

*На правах рукописи*



Шевченко Алексей Иванович

**ВЛИЯНИЕ НЕИДЕАЛЬНОСТИ РЕШЁТКИ КРЕМНИЕВЫХ И  
ФУЛЛЕРЕНСОДЕРЖАЩИХ СТРУКТУР НА ИХ ОПТИЧЕСКИЕ И  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА**

Специальность 01.04.07 – физика конденсированного состояния

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Симферополь – 2017

Работа выполнена на кафедре радиофизики и электроники Физико-технического института (структурное подразделение) Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского»

**Научный руководитель:** Мазинов Алим Сеит-Аметович,  
кандидат технических наук, доцент

**Официальные оппоненты:** Форш Павел Анатольевич,  
доктор физико-математических наук, доцент,  
Московский государственный университет  
имени М.В. Ломоносова, г. Москва, ведущий  
научный сотрудник кафедры общей физики и  
молекулярной электроники отделения экспери-  
ментальной и теоретической физики физиче-  
ского факультета

Ирха Владимир Александрович,  
кандидат физико-математических наук,  
ФГБОУ ВО «Южно-Российский государствен-  
ный политехнический университет (НПИ)  
имени М.И. Платова», г. Новочеркасск,  
доцент кафедры «Физика и электроника»

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное учре-  
ждение науки «Физико-технический институт  
имени А.Ф. Иоффе» Российской академии наук

Защита состоится 21 марта 2018 г. в 16 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.101.07 Кубанского государственного университета по адресу: 350040, г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Кубанского государственного университета и на сайте: [www.kubsu.ru](http://www.kubsu.ru).

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета Д 212.101.07,  
доктор физико-математических наук

Зарецкая М.В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы исследования

Ограниченность традиционных монокристаллических технологий доказывается снижением динамики уменьшения элементарных транзисторов, узкополосностью кристаллических солнечных батарей и т.д. [1–4]. Дальнейшее усовершенствование свойств функциональных элементов требует поиска новых методов создания нанобъектов [4–8]. Современные успехи в области микро- и нанoeлектроники показали, что использование немонокристаллических материалов открывает новые перспективы развития и создания уникальных устройств. Именно отсутствие монокристалличности и наличие разнообразных неидеальностей атомной решётки позволяет расширить свойства материалов и придать им новые характеристики, например, гибкость и изотропность на больших площадях.

К тому же немоноткристаллический кремний – аморфный, микро- и нанокристаллический – представляет перспективы для удешевления полупроводниковых приборов [6], а использование углерода теоретически позволит ещё больше уменьшить стоимость твердотельного прибора.

Широкомасштабное получение уже готовых материалов с нанобъектами, таких как нанотрубки, фуллерены, графен уже сейчас достигло больших объёмов [7]. Тем не менее цены производства фуллеренов ещё достаточно высоки и зависят не только от их выделения из фуллеренсодержащих веществ, но и от производства самих материалов [8]. Поэтому поиск новых менее затратных путей получения фуллеренсодержащих материалов (ФСМ), особенно направленных на улучшение экологической ситуации, сейчас представляется актуальной задачей.

Как никогда востребованным остаётся модельное представление неидеальных свойств атомной решётки, множество методов описания неоднородности которой обусловлено тем, что обширная природа дефектов конденсированных сред достаточно разнообразна и неоднозначна, тогда как промышленные технологии требуют чётких закономерностей и определений [9–11].

Одними из важнейших характеристик полупроводниковых структур являются их оптические спектральные зависимости, исследование которых позволит выявить пути повышения подвижности носителей заряда в тонкоплёночных транзисторах, приборах с зарядовой связью и эффективности фотопреобразующих элементов [3, 4, 6]. Использование аморфного кремния увеличивает ширину запрещённой зоны и уширяет спектр поглощения. Применение углеродсодержащих материалов и наноструктурированного кремния востребовано с точки зрения создания широкозонных материалов, например, карбида кремния, и расширения спектра ближе к ультрафиолетовому диапазону. Кроме того, влияние энергетических уровней дефектных центров и легирующих примесей может значительно улучшить спектральные зависимости, как в видимом, так и в инфракрасном (ИК) диапазоне, что в сумме существенно увеличит полосу поглощения фототермических структур [3, 12–14].

Точное построение профиля встроенного поля с учётом особенностей неидеальности материалов позволит более тонко выстраивать преобразующие барьеры нелинейных структур.

Построение модели получения твердотельных структур для приборов полупроводниковой электроники конкретной технологической цепочки с возможностью применения к другим позволяет рассмотреть вклад реальных значений констант диффузии на профиль распределения примеси. Такие диффузионные постоянные зависят и от неидеальности легируемой структуры. Подобные модельные представления необходимы для анализа влияния изменения диффузионных констант на профили концентрации, заряда, напряжённости, потенциала электрического поля в области пространственного заряда (ОПЗ), что позволит подобрать необходимые режимы получения готового прибора с оптимальными параметрами [15].

Изучение вольт-амперных характеристик (ВАХ) полупроводниковых структур, несомненно влияющих на эффективность их основных параметров, с использованием теоретических токовых зависимостей позволяет рассмотреть механизмы токопереноса.

**Цель работы:** экспериментальные исследования и модельные представления оптических и электрических характеристик кремниевых и фуллеренсодержащих материалов с различной степенью неидеальности.

**Задачи,** определённые целью исследования:

1. Получение и экспериментальное изучение твердотельных полупроводниковых кремниевых структур, как в нанокристаллическом, так и в аморфном состояниях.

2. Анализ и поиск методов производства фуллеренсодержащих материалов, получение и экспериментальное исследование их электрических характеристик и сравнение свойств данных веществ, произведённых традиционным и новым методами.

3. Изучение влияния неидеальности структуры на спектры поглощения кремния различного типа кристаллизации в видимой и ИК области с соответствующими математическими моделями.

4. Расчёт профиля диффузии и зонной диаграммы современной кремниевой барьерной структуры. Оценка девиации основных технологических констант с учётом реальных экспериментально полученных значений и их влияния на профиль распределения концентрации легирующего вещества. Рассмотрение влияния неидеальности структуры на величины диффузионных постоянных.

5. Изучение диодных коэффициентов неидеальности ВАХ для кремниевой барьерной структуры.

**Методы исследования**

Для решения поставленных задач применялись как теоретические, так и экспериментальные методы.

В ходе выполнения работы проводились аналитические расчёты параметров твёрдых тел. Оптические свойства в видимом диапазоне моделировались зависимостями с учётом влияния непрямых переходов. Для вывода формулы коэффициента поглощения в ИК области спектра применялась дипольная теория поглощения. При расчётах профиля диффузии использовался второй закон Фика, зонной диаграммы – уравнение Пуассона, теорема Гаусса и другие зависимости электростатики. Применялись формулы для нахождения энергии активации проводимости и описывающие ВАХ полупроводниковых переходов.

Экспериментальные методы, с помощью которых изучались структура и свойства кремниевых и фуллеренсодержащих материалов, включали в себя исследование поверхности (интерференционный микроскоп; сканирующий электронный микроскоп РЭМ-106 ОАО «SELMI», Украина; атомно-силовые микроскопы «НАНОЭДЮКАТОР II», «ИНТЕГРА Прима» NT-MDT, Россия, г. Зеленоград), температурной проводимости, оптических спектров (монокроматоры МДР-4; ДМР-4; спектрофотометр Specord 75 IR), вольт-амперных зависимостей (измерители характеристик полупроводниковых приборов Л2-56; TR-4805, Венгрия), рентгенофазовый анализ (рентгеновские дифрактометры ДРОН-3, ДРОН-8 НПП «Буревестник», Россия, г. Санкт-Петербург).

Производилось сравнение собственных данных, полученных опытным путём, с экспериментальными данными, взятыми из литературных источников. Также сравнивались теоретически рассчитанные и экспериментально полученные характеристики.

#### **Практическая значимость полученных в работе результатов**

1. Рассмотрены способы получения нанокристаллического порошкового кремния и фуллеренсодержащего вещества, которые позволят удешевить производство функциональных элементов полупроводниковых приборов.

2. Представлена модель, объясняющая поглощение дефектным материалом ИК излучения, которая даёт возможность проанализировать вклад дефектных уровней, образующихся при получении твердотельных слоёв и поможет подобрать оптимальные технологические режимы для получения структур с приблизительно заданным распределением дефектов и, следовательно, оптическими свойствами.

3. Сопоставлены экспериментальные и теоретические данные спектров поглощения, вольт-амперных зависимостей кремниевых структур, которые объясняют полученные характеристики полупроводниковых приборов и определяют направления целенаправленной модификации их физических свойств.

