

На правах рукописи



МИШУСТИН Владислав Геннадьевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЛОКАЛИЗОВАННЫХ СОСТОЯНИЙ
НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ЗАРЯДА
В БАРЬЕРНЫХ СТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ
НЕУПОРЯДОЧЕННЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ**

Специальность 01.04.10 – физика полупроводников

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Рязань – 2008

Работа выполнена в Рязанском государственном радиотехническом университете

Научный руководитель: кандидат технических наук,
доцент Н.В. Вишняков

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор А.Г. Казанский

доктор физико-математических наук,
профессор А.А. Трубицын

Ведущая организация: ГОУВПО "Институт общей и неорганической химии"

Защита состоится " 18 " ноября 2008 г. в ____ часов на заседании диссертационного
совета Д 212.211.03 в Рязанском государственном радиотехническом университете
по адресу: 390000 ГСП, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке РГРТУ

Автореферат разослан " ____ " _____ 2008 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор технических наук, профессор



Колотилин Б.И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

Впервые массовый интерес к неупорядоченным полупроводниковым материалам возник в 50-х годах XX века. В основном это относилось к халькогенидным стеклообразным полупроводникам, а также аморфному кремнию и сплавам на его основе. Этот интерес был обусловлен освоением таких технологических приемов как гидрогенизация неупорядоченных полупроводников и их эффективное легирование. Это, в свою очередь, позволило получить удовлетворительные электрофизические характеристики полупроводниковых материалов и открыло широкие перспективы их приборного применения в различных областях электронной техники.

Неупорядоченные полупроводники характеризуются такими качествами как высокий коэффициент поглощения электромагнитного излучения и устойчивость к радиационному воздействию. Технологически имеются возможности низкотемпературного осаждения тонких полупроводниковых пленок на гибкие подложки большой площади, совместимость с традиционной кремниевой технологией, возможность управления электрофизическими свойствами материала за счет степени гидрогенизации и уровня легирования в процессе осаждения. Это позволило использовать неупорядоченные полупроводники в качестве различных высокочувствительных датчиков электромагнитного излучения, элементов памяти, в солнечной энергетике, в фотокопировальной и другой электронной технике.

Повышенный интерес к неупорядоченным полупроводникам в последние годы связан с динамичным развитием рынка плоских жидкокристаллических телевизионных панелей, где в качестве активного элемента управления изображением применяются матрицы тонкопленочных полевых транзисторов (ТПТ) на основе сплавов неупорядоченных полупроводников. В связи с этим следует заметить, что как в случае ТПТ-технологии, так и приборостроения в целом, работа по улучшению характеристик идет преимущественно по технологическому пути развития. Таким образом, улучшение электрофизических свойств материалов и эксплуатационных характеристик приборов достигается за счет варьирования технологических режимов, и зачастую, успех определяется интуицией инженеров-технологов.

Такой путь развития позволил достичь значительных успехов в разработке и изготовлении приборов различного назначения на основе неупорядоченных полупроводниковых материалов. Однако при таком подходе трудно заранее прогнозировать результаты, и успех зачастую определяется случайными факторами. До сих пор не существует единой общепризнанной теории, удовлетворительно описывающей физические процессы в некристаллических полупроводниках. Чаще всего использу-

ется традиционный математический аппарат, разработанный для кристаллических полупроводников, при этом особенности неупорядоченных материалов учитываются с помощью введения поправочных коэффициентов, полученных эмпирическим путем. Такой подход позволяет удовлетворительно решать частные задачи, связанные с расчетом характеристик конкретных приборов на основе определенных материалов, но теряет свою универсальность при незначительных изменениях электрофизических свойств материала.

Таким образом, понимание физических процессов в неупорядоченных полупроводниках и создание адекватного математического аппарата для их описания является актуальной задачей как с точки зрения фундаментальной науки, так и практического применения этого класса материалов. Поскольку отличие неупорядоченных полупроводников от их кристаллических аналогов обусловлено наличием непрерывного по энергии спектра плотности локализованных состояний в щели подвижности, необходимо установить взаимосвязь между параметрами распределения плотности локализованных состояний и электрофизическими свойствами этих материалов, а также характеристиками барьерных структур на их основе.

Целью работы является определение влияния плотности локализованных состояний в щели подвижности неупорядоченных полупроводников на пространственное распределение заряда, напряженности и электростатического потенциала электрического поля в барьерных структурах на их основе. Для достижения поставленной цели в работе решались следующие **задачи**:

1. Анализ существующих методов экспериментального исследования электрофизических и оптических характеристик неупорядоченных полупроводниковых материалов.
2. Развитие времяпролетного метода исследования неупорядоченных полупроводников, позволяющего определять пространственное распределение объемного заряда и напряженности электрического поля в барьерных структурах на их основе.
3. Разработка и изготовление макета экспериментально-измерительного комплекса, реализующего модифицированный времяпролетный метод исследования неупорядоченных полупроводников.
4. Проведение экспериментальных исследований для определения влияния плотности локализованных состояний на характер распределения напряженности электрического поля и на основные параметры барьера: эффективную высоту барьера и ширину области пространственного заряда (ОПЗ).

Объекты исследований.

Основными объектами исследований были выбраны вертикальные и планарные структуры с барьерами на контакте металл – неупорядоченный полупроводник на основе сплавов аморфного гидрогенизированного кремния и углерода различного состава ($a\text{-Si}_x\text{C}_{1-x}\text{:H}$), полученных методами НЧ плазмохимического осаждения и реактивного распыления.

Научная новизна.

1. На основе решения одномерного уравнения Пуассона получены новые аналитические выражения, устанавливающие зависимость напряженности электрического поля и ширины ОПЗ от параметров распределения локализованных состояний в щели подвижности для барьерных структур на неупорядоченных полупроводниках. Полученные выражения отличаются от известных тем, что в них учитывается определяющая роль глубоких локализованных состояний на формирование барьера.

2. Впервые при определении коэффициента собирания фотогенерированного заряда учтена потеря части носителей за счет захвата на глубокие ловушки с последующей их рекомбинацией. Разработан соответствующий математический аппарат, необходимый для реализации модифицированного времяпролетного метода исследования неупорядоченных полупроводников.

