На правах рукописи

Семенов Андрей Романович

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ПРОЦЕССЫ ПЕРЕНОСА И ФЛУКТУАЦИИ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ БАРЬЕРНЫХ СТРУКТУРАХ

01.04.10 физика полупроводников

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Рязань – 2020 г.

Работа выполнена на кафедре «Микро- и наноэлектроника» в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина»

Научный руководитель:

Холомина Татьяна Андреевна, заслуженный работник высшей школы РФ, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры «Микро- и наноэлектроника» ФГБОУ ВО «РГРТУ»

Официальные оппоненты:

Андреев Владимир Викторович,
доктор технических наук, профессор кафедры ИУ1-КФ «Проектирование и технология производства электронных приборов», Калужский филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», г. Калуга

Трегулов Вадим Викторович,
кандидат технических наук, доцент кафедры «Общая и теоретическая физика и методика преподавания физики», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Рязанский государственный университет имени С.А. Есенина», г. Рязань

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» (ФГБОУ ВО "НИУ «МЭИ»), г. Москва

Защита состоится «06» октября 2020 г. в 11 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 212.211.03 в ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина» по адресу: 390005, г.Рязань, ул.Гагарина, 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «РГРТУ»: http://www.rsreu.ru

Автореферат разослан «____» _____ 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.211.03, к.ф.-м.н., доцент **Литвинов Владимир Георгиевич**

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Одной из наиболее важных прикладных проблем физики полупроводников является совершенствование характеристик, повышение воспроизводимости и стабильности параметров полупроводниковых барьерных структур, являющихся основой активных элементов микро- и наноэлектроники. Это может быть достигнуто комплексом мер, включающем как углубленное изучении электрофизических процессов в традиционных и малоизученных материалах, так и совершенствование технологии изготовления устройств путём применения научно обоснованных конструктивно-технологических решений и достоверных методов контроля параметров материалов и приборов.

Точечные или линейные дефекты структуры монокристаллического материала, могут создавать глубокие энергетические уровни (ГУ), локализованные в запрещённой зоне полупроводника. В большинстве случаев возникающие глубокие центры (ГЦ), связанные с отклонениями структуры полупроводника от идеальной, прямо или косвенно приводят к деградации параметров и снижению процента выхода годных полупроводниковых приборов.

Спектроскопия низкочастотного шума является одним из наиболее чувствительных методов контроля и информативным источником сведений о физических процессах, протекающих в барьерных структурах с ГУ. Важным преимуществом спектроскопии является возможность проведения неразрушающего контроля качества приборов и прогнозирования их надежности. Изучение физических механизмов генерации шума и роли ГУ в них является важной и актуальной задачей.

Анализ состояния проблемы свидетельствует о том, что, физические процессы, протекающие в полупроводниковых приборах с ГУ, изучены недостаточно. В частности не ясны природа и особенности зависимости спектральной плотности мощности (СПМ) НЧ-шума от обратного электрического смещения, при котором функционирует значительная часть полупроводниковых приборов.

Актуальным представляется изучение влияния параметров технологического процесса на структуру и электрофизические характеристики таких материалов, как оксиды цинка и магния, перспективных для создания оптоэлектронных приборов, газовых сенсоров, солнечных элементов и полупроводниковых датчиков терагерцового диапазона. Литературные данные о свойствах таких материалов, а также гетероструктур на их основе, разрозненны и противоречивы.

Основополагающими работами, оказавшими влияние на проведенные автором теоретические и экспериментальные исследования, являются труды С.М.Зи, П.Т.Орешкина, Г.П.Жигальского, В.Г.Литвинова, Т.А.Холоминой, С.А. Кострюкова, А.М. Гуляева, И.Н. Мирошниковой, В.В. Андреева, В.В. Трегулова, Л.С. Бермана и К. Ван Влиет.

Цель работы – изучение влияния электрического поля на процессы переноса и флуктуации носителей заряда в полупроводниковых барьерных структурах для развития представлений об особенностях физических явлений в полупроводниковых гетероструктурах на основе монокристаллического кремния и микрокристаллических оксидов цинка и магния.

Для достижения цели в работе решаются следующие основные **задачи.**

- Анализ состояния проблемы и тенденций развития физических моделей, описывающих особенности влияния электрического поля на спектры НЧ-шума.
- Анализ и развитие модели понижения потенциального барьера на границе металл-полупроводник в соответствии с эффектом Пула-Френкеля применительно к определению энергии ионизации ГУ на основе приближения экранированного кулоновского потенциала, оценка ее достоверности путем сравнения результатов моделирования с опубликованными в литературе и экспериментальными данными.
- Выявление функциональной зависимости СПМ НЧ-шума от обратного электрического смещения барьерной структуры Шоттки на основе кремния.
- Анализ и обоснование выбора объектов и методик экспериментальных исследований.
- Исследование НЧ-шума, а также процессов переноса заряда, характеристик гетероструктур Au/ZnO/n-Si, In/ZnO/n-Si, Au/MgO/ZnO/n-Si и барьерных структур на кремнии.
- Исследование влияния среды технологического отжига на структуру и процессы переноса, а также флуктуации носителей заряда в гетероструктурах на основе оксидов цинка и магния – перспективных материалов микро- и наноэлектроники.

Объекты и методы исследований. Для изучения влияния электрического поля на процессы переноса и флуктуации заряда в барьерных структурах металл-полупроводник применены тестовые структуры в виде кремниевых диодов Шоттки, изготовленных по промышленной технологии.

Гетероструктуры на основе микрокристаллических пленок оксида цинка и магния выполнены в национальном исследовательском университете «МИЭТ» на оригинальной установке для нанесения тонких пленок ZnO и MgO с низким содержанием примесей методом спрей-пиролиза на высоколегированные кремниевые подложки.

В экспериментах использована автоматизированная установка для исследования материалов и барьерных структур, включающая RLC-метр Agilent E4980A, а также комплекс анализа спектроскопии адмиттанса и НЧ-шумов. Исследования релаксационных процессов и параметров глубоких центров в барьерных структурах проведены методом спектроскопии низкочастотного шума. Концентрация мелкой примеси в образцах контролировалась при помощи ВФХ.