4. Представлены расчёт профиля диффузии и построение зонной диаграммы с перспективной возможностью подсчёта параметров для фотопреобразователей конкретной технологической цепочки, выявления способов увеличения КПД и удешевления производства солнечных элементов.

5. Выявлены модельные представления ВАХ полупроводниковых переходов, которые позволяют оптимизировать токовые режимы твердотельного прибора.

### Научные положения, выносимые на защиту

1. Нанокристаллический порошковый кремний, полученный в среде аргона при температуре 8000–12000 °С, обладает удельными сопротивлениями 0,022–12,2 Ом·см и характеризуется энергиями активации проводимости 0,02–0,22 эВ, средние значения которых увеличиваются с повышением давления, оказываемого на порошок (0,04 эВ при 0 МПа, 0,05 эВ при 18 МПа, 0,09 эВ при 27 МПа и 0,12 эВ при 35 МПа).

2. Применение каталитического крекинга резиносодержащих отходов при 450–500 °С с использованием железо-медно-цинкового катализатора позволяет получить фуллеренсодержащий материал.

3. Фуллеренсодержащий материал, полученный методом каталитического крекинга резиносодержащих отходов, имеет удельные сопротивления 3–10 Ом·см и энергии активации проводимости 0,016–0,15 эВ.

4. Модельное представление неидеальности структуры, обусловленной распределением дефектов  $j$ -типа, характеризуемое количественными ( $b_j$ ), определяющими частоту встречаемости, и энергетическими ( $\zeta_j$ ), показывающими расположение  $j$ -типа дефектов относительно середины энергетической щели аморфного кремния, параметрами, объясняет наблюдаемые пики в его спектре ИК поглощения.

5. На точность расчёта профиля концентрации легирующей примеси влияет неидеальность структуры, которая обуславливает девиацию энергии активации диффузии  $E_a$  в диапазоне 3,48–3,84 эВ и диффузионного коэффициента  $D_0$  в пределах 3–9 см<sup>2</sup>/с, что определяет разброс глубины залегания в 170 нм и 40 нм соответственно.

### Научная новизна:

1. Определены удельные сопротивления, энергии активации проводимости нанокристаллического порошкового кремния, получаемого методом высокотемпературного плазмохимического синтеза, и их зависимость от увеличения давления на порошок.

2. Впервые получен фуллеренсодержащий материал с помощью крекинга резиносодержащих отходов в присутствии железо-медно-цинкового катализатора при температуре 450–500 °С.

3. Определены удельные сопротивления и энергии активации проводимости для фуллеренсодержащего материала, получаемого методом низкотемпературного каталитического крекинга резиносодержащих отходов.

4. Представлена модель для объяснения спектра поглощения аморфного кремния в ИК диапазоне, отличающаяся тем, что аморфность описывается серией дефектных состояний (вакансии, межузельные атомы, дивакансии, их комплексы с примесными атомами), которые характеризуются количественными и энергетическими параметрами.

### **Степень достоверности**

Достоверность полученных результатов подтверждается данными из литературных источников, применением строгих математических методов и современных математических пакетов прикладных программ, использованием современных микроскопов и рентгеновского дифрактометра, серийно проделанными экспериментальными исследованиями на различных приборах, сравнением теоретически и экспериментально полученной информации.

### **Апробация результатов диссертационной работы**

Положения, выносимые на защиту, представлялись, обсуждались и публиковались на следующих симпозиумах, форумах, конференциях: 7–11-й Международных научно-технических конференциях «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций», Севастополь, 2011–2015; XVIII, XIX Международных научно-технических конференциях «Силовая электроника и энергоэффективность», Алушта, 2012, 2013; I Всеукраинской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Современные тенденции развития приборостроения», Луганск, 2012; V, VI Международных научных конференциях «Функциональная база наноэлектроники», Харьков – Крым, 2012, 2013; 2, 3-й Международных научно-технических конференциях «Физико-технологические проблемы радиотехнических устройств, средств телекоммуникаций, нано- и микроэлектроники», Черновцы, 2012, 2013; XIV Международной научно-практической конференции «Возобновляемая энергетика XXI века», Киев – Крым, 2013; International Conference “Geographical and Geocological Researches of Ukraine and Adjacent territories”, Simferopol, 2013; 6-й Украинской научной конференции по физике полупроводников, Киев – Черновцы, 2013; International Conferences “Nanomaterials: Applications and Properties”, Sumy – Alushta, 2013, Sumy – Lviv, 2014; 2, 3-й Международных научно-практических конференциях «Полупроводниковые материалы, информационные технологии и фотовольтаика», Кременчуг, 2013, 2014; IX, X Международных конференциях «Аморфные и микрокристаллические полупроводники», Санкт-Петербург, 2014, 2016; 24–26-й Международных Крымских конференциях «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо)», Севастополь, 2014–2016; Международной конференции «XXVI Крымская Осенняя Математическая Школа-симпозиум по спектральным и эволюционным задачам», Крым, 2015; International Symposium “The 15th International Symposium on Advanced Organic Photonics”, Moscow, 2015; IV, VI Международных молодёжных научных школах-конференциях «Современные проблемы физики и технологий», Москва, 2015, 2017; II научной конференции профессорско-преподавательского состава, аспирантов, студентов и молодых учёных «Дни науки КФУ им. В.И. Вернадского», Симферополь, 2016; 12-й Международной молодёжной научно-технической конференции «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций «РТ-2016», Севастополь, 2016; XXIV Международной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных по фундаментальным наукам «Ломоносов-2017»,

Москва, 2017; XXIII Международной конференции «Оптика и спектроскопия конденсированных сред», Краснодар, 2017.

### **Публикации**

Основные теоретические и практические результаты диссертации отражены в 53 материалах. Среди них 13 статей, 5 из которых индексируются в базах данных Scopus и Web of Science, 3 – в журналах, рекомендованных в перечне ВАК РФ, 3 – в журналах, рекомендованных в перечне ВАК Украины (в соответствии с постановлением Правительства РФ от 30 июля 2014 г. № 723 приравненных к ВАК РФ), 2 – в журналах, индексируемых РИНЦ. Опубликованы одни методические указания. Получено одно свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ.

### **Личный вклад автора**

Экспериментальные изыскания оптических и проводящих свойств кремниевых структур и фуллеренсодержащих материалов выполнялись автором лично или с соавторами при непосредственном его участии. Анализ полученных характеристик твёрдых тел проводился автором лично или в сотрудничестве с научным руководителем, в частности модифицирована формула поглощения электрическим диполем и применена для аморфного кремния с учётом дефектных центров различных типов. Параметры неидеальности для ВАХ найдены автором; кроме того, получен профиль диффузии легирующей примеси, численно-аналитически построена зонная диаграмма для одной из современных технологических цепочек по производству фотопреобразователей, и для её подсчёта был выстроен алгоритм; осуществлено сравнение теоретически и экспериментально полученных характеристик твердотельных структур.

### **Структура и объём диссертации**

Защищаемая научная работа представлена на 143 страницах рукописи, содержащей 4 главы с соответствующими выводами, введением и заключением. Работа содержит 76 рисунков и 4 таблицы. Литературный список состоит из 172 источников и расположен в конце диссертации.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** выбран основной вектор исследовательской деятельности и раскрыта актуальность работы, поставлены цели, задачи исследования, представлена практическая значимость, а также научная новизна полученных результатов, сформулированы основные выносимые на защиту положения.

**Первая глава** – анализ современных достижений в области построения и описания неидеальных структур на основе кремния, фуллеренсодержащего вещества и потенциальных барьеров для кремниевой твердотельной электроники. Определены векторы экспериментальных исследований и теоретического построения моделей кремниевых и углеродных неидеальных систем.

**Вторая глава** представляет основу экспериментальных исследований. В ней описываются методы получения структур, используемых для описания влияния неидеальности, их микроскопия.



Для получения плёнок аморфного и аморфного гидрогенизированного кремния (a-Si и a-Si:H) применялись магнетронные установки типа УРМ 3.279.014 и УРМ 3.279.026. Диапазон давлений в рабочей камере находился на уровне  $10^{-2}$ – $10^{-3}$  Па, напряжение и ток мишени – соответственно 500–650 В и 1,5–2 А. При осаждении плёнок использовались подложки на основе ситалла (СТ-50-1-1-0.6, ЩУ 7. 817 002-15, ЩЕО 781 001 0У) и стекла высокого качества.

