### АКАДЕМИЯ НАУК РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

На правах рукописи УДК 621.315.592+621.039.553.

## СУЛАЙМОНОВ АБДУРАХМОН АБДУРАШИДОВИЧ

### РАЗРАБОТКА ТЕРМОРАДИАЦИОННЫХ ДАТЧИКОВ НА ОСНОВЕ НЕЙТРОННО-ЛЕГИРОВАННОГО МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ

01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики

### **ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени доктора философии (PhD) по техническим наукам

Научный руководитель: д.ф.-м.н., проф. Ташметов М.Ю.

Определения, обозначения и сокращения	5
Введение	6
ГЛАВА І. СПОСОБЫ ПОЛУЧЕНИЯ ЛЕГИРОВАННОГО	
МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ	18
§1.1. Легирование кремниевых кристаллов при выращивании	20
§1.2. Высокотемпературное диффузионное легирование пластин	
кремния	24
§1.3. Имплантационное легирование кремния	25
§1.3.1.Термический отжиг имплантированных слоев	27
§1.3.2. Лазерный отжиг полупроводников	29
§ 1.4. Ядерное легирование монокристалла кремния	30
Вывод	32
ГЛАВА II. МЕТОДИКА ЛЕГИРОВАНИЯ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ	
УСТАНОВКИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ	
ХАРАКТЕРИСТИК ОБРАЗЦОВ	34
§2.1. Выбор оптимальных режимов нейтронного легирования и	
характеристика образцов	34
§2.2. Нормализация параметров нейтронно - трансмутационного	
кремния термообработкой	38
Вывод	39
ГЛАВА III. РАЗРАБОТКА СПОСОБА ПОЛУЧЕНИЯ ТЕРМО-	
ДАТЧИКОВ НА БАЗЕ ЯДЕРНОЙ ТРАНСМУТАЦИИ КРЕМНИЯ	40
§3.1. Технология получения нейтронно-компенсированных	
§3.1. Технология получения нейтронно-компенсированных кремниевых образцов	40
§3.1. Технология получения нейтронно-компенсированных кремниевых образцов §3.2. Способ изготовления кремниевых терморезисторов	40 45
<ul> <li>§3.1. Технология получения нейтронно-компенсированных</li> <li>кремниевых образцов</li> <li>§3.2. Способ изготовления кремниевых терморезисторов</li> <li>§3.3. Изготовление образцов для термодатчиков на базе</li> </ul>	40 45

## оглавление

§3.4. Параметры и характеристики термодатчиков	56
§3.4.1. Электронный термометр	63
§3.4.2. Датчик-сигнализатор температуры	64
§3.5. Особенности влияния радиационных дефектов после облучения	
быстрыми нейтронами на фотопроводимость кремния	66
§3.6. Влияние быстрых нейтронов на электрофизические свойства	
ядерно-легированного кремния <i>р</i> -типа	71
§3.7. Исследование времени жизни носителей заряда в нейтронно-	
легированном кремнии в зависимости от концентрации исходного	
бора	77
Вывод	81
ГЛАВА IV. РАЗРАБОТКА СПОСОБА ПОЛУЧЕНИЯ	
ДЕТЕКТОРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПОТОКА НЕЙТРОНОВ НА	
БАЗЕ ЯДЕРНО-ТРАНСМУТАЦИОННОГО КРЕМНИЯ	83
§4.1. Определение потока нейтронов ядерного реактора	
полупроводниковыми детекторами	83
§4.2. Оптимизация параметров кремниевых детекторов в потоке	
нейтронов	86
§4.3. Технология получения нейтронно-легированного кремния для	
детектора измерения плотности потока нейтронов	92
§ 4.4. Изготовление образцов кремниевых детекторов для измерения	
потока нейтронов	94
§4.5. Плотность потока медленных нейтронов на девятом канале	
ядерного реактора BBP-CM	96
Вывод	98
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	100
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	103
Приложения	119

### ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

- N<sub>p</sub> концентрация атомов фосфора
- φ интенсивность потока нейтронов
- t- длительность облучения
- ρ- удельное сопротивление
- n- концентрация носителей заряда (электронов или дырок)
- К<sub>n</sub> коэффициент радиационного повреждения по проводимости
- Ф- флюенс нейтронов
- F положение уровня Ферми
- N<sub>c</sub> -эффективная плотность состояний у дна зоны проводимости
- ТКС температурный коэффициент сопротивления (обозначение α)
- В- коэффициент температурной чувствительности
- R- электросопротивление
- РД радиационные дефекты
- ТД точечные дефекты
- ЛО лазерный отжиг
- ТО термический отжиг
- ПД примесные дефекты
- РО разупорядоченная область
- ЯТ ядерная трансмутация
- n-Si<B,P> компенсированный кремний с наведенными атомами фосфора
- p-Si<B,P> компенсированный кремний с наведенными атомами фосфора
- НЛК нейтронно-легированный кремний
- НЛД нейтронно-легированный кремниевый детектор
- ТРУ терморегистрирующее устройство
- ГЭУ глубокий энергетический уровень
- ИЛС ионно-лучевой синтез

#### ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. В настоящее время полупроводниковые материалы являются одним из самых широко используемых элементов твердотельной электроники. Они нашли свое применение в качестве фото- и термодатчиков, детекторов ядерных излучений в различных областях и, в том числе, в науке, технике и промышленности. К примеру, фото- и термодатчики различной конструкции широко применяются для контроля зависящих от температуры параметров в металлургической промышленности, нефтебазах, производстве химических соединений, контроле температуры и влажности при длительном хранении сельскохозяйственной продукции В помещениях общественного И назначения, а также в составе электронных термометров. Основным требованием к базовым материалам, В частности, применяемым В изготовлении терморезисторов, как известно, является высокая чувствительность электрического сопротивления материала к воздействию физическим свойствам в зависимости от базового температуры. По материала терморезисторы разделяются на две группы с положительным и отрицательным температурным коэффициентом сопротивления. Диапазон температурной чувствительности терморезисторов определяется электрофизическими параметрами и характеристиками материала. Изменяя параметры и характеристики базового материала можно регулировать температурную зависимость сопротивления терморезистора в широких пределах.

В последние годы в мире интенсивно разрабатываются и производятся разные виды терморезисторов в разных конструктивных исполнениях на базе полупроводников, оксидных диэлектрических материалов и различных сплавов. Для изготовления терморезисторов широко используются полупроводниковые материалы и соединения, позволяющие создавать

различные датчики температур, детекторы ядерных излучений, одним из которых является монокристаллический кремний с высоким удельным сопротивлением. Получение такого материала в промышленных условиях требует достаточно весомых затрат, обусловленных очисткой материала и сложностью получения радиально однородного кремния по удельному сопротивлению. На практике для реализации этих задач широко применяется метод легирования кремния различными компенсирующими примесями, как в процессе выращивания, так и методами высокотемпературной диффузии, высокоэнергетическим электронов облучения потоком или ионной имплантации. Недостатком перечисленных методов является то, что они не позволяют получать терморезисторы с одинаковым удельным сопротивлением путем легирования образцов по объему. Поэтому разработка терморадиационных датчиков терморезисторов с однородным распределением легированного элемента, позволящих получать одинаковое актуальной, a разработка удельное сопротивление является метода радиационной технологии получения их облучением потоком нейтронов является решением этих проблем.

В настоящее время в нашей республике развиваются новые способы получения материала с заданными свойствами и параметрами, основанные на формировании в матрице базового материала терморезисторов компенсирующих дефектных состояний с использованием радиационной технологии. В связи с этим, исследования и разработка новых способов повышения однородности параметров и характеристик базовых материалов, применительно к детекторам ядерных излучений, датчикам температур и расширение диапазона температурной чувствительности датчиков, являются одной из актуальных проблем современной твердотельной электроники и смежных отраслей науки и техники.

Исследования, проведенные в данной диссертационной работе, соответствуют задачам, предусмотренным в Указах Президента Республики

Узбекистан № УП-4947 от 2 февраля 2017 года «О Стратегии<sup>1</sup> действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан на 2017–2021 гг.», № УП-4958 от 16 февраля 2017 года «О дальнейшем совершенствовании системы послевузовского образования», в Постановлении Президента Республики Узбекистан № ПП-2789 от 17 февраля 2017 года «О мерах по дальнейшему совершенствованию деятельности Академии наук, организации, управления и финансирования научно-исследовательской деятельности», а также в других нормативно-правовых документах, принятых в данном направлении.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики. Диссертационная работа выполнена в рамках приоритетных направлений развития науки и технологий республики II. «Энергетика, энергосбережение и альтернативные источники энергии».

Степень изученности проблемы. Изучением целенаправленного изменения электрофизических параметров кремния методом легирования компенсирующими примесями или введением дефектных состояний занимаются ведущие ученые мира, например, российские (Асин С.С., Шевченко В.Г., Ионов А.Н.), американские (Michel Kozhuk), украинские (Shin'ichiro (Долголенко А.П. И др.), японские Takasu), a также узбекистанские (Муминов Р.А., Юнусов М.С., Каримов М., Бахадирханов М.К., Зайнобиддинов С.З., Махкамов Ш., Ёдгорова Д. М., Раджапов С.А. и д**р**.).

Анализ литературных данных и изданных монографий по легированным полупроводникам показывает, что существующие радиационные методы введения примесей при выращивании кристалла и диффузией, в основном, не позволяют достичь однородности легирования по всему объему кристалла, а степень компенсации от образца к образцу,

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Указ Президента Республики Узбекистан № УП-4947 «О Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан» от 7 февраля 2017 г.

больших существенных пределах. Использование изменяется В радиационной компенсации кремния потоком быстрых электронов ограничивается диапазоном, энергией и однородностью пучка, а также размерами облучаемого кристалла. Введение компенсирующих примесей ионной имплантацией позволяет получить компенсированный материал с определенной толщиной (в зависимости от энергии ионов до нескольких микрон). При этом компенсация объема базового материала не происходит, и изготавливать терморезисторы на базе компенсированного слоя в несколько микронов с необходимым геометрическим размером практически сложно.

В связи с вышеизложенным, решение задачи получения однородного высокоомного полупроводникового материала требует поиска и разработки новых подходов и методов введения компенсирующих примесей или дефектных состояний. Одним ИЗ новых подходов таких ДЛЯ целенаправленного управления свойствами и параметрами кремния является введение радиационной обработкой компенсирующих дефектов, имеющих образованию электрически склонность К активных комплексов с технологическими примесями базового материала по всему объему.

Связь темы диссертационного исследования с планами научноисследовательских работ научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертация. Диссертационное исследование выполнено в рамках научно-исследовательских проектов Института ядерной физики Академии наук Республики Узбекистан по темам: № ФА-А14-Ф63 «Разработка технологии получения нейтроно-компенсированного кремния для терморезисторов» (2009-2011), № АЗ-ФА-Ф124 «Разработка технологии получения высоко компенсированного кремния методом радиационной обработки и датчиков на его основе» (2012-2014), № ФА-А14-Ф063 «Разработка устройства дистанционного контроля температуры и влажности в хранилищах на основе датчика из компенсированного кремния» (2015-

2017) и теми «Радиационно - стимулированные процессы при ядерной трансмутации легированного монокристаллического кремния» (2020-2024).

**Целью исследования** является разработка радиационной технологии получения компенсированного монокристаллического кремния с атомами фосфора и терморадиационных датчиков на их основе.

#### Задачи исследования:

изучить влияние исходных технологических примесей и электрофизических параметров кремния на степень компенсации кремния при радиационной обработке;

осуществить легирование кремния атомами фосфора с максимальной степенью компенсации радиационной обработкой потоками медленных нейтронов атомного реактора;

определить оптимальный режим радиационной и термической обработки для получения нейтронно легированного кремния (НЛК) и высокоомного однородно – компенсированного кремния *i*-типа;

разработать технологию получения высокочувствительных детекторов ядерного излучения и термо- и фоторезисторов с удельным сопротивлением 100÷170 Ом·см, на основе НЛК элементов датчиков извещателей пожара, работающих в интервале температур 273÷398 К;

разработать способ экспрессного определения плотности потока медленных нейтронов, атомного реактора по изменению электросопротивления кремния *n*-типа;

испытать лабораторный макет терморадиационных датчиков на основе компенсированного кремния, определить электрофизический параметр и область их применения.

Объектами исследования являются нейтронно-легированные и радиационно-обработанные монокристаллические кремний и терморадиационные датчики, детекторы для измерения потока нейтронов на их основе.

**Предметом исследования** являются нейтронно-стимулированные процессы в компенсированном кремнии и способ разработки датчиков для контроля температуры среды и плотности потока нейтронов атомного реактора.

Методы исследования. Метод облучения нейтронами, электрические методы измерения сопротивления резистора в зависимости от температуры; измерение концентрации носителей заряда; измерение удельного сопротивления кремния методом Холла.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

выявлены оптимальные режимы радиационной и термической обработки промышленных образцов *p*- и *n*-типов кремния для получения компенсированного монокристаллического кремния с номинальным удельным сопротивлением (4÷8)·10<sup>5</sup> Ом·см;

предложен способ получения высокоомного кремния для изготовления терморадиационного датчика и разработан термодатчик на основе компенсированного кремния, работающего в интервале температур 273÷398 К для системы пожарного извещателя;

разработаны способ и датчик экспрессного определения плотности потока нейтронов исследовательского атомного реактора BBP-CM, основанный на изменении электросопротивления кремния *n*-типа с исходным удельным сопротивлением 1÷5 Ом·см;

установлено, что терморезисторы с *n<sup>+</sup>-n-n<sup>+</sup>* структурой после эксплуатации практически восстанавливают электрофизические параметры при повторной термообработке до температуры 473 К.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

разработан и защищен патентом способ изготовления термочувствительных  $n^+$ -n- $n^+$  структур на основе компенсированного кремния n-типа с радиационными дефектами, позволяющий определять температуру в интервале 273÷398 К;

предложена и освоена технология получения радиационных датчиков на основе ядерно-легированного монокристаллического кремния и показана возможность их использование для измерения плотности потока нейтронов атомного реактора;

показана возможность создания высокочувствительных фото- и терморезисторов из кремния *n*-типа с удельным сопротивлением 100÷170 Ом.см путем облучения быстрыми нейтронами и установлен предел чувствительности полученных резисторов.

Достоверность результатов исследований обосновывается применением современных и высокоточных методов и приборов, а также научно обоснованными теоретическими и практическими исследованиями. С применением хорошо известных и обоснованных технологических способов обработки образцов, предложенная методика радиометрических исследований защищена патентом и апробирована на разных кремниевых приборах.

Научная и практическая значимость результатов исследования. Научная значимость результатов заключается в определении закономерностей изменений электрофизических параметров в зависимости от температуры  $n^+$ - n - $n^+$  структур, образованных в монокристаллах кремния, в потоке быстрих и медленных нейтронов исследовательского атомного реактора BBP-CM.

Практическая значимость результатов исследования заключается в том, что разработанный способ получения  $n^+$ - n - $n^+$  структур позволяет повысить чувствительность терморадиационных датчиков и существенно снизить подобных изделий. В стоимость производства частности, ДЛЯ пациента дистанционного определения температуры В медицинских учреждениях можно применять электронные термометры, разработанные на основе вышеуказанных структур.

Внедрение результатов исследования. На основе полученных результатов по разработке терморадиационных датчиков на основе нейтронно-легированного монокристаллического кремния:

выявленные оптимальные режимы радиационной и термической обработки промышленных образцов *р*-и п-типов для получения компенсированного монокристаллического кремния с номинальным удельным сопротивлением в интервале  $(4 \div 8) \cdot 10^5$  Ом·см были использованы в АО «Foton» для изготовления терморадиационных датчиков (Письмо ассоциации «Uzeltexsanoat» № 04-3/1307 от 14.07.2021 г.). Использование научных результатов позволило получить терморезисторы с заданными и улучшенными относительно зарубежных аналогов характеристиками;

предложенный способ получения высокоомного кремния ДЛЯ изготовления терморадиационного датчика и разработанная технология изготовления термодатчика основе компенсированного на кремния, работающего в интервале температур 273÷398 К зарегистрированы в Агентстве по интеллектуальной собственности Республики Узбекистан (патент РУз ІАР № 04796, 29.11.2013). Использование данной разработки позволило изготовить терморезисторы для системы пожарного извещателя;

разработаный способ экспрессного определения плотности потока медленных нейтронов исследовательского атомного реактора В Агентстве интеллектуальной собственности зарегистрирован ПО Республики Узбекистан (патент РУз IAP №05339, 11.01.2017). Использование данной разработки позволило расширить диапазон контроля потока медленных нейтронов на реакторе BBP-CM от 10<sup>10</sup> до  $10^{18}$ нейтронов/см<sup>2</sup>;

установленная возможность восстановления параметров терморезисторов с  $n^+$ -n- $n^+$  структурой после эксплуатации при повторной термообработке до температуры 473 К была использована в AO «Foton» при производстве диффузионных терморезисторов (Письмо ассоциации

«Uzeltexsanoat» № 04-3/1307 от 14.07.2021 г.). Использование научных результатов позволило изготовить диффузионные терморезисторы на основе кремния *n*-типа.

Апробация результатов исследования. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 11 Международных и республиканских конференциях.

Опубликованность результатов исследований. По теме диссертации получены 2 патента Республики Узбекистан, опубликованы 16 научных работ, из них 3 статьи в научных изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов докторских диссертаций, 2 из которых в реферируемом международном журнале.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и приложения. Объем диссертации составляет 126 страницы.

### Список опубликованных работ:

1. Патент на изобретение РУз № ІАР 04796. Способ изготовления кремниевых терморезисторов / Каримов М., Махкамов Ш., Турсунов Н. А., Махмудов Ш. А., Сулаймонов А.А. // Агентство по интеллектуальной собственности РУз. - 29.11.2013.

2. Патент на изобретение РУз № ІАР 05339. Способ измерения плотности потока нейтронов кремниевым детектором *n*-типа / Каримов М., Махкамов Ш., Турсунов Н.А., Махмудов Ш.А., Саттиев А.Р., Сулаймонов А.А., Рафиков А.К. // Агентство по интеллектуальной собственности РУз. - 27.04.2017.

3. Каримов М., Махкамов Ш., Махмудов Ш.А., Муминов Р.А., Рахматов А.З., Сандлер Л.С., Саттиев А.Р., Сулаймонов А.А., Турсунов Н.А. Особенности

влияния радиационных дефектов на фотопроводимость кремния, облученного быстрыми нейтронами // Международный журнал Гелиотехника. – Ташкент: Физико-технический институт, 2010. - № 4. - С.64-66. (01.00.00. №1)

4. Махмудов Ш.А., Махкамов Ш., Каримов М., Сулаймонов А,А., Рафиков А.К., Эргашев Х.А. Исследование времени жизни носителей заряда в нейтронно-легированном кремнии в зависимости от концентрации исходного бора // Научно-технический журнал Ферганского политехнического института, спец выпуск. – Фергана, 2014. - С. 135-137. (05.00.00. № 20)

5. Ташметов М.Ю., Махмудов Ш.А., Сулаймонов А.А., Рафиков А.К. Фотодатчики на основе нейтронного легированного кремния // Международный журнал Гелиотехника. - Ташкент: Физико-технический институт, 2018. - № 6. - С.61-63. (01.00.00. №1)

6. Махмудов Ш.А., Махкамов Ш., Каримов М., Сулаймонов А,А., Рафиков А.К., Эргашев Х.А. Исследование времени жизни носителей заряда в нейтронно-легированном кремнии в зависимости от концентрации исходного бора // Труды 3-ей Международной конференции по оптическим и фотоэлектрическим явлениям в полупроводниковых микро- и наноструктурах, 14-15 ноября 2014. - Фергана, 2014. - С. 262-264.

7. Махкамов Ш., Махмудов Ш.А., Бегматов К.А., Рафиков А.К., Сулаймонов А.А., Эргашев Х. Влияние концентрации бора на время жизни носителей заряда в нейтронно-легированном кремнии // Сборник докладов Международной конференции «Современные материалы и технологии», 21-23 октября 2015. – Тбилиси (Грузия), 2015. - С.-90-92.

8. Каримов М., Махкамов Ш., Махмудов Ш.А., Муминов Р.А, Рахматов А.З., Сандлер Л.С., Саттиев А.Р., Сулаймонов А.А., Турсунов Н.А. Фоторезистор на основе компенсированного кремния с радиационными дефектами // «Фундаментальные и прикладные вопросы физики»: Материалы

конференции, посвященной 80-летию академика М.С. Саидова, 24-25 ноября 2010. – Ташкент: НПО «Физика-Солнце» АН РУз, 2010. –С.207-208.

9. Makhkamov Sh., Tahsmetov M.Yu., Makhmudov Sh.A., Sulaimonov A.A., Rafikov A.K. Thermal resistor based on the compensated silicon // The International Symposium "New Tendencies of Developing Fundamental and Applied Phusics: Problems, Achievement, Prospectives", November 10-11, 2016. – Tashkent, 2016. - P.-383.

10. Makhkamov Sh., Tahsmetov M. Yu., Makhmudov Sh.A., Sulaimanov A.A., Rafikov A.K. Influense of disordered fields of compensated silicon on formation of radiation of defects at gamma – irradiation. // The International Symposium "New Tendencies of Developing Fundamental and Applied Phusics: Problems, Achievement, Prospectives", November 10-11, 2016. - Tashkent, 2016. - P.384.

11. Ташметов М.Ю., Махкамов Ш., Махмудов Ш.А., Сулаймонов А.А., Рафиков А.К. Термо- и фотодатчики на основе нейтронно-компенсированного кремния // International Scientific Forum "Nuclear science and technologies" dedicated to the 60<sup>th</sup> anniversary of the Institute of Nuclear Physics. "Nucleus-2017" September 12-15, 2017. - Almaty, Republic of Kazakhstan, 2017. - P.221.

12. Махмудов Ш.А., Сулаймонов А.А., Маматкаримов О.О., Хайитов Д. Влияние термического воздействия на электрофизические свойства нейтронно-легированного кремния *p*-типа // «Неравновесные процессы в полупроводниках и в полупроводниковых структурах»: Материалы II Международной конференции, 12-14 ноября 2009. - Ташкент, 2009. - С. 70-72.

13. Каримов М., Махкамов Ш., Турсунов Н.А., Махмудов Ш.А., Сулаймонов А.А. Термодатчики на основе кремния компенсированного радиационными Неравновесные дефектами || процессы В полупроводниках И в полупроводниковых структурах: Материалы Π Международной конференции, 12-14 ноября 2009. - Ташкент, 2009. - С. 125-126.

14. Каримов М., Махкамов Ш., Турсунов Н.А., Махмудов Ш.А., Рафиков А.К., Сулайманов А.А. Способ изготовления кремниевых терморезисторов на основе радиационной технологии // Материалы республиканской научно-практической конференции "Инновации и инновационные технологии на производстве и высшем образовании". 2- том. – Андижан, 2013. -С. 171-174. 15. Ташметов М.Ю., Сулаймонов А.А., Махмудов Ш.А., Рафиков А.К. Высокоомный температурно чувствительный резистор на основе нейтронно легированного кремния // Седьмая Международная конференция по физической электронике IPEC-7: Тезисы докладов, 18-19 мая 2018. – Ташкент, 2018. – С.-162.

16. Ташметов М.Ю., Сулаймонов А.А., Махмудов Ш.А., Рафиков А.К. Фотодатчики основе нейтронного на легированного кремния || Фундаментальные прикладные вопросы физики»: Материалы И конференции, 25-26 сентября 2018.- Ташкент: НПО «Физика-солнце» АН РУз, 2018. - С.93-95.

# ГЛАВА І. СПОСОБЫ ПОЛУЧЕНИЯ ЛЕГИРОВАННОГО МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ

В настоящее время датчики измерения температуры, температурные извещатели пожаров, датчики контроля температуры в хранилищах и в "активных" средах широко применяются в повседневной жизни. Существует множество типов датчиков температуры, которые производятся во многих странах.

Пожарные извещатели являются одними из востребованных, которые срабатывают на изменение температуры и появление дыма. Особенно, датчики используемые на изменение температуры в интервале 303÷373 К, имеют высокую потребность, что обусловлено широким спектром их применения. Многие датчики температуры чувствительные на изменение температуры имеют относительно высокую погрешность, например при температуре 323 К погрешность ±2,5 К [1; с.468-478, 500-509], а с увеличением температуры значение погрешности растет. Важным пожарных извещателей недостатком многих датчиков является "длительное" время срабатывания-оповещения о пожаре, быстрый износ (коррозия) покрытий датчика, а также высокая возможность появления искры в контактах (при прохождении тока). Еще одним недостатком является то, что с увеличением расстояния между датчиками растет погрешность определения температуры в здании, помещении.

Датчики, которые реагируют на появление дыма, "срабатывают" после возгорания и образования дыма из-за прерывания приема сигнала за счет появления среды, не проводящий сигнал между передающей и принимающей частями датчика. В этом случае велика вероятность ущерба большей части зданий, помещений от "запаздалого" срабатывания пожарной сигнализации.

