

**АКАДЕМИЯ НАУК РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКСТАН
НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ
«ФИЗИКА-СОЛНЦЕ» им. С.А.АЗИМОВА
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ им. С.В.СТАРОДУБЦЕВА**

На правах рукописи
УДК 621.1.074

РАДЖАПОВ САЛИ АШИРОВИЧ

**ОСОБЕННОСТИ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ
КРЕМНИЙ-ЛИТИЕВОГО ДЕТЕКТОРА ЯДЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
С БОЛЬШОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОЙ ОБЛАСТЬЮ**

01.04.10 – Физика полупроводников

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Ташкент-2010

Работа выполнена в Физико-техническом институте НПО «Физика-Солнце» им. академика С.А.Азимова Академии Наук Республики Узбекистан

Научный консультант: доктор физико-математических наук, академик АН РУз, проф. **Муминов Рамизулла Абдуллаевич**

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, академик АН РУз, проф. **Тураев Назар Юлдашевич**

доктор физико-математических наук, профессор **Мирсагатов Шавкат Акрамович**

доктор физико-математических наук, профессор **Илиев Холмурод Маджидович**

Ведущая организация: Институт Ядерной физики АН РУз

Защита состоится «___» _____ 2010 г. «___» часов на заседании объединенного Специализированного совета Д 015.08.01 при Физико-техническом институте НПО «Физика-Солнце» им. академика С.А. Азимова АН РУз по адресу: 100084, г. Ташкент, Бодомзор йули, 2Б.

Тел: (8-10-99-871)-233-12-71

Факс: (8-10-99-871) -235-42-91

E- mail: karimov@uzsci.net

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физико-технического института НПО «Физика-Солнце» им. академика С.А.Азимова АН РУз.

Автореферат разослан «___» _____ 2010г.

Отзыв, на автореферат заверенный печатью в двух экземплярах просим отправить по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря Специализированного совета

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

Каримов А.В.

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Регистрация, спектрометрия и идентификация ионизирующих слабоинтенсивных, высокоэнергичных излучений являются основными этапами в решение многих задач в различных областей науки и техники, а также в ряде отраслей экономики, в частности геологии, металлургии, медицине, охране окружающей среды и др.

Полупроводниковые детекторы (ППД) ядерных излучений обладают рядом принципиальных преимуществ перед другими видами счетчиков и спектрометров ионизирующих излучений (газоразрядные камеры, сцинтилляционные счетчики на основе ФЭУ, магнитные спектрометры и др.), такими, как малые габариты и вес, низковольтное питание, механическая прочность, большая тормозная способность поглощающей среды, нечувствительность к магнитному полю, линейность сигнала в широком диапазоне энергий и др. В настоящее время они являются фактически единственно приемлемым прибором для исследования спектрального состава, интенсивности, пространственного и углового распределения ионизирующих частиц.

Быстрое развитие полупроводникового детекторостроения привело к созданию большого разнообразия счетчиков и спектрометров ядерных излучений, предназначенных для решения конкретных задач в различных отраслях фундаментальных и прикладных исследований современной физики.

Степень изученности проблемы. Среди широкого класса детекторов ядерного излучения на полупроводниковых кристаллах особое место занимают кремний-литиевые детекторы. В настоящее время в мировой практике детекторы относительно малых размеров хорошо развиты. Максимальные площади их чувствительной области составляют $S = (2 - 60) \text{ см}^2$ и толщины $W_i < 2 \text{ мм}$ [1, 2, 3]. Однако существует ряд задач, для решения которых необходимо создание высокоэффективного спектрометрических детекторов с большим объемом чувствительной области. В то же время их создание имеют свои не только физические, но и технические, технологические, конструкторские особенности и трудности. Они связаны с проявлением эффектов, обусловленных взаимосвязью параметров исходного кристалла больших диаметров с изготовлением на их основе эффективных детекторов ядерного излучения. В частности, это связано с обеспечением высококачественных детекторных структур больших размеров чувствительной области на базе p-n- или p-i-n структур на монокристаллах кремния большого диаметра. Отсюда следует необходимость глубокого понимания физических процессов, обусловленных эффектами больших размеров полупроводникового кристалла. Требуется умение целенаправленно управлять сложными технологическими процессами, в частности, диффузией, дрейфом, химическими и механическими обработками, с целью обеспечения резких

плоскопараллельных по всей площади кристалла p-n, p-i, i-n переходов, получения тонких высокоэффективных токосъемных контактов и т.д. В конечном итоге детекторные структуры типа p-n или p-i-n должны иметь оптимальные токовые, емкостные, шумовые характеристики обеспечивающие эффективные радиометрические характеристики (энергетическое разрешение, качественные амплитудные сигналы, высокая чувствительность, тонкие входные окна-“мертвые слои” и т.д.). При формировании детекторных структур на кристаллах большого диаметра и толщины с указанными выше требованиями возникают особенности физических процессов диффузии, дрейфа, контактных явлений и др., которых необходимо изучить и найти в конечном итоге оптимальные физические, технические, конструкторские и технологические решения для разработки Si(Li) детекторов.

В связи с выше изложенным, актуальной задачей в полупроводниковой спектromетрии ядерных излучений, а также в регистрации слабоинтенсивных, высокоэнергетичных излучений на основе полупроводниковых детекторов, является выявление физических особенности взаимосвязи свойств исходного монокристаллического кремния с эксплуатационными характеристиками ППД и на этой основе разработка технологии получения Si(Li) детекторов ядерных излучений больших объемов.

Связь диссертационной работы с тематическими планами НИР. Работа выполнена при финансовой поддержке: ГНТП-5 "Разработка низкофоновой установки на основе кремний-литиевого детектора с большой площадью (до 100 см²) для регистрации слабоинтенсивного ионизирующего излучения" а также проекта Фонда поддержки фундаментальных исследования "Особенности физических процессов формирования полупроводниковых детекторных структур ядерного излучения с большим диаметром (до 110 мм) и толстой (до 10 мм) чувствительной областью".

Целью исследования является изучение физических и технологических особенностей разработки и изготовления кремний-литиевых детекторов ядерного излучения на монокристаллическом кремнии с диаметром слитка до 100÷110 мм, толщиной $d \geq 5$ мм.

Задачи исследования:

- Изучить особенности физических свойств кремниевых пластин больших диаметров и толщин ($\varnothing > 30$ мм, $d \geq 5$ мм);
- исследовать физические и технологические особенности процесса диффузии и дрейфа ионов лития в кремниевые пластины больших диаметров и толщин;
- изучить технологические особенности получения кремний-литиевых детекторных p-i-n структур с чувствительной поверхностью до $S = 100$ см², и толщиной $W_i \geq 5$ мм.
- разработать и создать высокоэффективные спектрометрические устройства для регистрации длиннопробежных заряженных частиц;

- исследовать влияние внешних воздействий на характеристики полупроводниковых детекторов ядерного излучения большого объема ($\varnothing > 30\text{мм}$, $d \geq 5\text{ мм}$);

Объект и предмет исследования. В качестве объекта исследования были выбраны монокристаллический кремний больших диаметров и толщин ($\varnothing > 30\text{мм}$, $d \geq 3\text{ мм}$) и полупроводниковые Si(Li) p-n , и p-i-n структуры с большим объемом чувствительной области. Предметом исследований является физические особенности процесса собирания неравновесных носителей заряда и формирования амплитудных спектров ядерного излучения в Si(Li) p-i-n структурах больших объемов и поверхностей их чувствительной области.

Гипотеза исследования. Как известно, в полупроводниковых структурах с протяженной областью объемного заряда (фотопреобразователей, полупроводниковых детекторах ионизирующей излучения, ИК фотоприемниках), их эксплуатационные характеристики непосредственно связаны с закономерностями движения частиц в этой области. Проблема анализа движения частицы в этих случаях имеет фундаментальное значение в процессах преобразования потока носителей заряда во многих физических устройствах и может рассматриваться как задача о движении частицы в неоднородном стационарном и не стационарном потенциальном поле (электрическое). Из-за фундаментальной ценности понимания этих физических процессов, и на этой основе обеспечение высокой эффективности приборов необходимы теоретические и экспериментальные работы в этом направлении.

Данный вопрос рассматривается в настоящей диссертации для полупроводниковых детекторов ионизирующих излучений. Обычно при рассмотрении работы детектора учитываются закономерности процессов взаимодействия заряженной частицы с кристаллической решеткой детектора, а рассеяние (в толстой детекторах) учитывается как ее взаимодействие в основном на точечных дефектах (заряженных или нейтральных) или фонах.

Всесторонний анализ моделей детектора как с физической точки зрения, также технологических особенностей формированию высокоэффективных детекторных структур является нетривиальной задачей, особенно для детекторов больших объемов и поверхностей их чувствительной области.