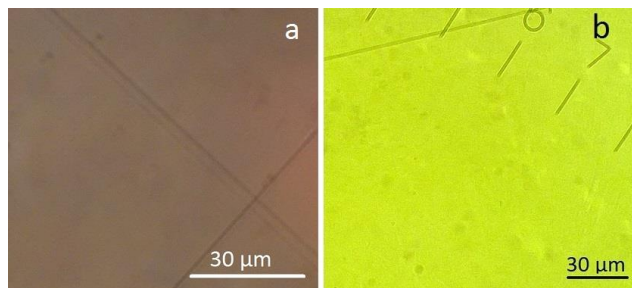


Рисунок 1 – Фото плёнок a-Si (a) и a-Si:H (b) при увеличении оптическим микроскопом

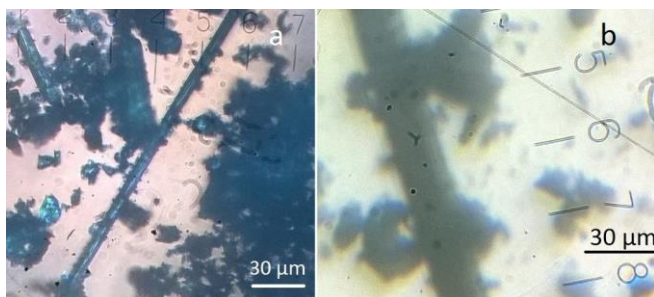


Рисунок 2 – Частицы и микротрубки смеси нанокристаллического кремния под увеличением оптического микроскопа

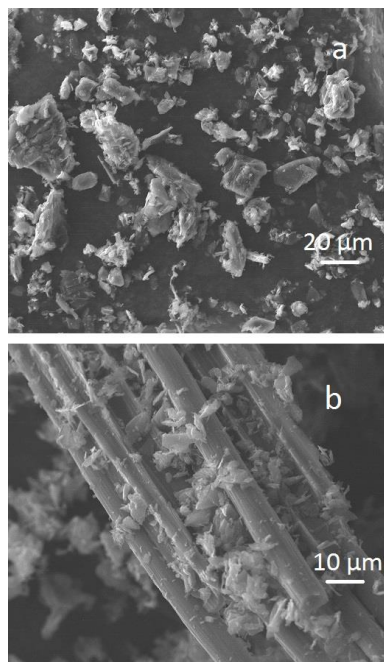


Рисунок 3 – Микро-частицы (a) и колончатые структуры (b) в полученном pwSi

Контроль качества и первичный анализ полученных плёнок осуществлялись оптическими методами при увеличениях до  $\times 1500$ , включая интерференционные методы. При повышении концентрации водорода в камере магнетрона наблюдается заметный переход видимых спектров отражения плёнок из красно-коричневой в жёлто-зелёную область (рисунок 1, а и б соответственно).

Электронная микроскопия, используемая для анализа качества поверхности осаждённых плёнок аморфного и аморфного гидрогенизированного кремния, показала приборный уровень полученных образцов, который возрастал с уменьшением скорости осаждения и увеличением глубины вакуума.

Следующим шагом поиска дешёвых материалов и технологий для создания оптоэлектронных приборов нового поколения явилось исследование порошковых углеродных и кремниевых структур, полученных по углеродной порошковой технологии (рисунки 2, 3).

Был рассмотрен метод высокотемпературного плазмохимического синтеза, который хорошо отработан для получения фуллеренсодержащих веществ, однако также может быть использован для создания порошка нанокристаллического кремния (pwSi). Порошок микрокристаллического кремния со средним размером частиц десятки микрон помещался в плазму с температурой 8000–12000 °С и испарялся. При выходе из плазмы под действием встречных газовых потоков

кремний быстро десублимировался. Вне рабочей камеры происходило разделение  $\text{pwSi}$  на фракции посредством аэроселекции и применения крупных и мелких фильтров. Для отделения фуллеренов фуллеренсодержащий материал, полученный по той же методике из графитового сырья, растворялся в толуоле. Кроме ФСМ, исследовались также его смеси с нанокристаллическим кремнием, названные  $\text{pwSi}+\text{FCM}$  (исходный микрокристаллический кремний смешивался с графитом, затем загружался в реактор) и  $\text{pw2Si}+\text{FCM}$  (нанокремний смешивался с графитом, затем загружался в реактор).

Полученный таким способом порошковый кремний представляет собой набор макро- и микрочастиц (рисунок 3, а), а также колончатых (трубчатых) структур (рисунок 3, б). С помощью применения электронной микроскопии был изучен внешний вид наночастиц, расположенных на поверхности микрочастиц порошкового кремния. Линейные размеры нанокристаллитов составляют 8–200 нанометров (рисунок 4, а), при этом наиболее часто встречаются структуры 20–

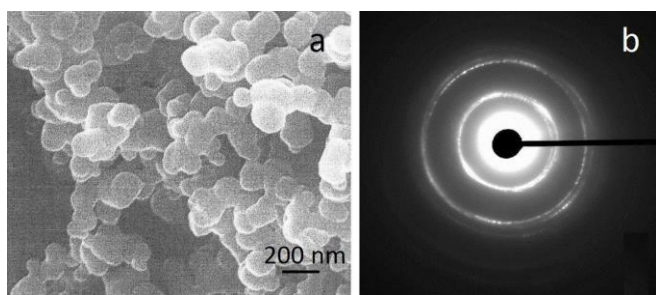


Рисунок 4 – а) поверхность микрочастицы порошкового кремния, б) его электронограмма

40 нм в диаметре. Нанокристаллическая фаза подтверждается электронограммами (рисунок 4, б).

Полученные материалы характеризуются высокой пористостью и имеют сложную структуру поверхности. Например, рассматриваемая частица  $\text{pwSi}$  (рисунок 5) обладает перепадом высот в 518 нм. Поверхностная площадь для 1 г вещества составляет 600–700 м<sup>2</sup>.

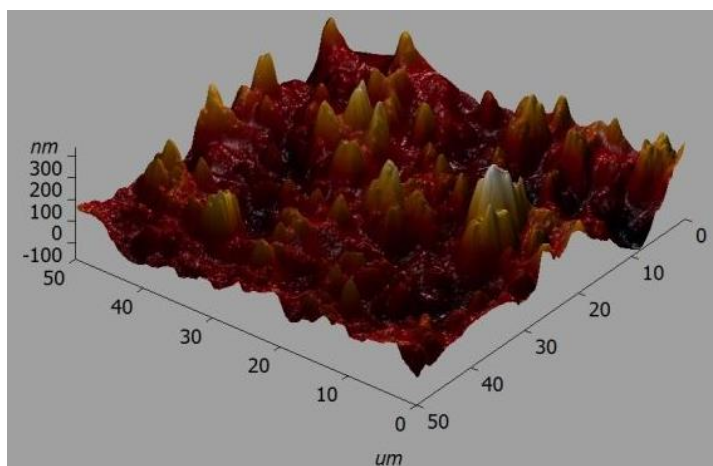


Рисунок 5 – Неровности поверхности частицы нанокремния

ФСМ был получен и методом низкотемпературного каталитического крекинга. Отходы из резины размельчались, нагревались до температуры 450–500 °С в течение 6–8 часов при железомедно-цинковом катализаторе. Образовавшаяся парогазовая смесь охлаждалась до 30–50 °С, а затем происходило отделение фуллеренсодержащего вещества, которое очищалось от металлических материалов магнитным методом.

Проведённые рентгеновские исследования показали содержание фуллерена  $\text{C}_{60}$  в количестве 2,7%.

В третьей главе приводятся экспериментальные оптические характеристики кремниевых структур, полученных при различных условиях, и сравнива-

ются с данными ведущих исследовательских групп. Анализируются разброс параметров и девиация модельных и экспериментальных коэффициентов поглощения оптического излучения в видимом диапазоне при различных степенях неидеальности. Моделируется влияние дефектных и примесных уровней в атомной решётке аморфного кремния на его спектр поглощения в ИК диапазоне. Рассматривается связь неидеальности атомной структуры и электрических характеристик порошковых кремниевых и фуллеренсодержащих материалов. Представляются зависимости их удельного сопротивления от температуры и прикладываемого давления и энергии активации при различном давлении, вольт-амперные характеристики.