Структура и морфология исследуемых образцов исследована при помощи растрового электронного микроскопа JEOL JSM-6610LV в режиме вторичной электронной визуализации (SEI) с ускоряющим напряжением 30 кВ.

Научная новизна работы

1. Разработана физическая модель понижения потенциального барьера на границе металл-полупроводник в соответствии с эффектом Пула-Френкеля применительно к определению энергии ионизации ГУ на основе приближения

экранированного кулоновского потенциала. На основе результатов моделирования с учетом экспериментальных данных предложено математическое соотношение вида $S \sim B \cdot exp(U^r)$, хорошо отражающее зависимости СПМ НЧ-шума от обратного напряжения, приложенного к барьерной структуре, при $r \simeq 0{,}5$.

2. Впервые проведено комплексное исследование электрофизических характеристик полупроводниковых гетероструктур Au/ZnO/n-Si, In/ZnO/n-Si и Au/MgO/ZnO/n-Si. Установлено влияние среды отжига плёнок оксида цинка, полученных методом спрей-пиролиза, на структуру, энергетические спектры электронных состояний, процессы переноса и флуктуации носителей заряда в образцах под действием электрического поля.

3. Проведён расчёт зонных диаграмм гетероструктур In/ZnO/n-Si и Au/ZnO/n-Si по параметрам, определенным из вольт-амперных характеристик. Для омического контакта высоколегированного кремния *n*-типа с пленкой ZnO на поверхности кремния выявлен положительный заряд с эффективной плотностью 3,6 мкКл/см^2. Установлено, что величины потенциальных барьеров со стороны металла находились в диапазоне 0,66-0,84 эВ, а положение уровня Ферми в оксиде цинка составило 0,61±0,02 эВ относительно дна зоны проводимости.

4. Выявлены механизмы переноса носителей заряда в гетероструктурах In/ZnO/n-Si, Au/ZnO/n-Si и Au/MgO/ZnO/n-Si под действием электрического поля: объемный механизм, обусловленный эффектом Пула-Френкеля (преобладающий); ТОПЗ и надбарьерная эмиссия (эффект Ричардсона-Шоттки).

5. Впервые на основе экспериментальных данных проведено численное моделирование спектра поверхностных состояний на границе раздела ZnO/n-Si с плёнками оксида цинка, полученными методом спрей-пиролиза. Получены значения эффективной плотности поверхностных состояний, лежащие в интервале $(5 \cdot 10^{11} – 5 \cdot 10^{13})$ эВ$^{-1}$ см$^{-2}$.

Основные положения и результаты, выносимые на защиту

1. Полученное аппроксимацией экспериментальных данных значение $r \simeq 0{,}5$ в математическом соотношении, описывающем вид вольт-шумовых характеристик барьерных структур Шоттки на основе кремния $S \sim B \cdot exp(U^r)$, соответствует теоретическому значению показателя экспоненты функции, характеризующей эффект Пула-Френкеля. Развитие физической модели понижения потенциального барьера под действием электрического поля при генерации низкочастотного шума на основе приближения экранированного кулоновского потенциала позволяет повысить точность определения энергии ионизации ГУ до 4.7%.

2. При отжиге пленок оксида цинка в газовой среде замена аргона на кислород повышает качество технологического процесса: значительно от $3{,}5 \cdot 10^{12}$ до $6{,}1 \cdot 10^{11}$ эВ$^{-1}$ см$^{-2}$ уменьшается эффективная плотность поверхностных состояний на границе раздела ZnO/n-Si и примерно на порядок спектральная плотность мощности НЧ-шума, а среднее значение диаметра микрокристаллических волокон заметно (на 30%) увеличивается.

3. Зонные диаграммы гетероструктур In/ZnO/n-Si и Au/ZnO/n-Si, построенные на основе анализа результатов экспериментальных исследований и моделирования процессов переноса носителей заряда под действием электрического поля, характеризуются величинами потенциальных барьеров со стороны металла (0,66 –

0,84) эВ и положением уровня Ферми 0,61±0,02 эВ относительно дна зоны проводимости оксида цинка.

Практическая значимость результатов работы

1. На основе приближения экранированного кулоновского потенциала в модели Пула-Френкеля, примененной для глубоких уровней, уточнено соотношение для расчета их энергии ионизации по точке «перегиба» частотной зависимости СПМ НЧ-шума, что обеспечило существенное (до 4,7 %) повышение точности определения энергии ионизации глубоких уровней в полупроводниках.

2. Для гетероструктур Au/ZnO/n-Si и In/ZnO/n-Si определено влияние газовой среды технологического отжига на морфологию плёнок ZnO, выращенных методом спрей-пиролиза, и электрофизические свойства образцов. Установлено, что замена аргона кислородом приводит к увеличению (на 30%) размеров микрокристаллических волокон на поверхности ZnO, а также приблизительно на порядок снижает СПМ НЧ-шума и эффективную плотность поверхностных состояний на границе ZnO/n-Si.

3. Установлено, что преобладающим механизмом переноса носителей заряда в гетероструктурах In/ZnO/n-Si, Au/ZnO/n-Si и Au/MgO/ZnO/n-Si является эффект Пула-Френкеля. Основную роль в переносе заряда играет слой диэлектрика.

4. Показана возможность применения метода низкочастотной шумовой спектроскопии для прецизионного исследования энергетического спектра электронных состояний в полупроводниковых барьерных структурах.

Материалы работы вошли в учебное пособие “Электронные процессы в твердом теле” и используются при подготовке бакалавров и магистров по направлениям подготовки 11.03.04 и 11.04.04 «Электроника и наноэлектроника».

Достоверность полученных результатов подтверждается непротиворечивостью теоретических и экспериментальных результатов основным положениям физики полупроводников; сопоставлением экспериментальных данных с предложенными автором моделями; совпадением значений исследованных параметров, полученных на одних и тех же образцах, разными методами.

Личный вклад автора

Автор принимал участие в получении, обработке и интерпретации экспериментальных результатов, создании теоретических моделей, написании научных статей в составе авторского коллектива и подготовке их к публикации, представлял доклады по теме диссертации на конференциях. Положения и результаты, выносимые на защиту, сформулированы и получены автором.