Необходимо отметить, что, в принципе, возможно использовать в качестве элемента датчика температуры полупроводниковые монокристаллы,

легированные другими элементами [2; с.03037]. Однако существуют проблемы с неоднородностью распределения легированного элемента по всему объему кристалла, что затрудняет использование монокристалла относительно большого размера.

Полупроводниковые материалы, особенно особо чистый кремний и германий используются в датчиках-детекторах ядерных излучений, в частности нейтронов [3; с.48-52, 136-149], которые имеют хорошее разрешение. Однако у них имеются недостатки, например, германий является дорогим элементом, для использования германия и кремния в датчикахдетекторах необходимо их укомплектовать системой охлаждения (сосуд Дьюра с жидким азотом) и предусилителем, обеспечить высоковольным питанием и цифровым анализатором [4; с.187].

Необходимо отметить, что существуют также другие типы датчиковдетекторов для регистрации нейтронов, такие как, жидкие [4; с.153], пленочные, твердотельные, газовые и другие, каждый из которых имеет свои преимущества и недостатки и основан на вылете заряженных частиц (ядерная реакция) [4; с.152], гамма излучении, делении ядер и т.д. Некоторые из них позволяют определить спектр нейтронов, некоторые предназначены для регистрации тепловых или медленных нейтронов, а другие для определения спектра падающих нейтронов. Однако, в основном, многим из них необходимо относительно больше времени для регистрации и определения потока нейтронов, расшифровки спектра нейтронов. Также, многие из них в принципе невозможно использовать в некоторых особых условиях, например, при определении потока нейтронов ядерного реактора.

Представляется возможным использование полупроводникового кремния в качестве датчика температуры и датчика (детектора) потока нейтронов, при "установлении" линейной зависимости электросопротивления от температуры и от потока нейтронов ядерного реактора. Использование в качестве датчика монокристалла кремния

основано на его легировании другими элементами и последующей обработки. Легирование является основапологающим способом получения монокристаллического кремния с необходимыми электрофизическими параметрами, которое осуществляется разными методами [5; с.264-293], в том числе облучением кремния нейтронами [6; с.6], электронами [7; с.11].

В связи с этим, рассмотрим методы легирования монокристалла кремния для выявления оптимального способа легирования, позволяющего получить однородное распределение легирующего элемента по всему объему кристалла и с линейной зависимостью сопротивления от температуры, потока нейтронов.

### § 1.1. Легирование кремниевых кристаллов при выращивание

Как известно, введенные в кремний примесные дефекты с глубокими энергетическими уровнями (ГЭУ) путем технологических процессов или радиацией являются термодинамически неустойчивыми. Поэтому такая система стремится к равновесному состоянию путем распада. Распад примесных И радиационных дефектов приводит к изменению электрофизических и рекомбинационных свойств кремния и параметров приборов на его основе, т.к. в процессе распада дефекты переходят в новые состояния, представляющие собой комплексы, которые могут образовывать дополнительные энергетические уровни в запрещенной зоне кремния. Поэтому распада изменением изучение процессов с температуры представляет большой научный и практический интерес.

Кроме того, в большинстве опубликованных работ [8; с.15, 9; с.9, 10; с.87-93, 11; с.17, 12; с.12-20, 13; с.132-201, 14; с.36-54, 15; с.110-111, 16; с.11-16] отмечается активное участие собственных дефектов в образовании дефектных комплексов с примесьями, создающих ГЭУ с первичными радиационными дефектами, особенно с вакансиями (V). Поэтому

исследование электрофизических и рекомбинационных явлений в кремнии с ГЭУ также является весьма актуальной задачей, поскольку сведения, получаемые в этих исследованиях, позволяют решить проблему о структуре и природе глубоких энергетических уровней в полупроводниковых материалах.

Энергетическое положение уровней. Изолированные атомы примесей и их комплексы вносят глубокие энергетические уровни. Данные по энергетическому положению уровней, полученные различными экспериментальными методами [17; с.305-310, 18; с.186-223], представлены в табл.1.1. Типы и взаимодействия собственных и примесных дефектов и дефектных комплексов приведены в табл.1.2.

Как видно из таблицы 1.1 3d- элементы и их комплексы являются термически нестабильными, т.е. с повышением температуры они легко образуют преципитаты образования твердой фазы в растворе. Кроме того, фазовая граница переходной области «примесь – кремний» в большинстве случаев обогащена силицидами, т.е. соединениями типа MSi<sub>2</sub> [19; с.8-15, 20; с.7-30]. Однако эти включения обладают повышенной электропроводностью, и необходимо предотвращать их появление в активной области кремниевых пластин.

Изменение электрофизических свойств кремния связано с созданием в его запрещенной зоне в процессе термического воздействия сложного спектра локальных уровней (термодефектов). Источником этих термодефектов (ТД) может быть, как поверхность, так и объем кристалла.

## Ковалентные радиусы, типы дефектов и их энергетически уровни от

Элемент	Ковалентные радиусы	Тип	$\gamma_{\rm Hencetheckhe vnobility}$	
JIEMEHI	элементов, Å	центров	Энергетические уровни, эв	
	1,17	А	Е <sub>с</sub> - (от 0,15 до 0,21) эВ,	
Ni		А	Е <sub>с</sub> - (от 0,36 до 0,47) эВ	
		А	E <sub>v</sub> + (от 0,31 до 0,35) эВ,	
		А	Е <sub>v</sub> + (от 0,15 до 0,21) эВ	
	1,18	А	Е <sub>с</sub> - (от 0,20 до 0,24) эВ,	
		D	Е <sub>с</sub> - (от 0,38 до 0,41) эВ	
Co		А	E <sub>v</sub> + (от 0,38 до 0,40) эВ,	
		А	Е <sub>v</sub> + (от 0,20 до 0,23) эВ	
		А	$E_c - 0,53$ эВ	
Cr	1 10	D	$E_{c} - 0,41 \ \Im B,$	
CI	1,19	А	$E_v + 0,11 \ \Im B$	
Ma	1,19	D	$E_c - 0,20 \ \Im B, E_c - 0,42 \ \Im B$	
IVIn		А	$E_v + 0.54 \Im B$	
Fe	1,2	D	$E_{c} - 0,55$ 3B, $E_{v} + 0,40$ 3B	
Cu	1,25	D	Е <sub>с</sub> - (от 0,15 до 0,20) эВ,	
		А	Е <sub>v</sub> + (от 0,20 до 0,24) эВ	
		А	E <sub>v</sub> + (от 0,41 до 0,46) эВ,	
		А	E <sub>v</sub> + (от 0,09 до 0,10) эВ	
Rh	1,27	А	$E_{c} - 0,32 \ \Im B,  E_{c} - 0,53 \ \Im B$	
Ir	1 20	D	$E_{c} - 0,32 \ \Im B,$	
	1,28	А	$E_c - 0,56$ эВ	
Pt	1,3	А	E <sub>c</sub> - 0,24 эВ, E <sub>c</sub> + 0,53 эВ	
		А	$E_v + 0.36 \Im B$	
		D	$E_v + 0,30 \ \Im B$	
Ag	1 40	D	Е <sub>с</sub> - 0,37эВ, Е <sub>с</sub> - 0,53 эВ	
	1,42	А	$E_v + 0,29 \ \Im B, \ E_v + 0,43 \ \Im B$	
٨	1 42	А	Е <sub>с</sub> - 0,54 эВ,	
Au	1,43	D	$E_v + 0,35 \ \Im B$	

легированных примесей в кремнии. (А-акцептор, D-донор)

### Таблица 1.2

Дефект и его комплексы	Энергетический	Тип центров
	уровень, эВ	
	$E_{c}+0,09$	Α
Doronoug	$E_{c}+0,11$	D
Вакансия	E <sub>v</sub> +0,2	А
	E <sub>v</sub> +0,05	D
	E <sub>c</sub> - 0,23	А
Пироконона	E <sub>c</sub> - 0,4	А
дивакансия	E <sub>c</sub> - 0,54	D
	E <sub>v</sub> + 0,21	D
Вакансия- кислород (А-центр)	E <sub>c</sub> - 0,18	А
Вакансия- фосфор (Е-центр)	E <sub>c</sub> - 0,4	А
Вакансия-бор	$E_v + 0,45$	D
Вакансия-алюминий	E <sub>v</sub> +0,48	D
Междоузельный углерод- узловой углерод	E <sub>c</sub> - 0,16	D
Междоузельный углерод	E <sub>v</sub> +0,27	D

Типы и энергетические уровни дефектов и их комплексов в кремнии

Действительно, реальная поверхность кремния В процессе технологической обработки может загрязняться такими примесями, как Au, Fe, Cu, Ni и др. [16; c.11-16, 21; c.30-35]. Так как эти примеси имеют при высоких температурах большие коэффициенты диффузии, то при соответствующей термообработке они проникают в объем кристалла, изменяя его параметры (особенно, время жизни носителей заряда - т). С другой стороны, в процессе термообработки (ТО) может наблюдаться изменение состояния примесей в объеме кремния: т.е. их переход из электрически неактивного состояния в электрически активное и наоборот (П<sub>неакт</sub>. ≒ П<sub>акт</sub>). При любом механизме образования ТД существенную роль в их результирующей концентрации и типе играет скорость охлаждения.

# § 1.2. Высокотемпературное диффузионное легирование пластин кремния

При изготовлении полупроводниковых структур используются монокристаллы Si, легированные в основном элементами III и V групп, которые выполняют роль, соответственно, акцепторов или доноров [22; с.85-90]. Источниками примесей могут быть как чистые элементы, так и их разнообразные соединения с другими элементами, практически не растворяющимися в полупроводнике или не оказывающими существенного влияния на наиболее важные электрофизические и рекомбинационные свойств.

Источники примеси наносятся на поверхность полупроводника, или фиксируются вблизи него из газовой фазы.

Для наносения локального источника диффузии, распологаемых на поверхности полупроводника применяют газообразные, жидкие и твердые внешние примеси.

При выборе метода проведения диффузии и источника диффузанта, в первую очередь, необходимо исходит из технологичности и воспроизводимости процесса легирования, экологических особенностей и экономичности.

Источниками диффузанта являются пленки, наносимые на поверхность полупроводника. Пленки ряда материалов, например, [23; с.4] Au и Al, могут наноситься методом термического испарения соответствующего металла. Толщина пленок определяется требуемым количеством примеси, которое должно быть введено в полупроводник. В большинстве случаев оно [23; с.4] соответствует нескольким монослоям, т.е. толщина пленок составляет [23;

с.4] порядка нанометра. Высокотемпературная обработка, в процессе которой [23; с.4] идет диффузия примеси, может выполняться на воздухе (если не опасно окисление поверхности подложки), в атмосфере нейтрального газа  $(N_2, Ar)$  или в вакууме. Воспроизводимость параметров диффузионного слоя в этом случае определяется количеством нанесенной примеси, температурой и длительностью высокотемпературной обработки [22; с.85-90, 23; с.4, 24; с.3-12, 25; с.3-7]. Температура обычно должна контролироваться и воспроизводиться с точностью порядка [23; с.4]  $\pm$  2 К (лучше  $\pm$ 0,2 К), а длительность процесса с точностью порядка нескольких секунд при общей минимальной длительности [23; с.4] обработки несколько минут. На воспроизводимость процесса оказывает влияние атмосфера, поскольку, например, слой оксида, вырастающего на поверхности пластины, может захватывать часть примеси, а в нейтральной атмосфере примесь может частично испаряться с ее поверхности [23; с.4, 26; с.2-7]. Толщина пленок обычно выбирается достаточно большой [23; с.4], чтобы в полупроводник диффундировала только часть имеющейся в пленке примеси [23; с.4]. С технологической точки зрения высокотемпературный способ диффузии имеет ряд таких преимуществ, как дешевизна и универсальность, но при этом невозможность обеспечения равномерности глубины диффузии внедряемых атомов и довольно высокая степень эрозии поверхности пластин кремния сильно ухудшают качество изделий.

Для перекомпенсированных образцов кремния способ направленной диффузии атомов фосфора из-за малой глубины диффузии [27; с.175-181, 28; с.2-8, 29; с.647-654] является нежелательным.

#### § 1.3. Имплантационное легирование кремния

Ионное имплантация примесных атомов в кремний происходит в результате бомбардировки ионами атомов данных элементов при энергиях

от 10 до 100 кэВ пластин или эпитаксиальных пленок кремния. Из-за высокой точности управления концентрацией и глубиной имплантации любого примесного атома В кремний, метод имеет большой исследовательский потенциал, но не свободен от тех же недостатков, что и метод диффузионного легирования [30; с.60-61]. Одной из преимуществ метода ионной имплантации является его универсальность. Используя пучки ускоренных ионов обычных масс-спектрометров, можно вводить любую примесь (если необходимо – изотопно-чистую) в любой кристалл [31; с.348-357, 32; c.80, 33; c.25-32].

Процесс облучения кристаллов осуществляется при комнатной температуре. Однако после ионного легирования, необходимо отжигать образцы для устранения аморфного слоя, возникающего под действием ионной бомбардировки. Вопрос устранения дефектов имеет принципиальное Уже значение для ионного легирования полупроводников. первые пучками эксперименты ионными показали, что возможности С практического применения нового метода в каждом конкретном случае зависят [32; с.80] от возможности восстановления упорядоченной структуры решетки после ионной бомбардировки [20; с.27-35, 32; с.80].

Регулируя энергию (*E*) и дозу (*D*) ионов по заданной программе, а также используя ориентационные эффекты, можно в широких пределах варьировать профиль распределения примеси в ионно-внедренном слое [32; с.16-23].

Возможность управления профилем концентрации "вбитых" атомов – это существенное преимущество ионного легирования, так как электрические свойства *p*–*n* -перехода и создаваемые на их основе приборы зависят от распределения примесей вблизи перехода [32; с.80].

Все дефекты решетки, индуцированные ионной бомбардировкой можно устранить термическим отжигом.

#### § 1.3.1. Термический отжиг имплантированных слоев

После имплантации ионов фосфора в монокристаллический кремний дозой, превышающей порог аморфизации, большая часть примеси оказывается в аморфизованной части имплантированного слоя, в которой примесь не проявляет донорных свойств. Меньшая часть примеси остается в не аморфизованной части имплантированного слоя, в котором лишь небольшая ее часть занимает узлы кристаллической решетки, проявляя электрическую активность. Как видно из [11; с.2-15, 27; с.175-181, 34; с.93-98], активация фосфора происходит в три этапа, в которых "работают" различные механизмы активации. На первых двух этапах "работают" механизмы, связанные со встраиванием атомов примеси в кристаллическую решетку кремния и с отжигом радиационных дефектов, создающих компенсирующие уровни в запрещенной зоне [11; с.2-15, 31; с.348-357, 35; с. 263-269].

Кинетика активации на этих этапах имеет экспоненциальный характер, обнаруженный еще в ранних работах по отжигу кристаллических имплантированных слоев кремния [31; с.348-357, 36; с. 86-93]. Найденные энергии активации с значениями  $E_1=1,20$  эВ,  $E_2=1,54$  эВ соответствуют литературным данным [31; с.348-357, 34; с.93-98, 37; с.105-118]  $E_a=0,15 \div 0,26$  эВ до  $E_a=0,77 \div 1,59$  эВ для отжига слоев кремния, имплантированных фосфором [32; с.80, 34; с.93-98].

Для формирования скрытого эпитаксиального слоя полупроводникового дисилицида хрома в кремнии используется ионнолучевой синтез (ИЛС), заключающийся в имплантации ионов Cr<sup>+</sup> в монокристаллическую кремниевую подложку с энергией ионов 200 кэВ дозой 3·10<sup>17</sup> см<sup>-2</sup>. Следующей необходимой операцией ИЛС является высокотемпературный отжиг. Однако длительные термические обработки нежелательны поскольку приводят к существенной диффузии атомов металла вглубь кремния, что ведет к деградации параметров кремниевых приборов. В целях преодоления данного ограничения авторы [18; с.88-126, с.5-13, 39; с.28-30] использовали импульсную термообработку 38: имплантированных кремниевых слоев. В результате импульсного отжига при 1373 К в течение 40 с была сформирована структура Si(60нм)/CrSi<sub>2</sub> (100нм)/ Si(подложка). Ионно-лучевой синтез дисилицида железа β- FeSi<sub>2</sub> является достаточно распространенным методом формирования данного материала. Энергия Fe<sup>+</sup> варьируется в пределах 50 ÷ 1200 кэВ, дозы имплантации составляют 10<sup>16</sup>-10<sup>17</sup> см<sup>-2</sup>, а характерная температура процесса 593-623 К. Непосредственная имплантация ионов железа в кремний приводит, как правило, к формированию трех силицидных фаз: ε- FeSi, α- FeSi<sub>2</sub> и β- FeSi<sub>2</sub>. Для получения однофазной композиции необходим последующий отжиг, продолжительность которого варьируется от десятков секунд до нескольких часов. Поскольку β- FeSi<sub>2</sub> является низкотемпературной модификацией дисилицида железа, стабильной при температурах ниже 1210 К, то типичные температуры отжига имплантированных слоев составляют 973-1173 К [39; с.28-30, 40; с.22-24, 41; с.28-41], в которой силициды є- FeSi, а- FeSi<sub>2</sub> являются метастабильными.

Таким образом, в результате имплантации низкоэнергетических ионов железа  $Fe^+$  (E=50 кэВ) в кремний, с последующим отжигом имплантированной структуры при температуре 1173 К в течение 120 секунд, получены сплошные скрытые эпитаксиальные слои β- FeSi<sub>2</sub>(100) //Si(001). Имплантированные структуры подвергались отжигу при 373-1373 К в течение часа.

Также исследовано влияние промежуточного отжига на оптические свойства сформированного силицида рутения. Измерения коэффициента поглощения силицидных слоев в области энергий 0,7 до 1 эВ показали, что силицид рутения Ru<sub>2</sub>Si<sub>3</sub> является прямозонным полупроводником с шириной запрещенной зоны 0,9 эВ, что было подтверждено теоретическими расчетами

электронных и оптических свойств данного материала [39; с.28-30, 40; с.22-24, 42; с.23-109].

#### § 1.3.2. Лазерный отжиг полупроводников

Многие достижения последних лет в области полупроводниковой электроники в части улучшения характеристик приборов, уменьшения их размеров, увеличения выхода годных изделий, несомненно, связанны с применением технологии [43; с. 24] имплантационного легирования [44; с. 8-70]. Однако эти успехи были бы еще более впечатляющими, если бы удалось нейтрализовать основной недостаток этой технологии. После имплантации приповерхностная область монокристаллического полупроводника сильно нарушается вплоть до полной аморфизации [44; с. 8-70]. Кроме того, внедренная В полупроводник примесь находится, как правило, В электрически неактивном состоянии.

До недавнего времени для устранения радиационных дефектов и электрической активации внедренной примеси использовался термический отжиг (ОТ) образца в температурном интервале (573-1473 К) в течение 10-60 мин. в вакууме или в атмосфере инертных газов [45; с.1464-1473, 46; с.76]. Однако такой нагрев не полностью устраняет радиационные дефекты [44; с.8-70] и нарушения кристаллической решетки и к тому же приводит к целому ряду нежелательных последствий, таких, как ухудшение некоторых [47; с.140] электрических характеристик, декомпозиция подложки в случае сложных полупроводников, выпадение в осадок внедренной примеси, загрязнение поверхности слоя неконтролируемыми примесями, и наконец ограничения накладывает дополнительные на последовательность операций. большой технологических Поэтому интерес представляет принципиально новый метод устранения радиационных нарушений и электрической активации внедренной примеси в ионно-легированных

полупроводниках. Метод, который был назван авторами [45; с.1464-1473, 47; с. 140, 48; с.43-67] "лазерный отжиг" (ЛО) [47; с.140], заключается в том, что на имплантированный полупроводник воздействуют мощным импульсом светового излучения с определенной длиной волны, плотностью энергии и длительностью импульса. Уже в ходе первых экспериментов [44; с.8-70, 46; с.76, 49; с.330] были выявлены уникальные особенности лазерного отжига (ЛО) [47; с.140]. Однако, несмотря на [46; с.76] высокую активность в этой области (за последние годы опубликовано более 400 работ, посвященных лазерной обработке), еще рано утверждать, что проблема полностью решена. Хотя многие вопросы физики и техники ЛО достаточно хорошо изучены и поняты, однако даже вопрос о механизме (механизмах) лазерного отжига не получил окончательного ответа.

### § 1.4. Ядерное легирование монокристалла кремния

термостабильного и Получение однородного ПО электрическим параметрам представляет собой основную кремния трудность В промышленности. В связи с этим, в последнее время все большее внимание уделяется нейтронному легированию кремнию. Принципиальное отличие способа ядерной трансмутации, называемой нейтронным легированием заключается в том, что легирующая примесь – фосфор, не вводится в образуется исходный материал извне, a процессе облучения В непосредственно из атомов [50; с.236] кремния [51; с.48] путем ядерной трансмутации по реакции [52; с.18-25]:

$$^{30}_{14}Si(n,\gamma) \rightarrow ^{31}_{14}Si \xrightarrow{\beta} ^{31}_{2.64} \rightarrow ^{31}_{15}P$$
 (1.1)

Концентрация примеси фосфора (<sup>31</sup>P) - N<sub>p</sub>, образующегося в результате ядерной трансмутации части атомов кремния, определяется соотношением:

$$N_P = Nk \,\eta It, \tag{1.2}$$

где N – число атомов Si в 1 см<sup>-3</sup>; k – относительное содержание изотопа <sup>30</sup>Si (3.09 %);  $\eta$  – поперечное сечение поглощения нейтронов, ( $\eta$  – 0,11 барн); I – поток тепловых нейтронов, нейтр./см<sup>2</sup>·с; t – время облучения, с.; [52; с.18-25, 53; с.11].

Электрофизические свойства и однородность НЛК зависят от ряда факторов: условий облучения, величины интенсивности флюенса нейтронов, энергии нейтронного излучения, качества исходного монокристаллического кремния.

При производстве НЛК, кроме эффекта ядерных реакций с образованием новых химических элементов, как упоминалось выше, важную роль играет эффект радиационного повреждения нейтронно-облучаемого материала. Поэтому нейтронное легирование всегда сопровождается большим числом радиационных нарушений. Для избавления OT радиационных нарушений облученный материал подвергается термоотжигу в интервале 1073-1473 К в течение 0,5-2 ч., что практически полностью устраняет образующиеся РД и достигается стабильное значение удельного сопротивления, концентрации и подвижностей носителей заряда, а также [54; c.133-142]. значений времени жизни В процессе облучения монокристалла кремния в ядерном реакторе, изменяется концентрация носителей заряда в зависимости от флюенса быстрых нейтронов.

Несмотря на достаточно широкое применение НЛК в производстве полупроводниковых приборов, влияние проникающей радиации на электрофизические свойства НЛК к настоящему времени мало изучено. Причем, имеющиеся в литературе данные противоречивы.

В работе [55; с.17-18] наблюдали, что НЛК, полученный из исходного Si, выращенного в атмосфере аргона с ~10% примесью водорода, устойчивей к воздействию протонов с энергией ~30 МэВ, чем НЛК без примеси водорода. В НЛК с примесью водорода наблюдается меньшее количество дивакансий. Кроме того, нейтронно-легированный кремний *n*-типа проявляет

высокую стойкость к действию γ–квантов <sup>60</sup>Со, что связано с наличием в материале эффективных стоков (центров аннигиляции) для вакансий.

В работах [56; с.182, 57; с.317-320] излагаются результаты изучения влияния γ-квантов на электрические свойства *n*-Si и HЛК. Установлено, что характер изменения концентрации носителей, эффективность примеси и энергетические спектры возникающих радиационных дефектов В контрольных и НЛК образцах с ростом дозы облучения, в основном, одинаковы. При облучении у-квантами <sup>60</sup>Со образуются дефекты с энергетическими уровнями  $E_c$ -0,18 эВ ( $N_n$ =2·10<sup>-14</sup> см<sup>2</sup>),  $E_v$ +0,34 эВ ( $N_p$ =10<sup>-15</sup> см<sup>2</sup>), Е<sub>с</sub>-0,40 эВ (p<sub>n</sub>=2,5·10<sup>-15</sup> см<sup>2</sup>). Кроме того, авторы выше отмеченной работы также обнаружили, что в НЛК скорость образования Е-центров примерно на порядок меньше, а А-центров (E<sub>c</sub>-0,17 эВ) почти в 2 раза больше, по сравнению с контрольными образцами (в качестве контрольных образцов использовались зонные кристаллы кремния с близкими значениями, подвергнутыми термообработке в течение ~2 часов при 1073 К). Полученные результаты объясняются предположением о наличии в НЛК сформированных при высокотемпературной обработке электрически нейтральных примеснодефектных скоплений, представляющих собой стоки для генерируемых уквантами вакансий (V) и междоузельным атомом (I), а также насыщением материала кислородом при высокотемпературной диффузии на воздухе.

