



МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное
автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский
университет «Московский институт
электронной техники»

Шокина пл., д.1, г. Зеленоград, Москва, 124498

Тел.: +7(499) 731 44 41 Факс: +7(499) 710 22 33

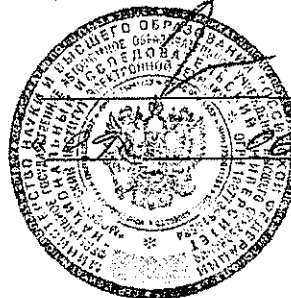
E-mail: netadin@miet.ru <http://www.miet.ru>

ОГРН 1027739615584

09.06.2023 № 98-2080/4.5
на № _____

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе ФГАОУ
ВО «Национальный исследовательский
университет «Московский институт
электронной техники», доктор
технических наук, профессор



С.А. Гаврилов

2023 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

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

1. Предмет исследования

Диссертация посвящена исследованию особенностей резистивных и контактных явлений в ограниченных полупроводниках с неоднородно распределенными примесями и последующей разработке методов измерений физических параметров материалов электронной техники.

2. Актуальность работы

Актуальность диссертационного исследования обусловлена перспективами внедрения в полупроводниковую микро- и наноэлектронику естественно и искусственно неоднородных полупроводниковых материалов. В частности, уже получили широкое применение и весьма перспективны для построения функциональных элементов электроники полупроводниковые диффузионные, ионно-легированные и эпитаксиальные структуры на кремнии и арсениде галлия. Данные полупроводники имеют симметричную кристаллическую структуру и распределением примесей по глубине кристалла можно управлять, создавая функционально новые материалы. Указанные неоднородные полупроводниковые

001736

материалы также представляют интерес с точки зрения создания устройств твердотельной опто- и микроэлектроники. Большие перспективы в полупроводниковой электронике имеют слоистые полупроводниковые структуры. Слоистые полупроводники могут быть использованы для создания лазеров, модуляторов света, фотодетекторов и функциональных устройств, управляемых магнитным полем.

Сдерживающим фактором развития физико-технических решений на основе низкосимметричных неоднородных полупроводников в определенной степени является отсутствие физических моделей, детально описывающих распределения электрического тока и потенциала при соответствующих граничных условиях в макроскопических образцах. Проблема разработки таких моделей в первую очередь заключается в сложном характере распределений электрического потенциала и плотности тока в полупроводниках, обладающих неоднородностью электрофизических свойств. Внедрение новых полупроводниковых материалов в электронику требует разработки и совершенствования методов исследования их физических свойств.

3. Новизна результатов

В диссертации представлены следующие новые физические модели и методики исследования полупроводников с естественными и искусственными неоднородностями:

- впервые получены выражения в виде рядов Фурье для расчета распределения электрического потенциала в объеме неоднородных полупроводников при зондовых измерениях на постоянном токе на основе решения уравнения Пуассона при граничных условиях Неймана;
- выполнен теоретический анализ выражений для потенциалов, концентрации тока проводимости в материалах с неоднородной по глубине проводимостью, созданной различными методами (диффузией и ионным внедрением), реализован численный расчет соответствующих величин;
- путем соответствующего обоснования разработаны новые методики вычисления коэффициента Холла и холловской подвижности в ограниченных полупроводниках при различном расположении токовых и измерительных контактов;
- разработан ряд новых методик измерения кинетических параметров неоднородных полупроводниковых материалов: четырехзондовые и двухзондовые методы измерений поверхностной проводимости полупроводниковых пленок; методики совместных измерений электропроводности и подвижности полупроводников; предложена оригинальная методика измерения и контроля свойств пленок неоднородно легированных полупроводниковых материалов, рассмотрены случаи экспоненциального и нормального распределения примесей вдоль одного из направлений в полупроводнике.

Впервые обнаружены и исследованы следующие эффекты и закономерности:

- эффект нелинейного отклика величины электрического сопротивления неоднородной пленки на ее геометрические размеры;

- количественные выражения для концентрирования тока проводимости при зондовых измерениях в приконтактных областях неоднородных полупроводников.

4. Достоверность результатов и обоснованность выводов

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

- использованием надежных физико-математических моделей для получения и интерпретации полученных решений;
- сопоставимостью отдельных экспериментальных результатов работы с известными данными, полученными как аналогичными, так и иными методами исследования;
- воспроизводимостью экспериментальных данных при изучении опытных образцов (тестовых структур);
- использованием надежного программного обеспечения для реализации численных расчетов, приводимых в работе;
- сопоставлением полученных формул с известными ранее и широко используемыми выражениями, применяемыми при зондовых измерениях.

5. Значимость результатов для науки и производства

Теоретически разработанные и физически обоснованные автором модели обеспечивают довольно строгий расчет макроскопических явлений электронного переноса в неоднородных полупроводниковых монокристаллах и пленках. В диссертации применялась методика решения уравнений Лапласа и Пуассона в ограниченной области полупроводника с неоднородными граничными условиями.