Апробация работы

Результаты работы обсуждались на XXVIII Международной научной конференции ММТТ-28; Международной научно-технической и научно-методической конференции СТНО, 2016 – 2019 гг.; Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых учёных и специалистов НИТ, 2016 – 2019 гг., Рязань, РГРТУ им. В.Ф. Уткина; Международной конференции «Аморфные и микрокристаллические полупроводники», Санкт-Петербург, 2018; Международной конференции ICNF, 2017 г., 2019 г.; Международной конференции MECO 2018; Международной конференции Radioelektronika, 2018, а также на ежегодных научно-

технических конференциях Рязанского государственного радиотехнического университета.

Публикации

Основные научные результаты диссертации опубликованы в 24 научных работах, включая 4 публикации в изданиях, рекомендуемых ВАК, 7 публикаций в изданиях, индексируемых в базах данных Scopus и Web of science и 13 публикаций в статьях, а также материалах всероссийских и международных конференций.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырёх глав и заключения. Объём диссертации – 161 страница машинописного текста, включая 10 таблиц, 71 рисунок и список литературы из 116 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность, определены цель и основные задачи работы, раскрыты научная новизна и практическая значимость результатов, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведён анализ литературных данных и современных представлений о влиянии электрического поля на процессы флуктуации носителей заряда в полупроводниковых барьерных структурах. Рассмотрены основные виды флуктуационных процессов в твердом теле, а также особенности механизмов генерации НЧ-шума как основы спектроскопии, обладающей рядом преимуществ по сравнению с другими методами изучения параметров ГУ. Подчеркнута целесообразность применения активационно-дрейфовой модели, предложенной П.Т. Орешкиным, которая объединяет существующие альтернативные подходы к описанию процесса формирования НЧ-шума в полупроводниковых барьерных структурах.

Проведен анализ моделей, используемых для описания локализованных энергетических состояний в полупроводниковых материалах, а также влияния ГЦ на характеристики барьерных структур. Рассмотрены достоинства и недостатки существующих методов определения параметров ГУ. Отмечена перспективность диагностики электронных приборов по параметрам НЧ-шума.

Обоснован выбор гетероструктур на основе пленок ZnO в качестве объекта исследований, проанализированы литературные данные о характеристиках и параметрах объекта. Оксид цинка является широкозонным полупроводником типа $A^{II}B^{VI}$, обладающим рядом уникальных свойств, позволяющих считать его перспективным материалом для оптоэлектроники и солнечной энергетики. Исследованию свойств гетероструктур на основе пленок ZnO и MgO посвящено немало работ, однако электрические и флуктуационные свойства пленок изучены на настоящий момент недостаточно.

На основе проведенного анализа сформулированы цель работы и основные задачи исследований.

Во второй главе приведено описание конструктивно-технологических особенностей изучаемых образцов, а также методов их контроля. Для проведения исследований были выбраны 3 группы тестовых барьерных структур Шоттки,

изготовленных по промышленной технологии, а также группы тонкоплёночных гетероструктур типа Au/ZnO/n-Si, In/ZnO/n-Si и Au/MgO/ZnO/n-Si, (рисунок 1).

При изготовлении гетероструктур на n^+ кремниевых подложках выращивался слой нелегированного ZnO толщиной 700 нм методом спрей-пиролиза при 300°С с последующим нанесением на его поверхность контактов из индия (In) квадратной формы со стороной 0,85 мм (партии 1 – 4) и контактов из золота (Au) круглой формы диаметром 0,85 мм (все партии). В образцах партии 6 поверх слоя оксида цинка наносилась плёнка оксида магния. Затем структуры отжигались при 600°С в аргоне (партии 1, 5 и 6) и кислороде (партии 2 – 4). Омический контакт на обратной стороне подложки создавался термическим испарением алюминия в вакууме.

На основе полученных вольт-амперных характеристик полупроводниковых барьерных структур определялись проводимость, концентрация носителей заряда, высота барьеров на границах раздела образцов и преобладающие механизмы переноса носителей заряда под действием электрического поля.

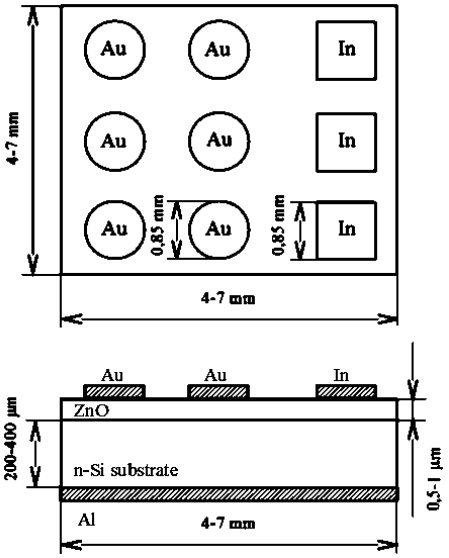


Рисунок 1 – Структура исследуемых образцов

Вольт-фарадные характеристики применялись для определения ёмкости структуры, концентрации легирующей примеси в полупроводнике высоты потенциального барьера, величины встроенного заряда в МДП-структуре и эффективной плотности поверхностных состояний на границе раздела полупроводник-диэлектрик. Методом НЧ-шумовой спектроскопии определялась энергия ионизации ГУ и оценивалось влияние ГЦ на процессы генерации НЧ-шума.

Структура и морфология объектов исследовались с помощью растрового электронного микроскопа JEOL JSM-6610LV в режиме вторичной электронной визуализации (SEI) в вакууме с ускоряющим напряжением 30 кВ.

Совокупность экспериментальных методов позволяла оценивать влияние электрического поля на флуктуационные и электрофизические характеристики изучаемых объектов для подтверждения достоверности теоретических результатов.

В третьей главе представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований механизмов генерации НЧ-шума в кремниевых структурах с глубокими уровнями – барьерах Шоттки.

Проведенный анализ показал, что в большинстве опубликованных работ зависимости СПМ НЧ-шума от величины приложенного обратного напряжения (вольт-шумовые характеристики – ВШХ) в разных барьерных структурах подобны и представляют собой кривые с начальным ростом, переходящие в участок насыщения. Это может свидетельствовать об общности механизмов генерации НЧ-шума в структурах.