### Выводы к главе I

- Изучены типы и свойства известных собственных и примесных дефектов, проведен сравнительный анализ методов легирования примесей для получения структур с заданными свойствами в монокристалле кремния.
- 2. Проведен сравнительный анализ преимуществ и недостатков способа стабилизации примеси в нужном электрически активном состоянии,

(вследствие этого стабилизируется удельное сопротивление исследуемого образца).

3. На основе анализа литературных данных, в качестве наиболее оптимального, выбран способ термического отжига метастабильных состояний.

# ГЛАВА II. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБРАЗЦОВ

# § 2.1. Выбор оптимальных режимов нейтронного легирования и характеристика образцов

При нейтронном легировании монокристалла кремния необходимо учитывать наряду с характеристиками источника нейтронов (ядерный реактор), типа и исходных удельных сопротивлений кремния, также размеры облучательского канала и ее поток. При подготовке образцов для легирования на ядерном реакторе BBP-CM и проведения измерений их электрофизических характеристик были учтены вышеупомянутые моменты.

Маршрутная карта изготовления  $n^+$ -n- $n^+$  структуры на основе кремния состоит из следующих технологических процессов [58; с.7, 59; с.136-137]:

- Из монокристаллического слитка кремния *n*-типа с удельным сопротивлением ρ =100 ÷ 175 Ом·см вырезаются шайбы размерами d=0,6 мм, L=20 см, которые шлифуются с обеих сторон микропорошком (M-10) до толщины 0,48÷0,52 мм.
- После механической обработки шайбы (пластины) промываются 3-4 раза в дистиллированной воде, кипятятся (обезжириваются) в толуоле, а затем в дистиллированной воде [59; с.136-137].
- На чистую поверхность пластины стеклянными трубками наносится раствор фосфора (PCI<sub>3</sub>) (стеклянные трубки диаметром ~3 мм промываются дистиллированной водой, кипятятся в толуоле).
- 4. Подготовленные пластины складываются в стопку и загружаются в рабочую зону печи при заранее установленной температуре.
- Диффузия фосфора проводится при температуре 473±0,5 К в течение ~30 мин, затем печь выключается и шайбы остывают в месте с печью [59; с.136-137].

- Для снятия окисного слоя пластины погружаются в плавиковую кислоту (HF) на 5÷10 секунд и промываются 2÷3 раза в дистиллированной воде.
- 7. Образцы (n<sup>+</sup>-n-n<sup>+</sup> структуры) помещаются в кварцевую ампулу и запаиваются, чтобы избежать поверхностного загрязнения образцов β-частицами при облучении нейтронами. Далее, ампулы с образцами подвергаются нейтронному облучению в канале атомного реактора до полной компенсации основных носителей заряда [59; с.136-137].
- 8. Электрические контакты наносятся путем химического осаждения никеля. Для осаждения никеля используется щелочной электролит состава: 30 г/л (NiCl- $6H_2O$ ), 10 хлористого никеля г/л гипофосфата натрия (NaH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>·H<sub>2</sub>O), 50 г/л хлористого аммония (NH<sub>4</sub>Cl) и 60 г/л лимонной кислоты H<sub>3</sub>C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>O<sub>7</sub>. В полученный электролит непосредственно перед никелированием добавляют водный раствор аммиака (NH<sub>4</sub>OH) до получения pH раствора равного 8÷9. Для нанесения никелевого покрытия на поверхности пластины они погружаются в ванну с щелочным электролитом, нагретым до 358÷368 К (длительность никелирования составляет ~10 мин).
- После промывки и сушки пластин полученное никелевое покрытие подвергается кратковременной термообработке. Оптимальным режимом выжигания никеля является термообработка при температуре 573÷673 К в течение 10 мин. на воздухе.
- 10. Готовые пластины разрезаются на станке алмазной резки на прямоугольные пластины шириной ~1,25 мм (1,25х1,25х0,5 мм<sup>3</sup>).

Измерение постоянной Холла, удельного сопротивления (ρ) и концентрации носителей тока (*n* или *p*) и их температурных зависимостей позволяет определить концентрацию компенсирующих центров, подвижность носителей заряда (μ<sub>n</sub> и μ<sub>p</sub>), а также энергию ионизации E<sub>i</sub>

уровней только в одной половине запрещенной зоны в области  $E_F < E_i < E_{g/2}$  в равновесных условиях.

Существует несколько методик измерений удельного сопротивления р: однозондовые, двухзондовые, четырехзондовые и др. Наиболее распространенным из четырехзондовых является метод Ван-дер-Пау [60; 352 с.108-114]. Электрическая схема установки представлена на рис. 2.1.



Рис. 2.1. Принципиальная схема установки для измерения постоянной Холла и удельной электропроводности: 1) вольтметр универсальный В7-21А;
2) вольтметр универсальный В7-21; 3) переходник; 4) ключ; 5) держатель
Расчет удельного сопротивления р проводился по формуле [60; 352 с.108-114]:

$$\rho = \frac{\Pi \cdot d}{Ln2} \frac{R_1 + R_2}{2} \cdot f = 2,26 \cdot (V_1 + V_2) \cdot d / I$$
 (2.1)

где  $R_1 = \frac{V_{_{\theta c}}}{I_{_{a \delta}}} = V_1/I$  (Ом);  $R_2 = \frac{V_{_{\delta \theta}}}{I_{_{a c}}} = V_2/I$  (Ом); d – толщина образца (см);

f - функция, зависящая от отношения  $V_1/V_2$  (или  $V_2/V_1$ ) при  $I = I_{az} = I_{a\delta}$ , которая отражает асимметрию контактов и степень неоднородности образцов.

Измерения проводились при двух направлениях тока для исключения паразитных эффектов на электрических контактах.

Измерение ЭДС Холла производилось компенсационным методом на постоянном токе при напряженности магнитного поля в 3,6 кЭ. <u>Концентрация носителей заряда</u> определялась по формуле [60; 352 с.108-114]:

$$n(p) = \frac{I \cdot H \cdot 10^{-8}}{e \cdot V_{x} \cdot d} \text{ cm}^{-3}, \qquad (2.2)$$

где *I* – постоянный ток, протекающий через образец (А), *H* – напряженность постоянного магнитного поля (Эрстед), *e* – заряд электрона (Кл), *V*<sub>x</sub> – ЭДС Холла (В), *d* – толщина образца (см).

Резистивный элемент облучают в ампулах на вертикальном канале атомного реактора флюенсом медленных нейтронов в интервале (1,8 ÷ 2,7)·10<sup>14</sup> см<sup>-2</sup> (t = 90 мин) для *n*-типа кремния с исходным удельным сопротивлением 150 Ом·см.

Ошибка при измерении удельного сопротивления составляет ±10 %, а концентрации носителей заряда ~ 8 %.

# § 2.2. Нормализация параметров нейтронно-трансмутационного кремния термообработкой

В качестве исходного материала для терморезисторов с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления (ТКС) использован монокристалл кремния *n*-типа с удельным сопротивлением ~ 100÷170 Ом·см при 300 К. Для получения омических контактов до облучения поверхность шайбы диффундировалась фосфором при температуре ~473 К в течение 10 минут, затем проводился отжиг при температуре 850 К для нормализации параметров Si и удаления термодефектов.

Облучение проводилось быстрыми нейтронами атомного реактора  $(7 \div 10) \cdot 10^{13}$ потока нейтр./см<sup>2</sup>·с. **BBP-CM** интервале Лалее в ИЗ компенсированного кремния с радиационными дефектами вырезали пластины размером 3x3x1 мм<sup>3</sup> и на поверхность наносили электролитический слой никеля (при необходимости к никелю затем припаивались луженые медные проводники). Вольтамперная характеристика образца обладает достаточной линейностью в пределах до приложенного напряжения ~10 В при ~300 К.

Электросопротивление терморезистора  $R_x$  измерялось в одном и том же интервале температур до и после облучения нейтронами. Принципиальная электрическая схема установки для измерения температурного сопротивления терморезистора (создана на базе термостата в [10; с.89, 41; с.28-41, 61; с.10-15, 62; с.107-110, 63; с.14-19, 64; с.80-93]) приведена на рис. 2.2.

Измерения электросопротивления – R, *n*<sup>+</sup>-*n*-*n*<sup>+</sup> -структуры проводились в одном и том же интервале температур (303÷373 K).



Рис. 2.2. Принципиальная электрическая схема установки для измерения температурного сопротивления (R<sub>x</sub>) терморезисторов (схема создана на базе термостата [60; с.352]): 1) Щ-300 амперметр; 2) Ф30 – вольтметр; 3) R<sub>x</sub> - терморезисторы

### Выводы к главе II

- Приведены характеристики исследованных образцов, описаны методы исследования и оптимальные режимы нейтроннно-тарнсмутационного легирования.
- 2. На основе выбора технических условий оптимальных режимов нейтронной трансмутации <sup>30</sup>Si разработана маршрутная карта изготовления n<sup>+</sup>-n-n<sup>+</sup> структур на основе нейтронно-легированного кремния (НЛК), составляющих основу терморезисторов.
- 3. Установлен порядок нормализации параметров НЛК термообработкой и удаления дефектов.

### ГЛАВА III. РАЗРАБОТКА СПОСОБА ПОЛУЧЕНИЯ ТЕРМО-ДАТЧИКОВ НА БАЗЕ ЯДЕРНОЙ ТРАНСМУТАЦИИ КРЕМНИЯ

# § 3.1. Технология получения нейтронно-компенсированных кремниевых образцов

Получение компенсированного кремния с созданием донорной примеси фосфора при захвате одним из изотопов кремния медленного нейтрона, присутствующего в природном кремнии изотопа  ${}^{30}_{14}Si$ , показано в работах [38; c.5-13, 53; c.11, 65; c.27-51,77-91, 66; c.125-126]. При этом наведенную концентрацию фосфора можно рассчитать, подставив в формулу (1.2) соответствующие данному случаю значения параметров и постоянных величин, по следующей формуле [52; c.18-25]:

$$N_{P} = Nk\eta It = 1,7 \cdot 10^{-4} \Phi; \quad \Phi = \frac{N_{P}}{1,7 \cdot 10^{-4}}$$
(3.1)

Известно, что каждый атом донора (фосфора) в кремнии поставляет один электрон в зону проводимости (в кремнии *n*-типа) или уменьшает (компенсирует) одну дырку валентной зоны (в кремнии *p*-типа):

$$n = n_{o} + N_{P}$$
 или  $N_{P} = n_{o} - n$   
 $p = p_{o} - N_{P}$  или  $N_{P} = p_{o} - p$  (3.2)

где  $n_o(p_o)$  и n(p) - концентрация носителей заряда до и после облучения, соответственно;  $N_p$ - концентрация наведенных атомов фосфора.

Отжиг радиационных дефектов (возникающих в процессе облучения нейтронами) проводят при температуре ~1073 К (в течение  $30\div60$  мин) с последующим медленным охлаждением [67; с.9-12, 68; с.86-90]. Измеряя до облучения и после термического отжига концентрации основных носителей заряда кремния, определяется наведенная концентрация атомов фосфора ( $N_P$ ).

Далее, зная *t* и  $N_P$  из формулы (3.1), определяется  $\varphi$ , потом определяется из выражения  $\Phi = \varphi \cdot t$  флюенс медленных нейтронов.

Основным предложенного способа недостатком является не экспрессность, связано необходимостью проведения что с высокотемпературного термоотжига радиационных дефектов И существенной зависимостью результатов от скорости охлаждения после термоотжига.

В нашем случае, в отличие от предыдущего случая вырезают готовые пластины с омическим контактами, на станке алмазной резки на прямоугольные кристаллики размером (1,1x1,1x0,4 мм<sup>3</sup>).

Температурные характеристики терморезистора, изготовленного на основе компенсированного кремния *n*-типа (изменение в *n*-типа при перекомпенсации кремния *p*-типа) с радиационными дефектами (полученного путем облучения нейтронами атомного реактора), показаны на рис. 3.1.



Рис. 3.1. Электросопротивление *n*<sup>+</sup>- *n*- *n*<sup>+</sup> структуры на основе компенсированного кремния из *p*- в *n*-тип (исходный кремний *p*-типа с ρ<sub>0</sub>=1·10<sup>4</sup> Ом·см) в зависимости от температуры (после облучения флюенсом нейтронов 1,2·10<sup>16</sup> см<sup>-2</sup>)

Положительный эффект – экспрессность достигается: времени облучения t = 1 - 2 час за счет выбора удельного сопротивления в качестве исходного материала детектора  $\rho_0 = 1 \cdot 10^4$  Ом·см, соответственно.

Если удельное сопротивление кремния *p*-типа ≤10<sup>3</sup> Ом·см, то получение термочувствительных резисторов, с заданными идентичными параметрами кремния *n*-типа, приводит к увеличению длительности времени облучения, которое увеличивает стоимость резистора.

Известно, что температурная характеристика такого терморезистора описывается следующим уравнением [69; с.1-7]:

$$R/R_0 = \exp[B(T - T_0) / T \cdot T_0] = \exp[B/T]$$
(3.3)

где *B*- коэффициент температурной чувствительности, связанный с ТКС соотношением  $B = -\alpha T^2$ ;  $R_o$  – номинальное электросопротивление при  $T_o = 300$  K, R – электросопротивление при температуре *T*,  $\alpha$ - температурный коэффициент сопротивления терморезистора [70; с.270-271].

Для достижения вышеуказанных показателей, образцы выбирались в следующем порядке:

а) для образца с удельным сопротивлением  $\rho = 4 \cdot 10^3$  Ом·см: облученных флюенсами нейтронов  $\varphi = 1, 2 \cdot 10^{16}$  см<sup>-2</sup>.

1 – компенсированный кремний из *p*- в *n*- тип с удельным сопротивлением  $\rho = 1.10^5$  Ом·см (исходный кремний *p*-типа с  $\rho_0 = 1.10^4$  Ом·см,  $p_0 = 2.10^{12}$  см<sup>-3</sup>);

2 – компенсированный кремний *p*-типа, с удельным сопротивлением  $\rho = 4.10^3$  Ом·см (исходный кремний *p*-типа с  $\rho_0 = 1,42.10^3$  Ом·см,  $p_0 = 1,2.10^{13}$  см<sup>-3</sup>).

б) для образца с удельным сопротивлением  $\rho = 1.10^5$  Ом·см.

1- компенсированный кремний из *p*- в *n*-типа с удельным сопротивлением  $\rho = 2 \cdot 10^3$  Ом·см (исходный кремний *p*- типа с  $\rho_0 = 1 \cdot 10^4$  Ом·см,  $p_0 = 2 \cdot 10^{12}$  см<sup>-3</sup>);

2- компенсированный кремний из *p*- в *n*-типа с удельным сопротивлением  $\rho = 1.10^5$  Ом·см (исходный кремний *p*-типа с  $\rho_0 = 1,42.10^3$  Ом·см,  $p_0 = 1,2.10^{13}$  см<sup>-3</sup>).

Чувствительность терморезистора *В* определялась по линейному участку зависимости  $lgR \sim f(1/T)$  по следующей формуле [71; с.171-174]:

$$B = \frac{2,3 \cdot \lg \frac{R_0}{R}}{T_0^{-1} - T^{-1}} ,$$
 (3.4)

где  $R_o$  и R – номинальные электросопротивления, соответствующие температурам  $T_o$  и T.

Выбор обработки флюенсом медленных нейтронов (1,2÷6)·10<sup>16</sup> см<sup>-2</sup> кремния *p*-типа обусловлен тем, что при таком флюенсе достигается максимальная компенсация дефектов в образце.

Выбор температурного отжига после облучения кремниевых шайб связан с получением максимальной концентрации атомов фосфора при диффузии на поверхности компенсированного кремния n-типа (для получения  $n^+$ -n- $n^+$  структуры), т.е. необходимо получать низкоомные омические контакты и одновременно отжигать радиационные дефекты. Изменение электросопротивления такой структуры в зависимости от температуры приведено на рис. 3.2 [72; с.3-4].

Интенсивность медленных нейтронов (энергия  $E \le 0,1$  МэВ) в атомном реакторе определяется по нижеследующей методике. Расчет потока проводится на основе создания в кремнии *n*-типа донорной примеси фосфора, при захвате одним из изотопов кремния медленного нейтрона по

формуле (3.1), а наведенная концентрация фосфора N<sub>P</sub> рассчитывается по первому выражению в формуле 3.1.



Рис. 3.2. Электросопротивление  $n^+$ -n- $n^+$ – структуры в зависимости от температуры: a - 1) компенсированный кремний из p- в n- тип с удельным сопротивлением  $\rho = 1.10^5$  Ом·см, 2) компенсированный кремний p-типа, с

удельным сопротивлением  $\rho = 4 \cdot 10^3 \,\text{Om} \cdot \text{см}; \, \delta - 1$ ) компенсированный кремний из *p*- в *n*-типа с удельным сопротивлением  $\rho = 2 \cdot 10^3 \,\text{Om} \cdot \text{сm}, 2$ ) компенсированный кремний из *p*- в *n*-типа с удельным сопротивлением  $\rho = 1 \cdot 10^5 \,\text{Om} \cdot \text{cm}$ 

Измеряя до и после облучения концентрации носителей заряда кремния можно определить концентрации фосфора N<sub>P</sub> [73; с.75-78]. Отжиг радиационных дефектов проводился при температуре ~1273 К в течение 3 часов с последующим медленным охлаждением со скоростью (4÷5) град./мин [73; с.75-78].

Зная  $N_P$  и *t* из формулы (3.1) можно определить  $\varphi$ . Далее определяется из выражения  $\Phi = \varphi \cdot t$  флюенс медленных нейтронов.

В предлагаемом способе в качестве материала для терморезисторов с отрицательным ТКС (термисторов) используется кремний *p*-типа.

Следует отметить, что ни один из других известных способов [74; с.2-6, 75; с.244-247] не позволяет получать  $n^+$ -n- $n^+$  –структуры (резисторы) с заданными номинальными удельными сопротивлениями и стабильными параметрами в широком диапазоне температур эксплуатации.

Также, обращаем внимание на то, что соблюдение технологической схемы кремния *p*-типа переводит компенсированный кремний из *p*- в *n*- тип с удельным сопротивлением  $\rho = 1.10^5$  Ом·см.

### § 3.2. Способ изготовления кремниевых терморезисторов

Предлагаемый способ радиационной технологии получения компенсированного монокристаллического кремния с атомами фосфора и радиационными дефектами относится к полупроводниковой технологии. Он может быть использован для создания терморезисторов с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления (ТКС), т.е. термисторов, преимущественно срабатывающих при отклонении от установленной температуры – Т. Температурная характеристика такого терморезистора описывается следующим уравнением [58; с.2-4]:

$$R = R_0 \cdot exp \left[ B(T - T_0) / T \cdot T_0 \right]$$
(3.5)

где *B* –коэффициент температурной чувствительности, связанный с ТКС соотношением  $B = -\alpha T^2$ ;  $R_o$ – электросопротивление при  $T_o = 300$  K, *R*– электросопротивление при температуре *T*,  $\alpha$ – температурной коэффициент сопротивления терморезистора. Чувствительность терморезистора *B* определялась по линейному участку зависимости  $lgR \sim f(1/T)$  по формуле (3.4), где,  $R_o$  и *R*–электросопротивления, соответствующие температурам  $T_o$ и T.

Для получения наибольшей температурной чувствительности терморезисторов были использованы компенсирующие примеси с глубокими центрами в кремнии [58; с.2-4, 76; с.55-59]. Однако из-за ограниченности термостабильности компенсирующих примесей происходит деградация их электрофизических параметров.

Поэтому, в данном случае нашей задачей является увеличение выхода терморезисторов с одинаковыми электрофизическими параметрами на основе компенсированного кремния с радиационными дефектами.

Цель этой поставленной задачи достигается способом изготовления полупроводникового терморезистора, включающего создание в кремниевом резистивном элементе [24; с.3-12] омических контактов и введение радиационных дефектов для полной компенсации исходных носителей заряда  $(2,5\div4)\cdot10^{13}$  см<sup>-3</sup> путем облучения флюенсами быстрых нейтронов  $(2\div2,7)\cdot10^{14}$  см<sup>-2</sup> [24; с.3-12].

Следует отметить, что  $n^+$ -n- $n^+$ -структуры (резистор на основе кремний *n*-типа) облучались для определения оптимального флюенса быстрых нейтронов в интервале  $(0,5\div3)\cdot10^{14}$  см<sup>-2</sup>.

Положительный эффект достигается в процессе нейтронного облучения следующим образом:

- за счет введения в резистивный элемент, для получения удельного электросопротивления  $\rho = 5 \cdot 10^4 \div 10^5$  Ом·см, равномерно возникающей

концентрации радиационных дефектов и требуемой компенсации начальных носителей заряда (энергия ионизации которых больше  $E_c$ -0,45 эВ) в объеме резистора. В таких образцах уровень Ферми расположен выше  $E_c$ -0,45 эВ. Радиационные дефекты с меньшими энергетическими уровнями  $E_c$ -0,45 эВ практически не участвуют в компенсации носителей заряда. Если требуемая величина электросопротивления термочувствительного резистора при комнатной температуре меньше номинального (контроль осуществляется путем измерения электросопротивления ( $R = \rho l/S$ , где  $\rho$  – удельное электросопротивление, l – длина образца, S –площадь его поперечного сечения), то его подвергают дополнительному облучению нейтронами. Если наоборот, больше номинального, то подвергают низкотемпературной обработке (температурный отжиг) [1; с.82-85, 219-225, 410-435, 468-478, 500-509, 77; с.1255-1264, 78; с.422-431];

- за счет выбора времени облучения (*t* = 1÷2 мин). В течение этого времени флуктуация плотности потока нейтронов не влияет на получение необходимой концентрации радиационных дефектов в облучаемой партии материала.

Известно, что чем больше концентрация основных носителей, тем требуется большее время облучения нейтронами (при постоянной плотности потока нейтронов) для создания сравнимой концентрации акцепторных радиационных дефектов [79; с.25-31, 80; с.31-58, 64-103]. Для уменьшения остаточной активности необходимо использовать кремний с минимальной концентрацией основных носителей заряда. При этом, для получения образцов сильно компенсированного кремния с идентичным удельным сопротивлением, время облучения оказалось минимальным и соответственно активность образцов минимальной. Соблюдение этих условий позволяет получать партию терморезисторов с заданными значениями и одинаковыми параметрами на основе компенсированного кремния с радиационными дефектами.

К отличительным признакам предлагаемого технического решения относится: резистивный элемент  $n^+$ -n- $n^+$ , изготовленный из кремния n- типа с концентрацией носителей заряда  $(2,5\div4)\cdot10^{13}$  см<sup>-3</sup> ( $\rho = (100\div170)$  Ом·см). облучают флюенсом быстрых нейтронов  $(2\div2,7)\cdot10^{14}$  см<sup>-2</sup>.

Выбор исходного кремния *n*-типа с удельным сопротивлением ρ = (100÷170) Ом·см обусловлен двумя причинами:

- если удельное сопротивление полупроводникового материала кремния больше  $\rho = 170$  Ом·см, то получение термочувствительных резисторов с заданными идентичными параметрами ( $R \le 3 \cdot 10^5$  Ом) при расчетном времени облучения в атомном реакторе затрудняется (чтобы получать  $R \le 3 \cdot 10^5$  Ом необходимо уменьшать время облучения). Это происходит вследствие того, что загрузка-выгрузка образцов в канал облучения занимает 25÷30 % всего времени облучения, следовательно, сложно получать материал с заданными параметрами;

- если удельное сопротивление полупроводникового материала кремния меньше 100 Ом·см, то получать термочувствительные резисторы с заданными идентичными параметрами также затруднено, поскольку при расчетном времени облучения в образцах не всегда достигается максимальная *В* термочувствительность (рис. 3.3).



Рис. 3.3. Зависимость электросопротивления  $n^+ - n - n^+ -$ структуры от температуры при различных исходных удельных сопротивлениях кремния (после облучения быстрыми нейтронами  $\Phi = 2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ ) [58; с.2-7]: 1) 70 Ом·см; 2) 100 Ом·см; 3) 170 Ом·см

Выбор обработки  $n^+$ -n- $n^+$  - структуры флюенсом быстрых нейтронов обусловлен тем, что, как показывают экспериментальные результаты, термочувствительность *B* растет с ростом флюенса нейтронов и остается практически постоянной при больших флюенсах нейтронов 2·10<sup>14</sup> см<sup>-2</sup> (рис. 3.3) [58; с.7].

Если  $n^+$ -n- $n^+$ -структуры облучать флюенсом быстрых нейтронов меньше  $2 \cdot 10^{14}$  см<sup>-2</sup>, то облучение не приводит к получению максимальной термочувствительности *B* в материале (рис.3.4).

Следует отметить, что для идеального, высокоомного монокристаллического кремния  $B/T = (E_g / 2 \text{ kT}) \approx 6000 \text{ K} / \text{ T}$  (где  $E_g = 1,12 \text{ 3B}$  –ширина запрещенной зоны, k = 8,625·10<sup>-5</sup> 3B/ K [81; c.11-27].