Спектры поглощения плёнок аморфного и аморфного гидрогенизированного кремния были рассчитаны на основе данных, полученных с использованием монохроматоров. Они показали характерное для полупроводников увеличение коэффициента поглощения при энергиях падающего излучения, больших ширины запрещённой зоны кремния (рисунок 6). При повышении давления водо-

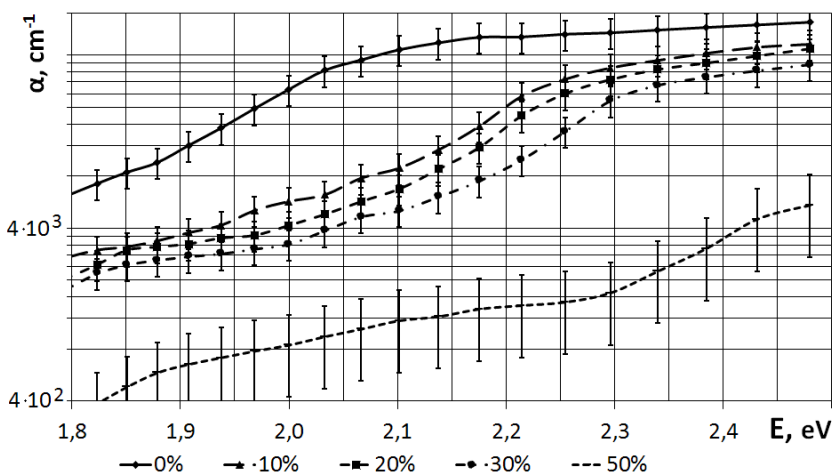


Рисунок 6 – Коэффициент поглощения полученных плёнок аморфного кремния с различной концентрацией водорода в камере магнетрона в зависимости от энергии падающего излучения

рода относительно давления его смеси с аргоном в плазме с 0% до 30% коэффициент поглощения плёнками аморфного гидрогенизированного кремния при 2 эВ уменьшается практически на порядок – с 25000  $\text{см}^{-1}$  до 3200  $\text{см}^{-1}$ , вблизи 2,5 эВ – несущественно – с 60000  $\text{см}^{-1}$  до 35000  $\text{см}^{-1}$ . А при добавлении водорода с концентрацией 50% на 2 эВ коэффициент поглощения составляет всего 900  $\text{см}^{-1}$ , при 2,5 – 5500  $\text{см}^{-1}$ .

На поглощение в видимой части оптического излучения в непрямозонных полупроводниках (к которым относится кремний) влияют непрямые переходы, где коэффициент поглощения определяется как

$$\alpha_{\text{раз}}^{\text{неп}} = \frac{B^{\text{исп}}}{\omega(E_0 - \hbar\omega)^2} (\hbar\omega - (E_g + \Delta E_g) - \hbar\omega_{kL})^2 + \frac{B^{\text{ногл}}}{\omega(E_0 - \hbar\omega)^2} (\hbar\omega - (E_g + \Delta E_g) + \hbar\omega_{kL})^2 \quad (1)$$

при разрешённых переходах и содержит слагаемые, пропорциональные  $(\hbar\omega - (E_g + \Delta E_g) \pm \hbar\omega_{kL})^3$  при запрещённых.  $\Delta E_g$  – величина, показывающая уширение (сужение) запрещённой зоны и зависящая от степени дефектности системы.

В этой формуле  $\hbar\omega$  – энергия поглощаемого фотона,  $\hbar\omega_{k_L}$  – испускаемого (поглощаемого) фонона.  $B^{исп}$  и  $B^{погл}$  не зависят от частоты,  $E_0$  – расстояние между валентной зоной и зоной проводимости в точке  $k = 0$ , для кремния – 3,4 эВ. При анализе влияния непрямых разрешённых переходов использовалась следующая обобщённая формула:

$$\alpha = B(\hbar\omega - (E_g + \Delta E_g))^2. \quad (2)$$

Основная апробация модельных представлений (1, 2) по смещению края фундаментального поглощения оптического излучения при изменении его кристалличности осуществлялась посредством сравнения зависимостей коэффициента поглощения монокристаллического, микрокристаллического и аморфного кремния в видимом диапазоне. При этом девиация спектра для кристаллического материала составляет 10%. По-видимому, это обусловлено различными степенями неидеальности решётки, которая в свою очередь также зависит от технологии выращивания кристалла и обработки рабочих пластин.

При анализе рассмотрения спектров поглощения структур на основе аморфного кремния наблюдается их больший разброс по сравнению с таковыми для монокремния, достигающий 20%. Данный эффект можно пояснить разнообразием методов получения тонкоплёночных структур, технических условий их производства, степенью обработки поверхности и физико-химическим составом.

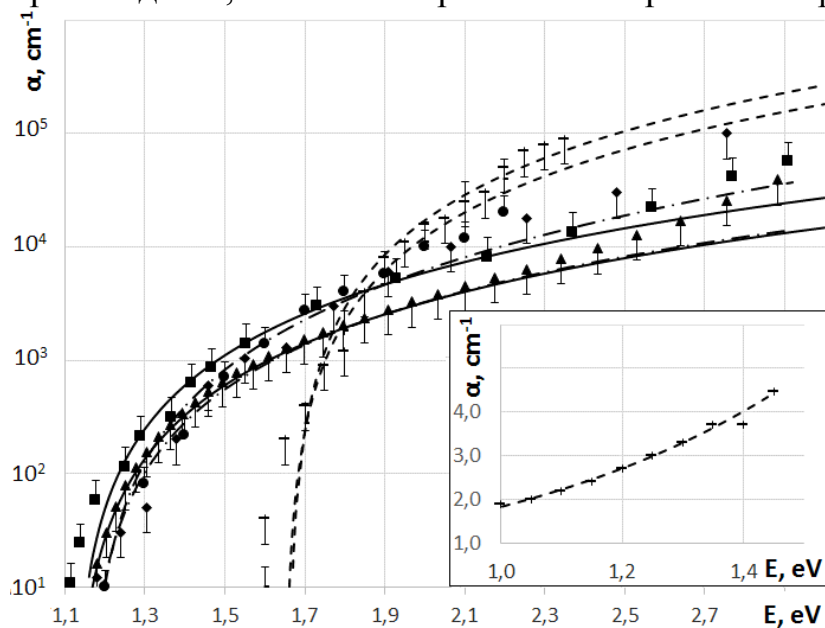


Рисунок 7 – Сравнение экспериментальных и теоретических зависимостей коэффициента поглощения от энергии фотонов для монокристаллического, микрокристаллического и аморфного кремния. Экспериментальные данные: ■, ▲ – с-Si; ◆, ● –  $\mu$ s-Si; -, — – a-Si. Теоретические данные: сплошная линия – с-Si, штрихпунктирная –  $\mu$ s-Si и штриховая – a-Si

По сравнению с монокристаллическим, у микрокристаллического кремния наблюдается более равномерное увеличение коэффициента поглощения при 1,7–3,5 эВ, что было объяснено неидеальностью микрокристаллических структур, вызванной границами зёрен.

При сравнении экспериментально полученных зависимостей с теоретическими характеристиками хочется отметить неоднозначность измерений и вывода коэффициента поглощения, которая диктуется сложностью структуры непрямозонных полупроводников.

Сравнение экспериментальных параметров и значений согласно (2) (рисунок 7) позволяет получить изменение ширины запрещённой зоны на  $\Delta E_g \approx 0,5$  эВ, для c-Si – 1,12 эВ, a-Si – 1,65–1,66 эВ. У  $\mu$ c-Si запрещённая зона составляет 1,15–1,16 эВ. В данном случае использовались постоянные  $4200\text{--}7700$  эВ $^{-2}\cdot\text{см}^{-1}$  для кристалла  $\alpha$ -Si,  $4500\text{--}6000$  эВ $^{-2}\cdot\text{см}^{-1}$  для микрокристаллов и  $(1\text{--}1,5)\cdot 10^5$  эВ $^{-2}\cdot\text{см}^{-1}$  для аморфного кремния, которые описывают количество резонансных центров. На вставке рисунка 7 представлено сравнение экспериментально полученных зависимостей коэффициента поглощения, связанного с влиянием дефектных состояний, для a-Si (—) в области энергий 1,0–1,5 эВ и теоретической модельной экспоненциальной зависимости (пунктирная линия).

Для получения спектров прохождения и зеркального отражения в инфракрасном спектральном диапазоне

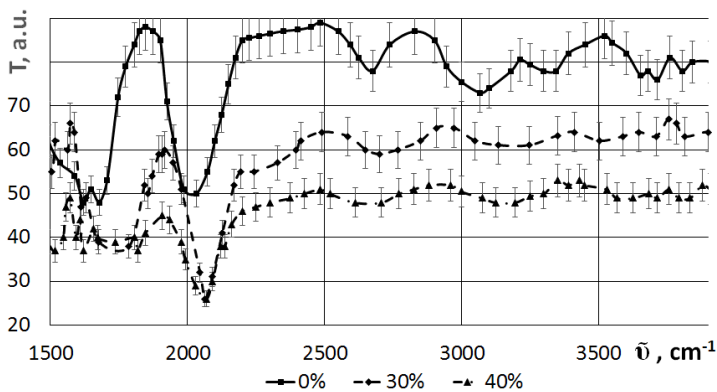


Рисунок 8 – Спектр прохождения ИК излучения для аморфного кремния в зависимости от концентрации водорода в плазме

при обратных длинах волн  $3900\text{--}1500$  см $^{-1}$  использовался спектрофотометр Specord 75IR. С увеличением концентрации водорода наблюдается уменьшение коэффициента прохождения излучения сквозь плёнки (рисунок 8).