Методы исследования. Одно и четырехзодовые измерения, электрофизические (ВАХ, ВФХ, ВШХ) и радиометрические измерения, фазо-частотные измерения по емкостной методике.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Электрофизические, радиометрические и временные характеристики Si (Li) детекторов больших объемов определяются в конечном итоге, необходимостью всестороннего учета свойств исходного кристалла с физическими особенностями процесса диффузии лития в кислородо-

- содержащем кремнии и много ступенчатостью дрейфа ионов лития в низкоомном кремнии большого диаметра и толщины.
2. Предложена методика и физический алгоритм подбора режима «выравнивающего» дрейфа ионов лития на готовых Si (Li) p-i-n структур для получения однородно компенсированных рабочих областей ($W_i \geq 5$ мм) на основе данных ВЕХ, ВАХ и радиометрических характеристик прибора.
 3. Установлен ряд физико-технологических процессов (термические, УЗВ, импульсным электрическим и световым полями) позволяющих создавать детекторы с большим объемом чувствительной области ($S = 20 - 80 \text{ см}^2$, $W_i \geq 5$ мм).
 4. На основе установленных закономерностей взаимосвязи свойств кристаллов и радиометрических характеристик детекторов на их основе разработана технология и маршрутная карта изготовления Si(Li) детекторов с большим объемом чувствительной области из p-Si Чохральского (КЧ) ($\rho = 10 \text{ Ом.см}$, $\tau \geq 50 \text{ мкс}$) и безтигельной зонной плавки (БЗП) ($\rho = 1 \text{ кОм.см}$, $\tau \geq 300 \text{ мкс}$) с диаметром $\varnothing 100$ мм и толщиной $W_i \geq 5$ мм
 5. Впервые разработан и изготовлен новый тип Si (Li) универсального детектора с большой чувствительной областью, в котором формирование амплитудного сигнала может эффективно проходить как в параллельном, так и перпендикулярном электрическом поле в рабочей области детектора, обеспечивая регистрацию длиннопробежных частиц.
 6. Разработаны универсальный спектрометры заряженных частиц низких и высоких энергий; низкофоновая установка α и β -частиц, работающих в спектрометрическом режиме; $\Delta E - E$ детекторы (телескоп) в едином монокристалле кремния.

Научная новизна:

- установлены особенности процесса диффузии лития в монокристаллические кремниевые пластины, обеспечивающие резкий профиль распределения его концентрации после определенной задаваемой глубины проникновения;
- выявлены физические механизмы многоступенчатого режима процесса дрейфа ионов лития на кремниевые пластины диаметром до 110мм и толщины до 10мм и установлены физические явления, обеспечивающие однородную компенсацию чувствительной области детектора;
- определены научно-обоснованные методы акустостимулированных и импульсных электрических полевых процессов для оптимизации эксплуатационных характеристик кремний-литиевых детекторов ядерного излучения с большим объемом их чувствительной области;
- показаны физические основы создания универсальных спектрометров для длиннопробежных ионизирующих частиц;

- определены физические основы и оптимальные технологические режимы проведения «выравнивающего» дрейфа на Si(Li) структурах, деградированных за длительное время их эксплуатации или хранения;
- установлена научная основа получения равномерного профиля распределения лития в кислородосодержащем p-Si. Изучены физические особенности подбора индивидуального температурно-временного режима диффузии лития с учетом изменения коэффициента диффузии за счет комплексообразования Li-O;
- показан физический механизм, обеспечивающий эффективность дополнительного низкотемпературного «выравнивающего» дрейфа на готовых Si(Li) p-i-n структурах, основанный на минимизации роли дипольных моментов, образованных в процессе дрейфа и обусловленных вследствие смещения концентрации профиля лития относительно локальных флуктуаций концентрации акцепторной примеси в исходном полупроводнике;
- для получения Si(Li) p-i-n структур с большим объемом чувствительной области, развиты физические принципы проведения дрейфа ионов лития с двух сторон. Это позволяет значительно сократить время получения протяженной компенсированной i-области и улучшить характеристики изготавливаемого детектора;
- установлены физические особенности влияния ультразвуковых волн и импульсного электрического поля на оптимизацию свойств исходных полупроводниковых материалов и приборов на их основе;
- изучены динамически вращательные методы химической обработки кремниевых пластин с диаметром $\varnothing > 30$ мм, обеспечивающие их плоскопараллельность с точностью $\pm 1 \div 2\%$;
- разработаны технологические маршруты изготовления Si(Li) детекторов с большими чувствительными объемами;
- на основе изученных и разработанных научно-технических и технологических особенностей изготовлены действующие ППД системы: низкофоновые установки, работающие в спектрометрическом режиме; телескопический детектор в едином монокристаллическом кремнии; универсальный ППД с протяженной чувствительной областью ($W_i \geq 10$ мм);

Научная и практическая значимость результатов исследования.

1. Разработанная акустостимулированная и импульсная электрическая полевая технологии открывают возможности их широкого применения не только для оптимизации эксплуатационных характеристик детекторов ядерного излучения, но и для многих задач полупроводникового приборостроения и микроэлектроники. В целом эти способы позволят целенаправленно изменять свойства кристаллических структур, исходных материалов, а также контактные характеристик и поверхностных свойств различных полупроводниковых приборов.

2. Разработанные и изготовленные уникальные детекторы ядерного излучения на кремниевых пластинах с диаметром до 110 мм не имеют

мировых аналогов, и они открывают возможности разработки на их основе новых ядерно-физических экспериментов, а также использование их в различных отраслях науки и техники.

3. Разработанные методы воздействия ультразвуковых волн и импульсных электрических полей на полупроводниковые материалы, и приборы позволяют получать новые фундаментальные знания в области акустостимулированных и импульсных электрических полевых явлений в полупроводниках.

4. Разработанные НФУ, универсальный спектрометр, координатно-чувствительные и $\Delta E - E$ детекторы в едином монокристаллическом кремнии больших объемов позволяют решать широкий круг научно-технических задач в области ядерной физики и космических исследований, мониторинга радиоактивной загрязненности окружающей среды.

Реализация результатов исследования. Исследованные и разработанные кремний-литиевые детекторы ядерного излучения больших объемов имеют перспективы в решении фундаментальных и прикладных задач ядерной физики, медицины, геологии, экологии и др.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на Международной конференции «Фундаментальные и прикладные вопросы физики» (г.Ташкент, 2003, 2004, 2006); четвертой международной конференции «Ресурсовоспроизводящие, малоотходные и природоохранные технологии освоении недр» (Москва-Навои, 2005); Международной научной методической конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы физики полупроводников» (Андижан 2005); 6-ая Международной конференции «Ядерная и радиационная физика» (Алматы РКаз.-2007); конференция «Фотоэлектрические явления в полупроводниках» Ташкент 2004; «Фотоэлектрические и оптические явления в полупроводниковых структурах» (Фергана 2005); «Наука и кадры горно-металлургической промышленности» (Алмалык 2002, 2004); Международной конференции «Неравновесные процессы в полупроводниках и в полупроводниковых структурах», (Ташкент 2007); The 5th Joint International Symposium. NANOSCIENCE: Problems and Prospects. Uzbekistan-Korea, 2006; Uzbekistan, Khorezm Mamun Academy of Sciences (Khiva, 2007).

Опубликованность результатов. Материалы диссертации опубликованы в 39 работах, в том числе в 13 журнальных статьях, 23 трудах конференций, в двух авторских свидетельствах и в одном патенте на изобретение, а также в сборниках тезисов докладов, опубликованных в трудах научных конференций.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы. Объем работы состоит из 233 страниц, и содержит 66 рисунков, 6 таблиц, список литературы из 163 наименований

2. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении представлена актуальность темы, сформулированы цели и задачи диссертационной работы, научная новизна, практическая ценность, положения, выносимые на защиту.

В первой главе, являющейся обзором литературы, даны основные электрофизические свойства монокристаллического кремния, выращенных методом Чохральского (КЧ) и бестигельной зонной плавки (БЗП). Рассмотрены свойства кремния большого диаметра, в плане наличия в них различных несовершенств ростового и технологического характера (дислокации, преципитаты, микродефекты, содержание кислорода и углерода, скопления примесей). Сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

Вторая глава оригинальная и она посвящена особенностям технологических этапов получения Si(Li) детекторов больших объемов, (резка, шлифовка, химическая обработка, полировка, подготовка кристаллов для диффузии лития) предложены маршрутные карты изготовления. Показаны особенности диффузии лития в кислородо-содержащем p-Si, выращенного методом Чохральского. Исследованы процессы диффузии лития при различных температурно-временных режимах.

Разработана методика расчета профиля распределения концентрации лития в диффузионной n^+ области с учетом зависимости коэффициента диффузии лития от содержания кислорода в кремнии. Выявлены особенности получения резкого n^+ -p перехода в кремнии при температуре $T = (300 - 500)^{\circ}\text{C}$ в низкоомном кислородо-содержащем кремнии $N_{O_2} \geq 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Эти экспериментальные результаты сравнены с результатами в высокоомном кремнии с содержанием кислорода $N_{O_2} \leq 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Наблюдаемые особенности объясняются тем, что коэффициент диффузии лития в кислородо-содержащем кремнии уменьшается за счет комплексообразования Li-O.

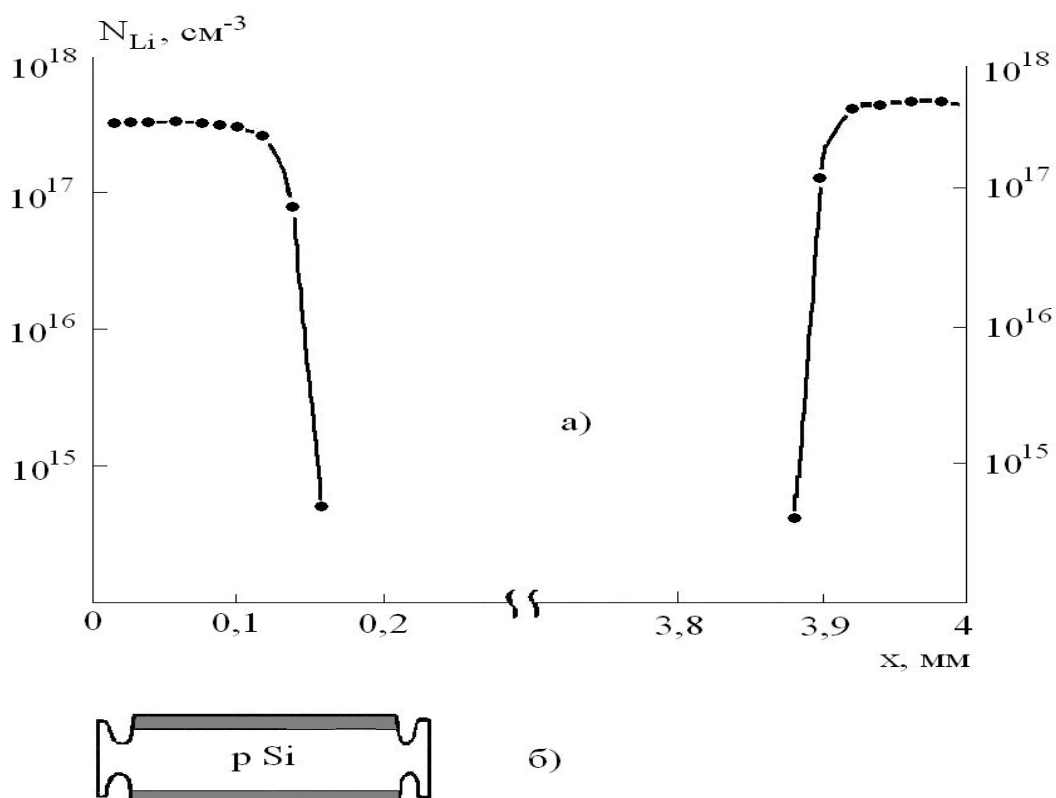
$$D(x) = \frac{D_0}{2} \left[\frac{N_{Li}(x) - N_{O_2} + \frac{1}{k}}{\sqrt{\left(N_{Li}(x) - N_{O_2} - \frac{1}{k}\right)^2 + \frac{4N_{Li}(x)}{k}}} + 1 \right] \quad (1)$$