Если  $n^+$ - n-  $n^+$  - структуры облучать флюенсом быстрых нейтронов больше  $3 \cdot 10^{14}$  см<sup>-2</sup>, чувствительность *В* незначительно возрастает, т.е. достигается ее насыщение (рис. 3.4), однако увеличение времени облучения приводит к увеличению стоимости резистора и остаточной радиоактивности.



Рис. 3.4. Изменение электросопротивления *n*<sup>+</sup>-*n*-*n*<sup>+</sup>- структур (полученных на основе ρ = 170 Ом·см), в зависимости от температуры до (1) и после облучения флюенсами быстрых нейтронов (см<sup>-2</sup>) [58; с.2-7]:

2)  $5 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ ; 3)  $8 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ ; 4)  $2 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ ; 5)  $3 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 

Поэтому, надо было решать эту техническую задачу нахождения оптимального потока нейтронов, времени облучения для получения термочувствительных терморезисторов с заданными техническими параметрами.

Это техническое решение, по нашему предположению можно решать следующим образом:

- В предлагаемом способе в качестве материала для терморезисторов с отрицательным ТКС (термисторов) используют кремний *n*-типа;
- Слиток кремния на станке алмазной резки разрезают на пластины;
- Электрические контакты получают путем химического осаждения никеля из щелочного электролита;
- Кремниевые шайбы с омическими контактами на станке алмазной резки разрезают на прямоугольные кристаллики;

- Подготовленные образцы (n<sup>+</sup>-n- n<sup>+</sup> -структуры) помещают в кварцевую ампулу и запаивают, чтобы избежать поверхностного загрязнения образцов β-частицами [58; с.2-7, 59; с.136-137];
- Далее, ампулы с образцами подвергают нейтронному облучению в канале атомного реактора до полной компенсации основных носителей заряда радиационными дефектами [58; с.2-7, 59; с.136-137];
- После выдержки облученные образцы в ампулах помещают в бокс и, если при этом не превышается предельно допустимый уровень мощности γ-излучения, вынимают из ампул [58; с.2-7, 59; с.136-137];
- Измерения электросопротивления R n<sup>+</sup>-n-n<sup>+</sup> структуры проводились в одном и том же интервале температур (303÷373 К) после облучения нейтронами.

Для определения интегрального потока быстрых нейтронов применялась методика определения интенсивности медленных нейтронов (энергия  $E \le 0,1$  MэB), с дальнейшим пересчетом с использованием кадмиевого соотношения. Расчет потока проводился на основе создания в кремнии *p*-типа донорной примеси фосфора, при захвате одним из изотопов кремния медленного нейтрона. При этом наведенную концентрацию фосфора можно рассчитать по формуле (3.1).

Измеряя до и после облучения концентрации носителей заряда кремния можно определить поток медленных нейтронов. Отжиг радиационных дефектов проводится при температуре ~1273 К с последующим медленным охлаждением со скоростью 3÷5 град./мин [67; с.9-12].

Температурные зависимости относительного изменения электросопротивления  $R_0/R$  (где  $R_0$  - электросопротивление при  $T_0=303$  К и R- электросопротивление при температуре T) после облучения флюенсами быстрых нейтронов  $2 \cdot 10^{14}$  см<sup>-2</sup> для 5 произвольно выбранных образцов приведены в таблице 3.1.

### Таблица 3.1

Изменение	Температурный коэффициент зависимости R (T)					
температур образцов, Т (К)	Образец №1	Образец №2	Образец №3	Образец №4	Образец №5	
	R, Ом	R, Ом	R, Ом	R, Ом	R, Ом	
303	$1,48 \cdot 10^5$	$1,76 \cdot 10^5$	$2,18\cdot10^{5}$	$2,09 \cdot 10^5$	1,93·10 <sup>5</sup>	
308	$9,58 \cdot 10^4$	9,63·10 <sup>4</sup>	$9.75 \cdot 10^4$	$9.68 \cdot 10^4$	$9.65 \cdot 10^4$	
313	7,19·10 <sup>4</sup>	$7,42 \cdot 10^4$	$7,57 \cdot 10^4$	7,49·10 <sup>4</sup>	$7,485 \cdot 10^4$	
318	$4,85 \cdot 10^4$	5,09·10 <sup>4</sup>	$5.15 \cdot 10^4$	$5.12 \cdot 10^4$	$5.1 \cdot 10^4$	
323	$3,58 \cdot 10^4$	$3,65 \cdot 10^4$	$3,76 \cdot 10^4$	3,67·10 <sup>4</sup>	3,66·10 <sup>4</sup>	
328	$2,61 \cdot 10^4$	$2.72 \cdot 10^4$	$2.80 \cdot 10^4$	$2.79 \cdot 10^4$	$2.75 \cdot 10^4$	
333	1,93·10 <sup>4</sup>	$2,03 \cdot 10^4$	$2,12 \cdot 10^4$	$2,10.10^4$	$2,07 \cdot 10^4$	
338	$1,48 \cdot 10^4$	$1,52 \cdot 10^4$	$1,65 \cdot 10^4$	1,63·10 <sup>4</sup>	1,59·10 <sup>4</sup>	
343	$1,09.10^4$	$1,15 \cdot 10^4$	$1,2.10^4$	$1,18.10^4$	$1,15 \cdot 10^4$	
348	$8,26 \cdot 10^3$	$9,33 \cdot 10^3$	$9,45 \cdot 10^3$	$9,42 \cdot 10^3$	$9,40.10^3$	
353	$6,47 \cdot 10^3$	$6,71 \cdot 10^3$	$6,82 \cdot 10^3$	$6,81 \cdot 10^3$	$6,74 \cdot 10^3$	
358	$5,18 \cdot 10^3$	$5,35 \cdot 10^3$	$5,46\cdot10^{3}$	$5,40\cdot 10^3$	$5,40.10^3$	
363	$3,72 \cdot 10^3$	$3,95 \cdot 10^3$	$4,12 \cdot 10^3$	$4,05 \cdot 10^3$	$4,07 \cdot 10^3$	
368	$2,97 \cdot 10^3$	$3,08 \cdot 10^3$	$3,18\cdot10^3$	$3,16\cdot10^3$	$3,14 \cdot 10^3$	
373	$2,16\cdot10^{3}$	$2,29 \cdot 10^3$	$2,36\cdot10^{3}$	$2,31 \cdot 10^3$	$2,32 \cdot 10^3$	

Температурные зависимости изменения электросопротивлния образцов

Проведенный статистический анализ значений термочувствительности измеренных образцов показал, что выход одинаковых резисторов, с равными *В* из 100 шт. составляет не менее 92 %.

Изготовленный терморезистор с отрицательным ТКС на основе компенсированного кремния с радиационными дефектами, обладающего

диапазоном номинальных сопротивлений  $(2\div 4)\cdot 10^5$  Ом, имеет следующие характеристики: постоянная  $B = (6000 \pm 50)$  К;  $\alpha_{306\ K} = -(6,9\div7,0)$  %/*град.* – температурный коэффициент сопротивления термистора при 306 К; интервал температуры измерения от 303 до 373 К. Показано, что предлагаемый способ позволяет получать однотипные характеристики терморезисторов на основе нейтронно-облученного кремния.

Измеряемую температуру определяют следующей формулой [72; с.2-7]:

$$T = \frac{B}{\frac{B}{T_0} - \ln \frac{R_0}{R}} \qquad , \ \mathrm{K}$$
(3.6)

где  $T_o = 306$  К – комнатная температура;  $R_0 = 418\ 000$  Ом – электросопротивление при  $T_o$  (после облучения нейтронами); R – электросопротивление, определяемое температурой T, Ом. В таблице 3.2 для сравнения приведены значения *B* известных выпускаемых терморезисторов TP-2, TP-14 и CT104D [82; c.383, 83; c.162, 84;]:

Таблица 3.2

Значения термочувствительности известных терморезисторов, по сравнению

С	нашими	образцами	i
-			-

Тип терморезистора	Номинальное сопротивление при 300 К	Постоянная « <i>В</i> », К	
Наш терморезистор	10 <sup>6</sup> Ом	6000 (273403 K)	
TP-2	33 кОм·см ±20 %	34703900 (273423 K)	
TP-14	(2,6÷2,9) кОм	40004300 (273423 K)	
CT104D	10 <sup>5</sup> Ом	4040 (233373 K)	

Как видно, в предлагаемом способе получения терморезисторов, параметры *B* в ~1,5 раза лучше по сравнению с другими известными способами получения терморезисторов.

Использование предлагаемого способа изготовления кремниевых терморезисторов, по сравнению с известными способами, обеспечивает следующие преимущества: крайняя простота изготовления (снижение себестоимости компенсированного материала) и отсутствие необходимости отдельной градуировки каждого терморезистора.

## § 3.3. Изготовление образцов для термодатчиков на базе компенсированного кремния

Технологический процесс изготовления термочувствительного элемента (терморезистор) должен удовлетворять ряду особых требований: стабильность характеристик материала в рабочем диапазоне температур и простота технологического процесса получения хорошей для воспроизводимости И идентичности характеристик изделий. Такие термодатчики в производстве используется во многих областях, в том числе и для изготовления датчиков-извещателей в противопожарной сигнализации.

Полупроводниковый кремний, компенсированный примесями, образующими глубоколежащие уровни в запрещенной зоне, является наиболее пригодным для создания терморезисторов c большим отрицательным ТКС. Отличительной характеристикой этих материалов является то, что такой материал показывает относительное изменение величины сопротивления при изменении температуры на один градус. Высокая скорость диффузии примесей, создающих глубоколежащие уровни в растворимость, позволяют использовать кремнии и достаточная ИХ диффузионную методику при получении компенсированного материала. Диапазон их номинальных сопротивлений 10<sup>3</sup>÷10<sup>5</sup> Ом.см, постоянная

*B*=6000÷7400 К, рабочий интервал температур от 150 до 400 К. Величина отрицательного температурного коэффициента сопротивления  $\alpha_{\rm T}$  в различных терморезисторах колеблется в пределах –(0,8÷6,0)·10<sup>-2</sup> К при комнатной температуре [85; с.272-273, 86; с.305-310].

В работе [87; с.207-208] осуществлено ионное легирование кремния с халькогенами, а отжиг и диффузионная разгонка примеси проведена при температуре 873÷1623 К с последующей закалкой импульсным отжигом в течение от 80 миллисекунд до 10 секунд с удельной мощностью 50 Вт/см<sup>-2</sup> ÷ 1 кВт/см<sup>-2</sup>.

Недостатки получения терморезисторов диффузионным способом можно преодолеть, если для получения терморезисторов воспользоваться компенсированным кремнием с радиационными дефектами, возникающими при облучение быстрыми нейтронами [88; с.1-4].

Описание подготовки образцов кремния *n*-типа с омическими контактами приведено во 2-ой главе диссертации (см. гл. 2, §2.1).

Выбор обработки  $n^+$ -n- $n^+$  –структуры флюенсом быстрых нейтронов обусловлен тем, что, как показали экспериментальные результаты, термочувствительность *B* с ростом дозы облучения растет и практически в интервале доз нейтронов ~ $(2\div3)\cdot10^{14}$  см<sup>-2</sup> остается постоянной (рис.3.5).

Если  $n^+$ -n- $n^+$  –структуры облучать флюенсом быстрых нейтронов меньше  $2 \cdot 10^{14}$  нейтр./см<sup>2</sup>, то облучение не приводит к максимальной термочувствительности *B*. Если  $n^+$ -n- $n^+$  –структуры облучать флюенсом быстрых нейтронов больше  $3 \cdot 10^{14}$  нейтр./см<sup>2</sup> увеличивается остаточная радиоактивность, а чувствительность *B* незначительно растет, т.е. достигается насыщение, кроме того увеличение времени облучения увеличивает стоимость резистора.



Рис. 3.5. Изменение электросопротивления  $n^+$ -n- $n^+$ -структуры в зависимости от температуры при различных исходных удельных сопротивлениях кремния (Ом·см): 1) 70; 2) 100; 3) 170 и облученные при флюенса быстрых нейтронов:  $a) (1,5 \div 1,8) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}; 6) (2,7 \div 3) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2} [58; c.2-7]$ 

### § 3.4. Параметры и характеристики термодатчиков

Как упоминалось выше (см. §3.1), исследования компенсированного кремния для изготовления высокочувствительных дискретных полупроводниковых датчиков имеют ряд ограничений, которые связаны с получением однородного материала с высоким удельным сопротивлением.

Пожарные датчики срабатывают при появлении дыма. Датчики, изготовленные из полупроводникового кремниевого материала, весьма чувствительны к изменениям температуры и срабатывают еще до появления пожара и тем самым позволяют предотвращать пожар. Для решения этой проблемы, в настоящее время, предлагаются новые способы получения материала с заданными идентичными свойствами и параметрами, с использованием радиационной обработки.

При рассмотрении предыдущих поколений датчиков-извещателей, убедились в том, что созданный нами новый вид датчика имеет ряд преимуществ. По сравнению с другими аналогичными датчиками, предлагаемый нами датчик в два раза чувствительнее к изменениям температуры, время срабатывания термодатчика быстро <8 секунд, максимальная температура контролируемой среды 398 К, напряжение электропитания 9÷220 В и себестоимость в два-три раза ниже (рис. 3.6).

К тому же поверхность датчика покрывается алюминием или нержавеющим материалом. В результате датчик становится устойчивым к внешним воздействиям, удобным при использовании в складах химических и радиационных веществ.

Появляется возможность повторного использования целиком или отдельных компонентов датчика. Кроме того, имеется возможность использования беспроводной передачи сигнала до 100 метров через USBпорт. Таким образом, преимущественными сторонами нашей разработки являются высокая чувствительность и низкая себестоимость, новый удобный при монтаже дизайн и возможность многократного использования.



Рис. 3.6. Датчик сигнализатора температуры: а) макеты терморезисторов в оболочке, которые выполнены из алюминиевого сплава и нержавещего материала; б) вид терморезистора; в) вид пожарных извещателей

В данном параграфе, по сравнению с другими радиационными методами обработки кремния отдано предпочтение нейтронному облучению, позволяющему вводить с высокой эффективностью дефектные комплексы компенсирующего типа. В соответствии с требованиями, предъявляемыми к нейтронно-облученным материалам, для нормализации электрофизических параметров и получения заданных свойств, требуется проведение термической обработки кристалла. Однако вопрос термической стабильности радиационных дефектов в нейтронно-компенсированном кремнии, при последующих технологических операциях изготовления полупроводниковых приборов, в частности резисторов, недостаточно изучен. Решение этого вопроса позволяет создать термодатчики и установить область температуры их использования.

Целью данного параграфа является изучение возможности получения кремниевых терморезисторов с идентичными характеристиками, путем облучения быстрыми нейтронами и отжига радиационных дефектов в нейтронно-компенсированном кремнии, для выявления термостабильности их электрофизических параметров.

В качестве исходного материала, для терморезисторов с отрицательным ТКС, использован кремний *n*-типа с удельным сопротивлением 150 Ом·см при 300 К. Для получения омических контактов на поверхности шайбы до облучения проводилась диффузия фосфора при температуре ~1273 К в течение 10 минут.

Если  $n^+$ -n- $n^+$ -структуры облучать флюенсом быстрых нейтронов меньше  $2 \cdot 10^{14}$  см<sup>-2</sup>, то облучение не приводит к получению максимальной термочувствительности *B* в материале (рис. 3.5а).

Облучение проводилось флюенсами быстрых нейтронов атомного реактора при интенсивности потока ~8·10<sup>12</sup> см<sup>-2</sup>. Далее, из компенсированного кремния с радиационными дефектами, вырезали пластины размером 5x5x0,5 мм<sup>3</sup>. Вольтамперная характеристика образца при ~300 К обладала достаточной линейностью в пределах приложенного напряжения до ~30 В.

С целью выяснения термостабильности образующихся радиационных дефектов, после облучения нейтронами, был исследован терморезистор в

интервале температур 373 ÷ 470 К. Время выдержки при температуре отжига составляло ~30 мин. Измерения проводились при комнатной температуре.

Зависимость электросопротивления нейтронно-компенсированного кремниевого резистора от температуры в интервале 300 ÷ 373 К показана в (рис. 3.7), чувствительность материала определялось по линейным участкам.

$$R_{\rm x} = R_1 \cdot \exp\left[\left(B / T_{\rm otw}\right) - (B / T_1)\right], \qquad (3.7)$$

где B = 6400 K,  $R_1 = 1,7 \cdot 10^5$  Ом (при  $T_1 = 373$  K).



Рис. 3.7. Зависимость электросопротивления нейтронно-компенсированного кремниевого резистора от температуры, усредненная по таблице 3.1

Анализ этих результатов позволяет использовать данную серию термодатчиков, во-первых, как терморезистор в интервале температур 300 ÷ 350 К, во-вторых, как основной рабочий элемент электронных термометров различного назначения (например, в медицинских электронных термометрах).

Результаты изохронного отжига терморезисторов, полученных путем облучения нейтронами, показаны на рисунке 3.8, из которого видно, что при

изохронном отжиге в интервале температур  $300 \div 373$  К электросопротивление остаётся практически постоянным. Из наклона температурной зависимости определялись значения постоянной распада ( $\tau_{pac}$ ) при различных температурах (рис. 3.8.).



Рис. 3.8. Электросопротивление после облучения потоком быстрых нейтронов ~ 2,2·10<sup>14</sup> см<sup>-2</sup>, изотермического отжига (температура измерения ~ 300 K) [89; с.262-264]

Постоянная времени распада определялась из следующего выражения:

$$R = R_o \cdot \exp(-t/\tau) \tag{3.8}$$

где  $R_{\rm o}$  и R – электросопротивления до и после термоотжига; *t*- время отжига;  $\tau_{\rm pac}$  – постоянная времени распада.

Постоянная времени распада в зависимости от температуры описывается выражением:

$$\tau_{pac} = A^* \cdot \exp\left(\frac{\theta}{k} T_{\text{отж}}\right), \tag{3.9}$$

где *А*\* – предэкспоненциальный множитель, *θ* - энергия активации отжига РД, кал/моль; *k* = 1,99 кал/град·моль – универсальная газовая постоянная.

Из наклона прямых были определены постоянные времени распада (рис.3.8) и построена температурная зависимость  $\tau_{pac}$  (рис. 3.9) [89; с. 262-264].



Рис. 3.9. Относительные изменения электросопротивления при изотермическом отжиге кремния после облучения потоком нейтронов ~2·10<sup>14</sup> см<sup>-2</sup> (T<sub>отж</sub>, K): 1) 373 K; 2) 403 K (τ<sub>pac</sub>=17700 c); 3) 433 K (τ<sub>pac</sub>=5211,5 c);
4) 473 K (τ<sub>pac</sub>=2563 c) [89; c.262-264]

Энергия активация распада определялась из температурной зависимости  $\tau_{pac}$  от температуры (рис. 3.10). При этом определяется величина  $\theta$ =10623,2 кал/моль A= 0,02526 с.



Рис. 3.10. Зависимость постоянной времени распада радиационного центра от температуры отжига нейтронно-компенсированного кремния

Зная значение активации распада радиационных дефектов  $\theta$ , длительность температуры отжига  $t_{omsc}$ , электросопротивления образца до  $(R_o)$  после отжига (R), можно определить воздействующую температуру из следующего выражения:

$$T = \frac{\theta}{R_o \ln \frac{(t_{omm} - t_o)}{A^* \ln \frac{R_o}{R}}}$$
(3.10)

Из полученных результатов выявлено, что путем распада радиационных дефектов с последующим термическим воздействием в интервале 373÷473 К можно получать терморезистор.

### § 3.4.1. Электронный термометр

Нами изготовлен лабораторный образец электронного термометра, схема которого приведена на рис. 3.11. Такая схема измерения электронного термометра представляет собой мост постоянного тока, в одно плечо которого включен терморезистор (TP) электронным ключом, а индикатором микроамперметра (0...50 мкА). служит головка Принцип работы электронного термометра основан на дисбалансе электрического моста при изменении сопротивления ТР. Резисторы R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub> устанавливают в минимальное положение. При комнатной температуре ТР имеет большое сопротивление (R<sub>тР</sub>= 2·10<sup>6</sup> Ом), т.е. транзистор закрыт. Напряжение на коллекторе транзистора (КТ315 Б) большое, а коллекторный ток мал. После уравновешивания моста напряжение в измерительной диагонали равно нулю. При температуре 307 К сопротивление ТР снижается, резистором R<sub>1</sub> устанавливают это значение на шкале прибора. Затем температура ТР поднимается до 315 К, с помощью резистора R<sub>4</sub> устанавливают это значение прибора. Температуру измеряют ртутным лабораторным на шкале

термометром. В течение короткого времени можно измерить температуру с погрешностью ±0,1 К в пределах 307-315 К, где должен заменить стеклянный термометр. В электронном термометре применен TP, изготовленный на основе компенсированного кремния ( $R_{TP} = 2 \cdot 10^5$  Ом при 303 К). Резисторы:  $R_1 = 100$  кОм,  $R_2 = 500$  Ом,  $R_3 = 500$  Ом,  $R_4 = 100$  Ом,  $R_5 = 150$  кОм,  $R_6 = 21$  кОм,  $R_7 = 100$  Ом,  $R_8 = 100$  Ом,  $R_9 = 10$  кОм. Изготовленные нами лабораторные термометры более чувствительные, реагируют на температуру быстрее и по себестоимости дешевле по сравнению с зарубежными. Этими электронными термометрами можно управлять программой с помощью соединения USB к компьютеру или телефону, кроме того можно измерить температуру больных пациентов.



Рис. 3.11. Схема электронного термометра

#### § 3.4.2. Датчик-сигнализатор температуры

Датчик-сигнализатор температуры, который приведен на рисунке 3.12, предназначен в качестве термодатчика для контроля за уровнем температуры контролируемой допустимой. высокой среды выше Благодаря терморезистора (B = 6000 K) успешно чувствительности его можно нефтегазовой химической, областях использовать В И других промышленности. Например, соединив нескольких датчиков через USB к комьютеру можно управлять и контролировать пожарную безопасность бункеров на хлопковых пунктах.



Рис. 3.12. Схема датчика-сигнализатора температуры; TP схема подключения с электронным ключом ( $R_{TP} = 2 \cdot 10^6$  Ом,  $R_1 = 100$  кОм,

 $R_2 = 20$  кОм,  $R_3 = 100$  Ом)

Принцип установления датчика для определенной температуры: если температура объекта не превышает установленный уровень, ТР имеет большое сопротивление ( $R_{TP} = 2 \cdot 10^6$  Oм), уровень напряжения на базе транзистора КТ315Б низкий, т.е. транзистор закрыт. Напряжение на коллекторе транзистора большое, а коллекторный ток мал. Резисторами  $R_2$  и  $R_3$  при комнатной температуре устанавливается коллекторный ток (8÷10) мА. С повышением температуры сопротивление ТР уменьшается. Резистором  $R_2$  достигается коллекторный ток транзистора (например, 333 К)  $I_{\kappa}\approx13$  мА. Коллекторный ток достаточен, чтобы вызвать срабатывание реле, к контактам которого подключено устройство сигнализации (на схеме не показано).

## § 3.5. Особенности влияния радиационных дефектов после облучения быстрыми нейтронами на фотопроводимость кремния

Создание дешевых полупроводниковых преобразователей солнечной энергии в электрическую для разработки фотодатчиков различного назначения является актуальной задачей физики и техники полупроводников.

В последнее время для получения фото, термо и других датчиков предлагается использовать компенсированный монокристалл кремния с примесными дефектами, создающими глубокие энергетические уровни (ГЭУ) [90; с.2-5, 91; с.164-167, 92; с.11-16, 93; с.93-105. 94; с.31-52]. Однако большого количества компенсированного получение материала с идентичными фотоэлектрическими и электрофизическими характеристиками термодиффузионным изготовления датчиков способом является для сложным. Во-первых, весьма трудно обеспечить требуемую точность компенсации путем введения акцепторной (или донорной) примеси при высокотемпературной диффузии из-за малого коэффициента диффузии компенсирующих примесей в кремнии. Во-вторых, из-за сложности технологии получения компенсированного кремния с ГЭУ, вследствие неравномерного распределения компенсирующей примеси в кремнии после высокотемпературной диффузии и существенной зависимости от скорости после диффузионного охлаждения.

Получения компенсированного материала решается методом радиационной (путем облучения быстрыми технологии нейтронами монокристалла кремния), которая дает возможность целенаправленно изменять фотоэлектрические параметры Применение кремния. радиационных методов в технологических целях предполагает управление типом образующихся дефектов, с одной стороны, и поиск путей оптимизации радиационного технологического процесса, с другой [95; с.133].