В настоящей работе построены ВШХ различных полупроводниковых приборов и барьерных структур на основе экспериментальных данных, опубликованных разными авторами, и установлено, что наиболее адекватно характеристики аппроксимируются экспоненциальной функцией. Это подтвердила обработка экспериментальных ВШХ тестовых барьерных структур при напряжениях обратного смещения (1,4 – 20) В и нескольких значениях частоты (рисунок 2). Наилучшим образом полученные ВШХ описываются соотношением $S = B\exp(U^r)$, где S – спектральная плотность шума; U – модуль напряжения; B и r – коэффициенты, первый из которых характеризует средний уровень плотности мощности шума на аппроксимирующей кривой. Установлено, что значения коэффициента r находятся в интервале 0,48-0,53 ($r \simeq 0{,}5$) на всех частотах измерения ВШХ, что указывает на соответствие полученного результата эффекту Пула-Френкеля, согласно которому зависимость концентрации носителей заряда n в сильном поле от напряженности электрического поля E определяется соотношением

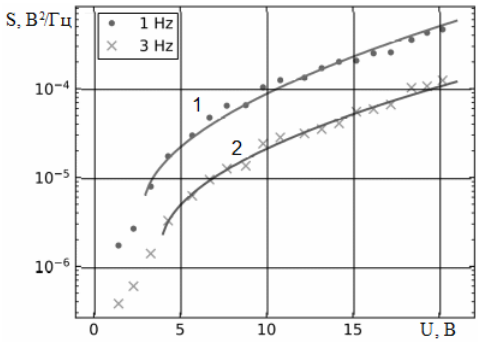


Рисунок 2 – Вольт-шумовые характеристики образца с барьером Шоттки и их аппроксимации при частотах 1 и 3 Гц

$$n = n_0 \cdot \exp\left(\frac{q\sqrt{qE}}{\sqrt{4\pi\varepsilon\varepsilon_0}kT}\right) = n_0 \cdot \exp\left(\alpha\sqrt{E}\right), \qquad (1)$$

где $\alpha = \frac{q\sqrt{q}}{\sqrt{4\pi\varepsilon\varepsilon_0}kT}$, q – элементарный заряд, ε и ε_0 –относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика и диэлектрическая постоянная.

Низкочастотные шумы являются флуктуациями тока или напряжения и обусловлены флуктуациями проводимости, которая зависит от концентрации носителей заряда и их подвижности. Величина концентрации является определяющей, поскольку ОПЗ полупроводниковой барьерной структуры при обратном смещении находится в сильном электрическом поле (расчетное значение

напряженности не ниже 10^4 В/м), и флуктуации подвижности маловероятны. Следовательно, ответственными за шумовые эффекты являются флуктуации концентрации носителей заряда, связь которой с величиной электрического поля определяется соотношением (1).

Модель генерации НЧ-шума в полупроводнике с ГУ, на основе эффекта Пула-Френкеля с учётом влияния дальнодействующего кулоновского потенциала для описания потенциальной энергии взаимодействия носителя заряда с ГУ, разработана ранее (С.А. Кострюков). В ней определена энергия ионизации глубокого уровня ΔW_t:

$$\Delta W_t = k_B T \ln\left(\frac{1}{4\pi f_b \cdot \tau_m}\right) + \sqrt{\frac{q}{\pi\varepsilon\varepsilon_0}\sqrt{\frac{qn_0}{2\varepsilon\varepsilon_0}(U_k - U)}}, \quad (2)$$

где f_b – частота перегиба на графике СПМ, U_k – контактная разность потенциалов, U – приложенное напряжение смещения.

Проведенный в настоящей диссертационной работе анализ модели, ее уточнение и сравнение с полученными экспериментальными данными показали, что использование приближения экранированного кулоновского потенциала, а не дальнодействующего, позволяет учитывать не только ионизированные, но и нейтральные ГЦ, что повышает точность определения энергии ионизации ГУ. В этом случае потенциальная энергия электрона определяется соотношениями:

$$W(x) = -\frac{q^2}{\varepsilon\varepsilon_0 x} \cdot \exp\left(-\frac{x}{L_D}\right), \quad (3)$$

$$L_D = \sqrt{\frac{\varepsilon\varepsilon_0 kT}{q^2 n_0}}, \quad (4)$$

где L_D – длина экранирования.

Энергия ионизации ГУ находится решением системы двух уравнений:

$$\begin{cases} \dfrac{q}{\varepsilon\varepsilon_0} \cdot \dfrac{L_D + x_0}{x_0^2 L_D} \exp\left(-\dfrac{x_0}{L_D}\right) - \sqrt{\dfrac{qn_0(U_k - U)}{2\varepsilon\varepsilon_0}} = 0 & , (5) \\ \Delta W_t = k_B T \ln\left(\dfrac{1}{4\pi f_b \cdot \tau_m}\right) + \left| -\dfrac{q^2}{\varepsilon\varepsilon_0 x_0} \exp\left(-\dfrac{x_0}{L_D}\right) - q x_0 \sqrt{\dfrac{qn_0(U_k - U)}{2\varepsilon\varepsilon_0}} \right| & , (6) \end{cases}$$

Величина x_0 определяется из уравнения (5), а затем находится значение энергии ионизации ГЦ с учётом поправки на влияние эффекта Пула-Френкеля. Характерные значения поправки – (0,01 – 0,1) эВ.

На основе проведённых теоретических и экспериментальных исследований сделан вывод, что применимость того или иного подхода определяется соотношением концентраций электрически активных и нейтральных ГЦ. Концентрация активных ГЦ может существенно увеличиваться с ростом напряжения обратного смещения. В этом случае влияние ГЦ усиливается, и точность расчета по формуле (6) оказывается более высокой (до 4.7 %), чем по формуле (2).

При определении энергии ионизации глубоких уровней методом спектроскопии НЧ-шума в качестве функции отклика используют частотный спектр либо температурную зависимость СПМ НЧ-шума: максимумы

температурных зависимостей СПМ, измеренных при фиксированной частоте f_b, или характерные частоты перегиба (изменения наклона спектров НЧ-шума при фиксированной температуре Т). В обоих случаях выполняется условие, $2\pi f_b\tau_0=1$, τ_0 – время релаксации процесса

Преимуществом изложенного выше метода является возможность рассчитывать энергию ионизации ГУ при конкретном значении частоты перегиба спектра НЧ-шума, измеренного при заданной температуре. Расчет ведется по соотношению $\tau = \tau_0 \exp(\Delta W_t / kT)\cdot$

На рисунке 3 приведены спектры НЧ-шума структуры с барьером Шоттки на основе кремния при напряжении смещения -7,9 В и значениях температуры от 90 до 290 К. На основе экспериментальных данных построены графики Аррениуса и определены значения энергии активации ГУ ΔW_t .