где D_0 – коэффициент диффузии лития в безкислородном Si, N_{Li} – концентрация лития, N_{O_2} – концентрация кислорода, k – константа равновесия.

Полученные результаты позволили управлять диффузионным профилем лития в кислородосодержащем низкоомном кремнии, и в конечном итоге

обеспечить получение тонких «выходных» окон детекторов. Это важно для телескопических систем, низкофоновых установок и для создания универсального спектрометра, так как открывает возможности улучшения их радиометрических характеристик.

Для получения больших объемов рабочей области и сокращения времени проведения дрейфа ионов лития, разработана специальная установка для двухстороннего дрейфа и разработаны технологические способы проведения дрейфа ионов лития. Проведены соответствующие расчеты процесса двухстороннего дрейфа, в частности, целью значительного сокращения времени процесса компенсации кремния на больших объемах и исключения негативных последствий длительного выдерживания кристалла при высоких температурах и электрического напряжения, нами разработан новый способ создания Si(Li) p - i - n⁺ структур. Способ состоит в том, что на предварительно подготовленные образцы кремния проводится диффузия лития с обеих торцовых поверхностей на заданную глубину, достаточную для обеспечения необходимой компенсации исходной акцепторной примеси на требуемый объем.



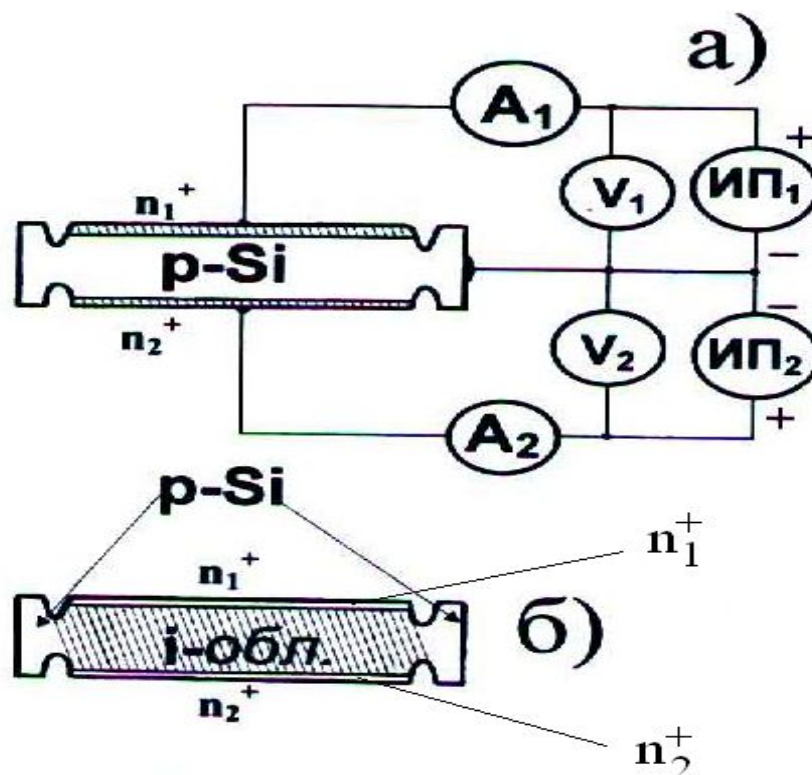
а - после проведения двухсторонней диффузии;
б - схематическое изображение пластины в разрезе

Рис. 1. Профиль концентрации Li в пластине

На рис.1а. показан типичный диффузионный профиль лития, полученный предлагаемым способом на p-Si с $\rho = 10$ Ом.см,

$N_{O_2} \approx 2 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Незначительное отклонение глубины диффузии лития с различных торцевых поверхностей кристалла связан с неодновременностью внедрения Li.

Далее, перед приложением напряжения дрейфа, кристаллам придается форма, схематически показанная на рис.1б. Канавка получается химическим вытравливанием. После стандартных химико-технологических операций кристаллы устанавливаются на дрейфовую установку с подключением в электрическую цепь, как показано на рис.2а.



а – схема для проведения двухстороннего дрейфа:
б - состояние распределения лития после окончания процесса дрейфа

Рис. 2. Схема подключения пластины

Температурно-полевой режим дрейфа выбирали с учетом низкоомности исходного кремния. Показано, что в предлагаемом способе время компенсации заданного объема кристалла сокращается в 4 раза и значительно повышается качество компенсации за счет подавления влияния свободных носителей генерированных при температуре дрейфа.

Экспериментально установлено, что для начальной стадии дрейфа ионов лития в низкоомном кремнии, напряжение обратного смещения и температура поэтапно увеличивается по мере расширения компенсированной i-области. В табл. 1. представлена временно-полевая

диаграмма проведения процесса начальной стадии дрейфа ионов лития для конкретного низкоомного кремниевого кристалла большого размера.

Таблица 1.

Температурно-полевой и временной режим дрейфа ионов лития			
Этап	T, °C	U, В	t, час
I	60	50	12
II	70	70	48
III	85	100	72
IV	90	200 - 600	96
V	60	100	24

Качество компенсации исходного p-Si во многом зависит от степени локальных неоднородностей концентрации акцепторов в объеме кристалла, а также термически генерированных подвижных носителей в процессе дрейфа. В работе эти факторы учтены и получено уравнение с учетом содержания кислорода.

Третья глава посвящена также физико-технологическим методом изготовления высококачественных Si(Li) детекторов больших объемов. На основе экспериментальных исследований на кремнии большого диаметра ($\varnothing$ 100 мм) и толщины ($d \geq 5$ мм) из КЧ и БЗП с широким диапазоном их исходных параметров разработана методика выбора оптимального режима «выравнивающего» дрейфа (ВД) ионов лития в объеме кристалла.

Найдены новые способы изготовления Si(Li) p-i-n структур больших объемов, основанных на использовании импульсного электрического поля для проведения процесса дрейфа ионов лития. Получены экспериментальные результаты на КЧ и БЗП ($\varnothing$ 100 мм, $d \geq 5$ мм). Разработана импульсно - дрейфовая установка процесса дрейфа на 10 позиций, определены оптимальные режимы: длительность импульса электрического поля и его периодичность, которые соответствуют $\tau = (1 \div 20)$ с и $T = (1 - 20)$ с в широком диапазоне амплитуды напряжения $U_{обр} = (10 \div 600)$ В.

Использование в технологии получения Si(Li) детекторов импульсного электрического поля с оптимальными параметрами (длительности импульса и периода амплитуды импульса) позволяет обеспечить получение равномерного контролируемого распределения атомов лития в объеме кристалла и ускорение их дрейфа. Это обусловлено тем, что в условиях импульсного электрического поля процесс дрейфа ионов лития происходит без существенного оседания атомов лития на микродефектах и дислокациях, сглаживанием в области с локальными флуктуациями концентрации акцепторов в объеме, а также относительно малым комплексобразованием LiO в объеме кристалла.

В результате Si(Li) детекторы, полученные, предлагаемым нами методом имеют улучшенные электрофизические и радиометрические

характеристики относительно таких же детекторов полученных традиционным способом (табл. 2).

Таблица 2.

Сравнительные параметры детекторов		
Наименование параметров	По предложенной нами методике	По традиционной методике
Время, компенсация, час	~240	~350÷400
Диаметр чувствительных обл., мм	8	8
Толщина чувствительных обл., мм	4	4
Наименьшее и наибольшее значение рабочего напряжение, В	100÷600	250÷600
Темновой ток, мкА	0,5÷1,0	0,8÷2,0
Емкость, пФ	1,5÷2,2	1,3÷2,5
Энергетический эквивалент шума, кэВ	12÷15	15÷30
Энергетические разрешения: кэВ по α -частицам ^{238}Pu с энергией $E_\alpha=5,5$ МэВ	25 -30	40 - 50
по β -частицам ^{207}Bi с энергией $E_\beta=1$ МэВ	18	25

Проведено исследование влияния импульсного электрического поля на выравнивающий дрейф ионов лития на готовых Si(Li) p-i-n структурах изготовленных из КЧ и БЗП $\varnothing$ (10÷30) мм, $W_i \geq 4$ мм. Рабочие напряжения обратного смещения ($U_{\text{раб}}$) ВАХ Si(Li) p-i-n детекторов изготовленной из КЧ уменьшается с 200В до 30В, а из БЗП с 200В до 60В. Это способствует изготовлению высококачественных Si(Li) детекторов большой протяженностью рабочей области за короткий срок за счет ускоренного процесса дрейфа ионов лития в этих условиях.