Согласно данным исследований работ [67; с.9-12, 96; с.1194-1201, 97; с.1409-1411, 98; с.64-66, 99; с.12-42,67-85, 100; с.67-70, 86-90], проведенных с использованием современных методов, в облучаемом нейтронами кремнии *n*-типа в верхней половине запрещенной зоны идентифицированы следующие дефектные центры с уровнями акцепторного характера:  $E_c$ -0,18 эВ – комплекс вакансия + кислород (А-центр);  $E_c$ -0,40 эВ – комплекс вакансия + атом донора (Е-центр);  $E_c$ -0,24,  $E_c$ -0,39,  $E_c$ -0,54 эВ – уровни, принадлежащие дивакансии. В основном, эти дефектные центры ответственны за изменение электрофизических свойств облученного *n*-кремния [101; с.27-35].

В настоящем разделе диссертации исследуется возможности получения фоточувствительных структур на основе *n*-кремния, компенсированного радиационными дефектами, с близкими электрофизическими параметрами.

Известно, что при радиационной обработке в объеме кремния формируются компенсирующие радиационные дефекты и степень компенсации кристалла определяется концентрацией носителей заряда в исходном материале и флюенсом облучения, при этом с увеличением концентрации основных носителей заряда, увеличивается и время облучения нейтронами (при постоянной плотности потока нейтронов).

кремния нейтронами С другой стороны, при облучении ДЛЯ уменьшения остаточной необходимо активности использовать монокристаллический кремний с минимальной концентрацией основных носителей заряда. В связи с этим, использовался монокристаллический кремний *n*-типа с удельным сопротивлением 70÷150 Ом·см, в котором уровень Ферми при комнатной температуре расположен в области E<sub>c</sub>-(0,32 ÷ 0,36) эВ от дна зоны проводимости.

Размеры образцов составляли 5x5x0,5 мм<sup>3</sup>, а  $n^+$ -n- $n^+$  структуры были получены методом термодиффузии фосфора при ~1373 К в течение ~120 мин.

Фотоэлектрические параметры компенсированных образцов контролировались на основе изменения отношения –  $R_T/R_c$ , где  $R_T$  – темновое сопротивление, Ом;  $R_c$  – световое сопротивление, Ом. Световое сопротивление измерялось при освещенности E=200 лк.

Таким образом, в результате исследования радиационно-компенсированного кремния выявлена возможность создания фото- и термодатчиков с идентичными характеристиками, работающих в интервале температур от 303÷373 К.

Подготовленные образцы ( $n^+$ -n- $n^+$  - структуры) помещали в кварцевую ампулу и запаивали, подвергали нейтронному облучению в канале атомного реактора (при интенсивности быстрых нейтронов  $\varphi = (3 \div 4) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2} \cdot \text{c}^{-1}$ ) до полной компенсации основных носителей заряда акцепторными радиационными дефектами. Темновое сопротивление контролировалось измерением температурной зависимости в интервале 303÷373 К. Полученные результаты приведены на рис. 3.4 и 3.13 [89; с.262-264].



Рис. 3.13. Зависимость электросопротивления облученных n<sup>+</sup>-n-n<sup>+</sup>-структур от температуры для кремния с различными исходными ρ₀ (Ом·см): 1) 70;
2) 100; 3) 170 [89; с.262-264, 98; с.64-66]

Показона, что на рис. 3.4 значения R<sub>т</sub> практически достигают максимальной величины после времени облучения t=60 с. Следует отметить,

что при флюенсе быстрых нейтронов  $2 \cdot 10^{14}$  см<sup>-2</sup> значения  $R_{\rm T}$  резисторов с удельным сопротивлением (100÷170) Ом см сравниваются (рис. 3.4). В этих образцах уровень Ферми расположен ниже  $E_{\rm c}$ -0,50 эВ и образующиеся уровни  $E_{\rm c}$ -0,18 и  $E_{\rm c}$ -0,39 эВ, по мере роста флюенса быстрых нейтронов из-за смещения уровня Ферми к середине запрещенной зоны, полностью ионизуются.

Уровень  $E_c$ -0,40 эВ, связанный с концентрацией атомов фосфора + вакансия (Е-центр) имеет малую величину (<  $10^{12}$  см<sup>-3</sup>), после облучения также ионизован, то есть практически не влияет на электрофизические свойства кремния. Поэтому, можно предположить, что в компенсации исходной донорной примеси фосфора, в основном, участвует только акцепторный уровень дивакансии  $E_c$ -0,54 эВ.

Для стабилизации фотоэлектрических параметров облученного образца проводился термоотжиг при температуре 493 К в течение 20 мин. Результаты измерения R<sub>т</sub>/R<sub>c</sub> от температуры отжига приведены в таблице 3.3. Как видно из таблицы после термообработки кратность изменения электросопротивления растет и увеличивается практически на порядок (~10 раз).

Таблица 3.3

Кратность изменения отношения  $R_T/R_c$  в образцах  $\rho_o = 170 \text{ Ом} \cdot \text{см}$  после облучения флюенсами быстрых нейтронов ~  $2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$  до и после термоотжига при ~493 К в течение ~20 мин [82; с.383].

Состояние	Кратность изменения отношения R <sub>т</sub> /R <sub>c</sub>				
До термоотжига	1,14	1,1	1,1	1,2	
После термоотжига	11,2	9,7	11,1	12	

На рис. 3.14 приведено относительное изменение электросопротивления облученных (флюенс быстрых нейтронов ~ $2 \cdot 10^{14}$  см<sup>-2</sup>)  $n^+$ -n- $n^+$ - структур (полученных на основе  $\rho_0 = 170$  Ом·см) при освещенности ~200 лк в зависимости от температуры Т. Полученная зависимость описывается следующим выражением:

$$(R_T - R_C)/R_T = \exp(-670 / T)$$
 (3.11)



Рис. 3.14. Зависимость сопротивления фоторезисторов (*n*<sup>+</sup>-*n*-*n*<sup>+</sup>-структуры) от температуры: 1) в темноте; 2) при освещении (Е = 200 лк) [98; с.64-66]

Фоторезистор, полученный на основе кремния, компенсированного радиационными дефектами, работоспособен до температур ~373 К в качестве фото- и термодатчиков (рис. 3.15).



Рис. 3.15. Зависимость относительного изменения электросопротивления фоторезисторов ( $n^+$ -n- $n^+$  -структуры) от температуры при освещенности E = 200 лк [98; c.64-66]

### § 3.6. Влияние быстрых нейтронов на электрофизические свойства ядерно-легированного кремния *р*-типа

Известно, что накопление термо- и радиационных (или примесных) дефектов в кремнии, в большинстве случаев, приводит к возникновению компенсирующих дефектов. Если концентрация этих дефектов становится сравнимой с исходной концентрацией носителей заряда, то повышается радиационная стойкость электрофизических свойств компенсированного кремния [67; с.9-12, 73; с.75-78, 102; с.135-137, 103; с.3-9, 104; с.70-72, 105; с.162-167]. Большинство исследователей считают, что на электрофизические свойства компенсированного материала влияет характер радиационных (или примесных) дефектов, а другие исследователи основным вкладом считают высоту потенциальных барьеров ( $\Delta$ ) между высокоомными и низкоомными областями. Однако влияние вклада потенциальных барьеров между низко- и высокоомными – областями на электрофизические свойства кремния под действием проникающей радиации остается недостаточно изученным. Как

выше отмечалось, целью исследования данной главы является влияние высоты потенциального барьера между высокоомными и низкоомными областями на радиационную стабильность электрофизических свойств ядерно-легированного кремния *p*-типа (*p*-Si<B,P>). В качестве исходного материала использовался кремний *p*-типа, с удельным сопротивлением 1÷20 Ом·см. Высота потенциального барьера в образцах изменялась при варьировании времени легирования кремния примесями фосфора в атомном реакторе BBP-CM при флюенсе нейтронов  $\varphi \approx 8 \cdot 10^{13}$  см<sup>-2</sup>·c<sup>-1</sup>. При этом концентрация наведенного атома фосфора рассчитывалась по формуле [52; c.18-53, 58; c.2-6]:

$$N_P = 1, 7 \cdot 10^{-4} \, \Phi, \tag{3.12}$$

где  $\Phi = \phi \cdot t$  – поток медленных нейтронов;  $\phi$  – плотность потока медленных нейтронов; *t* – время облучения.

Отжиг радиационных дефектов (после облучения медленными нейтронами,  $E \le 0,1$  МэВ) проводился при температуре ~1270 К на воздухе, в течение ~30 мин с последующим охлаждением со скоростью (5÷10) град./мин.

Омические контакты на *p*-Si<B,P> получали путем припаивания сплава Sn+In (50% +50%) при температуре ~400 К.

Высота потенциального барьера между дырочно–дырочным ( $p^{min}-p^{max}$ ) переходом в образцах кремния, определялась известными выражениями [104; с.70-72, 106; с.90-92.]:

где 
$$p^{\max} = p_0 (1 + \frac{p^{\max} - p^{\min}}{2p_o} - K)$$
 и  $p^{\min} = p_0 (1 - \frac{p^{\max} - p^{\min}}{2p_o} - K)$  (3.13)
максимальная и минимальная концентрации носителей зарядов;  $K = (N_P/p)$  - степень компенсации,  $N_P$  - концентрация атомов наведенного фосфора,  $p_o$ -средняя концентрация носителей зарядов до облучения;  $\tau_o$ ,  $\tau$  – время жизни основных носителей заряда до и после нейтронного легирования кремния *p*-типа.

Параметры электрофизических свойств исследованных образцов с различными потенциальными барьерами, приведены в таблице 3.4.

Таблица 3.4

N⁰	Тип Образцов	Удельное сопротивл ение р, Ом∙см	Концентрации носителей заряда <i>p</i> , см <sup>-3</sup>	Подвижность носителей заряда µ, см <sup>2</sup> / В·с	Высота потенциаль- ного барьера Δ, мэВ
1.	<i>p</i> -Si <b></b>	9,8	$1,9.10^{15}$	315	5
2.	p-Si < B,P> $p_0=2.10^{16} \text{ cm}^{-3}$	9,1	$2,3 \cdot 10^{15}$	280	23
3.	<i>p</i> -Si <b></b>	1800	$1,3.10^{13}$	280	10
4.	p-Si < B,P> $p_o=2.10^{16} \text{ cm}^{-3}$	1500	1,5·10 <sup>13</sup>	275	115,7

Тип и электрофизические параметры образцов кремния

Из таблицы видно, что контрольные образцы *p*-Si<B> (образцы 1 и 3) практически однородны по проводимости, а ядерно-легированные кремниевые образцы (образцы 2 и 4), наоборот, неоднородны.

Далее эти образцы облучались нейтронами, в горизонтальном канале атомного реактора при температуре ~300 К. Эффективность образования радиационных дефектов (РД) исследовалась методом измерения коэффициента Холла И удельного сопротивления при комнатной температуре.

Результаты исследования приведены на рис. 3.16. Как видно из рисунка в образцах p-Si<B,P> скорость удаления носителей (кривые 2 и 4) больше, чем в контрольных образцах (кривые 1 и 3).



Рис. 3.16. Зависимость относительного изменения концентрации носителей заряда в кремнии от флюенса быстрых нейтронов: 1) p-Si<B> ( $\rho = 9,8$  Ом·см); 2) p-Si<B,P> ( $\rho = 8,6$  Ом·см); 3) p –Si<P> ( $\rho = 1800$  Ом·см); 4) p-Si<B,P> ( $\rho = 1500$  Ом·см) [106; с.90-92]

Для наших исследуемых образцов также воспользовались барьерными моделями для объяснения выше упомянутого эффекта, которые приведены на рис. 3.17-3.18 (*a*, *b*). Для объяснения наблюдаемого эффекта предлагается барьерная модель [68; с.86-90].

Суть этой модели заключается в следующем. Известно, что при выращивании кристаллов кремния из-за неравномерного распределения основных примесей бора (или фосфора) технологических примесей кислорода и углерода в объеме кристалла образуются низкоомные ( $p^{max}$ )- и высокоомные ( $p^{min}$ )- области проводимости.

74



Рис. 3.17. Модели неоднородных  $p^{\text{max}}$  - и  $p^{\text{min}}$  - областей, образующихся в радиационно-компенсированном кремнии до (а) и после нейтронного облучения (б):  $E_1 = E_v + 0,28 \text{ >B}$ ,  $E_2 = E_v + 0,35 \text{ >B}$ , и  $E_3 = E_v + 0,40 \text{ >B}$ 

[73; c.75-78]

Наличие контактов между этими областями приводит к возникновению незначительного потенциального барьера  $\Delta_o$  для носителей заряда (см. таблицу 3.4). При этом энергетическое положение уровня Ферми (E<sub>f</sub>) для  $p^{\text{max}}$ – и  $p^{\text{min}}$  - областей остается единым, причем его положение определяет  $p^{\text{max}}$  – область [73; с.75-78]. В облученных нейтронами образцах кремния *p*-типа образуются дефекты с энергиями ионизации: E<sub>v</sub> + 0,18 эB, E<sub>1</sub>= E<sub>v</sub> + 0,28 эB, E<sub>2</sub>= E<sub>v</sub> + 0,35 эB, E<sub>3</sub> = E<sub>v</sub> + 0,40 эB.

В нашем случае  $E_f \ge E_V +0,20$  эВ, поэтому считалось, что в  $p^{max}$  -области, все наблюдаемые донорные РД полностью ионизованы. В *p*-Si<B>  $p^{min}$  – области частично, а в *p*-Si<B,P> полностью ионизованы (например, рис. 3.17*b* и 3.18*b* для №1 и 2 образцов). Кроме того считалось, что концентрация основных носителей заряда – дырок (*p* =N<sub>B</sub>) больше, по сравнению с концентрацией РД (N<sub>PД</sub>), т.е (N<sub>B</sub>) > (N<sub>PД</sub>).

На начальных этапах нейтронного облучения  $p^{\min}$ - области кристалла становятся более высокоомными, а  $p^{\max}$ -области, практически не чувствуя компенсацию носителей, остаются такими же низкоомными. Т.е. благодаря существенному различию степени компенсации в этих областях, облучение

приводит к повышению исходной высоты потенциального барьера (∆₀→∆) между этими областями (рис. 3.18*b*).



Рис. 3.18. Модели неоднородных  $p^{\text{max}}$ – и  $p^{\text{min}}$ - областей, образующихся в нейтронно-легированном кремнии: до (а) и после повторного нейтронного облучения (б):  $E_1 = E_v + 0,28$  эВ,  $E_2 = E_v + 0,35$  эВ и  $E_3 = E_v + 0,40$  эВ [73; c.75-78]

Повышение флюенса нейтронного облучения приводит к  $\Delta_{o}{\rightarrow}\Delta$  , т.е. в свою очередь, к росту степени заполнения РД  $p^{\min}$  – области, в данном случае Е<sub>1</sub>. При этом освободившиеся дырки из  $p^{\min}$  области переходят в  $p^{\max}$ область. В конечном итоге (до определенного флюенса облучения) в валентной зоне неоднородного (компенсированного) материала концентрация свободных дырок остается практически неизменной до тех пор, пока концентрация освободившихся дырок не сравняется С концентрацией электронов, захваченных дефектами Е<sub>1</sub> в *p*<sup>min</sup> – области (рис. 3.18b), т.е. пока не произойдет существенного изменения энергетического положения E<sub>f</sub> в *p*<sup>max</sup> – области. Как упоминалось выше в таком неоднородном материале, в основном, токопроводящей является именно  $p^{\max}$  – область. Аналогичный эффект ранее наблюдался для n-Si<P> в [73; с.75-78, 67; с.9-12, 107; c.171-180, 108; c.665-669].

В образцах *p*-Si<B,P> до повторного воздействия нейтронного облучения имеются микронеоднородности по проводимости с высотой потенциального барьера большей, по сравнению *p*-Si<B> (см. таблицу 3.4).

Для сравнения скорости удаления носителей в обоих типах образцов (p-Si<B,P> и p-Si<B>) концентрация РД, возникающих в процессе облучения, считалась практически одинаковой. В этих условиях можно сказать, что зарядовое состояние радиационных дефектов в высокоомной области существенно отличается по отношению к уровню Ферми (рис. 3.17*b* и 3.18*b*).

Поэтому в  $p^{\min}$  области заполнение электронами РД происходит быстрее в ядерно- легированном кремнии, чем в контрольном (благодаря  $\Delta_0 p$ -Si<B,P>,  $\Delta_0 p$ -Si<B>) (рис. 3.18), соответственно скорость удаления носителей в ядерно-легированном кремнии так же увеличивается.

#### § 3.7. Исследование времени жизни носителей заряда в нейтроннолегированном кремнии в зависимости от концентрации исходного бора

Одной из технологических операций при получении нейтроннолегированного монокристаллического кремния (НЛК) является термический отжиг при высоких температурах. Результаты, полученные различными авторами по изменению электрофизических параметров при термообработке НЛК, особенно времени жизни носителей тока, не всегда согласуются [73; с.75-78, 106; с.90-92]. Причинами этого, на наш взгляд, являются различные условия и режим термообработки кремния (температура, время отжига, геттерирующая среда, удельное сопротивление кристалла и др.) после нейтронного легирования.

В данном параграфе приведены измеренные нами электрофизические параметры методом затухания фотопроводимости, изучение влияния высокотемпературной обработки на рекомбинационные свойства НЛК в зависимости от концентрации бора. Отжиг радиационных дефектов (РД) проводился при температуре ~1273 К на воздухе, в течение ~30 мин. с последующим медленным охлаждением (5÷10) град./мин. Для выяснения номинального значения подвижности основных носителей заряда, проводился изотермический отжиг при температуре ~1273 К [67; с.9-12, 73; с.75-78, 106; с.90-92].

Омические контакты на *p*-Si<B,P> и *p*-Si<B> получали путем припаивания сплава Sn+In (50% + 50%) при температуре ~400 К. Электрофизические рекомбинационные параметры легированного кремния приведены в табл. 3.5.

Таблица 3.5

Электрофизические параметры нейтронно - легированного кремния в зависимости от исходного материала (T<sub>отж</sub> =1270 K, t<sub>отж</sub> =30 мин)

	Исходный образец	Нейтронно-легированный кремний (НЛК)				Время
№		ρ, Ом∙см	<i>р</i> (или <i>n</i> ), см <sup>-3</sup>	μ, см <sup>2</sup> /В·с	τ, c	облучения тепловыми нейтро- нами, t, c
1		$2,80 \cdot 10^3$	$1,40\cdot 10^{13}$	172	6,20·10 <sup>-7</sup>	$4 \cdot 10^5$
2	КДБ-1	$2,60 \cdot 10^3$	$1,30 \cdot 10^{13}$	210	8,10·10 <sup>-7</sup>	$6 \cdot 10^5$
3		$2,90 \cdot 10^3$	$1,96 \cdot 10^{13}$	190	$6,50 \cdot 10^{-7}$	$8 \cdot 10^{5}$
4		$4,00.10^3$	$2,30 \cdot 10^{12}$	710	9,30·10 <sup>-7</sup>	$10^{6}$
5	КДБ-10	$3,70 \cdot 10^3$	6,20·10 <sup>12</sup>	284	$3,50.10^{-6}$	$4 \cdot 10^{4}$
6		$3,60 \cdot 10^3$	$6,35 \cdot 10^{12}$	276	$2,50 \cdot 10^{-6}$	$6 \cdot 10^4$
7		$3,60 \cdot 10^3$	$6,95 \cdot 10^{12}$	260	$1,80.10^{-6}$	$8 \cdot 10^{5}$
8		$5,00 \cdot 10^4$	$1,28 \cdot 10^{11}$	1000	$1,00.10^{-6}$	$10^{5}$
9	КДБ-100	$2,40\cdot 10^3$	$7,80 \cdot 10^{12}$	340	6,00·10 <sup>-6</sup>	$3 \cdot 10^{3}$
9		$2,00 \cdot 10^3$	9,80·10 <sup>12</sup>	330	7,00·10 <sup>-6</sup>	$6 \cdot 10^{3}$
10		$2,20\cdot10^{3}$	8,75·10 <sup>12</sup>	320	5,00·10 <sup>-6</sup>	$10^{4}$

Как видно из таблицы подвижности основных носителей заряда в нейтронно-компенсированном кремнии p-типа (при идентичности  $\rho$ ) изменяются в зависимости от исходной концентрации бора, т.е. при вышеуказанной температуре отжига радиационные дефекты отжигаются не полностью. Время жизни носителей заряда в НЛК практически не зависит от концентрации бора и составляет около 10<sup>-6</sup> сек. Как видно из рисунка 3.19 подвижность носителей заряда ( $\mu$ ) увеличивается с ростом времени изотермического отжига и, чем больше концентрации компенсирующих донорных центров (в данном случае, фосфора), тем больше номинальное значение  $\mu$  сдвигается в сторону большего времени отжига (при этом концентрация основных носителей заряда в исследованных образцах остаётся практически неизменной).



Рис. 3.19. Зависимость подвижности носителей заряда от температуры изотермического отжига в НЛК (после  $T_{otm.} = 1270$  K, t = 30 мин.) при различном флюенсе тепловых нейтронов (см<sup>-2</sup>): 1) 10<sup>19</sup>; 2) 10<sup>18</sup>; 3)10<sup>17</sup>

[106; c.90-92]

Следовательно, можно сказать, что для достижения номинального значения концентрации носителей заряда достаточно температуры 1273 К и времени отжига t = 30 мин., а для уменьшения влияния структурных дефектов (например, областей разупорядочения) необходимо увеличить

время отжига. Кинетика релаксации неравновесных носителей заряда в компенсированном материале происходит различным образом:  $\tau_2 \approx 98$  с для *p*-Si<B,P>, а  $\tau_2 \approx 5$  с для *p*-Si<B>. Отличие релаксационных процессов в компенсированном и в контрольном кремнии объясняется различной степенью микронеоднородности по проводимости.

Изменение времени жизни носителей заряда от длительности термообработки показано на рис. 3.20.

Как видно из рис. 3.20 с увеличением времени отжига значения т в начале возрастает, а затем стабилизируется.



Рис. 3.20. Зависимость времени жизни носителей заряда в НЛК (исходный КДБ-1) от длительности отжига, при температуре ~1270 К [106; с.90-92]

На основе полученных результатов (таб. 3.5) показана возможность получения термостабильного высокоомного материала НЛК, который может использоваться для создания полупроводниковых приборов, работающих в широком диапазоне частот.

С ростом времени изотермического отжига подвижность носителей заряда (µ) растет и, чем больше концентрация фосфора, тем больше смешается номинальное значение µ в сторону большего времени отжига, что

связано с неполным отжигом структурных дефектов (в данном случае, область разупорядочения).

В компенсированном *p*-Si<B,P> и контрольном *p*-Si<B> релаксационный процесс происходит различным образом:  $\tau \approx 98$  с. для *p*-Si<B,P>, и  $\tau \approx 5$  с для *p*-Si<B>. При этом с ростом исходной концентрации носителей заряда (в данном случае бора-*B*) в компенсированном кремнии наблюдается возрастание  $\tau$  (при равных значениях  $\rho$ ), которое обусловлено различной степенью микронеоднородности по [67; с.9-12, 106; с.90-92] проводимости в исследованных образцах [67; с.9-12, 73; с.75-78, 89; с.262-264].

Термостабилизация времени жизни носителей заряда в НЛК зависит от исходной концентрации бора, т.е. чем больше исходная концентрация бора, тем больше длительность термоотжига. Вышеприведенные экспериментальные результаты позволяют сделать следующие выводы:

#### Выводы к главе III

- Установлена роль нейтронного облучения в улучшении технологических и электрофизических характеристик терморезисторов из компенсированного кремния. Правильный выбор времени и флюенса облучения нейтронами, а также уменьшение концентрации основных носителей заряда позволяют получить изделие с заданными характеристиками.
- Предложена технология изготовления терморезисторов с отрицательным ТКС из кремния *n*-типа. Анализ температурной зависимости изменения сопротивления показал очень высокий выход годной конечной продукции, т.е. выход годных терморезисторов доходит до 92%.
- Определен интервал флюенса быстрых нейтронов (2·10<sup>14</sup>÷3·10<sup>13</sup> нейтр./см<sup>2</sup>) для n<sup>+</sup>-n-n<sup>+</sup> –структур, которые используются для изготовления термодатчиков. Установлено, что увеличение флюенса выше 3·10<sup>13</sup>

нейтр./см<sup>2</sup> приводит к нежелательному увеличению остаточной радиоактивности, т.е., уменьшению годности готовых изделий.