Коэффициент поглощения аморфной полупроводниковой структуры предлагается описать путём поглощения квазикристаллической частью и поглощением

дефектами (неоднородностями). Влияние неоднородностей на спектр поглощения в ИК области показывается определением системы дефектных периодичностей нескольких типов в матрице базовой решётки. Подобным набором потенциально возможно описать практически любую асимметрию кристалла, включая нанокристаллические и аморфные фазы. Для каждого типа периодичностей были введены качественные  $\xi_j$  и количественные  $b_j$  параметры, характеризующие тип дефекта. Модельным подбором  $\xi_j$  и  $b_j$  описывалось изменение внутренней структуры полупроводника в зависимости от его состояния и условий получения.

Так, были выведены коэффициенты поглощения аморфного кремния для ИК оптического диапазона, где определяющую роль во взаимодействии падающей волны и материала оказывают дефекты, находящиеся в запрещённой зоне. Исходя из дипольной теории поглощения, рассчитанный коэффициент определялся суммой (СГС)

$$\alpha_a(\lambda) = \sum_{j=1}^K \frac{4\pi e^2 N_c b_j \omega^2 \gamma_j}{cm_n \left[ \left( \frac{E_g}{2\hbar} - \frac{\xi_j}{\hbar} \right)^2 - \omega^2 \right]^2 + \omega^2 \gamma_j^2} \quad (3)$$

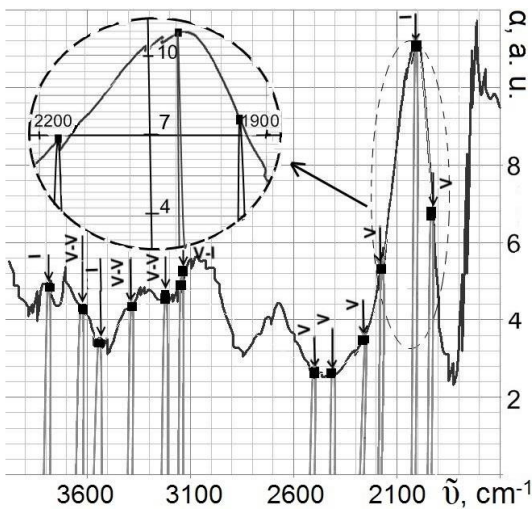


Рисунок 9 – ИК спектр поглощения плёночного а-Si в диапазоне обратных длин волн 1600–3900 см<sup>-1</sup>. На вставке более детально показан пик при 1900–2200 см<sup>-1</sup>

$$\alpha_a(\lambda) = \alpha_1(2,64) + \alpha_2(2,76) + \alpha_3(2,82) + \alpha_4(2,95) + \alpha_5(3,10) + \alpha_6(3,18) + \alpha_7(4,00) + \alpha_8(4,13) + \alpha_9(4,43) + \alpha_{10}(4,59) + \alpha_{11}(4,96) + \alpha_{12}(5,17)$$

в скобках – длины волн, мкм.

В качестве основных типов неоднородностей можно обозначить вакансии (V) и межузельные атомы (I), нейтральные и заряженные дивакансии (V-V<sup>0</sup>, V-V<sup>-</sup>, V-V<sup>+</sup>) и их комплексы с донорными и акцепторными примесями (рисунки 9, 10).

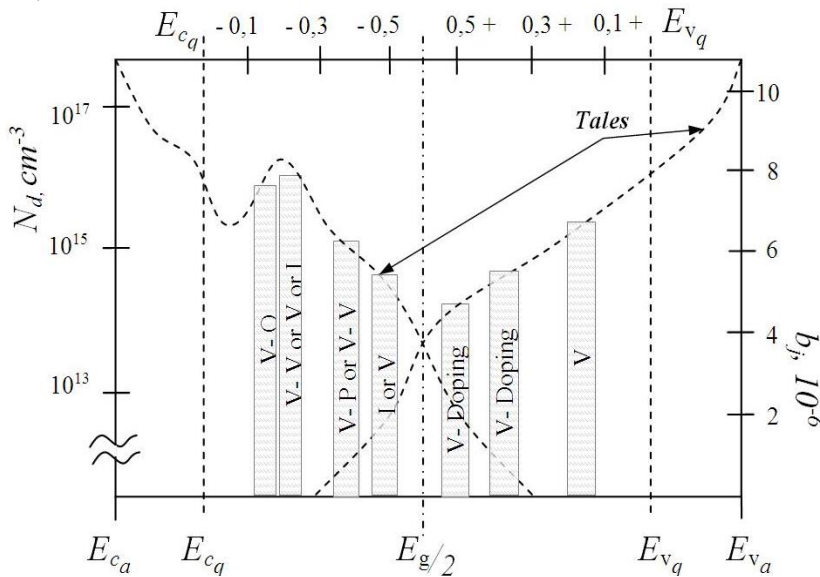


Рисунок 10 – Вклад базовых уровней дефектов на поглощение в аморфном кремнии в ИК области спектра

по *j*-типу дефекта, в которой коэффициент  $\gamma_j$  показывает затухание и определяется временем жизни фотогенерируемой электронно-дырочной пары, дефекты характеризуются  $b_j$  – количественным параметром и энергетическим параметром  $\xi_j$ .

Корреляция теоретической модели с экспериментальными результатами осуществлялась на оптических спектрах поглощения инфракрасного диапазона для плёночного аморфного кремния, получаемого магнетронным распылением. Сами по себе полученные опытным путём спектры поглощения аморфного кремния в ИК диапазоне представляют собой сложную кривую (рисунок 9). Согласно (3), экспериментально полученный спектр представлялся суммой коэффициентов поглощения на фиксированных длинах волн:

Чтобы определить природу каждого из компонентов суммарного спектра, был рассмотрен набор резонаторов, сформированный в запрещённой зоне дефектными центрами (рисунок 10). За первый из коэффициентов,  $\alpha(2,64)$ , по всей видимости, ответственен собственный межузельный атом на уровне  $E = E_c - 0,47 \text{ эВ} \pm 0,04 \text{ эВ}$ .

Поглощение на длине волны 2,95 мкм связано с взаимодействием

вакансии и примесного атома фосфора с образованием энергетического центра на  $E=E_c-0,42 \text{ эВ} \pm 0,04 \text{ эВ}$ . Энергетический центр на уровне  $0,4 \text{ эВ}$  имеет более сложную природу. Во-первых, на нём может располагаться межузельный атом. Также на этом энергетическом уровне вероятно нахождение комплекса вакансии и атома фосфора или при объединении двух вакансий образуется дивакансия. Объединение вакансии и межузельного атома на уровне  $0,39 \text{ эВ}$  ( $3145 \text{ см}^{-1}$ ) образует дальнейший пик поглощения.

Достаточно сильное влияние оказывает группа энергетических центров на поглощение в диапазоне  $1900\text{--}2200 \text{ см}^{-1}$ . Уровень  $E=E_c-0,27 \text{ эВ} \pm 0,03 \text{ эВ}$  образован вакансией, а на  $0,25 \text{ эВ}$  ниже зоны проводимости расположился межузельный атом кремния. Центр поглощения при  $5,17 \text{ мкм}$  относится или к вакансии, или к дивакансии.

Основываясь на результатах анализа спектра поглощения аморфного кремния в ИК диапазоне, были определены моды колебания, которые позволяют рассмотреть энергетическое распределение в хвостах запрещённой зоны ( $\xi_j$ ) и частоту встречаемости каждого из типов дефектов ( $b_j$ ) (3) (рисунок 10). В качестве апробации предложенного подхода был описан пик в области  $1900\text{--}2200 \text{ см}^{-1}$ , более подробно показанный на вставке рисунка 9. Он образован тремя энергетическими уровнями, характеризующимися следующими  $b_j$  и  $\xi_j$  (таблица 1).

Таблица 1 – Значения  $b_j$  и  $\xi_j$  для пика на  $1900\text{--}2200 \text{ см}^{-1}$

Тип дефекта	$\tilde{\nu}, \text{ см}^{-1}$	$b_j, \cdot 10^{-6}$	$\xi_j, \text{ эВ}$
Вакансия	2177	3,8	0,63
Межузельный атом	2016	7,7	0,65
Дивакансия	1936	1,5	0,66

Исследуемыми объектами для изучения электрических характеристик служили структуры металл-полупроводник-металл. Для порошковых материалов энергии активации, меняющиеся в пределах десятых электронвольт, показали зависимость от прикладываемого давления (рисунок 11).