Основные характеристики Si(Li) детекторов во многом обусловлены характером распределения лития в диффузионной области, так как в процессе дрейфа это в свою очередь определяет распределение проводимости в чувствительной области и качество p-n перехода. С целью улучшения распределения электрически активного лития в диффузионной области Si(Li) детекторов исследовано влияние УЗ поля на диффузию лития в кремнии. Проведенные исследования показали, что после воздействия УЗ полем, концентрация электрически активного лития в кремнии возрастает в 4-6 раза. Это можно объяснить следующим образом: в результате

воздействия УЗ полем резко уменьшается сток и оседание ионов лития на микродефектах кремния, а также происходит распад (разрыв) комплексов (Li-O, Li-B).

Результаты исследования воздействия УЗВ на выравнивающий дрейф ионов лития показали, что электрическое поле и УЗВ при одновременном воздействии способствует получению равномерного контролируемого распределения внедряемых примесей и ускорению процесса дрейфа. Экспериментально показано резкое улучшение ВЕХ и ВШХ и выхода её на плато при достаточно низких электрических полях, следовательно, это соответствует более равномерной компенсации чувствительной i-области. В данной главе также приведены экспериментальные и теоретические результаты исследования диффузионного метода получения компенсированной i-области в Si(Li) детекторах на основе p-Si методом введенных ионов лития тепловой диффузией, одновременно с двух противоположных торцевых поверхностей кристалла в интервале температур $(200 \div 450)^{\circ}\text{C}$. Данный режим температуры выбран с учетом того, что в этих условиях компенсация акцепторов обеспечивается путем перераспределения ионов лития по всему объему кристалла, т.е. ионы лития вводятся в таком количестве, чтобы концентрации акцепторов и ловушек в исходном материале уравнивались. Для решения уравнения диффузии для данного случая определяли граничные условия, исходя из того, что концентрация акцепторов в кремнии составляет $5 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$, концентрация ловушек того же порядка, а температура введения ионов лития соответствует от 200°C до 450°C . Результаты расчета приведены в следующей таблице 3.

Таблица 3.

Температурно-временные режимы диффузии лития

№	Температура введения ионов лития $T, ^{\circ}\text{C}$	Время введения ионов лития, с	Температура перераспределения ионов лития $T, ^{\circ}\text{C}$	Время перераспределения ионов лития, сут
1	200	180	200	100
2	250	150	250	80
3	300	60	300	40
4	350	20	350	10
5	400	7	400	4
6	450	5	450	4

Пользуясь данными, приведенными в таблице, выбираем режимы диффузии для введения ионов лития в приповерхностную область и перераспределения лития в объеме кристалла.

Например: Для того, чтобы получить компенсацию кристалла толщиной $d = 2$ мм, можно выбрать следующие режимы диффузии:

Режим 1: Температура и время введения ионов лития: $T_0 = 200^\circ\text{C}$, $t_0 = 180\text{ с}$, соответственно, температура и время перераспределения ионов лития $T = 200^\circ\text{C}$, $t = 9,6 \times 10^6\text{ с} = 100\text{ сут}$, соответственно.

Режим 2: Температура и время введения ионов лития $T_0 = 450^\circ\text{C}$, $t_0 = 60\text{ с}$ соответственно, температура и время перераспределения ионов лития $T = 450^\circ\text{C}$, $t = 3,6 \times 10^5\text{ с} = 4\text{ сут}$, соответственно.

Режим 3: Температура и время введения ионов лития $T_0 = 300^\circ\text{C}$, $t_0 = 60\text{ с}$ соответственно, температура и время перераспределения ионов лития $T = 400^\circ\text{C}$, $t = 3,6 \times 10^5\text{ с} = 4\text{ сут}$, соответственно.

Как видно из сравнения режимов диффузии общее время, необходимое для компенсации акцепторов в кристалле толщиной 2 мм в случае применения режима 1 сравнима со временем, необходимым для компенсации того же кристалла с известным традиционным способом, то есть методом дрейфа ионов лития при 100°C .

В случае же применения режимов 2 и 3 время компенсации значительно меньше.

Таким образом, дрейф ионов лития в электрическом поле заменяется диффузионным отжигом при температурах от 200°C до 450°C .

В конце главы приведены результаты исследования влияния светового излучения на выравнивающий дрейф ионов лития, так как точность компенсации исходного р-Si является важнейшим критерием качества Si(Li) детекторов, предназначенных для спектрометрических детекторов больших объемов.

Si(Li) детектор также был изготовлен из р-Si выращенного методом Чохральского, с концентрацией кислорода $N_{\text{O}_2} \approx 2 \times 10^{17}\text{ см}^{-3}$, с удельным сопротивлением $\rho \sim 10\text{ Ом.см}$, временем жизни носителей $\tau = 50\text{ мкс}$. Был использован метод воздействия солнечным излучением. Для фотостимулирования «выравнивающего» дрейфа «ВД» в качестве источника света была использована обычная система, позволяющая получить не сильно концентрированный поток солнечного излучения на поверхность образца. Образец находился в специальной прозрачной камере и контроль температуры осуществлялся контактным термометром. Эксперименты показали, что фотостимулирование сокращает время процесса «выравнивания» вдвое.

Четвертая глава посвящена исследованию электрофизических и радиометрических характеристики Si(Li) детекторов с большим объемом чувствительной области.

В начале главы приведено описание автоматизированной комплексной установки для исследования ВАХ, ВЕХ и ВШХ и её блок схема. Проведены теоретические и экспериментальные анализы ВАХ Si(Li) детекторов больших объемов изготовленного из КЧ и БЗП. Из расчетов и их

сопоставления с экспериментальными данными установлено, что ток утечки Si(Li) p-i-n детекторов больших объемов из КЧ ($\rho = 10 \text{ Ом.см}$) практически полностью определяется только генерационным током в компенсированной i-области детекторов. В ППД изготовленных на основе кремния из БЗП ($\rho = 1 \div 5$) кОм.см, показано, что в значении генерационного тока существенно влияют в этом случае образования широкого и высокопроводящего инверсионного канала на его поверхности. В результате этих исследований выявлены существенные преимущества использования кристаллов, полученных методом из КЧ для изготовления детекторов больших объемов.

Исследования ВЕХ и ВШХ показали, что изготовление Si(Li) детектора с диаметром $\varnothing \geq 50 \text{ мм}$, толщиной $W_i \geq 5 \text{ мм}$ из КЧ ($\rho = 10 \text{ Ом.см}$), из БЗП ($\rho \geq 1 \text{ кОм.см}$) удовлетворяют требования использования в качестве детектора ядерного излучения. Анализ спектрометрических характеристик сканирования рабочей поверхности разными частицами (^{137}Cs , ^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{207}Bi , ^{226}Ra) показали, что i - область изготовленных детекторов из КЧ достаточно однородны (5 – 10%).

Исследования ВАХ, ВШХ, ВЕХ и радиометрических характеристик показали, что детекторы, изготовленные из КЧ перспективны для получения высококачественных Si(Li) детекторов больших объемов.

В конце главы рассмотрена временная деградация параметров Si(Li) детекторов большого объема ($\varnothing \geq 30 \text{ мм}$, $W_i \geq 5 \text{ мм}$). Показано, что основной причиной временной деградации параметров Si(Li) детекторов из КЧ является диффузионная раскомпенсация локальных неоднородностей акцепторной примеси и распад твердого раствора Li-Si. Предложены способы уменьшения деградационных процессов за счет специально разработанных условий хранения Si(Li) p-i-n детекторов большого объема. Способ основан на хранении детектора под напряжением обратного смещения при комнатной температуре или проведением ВД при температуре $t = (60 - 70)^\circ\text{C}$, $U_{\text{обр.}} = (100 - 300)\text{В}$ в течение (8 – 36) часов.

Пятая глава посвящена разработке спектрометрической низкофоновой установки (НФУ) на основе Si(Li) детекторов больших площадей ($S = 20 - 80 \text{ см}^2$) и толщиной чувствительной области ($W_i \geq 1,5 \text{ мм}$). Показаны технологические и конструкционные особенности создания НФУ на детекторах с большим объемом, и соответствующими электронными блоками. Специально изучены параметры установки и экспериментальные данные по исследованию конструкционных материалов. Создан макет НФУ работающий в спектрометрическом режиме, для регистрации низкоинтенсивных высокоэнергичных α и β -частиц с эффективностью регистрации не менее $\eta \leq 35\%$, $N_\phi \sim 0,06 \text{ имп/мин}$.

Установка может быть использована для измерения интенсивности активных препаратов в геологических, археологических, биологических исследованиях, при контроле окружающей среды, а также для определения собственного фона различных технологических и конструкционных материалов (Табл.4.).

Таблица 4.