3. Экспериментально установлено, что увеличение плотности локализованных состояний в середине щели подвижности приводит к перераспределению напряженности и электростатического потенциала электрического поля в барьерных структурах на основе $a\text{-Si:H}$ и $a\text{-SiC:H}$. Профиль электростатического потенциала в приконтактной области утончается, что приводит к понижению эффективной высоты барьера из-за туннелирования носителей заряда.

4. Предложен усовершенствованный способ определения плотности локализованных состояний в щели подвижности неупорядоченного полупроводника по экспериментально измеренному пространственному распределению напряженности электрического поля в ОПЗ.

Достоверность научных выводов.

Достоверность научных выводов по результатам работы обеспечена использованием комплекса независимых методов, в основе которых лежат различные физические принципы измерений: 1) модифицированный времяпролетный метод (МВПМ); 2) метод токовой релаксационной спектроскопии глубоких уровней (РСГУ); 3) метод вольт-амперных характеристик (ВАХ); 4) метод вольт-фарадных

характеристик (ВФХ); 5) метод оптического поглощения; 6) метод зондовой атомно-силовой микроскопии (АСМ), а также поверенного оборудования. Экспериментальные результаты находятся в хорошем согласии с теоретически рассчитанными значениями.

Научная и практическая значимость работы.

1. Модифицирован известный времяпролетный метод измерения напряженности электрического поля в барьерных структурах на основе неупорядоченных полупроводников.

2. Разработана и изготовлена комплексная измерительная установка для измерения напряженности электрических полей в барьерных структурах на основе неупорядоченных полупроводников, реализующая модифицированный времяпролетный метод исследования материалов с низкой подвижностью носителей заряда.

3. Предложен способ расчета электростатического потенциала, характеристической длины экранирования, пространственного распределения объемного заряда и ширины ОПЗ по известному распределению напряженности электрического поля в ОПЗ на контакте Me/a-Si:H.

4. Усовершенствован способ определения плотности локализованных состояний вблизи уровня Ферми и распределения плотности по энергии в щели подвижности a-Si:H по известному распределению напряженности электрического поля в ОПЗ на контакте Me/a-Si:H.

Положения и результаты, выносимые на защиту.

1. Учет потери части заряда в результате рекомбинации в тонкопленочных барьерных структурах на основе неупорядоченных полупроводников повышает точность измерения распределения напряженности внутреннего электрического поля модифицированным времяпролетным методом (погрешность снижается с 16% до 5 %).

2. Увеличение плотности локализованных состояний в щели подвижности a-Si:H повышает коэффициент прозрачности барьера (от 0 до 0.5 при изменении плотности от 10^{16} до 10^{18} эВ⁻¹см⁻³), понижает эффективную высоту барьера и делает его туннельно-прозрачным для носителей заряда за счёт резкого сужения профиля электростатического потенциала вблизи границы металл – неупорядоченный полупроводник.

3. Новая математическая модель в виде системы аналитических выражений, основанная на учете влияния локализованных состояний на формирование барьера, устанавливающая взаимосвязь между параметрами распределения плотности лока-

лизованных состояний (в диапазоне от 10^{15} до 10^{19} эВ⁻¹см⁻³) и пространственным распределением объемного заряда.

4. Усовершенствованный способ определения спектра плотности локализованных состояний в щели подвижности неупорядоченного полупроводника, в основе которого лежит измерение переменной характеристической длины экранирования, определяемой из экспериментального распределения напряженности электрического поля в ОПЗ.

5. Экспериментально-измерительный комплекс для определения напряженности электрических полей модифицированным времяпролетным методом исследования неупорядоченных полупроводников, позволяющий производить измерения в автоматизированном режиме с малой (~2%) погрешностью.

Апробация работы.

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на Международной конференции "Электротехника, электромеханика и электротехнологии" (Москва, МЭИ, 2000, 2003), IV Международной конференции по физико-техническим проблемам электротехнических материалов и компонентов (Москва, МЭИ, 2001), Научно-технической конференции РГРТА (Рязань, РГРТА, 2000, 2002, 2004, 2006), Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых "Ломоносов" (Москва, МГУ, 2001, 2002), 1-ой Российской конференции молодых ученых по физическому материаловедению (Калуга, 2001), First International Workshop on AMORPHOUS AND NANOSTRUCTURED CHALCOGENIDES: Fundamentals and Applications (Romania, Bucharest, 2001), Всероссийской научной конференции "Физика полупроводников и полуметаллов" (С.-Петербург, РГПУ им. А.И. Герцена, 2002), Международной конференции "Аморфные и микрокристаллические полупроводники" (С.-Петербург, 2002, 2004, 2006, 2008), IX Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов "Радиоэлектроника, электротехника и энергетика" (Москва, МЭИ, 2003), The fourth international edition of Romanian Conference on Advanced Materials ROCAM 2003 (Romania, Constanta, 2003).

Публикации.

По теме диссертации опубликовано 54 печатных работы, из которых 17 статей, 29 тезисы и труды конференций, 6 отчетов о НИР, 1 патент, 1 учебное пособие. Из них 7 работ опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК для защиты кандидатских диссертаций.

Структура диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка из 140 наименований и пяти приложений. Диссертация содержит 185 страниц машинописного текста, 116 формул, 4 таблицы, 51 рисунок.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи, указаны научная новизна и практическая значимость проведенной работы, а также выносимые на защиту научные положения.

Первая глава представляет собой обзор литературных данных, где кратко рассмотрены основные отличия электрофизических свойств неупорядоченных полупроводниковых материалов от их кристаллических аналогов, а также приведены основные методы их экспериментального исследования.

