры равная $1 \cdot 10^{15}$ экв.нейтр./см² и показано, что при больших дозах облучения основным механизмом стабильной работы детекторов является эффект тока, ограниченного пространственным зарядом.

Положения, выносимые на защиту:

1. Функционирование кольцевой структуры в необлученных кремниевых детекторах определяется инжекционной моделью распределения потенциала по кольцевой структуре, ключевым фактором которой является распределение электрического поля в межкольцевых промежутках детектора и протекание тока в объеме детектора.

2. В облученных $p^+ - n - n^+$ детекторах после инверсии знака пространственного заряда кольцевая структура сохраняет способность делить потенциал, что является результатом характерного распределения электрического поля в объеме детектора с двумя максимумами у контактов детектора.

3. Максимальная доза облучения эффективного функционирования кольцевых структур в кремниевых детекторах, равна $1 \cdot 10^{15}$ экв.нейтр./см², при больших дозах стабильная работа детектора обеспечивается эффектом тока, ограниченного пространственным зарядом.

Достоверность полученных результатов подтверждается сравнительным анализом экспериментальных данных и данных, полученных в результате моделирования, а также имеющимися литературными данными.

Результаты работы были использованы при выполнении проектов: Грант Президента РФ Научная школа НШ-2951.2008.2, НШ-3306.2010.2 и № НШ-3008.2012.2 «Физика неравновесных процессов в полупроводниковых структурах, микро- и нанотехнологии преобразования энергии», 2008-2013

гг.; Программа Президиума РАН «Экспериментальные и теоретические исследования фундаментальных взаимодействий, связанные с работами на ускорительном комплексе ЦЕРН», проект «Разработка принципов повышения радиационной стойкости кремниевых трековых детекторов для развития экспериментов на БАК и создание макетных образцов», 2009-2014 гг; гос. контракта № У-2013-1/10 «Радиационные эффекты» проект №17231 от 01.04.2013 на выполнение НИОКР «Разработка структур стабилизации ВАХ высоковольтных детекторов релятивистских частиц для коллайдеров с высокой светимостью пучка» по программе «У.М.Н.И.К.» Фонда содействию развития малых форм предприятий в научно-технической сфере; Фадеева Н.Н. является членом коллаборации ЦЕРН-RD50 (Radiation hard semiconductor devices for very high luminosity colliders).

Апробация результатов работы

Основные результаты диссертации докладывались на следующих конференциях: International conference on nuclear physics «Nucleus 2010» – Saint-Petersburg, 2010; The 9th International Conference on Position Sensitive Detectors, Aberystwyth, 2011; RD50 collaboration workshops, 2009-2012; 65 научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава СПбГЭТУ, СПб, 2012; Российская молодежная конференция по физике и астрономии «ФизикА.СПб», СПб, 2012; Международная зимняя школа по физике полупроводников, СПб, Зеленогорск, 2013.

Публикации

Основные результаты работы опубликованы в 10 печатных работах, из них 7 публикаций в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных в перечне ВАК; 3 публикаций в трудах научно-технических конференций.

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, 5 глав и заключения, изложенных на 143 страницах машинописного текста. Диссертация включает 58 рисунков, 4 таблицы и список литературы из 72 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении излагается актуальность темы диссертации, определяется основная цель работы и ее задачи, представлены основные результаты работы, обладающие научной новизной, а также имеющие практическую значимость, перечислены научные положения, выносимые на защиту.

Первая глава представляет собой обзор литературы, который посвящен основным принципам функционирования и свойствам полупроводниковых детекторов излучений.

В первом разделе приведены основные принципы работы полупроводниковых детекторов, используемых в физике высоких энергий. Описан процесс генерации электронно-дырочных пар в объеме детектора. Рассмотрены особенности взаимодействия ионизирующих частиц с материалом детектора в зависимости от их вида. Представлены процессы переноса и собирания носителей заряда в детекторе, а также режимы работы детекторов.

Во втором разделе описаны характеристики p^+-n перехода как основного элемента детектора. Рассмотрено формирование области пространственного заряда и ток $p-n$ перехода при обратном напряжении детектора.