Данные по измерению собственного фона конструкционных материалов.
(точность $\pm 1\%$, время измерения каждого образца 24 часа)

Материал	Фон образца, за вычетом фона имп/мин.см ²
Алюминий	1,100
Латунь	0,325
Медь	0,228
Свинец	0,250
Кремний	0,133
Стеклотекстолит	0,250

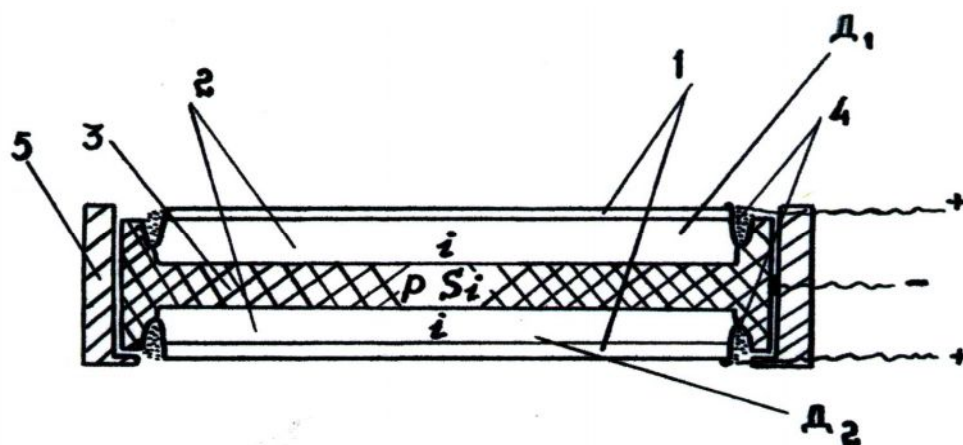
В конце главы приведен новый тип детектирующего модуля НФУ представляющий собой два p-i-n- Si(Li)-детектора (основной и защитный), изготовленных на едином монокристалле Si большого диаметра. Отличительной особенностью диффузионно-дрейфового этапа в данном случае является то, что дрейф ионов лития проводится не на всю толщину кристалла, а на строго определенную глубину, требуемую условиями решаемой физической задачи.

Следует отметить, что в данном случае особенно жесткие требования предъявляются к толщине диффузионных n^+ -областей (входных окон). С одной стороны, они должны обеспечивать достаточно высокую эффективность регистрации β -излучения (иметь небольшую толщину), а с другой – обладать хорошими (электрическим и механическим) контактными качествами. Большая электропроводность остаточной p-области, служащей общим отрицательным контактом для обоих (основного и защитного) детекторов обеспечивается низкоомностью исходного кремния, что и придает ей необходимые контактные свойства.

Два p-i-n Si(Li)-детектора изготовленные в едином монокристалле Si с площадью 25 см^2 , с толщиной чувствительной области $W_i = 1,5 \text{ мм}$ при $U_{\text{обр}} \approx 20 \div 30 \text{ В}$ имели темновой ток $I \approx 1 \div 2 \text{ мкА}$, $C \approx 180 \div 200 \text{ пФ}$, $E_{\text{ш}} \approx 25 \div 30 \text{ кэВ}$, энергетические разрешения по β -частице ^{207}Bi $R_{\beta} \sim (30 - 35) \text{ кэВ}$. с линиями $E_{\beta_1} = 976 \text{ кэВ}$ и $E_{\beta_2} = 1050 \text{ кэВ}$ (Рис.3а).

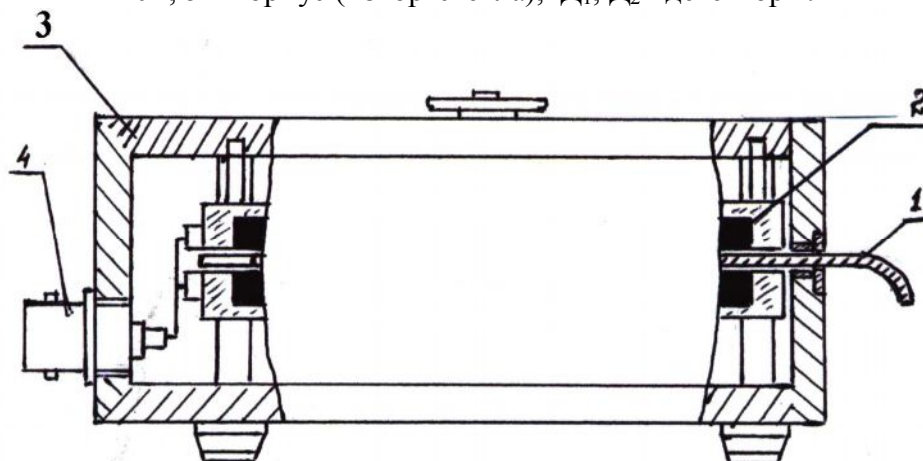
Использование описываемых p-i-n⁺ Si(Li)-детекторов большой площади на едином монокристалле p-Si, (Рис.3а) позволяет существенно повысить эксплуатационные характеристики установок для исследования слабоинтенсивных источников излучения. В частности, за счет уменьшения относительной доли конструкционных материалов (корпусов, защитных компаундов, металлических контактов и др.) уменьшается собственный фон установки. С другой стороны, расположение основного и защитного детекторов на едином кристалле в корпусе значительно упрощает конструкцию головного каскада, одновременно повышая механическую

прочность всей низкофоновой установки в целом. На рис.3 б показан головной каскад низкофоновой установки. Габаритные размеры установки не более 35х35х35 см, собственный фон 0.06 импульсов/мин, эффективность регистрации β -излучения 35%.



а)

1- диффузионная область, 2- компенсированная область, 3- p- Si, 4-изолирующий эпоксидный компаунд ЭКЛБ-10Б, 5 – корпус (из оргстекла), D_1, D_2 – детекторы.



б)

1-кассета для исследуемого β -препарата, 2- ППД, 3- общий корпус из оргстекла, 4 - разъемы для предусилителей.

Рис.3. ППД в разрезе и внешний вид головного каскада низкофоновой установки с двумя Si(Li) – детекторами с рабочей поверхностью 25 см²;

В шестой главе представлены физические особенности технологических методов изготовления универсальных спектрометров ионизирующих частиц на основе Si(Li) p-i-n структур с большими объемами, работающими при перпендикулярном и параллельном падении ионизирующих частиц на детектор относительно направления приложенного в i – область (чувствительную область) электрического поля. Приведены конструкции и экспериментальные результаты их исследования.

Исследования показали, что форма и спектр энергетического разрешения не отличаются существенно по площади торцевых входного, а также бокового окна детектора. Разработанные детекторы имеют следующие размеры и характеристики $S = (30 \times 60) \text{ мм}^2$, $W_i \geq 6 \text{ мм}$, $U_{\text{раб}} = (350 \div 600) \text{ В}$, $I_{\text{обр}} \sim 5 \text{ мкА}$, $C = 40 \text{ пФ}$, $E_{\text{ш}} = 45 \text{ кэВ}$, энергетические разрешения по α - частицам ^{238}Pu $R_\alpha \sim 75 \text{ кэВ}$, по β - частицам ^{207}Bi $R_\beta \sim 55 \text{ кэВ}$. В работе также приведены технологические особенности создания Si(Li) детектора на основе гетерепереходных структур Al - αSi - i - Au. На основе комплексного исследования технологических особенностей установлено, что качество гетереперехода зависит от степени компенсации i-области. Изготовлены детекторы с площадью $S = (70 \times 70) \text{ мм}^2$, толщиной чувствительной области $W_i \geq (2 \div 8) \text{ мм}$ из исходной пластины КЧ ($\rho \sim 10 \text{ Ом.см}$) и БЗП ($\rho \geq 1 \text{ кОм.см}$), а также изготовлены и исследованы $\frac{dE}{dx}$ -детекторы на основе гетероструктур, диаметром чувствительной области $\varnothing = 80 \text{ мм}$, и толщиной $W_i \geq 100 \text{ мкм}$. Преимущества детекторов изготовленных на основе p - Si состоит в том, что они имеют малое рабочее напряжение $U_{\text{обр}} = (5 - 10) \text{ В}$ и относительно малые потери энергии в «входном» и «выходном» окнах ($\Delta E_{\text{вх}} \sim 10 \text{ кэВ}$, $\Delta E_{\text{вых}} \sim 20 \text{ кэВ}$).

В конце главы приведены результаты исследования по разработке телескопической системы в едином Si(Li) p-i-n структуре для заряженных частиц.

В ядерно-физических экспериментах для идентификации различных типов частиц необходимы регистрация их времени появления, и измерение их полной кинетической энергии. Обычно для таких целей в основном используются телескопические системы, состоящие из ΔE тонких детекторов $W_i = (20-200) \text{ мкм}$ и последующих толстых детекторов $W_i = (0,5-5) \text{ мм}$. Такое строение телескопических систем позволяет решать широкий круг задач по идентификации и исследованию, в частности спектрального состава заряженных частиц с различной энергией, зарядом и массой.

Проведено исследование универсального спектрометра на основе Si(Li) p-i-n детектора ядерного излучения с протяженной чувствительной областью $W_i = (10-20) \text{ мм}$ в едином монокристаллическом кремнии.

Данный детектор-телескоп создается на основе Si(Li) p-i-n структуры на одной из боковых сторон которой формируется тонкий ΔE детектор, а остальная часть структуры работает как детектор полного поглощения. Особенность такого Si(Li) p-i-n спектрометра заключается в том, что ионизирующая частица падает через его боковую поверхность. Нами выше отмечено, что Si(Li) детекторы эффективно работают как параллельном, так и перпендикулярном падений ионизирующих частиц по отношению электрического поля, а также успешно могут найти применение для регистрации длиннопробежных заряженных частиц. Регистрация частиц производится в таком Si(Li) p-i-n спектрометре-телескопе в едином кристалле со стороны боковой поверхности, где сформирован тонкий «мертвой слой».

Такой спектрометр-телескоп представляет собой прямоугольную Si(Li) p-i-n⁺ структуру, изготовленную из кремния p-типа с удельным сопротивлением $\rho = 1 \div 5 \text{ кОм} \times \text{см}$ и толщиной $\sim 10 \text{ мм}$.

Использование предлагаемого детектора по сравнению с известным (телескопической системы на основе дискретных детекторов) имеет следующие преимущества: позволяет получить большие чувствительные (рабочие) объемы, высокую однородность чувствительной области, очень тонкий «мертвый слой», низкое рабочее напряжение, низкий уровень шума детектора, идентичность характеристик, малые размеры детектора.