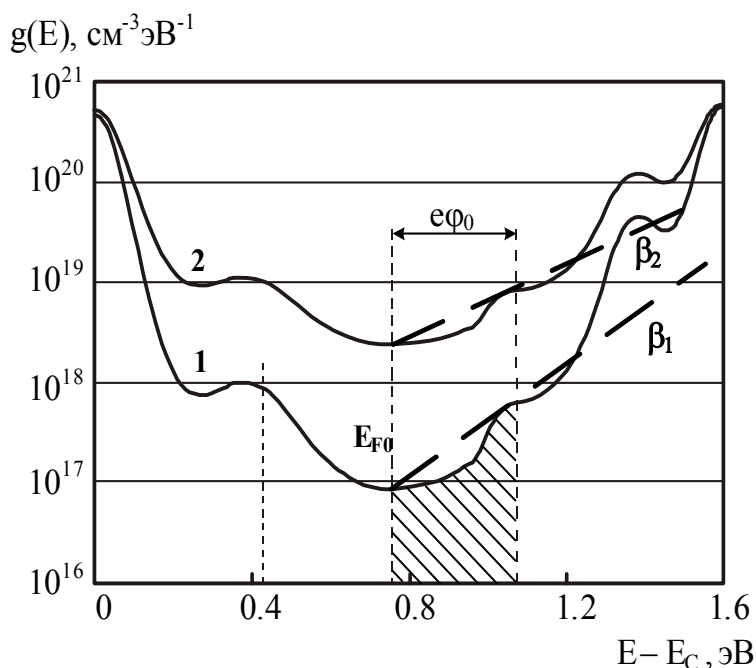


Рисунок 1 - Обобщенное распределение ПЛС в a-Si:H

Основное внимание уделено аморфному гидрогенизированному кремнию (a-Si:H) как типичному представителю класса неупорядоченных тетраэдрических полупроводников. Рассмотрены особенности энергетического зонного строения a-Si:H, влияние высокой плотности локализованных состояний (ПЛС) в щели подвижности a-Si:H на его фундаментальные свойства, а также проанализированы существующие модели распределения ПЛС в щели подвижности

по энергии. Структурные особенности неупорядоченных полупроводников, описываемые различными моделями энергетического распределения ПЛС, обобщены в интегральной модели распределения ПЛС на примере a-Si:H (рис. 1). Экспериментальные методы определения ПЛС по физическим принципам измерений разделены на несколько групп. Это атомно-силовая микроскопия (АСМ), электронный парамагнитный резонанс (ЭПР), оптическая спектроскопия (люминесценция, оптическое поглощение, переходное индуцированное поглощение), а также

методы, основанные на измерении кинетических свойств (ВАХ, эффект поля, ВФХ, РСГУ). В отдельную группу выделены времяпролетные методы (измерение дрейфовой подвижности носителей заряда, метод переходного фототока, модифицированный времяпролетный метод (МВПМ)).

МВПМ позволяет экспериментально измерять распределение напряженности электрического поля в барьерных структурах на основе неупорядоченных полупроводников. МВПМ является весьма информативным при исследовании материалов с низкой подвижностью носителей заряда, таких как a-Si:H и родственные ему материалы.

Поставлена задача дальнейшего развития МВПМ. Для повышения точности необходимо дальнейшее изучение МВПМ, его математическое обоснование и разработка нового математического аппарата, учитывающего технические особенности реализации метода, а также особенности электрофизических свойств объекта исследований – барьерных структур на основе неупорядоченных полупроводников.

Вторая глава посвящена разработке и описанию математического аппарата для реализации МВПМ. Рассмотрены технические особенности применения МВПМ для исследования материалов с низкой подвижностью носителей заряда.

МВПМ позволяет исследовать неупорядоченные полупроводниковые материалы, обладающие высоким омическим сопротивлением (ρ - до 10^{14} Ом·см). С помощью МВПМ измеряют следующие параметры, характеризующие электрофизические свойства полупроводника: дрейфовые сдвиги для электронов и дырок μt , распределение напряженности $F(x)$ и электростатического потенциала $\phi(x)$ электрического поля в ОПЗ полупроводника, плотность объемного заряда $\rho(x)$ и ширину области пространственного заряда W , а также распределение плотности локализованных состояний в щели подвижности $g(E)$.

При расчетах используются некоторые положения и допущения, основные из которых приведены ниже:

1) при контакте нелегированного a-Si:H и металла возникает запирающий слой;

2) при формировании потенциального барьера на контакте Me/a-Si:H определяющую роль играют электрически и фотоактивные состояния, локализованные в щели подвижности;

3) при расчетах используется обобщенная модель распределения ПЛС. Распределение ПЛС аппроксимируется экспоненциальной функцией вида:

$$g(E) = g_{F0} \exp(\beta(E - E_{F0})), \quad (1)$$

где E_{F0} – энергия уровня Ферми (рис. 1);

4) используется приближение полного обеднения.

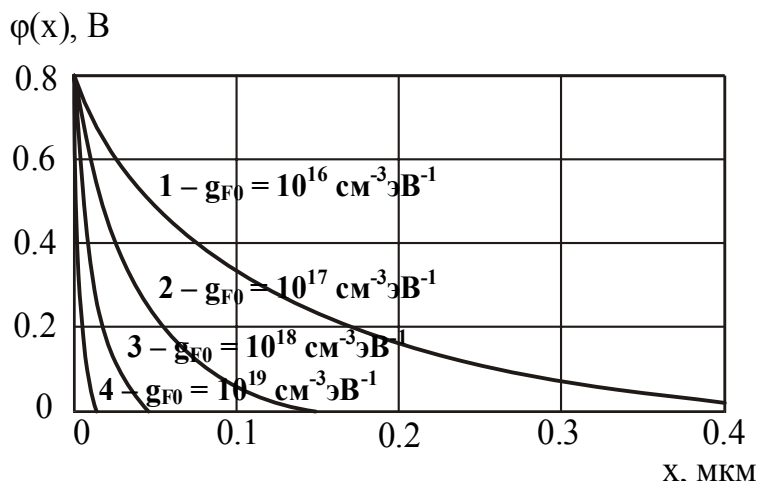


Рисунок 2 - Расчетное распределение $\varphi(x)$ в зависимости от величины ПЛС в a-Si:H

Решение одномерного уравнения Пуассона с учетом допущений и граничных условий позволяет получить новые аналитические выражения для распределения напряженности (2) и электростатического потенциала (3) электрического поля в зависимости от величины ПЛС в щели подвижности.

$$F(x) = \sqrt{\frac{2g_{F0}}{\beta^2 \epsilon \epsilon_0}} \operatorname{tg}\left(\frac{W-x}{\sqrt{2}L_S}\right); \quad (2)$$

$$\varphi(x) = -\frac{2}{\beta e} \ln \left| \cos\left(\frac{W-x}{\sqrt{2}L_S}\right) \right|, \quad (3)$$

где g_{F0} – значение ПЛС вблизи уровня Ферми, β – параметр распределения ПЛС в щели подвижности, x – координата, отсчитываемая от границы раздела с металлом вглубь полупроводника (рис. 2). Ширина ОПЗ (W) и характеристическая длина экранирования (L_S) электрического поля рассчитываются по (4) и (5):

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0}{e^2 g_{F0}}} \arccos \left[\exp\left(-\frac{\beta e(\varphi_0 - V)}{2}\right) \right]; \quad (4)$$

$$L_S = \sqrt{\frac{\epsilon\epsilon_0}{e^2 g_{F0}}}, \quad (5)$$

где φ_0 – контактная разность потенциалов, V – внешнее смещение. Таким образом, установлена взаимосвязь между параметрами распределения ПЛС в a-Si:H (g_{F0} , β) и пространственным распределением объемного заряда на контакте Me/a-Si:H ($\varphi(x)$, $F(x)$, W).