В третьем разделе приведены требования к материалу, пригодному для изготовления детекторов. Показаны преимущества кремния перед другими материалами. Кратко описан технологический процесс и дана схема изготовления кремниевых детекторов методом планарной технологии.

Четвертый раздел посвящен особенностям работы детекторов при высоких обратных напряжениях, необходимых при их эксплуатации в экспериментах физики высоких энергий с сильными радиационными полями. Кратко описан механизм пробоя кремниевого детектора и способы увеличения пробивного напряжения детектора, такие, как использование кольцевой структуры и расширенного электрода. Кольцевая структура плавно снижает потенциал от центральной части к периферии детектора и уменьшает напряженность электрического поля на краю основного $p-n$ перехода.

В пятом разделе рассмотрены процессы деградации кремниевых детекторов под действием облучения. Дан краткий обзор основных механизмов образования и типов дефектов. Рассмотрены эффекты, связанные

с влиянием радиационных дефектов на такие параметры детектора как: эффективная концентрация пространственного заряда, темновой ток детектора, распределение электрического поля в объеме детектора и эффективность собирания заряда.

Вторая глава посвящена описанию методик исследования и экспериментальных установок.

В первом разделе представлены методики экспериментального исследования, которое заключалось в измерении распределений потенциала по кольцевой структуре и межкольцевых токов детекторов. Измерения проводились при смещении основного $p^+ - n$ перехода детекторов в обратном направлении. Целью данного исследования было выявление закономерностей функционирования кольцевых структур в реальных кремниевых детекторах и влияния облучения на их способность делить потенциал и тем самым осуществлять защиту детектора от пробоя.

Во втором разделе описана методика компьютерного моделирования детекторов с кольцевыми структурами и их характеристик с использованием программного обеспечения Silvaco TCAD. Моделирование проводилось на основе знаний технологии изготовления кремниевых детекторов и топологий кольцевых структур, а также знаний о параметрах исходной кремниевой пластины, на основе которой создаются такие детекторы. Компьютерное моделирование позволило установить картины распределения потенциала и электрического поля в объеме детектора и межкольцевых промежутках, которые невозможно получить в результате какого-либо экспериментального исследования. Помимо этого, компьютерное моделирование использовалось как подтверждение эксперимента и способ проектирования кольцевых структур с улучшенными характеристиками.

Третья глава посвящена исследованию распределения потенциала по кольцевым структурам необлученных кремниевых $p^+ - n - n^+$ детекторов излучений. Представлена физическая модель работы кольцевой структуры, основанная на инжекционном механизме протекания тока через межкольцевые промежутки. Модель базируется на экспериментальных результатах, полученных для детекторов на основе высокоомного кремния до их облучения, и на результатах компьютерного моделирования.

В первом разделе описаны образцы для исследования – $p^+ - n - n^+$ детекторы, изготовленные на основе высокоомного кремния. Детекторы

имеют различное удельное сопротивление кремния, топологию кольцевой структуры и толщину.

Во втором разделе представлены вольт-емкостные и вольт-амперные характеристики исследованных образцов. При анализе данных характеристик показано, что удельное сопротивление кремния исследуемых детекторов находится в диапазоне 1 – 25 кОм·см. Детекторы имеют стабильные ВАХ в измеренном диапазоне напряжений. Максимальный обратный ток характерен для детектора с удельным сопротивлением кремния 20 кОм·см, толщиной 1 мм и составляет 9 нА при напряжении 500 В. Для дальнейшего исследования функционирования кольцевой структуры был выбран образец с удельным сопротивлением 5 кОм·см, толщиной 300 мкм и кольцевой структурой, состоящей из 4-х p^+ колец.

В третьем разделе представлены экспериментальные результаты распределения потенциала по кольцевой структуре и межкольцевые ВАХ. Показано, что ВАХ имеет два участка: малого тока и резко возрастающего тока при пороговом напряжении между кольцами. Значение порогового напряжения равно разности потенциалов между кольцами при определенном напряжении смещения основного перехода для соответствующего межкольцевого промежутка.