- Установлен минимальный флюенс нейтронов Φ ~ 2·10<sup>14</sup> см<sup>-2</sup> (энергия нейтронов ≥0,1 МэВ), облучение которым исходного кремния с удельным сопротивлением 150 Ом·см, приводит к получению термочувствительного материала (номинальное сопротивление при комнатной температуре ~10<sup>5</sup> Ом).
- 5. Показана возможность создания фоторезисторов из кремния *n*-типа с удельным сопротивлением 100÷170 Ом·см путем облучения быстрыми нейтронами атомного ректора. Выявлен оптимальный режим радиационно-термической обработки кремния для получения фоторезисторов. Обнаружено ~10 кратное изменение сопротивления при освещенности ~200 лк.
- 6. Результаты зависимостей R/R<sub>0</sub> от времени распада радиационных дефектов показали, что путем термического воздействия на процесс распада можно получить терморезистор. На основе этого предложена схема конструкции электронного термометра.
- Показана возможность изготовления термочувствительных n<sup>+</sup>-n-n<sup>+</sup> структур на основе компенсированного кремния n-типа с радиационными дефектами, способных определять температурное воздействие в интервале 373÷473 К.
- 8. Выявлено, что после повторного облучения скорость удаления основных носителей в *p*-Si<B,P> значительно больше, чем в контролном *p*-Si<B>, которое обусловлено наличием потенциального барьера до облучения.

## ГЛАВА IV. РАЗРАБОТКА СПОСОБА ПОЛУЧЕНИЯ ДЕТЕКТОРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПОТОКА НЕЙТРОНОВ НА БАЗЕ ЯДЕРНО-ТРАНСМУТАЦИОННОГО КРЕМНИЯ

## § 4.1. Определение потока нейтронов ядерного реактора полупроводниковыми детекторами

Как известно полупроводниковые (в основном, кремний и германий) "газовыми", детекторы имеют преимущества по сравнению с "сцинтиляционными" из-за высокой плотности, что позволяет, расширить диапазон регистрируемых энергий и провести измерения с высоким энергетическим разрешением. Например, работе В [109; c.214-2151 исследовано влияние нейтронного облучения на электрофизические и радиометрические характеристики кремния р-типа и установлено, что энергетическое разрешение E<sub>q</sub>=(100-135) кэВ по альфа частицам (источник Радон-226), а в работе [110; с.403-406] оптимизирована технология получения позиционно-чувствительных полупроводниковых детекторов (Si(Li) *p-i-n* структура) с термоохлаждающим устройством (элемент Пельте) и достигнуто энергетическое разрешение 2.3÷2.6 кэВ (Америций – 241). Авторы [111; с.234-237] для получения однородно компенсированного по объему Si(Li) провели выравнивающий дрейф при температуре 60°С и напряжении (200-300) В и по их данным с повышением напряжения происходит рост уровня шума. Показано [112; с.32-33], что эффективность  $\alpha$ Si(Li)-Si(Li) детектора ПО электрическим, радиометрическим И спектрометрическим характеристикам выше по сравнению с детектором (Si(Li) *p-i-n* структурой, что установлено в на основе исследования энергии спектра α-частиц (Радон – 226) и β-частиц (Висмут-207). Разработаны, оптимизированы полупроводниковые детекторы во многих работах, и показана возможность их использования для определения энергетического спектра частиц, например, в [113; с.151-154, 114; с.179-184, 115; с.124-126],

Известно, что принцип работы полупроводниковых детекторов основан на изменении электрофизических свойств полупроводников под действием нейтронов [67; с.9-12, 69; с.1-7, 72; с.3-5, 111; с.234-237; 116; с.9; 117; с.16]. Следует отметить, что на свойства монокристала кремния (р-типа) влияет соотношение потока быстрых и тепловых нейтронов и температура обработки, что установлено облучениями кремния в четырех разных ядерных [117; с.16]. Увеличение размера однородной области реакторах ПО сопротивлению с 6 мм до 24 мм было достигнуто после нейтронного облучения дозой ~ 10<sup>17</sup> нейтр./см<sup>2</sup> [118; с.7]. Известен способ [52; с.18-25, 72; c.3-41 измерения плотности потока медленных нейтронов полупроводниковым детектором, созданным на основе донорной примеси фосфора, образующегося при захвате одним из изотопов кремния медленного нейтрона. При этом наведенную концентрацию атомов фосфора можно рассчитать по формуле [52; с.18-25, 67; с.9-12, 72; с.3-4, 116; с.9]:

$$N_P = 1, 7 \cdot 10^{-4} \cdot \varphi \cdot t, \tag{4.1}$$

где  $\varphi$  - плотность потока медленных нейтронов, t – длительность облучения, с.

Отжиг радиационных дефектов, возникающих в процессе облучения нейтронами, проводят при температуре ~1073 К (в течение 30÷60 мин) с последующим [67; с.9-12] медленным охлаждением. Наведенная концентрация атомов фосфора ( $N_P$ ) определяется измерением концентрации основных носителей заряда ( $N_e$ ) в кремнии до облучения и после термического отжига. Далее, зная *t* и  $N_P$ , из выражения (4.1) определяется значение  $\varphi$ .

Основным недостатком способа является его не экспрессность, что связано с необходимостью проведения высокотемпературного термоотжига

радиационных дефектов, и существенной зависимостью результатов от скорости охлаждения после термоотжига.

Существует также способ измерения флюенса быстрых нейтронов полупроводниковым детектором, включающий в себя калибровку детектора, измерение удельного [119; с.7] сопротивления детектора до и после облучения, облучение неизвестным флюенсом быстрых нейтронов. Флюенс быстрых нейтронов определяют по изменению удельного электрического сопротивления кремния за счет образования в нем радиационных дефектов под воздействием быстрых нейтронов, причем их флюенс вычисляют по формуле:

$$f = K(\frac{1}{\rho_o} - \frac{1}{\rho}) \tag{4.2}$$

где *К* – коэффициент пропорциональности, который постоянен для измеряемого спектра нейтронов и не зависит от исходного удельного электрического сопротивления, коэффициент *К* определяют при калибровке детекторов;

*р*<sub>o</sub> – исходное удельное электрическое сопротивление, которое измеряется перед облучением детектора;

*ρ* – конечное удельное электрическое сопротивление, которое измеряется после облучения детектора [119; с.7] флюенсом *f* быстрых нейтронов.

Детектор позволяет измерять широкий диапазон флюенса быстрых нейтронов от  $10^{10}$  до  $10^{18}$  см<sup>-2</sup>, соответствующим выбором [119; с.7] исходного сопротивления кремния. Контроль за флюенсом быстрых нейтронов осуществляется с помощью порогового серного активационного детектора, показывающего значение интегрального потока нейтронов с энергией выше 3 МэВ, которое пересчитывается в интегральный поток [119; с.7] нейтронов с энергией свыше 10 кэВ в соответствии со спектрами нейтронов каналов [51; с.48] ядерного реактора типа ИРТ-Т [51; с.48, 69; с.7]. Недостатком [69; с.7] этого способа, является, во-первых, невозможность определить плотности потока медленных нейтронов, следовательно, не позволяет экспрессно определять плотность потока медленных нейтронов; во-вторых, для определения флюенса быстрых нейтронов в зависимости от измеряемого потока нейтронов выбирается исходное значение удельного сопротивления кремния.

Поэтому является предпочтительным экспрессное определение плотности потока медленных нейтронов, основанное на изменении электросопротивления резистора из полупроводникового кремния *n*-типа под действием нейтронного излучения в атомном реакторе.

Решение указанной задачи требует: выбора удельного сопротивления кремния *n*-типа для установления минимального времени облучения детектора тепловых нейтронов, определения верхней и нижней границы электрического сопротивления после облучения детектора, т.е. степени компенсации кремния *n*-типа. В результате достигаются условия для оптимизации параметров НЛД.

## § 4.2. Оптимизация параметров кремниевых детекторов в потоке нейтронов

Решение выше отмеченной задачи достигается способом измерения электросопротивления полупроводникового кремниевого резистора (детектора), изготовленного из кремния *n*-типа с исходным удельным электросопротивлением ( $\rho_0$ ) в интервале от 1 до 5 Ом·см ( $R_0$ ) и после облучения (R). Время облучения выбирается так, чтобы увеличение значения относительного электросопротивления  $R/R_0$  находилось в диапазоне от 10 до 1000.

Для создания такого резистора (детектора) используется полупроводниковый кремниевый резистор со структурой  $n^+$ -n- $n^+$ , т.е.

86

детектор, изготовленный из кремния *n*-типа с удельным электрическим сопротивлением (ρ), равным от 1 до 5 Ом·см. Выбор исходного кремния *n*-типа с удельным сопротивлением от 1 до 5 Ом·см и длительность облучения обусловлены двумя причинами:

- если удельное сопротивление кремния *n*-типа с  $\rho > 5$  Ом·см, тогда верхнюю границу длительности облучения выбирают таким образом, чтобы относительное изменение электросопротивления детектора ( $R/R_o$ ) было меньше 1000 (рис. 4.1). При этом значения подвижности основных носителей заряда практически остаются неизменными [ $R/R_o = (\mu_o n_o) / (\mu n)$ , где  $\mu_o$ -,  $n_o$ -,  $\mu$ -, n-, подвижность и концентрации основных носителей заряда до и после облучения, соответственно].



Рис. 4.1. Зависимость относительного изменения электросопротивления от длительности облучения нейтронов в атомном реакторе при различных значениях удельного сопротивления кремния *n*- типа (Ом⋅см): 1) 1,1; 2) 2,1; 3)
4,97 [69; c.7]

- если удельное сопротивление кремния *n*-типа *ρ* равно 1 Ом·см, тогда нижнюю границу длительности облучения выбирают таким образом, чтобы

относительное изменение электросопротивления детектора ( $R/R_o$ ) было больше 10 (рис. 4.1). При этом величина  $R/R_o$  будет значительно больше по сравнению с ошибкой измерений (общая погрешность измерения  $R/R_o$  составляют ± 3%).

В детекторе (кремнии *n*-типа с удельным сопротивлением от 1 до 5 Ом·см) возникающие радиационные дефекты  $E_c$ -0,18 эВ (*A*-центр) полностью ионизованы при комнатной температуре и на изменение сопротивления практически не влияют, а другие возникающие радиационные центры заполнены электронами и их концентрации не высокие. Именно эти условия определяют выбор верхней и нижней границы исходного удельного сопротивления кремния *n*-типа и относительного изменения электросопротивления после облучение нейтронами в интервале от 10 до 1000 (рис. 4.1).

Измерение плотности медленных нейтронов осуществляется следующим образом. При облучении электрическое сопротивление полупроводникового кремниевого резистора – детектора экспоненциально зависит от флюенса нейтронов *F* [69; с.7]:

$$R = R_o \exp(kF), \text{Om}$$
(4.3)

где  $R_o$ -, R- электрическое сопротивление до и после облучения, соответственно;  $F = \varphi \cdot t$  - флюенс нейтронов;  $\varphi$ - плотность потока нейтронов; t – длительность облучения; k– коэффициент радиационного повреждения по проводимости, зависящий от исходной проводимости материала ( $\sigma_o = 1/\rho_o$ , где  $\rho_o$  – исходное удельное сопротивление) и вида излучения [69; с.7]:

$$k = \frac{\Delta\sigma}{F} \cdot \rho_0 \, , \, \mathrm{cm}^2 \tag{4.4}$$

где  $\frac{\Delta \sigma}{F}$  - начальное (10 %) уменьшение электропроводности материала при облучении

$$\frac{\Delta \sigma}{F} = \alpha \cdot (\rho_o)^{-b}, \operatorname{cm}^2 / \operatorname{OM-cm}$$
(4.5)

где *α* и *b* -коэффициент пропорциональности и показатель степени, соответственно.

Величина  $\frac{\Delta\sigma}{F}$  определяется по наклону начальных (10 %) участков дозовых зависимостей  $R/R_o \sim f(F)$  (рис. 4.1). В результате, выражение (4.3) с учетом (4.4) и (4.5) записывается следующим образом

$$\frac{R}{R_o} = \exp(\alpha \cdot \rho_o^{1-b} \cdot \varphi \cdot t)$$
(4.6)

Из выражения (4.6) находится плотность потока медленных нейтронов

$$\varphi = \frac{\ln \frac{R}{R_o}}{\alpha \cdot \rho_o^{1-b} \cdot t} \tag{4.7}$$

Для определения коэффициента пропорциональности ( $\alpha$ ) и показателя степени (b) используется кремний n-типа с удельными сопротивлением от 1 до 5 Ом-см. Из слитка кремния n-типа вырезаются пластины толщиной 0,6 мм, которые шлифуются с обеих сторон микропорошком (M-10) до толщины 0,5 мм. После механической обработки пластины промываются 2 - 3 раза в дистиллированной воде [69; с.7], кипятятся (обезжириваются) в толуоле [59; с.136-137], а затем в дистиллированной воде. На чистую поверхность пластины стеклянными трубками наносится раствор фосфора (стеклянные трубки, диаметром ~3 мм промываются дистиллированной водой, кипятятся в толуоле). Подготовленные пластины складываются в стопку и осторожно загружаются в рабочую зону печи при заранее установленной температуре [59; с.136-137]. Диффузию фосфора проводят при температуре 1373±278 К в течение ~60 мин, затем печь выключают [59; с.136-137], и пластины охлаждаются с печью [69; с.7]. Для снятия окисного слоя пластины погружаются в плавиковую кислоту (HF) на 5  $\div$  10 с и промываются 2-3 раза в дистиллированной воде. Готовые пластины толщиной 0,5 мм с омическими контактами разрезают на станке алмазной резки на прямоугольные кристаллики размерами 5×5 мм<sup>2</sup>. Для определения коэффициентов  $\alpha$  и b, готовые полупроводниковые кремниевые резисторы ( $n^+$ -n- $n^+$  - структуры) с омическими контактами, с различным удельным сопротивлением подвергаются нейтронному облучению в канале атомного реактора BBP-CM (ИЯФ АН РУз) в интервале флюенса ( $2,2 \div 3$ )·10<sup>14</sup> см<sup>-2</sup>. Полученные значения отношений электропроводностей  $\sigma/\sigma_0$  (где  $\sigma_0$ ,  $\sigma$ - до и после облучение, соответственно) приведены на рис. 4.2.



Рис. 4.2. Относительное изменение электропроводности в зависимости от флюенса медленных нейтронов при различных значениях удельного сопротивления кремния *n*-типа (Ом·см)<sup>-1</sup>: 1) 0,09; 2) 0,476; 3) 0,201 [69; с.7]

По графику (рис. 4.2) определяется скорость начального (10 %) уменьшения электропроводимости  $(0,1\Delta\sigma / F) n^+ - n - n^+ - структуры.$ 

По наклону зависимости скорости начального (10 %) уменьшения электропроводимости в кремнии *n*-типа от исходного удельного сопротивления кремния *n*-типа (рис. 4.3) определяется коэффициент *b* = 0,15.



Рис. 4.3. Зависимость начальной скорости уменьшения электропроводимости в кремнии *n*-типа при облучении нейтронами от исходного удельного сопротивления кремния *n*-типа (Ом·см): 1) 1; 2) 2; 3) 5 [69; с.7]

Из (4.3), зная *b*,  $(0,1\Delta\sigma/F)$  и значение исходного удельного сопротивления ( $\rho_0$ ) кремния *n*- типа, определяется значение коэффициента  $\alpha = 2,7 \cdot 10^{-16}$  см<sup>2</sup>. Из (4.7) определяется плотность потока, зная значения изменения величины электросопротивления ( $R/R_o$ ), длительности облучения (t, с) детектора, коэффициент пропорциональности ( $\alpha$ ) и показателя степени (b), а также значение  $\rho_0$  кремния *n*-типа до облучения из следующего выражения [69; с.7]:

$$\varphi = 3,7 \cdot 10^{15} \cdot \frac{\ln \frac{R}{R_o}}{t \cdot \rho_o^{0.85}}, \, \mathrm{cm}^{-2} \cdot \mathrm{c}^{-1}$$
(4.8)

Электрическое сопротивление детектора ( $n^+$ -n- $n^+$ -структуры) измеряется при температуре 303 К до ( $R_o$ ) и после (R) облучения нейтронами (рис. 4.3).

## § 4.3. Технология получения нейтронно-легированного кремния для детектора измерения плотности потока нейтронов

На основе критического анализа литературных данных [11; с.17, 20; c.27-35, 26; c.7, 27; c.175-181, 35; c.263-269, 38; c.5-13, 57; c.317-320, 61; c.10-15; 63; с.14-19; 120; с.651-653] и учитывая возможность образования термостойких дефектных кластеров в процессе долговременной нейтронной обработки монокристалла кремния [10; с.89-90], предложена технология получения нейтронно-легированного кремния для детектора измерения нейтронов. Технологический плотности потока этап создания полупроводникового детектора из монокристаллического нейтроннолегированного кремния (НЛД) состоит из следующих последовательно выполняемых операций:

1. Предварительная заготовка пластин. Пластины для НЛ кремния необходимого диаметра [113; c.151-154] получают путем разрезания монокристаллов кремния *p*-типа с *ρ* = 1 - 5 кОм·см, с толщиной d = 10÷30 мм.

2. Для удаления механически нарушенного слоя во время резки используется двухсторонняя шлифовка на шлифовальном станке с применением микропорошков М-14 – М5 с последовательным уменьшением диаметра абразива. При этом с каждой стороны удаляется слой толщиной не менее 50 мкм [113; с.151-154].

3. Промывка пластин после шлифовки деионизованной водой с бесщелочным мылом, обработка в ультразвуковой ванне.

4. Очистка поверхности пластин:

a) кипячение в течение 15 минут в перекисно-аммиачном растворе. При обработке в этой слабощелочной среде эффективно удаляются неполярные органические соединения-загрязнения, такие как минеральные масла, парафины и т.д., дипольный момент молекул таких веществ невелик, поэтому

они обладают высокой удельной поверхностной энергией и обуславливают термодинамическую нестабильность поверхности;

б) кипячение в течение 7 минут в концентрированной азотной кислоте и промывка в деионизованной воде. При такой обработке ионные химические загрязнения (Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>+</sup>, Mg<sup>+</sup>, Fe<sup>2+</sup> и др.) удаляются с поверхности за счёт перевода их в растворимые в воде соли с последующей отмывкой в деионизованной воде.

При этом поверхность повторно и эффективно обрабатывается в перекисно-аммиачном растворе в течение 15 минут и промывкой снимаются [113; с.151-154] гидрофобные пористые окисные пленки [69; с.1-7, 72; с.3-5, 113; с.151-154].

5. Подготовленные шайбы помещают в кварцевую ампулу и запаивают. Далее, ампулы с образцами подвергают нейтронному облучению в канале атомного реактора до полной компенсации основных носителей заряда атомами фосфора, наведенного [59; с.136-137] в результате ядерной реакции [72; с.9, 118; с.7;]:

$$^{30}_{14}Si + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{31}_{14}Si \xrightarrow{\beta} ^{31}_{15}P$$

6. Для отжига радиационных дефектов, облученные пластины помещают в бокс и загружают в рабочую зону печи при температуре 1073-1173 К в течение 3 ч. и затем печь выключают, пластины остывают вместе с печью.

Из полученных в результате нейтронного легирования пластин, в соответствие изготавливаются образцы с поставленными задачами, необходимой геометрии (в данном случае – шайбы). Далее, после проведения [59; c.136-137] нейтронной компенсации кремния, все пластины подвергаются [59; с.136-137] химико-технологической обработке.

## § 4.4. Изготовления образцов кремниевых детекторов для измерения потока нейтронов

Изготовление образцов детекторов исследуемого типа охватывает следующие технологические операции:

Полировка пластин кремния в смеси с плавиковой, азотной и уксусной кислотами в соотношении 1:7:3.

С использованием клея (50% парафина, 50% воск) пластины приклеиваются к тефлоновому диску и помещаются в сосуд (стакан фторопластовый), установленный под углом 45<sup>0</sup> к оси вращения. Частота вращения стакана и вязкость травителя определяются экспериментально для обеспечения минимальной разности толщин диффузионного слоя и ламинарного течения травителя. Используемое химико-динамическое травление обеспечивает минимальный разброс размера рельефа поверхности. В зависимости от необходимой толщины кристалла (скорость травления в данном травителе 4 мкм/мин) выбирается время травления пластин.

Кремниевая пластина крепится к тефлоновому диску с помощью смеси воска с парафином и ленты с липким слоем.

1. При креплении смесью воска с парафином пластина снимается с диска при нагревании и помещается в бокс с CCl<sub>4</sub>, удаляется клеющее вещество подогревом CCl<sub>4</sub>.

2. При креплении ленты липким слоем пластина снимается с диска и обрабатывается ацетоном. После каждого травления кристалл промывается в деионизованной воде в течение 10 минут и снимаются пластины с диска [113; с.151-154].

3. Пластина оставлятся на 24 часа в чистом контейнере для поверхностного окисления.

94



Рис. 4.4. Схема расположения детектора в корпусе: 1) НЛ пластины; 2) ковровые кольца; 3) клей и ЭКЛБ -10Б

4. Монтаж кристаллов в корпус осуществляется двумя способами с использованием двух модификаций корпусов (рис. 4.4), напыление электродов осуществается до монтажа в корпус или [113; c.151-154] в корпусе.

Второй корпус (рис. 4.4) содержит два ковровых кольца диаметром d=28 мм, внутренний диаметр колец d=18 мм.

Кристалл устанавливается между кольцами, покрытыми компаундом ЭКЛБ-ЮБ, необходым для изоляции кристалла от корпуса [113; с.151-154].

5. Осуществляется сушка сборки в инфракрасной печи при T=373 К в течение 10 часов для полимеризации компаунда.

6. Проводится напыление на лицевую сторону детекторов слоя золота толщиной 20÷40 мкг/см<sup>2</sup> на обе стороны детектора.

Напыление металлических электродов на поверхность кристаллов проводилось на установках УРМ-3 с предварительно отожженных лодочек. Лодочки W, Ta, Mo спирали W, Mo закрепляются на токовводах, система откачивается до 10<sup>-5</sup> мм.рт.ст вакуума, затем лодочка (спираль) разогревается до белого свечения и выдерживается ~ 2-3 мин.

Процесс подплавления осуществается при температуре ниже точки испарения навески и длится до 30-40 с.

Подложки перед напылением укладываются в различные, в зависимости от типа детекторов, подложки-держатели и устанавливаются в камерах напыления [59; с.136-137, 67; с.9-12, 73; с.75-78].

Для напыления золота Мо-лодочка очищается, затем в ней расплавляется Au, после чего испаряется на кремниевые подложки в течение 20-30 с. Напиления Al слоев аналогично с Au электродов.

Изготовленный образец кремниевого детектора для измерения потоке нейтронов приведена на рис. 4.5.



Рис. 4.5. Кремниевый детектор в разобренном (а) и собранном (б) виде

# § 4.5. Плотность потока нейтронов на девятом канале ядерного реактора BBP-CM

Ядерный реактор BBP-CM Института ядерной физики Академии наук Республики Узбекистан имеет 44 облучательских канала, из них 34 вертикальные и 10 горизонтальные каналы. Облучение образцов, в основном, осуществляется на вертикальных каналах, а на горизонтальных каналах установлены оборудования для научных исследований. Поэтому представляет интерес, в первую очередь, определить плотность потока медленных нейтронов в вертикальных каналах, особенно, в девятом канале, где наиболее часто облучаются образцы.

В качестве образцов использованы монокристаллы кремния с исходными удельными сопротивлениями 1,2 и 5 Ом-см. В таблице 4.1 приведены результаты измерений с тремя детекторами в сопоставлении со значением  $\varphi_{\text{дет}}$ , полученным известным [111; с.234-237, 121; с.24-26, 122; с.11] методом (после длительности обучения t = 120 секунд медленными нейтронами). Измеряя до и после облучения концентрации носителей заряда (дырок) кремния, определяются концентрации атомов наведенного фосфора.

Таблица 4.1

Измеренные электрофизические параметры образцов и плотность потока медленных нейтронов на ядерном реакторе BBP-CM

Образцы	ρ₀, Ом∙см	R <sub>0</sub> , Ом	R, Ом	R/ R <sub>o</sub>	$\phi$ , cm <sup>-2</sup> ·c <sup>-1</sup>	$\phi_{\text{det}}$ , cm <sup>-2</sup> ·c <sup>-1</sup>
Nº1	1	0,6	4,5	7,5	$6,2\cdot 10^{13}$	
<u>№</u> 2	2	1,4	53,2	38	$6,22 \cdot 10^{13}$	$6,2 \cdot 10^{13}$
<u>№</u> 3	5	1,8	4500	2500	$6,14 \cdot 10^{13}$	

где  $\varphi_{\text{дет}}$  – плотность потока медленных нейтронов, полученная в эксперименте по показаниям наведенной концентрации фосфора (контроль за плотностью потока медленных нейтронов осуществляется способом измерения плотности потока медленных нейтронов полупроводниковым детектором);

*ф*- плотность потока медленных нейтронов, полученная в соответствии с формулой (4.7) по изменению электрического сопротивления;

 $\rho_{\rm o}$  – исходное удельное сопротивление кремния *n*-типа (до облучения), Ом·см;

97

 $R_{\rm o}, R$  – электросопротивление до и после облучения, соответственно; t – длительность облучения, с.