Далее рассматривается метод Гехта, который лежит в основе МВПМ и заключается в измерении коэффициента сбора фотогенерированного заряда. Модификация метода заключается в

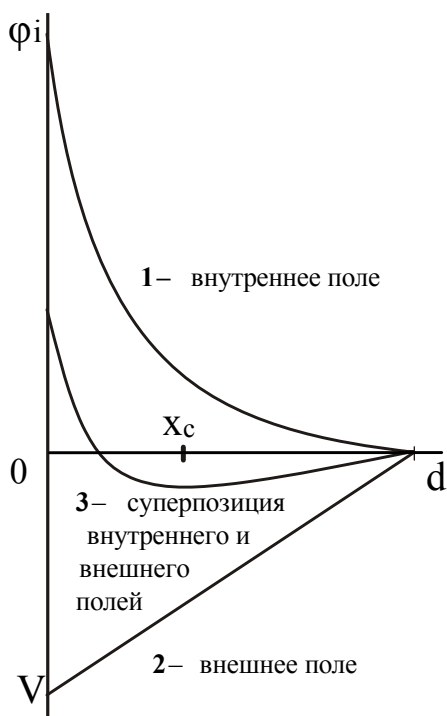


Рисунок 3 – Иллюстрация физического принципа МВПМ

том, что с целью повышения точности измерений внешнее поле (2) прикладывается навстречу внутреннему (1), при этом экспериментальная структура освещается импульсом монохроматического света (рис. 3). Точность измерений повышается за счет учета потери части фотогенерированного заряда в процессе дрейфа под действием суперпозиции внутреннего и внешнего электрических полей.

Приведен вывод математических зависимостей для МВПМ, учитывающих особенности электрофизических свойств неупорядоченных полупроводников. В результате разработан математический аппарат, позволяющий экспериментально измерять распределение напряженности внутреннего электрического поля в ОПЗ барьерной структуры. Напряженность $F(x)$ и координата x_c , в которой она измеряется, рассчитываются по формулам (6) и (7) соответственно:

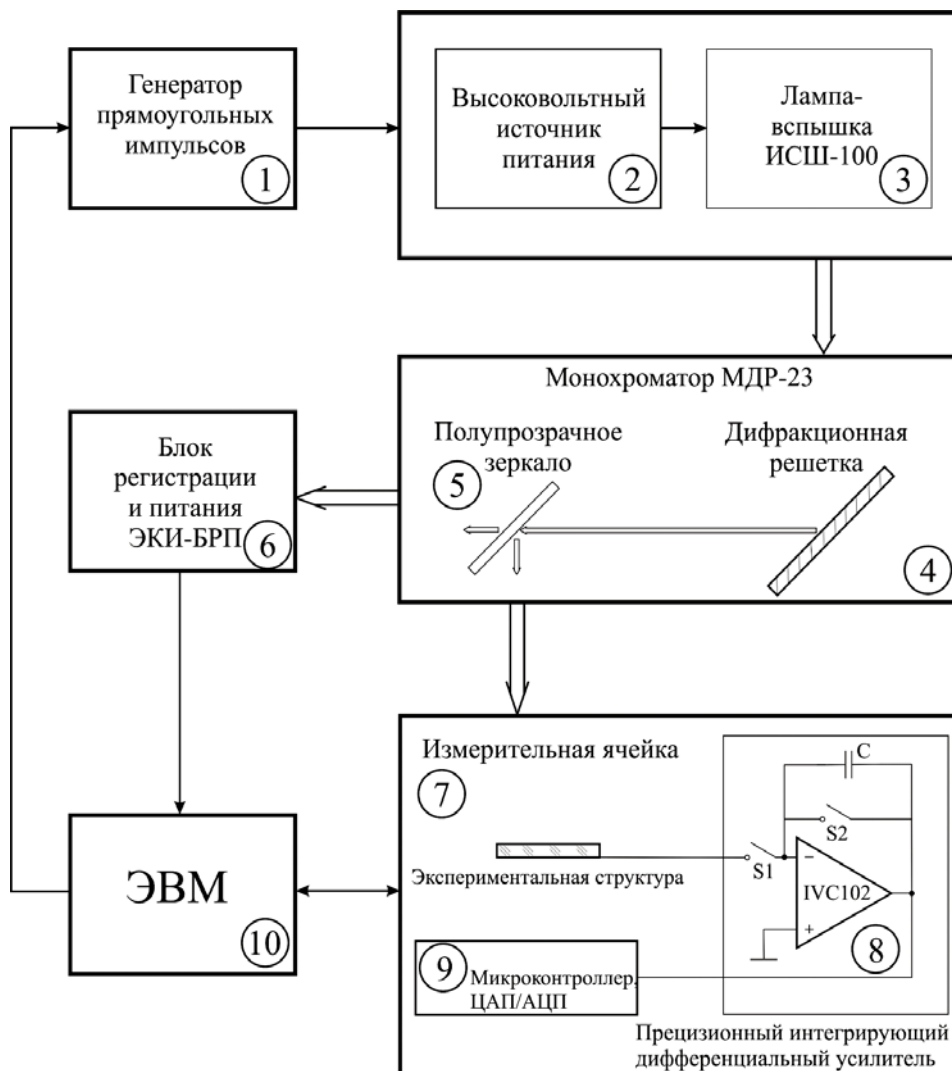


Рисунок 4 – Функциональная схема экспериментально-измерительного комплекса, реализующего МВПМ

$$F(x) = \frac{V_{(G=0)}}{d}; \quad (6)$$

$$x_c \left[1 - \exp\left(-\frac{d}{x_c}\right) \right] = \exp(-\alpha d)(d - x_c) \left[1 - \exp\left(-\frac{d}{d - x_c}\right) \right], \quad (7)$$

где $V_{(G=0)}$ – напряжение, при котором коэффициент собирания фотогенерированного заряда равен нулю; d – толщина экспериментальной структуры, α – коэффициент поглощения света при данной длине волны.