В четвертом разделе приведен анализ полученных экспериментальных результатов. Предложена инжекционная модель распределения потенциала по кольцевой структуре. Физической основой модели является инжекционный принцип протекания тока через межкольцевые промежутки, что становится возможным при определенном распределении электрического поля в областях пространственного заряда основного $p^+ - n$ перехода и $p^+ - n$ переходов колец. При приложении обратного напряжения к основному $p^+ - n$ переходу детектора область пространственного заряда расширяется и смыкается с областью падения контактной разности потенциалов первого кольца. В межкольцевом промежутке существует потенциальный барьер для дырок из p^+ области кольца. С увеличением напряжения потенциальный барьер уменьшается и при некотором значении напряжения становится равным нулю. Создаются условия для инжекции дырок из p^+ области кольца в межкольцевой промежуток и далее на основной электрод, потенциал кольца начинает увеличиваться. При дальнейшем увеличении прикладываемого напряжения потенциал кольца возрастает. Аналогичным образом происходит распределение потенциала по остальным кольцам детектора.

Пятый раздел посвящен аналитическому расчету распределения потенциала по кольцевой структуре с помощью электростатической модели. Рассмотрен первый промежуток детектора с удельным сопротивлением кремния 5 кОм·см. В электростатической модели потенциал кольца соответствует значению эквипотенциала, находящейся на расстоянии, равном ширине межкольцевого промежутка. В результате расчета получено распределение потенциала на первом кольце данного детектора. Показано, что результаты расчета не совпадают с экспериментальными данными. Рассчитанное падение напряжения на первом промежутке почти в два раза превосходит экспериментальное значение. Исследование, проведенное в данном разделе, позволяет сделать вывод, что межкольцевой промежуток детектора на основе высокоомного кремния является сложной системой, которую нельзя рассчитать только с помощью электростатической модели. Это связано с тем, что глубина *p-n* переходов мала (до 3 мкм), кроме того поверхность межкольцевого промежутка оказывает большое влияние на распределение потенциала по кольцевой структуре.

В шестом разделе представлено компьютерное моделирование структуры детектора с удельным сопротивлением кремния 5 кОм·см, а также распределение потенциала по кольцевой структуре детектора. Моделирование проводилось с помощью программного обеспечения Silvaco TCAD. Результаты моделирования дали хорошее соответствие результатам эксперимента. Кроме распределения потенциала по кольцевой структуре детектора, были смоделированы картины распределения плотности дырок в межкольцевом промежутке при напряжениях на основном электроде и кольце, соответствующих началу инжекции дырок в межкольцевой промежуток. Компьютерное моделирование подтвердило инжекционную модель распределения потенциала по кольцевой структуре.

В седьмом разделе описано влияние физических и геометрических параметров детектора на распределение потенциалов по кольцевой структуре. К таким параметрам относятся: удельное сопротивление кремния; ширина межкольцевого промежутка, кольца и расширенного электрода; толщина детектора. Данный раздел следует рассматривать как подтверждение правильности результатов моделирования для различных детекторов.

В четвертой главе исследуется влияние облучения нейтронами на характеристики делителей потенциала кремниевых $p^+ - n - n^+$ детекторов излучений.

В первом разделе описаны образцы для исследования – $p^+ - n - n^+$ детекторы, изготовленные на основе высокоомного кремния, имеющие топологию кольцевой структуры аналогичную образцу из предыдущей главы с удельным сопротивлением кремния 5 кОм·см. Детекторы были облучены нейтронами с энергией 1 МэВ в диапазоне доз от $1 \cdot 10^{10}$ до $5 \cdot 10^{15}$ экв.нейтр./см². Начальное удельное сопротивление кремния до облучения составляло 7 кОм·см.

Второй раздел посвящен исследованию распределения электрического поля в объеме кремниевых $p^+ - n - n^+$ детекторов при различных дозах облучения. Величина электрического поля в области межкольцевого промежутка является важнейшим фактором, определяющим разность потенциалов между соседними кольцами. Для исследования распределения электрического поля в образцах, облученных различными дозами, использовался метод переходного тока, состоящий в измерении формы токового отклика структуры на импульсную генерацию неравновесных носителей в образце. При облучении кремния в основном вводятся радиационные дефекты с глубокими акцепторными уровнями. С увеличением дозы облучения в $p^+ - n - n^+$ детекторе положительная эффективная концентрация пространственного заряда вначале уменьшается до нуля, после чего становится отрицательной и увеличивается по абсолютному значению. До инверсии знака пространственного заряда, т.е. до дозы облучения $1 \cdot 10^{13}$ экв.нейтр./см², максимум электрического поля находится на p^+ стороне. После инверсии знака пространственного заряда максимум поля смещается к n^+ стороне. Носители заряда способны захватываться на глубокие уровни. При учете этого эффекта эффективная концентрация пространственного заряда будет распределена неравномерно в объеме детектора: у p^+ стороны будет преобладать положительный заряд захваченных дырок, а у n^+ стороны отрицательный заряд захваченных электронов. Следовательно, распределение электрического поля будет иметь два пика у контактов детектора.