Анализ спектров показал наличие точек перегиба на частотах в диапазоне единиц Гц на трёх температурных участках: 100-140 К, 160-190 К и 270-290 К. Это свидетельствует о наличии 3-х ГУ. Рассчитанные значения энергии ионизации уровней равны 101; 107 и 279 мэВ при величинах $\tau_{0,}$ составляющих $1{,}86\cdot10^{-6}$; $2{,}63\cdot10^{-5}$ и $1{,}76\cdot10^{-7}$ с соответственно.

По экспериментальным данным рассчитана зависимость величины понижения энергии глубокого уровня от напряжённости электрического поля (рисунок 4). Среднее значение напряженности электрического поля в ОПЗ *E(U)* определялось как

$$E(U) = 0{,}5\sqrt{\frac{2qn_0(U_k - U - k_BT/q)}{\varepsilon\varepsilon_0}} \qquad (7)$$

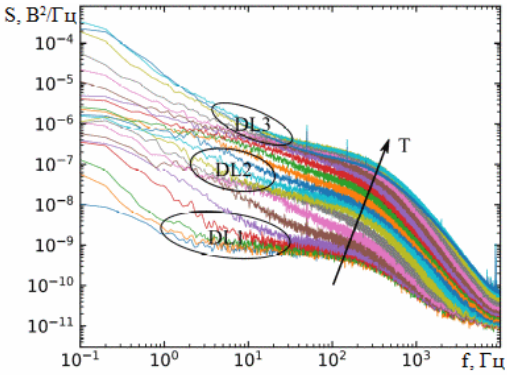


Рисунок 3 — Спектры НЧ- шума барьерной структуры на основе кремния при температурах 90 – 290 К

Из рисунка следует, что с ростом напряженности степень уменьшения энергии ионизации ГУ повышается, причем более резко – в сильном электрическом поле.

Приведенные результаты, полученные впервые, подтверждают возможность применения эффекта Пула-Френкеля - понижения потенциального барьера «мелких» доноров под действием сильного электрического поля при низкой температуре для аналогичной ситуации в сильном электрическом поле обратно смещенной барьерной структуры с ГУ при высокой температуре.

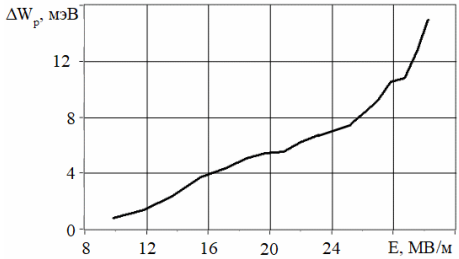


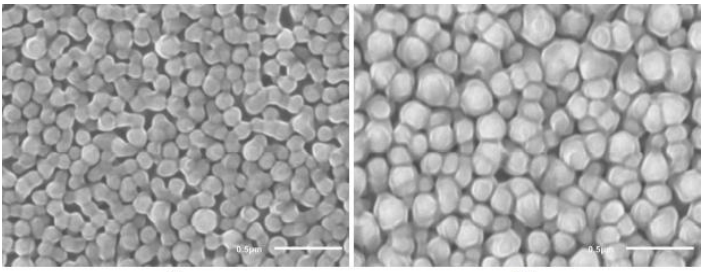
Рисунок 4 — Зависимость понижения энергии ионизации ГУ от напряжённости электрического поля в ОПЗ барьера Шоттки

Спектры НЧ-шума полупроводниковых барьерных структур, измеренные в широком диапазоне температур, позволяют рассчитать значения энергии ионизации глубоких ловушечных уровней ΔW_t на основе зависимости Аррениуса:

$$\ln \tau = \ln \tau_0 + \Delta W_t / kT \cdot \qquad (8)$$

В четвертой главе представлены результаты комплексного исследования электрофизических свойств полупроводниковых гетероструктур Au/ZnO/n-Si, In/ZnO/n-Si и Au/MgO/ZnO/n-Si. Последняя из них изучалась с целью определения влияния тонких плёнок MgO на электрофизические характеристики тонкоплёночных гетероструктур на основе ZnO.

Морфологию плёнок ZnO, отожженных в аргоне и кислороде, характеризует рисунок 5, на котором приведены изображения поверхности, полученные с помощью растрового электронного микроскопа. Из рисунка следует, что структура плёнок ZnO, представляет собой массив микрокристаллов гексагональной формы. Гистограммы распределения микрокристаллов по диаметру показали, что диаметры частиц плёнок ZnO, отожженных в аргоне, меньше, чем при отжиге в кислороде (средние значения 0,125 мкм и 0,175 мкм соответственно).



а) б)

Рисунок 5 – РЭМ изображение поверхности пленок ZnO при отжиге в аргоне (а) и кислороде (б)

Анализ ВАХ исследованных образцов позволил выявить основные механизмы переноса заряда под действием электрического поля. Измерения показали, что контакты на основе индия являлись омическими, в то время как на золотых контактах были получены выпрямляющие ВАХ. К наиболее вероятным механизмам переноса заряда в структурах относятся токи, ограниченные пространственным зарядом (ТОПЗ), надбарьерная эмиссия (эффект Ричардсона-Шоттки) и объемный механизм, обусловленный эффектом Пула-Френкеля.

Преобладание механизма переноса ТОПЗ в случае омических контактов подтверждено сопоставлением коэффициентов наклона экспериментальных зависимостей тока от напряжения в логарифмическом масштабе [ln$I$(ln$U$)] с теоретическими данными. Для оценки влияния механизма переноса, связанного с надбарьерной эмиссией и объемного механизма ВАХ гетероструктур Au/ZnO/n-Si и Au/MgO/ZnO/n-Si строились в виде зависимостей $\ln J(\sqrt{E}/kT)$. Экспериментальные и теоретические коэффициенты наклона линейных участков характеристик (рисунок 6) наиболее близки друг к другу в предположения действия эффекта Пула-Френкеля. Следовательно, в образцах с выпрямляющими контактами объёмный механизм переноса зарядов, является преобладающим.