Экспериментально измеренное распределение поля в ОПЗ аппроксимируется экспоненциальной функцией вида:

$$F(x) = F_0 \exp(-x/L_S), \quad (8)$$

где F_0 – напряженность на границе раздела Me/a-Si:H, а L_S – характеристическая длина экранирования электрического поля в a-Si:H, которая является переменной величиной и зависит от координаты. Это позволяет рассчитать распределение ПЛС по энергии в щели подвижности.

По результатам, полученным во второй главе, сделаны выводы, где обобщены данные о возможностях, области применения и ограничениях МВПМ для исследования a-Si:H и других неупорядоченных полупроводников.

В третьей главе представлена экспериментальная часть работы. Разработан и изготовлен экспериментально-измерительный комплекс, реализующий модифицированный времяпролетный метод исследования материалов с низкой подвижностью носителей заряда (рис. 4). Рассмотрены характеристики экспериментального оборудования для исследования неупорядоченных полупроводников методами ВАХ, ВФХ и РСГУ. Проанализированы возможные источники ошибок при проведении экспериментов и обработке полученных результатов, а также проведен расчет погрешности измерительного оборудования.

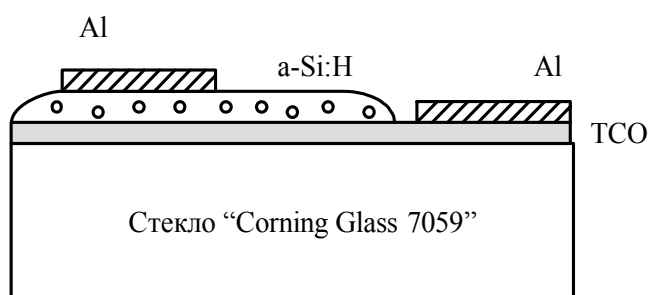


Рисунок 5 – Структура экспериментальных образцов

Для проведения комплексного исследования барьерных структур на основе неупорядоченных полупроводников разработаны и изготовлены образцы a-Si:H и a-SiC:H с заданной структурой и топологией (рис. 5).

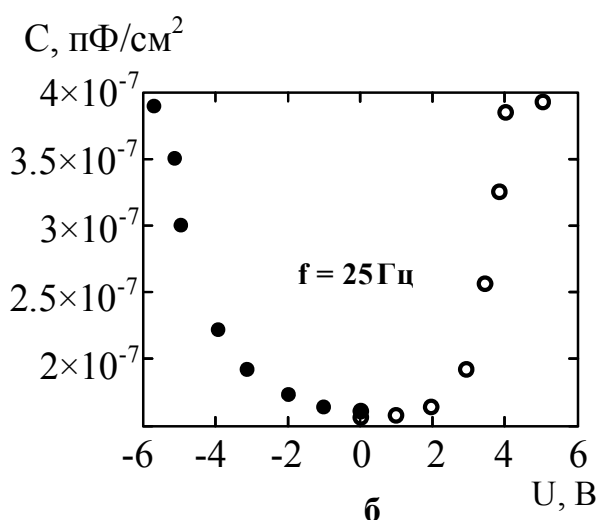
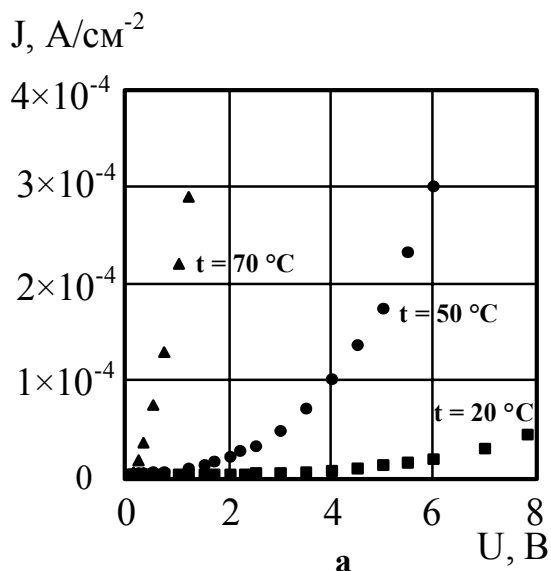


Рисунок 6 – Экспериментальные ВАХ (а) и НЧ ВФХ (б) структуры Al/a-Si:H/Al

Проведены измерения ВАХ и ВФХ барьерных структур на основе a-Si:H и a-SiC:H (рис. 6). По экспериментальным результатам идентифицирован механизм токопереноса, рассчитана энергия активации проводимости, получены величина встроенного потенциала (по результатам ВАХ $\phi_B = 0.60 \pm 0.09$, по НЧ ВФХ $\phi_B = 0.70 \pm 0.05$) и основные электрофизические характеристики экспериментальных структур.

