

## **АННОТАЦИЯ**

диссертации на соискание ученой степени доктора философии (PhD) по специальности

«6D071900 - Радиотехника, электроника и телекоммуникации»

**Джапашов Нурсултан**

Разработка высокочувствительных детектирующих систем на основе кремний-литиевых структур больших размеров

### **Общие характеристики исследования**

Диссертация посвящена разработке, исследованию и применению спектрометрических приборов, предназначенных для регистрации рентгеновского излучения. Особое внимание было уделено разработке детекторов и считывающей электроники для них. В рамках этой работы был предложен новый метод двусторонней диффузии и метод двустороннего дрейфа ионов лития в монокристаллическую кремниевую пластину для дальнейшей разработки детекторов ядерного излучения Si(Li) p-i-n структуры, с диаметром чувствительной поверхности более 110 мм и толщиной чувствительной области более 4 мм. Рассмотрены теоретические соображения и экспериментальные характеристики двухсторонней диффузии. Для получения структуры в качестве исходных материалов были взяты: монокристалл кремния p-типа, выращенный методом Чохральского и кристаллический кремний, полученный методом бестигельной зонной плавки. Также была разработана оптимизированная, быстродействующая, малошумящая считывающая электроника и был предложен алгоритм и блок-схема системы регистрации радиационных излучений.

### **Актуальность исследования**

На сегодняшний день, кремниевые детектирующие системы широко используются в различных областях для регистрации различных типов частиц и излучений. Одним из основных преимуществ такого рода детекторных систем является низкая энергия, высокая эффективность сбора статистических данных, хорошая радиационная стойкость. Благодаря таким характеристикам, кремниевые детектирующие системы являются объектом исследований и продуктом различных лабораторий во всем мире. К таким лабораториям относится лаборатория CANBERRA - который разрабатывает и производит кремниевые детекторы и спектрометры для исследовательских и промышленных нужд. Одним из лидеров в разработке и производстве детектирующих систем ионизирующих излучений является промышленная организация ORTEC. Это число включает в себя всемирные лаборатории, такие как: Брукгейвенская национальная лаборатория, лаборатория института физики высоких энергий полупроводниковых

детекторов и др., которые занимаются исследованиями и разработками полупроводниковых детекторов и спектрометров.

В то же время регистрация различных типов частиц и излучения по-прежнему является особой задачей науки и техники. Среди них особое место занимают детектирующие системы, основанные на ядерном излучении с высокой энергией и позиционными разрешениями, также линейность сигналов в широком диапазоне энергий для различных типов ионизирующих частиц. Одним из важных технологических, научно-технических этапов получения высокоэффективных детектирующих систем является правильное понимание физических, технологических и структурных решений проблем в разработке детекторов. Поскольку детектор является неотъемлемой частью спектрометрических систем, процесс формирования детекторных структур играет очень важную роль в развитии спектрометрических систем. Высокое энергетическое разрешение детектора, линейность сигнала и высокая эксплуатационная способность детектора обеспечивают успешную работу системы. В этом вопросе особое место занимает качество основного кристаллического материала для детектора. В нашем исследовании в качестве исходного материала был выбран монокристаллический кремний. По сравнению с другими материалами кремний отвечает всем вышеперечисленным требованиям.

Хорошо известно, что Ge-детекторы обладают самыми высокими функциональными характеристиками, но они работают при температуре  $T \leq 77\text{K}$ , поэтому в процессе работы они нуждаются в системе охлаждения с жидким азотом. Технологии производства монокристаллов, таких как - GaAs, CdTe и CdZnTe, в качестве исходного материала для изготовления детектора, имеют низкую эффективность обнаружения и малое энергетическое разрешение.

В настоящее время в мировой практике хорошо разработаны детекторы с относительно небольшими размерами. Но технологическая проблема разработки детекторов больших размеров все еще является нерешенным. По сравнению с другими полупроводниковыми приборами, такими как диоды, транзисторы, тиристоры и т. д., структуры детектора должны соответствовать высоким требованиям, связанным с их токовыми, зарядовыми, емкостными, спектрометрическими и временными характеристиками, а также с идентичностью регистрации ионизирующего излучения, независимо от его контакта с любой частью чувствительной области детектора. В связи с этим, важно изучить технологические проблемы, вызванные эффектами больших размеров полупроводников кристаллов для формирования требуемых детекторных структур с p-n и p-i-n переходами.