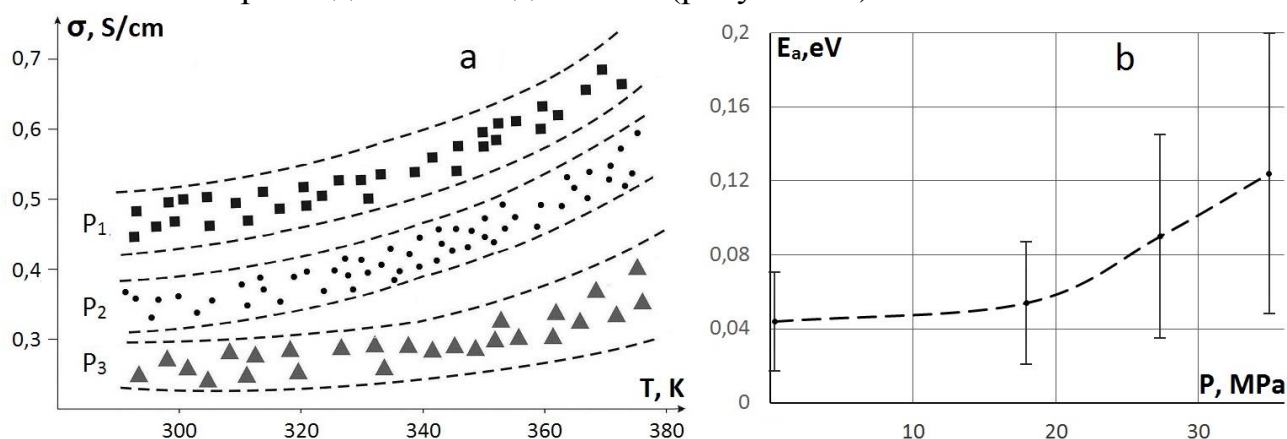


Рисунок 11 – Температурная зависимость проводимости  $\rho_{wSi}$  при различном давлении ( $P_1 > P_2 > P_3$ , а). Энергии активации проводимости в зависимости от приложенного давления (б)

Расчитанные удельные сопротивления для  $\text{pwSi}$  в зависимости от типа порошка варьируются в пределах  $0,022\text{--}12,2 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ , ФСМ –  $0,012\text{--}0,015 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ ,  $\text{pwSi+FCM}$  –  $0,017\text{--}0,019 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ ,  $\text{pw2Si+FCM}$  –  $0,021\text{--}0,023 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ . Средние значения энергий активации порошкового кремния составляют  $0,04 \text{ эВ}$  при давлении на порошок в  $0 \text{ МПа}$ ,  $0,05 \text{ эВ}$  при  $18 \text{ МПа}$ ,  $0,09 \text{ эВ}$  при  $27 \text{ МПа}$  и  $0,12 \text{ эВ}$  при  $35 \text{ МПа}$  (рисунок 11, б). Для ФСМ они колеблются в диапазоне  $0,01\text{--}0,05 \text{ эВ}$ ,  $\text{pwSi+FCM}$  –  $0,02\text{--}0,31 \text{ эВ}$ ,  $\text{pw2Si+FCM}$  –  $0,04\text{--}0,09 \text{ эВ}$ . В целом необходимо отметить значительное влияние прикладываемого давления к нанокристаллическому кремнию на удельные сопротивления и энергии активации, показывающее его пористость и неидеальность. Высокая пористость материала также приводит к сильной абсорбционности, показывающей высокую восприимчивость к неконтролируемым внешним воздействиям. ФСМ, полученный методом низкотемпературного синтеза, имеет удельные сопротивления  $3\text{--}10 \text{ Ом}\cdot\text{см}$  и энергии активации  $0,016\text{--}0,15 \text{ эВ}$ .

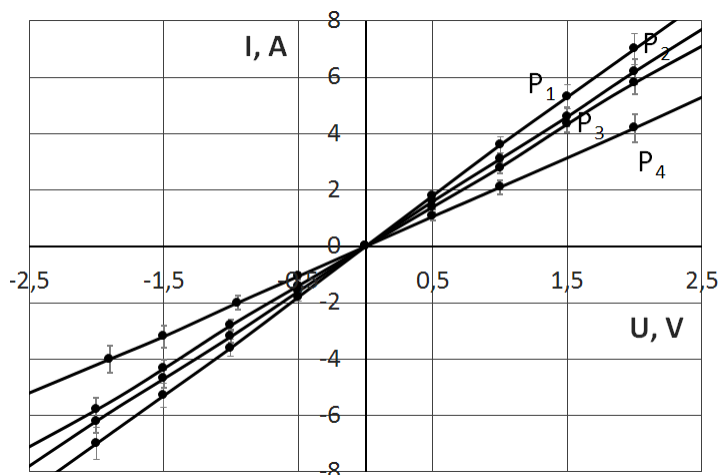


Рисунок 12 – ВАХ образца  $\text{pwSi}$  при разном давлении, прикладываемом к контактам:  $P_1 = 28,7 \text{ МПа}$ ,  $P_2 = 17,8 \text{ МПа}$ ,  $P_3 = 9,3 \text{ МПа}$ ,  $P_4 = 0,0 \text{ МПа}$

ВАХ обозначили линейность свойств исследованных материалов (рисунок 12). Влияние прикладываемого давления к порошковому кремнию на его энергии активации и ВАХ, скорее всего, обусловлено увеличением вероятности прыжков носителей заряда на границах частиц как неидеальностях структуры и показывает прыжковую проводимость. Кроме этого, нанокристаллический кремний характеризуется генерационно-рекомбинационным механизмом токопереноса.

В четвёртой главе кратко описывается технология изготовления моделируемой барьерной структуры по современной технологической цепочке с представлением расчёта профиля легирования и построением зонной диаграммы. Исследуется влияние девиации диффузионных констант и неидеальности кристаллической решётки на глубину залегания  $p\text{-}n$  перехода. Сравниваются экспериментально полученные ВАХ кремниевых барьерных структур и модельные характеристики. Определяются и анализируются диодные параметры неидеальности.

В данном разделе рассматриваются монокристаллические ФЭП ПАО «Кварз», полученные методом термодиффузии. В кремний, легированный бором с концентрацией  $(5\text{--}6) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , проводилась диффузия фосфора из фосфоросиликатного стекла, которое образовывалось на поверхности кристалла за время  $15\text{--}$



30 мин. Концентрация фосфора у поверхности была на уровне  $4 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ . Лицевой контакт представлял собой сетку из серебра, тыльный состоял из алюминия.

Для барьерной структуры была разработана модель диффузии из бесконечного твёрдого источника. Были рассмотрены девиации глубины залегания р-п перехода в зависимости от основных параметров, значения которых взяты из литературных и экспериментальных данных. Величина  $D_0$ , определяемая как коэффициент диффузии при энергии активации примеси, равной 0 эВ, заключена в диапазоне от 3 до 9  $\text{см}^2/\text{с}$ , меняя глубину залегания от 0,06 до 0,1 мкм при температуре диффузии фосфора в кремниевый кристалл  $T = 865 \text{ }^\circ\text{C}$  и диффузионной энергии активации  $E_a$ , равной 3,66 эВ. При этом отклонение  $E_a$  при изменении концентрации вакансий на 5% от среднестатистической величины (от 3,48 до 3,66 эВ) уменьшает глубину на 125 нм, а от 3,66 до 3,84 эВ – на 45 нм. В целом  $D_0$  и  $E_a$  напрямую связаны с неидеальностью кристаллической решётки и концентрацией различных дефектов. Выбирая температуру проведения диффузии от 820 до 910  $^\circ\text{C}$ , можно получить расположение р-п перехода относительно лицевой поверхности от 40 нм до 0,16 мкм. Концентрация фосфора на поверхности кремниевого кристалла  $C_s$ , значения которой колеблются в пределах  $4 \cdot 10^{19}$ –