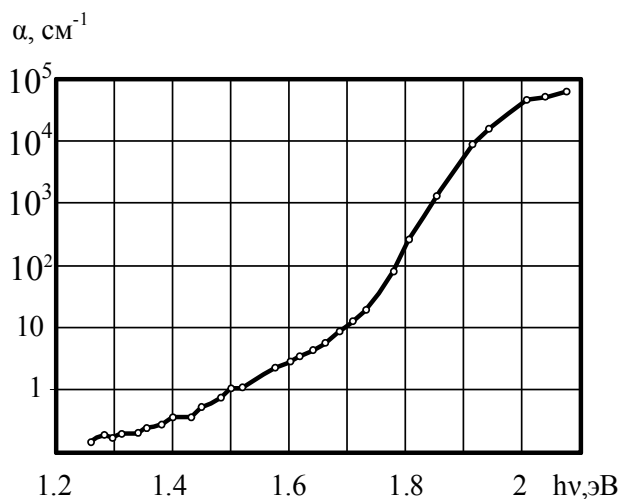


Рисунок 7 – Спектральная зависимость коэффициента поглощения

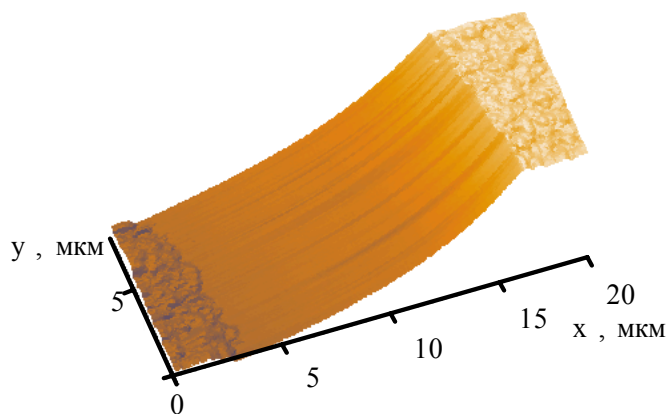


Рисунок 8 – АСМ изображение границы пленки a-Si:H

Проведены оптические измерения, по результатам которых получена спектральная зависимость коэффициента поглощения, а также определена оптическая ширина запрещенной зоны (рис. 7). Методом АСМ исследована поверхность пленок a-Si:H и a-SiC:H, а также измерены толщины экспериментальных структур (рис. 8).

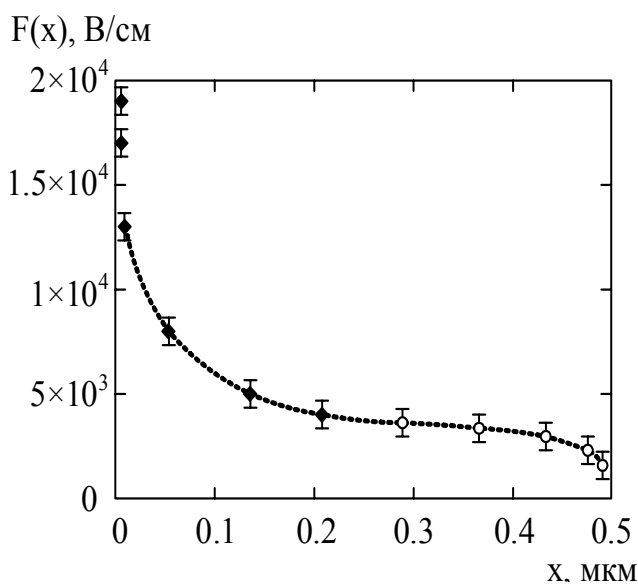


Рисунок 9 – Распределение напряженности внутреннего электрического поля

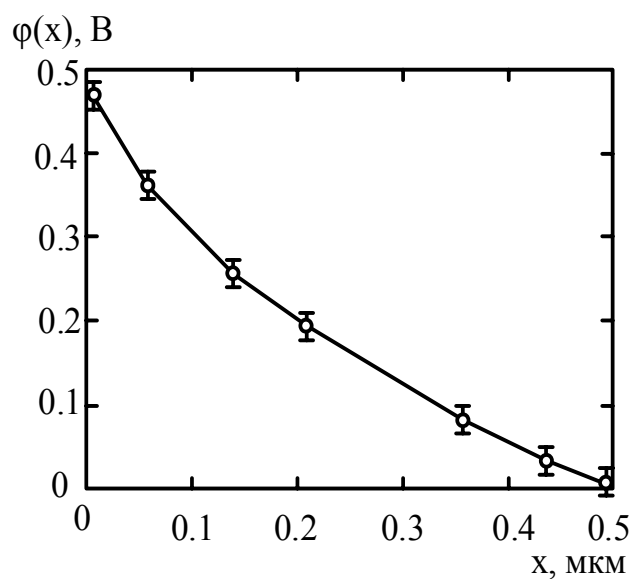


Рисунок 10 – Распределение электростатического потенциала

Проведены измерения распределения напряженности внутреннего электрического поля в барьерных сэндвич структурах Al/a-Si:H/TCO/Al (рис. 9). Получено,

что при увеличении ПЛС (от 10^{16} до 10^{18} эВ⁻¹см⁻³) происходит утончение профиля электростатического потенциала, в результате коэффициент прозрачности барьера повышается (от 0 до 0.5) из-за туннелирования носителей заряда.

По экспериментально измеренному распределению напряженности электрического поля рассчитаны профиль электростатического потенциала (рис. 10) и значение характеристической длины экранирования в a-Si:H в зависимости от координаты в ОПЗ. По этим данным рассчитан спектр ПЛС в щели подвижности a-Si:H (рис. 11).