Положительный эффект – экспрессность достигается за счет:

- готового кремниевого резистора (n<sup>+</sup>-n-n<sup>+</sup> структур) с омическими контактами и маленьким объемом (5×5×0,5 мм<sup>3</sup>), после облучения в течение 10÷15 мин. достигается предельно допустимый уровень радиации;
- достаточно быстрого и простого измерения электрического сопротивления;
- малой длительности времени облучения t = 1÷2 мин., которая достигается за счет выбора в качестве исходного материала детектора кремния с удельным сопротивлениям от 1 до 5 Ом·см, соответственно.

Следует отметить, что полученные экспериментальные результаты по плотности потока медленных нейтронов в девятом вертикальном канале ядерного реактора BBP-CM были сравнены с расчетными данными, выполненные по программе "IRT-2D", что показало хорошее соответствие  $(\phi_p = 6, 1 \cdot 10^{13} \text{ нейтр. cm}^2 \cdot \text{c}^{-1}).$ 

#### Выводы к главе IV

- 1. Разработана и апробирована технология способа изготовления детекторов из *n*-типа кремния с очень высокой термочувствительностью.
- 2. Установлен оптимальный режим изготовления детекторов путем измерения электросопротивления полупроводникового кремниевого резистора (детектора), изготовленного из кремния *n*-типа с исходным удельным электросопротивлением ( $\rho_0$ ) в интервале 1÷5 Ом·см ( $R_0$ ) до и после облучения (R) и определенного времени облучения, при котором увеличение относительного электросопротивления  $R/R_{o}$ значения

находится в диапазоне от 10 до 1000.

- Показана возможность экспрессного измерения плотности потока нейтронов изготовленным детектором, позволяющая управлять порядком проведения облучения образцов и изделий в потоке нейтронов с заранее выбранными флюенсами.
- Разработан экспрессный способ измерения интенсивности медленных нейтронов в атомном реакторе, заключающийся в использовании небольшого объема детектора (5x5x0,4 мм<sup>3</sup>) с удельным сопротивлением исходного материала детектора ρ₀ =(1÷5) Ом·см и облучении в течение 1÷2 минут.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенных исследований по диссертации на соискание ученой степени доктора философии (PhD) по техническим наукам на тему: «Разработка терморадиационных датчиков на основе нейтроннолегированного монокристаллического кремния» получены следующие результаты:

1. Предложен экспериментальный способ определения зависимости удельного сопротивления образцов от температуры до и после облучения нейтронами.

2. Установлен минимальный флюенс нейтронов  $\Phi = 2 \cdot 10^{14}$  см<sup>-2</sup> (энергия нейтронов ~0,1 МэВ) для облучения исходного кремния с удельным сопротивлением 100÷170 Ом·см, которое приводит к получению термочувствительного (*B*=6000 K) материала (номинальное сопротивление при комнатной температуре ~10<sup>5</sup> Ом), работающего в интервале температур 303÷373 K, а остаточная радиоактивность образца является минимальной.

3. Выявлено, что термостабильность параметров резисторов, полученных на основе кремния *n*-типа путем облучения нейтронами флюенсом  $(2,2\div2,7)\cdot10^{14}$  см<sup>-2</sup>, сохраняется при температурах не выше ~373 К.

4. Показано, что можно изготовить терморезистор из промышленного кремния *p*-типа с исходным удельным сопротивлением ( $10^3$ ) Ом×см с радиационной обработкой на нейтронном потоке ядерного реактора и разработана технология изготовления терморезисторов на базе *n*-типа кремния с  $\rho \sim 10^5$  Ом·см, работающие в диапазоне 273 ÷ 398 К.

5. Показана возможность создания фото - и терморезисторов из кремния *n*-типа с удельным сопротивлением 100÷170 Ом см путем облучения быстрыми нейтронами атомного реактора. Выявлен оптимальный режим радиационно-термической обработки кремния для получения

100

фоточувствительных структур. Получено ~10 кратное изменение сопротивления при освещенности ~200 лк.

6. Выявлены условия получения компенсированного кремния путем радиационной обработки потоками нейтронов и изготовления макета терморезистора работающего в области 303÷373 К. Пожарная сигнализация внедрена в производство терморезисторов, изготовлены терморезисторы совместно с компанией «Элекор».

7. На основе разработанной технологии изготовлены термо- и фотодатчики из легированного нейтронно-трансмутационным способом монокристаллического кремния, используемого для предупреждения пожароопасных ситуаций в объектах промышленности.

8. На основе термочувствительных  $n^+$ -n- $n^+$  структур изготовлены лабораторные образцы электронных термометров, позволяющих определить температуру тела человека.

9. Разработанный на основе кремния *n*-типа детектор для измерения плотности общего потока нейтронов позволяет измерять широкий диапазон флюенса нейтронов от 10<sup>10</sup> до 10<sup>18</sup> нейтронов/см<sup>2</sup>, соответствующим выбором исходного сопротивления кремния.

#### Благодарность коллегам по работе, научному руководителю.

Считаю своим приятным долгом выразить искреннюю и глубокую признательность моему научному руководителю д.ф.-м.н., профессору М.Ю.Ташметову за постоянную заботу и внимание, ценные советы и замечания в процессе выполнения всей работы.

В моей памяти навсегда светлые образы останется д.ф.-м.н., проф. М.Каримова и к.ф.-м.н., с.н.с. Н.А. Турсунова, внесшего большой научный В развитие радиационный физики вклад полупроводниковых материалов.

Я искренне благодарен к.ф.-м.н., с.н.с. Ш. Махкамову, к.ф.-м.н., с.н.с. Н.Т. Сулайманову, к.ф.-м.н., с.н.с. Ш.А. Махмудову за проявленный интерес, плодотворную дискуссию и полезные советы при выполнении данной работы. Выражаю свою благодарность всему коллективу лаборатории «Радиационной физики и техники твердотельной электроники» и «Структурных превращений в твердых телах» за поддержку и постоянную помощь в завершении данной работы.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Фрайден Д.Ж. Современные датчики. Справочник. Москва: Техносфера, 2005. - С. 587.
- Насриддинов. С.С. Иследование термодатчиков на основе Si<P,Ni> // Журнал нано-электронной физики. - Сумський державний университет (Украина), 2015. - Том 7, №3. – ID. 03037. -5с.
- Михеев В.П., Просандеев.А.В. Датчики и детекторы. Москва, 2007. С.172.
- Қаюмов М.А. Дозиметрия асослари ва ионлаштирувчи нурланишлардан ҳимояланиш. - Ташкент, 2013. –С.318.
- 5. Болтакс И.Б. Дифузия в полупроводниках. Москва, 1961. -С.460.
- Патент RU № 2202655. Способ получения резистентного кремния / Мильвидский М. Г., Пильдон В. И., Кожитов Л. В., Тимошина Г.Г. // Московский государственный институт стали и сплавов (Россия). - 2003. –С.6.
- Патент RU № 2284610. Способ изготовления мощного высокотемпературного полупроводникового резистора / Асина С. С., Комыса Н. Г. // Всероссийский электротехнический институт им. В.И. Ленина. - 2006. –С.11.
- Патент RU № 2445721. Способ изготовления мощного полупроводникового резистора / Асина С. С., Кокин С. А., Климов С. В. // Всероссийский электротехнический институт им. В.И. Ленина. - 2012. –С.15.
- Патент RU № 2058053. Материал для терморезисторов с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления / Логинова М.М., Иванова В.Ф., Полянский А.В., Павлоцкий Я.В., Андреев Ю.В., Олеск А.О., Гаврилов В.П., Пахомова З.И. // Научно исследовательский институт "Гириконд", 1995. –С. 9.

- 10. Ионов А.Н., Баранов П.Г., Бер Б.Я., Буланов А.Д., Годисов О.Н., Гусев А.В. Давыдов В.Ю., Ильин И.В., Калитеевский А.К., Калитеевский М.А., Сафронов А.Ю., Лазебник И.М., Riemann H., Abrosimov. N.V., Копьев П.С. Нейтронно-трансмутационное легирование фосфором моноизотопа кремния <sup>30</sup>Si // Письмо в ЖТФ. Санкт-Петербург, 2006. том 32, вып 12. С. 87-93.
- Патент RU №2514943. Способ и устройство для нейтронного легирования вещества /Петров Г.Н., Дробышевский Ю.В., Прохоров А.К., Гущин В.В., Столбов С.Н., Некрасов С.А., Апарина Т.В. - 2014. – С. 17.
- Волкова Е.В., Пузанов А.С., Оболенский С.В. Введение в физику полупроводниковых диодов и методы проектирования с использованием высокопроизводительных вычислений. - Нижний Новгород, 2014. – с.64,12-20.
- 13. Шарапов В.М., Полищук Е.С., Кошевой Н.Д., Ишанин Г.Г., Минаев И.Г., Совлуков А.С. Мир электроники. Датчики. 2012.- С. 617.
- 14. Бондаренко. И.Б. Электрорадиоэлементы. Часть 1. Резисторы. Санкт-Петербург, 2012. – С.109.
- 15. Валиев С.А., Зикриллаев Х.Ф., Хонбобоев А. Разработка технологии получения высокоэффективных термодатчиков // «Фундаментальные и прикладные проблемы физики полупроводников»: Международная научно-методическая конференция. -Андижан, 2005. –С.110-111.
- 16. Бахадырханов М.К., Комилов Т.С., Хусанов А.Ж., Иванкин Г.И., Занавескина И.С. Исследование влияния переходного слоя на фотоэлектрические свойства в структурах высшего силицида марганца (BCM)-Si<Mn>M // Поверхность. «Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования» – Москва, 2002. -№6. – С.11-16.
- 17. Бахадирханов М.К., Илиев Х.М., Аюпов К.С., Сатторов О.Э., Курбанова У.Х., Мавлонов А.Ш. Магнитодатчики на основе отри-

цательного магнитосопротивления в кремнии и в магнии // Актуальные проблемы электронного приборостроения: Материалы Международной научно-технической конференции. - Саратов, 2004. - С.305-310.

- Акчурин Р.Х., Андрианов Д.Г., Берман Л.С. и др. Физика и материаловедение полупроводников с глубокими уровнями / Под ред. Фистуля В.И. – М.: Металлургия, 1987. – С.232.
- Бахадирханов М. К., Илиев Х. М., Аюпов К. С., Сатторов О. Э. Датчик магнитного поля на основе компенсированного кремния // Письмо в ЖТФ.- Санкт–Петербург, 2003. –Т.29, №17. -С.8-15.
- 20. Варенцов М.Д., Гайдар Г.П., Долголенко А.П., Литовченко П.Г. Влияние облучения и отжига на термическую стабильность радиационных дефектов в кремнии // Вопросы атомной науки и техники: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение – Киев, 2010. - №5 (96). - С. 27-35.
- 21. Зайнабидинов С. З., Маматкаримов О. О., Хамидов Р. Х. Тензочувствительность компенсированного кремния при импульсном гидростатическом давлении // Известия ВУЗов, серия «Материалы электронной техники». - Томск, 2002. -№2. -С.30-35.
- 22. Сарач О.Б. Конспект лекций по дисципление основы технологии электронной компонентной базы. Москва 2012. –С. 85-90.
- 23. Лекция интернет.3.13.1.Диффузия из пленок, наносимых на поверхность полупроводника. https://studfile.net/preview/7632911/page:4/
- Патент RU № 2531381. Мощный полупроводниковый резистор и способ его изготовления. / Асина С. С., Коваленко А. Ю., Кудрявцев И. Е. // Всероссийский электротехнический институт им. В.И. Ленина. 2013. С. 13.
- 25. Patent US № 8617311. Silicon single crystal wafer for igbt and method for manufacturing silicon single crystal wafer for igbt /Toshiaki Ono. Wataru Sugimura. Masataka Hourai. - 2013. - pp 13.

- 26. Patent US № 4126509. Process for producing phosophorous-doped silicon monocrystals having a select peripheral dopant concentration along a radial cross-section of such monocrystall. / Wolfgang Keller. Herbert Kramer. Konrad Reuschel. Siemens Aktiengesellschaft. Germany. - 1978. – pp.7.
- 27. Долголенко А.П., Литовченко П.Г., Варенцов М.Д., Ластовецкий В.Ф., Гайдар Г.П., Литовченко А.П. Влияние методов выращивания и легирования на радиационную стойкость n-Si, облучённого быстрыми нейтронами реактора // Вопросы атомной науки и техники. – Киев: Институт ядерных исследований НАН (Украина), 2006. - №.4. - С. 175-181.
- Patent US № 7405457. High temperature thermistors. / Michael K. AdSem, Inc. - 2008. - pp. 8.
- 29. Александров О.В., Афонин Н.Н. "Особенности сегрегационного перераспределения фосфора при термическом окислении сильно легированных слоев кремния" // Физика и техника полупроводников. – 2005. - том 39, вып. 6. –С. 647-654.
- 30. Бахадирханов М.К., Аюпов К.С., Илиев Х.М., Зикриллаев Н.Ф., Кадырова Ф.А. Сильная компенсация- это крайне неравновесное состояние полупроводников // Материалы международной конференции «Неравновесные процессы в полупроводниках и полупроводниковых структурах». - Ташкент, 2007. - С.60-61.
- 31. Вавилов В.С., Челядинский А.Р. Ионная имплантация примесей в монокристаллы кремния, эффективность метода и радиационные нарушения //Успехи физических наук. – Москва, 1995. - том 165, № 3. – С. 348-357.
- 32. Достанко А.П., Голосов Д.А., Завадский С.М., Соловьев, Ковальчук. Н.С., Мельников С.Н., Стасишина А.М., Ермоленко М.В. Проектирование и производство изделий электронной технике. Минск БГУИР. – 2017. – С. 80

- 33. Гусев В.М. Ионное легирование полупровдников. –Москва. Мир 1973.
   С. 296.
- 34. Александров О.В., Милош А.Б. Электрическая активация фосфора в слоях кремния, аморфизованных ионной имплантацией // Конденсированные среды и межфазные границы. Воронеж, 2007. Том 9, № 2. –С.93-98.
- 35. Гайдар Г.П., Долголенко А.П., Литовченко П.Г. Получение высокоомного кремния с повышенной радиационной стойкостью: Критерии и условия // Вопросы атомной науки и техники: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. – Киев, 2009. - № 4-2 (94). - С. 263-269.
- Величко Д. В., Рубанов В. Г. Полупроводниковые приборы и устройства. Учебное пособие. – Белгород, 2006. – С. 184.
- Пасынков В.В., Чиркин Л.К. Полупроводниковые приборы: Учебник для вузов. – Санкт-Петербург, 2002. – С. 480.
- 38. Гайдар Г.П., Баранский П.И. Влияние термообработки на параметр анизотропии термо ЭДС увлечения трансмутационно легированных кристаллов кремния // Термоэлектричество. – Черновцы (Украин): Институт термоэлектричества НАН Украины, 2016. -№4. –С.5-13.
- 39. Комаров А.Ф., Пилько В.В., Никифоренко Н.Н., Емельянов В.А., Карват Ч. Формирование слоев C<sub>X→3</sub>N <sub>Y→4</sub> методом высокодозной имплантации азота в систему Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/C/ Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/ Si // 4-я международная конференция. Минск. Беларусь 2001. 3-5 октябрь –С. 28-30.
- 40. Иваненко Л.И. Формирование полупроводниковых силицидов методом ионно-лучевого синтеза // 4-я международная конференция "Взаимодействие излучений с твердым телом", 3-5 октября 2001. Минск, Беларусь, 2011. –С. 22-24.
- 41. Асабина Е.А. Дефекты в твердых телах и их влияние на свойства функциональных материалов. Нижний Новгород (Россия), 2012. С.65.

- 42. Зайнабидинов С.З. Физические основы образования глубоких уровней в кремнии. - Ташкент: Фан – 1984. – С. 160.
- 43. Малов.И.Е., Шиганов.И.Н. Лазерные технологии в электронном машиностроении. Москва. 2008. С. 24.
- 44. Малов И.Е., Шиганов И.Н. Лазеры в микроэлектронике. Москва 2012. С. 8-70.
- 45. Хайбуллин И.Г., Штырков Е.И., Зарипов М.М. Лазерный отжиг имплантированных полупроводников. // Известия Академии наук СССР. –Москва, 1981. -Т.45, №8. С. 1464-1473.
- Малов.И.Е., Шиганов.И.Н. Лазеры в микроэлектронике. Москва.
   2012. С. 76.
- Соколов.И.А. Интерференционный лазерный отжиг полупроводников.
   Дисс кандидата физ-мат наук. Ленинград. 1983– С. 140.
- 48. Соколов И.А. Интерференционный лазерный отжиг полупроводников. Диссертация. Ленинград 1983. –С. 43-67.
- 49. Хайбуллин И.Г., Штырков Е.И., Зарипов М.М., Закиров Г.Г. Физика и техника полупроводников. Санкт-Петербург, 1977. –т.11. –С. 330.
- 50. Гуров Ю.Б. Многослойные полупроводниковые установки для спектрометрии заряженных частиц на ускорителях. дис. ... док.-физ.-мат. наук. Москва 2011. – С. 236
- 51. Варлачев В.А. Нейтронное трансмутационное легирование кремния в бассейновом исследовательском ядерном реакторе. Автореферат дис. ... док.- технических. наук. Томск. 2015–С. 48.
- 52. Зайнабидинов С.З., Рубинова Э.Э. Нейтронно-трансмутационное легирование кремния. Ташкент: издательство "Фан", 1983. С. 93
- Батент RU № 2193610. Способ нейтронно-трансмутационного легирования кремния. / Шевченко В.Г., Шмаков Л.В., Лебедев В.И., Чумаченко Г.А., Трунов В.А., Булкин В.И. - 2002. –С. 11.
- 54. Нейтронное трансмутационное легирование полупроводников / под ред. Дж. Миза; пер. с англ. под ред. В.Н.Мордковича. – М.: Мир, 1982. – С. 259.
- 55. Зайнабидинов С., Бобохужаев К.У., Болтаев С., Каримов М., Рахматов Ж.А., Назыров Д.Э. Влияние облучения ү-квантов <sup>60</sup>Со на электрофизические свойства кремния, легированного редкоземельными элементами // Современные проблемы физики полупроводников: Международная конференция 23-25 ноября 2011. Нукус, 2011. С.17-18.
- 56. Makhmudov Sh.A., Karimov M. Investigation of influence of <sup>60</sup>Coγ-quanta to recombination properties of the copper doped silicon // Modern problems of nuclear physics: International Conference, September 19-22, 2006. -Tashkent. - p. 182.
- 57. Юнусов М.С., Каримов М., Джалелов М.А. К вопросу о стабилизации электрофизических свойств в компенсированном кремнии при облучении γ-квантами <sup>60</sup>Co // Физика и техника полупроводников. - Санкт– Петербург, 2001. - Т. 35, №3. – С.317-320.
- 58. Патент UZ № 20100070. Способ изготовления кремниевых терморезисторов // Каримов М., Махкамов Ш., Турсунов Н. А., Махмудов Ш. А., Сулаймонов А.А. / Бюллетень Патентного ведомства. Ташкент, 2013. С.7.
- 59. Муминов Р.А., Раджапов С.А., Раджапов Б.С., Рахимов Р.Х. Детекторы ионизирующего излучения на основе нейтронно-легированого кремния. Comp, nanotechnol. 2016. выпуск 4. Рр. 136-137.
- Фистуль В.И. Введение в физику полупроводников. Москва: Высшая школа, 1984. –С. 352.
- Асина С.С., Кокин С.А., Филатова Т.В. Радиационная технология изготовления мощных кремниевых резисторов // Элекричество. – Москва: Российская академия наук, 2011. - №10. – С.10-15.

- 62. Варлачев В.А., Емец Е.Г., Солодовников Е.С. Влияние быстрых нейтронов на проводимость простых полупроводников. // 9-ая Международная конференция «Взаимодействие излучений с твердым телом», 20-22 сентября 2011. – Минск (Беларусь), 2011– С. 107-110.
- 63. Долголенко А.П. Кинетические коэффициенты в п-типе кремния, облучённого быстрыми нейтронами реактора. Вопросы атомной науки и техники: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. – Киев, 2011. - №4 (98). – С. 14-19.
- 64. Марченко А.Н. Управляемые полупроводниковые резисторы. М.: Энергия, 1978. С.216.
- 65. Каримов М. Қаттиқ жисм радиацион физикаси. Тошкент, 2006. б. 105.
- 66. Каримов М., Махкамов Ш., Турсунов Н.А., Махмудов Ш.А., Сулаймонов А.А. Термодатчики на основе кремния компенсированного радиационными дефектами // Неравновесные процессы в полупроводниках и в полупроводниковых структурах: Материалы II Международной конференции 12-14 ноября 2009. – Ташкент, 2009. – С.125-126.
- 67. Каримов М., Махкамов Ш., Турсунов Н.А., Махмудов Ш.А., Бегматов К.А., Караходжаев А.К., Садиков А.Х. Кинетика релаксации фотопроводимости в кремнии р-типа, компенсированном атомами фосфора // Известия вузов. Физика. 2009. № 5. –С.9-12.
- Махкамов Ш., Каримов М., Турсунов Н.А., Саттиев А.Р., Махмудов Ш.А., Эрдонов М.Н. Влияние дислокации на процесс образования примесно-дефектных композиций в легированном кремнии при терморадиационной обработке // Известия вузов. Физика. Томск, 2011.
   -T.54, №1/3. –С.86-90.
- 69. Патент UZ № 20120166. Способ измерения плотности потока нейтронов кремниевым детектором n-типа // Каримов М., Махкамов Ш.,

Махмудов Ш.А., Сулаймонов А.А., Рафиков А.К. // Расмий ахборотнома. - 2017. –С. 7.

- Karimov M., Makkhamov Sh., Makhmudov Sh.A., Sulaymonov A.A., Rafikov A.K., Akramov F.S., Alikulov M.N., Bakiev S.A. Thermal resistor based on the compensated silicon. // Nuclear science and ITS application: VII Eurasian conference October 21-24, 2014. – Baku (Azerbaijan), 2014. – pp. 270-271.
- 71. Каримов М., Махкамов Ш., Турсунов Н.А., Махмудов Ш.А., Рафиков А.К., Сулайманов А.А. Способ изготовления кремниевых терморезисторов на основе радиационной технологии / Материалы республиканской научно-практической конференции "Инновации и инновационные технологии на производстве и высшем образовании" 16-17 май 2013. 2- том. - Андижан, 2013. – С. 171-174.
- 72. Патент UZ № 20130149. Способ изготовления термочувствительных кремниевых элементов. // Каримов М., Ташметов. М.Ю., Махкамов Ш., Турсунов. Н.А. Саттиев. А.Р., Махмудов Ш.А., Сулаймонов А.А., Рафиков А.К. // Расмий ахборотнома. 2018. С. 9.
- 73. Каримов М., Махкамов Ш., Турсунов Н., Махмудов Ш.А., Сулаймонов А.А. Влияние быстрых нейтронов на электрофизические свойства ядерно-легированного кремния р-типа» // Известия вузов, Физика. – Томск. 2011. –Вып. 5 – С. 75-78.
- 74. Долголенко А.П. Роль межузельных атомов кремния в конфигурационной перестройке дивакансий в кластерах дефектов // ВАНТ. Саров (Россия), 2016. №2 (102). С. 7.
- 75. Махкамов Ш., Турсунов М., Каримов М., Холмедов А.Р., Саттиев А.Р., Курбонов А.О., Махмудов Ш.А. Исследование примесно-дефектных состояний в легированном кремнии // V Международная научная конференция «Радиационно-термические эффекты и процессы в неорганических материалах». – Томск (Россия), 2006. – С. 244-247.

- 76. Юнусов М.С., Абдурахманов С.Н., Ахмадалиев А., Зайковская М.А., Каримов М., Каримов А., Кочкаров Р., Лапина Н.А., Махмудов А.Ш., Маннанова Х.Х., Муратов З., Оксенгендлер Б.Л., Сабиров С., Тураев Т., Хакимов З. Физические свойства облученного кремния. – Ташкент: изд. ФАН, 1987. – С. 148.
- 77. Pochrybniak. C., Pytel. K., Milczarek. J.J., Jaroszewicz. J., Lipinski. M., Piotrowski. T, Kansy. J. Properties of neytron doped multi crystal in esiliconforsolorcells // Acta physica polonika A. Warsaw, 2008. vol.113, №4. pp. 1255-1264.
- Лукьяница В.В. Уровни вакансий и междоузельных атомов в запрещенной зоне кремния //ФТП. -Санкт-Петербург, 2003. - Т.37, №4. – С.422-431.
- 79. Каримов М. Радиационно-физические процессы в компенсированном кремнии: Автореф. дис. ... док.-физ.-мат. наук. -Ташкент, 2001. –С. 31.
- 80. Винецкий В.Л. Холодарь Г.А. Радиационная физика полупроводников.
  Киев: Наукова думка, 1979. С. 336.
- 81. Аскаров Б., Зайковская М.А., Каримов М., Койфман А.И., Махмудов А.Ш., Наркулов А., Оксенгендлер Б.Л., Тохиров К.Р., Турсунов Н., Шакиров У.А., Юнусов М.С. Радиационно-активируемые процессы в кремнии. Ташкент: изд.Фан, 1977. С. 167.
- 82. Makhkamov Sh., Tahsmetov M.Yu., Makhmudov Sh.A., Sulaimanov A.A., Rafikov A.K. Thermal resistor based on the compensated silicon //The International Symposium "New Tendencies of Developing Fundamental and Applied Phusics: Problems, Achievement, Prospectives" November 10-11, 2016. – Tashkent, 2016. - P. 383.
- 83. Ташметов М.Ю., Сулаймонов А.А., Махмудов Ш.А., Рафиков А.К. Высокоомный температурно чувствительный резистор на основе нейтронно легированного кремния // Седьмая Международная

конференция по физической электронике IPEC-7 18-19 мая 2018. – Ташкент, 2018. – С. 162.