В третьем разделе представлены ВАХ облученных детекторов, которые показывают стабильность во всем диапазоне измеренных напряжений. Установлены зависимости распределения потенциала по кольцевой структуре от дозы облучения детектора (Рисунок 1). Показано, что кольцевая

структура перестает выполнять роль делителя потенциала при дозах облучения больших $1 \cdot 10^{15}$ экв.нейтр./см².

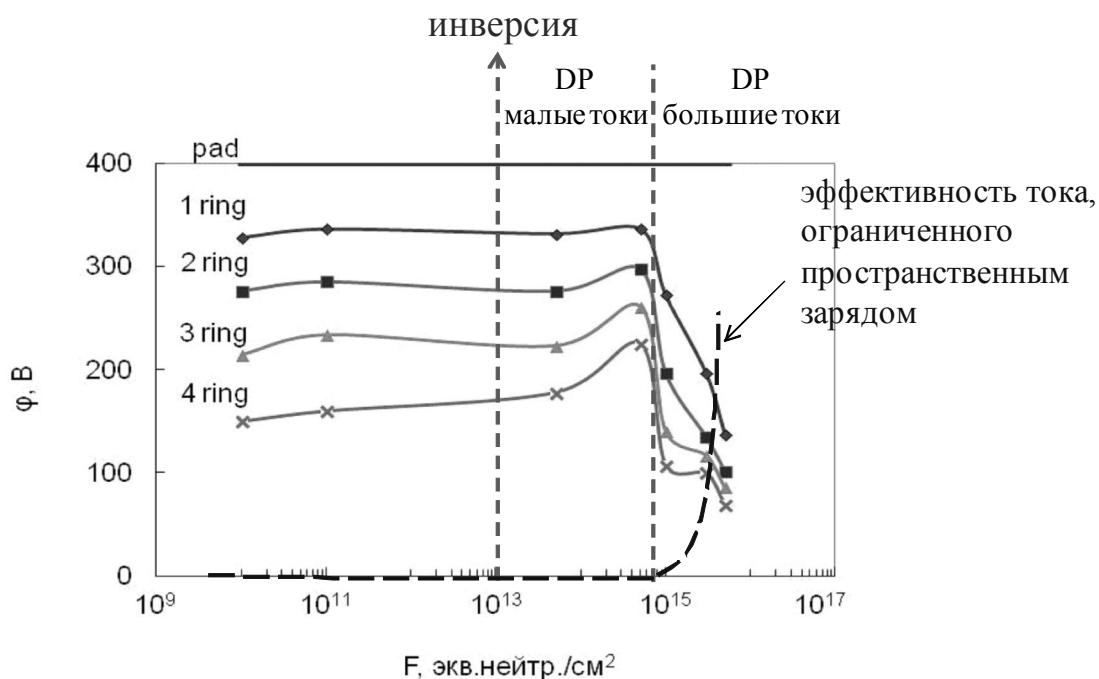


Рисунок 1. Зависимость распределения потенциала на кольцах детектора φ от дозы облучения F при обратном напряжении $V_{bias}=400$ В.