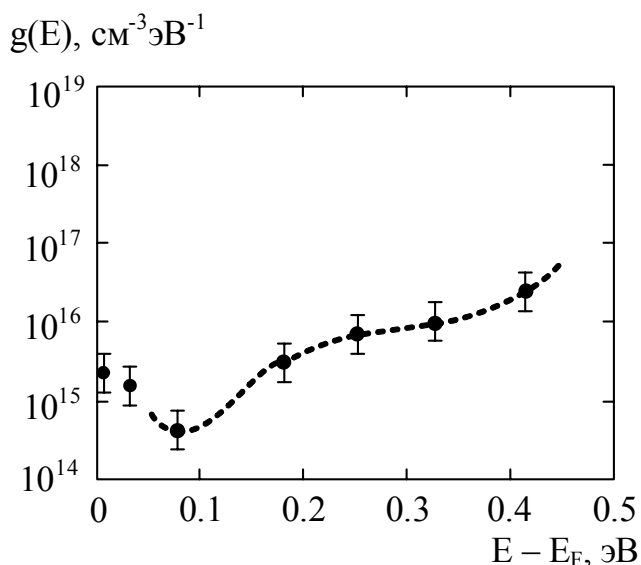


Рисунок 11 – Спектр ПЛС в щели подвижности a-Si:H

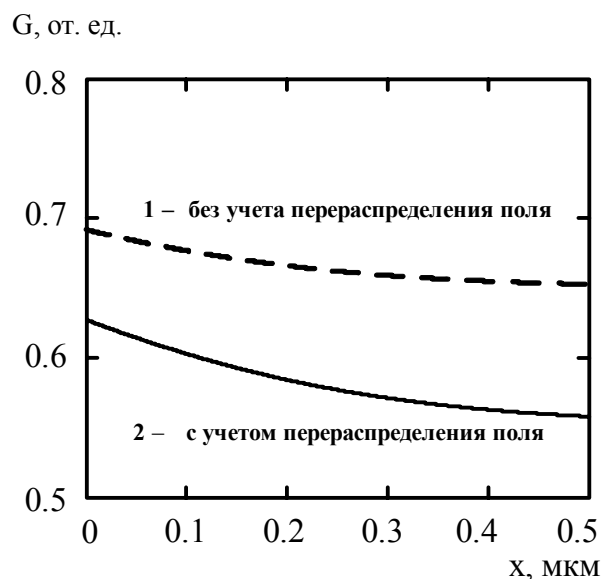


Рисунок 12 – Зависимость коэффициента сбора от толщины структуры

Четвертая глава посвящена практическому применению аморфного гидрогенизированного кремния и сплавов на его основе (a-SiGe:H, a-SiC:H) в солнечной энергетике. Кратко рассмотрены основные полупроводниковые материалы и типовые конструкции фотоэлектрических преобразователей (ФЭП). Проведен анализ факторов, определяющих эффективность ФЭП и стабильность их характеристик. При анализе использованы математический аппарат и экспериментальные данные, полученные в главах II и III соответственно.

Показано, что деградация фотоэлектрических характеристик ФЭП под действием света (эффект Стэблера-Вронского) обусловлена не только ухудшением кинетических свойств материала из-за возникновения дополнительных дефектов, но и перераспределением электрического поля, которое "концентрируется" вблизи контактов, вследствие чего ухудшается сбор фотогенерированных носителей. Предложен способ оценки коэффициента сбора фотогенерированного заряда (рис. 12).

В приложения вынесены следующие вопросы:

- область применения, основные характеристики, разрешающая способность, а также достоинства и недостатки основных экспериментальных методов определения плотности локализованных состояний в неупорядоченных полупроводниках (приложение 1);
- решение одномерного уравнения Пуассона для случая малого изгиба зон (порядка нескольких kT) в барьере на контакте $Me/a-Si:H$ (приложение 2);
- решение уравнения Пуассона для случая сильного изгиба зон (порядка десяти kT и больше) в барьере на контакте $Me/a-Si:H$ (приложение 3);
- расчет погрешности модифицированного времяпролетного метода (приложение 4);
- вывод зависимости длины дрейфа фотогенерированных носителей от координаты места их генерации в структуре $Me/a-Si:H$ (приложение 5).

Основные результаты работы.

1. Наличие непрерывного по энергии спектра плотности состояний, локализованных в щели подвижности, является фундаментальным свойством неупорядоченных полупроводников. Это обуславливает отличия процесса формирования и свойств барьера металл – неупорядоченный полупроводник от соответствующего барьера на кристалле. Пространственное распределение объемного заряда в барьере определяется ионизированными локализованными состояниями.

2. Отличия электрофизических свойств неупорядоченных полупроводников от их кристаллических аналогов обуславливают особенности применения стандартных экспериментальных методов для исследования этих материалов. Рассмотрены особенности применения методов АСМ, ВАХ, ВФХ, РСГУ и оптического поглощения для исследования электрофизических характеристик неупорядоченных полупроводников, указаны их возможности, достоинства и недостатки. Показано, что для всестороннего исследования неупорядоченных полупроводниковых материалов и структур на их основе необходим комплексный подход, сочетающий применение независимых экспериментальных методик, использующих различные физические принципы измерений.

3. Модифицированный времяпролетный метод (МВПМ) позволяет экспериментально измерять распределение напряженности электрических полей в барьерных структурах на основе неупорядоченных полупроводников. Метод специально разработан для исследования материалов с низкой подвижностью носителей заряда,

таких как a-Si:H и родственные ему материалы. МВПМ обладает более высокой чувствительностью по сравнению с традиционным времяпролетным методом, поскольку при измерениях исключается влияние мелких уровней, обуславливающих дисперсионный характер переноса и усложняющих интерпретацию результатов при непосредственном наблюдении кинетики тока.

4. Показано, что существующий математический аппарат не учитывает некоторые технические особенности реализации модифицированного времяпролетного метода, а именно потерю части фотогенерированного заряда при приложении внешнего компенсирующего поля навстречу внутреннему, что снижает точность измерений.

5. Проведено дополнительное математическое обоснование модифицированного времяпролетного метода. Разработан новый математический аппарат, учитывающий особенности неупорядоченных полупроводников – наличие высокой плотности локализованных состояний и низкую подвижность носителей заряда. Новый математический аппарат отличается более высокой точностью за счет учета технических особенностей реализации МВПМ: напряженность внутреннего электрического поля определяется по напряжению внешнего компенсирующего поля, при котором суммарный заряд, протекающий во внешней цепи, равен нулю; координата точки, где происходит компенсация внешнего и внутреннего полей, определяется с учетом потери части фотогенерированного заряда в процессе дрейфа под действием суперпозиции внутреннего и внешнего электрических полей за счет захвата на глубокие ловушки с последующей рекомбинацией.

6. С целью повышения точности измерений в МВПМ измеряется не фототок, а заряд фотогенерированных носителей, который создается импульсом возбуждающего монохроматического света. Заряд, протекающий во внешней цепи, измеряется с помощью прецизионного дифференцирующего усилителя. Напряжение внешнего поля, при котором суммарный протекающий заряд равен нулю, определяется автоматически с помощью цифрового потенциометра.

7. Разработан и изготовлен экспериментально-измерительный комплекс, реализующий МВПМ. Экспериментальная установка представляет собой комплекс специально разработанных блоков и стандартных измерительных приборов, адаптированных для измерения электрических полей в тонких барьерных структурах на основе неупорядоченных полупроводников. Все измерительные устройства интегрированы с ЭВМ, что позволяет автоматизировать процесс измерения и обработки экспериментальных данных, и, тем самым, свести к минимуму влияние "человеческого" фактора.

8. Для расчета распределения электростатического потенциала, характеристической длины экранирования и спектра ПЛС по экспериментальным данным, полученным МВПМ, разработан специальный математический аппарат. На основе решения одномерного уравнения Пуассона получены новые аналитические выражения, устанавливающие взаимосвязь между параметрами распределения плотности локализованных состояний и пространственным распределением напряженности и электростатического потенциала внутреннего электрического поля, а также ширины ОПЗ на контакте металл – неупорядоченный полупроводник.