- 84. <u>www.tkd.com.ua/producer.php?producer=4</u>.
- 85. Makhkamov Sh., Karimov M., Makhmudov Sh. A., Sulaymonov A.A., Rafikov A.K., Jalelov M.A. Influence of disodered fields of compensated silicon on formation of radiation defects at gamma-irradiation // VII Eurasian Conference on "Nuclear Science and Its Application" in the Institute of Radiation Problems of ANAS On 21-24 October 2014. – Baku (Azerbajan), 2014. - P.272-273.
- 86. Бахадирханов М. К., Илиев Х. М., Аюпов К. С., Сатторов О. Э., Курбанова У. Х., Мавлонов А. Ш. Магнитодатчики на основе отрицательного магнитосопротивления в кремнии и магнии // Актуальные проблемы электронного приборостроения: Материалы Международной научно-технической конференции. - Саратов, 2004. –С. 305-310.
- 87. Каримов М., Махкамов Ш., Махмудов Ш.А, Муминов Р.А., Рахматов А.З., Сандлер Л.С., Саттиев А.Р., Сулаймонов А.А., Турсунов Н.А. Фоторезистор на основе компенсированного кремния с радиационными дефектами // Международная конференция, посвященная 80-летию академика М.С. Саидова 24 - 25 ноября 2010. - Ташкент, 2010. –С. 207-208.
- 88. Патент RU № 2014669. Способ изготовления полупроводниковых детекторов мощности дозы /Юнусов М., Ахмадалиев А., Бегматов К.А., Генералова В.В., Маннанова Х.Х. // Институт ядерной физики АН Рееспублики Узбекистан. 1994. –С. 1-5.
- 89. Махмудов Ш.А., Махкамов Ш., Каримов М., Сулаймонов А.А., Рафиков А.К., Эргашев Х.А. Исследование времени жизни носителей В нейтронно-легированном кремнии заряда В зависимости OT исходного бора // Материалы III международной концентрации конференции фотоэлектрическим ПО оптическим и явлениям В

полупроводниковых микро и нано структурах. - Ферганские политехнический институт, 2014. –С. 262-264.

- 90. Брудный В.Н. Радиационные эффекты в полупроводниках // "Физика": Специальный выпуск. – Вестник Томского государственного университета. - Томск, 2005. - №285.–С. 8.
- 91. Довбня А.Н., Ефимов В.П., Абызов А.С., Шаповал И.И., Рыбка А.В., Березняк Е.П., Закутин В.В., Решетняк Н.Г., Ромасько В.П. Радиационное дефектообразование для изменения электрофизических характеристик в кремниевых фотопреобразователях // Problems of atomic science and technology. Series: Nuclear Physics Investigations. - 2010. - No2 (53). - p.164-167.
- 92. Бахадырханов М.К., Комилов Т.С., Хусанов А.Ж., Иванкин Г.И., Занавескина И.С. Исследование влияния переходного слоя на фотоэлектрические свойства в структурах высшего силицида марганца (BCM)-Si<Mn>-M // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. –Москва, 2002. -№6. –С.11-16.
- 93. Гайдар Г.П. Отжиг радиационных дефектов в кремнии. Электронная обработка материалов. Кишинев: Институт прикладной физики Академии наук Молдовы, 2012. №48(1). –С. 93–105.
- 94. Кулинич О.А., Яцунский И., Свиридова О. Дефектообразование в кремниевых фотоприемниках. Монография. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011. С. 61.
- 95. Корулин.А.В. Радиационно-физические процессы и ядерное легироваие нитрида галлия. Дисс кандидата физ-мат наук. Москва. 2011– С. 133.
- 96. Ермолов П., Карманов Д., Лефлат А., Мананков В., Меркин М., Шабалина Е. Нейтронно-наведенные эффекты в зонном кремнии, обусловленные дивакансионными кластерами с тетравакансионным ядром // ФТП. -Санкт-Петербург, 2002. - Т.36, № 10. –С.1194-1201.

- 97. Бадылевич М.В., Блохин И.В., Головин Ю.И., Дмитриевский А.А., Карцев С.В., Сучкова Н.Ю., Толотаев М.Ю. Немонотонные изменения концентрации радиационных дефектов донорного и акцепторного типов в кремнии, индуцируемые потоками β-частиц малой интенсивности // ФТП. -Санкт-Петербург, 2006. - Т.40, № 12. –С.1409-1411.
- 98. Каримов М., Махкамов Ш., Махмудов Ш.А., Муминов Р.А., Рахматов А.З., Сандлер Л.С., Саттиев А.Р., Сулаймонов А.А., Турсунов Н.А. Особенности влияния радиационных дефектов на фотопроводимость кремния облученного быстрыми нейтронами // Гелиотехника. - 2010. -№ 4. –С. 64-66.
- 99. Кулинич О.А., Яцунский И., Глауберман М. Дефектообразование в слоистых структурах диоксид кремния - кремнии. Монография. - LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011. – 264 с.
- 100. Dieter Schroder, Chair Dragica Vasileska, Michael Kozicki, James Aberle. Characterization of High-Resistivity Silicon. Bulk and Silicon-on-Insulator Wafers by Pinakpani Nayak. Approved August 2011 by the. Graduate Supervisory Committee: Arizona State University. August-2012 y. – pp.268.
- 101. Варенцов М.Д., Гайдар Г.П., Долголенко А.П., Литовченко П.Г. Влияние облучения и отжига на термическую стабильность радиационных дефектов в кремнии // Вопросы атомной науки и техники. Киев (Украина): Институт ядерных исследований НАН, 2010. №5. с. 27-35.
- 102. Махмудов Ш.А., Махкамов Ш., Каримов М., Сулаймонов А.А., Рафиков А.К., Эргашев Х.А. Исследование времени жизни носителей кремнии заряда нейтронно-легированном В В зависимости OT концентрации исходного бора // Научно-технический журнал Ферганского политехнического института. Спец выпуск. – Фергана (Узбекистан), 2014. -С. 135-137.

- 103. Patent Japan WO2004008521. High-resistance silicon vafer and process for producing the same / Shinsuke Sadamitsu., Nobumitsu Takase., Hiroyuki Takao., Koji Sueoka., Masataka Horai. - 2004. - 19 p.
- 104. Махмудов Ш.А., Сулаймонов А.А., Маматкаримов О.О., Хайитов Д. Влияние термического воздействия на электрофизические свойства нейтронно-легированного кремния *p*-типа // 2-я Международная конференция «Неравновесные процессы в полупроводниках и в полупроводниковых структурах», 12-14 ноября 2009. - Ташкент, 2009. – С.70-72.
- 105. Стась В.Ф., Антонова И.В., Неустроев Е.П., Попов В.П., Смирнов Л.С. Термоакцепторы в облученном кремнии // ФТП. -Санкт-Петербург, 2000. - Т.34, № 2. –С.162-167.
- 106. Махкамов Ш., Махмудов Ш.А., Бегматов К.А., Рафиков А.К., Сулаймонов А.А., Эргашев Х. Влияние концентрации бора на время жизни носителей заряда в нейтронно-легированном кремнии // Сборник докладов Международной конференции «Современные материалы и технологии» 21-23 октября 2015. – Тбилиси (Грузия), 2015. –С. 90-92.
- 107. Yunusov M.S., Karimov M., Alikulov M.N., Begmatov K. The radiationinduced defects production in p-type silicon doped by impurities of transitional elements // Radiation Effects and Defects in Solids. - London, 2000. - v. 152. - P.171-180.
- 108. Пагава Т.А. Исследование рекомбинационных центров в облученных кристаллах p-Si // ФТП. –Санкт–Петербург, 2004. –Т. 38, № 6. –С. 665-669.
- 109. Рафиков.А.К., Муминов Р.А., Махмудов Ш.А, Раджапов С.А., Каримов М. Детекторы ядерного излучения на основе нейтронно-легированного кремния // Труды международная конференция, посвященная 70-летию Физико-технического института НПО "Физико-солнце". 14 15 ноября 2013. Ташкент, 2013. –С. 214-215.

- 110. Раджапов С.А., Тошмуродов Ё.К., Раджапов Б.С., Рисалиева Ш. Координатно-чувствительные детекторы ядерного излучения с термоохлаждающим устройством // Узбекский физический журнал. – Ташкент, 2016. - № 4(18). – С. 403-406.
- 111. Муминов Р.А., Раджапов С.А., Тошмуродов Ё.К. Электрофизические характеристики разных типов кремниевых детекторов ядерного излучения с большой поверхностью чувствительной области // Узбекский физический журнал. – Ташкент, 2014. - № 3(16). – С. 234-237.
- 112. Muminov R.A., Saymbetov A.K., Toshmurodov Yo.K. Special Features of Formation of High-Performance Semiconduktor Detektors Based on αSi-Si(Li) Heterostructures // ISSN 0020-4412, Instruments and Experimental Techniques, 2013. - vol.18, № 4. – pp. 32-33.
- 113. Раджапов С.А., Раджапов Б.С., Рахимов Р.Х. Особенности технологии изготовления кремниевых поверхностно-барьерных детекторов большой чувствительной рабочей площадью для измерения активности естественных изотопов. Comp, nanotechnol. 2018. выпуск 1. Рр. 151-154.
- 114. Muminov R.A., Radzhapov S.A., Toshmurodov Yo.K. Bekbaev S. Silikonlithium nuclear radiation detectors with a large surface of sensitive area // Uzbek Jurnal of Physiks. – Tashkent, 2013. vol.15, № 3-4. – pp. 179-184.
- 115.Тошмуродов Ё.К., Детекторы ядерного излучения на основе гетеропереходных структур // Узбекский физический журнал. – Ташкент, 2017. - № 2, том 19. – С. 124-126.
- 116. Patent №4119441. Method for the production of N-doped silicon with a dish-shaped profile of specific resistance in a radial direction / Ernst Haas., Karl Platzoeder. – 1978y. – pp. 9.
- 117. Patent №4910156. Neytron transmutation doping of a silicon wafer / Shin'ichiro Takasu., Michihiro Ohwa., Kazuhiko Kashima., Eiichi Toji., Kozumoto Homma. – 1990y. – pp. 16.
- 118. Patent №4027051. Method of producing homogeneously doped N-type Si

monocrystals and adjusting dopant concentration therein by thermal neytron radiation / Konrad Reuschel., Manfred Schnoeller., Alfred Muehlbauer., Eberhard Spenke., Wolfgang Keller. – 1977y. –pp. 7.

- 119. Патент RU №2553840. Способ измерения флюенса быстрых нейтронов с помощью полупроводникового детектора / Замятин Н.И., Черёмухин А.Е., Шафроновская А.И. - 2014. – С. 7.
- 120. Пагава Т.А. Особенности отжига радиационных дефектов в облученных кристаллах р-Si // ФТП. -Санкт-Петербург, 2007. -Т.41, № 6. -С.651-653.
- 121. Смирнов Л.С. Легирование полупроводников методом ядерных реакций. Новосибирск: Наука, 1981. С.181.
- 122. Патент RU № 2284610. Способ изготовления мощного высокотемпературного полупроводникового резистора / Асина С.С., Комыса Н.Г. // Всероссийский электротехнический институт им. В.И.Ленина, 2006. – С. 11.

## Приложения

## 1. Статистическая обработка результатов эксперимента

Погрешности измерений параметров кремния определялись на основе способов, описанных в работе [2]. Они характеризуются отклонением результатов измерений от истинного значения измеряемой величины. Погрешности измерений вызываются разными причинами.

1.1. Суммарную погрешность  $\zeta$  можно представить в виде:

$$\zeta = \xi + \theta \tag{\Pi1.1}$$

где θ- систематическая погрешность (остаётся постоянной или закономерно изменяется при повторных измерениях одной и той же величины),

ξ - случайная погрешность (составляющая погрешности измерения, которая изменяется случайным образом при повторных измерениях одной и той же величины, например, температуры, напряжения и т.п).

1.2. Абсолютной погрешностью измерения считают погрешность, выраженную в единицах измеряемой величины:

$$\Delta x = x_0 - x_i$$

где  $x_i = x + x_2 + ... + x_n$  – единица измеренной величины,

*х*<sub>0</sub>- истинное значение измеряемой величины.

1.3. Относительная погрешность измерения - отношение абсолютной погрешности к истинному значению измеряемой величины:

$$\delta_{\rm x} = \Delta x \,/ \bar{x} \tag{\Pi1.2}$$

где  $\bar{x}$  - среднее арифметическое значение

1.4. Среднее арифметическое значение:

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>Зайдель А.Н. Элементарные оценки ошибок измерений. –М.: Наука, 1968. -97 с.

$$\overline{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$
(II1.3)

Как показано в теории ошибок, наиболее близким к истинному значению  $x_0$  измеряемой величины  $x_i$  является (3), т.е.  $x_o \approx \overline{x}$ . Следовательно, значение  $x_0$  с достаточно большой вероятностью попадает в интервал от  $\overline{x} - \delta$  до  $\overline{x} + \delta$ . Результаты измерений величины *x* записывают тогда в виде:

$$x_0 = \overline{x} \pm \delta \tag{\Pi1.4}$$

На практике невозможно провести очень много замеров, поэтому нельзя построить нормальное распределение, чтобы точно определить истинное значение  $x_0$ . В этом случае хорошим приближением к истинному значению можно считать  $\bar{x}$ , а достаточно точная оценка ошибки измерений определяется с помощью выборочной дисперсии, вытекающей из нормального закона распределения, но относящейся к конечному числу измерений.

1.5. Средняя квадратическая погрешность:

$$S_{n} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (\bar{x} - x_{i})^{2}}{n-1}}$$
(II1.5)

1.6. Средняя квадратическая погрешность ряда измерений:

$$S_{\bar{x}} = \frac{S_n}{\sqrt{n}} \tag{\Pi1.6}$$

Интервал  $(\bar{x} - \varepsilon, \bar{x} + \varepsilon)$ , в котором находится с заданной вероятностью истинное значение  $x_0$ , называется доверительным интервалом. В подавляющем большинстве экспериментальных задач доверительная вероятность составляет 0,90 ÷ 0,95 и большая надежность не требуется.

1.7. Существует корректный метод для определения вероятности нахождения искомого значения в заданном доверительном интервале,

основанный на использовании распределения Стьюдента. Обозначим через  $\pm \Delta x$  интервал, на который может отклониться среднее арифметическое значение  $\bar{x}$  от истинного значения  $x_0$ , т.е.  $\Delta x = x_0 - \bar{x}$ . Иными словами, мы хотим определить значение доверительного интервала  $\Delta x$ :

$$\Delta x = \frac{t_{\alpha n} S_n}{\sqrt{n}} \tag{\Pi1.7}$$

где *S<sub>n</sub>* определяется формулой (П1.5).

Эта величина подчиняется распределению Стьюдента. Распределение Стьюдента характерно тем, что не зависит от параметров  $x_0$  при небольшом числе измерений (n < 20) и позволяет оценить погрешность  $\Delta x = \bar{x} - x_i$  по заданной доверительной вероятности  $\alpha$  или по заданному значению  $\Delta x$  и может найти надежность измерений (табл. П1.1).

Таблица П1.1

α	n	2	3	4	5	6	7	8
0,90	6,	31	2,92	2,35	2,13	2,02	1,94	1,89
0,95	12	2,7	4,30	3,18	2,78	2,57	2,45	2,36

Коэффициенты Стьюдента  $t_{an}^{[3]}$ 

1.8. Относительная погрешность измерений определяется как<sup>[3]</sup>:

$$\delta_x = \frac{\Delta x}{\overline{x}} = \frac{t_{an}S_n}{\sqrt{n}} \cdot \frac{1}{\overline{x}} \cdot 100\% \tag{\Pi1.8}$$

Среднее арифметическое значение измеряемых физических величин определялось по формуле (П1.3), среднее квадратическое значение погрешности - по формуле (П1.5), абсолютную погрешность измерений определяли по формуле (П1.7) и относительную погрешность – по формуле (П1.8). Если

определять относительную погрешность нескольких измеряемых величин, тогда используются формулы (П1.9):

$$\begin{array}{c} U = x \pm y; \\ U = x \cdot y \\ U = x / y \end{array} \right\} \qquad \begin{array}{c} \Delta U/\bar{U} = \sqrt{[(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2]} / (x \pm y) \\ \Delta U/\bar{U} = \sqrt{(\Delta x/x)^2 + (\Delta y/y)^2} \\ \Delta U/\bar{U} = \sqrt{(\Delta x/x)^2 + (\Delta y/y)^2} \end{array}$$
(II1.9)

На основании (П1.9) формула для определения <u>относительной</u> погрешности удельного сопротивления имеет вид:

$$\frac{\Delta\rho}{\overline{\rho}} = \sqrt{\left(\frac{\Delta V_{\rho}}{\overline{V_{\rho}}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta I}{\overline{I}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta d}{\overline{d}}\right)^2} = \sqrt{\left(\sqrt{\left[\left(\Delta V_1\right)^2 + \left(\Delta V_2\right)^2\right]}/(\overline{V_1} + \overline{V_2})\right)^2 + \left(\frac{\Delta I}{\overline{I}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta d}{\overline{d}}\right)^2}$$

В таблице П1.2 приведены параметры одних и тех же образцов, измеренные 5 раз.

Таблица П1.2

Измеренные	1	2	3	4	5
величины					
$V_1, *10^{-3} B$	8	7,9	9,5	9,6	8,3
V <sub>2</sub> , *10 <sup>-3</sup> B	7,92	7,5	7,2	7,3	6,5
I, *10 <sup>-3</sup> A	1,002	0,99	1,003	1,01	0,995
d, см	0,084	0,085	0,083	0,082	0,08

Погрешности измерения параметров

$$\xi = \delta_{\rho} = \frac{\Delta \rho}{\overline{\rho}} * 100 \% = 0.0624 * 100 \% = 6.24 \%$$

## 2. Системная (или аппаратная) погрешность измерительных приборов Установка Холла

- а) Микрометр КИ (0,01мм) 1 %
- б) Измеритель магнитной индукции Ш1-8 ~ 1,5 %

На основании (П1.9) таблица для определения относительной погрешности концентрации носителей заряда имеет вид:

$$\frac{\Delta n}{\overline{n}} = \sqrt{\left(\frac{\Delta V_x}{\overline{V_x}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta I}{\overline{I}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta d}{\overline{d}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H}{\overline{H}}\right)^2}$$

Таблица 2.3

Измеренные	1	2	3	4	5
величины					
V <sub>x</sub> , *10 <sup>-3</sup> B	0.992	0.9862	1.006	0.955	0.9516
I, *10 <sup>-3</sup> A	1,002	0,99	1,003	1,01	0,995
d, см	0,084	0,085	0,083	0,082	0,08
Н, эрст.	3600	3601	3598	3604	3596

Погрешности измерения параметров

 $\xi_n = \delta_n = \frac{\Delta n}{n} * 100 \% = 0.0332 * 100 \% = 3.32 \%$  — погрешность расчетов

концентраций носителей заряда.

в) Вольтметр универсальный В7-21

I - 1 mA - 1 % V - 10 - mV - 3 %

10 mA – 1 % *100 mV* – *1* %

100 mA - 3% 1 V - 2%

 $\zeta_{n\,(\text{или }p)} \;=\; \xi + \theta \;= 3,32 \;\; +1 + 1 + 1 + 1,5 \;\; \approx \pm 8 \; \%.$ 

Ошибка при измерении удельного сопротивления составляет ±10 %, а концентрации носителей заряда ±8 %.

На основании (П1.9) формула для определения относительной погрешности  $\tau = \frac{1}{12} \frac{d_k \cdot d_x \cdot C_x \cdot I_k}{C_k \cdot D_k \cdot \rho_x^2 \cdot I_x} = k \cdot \frac{d_x \cdot C_x \cdot I_k}{\rho_x^2 \cdot I_x}$  имеет вид:

$$\frac{\Delta \tau}{\overline{\tau}} = \sqrt{\left(\frac{\Delta d_x}{\overline{d_x}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C_x}{\overline{C_x}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta I_k}{\overline{I_k}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta I_x}{\overline{I_x}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \rho_x}{\overline{\rho_x}}\right)^2} \ .$$

Таблица П1.4

Измеренные	1	2	3	4	5
величины					
d, см	0,108	0,101	0,102	0,115	0,122
С, см	0,263	0,276	0,278	0,26	0,261
$I_k$ , *10 <sup>-3</sup> A	576	552	571	564	580
$I_x$ , *10 <sup>-3</sup> A	72	46	69	66	54
р, Ом.см	15,5	15,2	15,1	15,05	15,25

Погрешности измерения параметров

$$\xi = \delta_{\tau} = \frac{\Delta \tau}{\overline{\tau}} * 100 \% = 0.091 * 100 \% = 9.2\%$$

**3. Вычисление полной системной погрешности** измерений состоит из системных (*или* аппаратных) погрешностей следующих измерительных приборов

1. Микрометр КИ (0,01 мм) - 1 %

2. Милливольт ампермет р-типа М254 – 1,5

- 3- Усилитель (У2-8) 1,5
- 4- Синхронный детектор (СД-1) 1
- 5- Милливольтметр (В6-4) 1,5
- 6-Частотомер (ЧЗ-ЗЗ) -1,5

 $\zeta_{\rho} = \xi + \theta = 9,2 + 1 + 1,5 + 1,5 + 1,5 + 1,5 \approx \pm 15.7 \%.$ 

Ошибка при измерениях времени жизни носителей заряда составляла ±15.7 %.

4. Сопротивление терморезистора  $R_x$  измерялось «Комбинированным цифровым прибором Щ300» в пределах от 2.10<sup>2</sup> до 10<sup>2</sup> Ом, при этом

погрешность составляла ξ≤ 0,12% (Техническое описание Щ300. – Краснодарский ЗИП, 1986. с.5). Измерение проводилось в интервале температур 300-373 К до и после облучения нейтронами. Принципиальная электрическая схема установки для измерения температурного сопротивления терморезистора приведена на рис. П1.1.





Для определения случайных погрешностей, измерения проводились по

6 раз. Результаты измерений приведены в табл. П1.5

Таблица П1.5

Измеренные	Номера измерений					
величины	1	2	3	4	5	6
R, *10 <sup>5</sup> Ом	1	0,99	1,1	0,985	1,15	1

Погрешности измерения параметров

a) 
$$\overline{R} = \frac{R_1 + R_2 + ... + R_n}{n} = 1,0375 * 10^5 OM;$$
  
6)  $S_R = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\overline{R} - R_i)^2}{n-1}} = 0,007 * 10^5 OM$   
B)  $\delta_R = \frac{t_{con} S_R}{\overline{R} \sqrt{n}} 100\% = \frac{2 * 0.007 * 10^5 OM}{1,0375 * 10^5 \sqrt{6}} \approx 2\%;$ 

 $_{\Gamma}$ ) ζ<sub>R</sub> = ξ + θ = 0, 12+2 ≈±3 %.

Ошибка при измерении электросопротивления составляет ±3 %.

**5. Измерение температуры** проводится цифровым прибором Ф266 (с термопарой ТХА в интервале температур от 300 до 470 К, при этом абсолютная погрешность составляет ~1 % [3].

Таблица П1.6

Погрешности измерения параметров

Измеренные	Номера образцов							
величины	1	2	3	4	5	6		
Т, К	330	329	331	329	331	300		

a) 
$$\overline{T} = \frac{T_1 + T_2 + \dots + T_n}{n} = 330$$
 K.

б)  $S_T = \sqrt{\frac{4}{5}} = 0.9$  при  $\alpha = 90$ ,  $t_{\alpha n} = 2$ .

B) 
$$\Delta T = \frac{t_{an}S_T}{\overline{T}\sqrt{n}} 100\% = \frac{2*0.9}{330\cdot\sqrt{6}} 100 \approx 0.3\%;$$

$$\Gamma$$
)  $\zeta_{\rm T} = \xi + \theta = 0.3 + 1 \approx \pm 2 \%$ .

Ошибка при измерении температуры в интервале 300-470 К составляет ±2 %. Общая ошибка термодатчика при определении температуры составляет:

$$\zeta = \zeta_R + \zeta_T = 3 + 2 \; \approx \pm 5 \; \% \; .$$

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Паспорт Ф266.- ПО «Электроточприбор», 1989. с.2.