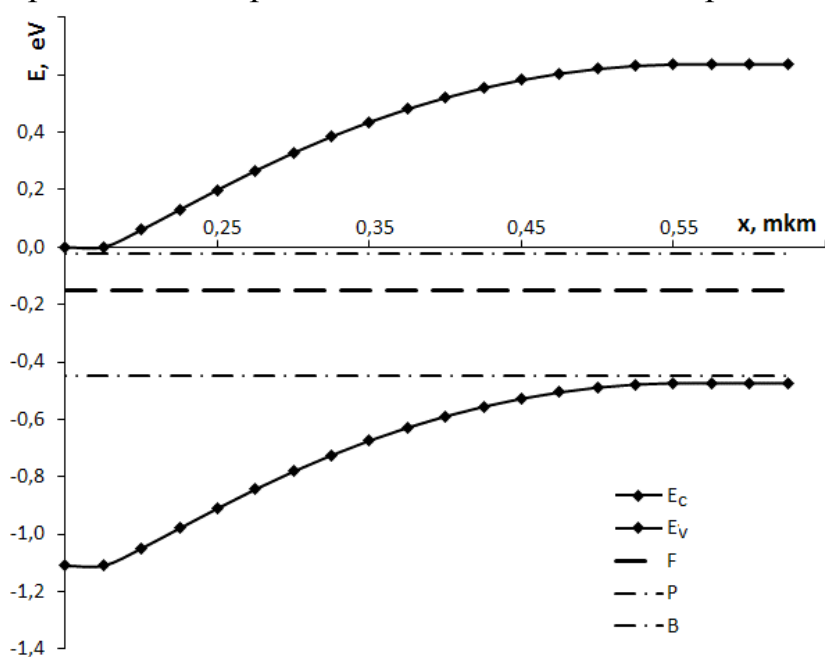


Рисунок 13 – Рассчитанная зонная диаграмма твердотельной барьерной структуры

ВАХ барьерной структуры на основе монокристаллического кремния на средних и больших токах с теоретически построенными зависимостями, полученными с использованием основных формул. Как показало сравнение, не существует универсальных формул, позволяющих построить теоретические зависимости с максимальным их совпадением с экспериментальными как при средних, так и при больших токах. Были выявлены теоретические модели, которые наиболее оптимально аппроксимируют полученные опытным путём характеристики.

$8 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ , на глубину залегания барьера влияет относительно незначительно – 20%. Время загонки примеси при возрастании от 54 до 66 мин увеличивает расстояние от поверхности до перехода с 76 до 85 нм.

Опираясь на профиль диффузии, численно-аналитически рассчитан встроенный заряд, построены зонные диаграммы с учётом запрещённых энергетических щелей кремния (рисунок 13).

Кроме этого, было произведено сравнение

Лучшие согласования экспериментальных ВАХ современных ФЭП в режиме средних токов прямой ветви (0–10 мА) наблюдаются для классической экспоненциальной модели с коэффициентом неидеальности, равным 1, а также для модели, учитывающей сопротивление базового слоя. Большие токи (0–300 мА) коррелируются с моделью с расчётом диффузионных токов (при этом параметр неидеальности равен 1) и классической экспоненциальной с коэффициентом 2.

Логарифмированием ВАХ солнечного элемента «Квазар» в диапазоне напряжений 0–0,8 В показано, что она описывается характеристиками с различными диодными коэффициентами неидеальности при разных напряжениях. Выявлено, что в области напряжений, меньших 0,075 В электропроводность кремниевой барьерной структуры характеризуется токами, определяющимися неидеальностью решётки, в частности уровнями вакансий (V) и дивакансий (V-V) в запрещённой зоне в интервале энергий от  $E_c-0,27$  эВ до  $E_c-0,5$  эВ. В диапазоне 0,075–0,225 В наблюдается генерационно-рекомбинационный механизм проводимости, а при 0,225–0,45 В – диффузионный. Область токов инжекции – 0,45–0,55 В, высокого уровня инжекции – 0,55–0,65 В. С 0,65 В начинается участок омической проводимости.

В **заключении** представлены главные научные и практические результаты работы.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Углубление понимания физической природы свойств твердотельных полупроводниковых слоёв, базирующейся на объединении теоретических и экспериментальных исследований диссертационной работы, кратко можно сформулировать следующим образом.

1. Исследован наноструктурированный порошок Si, полученный при 8000–12000 °С в среде инертного газа. Данный материал характеризуется удельным сопротивлением 0,022–12,2 Ом·см и энергиями активации проводимости, лежащими в пределах 0,02–0,22 эВ и возрастающими с увеличением прикладываемого к порошку давления. Наряду с  $\text{pwSi}$  исследовались фуллеренсодержащие материалы, полученные тем же методом, и их смеси с нанокремнием. Удельные сопротивления ФСМ колебались в диапазоне 0,012–0,015 Ом·см, а их энергии активации – 0,01–0,05 эВ, смесей ФСМ с нанокристаллическим кремнием  $\text{pwSi+FCM}$  – 0,017–0,019 Ом·см при  $E_a=0,02-0,31$  эВ,  $\text{pw2Si+FCM}$  – 0,021–0,023 Ом·см при энергиях активации 0,04–0,09 эВ.

2. Получен ФСМ методом каталитического крекинга при температуре 450–500 °С в присутствии железо-медно-цинкового катализатора, содержащий 2,7% фуллерена  $\text{C}_{60}$ . Его удельные сопротивления находились в диапазоне 3–10 Ом·см, а энергии активации проводимости лежали в интервале 0,016–0,15 эВ.

3. Неидеальность кристаллической решётки кремния приводит к увеличению ширины запрещённой зоны (с-Si – 1,12 эВ,  $\mu$ c-Si – 1,15–1,16 эВ, a-Si – 1,65–1,66 эВ). Константы, характеризующие количество переходов, для данных трёх типов кремния соответственно следующие: 4200–7700 эВ<sup>-2</sup>·см<sup>-1</sup>, 4500–6000 эВ<sup>-2</sup>·см<sup>-1</sup> и  $(1-1,5) \cdot 10^5$  эВ<sup>-2</sup> см<sup>-1</sup>.

4. Сложная природа взаимодействия оптического излучения с разупорядоченным полупроводником определена как поглощение квазикристаллической  $\alpha_{cr}$  и дефектной  $\alpha_a$  частями, в котором поглощение дефектными центрами  $\alpha_a$  – сумма коэффициентов поглощения  $\alpha_{aj}$  каждого из их типов. Получена формула, показывающая влияние дефекта  $j$ -типа с параметрами  $b_j$  и  $\xi_j$  на коэффициент поглощения  $\alpha_a$  оптического излучения в ИК диапазоне для полупроводниковых структур. Для вакансий, ответственных за поглощение при 2177 см<sup>-1</sup>,  $b_j = 3,8 \cdot 10^{-6}$ ,  $\xi_j = 0,63$  эВ; межузельных атомов при 2016 см<sup>-1</sup>:  $b_j = 7,7 \cdot 10^{-6}$ ,  $\xi_j = 0,65$  эВ; дивакансий при 1936 см<sup>-1</sup>:  $b_j = 1,5 \cdot 10^{-6}$ ,  $\xi_j = 0,66$  эВ.

5. Неидеальность структуры, обуславливающая разброс коэффициента  $D_0$  со значениями 3–9 см<sup>2</sup>/с, даёт неточность залегания р-п перехода в 1,7 раза (60–100 нм). Неоднородность в виде вакансионных и межузельных дефектных состояний влияет на неточность определения энергии активации диффузии  $E_a$  в пределах 3,48–3,84 эВ, что в результате даёт ошибку определения профиля залегания примеси в 170 нм или около 80% относительно большей величины. В общем же неидеальность кристаллической структуры монокристаллического кремния может влиять на неточность определения профиля заряда до 80% и более.

6. Лучшие согласования экспериментальных ВАХ современных ФЭП в режиме средних токов прямой ветви (0–10 мА) получаются для экспоненциальной модели с коэффициентом неидеальности, равным 1, и модели с учётом сопротивления базового слоя. На больших токах (0–300 мА) для оптимальной корреляции необходимо использовать диффузионную модель с коэффициентом 1 или классическую с параметром 2. Логарифмированием ВАХ выявлено, что этот эффект связан с изменением диодного коэффициента неидеальности от 1,4 до 6,8 в зависимости от напряжения. Участок малых токов при напряжениях до 0,075 В характеризуется влиянием дефектных уровней, представляющих собой вакансии (V) и дивакансии (V-V) в запрещённой зоне при энергиях от  $E_c-0,27$  эВ до  $E_c-0,5$  эВ.

## СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dai, X. Improving convergence and simulation time of quantum hydrodynamic simulation: Application to extraction of best 10-nm FinFET parameter values / X. Dai, N.K. Jha // IEEE T. VLSI Syst. – 2017. – Vol. 25, iss. 1. – P. 319–329.