9. Показано, что экранирование электрического поля, в отличие от кристаллов, определяется не столько свободными носителями заряда, сколько глубокими ионизированными состояниями, локализованными в щели подвижности. Вследствие непрерывного спектра плотности состояний характеристическая длина экранирования зависит от изгиба зон, т.е. является величиной переменной, зависящей от координаты в ОПЗ. Таким образом, распределение напряженности внутреннего электрического поля можно описать экспоненциальной функцией с переменной характеристической длиной экранирования.

10. Предложен усовершенствованный способ определения величины плотности локализованных состояний вблизи уровня Ферми и распределения плотности в щели подвижности с учетом переменной характеристической длины экранирования. В этом случае экспериментально измеренное распределение напряженности внутреннего электрического поля аппроксимируется кусочно-экспоненциальным способом, на соответствующих участках определяется характеристическая длина экранирования, и рассчитывается значение величины плотности локализованных состояний. Энергетическое положение локализованных состояний по отношению к уровню Ферми определяется по значению электростатического потенциала в той точке, где измерена напряженность электрического поля.

11. Проведены комплексные измерения барьерных структур на основе $a\text{-Si:H}$ и $a\text{-SiC:H}$ методами АСМ, ВАХ, ВФХ, МВПМ, РСГУ и оптического поглощения. По результатам исследований получены данные об электрофизических характеристиках материалов, механизмах токопереноса через барьер, величине встроенного потенциала, оптической ширине запрещенной зоны, толщинах исследуемых структур, о распределении напряженности и электростатического потенциала внутреннего электрического поля, а также о величине плотности локализованных состояний в щели подвижности. Достоверность полученных результатов обеспечена использованием независимых экспериментальных методов, а также подтверждается соответствием экспериментально полученных результатов и теоретически рассчитанных значений.

12. Теоретические и экспериментальные результаты, полученные для барьерных структур на основе $a\text{-Si:H}$ и $a\text{-SiC:H}$, рассмотрены применительно к тонкопленочным фотоэлектрическим преобразователям (ФЭП) на основе этих материалов. Показано, что деградация фотоэлектрических характеристик ФЭП под действием света (эффект Стэблера-Вронского) обусловлена не только ухудшением кинетических свойств материала из-за возникновения дополнительных дефектов, но и перераспределением напряженности и электростатического потенциала электрического поля. В результате сужения профиля электростатического потенциала вблизи барьеров уменьшается коэффициент собирания фотогенерированных носителей. Предложен способ оценки коэффициента собирания фотогенерированного заряда, что может быть полезным при проектировании и разработке тонкопленочных ФЭП на основе неупорядоченных полупроводников.

Основные результаты диссертации изложены в 54 научных работах, в том числе:

1. S.P. Vikhrov, N.V. Vishnyakov, V.G. Mishustin et al. Time-of-flight technique for investigation of amorphous chalcogenides and barrier structures on their base // Journal of Optoelectronics and Advanced Materials, 2001. Vol. 3. Iss. 2. P. 407 – 410.
2. Мишустин В.Г. Новый подход к исследованию неупорядоченных полупроводников модифицированным времяпролетным методом // Вестник РГРТА. Вып. 8. Рязань, РГРТА. 2001. С. 95 – 99.
3. Вихров С.П., Вишняков Н.В., Мишустин В.Г. и др. Анализ и уточнение математического аппарата для модифицированного времяпролетного метода // Физика и техника полупроводников, 2002. Т. 36. Вып. 4. С. 433 – 436.
4. Вишняков Н.В., Мишустин В.Г., Уточкин И.Г. Расчет профиля потенциального барьера на границе металл - неупорядоченный полупроводник // Вестник РГРТА. Вып. 10. Рязань, РГРТА. 2002. С. 74 – 78.
5. S.P. Vikhrov, N.V. Vishnyakov, V.G. Mishustin et al. Speciality of Poisson equation solution and calculation of barrier profile on the interface to non-crystalline semiconductor // Journal of Optoelectronics and Advanced Materials, 2003. Vol. 5. No. 5. P. 1249 – 1254.
6. Вишняков Н.В., Мишустин В.Г., Уточкин И.Г. и др. Тонкопленочные полевые транзисторы на неупорядоченных полупроводниках. Проблемы расчета и применения // Вестник РГРТА. Вып. 14. Рязань, РГРТА. 2004. С. 83 – 87.
7. Вишняков Н.В., Мишустин В.Г., Уточкин И.Г. и др. Причины деградации электрических характеристик солнечных элементов на основе неупорядоченных полу-

проводниковых материалов // Вестник РГРТА. Вып. 15. Рязань, РГРТА. 2004. С. 112 – 115.

8. Вихров С.П., Вишняков Н.В., Мишустин В.Г. и др. Способ создания омических контактов в тонкопленочных устройствах на аморфных гидрогенизированных полупроводниках // Патент РФ № 2229755. 2004.

9. Вихров С.П., Вишняков Н.В., Мишустин В.Г. и др. Формирование потенциальных барьеров в нелегированных неупорядоченных полупроводниках // Физика и техника полупроводников, 2005. Т. 39. Вып. 10. С. 1189 – 1194.

10. Вихров С.П., Вишняков Н.В., Мишустин В.Г. Физические процессы в барьерных структурах на основе неупорядоченных полупроводников // Уч. пособие. Рязань, РГРТА. 2005. 72 с.

11. Вихров С.П., Вишняков Н.В., Мишустин В.Г. и др. Токоперенос через барьер на контакте металл - некристаллический полупроводник: особенности расчета прямых и обратных ВАХ // Вестник РГРТУ. Вып. 22. Рязань, РГРТУ. 2007. С. 86 – 88.

12. Вихров С.П., Вишняков Н.В., Мишустин В.Г. и др. Формирование квазиомических контактов в тонкопленочных устройствах на аморфных полупроводниках // Сборник трудов VI Международной конференции "Аморфные и микрокристаллические полупроводники". Санкт-Петербург. 2008. С. 279 – 280.

Мишустин Владислав Геннадьевич

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЛОКАЛИЗОВАННЫХ СОСТОЯНИЙ НА
ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЪЕМНОГО ЗАРЯДА
В БАРЬЕРНЫХ СТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ НЕУПОРЯДОЧЕННЫХ
ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Формат бумаги 60×84 1/16

2 стр. бумага газетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1.5. Тираж 100 экз. Заказ № 214.

Отпечатано в отделе оперативной полиграфии Рязоблкомстата,
390013, г. Рязань, ул. Типанова, д. 4.