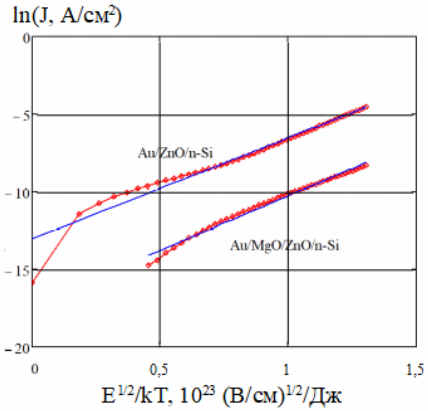


Рисунок 6 – ВАХ гетероструктур Au/ZnO/n-Si и Au/MgO/ZnO/n-Si на выпрямляющих контактах в координатах lnJ-$E^{1/2}$/kT

Экспериментальные вольтфарадные характеристики исследуемых гетероструктур, в основном, аналогичны характеристикам МДП-структур. Небольшие отличия наблюдаются в области обогащения границы раздела ZnO/n-Si носителями заряда. Поэтому к анализу ВФХ характеристик гетероструктур с пленками ZnO в настоящей работе впервые применены теоретические методы, используемые для МДП-систем, несмотря на то, что оксид цинка является широкозонным полупроводником.

Для расчета спектра поверхностных состояний на границе раздела ZnO/n-Si измерены ВФХ образцов при комнатной температуре с частотой и амплитудой тестового сигнала 1 кГц и 30 мВ. Распределение эффективной плотности состояний вычислено для ряда значений поверхностного потенциала на границе раздела ZnO/n-Si. В основу расчета положена разность теоретической и экспериментальной величин дифференциальной ёмкости структуры.

Установлено, что при отжиге плёнок оксида цинка в аргоне плотность поверхностных состояний гетероструктур Au/ZnO/n-Si на границе ZnO/n-Si на порядок больше (в среднем), чем при отжиге в кислороде (в единицах $эВ^{-1}$ $см^{-2}$ – $3{,}5\cdot10^{12}$ и $\sim6\cdot10^{11}$ соответственно).

На основании результатов экспериментальных исследований процессов переноса носителей заряда под действием электрического поля и теоретических положений модели Андерсона построены зонные диаграммы гетероструктур Au/ZnO/n-Si и In/ZnO/n-Si. Первая из них приведена на рисунке 7. Ширина запрещенной зоны оксида цинка принята равной средней величине реальной размытой энергетической зоны 3,37 эВ (в первом приближении, поскольку тонкие пленки оксида цинка являются поликристаллическими)

Величины потенциальных барьеров со стороны металла находились в интервале (0,66 – 0,84) эВ (для разных образцов), а положение уровня Ферми относительно дна зоны проводимости в оксиде цинка составило 0,61 эВ.

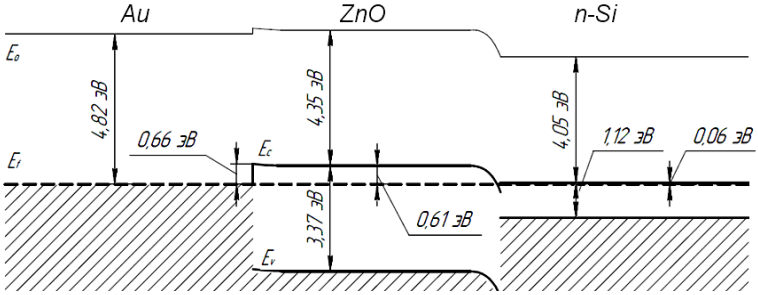


Рисунок 7 – Зонная диаграммы гетероструктуры Au/ZnO/n-Si, полученная в ходе проведения исследований

Энергия электронного сродства ZnO равна 4,35 эВ. Положение уровня Ферми относительно дна зоны проводимости в ZnO и работа выхода из ZnO рассчитаны по результатам измерений ВАХ на контактах In-подложка с использованием литературных данных. Расчеты показали, что в случае омического контакта высоколегированного кремния *n*-типа с оксидом цинка на поверхности скапливается положительный заряд с плотностью 3,6·мкКл/см^2. Расчетные значения глубины области пространственного заряда в ZnO для образцов партий 1 – 4 равны соответственно (в мкм) 170, 77,6·, 120 и 100, что значительно (примерно на два порядка) превышает толщину пленок.

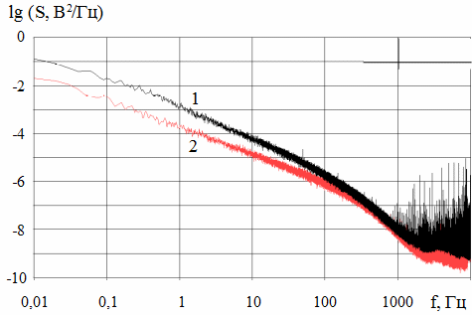


Рисунок 8 – Спектры НЧ-шума гетероструктур с пленками ZnO, отожженными в аргоне (1) и в кислороде (2)

Экспериментальные спектры НЧ-шума образцов гетероструктур содержат одну характерную точку перегиба и имеют близкие значения коэффициентов угла наклона для всех исследованных образцов в интервале 1,05 – 1,25 (рисунок 8). Как видно на рисунке, спектральная плотность мощности шума образцов, отожженных в кислороде, меньше, чем в арго-

не почти на порядок, что может быть связано с заполнением кислородных вакансий в пленках ZnO в процессе отжига.

Проведенные эксперименты показали, что добавление оксида магния в структуру слоя изменяет знак встроенного заряда в диэлектрике. При этом угол наклона шумового спектра уменьшается с 1,3 до 1,1, а средний уровень шума при положительном смещении возрастает, что говорит об увеличении в структуре концентрации глубоких уровней.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В соответствии с целью и задачами диссертационного исследования в работе получены следующие основные результаты:

1. Развита физическая модель процесса понижения потенциального барьера на границе металл-полупроводник в соответствии с эффектом Пула-Френкеля, новым и основным элементом которой является использование приближения экранированного кулоновского потенциала. На основе результатов моделирования и их сопоставления с литературными данными предложено отображать зависимость СПМ НЧ-шума S от обратного барьерного напряжения U соотношением вида $S \sim \exp(\sqrt{U})$. Подтверждены достоверность модели и возможность определения параметров ГУ по шумовым спектрам.