2. Goli, M. Autonomic coordination of skeleton-based applications over CPU/GPU multi-core architectures / M. Goli, H. González-Vélez // *Int. J. Parallel Prog.* – 2017. – Vol. 45, iss. 2. – P. 203–224.
3. Solar cell efficiency tables (version 50) / M.A. Green, Y. Hishikawa, W. Warta [et al.] // *Progress in Photovoltaics.* – 2017. – Vol. 25. – P. 668–676.
4. Чеботарёв, С.Н. Полупроводниковые наногетероструктуры с промежуточной подзоной / С.Н. Чеботарёв, В.В. Калинин, Л.С. Лунин. – М.: Физико-математическая литература, 2016. – 192 с.
5. A new method of fullerene production: pyrolysis of acetylene in high-frequency thermal plasma / Y. Chen, H. Zhang, Y. Zhu [et al.] // *Materials Science and Engineering: B.* – 2002. – Vol. 95, iss. 1. – P. 29–32.
6. Афанасьев, В.П. Тонкоплёночные солнечные элементы на основе кремния / В.П. Афанасьев, Е.И. Теруков, А.А. Шерченков. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2011. – 168 с.
7. Sattler, K.D. Carbon Nanomaterials Sourcebook: Graphene, Fullerenes, Nanotubes, and Nanodiamonds, Volume 1 / K.D. Sattler. – CRC Press, 2016. – 614 pp.
8. Continuous mass production of fullerenes and fullerene nanoparticles by 3-phase AC plasma processing / F. Fabry, T.M. Gruenberger, J.G. Aguilar [et al.] // *NSTI Nanotech 2005 Technical Proceedings.* – Anaheim, CA, USA, 2005. – P. 201–204.
9. Phonon interference and energy transport in nonlinear lattices with resonance defects / Y.A. Kosevich, H. Han, L.G. Potyomina [et al.] // *Springer Series in Materials Science.* – 2015. – Vol. 221. – P. 247–263.
10. Кочубей, И.В. Теоретическое исследование процессов релаксации электронного возбуждения в системе примесных центров в конденсированной среде в случае сильного когерентного взаимодействия центров / И.В. Кочубей, Е.Н. Тумаев // *Aspectus.* – 2014. – № 2. – С. 162–170.
11. Bai, X.-D. Unidirectional transport of wave packets through tilted discrete breathers in nonlinear lattices with asymmetric defects / X.-D. Bai, B.A. Malomed, F.-G. Deng // *Phys. Rev. E.* – 2016. – Vol. 94, iss. 3. – Art. no. 032216.
12. Electronic properties of ordered and disordered linear clusters of atoms and molecules / S.N. Behera, S. Gayen, G.V. Ravi Prasad, S. Bose // *Physica B.* – 2007. – No. 390. – P. 124–133.
13. Люминесценция солнечных элементов с гетеропереходом a-Si:H/c-Si / Д.М. Жигунов, А.С. Ильин, П.А. Форш [и др.] // *Письма в ЖТФ.* – 2017. – Т. 43, вып. 10. – С. 95–101.
14. Thevaril, J.J. Defect absorption and optical transitions in hydrogenated amorphous silicon / J.J. Thevaril, S.K. O’Leary // *Solid State Commun.* – 2010. – Vol. 150. – P. 1851–1855.
15. Богатов, Н.М. Распределение заряда в резком несимметричном равновесном n-p переходе / Н.М. Богатов // *Экологический вестник научных центров ЧЭС.* – 2016. – № 3. – С. 12–17.

## СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ РАБОТЫ

### Статьи, входящие в международные базы данных и цитирования:

1. Мазинов, А.С. Асимметричность плотности распределения объёмного некомпенсированного заряда на границе металлургического р-п перехода / А.С. Мазинов, А.И. Шевченко, М.А. Быков // Журнал нано- и электронной физики. – 2012. – Т. 4, № 3, 03026. – 4 с.

2. Mazinov, A.S. Analysis of model approaches for description of a near-surface p-n junction / A.S. Mazinov, A.I. Shevchenko // Telecommunications and Radio Engineering. – 2013. – Vol. 72, iss. 17. – P. 1601–1611.

3. Mazinov, A. Quantum interactions of optical radiation with the defect centres in the tails of the forbidden band of amorphous materials / A. Mazinov, A. Shevchenko, V. Bahov // Optica Applicata. – 2014. – Vol. 44, no. 2. – P. 327–335.

4. Mazinov, A.S. The influence of defects on the energetic spectrum of noncrystalline semiconductors / A.S. Mazinov, A.I. Shevchenko, E.I. Terukov // Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics. – 2015. – Vol. 9, no. 6. – P. 778–782.

5. Mazinov, A. The offset of the quantum interband transitions in non-crystalline semiconductors / A. Mazinov, A. Shevchenko // Optical and Quantum Electronics. – 2015. – Vol. 47, no. 7. – P. 1659–1669.

### Статьи из перечня изданий, рекомендованных ВАК РФ:

6. Токовые характеристики нанокристаллического порошкового кремния, полученного методом высокотемпературного плазмохимического синтеза / А.С. Мазинов, А.И. Шевченко, Н.И. Карпенко, В.С. Гурченко // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. – 2017. – №1. – С. 59–64.

7. Шевченко, А.И. Влияние неидеальности кристаллической структуры и условий диффузии на формирование мелкозалегающего р-п перехода / А.И. Шевченко, А.С. Мазинов, Н.Э. Арутинов // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. – 2017. – №1. – С. 74–82.

8. Фуллеренсодержащий материал, полученный низкотемпературным крекингом из резиносодержащих отходов / А.И. Шевченко, К.В. Работягов, Е.М. Максимова, И.А. Наухацкий, Л.А. Батиашвили // Вестник Тамбовского университета. Серия Естественные и технические науки. – 2017. – Т. 22, вып. 2. – С. 459–463.

### Статьи из журналов из списка ВАК Украины:

9. Мазинов, А.С. Девиация диффузионных констант и её влияние на профиль мелкозалегающего р-п перехода. / А.С. Мазинов, Л.Д. Писаренко, А.И. Шевченко // Техническая электродинамика: тем. вып. «Силовая электроника и энергоэффективность». – 2012. – Ч. 1. – С. 204–208.

10. Шевченко, А.И. Численно-аналитический подход и рабочие характеристики фронтальных р-п переходов / А.И. Шевченко, А.С. Мазинов, Л.Д. Писаренко // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2013. – Специальный выпуск. Т. 1, № 8 (114). – С.182–186.

11. Наноструктурированные полупроводники, полученные порошковым методом / А.С. Мазинов, А.И. Шевченко, В.М. Воскресенский, В.С. Гурченко, А.В. Куропаткин, Е.И. Теруков, В.П. Афанасьев // Учёные записки Таврического национального университета имени В.И. Вернадского. Серия "Физико-математические науки". – 2014. – Т. 27 (66), № 2. – С. 107–114.

**Статьи из журналов, индексируемых РИНЦ:**

12. Исследование структуры и физико-химических свойств пористых углеродных материалов, полученных низкотемпературным крекингом / К.В. Работягов, Е.В. Сай, Е.М. Максимова, И.А. Наухацкий, Н.И. Карпенко, А.И. Шевченко, А.С. Мазинов // Учёные записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. Серия "Биология, химия". – 2015. – Т. 1 (67), № 3. – С. 125–131.

13. Модификация модели Кронига-Пенни для описания отклонений от атомной периодичности / А.И. Шевченко, В.Б. Орленсон, А.С. Мазинов, В.А. Лукьяненко // Учёные записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. Серия "Биология, химия". – 2015. – Т. 1 (67), № 3. – С. 132–139.

**Материалы конференции, индексируемые в международных базах данных и цитирования:**

14. Наноструктурные полупроводники на основе порошковой технологии / А.С. Мазинов, А.И. Шевченко, В.М. Воскресенский, А.В. Куропаткин // 24-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо'2014)». Материалы конференции. – Севастополь. – 2014. – С. 740–741.

**Соавторство в учебных пособиях и методических указаниях:**

15. Методические указания к лабораторным работам по курсу «Основы радиоэлектроники» / Е.В. Григорьев, С.П. Арсеничев, А.С. Мазинов, Д.А. Полетаев, А.И. Шевченко. – Симферополь: Крымский федеральный университет, 2016. – 26 с.

**Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ**

16. Свид. 2017614699 Российская Федерация. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. Компьютерная программа для расчёта и построения зонной диаграммы полупроводникового диода на основе немонокристаллического материала с линейным распределением легирующих примесей / А.И. Шевченко, А.С. Мазинов, С.А. Зуев, Д.А. Полетаев; заявитель и правообладатель КФУ им. В.И. Вернадского (RU). – № 2017610108; заявл. 10.01.2017; опубл. 26.04.2017, Реестр программ для ЭВМ.