Необходимо увеличить информацию, полученную от спектрометра, как о самой частице, так и о процессах, происходящих в детекторе во время его регистрации. Это утверждение тривиально, но его реализация аналоговыми электронными методами очень проблематична, поскольку почти все имеющиеся ресурсы уже задействованы. С помощью цифрового метода анализа сигналов

становится возможным использование мощных математических методов, недоступных для аналоговой электроники. Это позволит перейти к новому уровню анализа форм импульса и извлекать из детекторных систем дополнительную, нужную информацию.

Свойства электронных компонентов, в аналоговых спектрометрах, отличаются в зависимости от условий окружающей среды (температура, влажность и т. д.). Несмотря на достаточно хорошие развитые системы стабилизации и компенсации, проблема остается актуальной практически для любых экспериментов, и особенно для тех, в которых число используемых электронных компонентов велико. При обработке цифровых сигналов большая часть работы, выполняемой с помощью электронных модулей, передается в компьютерные программы. Поэтому устойчивость всей системы возрастает.

Проблема улучшения разрешения спектрометра все еще остается актуальной. В практике, уже известны эффекты, которые мешают его улучшению (баллистический дефект, неоптимальная фильтрация сигналов и т. д.); однако это трудно осуществить с использованием аналоговой электроники. Методом цифровой обработки сигналов возможно восстанавливать сигналы и этим самым уменьшать эффект баллистического дефекта. Кроме того, перед началом обработки конкретного сигнала, с учетом особенностей его формы, можно создать отдельный фильтр, который оптимально соответствует этому сигналу.

**Цель исследования** является создание высокоэффективный, недорогой цифровой спектрометр для регистрации рентгеновского излучения. В связи с этим, разработать технологию изготовления детекторов Si (Li) p-i-n больших размеров и изучить его электрофизические характеристики. Также, создать схему спектрометра и алгоритмы цифровой обработки сигналов.

**Для достижения этой цели были установлены следующие задачи:**

- Выбрать подходящий исходный материал для детектора.
- Экспериментально изучить электрофизические характеристики исходного материала для детекторов.
- Разработать технологический режим двусторонней диффузии атомов лития в кремниевую пластину, диаметром более 110 мм;
- Разработать технологический режим двустороннего дрейфа ионов лития в кремниевую пластину больших размеров;
- Разработать подходящую и высокоэффективную электронику считывания сигналов для крупногабаритных Si (Li) p-i-n детекторов;
- Аппаратная реализация высокоэффективной спектрометрической системы на основе Si (Li) p-i-n-детекторов большого размера;

**Объекты исследования:** Объектом исследования является высокочувствительная система регистрации рентгеновских лучей, Si (Li) p-i-n структурированные детекторы, схема спектрометра и алгоритмы обработки цифровых сигналов.

**Предмет исследования:** предметом исследования являются физические механизмы и технологии для разработки как детекторов, так и детектирующей систем в целом.

**Основное положение защиты:**

- Установлено, что оптимальным режимом диффузии лития для получения детекторов большого диаметра ( $\geq 110$  мм) с толщиной чувствительной области  $W \geq 4$  мм, является в режиме температуры  $T = (450 \pm 20) ^\circ\text{C}$ ,  $t = 3$  мин,  $h_{\text{Li}} = (300 \pm 10)$  мкм.

- Метод проведения двухстороннего дрейфа ионов лития в монокристалл кремния выполняется путем синхронного ступенчатого увеличения температуры от  $55 ^\circ\text{C}$  до  $100 ^\circ\text{C}$  и напряжения обратного смещения от 70В до 200В.

- Технология двухстороннего дрейфа ионов лития в монокристалл кремния улучшает спектрометрические характеристики, повышает эффективность детектирующей системы и сокращает время изготовления детектора.

- Разработанный зарядо- чувствительный предусилитель для кремниевых детекторов имеет высокий скорость (время нарастания не более 5 нсек), низкую чувствительность к величине входной емкости, что обеспечивает его стабильность за счет малошумящих усилителей с уровнем шума не более  $0,45$  нВ/Гц<sup>1/2</sup>, а также возможность согласования импеданса подключенной линии и входа усилителя.

**Научная новизна:**

- Экспериментальным путем были обнаружены режимы диффузии атомов лития в монокристалл кремния, для изготовления детектора с чувствительной областью больше  $110$  мм<sup>2</sup> и толщиной 4 мм.