В четвертом разделе проведен анализ экспериментальных результатов и представлена модель распределения потенциала по кольцевой структуре в облученных детекторах. При дозах облучения $1 \cdot 10^{10}$ и $1 \cdot 10^{11}$ экв.нейтр./см² распределение потенциала по кольцевой структуре отвечает инжекционной модели, как и в необлученном детекторе. При больших дозах $5 \cdot 10^{13}$ и $1 \cdot 10^{14}$ экв.нейтр./см², когда инверсия знака пространственного заряда уже произошла, распределение электрического поля будет иметь два пика, благодаря чему кольцевая структура сохранит способность осуществлять деление потенциала. При последующем увеличении дозы облучения кольцевая структура теряет свои свойства как делителя потенциала. Концентрация радиационных дефектов с глубокими уровнями увеличивается, следовательно, растет темновой ток детектора. Электрическое поле в таком детекторе будет формироваться носителями заряда, захваченными на глубокие уровни, т.е. будет существовать только в областях протекания тока. На p^+ стороне такой областью является область, прилегающая к основному p^+-n переходу, где собирается основной ток структуры. Окружающие ее плавающие кольца, изолированные от центрального контакта, не собирают ток и находятся в стороне от траекторий

дрейфа дырок к p^+ -контакту. Как следствие, кольцевая система попадает в область, в которой электрическое поле мало, а потенциал близок к потенциалу тылового n^+ контакта.

Тем не менее, ВАХ детекторов остаются стабильными при дозах облучения больших $1 \cdot 10^{15}$ экв.нейтр./см². Этот факт является следствием эффекта тока, ограниченного пространственным зарядом. Сильно облученным кремниевым детекторам присуща высокая концентрация радиационных дефектов с глубокими уровнями и их зарядовые состояния зависят от концентрации свободных носителей в области пространственного заряда детектора. После инверсии знака пространственного заряда преобладает концентрация акцепторов, и эффективная концентрация пространственного заряда отрицательна. Максимум электрического поля находится у n^+ контакта, где область пространственного заряда касается поврежденного края детектора. Локальная инжекция дырок из поврежденного края детектора и последующий их захват на глубокие уровни делают эффективную концентрацию пространственного заряда положительной в данной области. Таким образом, уменьшается электрическое поле в точке инжекции и, как следствие, эффективность инжекции дырок. В результате инжекция стабилизируется, когда электрическое поле достигнет определенного значения.

В пятом разделе проведено компьютерное моделирование распределения потенциала по кольцевой структуре для экспериментально исследованного детектора. Моделирование учитывало введение глубоких уровней путем изменения эффективной концентрации пространственного заряда, но не учитывало захват носителей заряда на глубокие уровни и двухпиковое распределение электрического поля. До инверсии знака пространственного заряда результаты моделирования согласуются с результатами эксперимента. При больших дозах потенциалы колец становятся равными потенциалу основного электрода, данный факт абсолютно противоположен экспериментальным данным (Рисунок 2).

Из проведенных исследований можно сделать вывод, что влияние захвата носителей заряда на глубокие уровни и, как следствие, двухпиковое распределение электрического поля при высоких дозах облучения является определяющими в распределении потенциала по кольцевой структуре.