2. С помощью комплекса современных экспериментальных методов изучены свойства ряда кремниевых барьерных структур и исследовано влияние электрического поля на флуктуационные и электрофизические характеристики объектов. Получены спектры НЧ-шума структур при температурах от -183^0 С до 17^0 С, по которым определена энергия активации ГУ. По графикам Аррениуса обнаружены три ловушечных уровня с энергиями ионизации относительно дна зоны проводимости 0,101 эВ; 0,107 эВ и 0,279 эВ. Установлено, что с ростом напряженности поля в интервале (10 – 30) МВ/м величина понижения энергии активации ГУ увеличивается от 1 мэВ до 15 мэВ.

3. Выполнено комплексное исследование электрофизических свойств перспективных полупроводниковых гетероструктур Au/ZnO/n-Si, In/ZnO/n-Si и Au/MgO/ZnO/n-Si. Изучена морфология плёнок ZnO, отожженных в аргоне и кислороде. Обработкой РЭМ изображений показано, что диаметры микрокристаллов плёнок ZnO, отожженных в аргоне, меньше, чем при отжиге в кислороде (средние значения – 0,125 мкм и 0,175 мкм соответственно). По экспериментальным ВАХ гетероструктур сделан вывод о преобладании объёмного механизма переноса заряда в образцах с выпрямляющими контактами.

4. Установлено, что экспериментальные вольт-фарадные характеристики (ВФХ) исследуемых объектов, в основном, аналогичны характеристикам МДП-структур. На основании этого сделан вывод о том, что тонкие пленки ZnO и MgO в гетеростуктурах Au/ZnO/n-Si, In/ZnO/n-Si и Au/MgO/ZnO/n-Si можно рассматривать как аналогию диэлектрика МДП-структур. На основе ВФХ рассчитаны спектры плотности поверхностных состояний на границе раздела ZnO/n-Si, из которых следует, что при отжиге плёнок оксида цинка в аргоне эффективная плотность состояний гетероструктур Au/ZnO/n-Si приблизительно на порядок больше, чем при отжиге в кислороде ($3{,}5 \cdot 10^{12}$ и $6 \cdot 10^{11}$ эВ$^{-1}$ см$^{-2}$ соответственно).

5. На основании теоретических и экспериментальных результатов исследования переноса носителей заряда под действием электрического поля получены зонные диаграммы гетероструктур In/ZnO/n-Si и Au/ZnO/n-Si. Величины энергетических зазоров для барьера Шоттки находились в диапазоне (0,66 – 0,84) эВ для разных образцов, а положение уровня Ферми относительно дна зоны проводимости в оксиде цинка составило 0,61±0,02 эВ. Расчетная глубина ОПЗ в ZnO – от 77,6 мкм до 170 мкм, что на два порядка превышает толщину пленок. На поверхности контакта с кремнием скапливается положительный заряд плотностью 3,6·мкКл/см^2.

6. Для изучаемых образцов гетероструктур получены экспериментальные спектры НЧ-шума, которые содержат одну характерную точку перегиба и имеют значения коэффициентов угла наклона в интервале 1,05 – 1,25. Спектральная плотность мощности шумов для образцов, отожженных в кислороде, меньше, чем в аргоне, почти на порядок, что может быть связано с заполнением кислородных вакансий в пленках ZnO в процессе отжига

Автор выражает глубокую благодарность В.Г. Литвинову А.В. Ермачихину, Н.Б. Рыбину и А.Е. Серебрякову (РГРТУ) за помощь в проведении экспериментальных исследований, а также Д.Г. Громову и С.П. Олейнику (НИУ МИЭТ) за предоставленные для исследования образцы.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из перечня ВАК РФ:

1. Холомина Т.А. Особенности процессов релаксации заряда в полупроводниках и барьерных структурах / Т.А. Холомина, А.Р. Семенов // Вестник РГРТУ. – 2014. – № 4 (50), ч. 2. – С.114-118.

2. Литвинов В.Г. Разработка автоматизированного комплекса для исследования спектров низкочастотного шума в элементах и структурах электронной техники / В.Г. Литвинов, Т.А. Холомина, А.В. Ермачихин, С.А. Кострюков, Д.С. Логинов, А.Р. Семенов // Радиотехника. – 2017. – № 5. – С. 179-185.

3. Литвинов В.Г. Исследование спектра поверхностных состояний на границе раздела гетероструктуры ZnO/Si / В.Г. Литвинов, А.Р. Семенов, Т.А. Холомина, А.В. Ермачихин, Н.Б. Рыбин, Д.Г. Громов // ВестникРГРТУ. – 2018. – № 4 (66), ч. 2. – С. 9-14.

4. Семенов А. Р. Исследование механизмов переноса заряда в гетероструктурах Me/ZnO/Si / А.Р. Семенов, М.В. Голованова, В.Г. Литвинов, Д.Г. Громов, С.П. Олейник, Т.А. Холомина, А.В. Ермачихин // ВестникРГРТУ. – 2019. – № 4 (70). – С. 179-189.

Публикации в изданиях из перечня Web of Science и Scopus

5. Kholomina T.A. Investigation and simulation of voltage-noise characteristics of semiconductor barrier structures / T.A. Kholomina, V.G. Litvinov, A.R. Semenov, A.V. Ermachikhin, A.D. Maslov // 2017 IEEE 24th International Conference on Noise and Fluctuations. – 2017. – P. 1–4.

6. Litvinov V.G. Measurement complex to investigate electrophysical and noise characteristics of semiconductor micro- and nanostructures / V.G. Litvinov, A.V.

Ermachikhin, D.S. Kusakin, N.V. Vishnyakov, A.D. Maslov, A.R. Semenov // 2017 IEEE 24th International Conference on Noise and Fluctuations. – 2017. – P. 1–4.

7. Kholomina T.A. Excess noise and deep level defects diagnostics in semiconductor barrier structures / T.A. Kholomina, V.G. Litvinov, A.V. Ermachikhin, A.R. Semenov // 2018 IEEE 28th International Conference Radioelektronika. – 2018. – P. 1–5.