Полученные по предложенной методике ΔE и E -детекторы имеют следующие типичные параметры: при обратном напряжении смещения $U_{об} \sim 20 \div 200 \text{ В}$, темновой ток $I \sim 0,1 \div 0,5 \text{ мкА}$, емкость $C \sim 2 \div 20 \text{ пФ}$, энергетические шумы $E_{ш} \sim 12-35 \text{ кэВ}$, энергетические разрешения системы по α -частицам ^{238}Pu $E_{\alpha} \sim (25 \div 40) \text{ кэВ}$, по β -частицам ^{207}Bi $R_{\beta} \sim (12 - 20) \text{ кэВ}$.

Таким образом, в результате получается достаточно удобная монолитная детектирующая телескопическая система, способная проводить спектрометрические исследования различных ионизирующих частиц от малых до достаточно высоких энергий, включая космические излучения.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Показаны физические особенности процесса диффузии ионов лития в p-Si большого диаметра, выращенного методом Чохральского, с учетом комплексообразования Li-O, а также генерации термодоноров. Экспериментально установлено, что резкость диффузионного n⁺-p-переходе значительно лучше у низкоомного кремния с большим содержанием кислорода по сравнению с высокоомным. Дано качественное объяснение наблюдаемому эффекту, заключающегося в том, что изменение коэффициента диффузии Li связано в условиях комплексообразования.

2. Определен физический механизм оптимального режима дрейфа ионов лития в кремнии большой площади. Режим дрейфа выбирался следующим образом: температура $T_{др.} = (85 \div 90)^\circ\text{C}$, напряжение смещения $U_{обр.} = (100 \div 600) \text{ В}$ в зависимости от величины токов утечки на каждом конкретном кристалле. Показано, что после окончания процесса дрейфа ионов лития в компенсированной области не обеспечивается достаточно высокое удельное сопротивление. Это обусловлено наличием в объеме кристалла локальных неоднородностей исходной акцепторной примеси, а также возникновением термически генерированных носителей в процессе дрейфа. Поэтому предложено проведение дополнительно «выравнивающего» дрейфа, обеспечивающего достаточно высокую степень компенсации. В результате показано, что процесс «выравнивающего» дрейфа является обязательной технологической операцией. Установлен оптимальный диапазон температурно-временного режима «выравнивающего» дрейфа.

3. Обнаружено увеличение плотности дрейфующих пакетов неравновесных носителей заряда в рабочем объеме Si(Li) p-i-n детектора. Установлено, что наблюдаемое увеличение плотности дрейфующих пакетов неравновесных носителей заряда обусловлены: а) увеличением концентрации неравновесных носителей и связанное с этим уменьшение вероятности захвата дрейфующих носителей ловушками; б) перезарядкой центров захвата в ультразвуковом поле.

4. Изучены особенности литий-дрейфовой технологии для получения Si(Li) p-i-n⁺ структур больших объемов. Показано, что уменьшение эффективного коэффициента диффузии обусловлено комплексобразованием Li-O в кислородосодержащем кремнии. Комплексобразование Li-O уменьшает концентрацию электрически активного лития, но в то же время увеличивает растворимость Li в низкоомном кремнии за счет большой концентрации бора.

5. Показано, что для кристаллов p-Si большого диаметра определяющий вклад в обратный ток p-i-n структур вносит инверсионный слой на их боковой поверхности. Получено аналитическое выражение для обратного тока по инверсионному каналу и проведены численные расчеты на ЭВМ. Сравнение расчетных данных с экспериментальными ВАХ p-i-n детекторов с $S = 60 \text{ см}^2$ из КЧ и БЗП показали, что у детекторов из БЗП обратный ток в несколько раз превышает, чем у детекторов из КЧ. Выяснение природы поверхностного тока позволило выбором специальной конструкции ППД больших объемов уменьшить влияние поверхностного инверсионного канала.

6. Исследовано распределение радиометрических характеристик детекторов по чувствительной поверхности и показана роль её однородности. Энергетическое разрешение по участкам сканирования детекторов с площадью $S = 50 \text{ см}^2$, толщины $W_i = 5 \text{ мм}$ составило $R_\beta = (35 \div 42) \text{ кэВ}$ по линии $E_\beta = 976 \text{ кэВ}$ ЭВК ^{207}Bi , что составляет $(3 - 5)\%$ при учете шума предусилителей $E_{\text{шпу}} \sim 6 \text{ кэВ}$.

7. Применение ультразвукового воздействия на технологические процессы дрейфа приводит к ускорению этого процесса и сглаживанию рельефа дрейфующих атомов в объеме детекторного кремния большого диаметра и толщины.

8. Показано, что воздействие ультразвуковых волн на детекторный кремниевый монокристалл с наличием дефектов в приповерхностных слоях и диффузией примеси в приповерхностной области, приводит к изменению свойств структуры и его характеристик. Ультразвуковые волны мощностью $I = (0,1 \div 2) \text{ Вт/см}^2$ и частотой $f \geq 5 \text{ МГц}$ приводят к отжигу дефектов в приповерхностных слоях и диффузии атомов примеси с поверхности вглубь детекторных Si-монокристаллов.

9. Обнаружено, что воздействие ультразвукового поля на процессы дрейфа атомов Li в p-Si приводит к эффекту его ускорения и более равномерному распределению концентрации Li в объеме Si-монокристаллов

за счет передачи энергии акустогенерированных фононов атомам примеси. На основе этого предложен физический механизм «выравнивающего» дрейфа, состоящего в перераспределении электрического поля при понижении температуры дрейфа и его падении на локальных неоднородностях, образованных на стадии дрейфа при отсутствии воздействия ультразвуковых волн. Экспериментально показано, что эффективность «выравнивающего» дрейфа в низкоомном Si значительно выше по сравнению с высокоомным.

10. Исследована возможность стимулирования «выравнивающего» дрейфа (ВД) методом импульсного электрического поля. Экспериментально показано, что «ВД» в импульсном электрическом поле позволяет устранить негативные последствия проведения дрейфа относительно традиционных режимов.

11. Впервые разработаны физические и технологические принципы изготовления универсального спектрометра ионизирующих частиц на основе Si(Li) p-i-n структуры с большим объемом чувствительной области, работающим при перпендикулярном и параллельном падении частиц на детектор относительно направления электрического поля. На основе такого спектрометра разработаны и исследованы Si(Li) непрерывные координатно-чувствительные детекторы с большим объемом рабочей области ($70 \times 70 \times 6$) мм³, которые имеют энергетические разрешения по α - частицам ^{238}Pu ($E_\alpha \sim 5,5$ МэВ) $R_\alpha \sim 70$ кэВ, по β - частицам ^{207}Bi ($E_\beta \sim 1$ МэВ) $R_\beta \sim 50$ кэВ, разрешающая способность по координате составляет $\sim 0,8$ мм, а также ΔE и E детекторы в едином кристалле.

12. Впервые установлены физические основы возможности создания телескопических систем на единой Si(Li) p-i-n структуре для заряженных частиц. ΔE и E детекторы в системе имеют следующие типичные параметры: при обратном напряжении смещения $U_{\text{обр.}} \sim (20 \div 200)$ В, обратный ток $I \sim (0,1 \div 0,5)$ мкА, емкость $C \sim (2 \div 20)$ пФ, энергетические шумы $E_{\text{ш}} \sim (12 \div 35)$ кэВ, энергетические разрешения системы по α -частицам ^{238}Pu $E_\alpha \sim (25 \div 40)$ кэВ, по β -частицам ^{207}Bi $R_\beta (12 \div 20)$ кэВ.

13. Впервые разработана конструкция, соответствующие электронные блоки по изготовлению макета низкофоновой установки (НФУ) с четырьмя Si(Li) детекторами больших объемов каждый (диаметром 30 - 100 мм, толщины 1 - 8 мм), работающего в спектрометрическом режиме с эффективности регистрации β - частиц $\eta \geq 35\%$.

14. Изучены оптимальные способы механической и химической обработки полупроводниковых пластин на основе кремния большого диаметра (30 - 110 мм).

15. Разработаны и усовершенствованы специальные приспособления для доведения кристаллов больших диаметров к технологическим, механическим и химическим процессам полировки, а также процессам диффузии, дрейфа примесных атомов и формирования на этой основе резких границ p-n переходов на строго плоскопараллельных пластинах.

На основе проведенных исследований разработаны и изготовлены Si(Li) детекторы, предназначенные для спектрометрии и регистрации заряженных частиц (электронов, протонов, α -частиц и др.). Детекторы имеют диаметр чувствительной области $\varnothing = (5 \div 90)$ мм, толщина $W_i = (0,1 \div 8)$ мм, энергетическое разрешение по α - частицам ^{238}Pu ($E_\alpha \sim 5,5$ МэВ) $R_\alpha \sim (22 \div 90)$ кэВ, по β - частицам ^{207}Bi ($E_\beta \sim 1$ МэВ) $R_\beta \sim (12 \div 60)$ кэВ. На их основе разработаны и изготовлены действующие макеты НФУ, радоносекторметр, универсальный спектрометр, телескопические детекторные системы в едином монокристаллическом кремнии и т.д.

Разработанные детекторы находят применение в решении ядерно-физических экспериментов (ИЯФ АН Казахстан, НИИЯФ МГУ, х/д №01/04, 01/05 ИЯФ АН РУз, ИКИ АН Россия, ЛИЯФ АН Россия, НПО «Тайфун» Россия, х/д №01/07-09 УзКТЖМ, а также могут найти применение в Алмалыкском горно-металлургическом комбинате, НГМК и Узгидромете).

СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Азимов С.А., Муминов Р.А., Шамирзаев С.Х. Яфасов А.Я. Кремний-литиевые детекторы ядерного излучения. –Т.: Фан, 1981. - 257с.
2. Раджапов С.А. Исследование особенностей создания кремний-литиевых р-і-п детекторов большой площади для регистрации ионизирующего излучения малой активности. Автореф. Дис. канд. ... канд.физ. – мат. Наук. –Ташкент: ТашГУ. 1991. – 16.
3. Акимов Ю.К. Кремниевые детекторы излучения (обзор). // ПТЭ. –Москва, 2007. - №1. - С. 5-34.

4. СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

В журналах:

1. Муминов Р.А. Мирзаева К.С. Раджапов С.А. Низкофоновая установка с кремниевыми детекторами большой площади. // ПТЭ. – Москва, 1994. - № 6. - С. 176 – 177.
2. Муминов Р.А., Раджапов С.А., Хасанов Д.К. Дegrаdация эксплуатационных характеристик Si(Li) - детекторов рабочих площадью 20 - 60 см². // Атомная энергия. – Москва, 1994. - Т. 77. - Вып. 3. - С. 215 -217.
3. Раджапов С.А. Выравнивающий дрейф в Si(Li) р-і-n детекторах. // ДАН РУз. – Ташкент, 2004. - №6. - С. 56-57.
4. S.A.Radzapov Solar-Beam Treatment of a Li-Si Detector //Applied Solar Energy.- New York, Vol.40, No.4, 2004, pp.87-89.

5. R.A.Muminov, S.A.Radzhapov and N.A.Sagyndykov A low-background β -ray spectrometer with composite detecting modules // Instruments and Experimental Techniques.- New York , Vol. 48, No. 1, 2005, pp. 41-42.
6. R.A.Muminov, S.A.Radzhapov, N.A.Sagyndykov and K.M.Nurbaev Salient features of the fabrication of Si(Li) detectors with a large-volume working region // Atomic Energy. – New York, Vol. 98, No. 1, 2005, pp. 69-71.
7. Раджапов С.А. Исследования вольтамперных характеристик Si(Li) детекторов большой площади. // УФЖ. – Ташкент, 2005. – В.7. - №4. - С. 267-271.
8. Раджапов С.А. Особенности процесса дрейфа ионов лития в низкоомном кремнии большого диаметра. // ДАН РУз. – Ташкент, 2007. - №2. - С. 17- 21.
9. Раджапов С.А. Исследования особенности процесса диффузии лития в кремния выращенного методом Чохральского. // УФЖ. –Ташкент, 2007. – В.9. - №3. - С. 190-194.
10. S.A.Radzhapov, Diffusion formation of the i region Si(Li) detectors of nuclear radiation // Atomic Energy. – New York, Vol. 102, No. 6, 2007, pp. 485-486.
11. S.A.Radzhapov A Versatile Spectrometer Based on a Large-Volume Si(Li) p-i-n Structure // Instruments and Experimental Techniques.- New York, 2007, Vol. 50, No. 4, pp. 452-454.
12. R.A.Muminov, S.A.Radzhapov, and A.K.Saimbetov Developing Si(Li) Nuclear Radiation Detectors by Pulsed Electric Field Treatment //Technical Physics Letters.- New York, 2009, Vol. 35, No. 8, pp. 768-769.
13. R.A.Muminov, S.A.Radzhapov and A.K.Saimbetov Silicon-Lithium telescopic detector in one crystal // Atomic Energy. – New York, Vol. 106, No. 2, 2009, pp. 141-142 .

Патенты:

14. А.с. № 1259906 , Н 01 L 31/18. Способ изготовления полупроводниковых n^+-i -р структур с литием. /Азимов С.А., Винокурова Л.М., Ледерман Е.А., Муминов Р.А., Раджапов С.А., Хасанов Д.К., Яфасов А.Я. Оpubл. 1986г.
15. А.с. №1459533, Н 01 L 21/225. Способ изготовления р – i - n^+ структуры. / Муминов Р.А., Искандеров А.Ш., Раджапов С.А. Оpubл. 1988г.
16. Патент РУз № IAP 04073 Способ изготовления Si(Li) p-i-n структур. /Муминов Р.А., Раджапов С.А., Пиндюрин Ю.С., Саймбетов А.К. // Расмидоротнома -2009. -№12.

В трудах международных конференций:

17. Раджапов С.А. Оптимизация параметров Si(Li) p-i-n детекторов для регистрации электронов на фоне γ -излучения. //Ресурсовоспроизводящие, малоотходные и природоохранные технологии освоения недр: Материалы четвертой международной конференции, 18-25 сентября 2005.- Москва-Навоий , - С.352-354.

18. Раджапов С.А. Изменение характеристик Si(Li) p-i-n детекторов с большим объемом при распаде твердого раствора Li-Si. //Ресурсовоспроизводящие, малоотходные и природоохранные технологии освоения недр: Материалы четвертой международной конференции, 18-25 сентября 2005.- Москва-Навоий, - С.355-357.
19. Раджапов С.А., Турсункулов О.М., Муталов А.М., Имамбердиев Э.А., Анарбаев С.А. Универсальная низкофоновая установка с детектирующими модулями для спектрометрии слабоинтенсивного радиационного излучения. //Ресурсовоспроизводящие, малоотходные и природоохранные технологии освоения недр: Материалы четвертой международной конференции, 18-25 сентября 2005.- Москва-Навоий, - С.338-340.
20. Раджапов С.А. Разработка и оптимизация технологии детекторов большой площади. //Фундаментальные и прикладные вопросы физики: Труды международной конференции. Посвященной 90-летию акад. С.А.Азимова., 18-19 ноября 2004. – Ташкент, - С.331-334.
21. Muminov R.A., Radjapov S.A. Feature of physical processes during formation of Si:Li nuclear detectors with large area up to 100 cm². The 5th Joint International Symposium. NANOSCIENCE: //Problems and Prospects. Program & Abstract, Uzbekistan-Korea, November 4-6, 2006,p. 25.
22. Муминов Р.А., Раджапов С.А., Саймбетов А.К., Сагындыков Н.А., Пиндюрин Ю.С., Полупроводниковый координатно-чувствительный детектор с большим объемом рабочей области. //Ядерная и радиационная физика: Труды VI Международной конференции, 4-7 июня 2007, -Алматы, - С. 368-369.
23. Муминов Р.А., Раджапов С.А., Саймбетов А.К., Турсункулов О.М., Заверюхин Б.Н., Полупроводниковые детекторы для регистрации заряженных частиц в широком энергетическом диапазоне //Ядерная и радиационная физика: Труды VI Международной конференции, 4-7 июня 2007, - Алматы, - С. 367-368.
24. Муминов Р.А. Раджапов С.А. Низкофоновая установка с кремниевыми детекторами большой площади. // Оптимизация сложных технологических процессов в горно-металлургической промышленности: Сб.науч.трудов ТашГТУ. –Ташкент, 1993. – С.15.
25. Муминов Р.А. Раджапов С.А. Деградация Si детекторов при диффузионной раскомпенсации локальных неоднородностей. //Оптимизация сложных технологических процессов в горно-металлургической промышленности: Сб.науч.трудов ТашГТУ. –Ташкент, 1995, - С.14.
26. Раджапов С.А., Турсункулов О.М., Сагындыков Н.А. Влияние ультразвукового поля на активацию диффузии лития в кремнии. //Фундаментальные и прикладные вопросы физики: Труды международной конференции посвященной 90-летию акад. С.А.Азимова., 18-19 ноября 2004. – Ташкент, С. 334-335.

27. Раджапов С.А. Исследование влияние ультразвукового воздействия на «выравнивающий» дрейф ионов лития. //Фотоэлектрические явления в полупроводниках 2004: Материалы научной конференции. 20-21 апреля 2004. - Ташкент, - С.17.
28. Муминов Р.А., Нурбаев К.М., Сагындыков А.С., Раджапов С.А. Особенности изготовления Si(Li) детекторов с большим объемом рабочей области. //Фундаментальные и прикладные вопросы физики: Труды международной конференции посвященной 60-летию Академии наук и Физико-технического института АН РУз., 27-28 ноября 2003. – Ташкент, - С. 231.
29. Раджапов С.А., Саймбетов А.К., Абдугафуров А.М. Особенности процесса диффузии лития в Si(Li) детекторах большой площади. //Фундаментальные и прикладные проблемы физики полупроводников: Материалы международной научно-методической конференции, 20-21 декабря 2005 . - Андижан, - С. 130-131.
30. Муминов Р.А., Раджапов С.А., Пиндюрин Ю.С., Саймбетов А.К. Способы изготовления Si(Li) p-i-n структуры. //Фотоэлектрическим и оптическим явлениям в полупроводниковых структурах: Материалы международной научно-методической конференции, 2-3 октября 2006. - Фергана, - С. 71.
31. Муминов Р.А., Раджапов С.А., Турсункулов О.М., Саймбетов А.К., Сагындыков Н.А. Полупроводниковые детекторы ядерного излучения на основе гетерепереходных Al- α Si-i-Au. //Фотоэлектрическим и оптическим явлениям в полупроводниковых структурах: Материалы международной научно-методической конференции, 2-3 октября 2006. -Фергана, - С. 57.
32. Муминов Р.А., Раджапов С.А., Саймбетов А.К. Si(Li) p-i-n детекторы больших объемов с ортогональным электрическим полем. //Фундаментальные и прикладные вопросы физики: Труды международной конференции, 26-27 октября 2006. –Ташкент, - С.259.
33. Муминов Р.А., Байзаков Б.Б., Пиндюрин Ю.С., Раджапов С.А. Выравнивающий дрейф ионов лития импульсным электрическим полем: Труды международной конференции, 26-27 октября 2006. –Ташкент, - С. 261
34. Муминов Р.А., Муталов А.М., Раджапов С.А. Низкофоновая установка для исследования слабоинтенсивных β -препаратов. //Алмалык и проблемы развития региона. Тезисы докладов. Республиканской научно – методической конференции, - Алмалык, 2002. - С.41.
35. Муминов Р.А., Муталов А.М., Раджапов С.А. Низкофоновая установка с кремниевыми детекторами большой площади для исследования ионизирующего излучения малой активности. //Актуальность задачи современных горно-технологических комплексов и пути их решения: Тезисы докладов Международной конференции.- Навоий, 2002, - С.26.
36. Муминов Р.А., Муталов А.М., Раджапов С.А., Анарбаев С.А. Низкофоновая установка с комбинированными детектирующими модулями

для слабо интенсивных β -препаратов. //Наука и кадры горно-металлургической промышленности: Тезисы докладов. Республиканской научно – методической конференции, 30 апрель 2004. - Алмалык, - С.66.