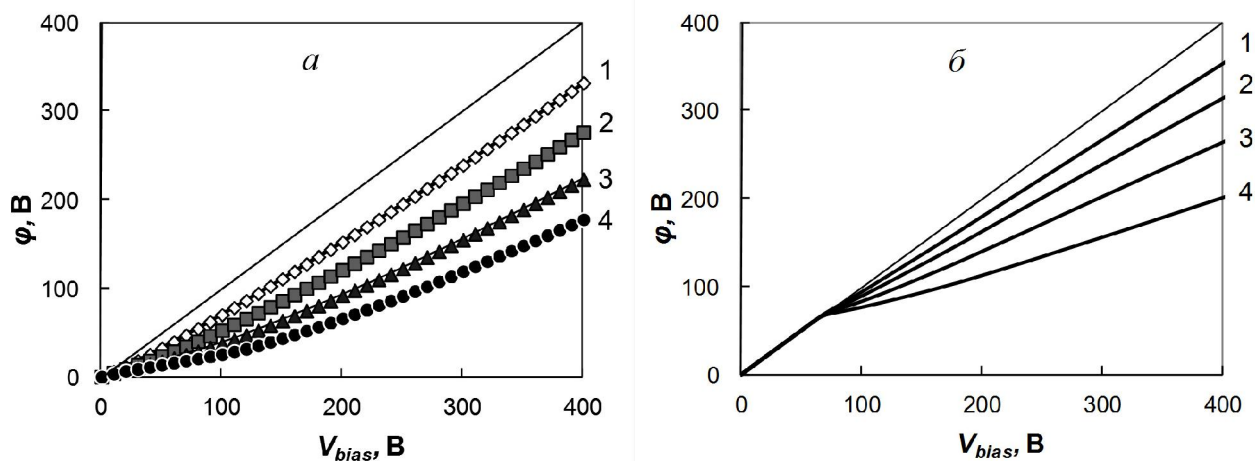


Рисунок 2. Экспериментальные (а) и смоделированные (б) зависимости потенциалов на кольцах φ от напряжения V_{bias} , приложенного к центральному электроду. Доза облучения $5 \cdot 10^{13}$ экв.нейтр./см². Номера кривых соответствуют номерам колец, начиная с внутреннего. Сплошная линия показывает потенциал центрального электрода.

В пятой главе рассмотрено распределение потенциалов по кольцевой структуре $n^+ - p - p^+$ детекторов. Детекторы на основе p -типа кремния считаются более радиационно-стойкими, т.к. в них не происходит инверсии знака пространственного заряда, т.е. положение области высокого поля в структуре остается неизменным.

В первом разделе приведено описание исследуемых $n^+ - p - p^+$ детекторов. Детекторы были изготовлены из кремния p -типа с удельным сопротивлением 30 кОм·см и имели 7 n^+ и 8 p^+ чередующихся плавающих колец.

Во втором разделе представлены ВАХ необлученного детектора. Пробой детектора в режиме плавающих колец происходит при напряжении 170 В.

В третьем разделе приведены распределения потенциала по кольцевой структуре для $n^+ - p - p^+$ детекторов до и после облучения. Кольцевая структура в данном детекторе оказывается нерабочей. Основная часть приложенного напряжения падает на первом промежутке. Топология данной кольцевой структуры не является оптимальной.

В четвертом разделе проведено компьютерное моделирование распределения электрического поля в объеме исследованного $n^+ - p - p^+$ детектора. Максимальная напряженность электрического поля наблюдается на краю основного $n^+ - p$ перехода и при обратном смещении равном 200 В составляет $4,5 \cdot 10^4$ В/см и кольца оказываются в области малого

электрического поля. Также был проведен более детальный анализ механизмов распределения потенциала для первого промежутка между n^+ областями с p^+ кольцом между ними. Распределение потенциала по кольцевой структуре n^+-p-p^+ детектора определяется инжекционной моделью, как и в p^+-n-n^+ детекторе, однако инжектироваться будут электроны. Отличие функционирования кольцевой структуры n^+-p-p^+ детектора состоит в том, что потенциальный барьер для электронов создается p^+ кольцом, ширина которого непосредственно влияет на условия инжекции электронов. В исследуемом детекторе ширина p^+ кольца составляла 20 мкм и, как оказалось, была слишком большой для эффективного деления потенциалов.

В пятом разделе средствами моделирования был спроектирован n^+-p-p^+ детектор с шириной p^+ колец равной 5 мкм. Детектор показал более однородное распределение электрического поля. На основе проведенного моделирования были разработаны фотошаблоны и изготовлены тестовые образцы. В детекторах достигнут положительный результат: наблюдается равномерное распределение потенциала по кольцевой структуре и стабильная ВАХ до напряжения 950 В. Данные исследования показали, что программный пакет Silvaco TCAD является универсальным механизмом для моделирования кольцевых структур кремниевых детекторов.

В Заключении изложены основные итоги выполненного исследования.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Распределение потенциала по кольцевой структуре p^+-n-n^+ детекторов, изготовленных на основе высокоомного кремния, определяется инжекционным током, протекающим в межкольцевом промежутке.

2. В необлученных n^+-p-p^+ детекторах распределение потенциала по кольцевой структуре также определяется протеканием инжекционного тока в межкольцевом промежутке. Ширина p -stop кольца оказывает существенное влияние на функционирование кольцевой структуры.

3. Радиационная деградация объема p^+-n-n^+ детектора приводит к нарушению работы кольцевых структур, которые отвечают за стабилизацию характеристик $p-n$ перехода. Определяющим механизмом при увеличении дозы облучения является изменение распределения электрического поля в объеме детектора.