8. Ermachikhin A.V. Investigation of Au/ZnO/Si MIS structures by capacitance-voltage characteristics method / A.V. Ermachikhin, T.A. Kholomina, V.G. Litvinov, A.R. Semenov, N.B. Rybin, D.G. Gromov, S.P. Oleinik // 2018 IEEE 28th International Conference Radioelektronika. – 2018. – P. 1–4.

9. Semenov A.R. Investigating and modeling high frequency C-V characteristics of zinc oxide-based heterostructures / A.R. Semenov, V.G. Litvinov, T.A. Kholomina, A.V. Ermachikhin, N.V. Rybina, D.G. Gromov, S.P. Oleinik // 2018 IEEE 7th Mediterranian Conference on Embedded Computing. – 2018. – P. 586–589.

10. Loginov D.S. Study of low frequency noise parameters of metal contacts / D.S. Loginov, O.N. Krutchenko, V.G. Litvinov, T.A. Kholomina, A.V. Ermachikhin, N.B. Rybin, A.R. Semenov // 2019 IEEE 25th International Conference on Noise and Fluctuations. – 2019. – P. 208–211.

11. Litvinov V.G. Low noise characteristics of Schottky diode with deep energy level / V.G. Litvinov, T.A. Kholomina, A.R. Semenov, A.V. Ermachikhin // 2019 IEEE 25th International Conference on Noise and Fluctuations. – 2019. – P. 330–333.

Статьи и материалы конференций

12. Семенов А.Р. Исследование электрических характеристик точечного барьерного контакта металл- полупроводник с помощью атомно-силовой микроскопии / А.Р. Семенов, Д.С. Кусакин, В.Г.Литвинов // Диагностика наноматериалов и наноструктур: Труды VIII Всероссийской школе-семинаре студентов, аспирантов и молодых ученых. Т. 3. – 2015 – С. 203-206.

13. Семенов А.Р. Особенности вольт-шумовых характеристик полупроводниковых барьерных структур // Математические методы в технике и технологиях: Сборник трудов XXVIII Международной научной конференции ММТТ-28. Т. 9 – 2015. – С. 74-78.

14. Семенов А.Р. Прогнозирование надежности полупроводниковых приборов по параметрам вольт-шумовых характеристик / А.Р. Семенов, Т.А. Холомина // Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2016: сб. тр. междунар. науч.-техн. и науч.-метод. конф. Рязань: РГРТУ, 2016. – Т. 2. – С. 212 – 218.

15. Семенов А.Р. Применение современных информационных технологий в виртуальном эксперименте по изучению материалов электронной техники / А.Р. Семенов, А.Ю. Холомин // Новые информационные технологии в научных исследованиях: труды XXI Всероссийской научно-технической конференции НИТ-2016. – Рязань. – 2016. – С. 353-354.

16. Семенов А.Р. Изучение полупроводниковых барьерных структур методом вольт-шумовых характеристик / А.Р. Семенов, Т.А. Холомина, А.Ю. Холомин, Д.С. Логинов // Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2017: сб. тр. междунар. науч.-техн. и науч.-метод. конф. Рязань: РГРТУ, 2017. – Т. 4 – С. 156-161.

17. Семенов А.Р. Разработка блока установки спектроскопии НЧ шума для исследования низкоомных объектов / А.Р. Семенов, Д.С. Логинов, А.В. Ермачихин, А.Ю. Холомин // Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2017: сб. тр. междунар. науч.-техн. и науч.-метод. конф. Рязань: РГРТУ, 2017. – Т. 4 – С. 166-171.

18. Громов Д.Г. Исследование полупроводниковых барьерных структур на основе оксида цинка / Д.Г. Громов, А.Р. Семенов, В.Г. Литвинов, А.В. Ермачихин, Т.А. Холомина, Н.Б. Рыбин // Диагностика наноматериалов и наноструктур: Труды IX Всероссийской школы-семинара студентов, аспирантов и молодых ученых. Т. 2. – 2017 – С. 102-111.

19. Семенов А.Р. Моделирование вольт-фарадных характеристик гетероструктур на основе оксида цинка / А.Р. Семенов, Д.Г. Громов, В.Г. Литвинов, Т.А. Холомина, С.П. Олейник, А.В. Ермачихин. // Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2018: сб. тр. междунар. науч.-техн. и науч.-метод. конф. Рязань: РГРТУ, 2018. – Т. 2 – С. 167-173.

20. Семенов А.Р. Моделирование электрофизических характеристик гетероструктур на основе оксида цинка / А.Р. Семенов, Т.А. Холомина, В.Г. Литвинов, М.В. Голованова, А.В. Ермачихин // Аморфные и микрокристаллические полупроводники – сб. тр. междунар. конфер. – Спб., 2018. – С 247-248.

21. Семенов А.Р. Моделирование электрофизических свойств гетероструктур типа ZnO/n-Si / А.Р. Семенов, Т.А. Холомина // Новые информационные технологии в научных исследованиях: труды XXIII Всероссийской научно-технической конференции НИТ-2018. – Рязань. – 2018. – С. 85-87.

22. Логинов Д.С. Исследование параметров НЧ шума металлических контактов / Д.С. Логинов, О.Н. Крютченко, В.Г. Литвинов, Т.А. Холомина, А.В. Ермачихин, Н.Б. Рыбин, А.Р. Семенов // Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2019: сб.тр. междунар. науч.-техн. и науч.-метод. конф. Рязань: РГРТУ, 2019. – Т. 2– С. 84-88.

23. Семенов А.Р. Низкочастотные шумовые характеристики диода Шоттки с глубокими энергетическими уровнями // Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2019: сб.тр. междунар. науч.-техн. и науч.-метод. конф. Рязань: РГРТУ, 2019. – Т. 2– С. 91-96.

24. Семенов А.Р. Применение современных информационных технологий в виртуальном эксперименте по изучению материалов электронной техники // Новые информационные технологии в научных исследованиях: труды XXIV Всероссийской научно-технической конференции НИТ-2019. – Рязань. – 2019. – С. 353-354.

Семенов Андрей Романович

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ПРОЦЕССЫ ПЕРЕНОСА И ФЛУКТУАЦИИ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ БАРЬЕРНЫХ СТРУКТУРАХ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Подписано в печать . Формат бумаги 60x84 1/16.
Бумага ксероксная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 1,0.
Тираж 100 экз.

Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина
390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.