

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию **Лузянина Сергея Евгеньевича «Электрические свойства ограниченных полупроводников с естественными и искусственными неоднородностями»**, представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности
1.3.11. Физика полупроводников

Диссертационная работа Лузянина С.Е. посвящена установлению основных закономерностей влияния естественных и искусственных неоднородностей на электрические параметры ограниченных полупроводников. Актуальность диссертационной работы обосновывается тем, что процессы легирования полупроводников методами диффузии, ионной имплантации являются базовыми в технологии микро- и наноэлектроники и позволяют получать новые уникальные полупроводниковые компоненты такие как быстродействующие транзисторы, оптоэлектронные преобразователи, фотопроводники и др. Полупроводниковые материалы, получаемые методами эпитаксии с резко неоднородной структурой, находят широкое применение в транзисторных структурах, лазерах, фотодетекторах и других электронных приборах. Явления, протекающие в таких компонентах детально можно объяснить только с учетом неоднородности электрофизических свойств материалов. Контроль качества такого рода материалов требует развития физических моделей, детально описывающих распределения постоянного электрического тока и потенциала при соответствующих граничных условиях в неоднородных полупроводниковых образцах. В связи с вышесказанным тема диссертации, несомненно, **актуальна**.

Общая характеристика работы.

Диссертация состоит из введения, литературного обзора, экспериментальной части, состоящей из четырех глав, основных результатов и выводов. Общий объем диссертации – 154 страницы, включая 74 рисунка, 18 таблиц и библиографию, содержащую 117 наименований.

Во **введении** автор обосновывает актуальность работы, ее научную новизну, теоретическую и практическую значимость, формулирует цели и задачи, основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** представлен литературный анализ, в котором освещены вопросы формирования неоднородных полупроводниковых структур, рассмотрены современные зондовые методы измерения электрических параметров полупроводников, основные методы экспериментальной проверки свойств контактов металл-полупроводник.

Во **второй главе** автор рассматривает задачи распределения потенциала стационарного электрического тока для случая однородной полупроводниковой пластины прямоугольной и круглой формы в общем случае в однородном магнитном поле. Для этого были решены методом Фурье соответствующие краевые задачи с граничными условиями. На основе решения данных задач предложены методики измерения электропроводимости образца, коэффициента

Холла, теоретического расчета сопротивления исследуемого образца, проведено моделирование распределение электрического поля и токов в образцах стандартной геометрической формы.

В **третьей главе** автор описывает методики исследования переходных сопротивлений контактов металл-полупроводник. Автором были решены соответствующие краевые задачи, на основе которых предложены методики определения переходного сопротивления контактов. В работе были получены никелевые контакты на поверхности арсенида галлия с различным типом проводимости, проведены измерения поверхности контакта с АСМ СММ-2000, а также измерены ВАХ, на основе которых автор выявил омические свойства контактов Ni-p-GaAs и существование нелинейной области ВАХ контактов Ni-n-GaAs.

В **четвертой главе** автором предложена методика выявления локальных неоднородностей по величине удельной электропроводности и коэффициента Холла для полупроводниковых прямоугольных пластин и круглого диска. В данной главе были решены задачи распределения потенциала для неоднородных полупроводниковых образцов, полученных с применением различных методов легирования (диффузии, эпитаксии, ионной имплантации). Решение данных задач позволило автору предложить методики определения поверхностной электропроводности и других электрических параметров полупроводникового материала. На основе полученных выражений было проведено компьютерное моделирование и анализ распределений потенциалов и токовых линий для двуслойных структур.

Наиболее важными результатами работы, имеющими несомненную **научную ценность**, являются следующие:

1. Построена модель распределения потенциала стационарного электрического тока для случая однородной полупроводниковой пластины прямоугольной и круглой формы в однородном магнитном поле. На основе теоретической модели предложены методики измерения электропроводности образца, коэффициента Холла, теоретического расчета электрического сопротивления исследуемого образца. Автором проведена экспериментальная проверка на полупроводниковых образцах кремния и арсенида галлия, для которых были определены основные электрические параметры образцов и показана хорошее согласие экспериментальных и теоретических данных для исследуемых образцов.

2. Рассмотрены методики исследования переходных электрических сопротивлений контактов металл-полупроводник. Автором были решены соответствующие краевые задачи, на основе которых предложены методики определения переходного сопротивления контактов, учитывающие размеры токовых контактов. Для проверки теоретических моделей автором были получены никелевые контакты на поверхности арсенида галлия с различным типом проводимости, измерены ВАХ, на основе которых выявлены омические свойства контактов Ni-p-GaAs и существование нелинейной области ВАХ контактов Ni-n-GaAs.

3. Автором предложена методика выявления локальных неоднородностей по величине удельной электропроводности и коэффициента Холла для полупроводниковых прямоугольных пластин и круглого диска. Для данной методики автор выполнил экспериментальную проверку контроля однородности и показано достаточно хорошее согласие теоретических и экспериментальных результатов.