37. Муминов Р.А., Раджапов С.А., Саймбетов А.К., Рахманов У.Х. dE/dx -детекторы большой площади на основе $Al(\alpha Si)-i-Au$ структуре. //Неравновесные процессы в полупроводниках и в полупроводниковых структурах: Материалы международной конференции, 1-3 февраля 2007,- Ташкент, 2007. - С.129-130.

38. Muminov R.A., Radjapov S.A., Saymbetov A.K., Tursunkulov O.M. Development of low-background semiconductor nuclear radiation detectors on the base of large volume silicon. // Khiva, Uzbekistan, Khorezm Mamun Academy of Sciences, 25th - 30th September 2007, - Khiva, 2007. - p. 57.

39. Muminov R.A., Radjapov S.A., Saymbetov A.K., Tursunkulov O.M., Pindurin Yu.S. Method of producing $p-i-n$ structures by compensation of lithium ions from both side of silicon. // Khiva, Uzbekistan, Khorezm Mamun Academy of Sciences, 25th - 30th September 2007,- Khiva,2007. - p. 58.

РЕЗЮМЕ

диссертации Раджапова Сали Ашировича на тему «Особенности физических процессов формирования кремний-литиевого детектора ядерного излучения с большой чувствительной областью» на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.10 – физика полупроводников

Ключевые слова: Si(Li) p-i-n детекторы ядерного излучения, монокристаллический кремний, литий, дрейф, диффузия, чувствительная область, электрофизические и спектрометрические характеристики.

Объект исследования: монокристаллический кремний диаметром и толщиной ($\varnothing > 30\text{ мм}$, $d \geq 3\text{ мм}$), Si(Li) p-n, и p-i-n структуры с большим объемом чувствительной области.

Цель работы: исследование новых физических и технологических основ разработки и изготовления Si(Li) детекторов ядерного излучения на кристаллах с диаметром слитка до $100 \div 110\text{ мм}$, толщиной $W_i \geq 5\text{ мм}$.

Методы исследования: одно и четырехзондовые, электрофизические (ВАХ, ВФХ, ВШХ), радиометрические, и фазо-частотных измерения.

Полученные результаты и их новизна: показаны, физические особенности процесса диффузии ионов лития с учетом комплексообразования Li-O в p-Si большого диаметра; найдены новые физические механизмы литий-дрейфовой технологии на большие объемы монокристаллического кремния, показаны ранее неизвестные физические и технологические принципы создания универсального спектрометра телескопической системы, низкофоновой установки на основе Si(Li) p-i-n структуры с большим объемом чувствительной области; созданы методы, основанные на внешних воздействиях (УЗВ, импульсных электрических полей) развевающие новые фундаментальные знания в физики полупроводников.

Практическая значимость: детекторы ядерного излучения на кремниевых пластинах диаметром до 110 мм не имеют мировых аналогов, и они открывают возможности решать широкий круг задач в науке и технике, геологии, металлургии, медицине, охрана окружающей среды и т.др.

Степень внедрения и экономическая эффективность: разработанные детекторы находят применение в НИИЯФ МГУ, х/д №01/04, 01/05 ИЯФ АН РУз, НПО «Тайфун» Россия, АГМК, НГМК, Узгидромет, х/д №01/07 09 УзКТЖМ.

Область применения: исследование и разработанные кремний-литиевые детекторы ядерного излучения больших объемов имеют перспективы в решении фундаментальных и прикладных задач в ядерной физике, а также металлургии, геологии, медицине, археологии, экологии и другие.

Физика-математика фанлари доктори илмий даражасига талабгор Раджапов Сали Ашировичнинг 01.04.10 – Ярим ўтказгичлар физикаси ихтисослиги бўйича «Катта сезиш соҳасига эга бўлган кремний-литийли ядровий нурланиш детектори шаклланишида рўй берадиган физиквий жараёнларнинг муҳим жиҳатлари» мавзусидаги диссертациясининг

РЕЗЮМЕСИ

Таянч сузлар: Si(Li) p-i-n⁺ ядро нурланиш детекторлари, монокристалл кремний, литий, дрейф, диффузия, сезувчан соҳа, электрофизик ва спектрометрик таснифлар.

Тадқиқот объектлари: диаметри ва қалинлиги ($\varnothing > 30\text{мм}$, $d \geq 3\text{ мм}$) булган монокристалл кремний, Si(Li) p-n ва p-i-n структурали катта ҳажимли сезгирли соҳа, ядро нурланиш Si(Li) детекторлари.

Ишнинг мақсади: қуйманинг диаметри 100÷110 мм гача, қалинлиги $W_i \geq 5\text{ мм}$ булган кристаллар асосида Si(Li) ли ядровий нуланиш детекторларни ишлаб чиқиш ва тайёрлашнинг янги физикавий ва технологик асослари тадқиқоти.

Тадқиқот усули: бир ва тўртзонли, электрофизик (ВАХ, ВФХ, ВШХ), радиометрик ва фазо-частотали ўлчовлар.

Олинган натижалар ва уларнинг янгилиги: катта диаметрли p-Si да литий ионналирининг диффузияси жараёнининг муҳим физикавий жиҳатлари Li-O комплекс ҳосил булишини ҳисобга олган ҳолда кўрсатилган. Катта ҳажимдаги кремний монокристаллари учун литий-дрейф технологиясининг янги физикавий механизмлари топилган. Катта ҳажимли сезиш соҳасига эга бўлган Si(Li) p-i-n⁺ структураси асосидаги пастфонли қурилмалар, телескопик тизимнинг универсал спектрометрини яратишнинг илгари номалълум бўлган физикавий ва технологик тамойиллари кўрсатиб ўтилган. Ташқи таъсирлар (ультратовуш, импульсли электор майдонлари) га асосланган, ярим ўтказгичлар физикасида янгича фундаментал билимлари пайдо бўлишига туртки берувчи усуллари яратилган.

Амалий аҳамияти: дунёда ухшаши йуқ, диаметри 110 гача бўлган кремний пластинкаларида ядро нурланиш детекторлари, фан ва техника, геология, металлургия, медицина, атроф муқитни радиоактив ифлосланишни кўзатиш ва бош. масалаларни ечиш имконини яратади.

Татбиқ этиш даражаси ва иктисодий самарадорлиги: ишлаб чиқилган детекторлар НИИЯФ МГУ, х/д №01/04 , 01/05 ИЯФ АН РУз , НПО «Тайфун» Россия , ОТМК, НТМК, Узгидромет х/д №01/07 09 УзКТЖМ қулланилмоқда.

Қулланиш соҳаси: Тадқиқот қилинган ва ишлаб чиқилган катта ҳажмдаги кремний-литийли ядровий нурланиш детекторлари фақатгина ядро физикасининг фундаментал ва амалий масалаларини ечишда истиқболли бўлиб қолмасдан медицина, геология, археология, экология ва бошқаларда ҳам фойдали бўлиши мумкин.

RESUME

of dissertation of Radjapov Sali Ashirovich entitled "Specific features of physical processes in development of lithium drift silicon detectors of nuclear radiation with a large sensitive area" for the degree of doctor of sciences in physics and mathematics on speciality 01.04.10 - semiconductor physics.

Key words: Si(Li) p-i-n detectors of nuclear radiation, silicon single crystal, lithium, drift, diffusion, sensitive area, electro-physical and spectrometric characteristics.

Subjects of research: Silicon single crystal with large diameter and thickness ($D > 30$ mm, $d > 3$ mm), Si(Li) p-n and p-i-n structures with large sensitive volume.

Purpose of work: Investigation of new physical and technological bases for development of Si(Li) detectors of nuclear radiation on silicon single crystals with a diameter up to 100 - 110 mm and thickness $W > 5$ mm.

Methods of research: One- and four- probe measurements, electro-physical (current-volt, capacity-volt and noise-volt characteristics) and radiometric measurements, phase-frequency measurements.

The results obtained and their novelty: New specific features of the lithium diffusion process in p-Si with large diameter, related to formation of Li-O complexes, have been revealed. New physical techniques in lithium drift technology on silicon single crystal of large volume are found. Previously unexplored physical and technological aspects in development of universal spectrometer of telescope type and low background installation based on Si(Li) p-i-n structure with large sensitive area, are presented. Methods based on external sources (ultrasound, pulsed electric field) are developed, which extend the basic knowledge in semiconductor physics.

Practical value: the unique detectors of nuclear radiation created on silicon wafers with diameter up to 110 mm do not have analogues in the world. They open new perspectives in the design of original experiments in nuclear physics, as well as new applications in various fields of science and technology, such as geology, metallurgy, medicine, environment protection, etc.

Degree of embed and economic effect: semiconductor detectors that have been developed are employed in nuclear physics experiments conducted at Nuclear Research Institute of Moscow State University, agreement No.01/04, 01/05 Institute of Nuclear Physics of Uzbek Academy of Sciences, Scientific Production Association of Russia "Taifun", Almalik Metallurgical Enterprise, Uzgidromet, agreement No. 01/07 09 UzKTGM.

Field of application: new scientific knowledge and advanced technology for the creation of silicon-lithium detectors of nuclear radiation with large sensitive volume, that have been obtained, can be effectively used for solving various fundamental and applied problems in nuclear physics, medicine, geology, archeology, environmental research, etc.