- Впервые экспериментальным методом определены технологические режимы двухстороннего дрейфа ионов лития в монокристалл кремния, включающие синхронное ступенчатое изменение температуры и напряжения обратного смещения приводящие к сокращению дрейфовой пути проникания ионов лития и к более однородной структуре детектора, за счет чего уменьшается энергетическое разрешение детектора для бета частиц на 5 кэВ а для альфа частиц на 7 кэВ.

- Теоретические вычисления и экспериментальные данные показали что технология двухстороннего дрейфа в четыре раза сокращает время изготовления Si(Li) p-i-n – структуры.

- Разработанный чувствительный к заряду предусилитель для Si (Li) p-i-n структурированного детектора показала низкий уровень шума, для детекторов с выходной емкостью 300 пФ, среднее квадратическое отклонение шумового тока составляет 45 нА и минимальное время задержки до 8 нс. Также, установлено что предусилитель полностью совместима с другими, альтернативными, кремниевыми детекторами с выходной емкостью от 10 до 1300 пФ.

**Метод исследования:**

Детекторная структура Si (Li) p-i-n была получена методом двусторонней диффузии и дрейфа ионов лития на кремниевую пластину. Определение электрофизических характеристик детектора и всей детектирующей системы проводилось путем теоретического расчета, а затем экспериментальных измерений. Электронная часть системы была построена путем моделирования, теоретического расчета, затем экспериментальным методом (включающий аппаратную реализацию системы).

**Научно-практическое значение работы:** В диссертационной работе рассмотрены новые теоретические и экспериментальные особенности формирования структур Si (Li) p-i-n больших размеров. Создание таких детекторных структур связано с более детальным и глубоким пониманием электрических свойств исходного кремния большого диаметра и установлением их взаимосвязи с требованиями для получения высокопроизводительных Si (Li) p-i-n структур. Эти научные результаты важны для понимания физических процессов для различных полупроводниковых приборов большого размера, а также практических последствий для улучшения их характеристик.

Кроме того, здесь была разработана цифровая электроника спектрометров, которая согласуется с параметрами этих детекторов. Создан алгоритм для считывания цифровой электроники детектирующей системы. Исследованы электрофизические и радиометрические характеристики этих систем.

Разработка уникальных спектрометров на основе детекторов Si (Li) p-i-n больших размеров открывает новые возможности для проведения исследований в области науки и техники для изучения физико-химических свойств объектов окружающей среды. Это исследование откроет новые перспективы в развитии науки и промышленности в улучшении качества обработки информации по радиоактивным излучениям, что в дальнейшем позволит использовать ее в сейсмологии, геологии, медицине и. и т.п.

**Личный вклад автора,** заключается в том, что автор был непосредственно вовлечен в получении основных научных результатов. Все результаты физического эксперимента, теоретические расчеты, численный анализ моделей, аппаратная реализация детектирующей системы были получены лично автором. Установление задач и разработка идей осуществлялись в сотрудничестве с научными консультантами. Все публикации по теме диссертации были подготовлены с его непосредственным участием.

#### **Достоверность результатов:**

-Теоретическая часть, описанная в этой статье, является продолжением известных научных работ в области электроники и полупроводниковой электроники. Полученные результаты связаны с работами предыдущих исследований и является их логическим продолжением.

-Экспериментальные и теоретические результаты, приведенные в работе, хорошо согласуются.

-Разработанная система детектирования рентгеновских лучей полностью функциональна.

### **Апробация работы**

Основные результаты диссертации были представлены и обсуждены на семинарах Физико-технологического факультета Казахского национального университета имени аль-Фараби, а также на следующих международных конференциях:

- Четвертая международная конференция по радиации и применению в различных областях исследований (2016, Ниш, Сербия);

- Международная научная конференция студентов и молодых ученых «Фарабиалеми» (2018, Алматы, Казахстан);

- Результаты диссертации были реализованы в хозяйственной деятельности ООО «ScientiaKazakhstan», для определения уровня радиации оборудования.

**Публикации:** По материалам диссертационной работы было опубликовано 11 публикаций. Из которых 2 являются научными статьями, 2 в международном научном издании, цитируемый в базе данных ThomsonReuters (ISI Web of Knowledge, ThomsonReuters) и в базе данных Scopus, 6 статей в научных журналах, рекомендованных Комитетом по контролю образования и науки Министерства образования и науки Республики Казахстан, 1 доклад на международной конференции за рубежом и 2 доклада на местной международной конференции.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов и списка ссылок. Он представлен на 115 страницах машинописного текста, содержит 38 рисунков, 4 таблицы, 148 ссылок.