4. Решены задачи распределения потенциала для неоднородных полупроводниковых образцов, полученных с применением различных методов легирования (диффузии, эпитаксии, ионной имплантации). Данные задачи были решены методом разложения в ряд Фурье, а также получены в достаточно строгом виде аналитические выражения, которые удобны в использовании. Решение данных задач позволило автору предложить методики определения поверхностной электропроводимости и других электрических параметров полупроводникового материала. На основе полученных выражений было проведено компьютерное моделирование и анализ распределений потенциалов и токовых линий для двуслойных структур. Для диффузионных структур и двуслойных полупроводниковых структур также была проведена экспериментальная проверка. Полученные экспериментальные значения достаточно хорошо согласуются с паспортными данными образцов.

В работе также предложены оригинальные методики измерений электрических параметров полупроводниковых материалов.

Научная новизна

В диссертационной работе соискателем был выполнен ряд логически связанных исследований:

- получены теоретические выражения, позволяющие вычислить потенциал электрического поля в области прямоугольного неоднородного полупроводникового кристалла, а также приведено решение оригинальной краевой задачи электродинамики с неоднородными граничными условиями для плотности тока в двуслойных структурах $n-n^+$ и $p-p^+$ с резким изменением проводимости;

- разработана макроскопическая теория, объясняющая явление концентрирования плотности тока в приконтактных областях полупроводников прямоугольной формы с неоднородными электрическими параметрами по глубине;

- на основе приведенных выражений для потенциала электрического поля в диффузионно-неоднородных в полупроводниках разработаны и экспериментально проверены новые оригинальные методики измерений поверхностной удельной электропроводимости на базе зондовых методов;

- предложена оригинальная методика определения сопротивлений растекания и переходного сопротивления в контакте металл-неоднородный полупроводник.

Практическая значимость работы заключается в том, что полученные в работе выражения для распределений электрических полей в ограниченных неоднородных и однородных полупроводниковых образцах могут быть

использованы при экспериментальных измерениях удельной электрической проводимости и коэффициента Холла.

Достоверность результатов, обоснованность научных положений и выводов в диссертационной работе обеспечиваются следующими положениями:

- теоретические расчеты электрических полей основаны на известных и хорошо зарекомендовавших себя методах расчета с помощью рядов Фурье и были проведены экспериментальные измерения, подтверждающие многие из них;
- отдельные результаты автора согласуются с известными ранее экспериментальными работами;
- новые методики измерения кинетических параметров полупроводниковых материалов были проверены экспериментально, сравнение результатов с паспортными данными показало их согласованность;
- воспроизводимостью экспериментальных данных при изучении опытных образцов (тестовых структур);
- сопоставимостью отдельных экспериментальных результатов работы с известными данными, полученными как аналогичными, так и иными методами исследования.

В качестве **замечаний** можно отметить следующие:

1. Обзорную часть следовало бы расширить в области экспериментального исследования искусственно легированных полупроводников и не ограничиваться только методами диффузии и ионного внедрения.
2. Практическое и теоретическое значение приводимых расчетов электрических полей для $n-n^+$ и $p-p^+$ структур требует дополнительного обоснования: не указаны степень и способы легирования, размеры образцов, не описаны условия, требуемые для пренебрежения контактной разностью потенциалов.
3. В работе нет полного обоснования, почему автором проводится однозначная зависимость между концентрацией распределения примесей и проводимостью.
4. В тексте диссертации имеются также замечания по оформлению работы:
 - качество некоторых рисунков с эквипотенциалами и токовыми линиями следовало улучшить путем повышения качества расчетов;
 - нумерация формул не соответствует правилам оформления диссертаций (не по главам, а по разделам работы);
 - имеется небольшое количество опечаток (например, отсутствие знаков препинания после формул).

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Рассматривая диссертационную работу Лузянина С.Е. в целом, следует отметить, что она является законченной научно-исследовательской работой, обладающей актуальностью, новизной, научной и практической значимостью. Основные результаты работы достаточно подробно опубликованы в виде научных статей в ведущих российских и зарубежных изданиях, рекомендованных ВАК РФ. Материалы диссертации многократно докладывались на различных конференциях и отражены в 23 работах (из которых 9 в рецензируемых журналах списка ВАК и Scopus), получено

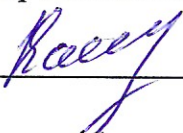
авторское свидетельство на программу ЭВМ для моделирования эквипотенциальных поверхностей и токовых линий.

Из текста диссертации и автореферата следует, что содержание диссертационной работы Лузянина С.Е. соответствует паспорту научной специальности 1.3.11. Физика полупроводников. Содержание диссертации с необходимой полнотой отражено в автореферате.

Считаю, что диссертация Лузянина С.Е. «Электрические свойства ограниченных полупроводников с естественными и искусственными неоднородностями», представленная на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11. Физика полупроводников, является законченным научным исследованием и по совокупности полученных результатов, их новизне и значимости соответствует требованиям п. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Соответственно, соискатель Лузянин Сергей Евгеньевич заслуживает присвоения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11. - Физика полупроводников.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук (01.04.07. Физика конденсированного состояния), профессор кафедры твердотельной электроники Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Воронежский государственный технический университет»


_____ Калинин Юрий Егорович

30 мая 2023 г.

Адрес: Россия, 394006, Воронежская область, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84

Тел.: +7(473) 246-66-47

E-mail: kalinin48@mail.ru

С обработкой персональных данных согласен.

Подпись профессора кафедры твердотельной электроники Факультета радиотехники и электроники ВГТУ Ю.Е. Калинина удостоверяю:

Ученый секретарь




В.П. Трофимов