4. Несмотря на инверсию знака пространственного заряда кольцевая структура $p^+ - n - n^+$ детекторов функционирует как делитель потенциала до дозы облучения $1 \cdot 10^{15}$ экв.нейтр./см². Это происходит из-за двухпикового распределения электрического поля в облученных детекторах. Электрическое поле у p^+ -стороны способствует протеканию инжекционного тока между кольцами.

5. При дозах облучения больших $1 \cdot 10^{15}$ экв.нейтр./см² концентрация радиационных дефектов становится значительной, и стабилизация вольт-амперных характеристик детекторов будет осуществляться за счет эффекта тока, ограниченного пространственным зарядом.

6. Программный пакет Silvaco TCAD подходит для моделирования распределения потенциала по кольцевой структуре детекторов, изготовленных на основе высокоомного кремния, и прогнозирования стабильности работы детекторов при высоких напряжениях.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ РАБОТЫ

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Межсегментное сопротивление в кремниевых позиционно-чувствительных приемниках излучений на основе р-п-переходов / Еремин В.К., Вербицкая Е.М., Ильяшенко И.Н., Еремин И.В., Сафонова (Фадеева) Н.Н., Тубольцев Ю.В., Егоров Н.Н., Голубков С.А., Коньков К.А. // Физика и техника полупроводников. – 2009. – Т. 43, Вып. 6. – С.825-829.

2. Распределение потенциала в охранных структурах с плавающими кольцевыми р-п-переходами кремниевых детекторов излучений / Вербицкая Е.М., Еремин В.К., Сафонова (Фадеева) Н.Н., Еремин И.В., Тубольцев Ю.В., Голубков С.А., Коньков К.А. // Физика и техника полупроводников. – 2011. – Т. 45, Вып. 4. – С.547-553.

3. Silicon detectors for the sLHC (Кремниевые детекторы для СуперБАК) / Members of RD50 // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. – 2011. – А658 – с.11-16.

4. Влияние облучения нейтронами на характеристики делителей потенциала кремниевых детекторов излучений / Еремин В.К., Фадеева Н.Н., Вербицкая Е.М., Теруков Е.И. // Физика и техника полупроводников. – 2012. – Т. 46, Вып. 7. – С.971-978.

5. Spectra distortion by the interstrip gap in spectroscopic silicon strip detectors (Искажение спектров за счет межстрипового промежутка в

спектороскопических кремниевых стриповых детекторах) / Eremin V., Verbitskaya E., Eremin I., Tuboltsev Yu., Fadeeva N., Egorov N., Golubkov S., Chen W. and Li Z. // Journal of Instrumentation. – 2012. –V. 7, C07002.

6. Radiation effects on floating rings of Voltage Terminating Structure in Si p-on-n detectors (Радиационные эффекты в плавающих кольцах кремниевых p-on-n детекторах) / Eremin V., Egorov N., Eremin I., Fadeeva N., Verbitskaya E. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. – In press. DOI: 10.1016/j.nima.2013.06.004.

7. Influence of radiation on Voltage Terminating Structure of silicon relativistic particle detectors (Влияние облучения на плавающие кольца кремниевых детекторов релятивистских частиц) / Fadeeva N., Eremin V., Verbitskaya E., Terukov E. // Journal of Physics: Conference Series. – 2013. – 461 - 012006.

Публикаций в трудах научно-технических конференций

8. Development of silicon double-sided strip detectors for ion spectroscopy and tracking at EXL experiment of FAIR program at GSI (Разработка кремниевых двухсторонних детекторов для ионной спектроскопии и определения трека в эксперименте EXL программы FAIR в GSI) / Verbitskaya E., Eremin V., Fadeeva N. // International conference on nuclear physics «Nucleus 2010». СПб. – 2010. – с.350.

9. Радиационные эффекты в структурах стабилизации ВАХ кремниевых детекторов релятивистских частиц / Фадеева Н.Н., Еремин В.К., Вербицкая Е.М., Теруков Е.И. // Российская молодежная конференция по физике и астрономии «Физика.СПб». СПб. – 2012. – с. 10-11.

10. Физическая модель функционирования кольцевых структур детекторов релятивистских частиц в интенсивных нейтронных полях / Фадеева Н.Н. // Международная зимняя школа по физике полупроводников. СПб. – 2013. – с. 32-33.