Разработанные соискателем теоретические модели распределения потенциала позволили предложить оригинальные методики исследования таких кинетических коэффициентов неоднородных полупроводников, как электропроводность и коэффициент Холла. Все предложенные методики достаточно просты в применении, не требуют использования сложной измерительной аппаратуры и позволяют использовать компьютерную технику для быстрого анализа результатов. Полученные выражения для распределений потенциала, впервые позволили количественно определять область локализации поля токового зонда в случае сканирования диффузионных и ионно-легированных пленок.

Практически реализован точечный электрохимический метод создания никелевых контактов на поверхности полупроводника $A^{III}B^V$ (GaAs). Полученные металлические пленки на полупроводнике характеризуются низкой шероховатостью. Показано, что созданные таким образом контактные структуры Ni-p-GaAs имеют омические свойства, а вольтамперные характеристики электрохимических контактов Ni-n-GaAs при напряжениях менее 1,5 вольт имеют нелинейную область.

6. Рекомендации по практическому использованию

Предлагаемые в диссертации методики измерений параметров неоднородных полупроводников избавляют от необходимости создания экспериментальных структур с большими контактами и процедур последовательного стравливания слоев, минусы которых – технологические сложности создания омических контактов, временные затраты, нарушение структуры поверхности исследуемого образца и его дальнейшая непригодность. Разработанные методики контроля однородности, определения проводимости и холловской подвижности неоднородных полупроводниковых образцов могут быть рекомендованы к использованию в ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН (г. Санкт-Петербург), Институте общей и неорганической химии РАН (г. Москва), Московском институте электронной техники (г. Зеленоград), Институте физики полупроводников им А.В. Ржанова СО РАН (г. Новосибирск), Институте физики микроструктур РАН (г. Нижний Новгород), Новосибирском государственном техническом университете (г. Новосибирск), Институте физики твердого тела и полупроводников НАН Белоруссии (г. Минск), а также в других научных центрах и учреждениях, занимающихся проблемами внедрения в электронную технику искусственно неоднородных полупроводниковых материалов, слоистыми полупроводниковыми структурами и разработкой приборов на их основе.

Описанные в работе методики тестирования как однородных, так и неоднородных пластин могут быть применены в заводских лабораториях по производству полупроводниковых материалов: ООО «Завод Кристалл» (г. Таганрог), ЗАО «Телеком-СТВ» (г. Зеленоград), ОАО «Воронежский завод полупроводниковых приборов» (г. Воронеж), АО «Группа кремний Эл» (г. Брянск), НИИ полупроводниковых приборов (г. Томск) и других предприятиях и научных центрах, занимающихся производством и тестированием полупроводниковых кристаллов и пластин.

7. Рекомендации по направлению дальнейших исследований

В настоящее время для НИИ, занимающихся проблемами разработки и исследований свойств материалов электронной техники, представляется важным развитие методик измерения и контроля параметров низкоразмерных структур, элементной базой которых являются слоистые и неоднородные полупроводники, поэтому целесообразно продолжение исследований в указанном направлении.

8. Замечания по работе

1. В работе не достаточно детально описана экспериментальная проверка полученных автором расчетных распределений потенциала, не приведены выражения для оценки погрешностей измерений.
2. Практическая значимость расчетов электрических потенциалов для $n-n^+$ ($p-p^+$) структур описана не вполне корректно. В частности, необходимо указать границы применимости авторских моделей (толщины пленок, концентрации примесей). Автором не упоминается контактная разность потенциалов данных структур.

3. В работе не для всех выражений для потенциалов в виде функциональных рядов указывается, какое количество членов ряда достаточно для достижения необходимой высокой точности расчетов.

4. По оформлению:

- автору следовало бы придерживаться единого стиля в записи десятичных чисел и использовать в качестве разделителя точку или запятую (в работе были использованы оба обозначения);
- качество отдельных рисунков (в частности, модели потенциалов и токов) следовало бы улучшить;
- имеется незначительное количество опечаток и стилистических ошибок.

9. Общая оценка работы

Диссертационная работа явилась итогом теоретических и экспериментальных исследований соискателя, результаты которых достаточно полно опубликованы в рецензируемых научных изданиях (5 работ в журналах перечня ВАК, 4 статьи в изданиях БД Scopus, 1 авторская программа для ЭВМ), регулярно докладывались и обсуждались на международных, всероссийских и региональных научных конференциях и семинарах (14 докладов). Всего автором по теме диссертационного исследования опубликовано в соавторстве более 20 работ. Автореферат достаточно полно и адекватно отражает содержание диссертации. Диссертационная работа является целостным и законченным научным трудом, задачи, поставленные в диссертации, решены в необходимом объеме.

Содержание диссертационной работы С.Е. Лузянина «Электрические свойства ограниченных полупроводников с естественными и искусственными неоднородностями» соответствует паспорту научной специальности 1.3.11. Физика полупроводников по следующим областям исследований:

- примеси и дефекты в полупроводниках и композитных структурах;
- поверхность и граница раздела полупроводников, полупроводниковые гетероструктуры, контактные явления;
- электронный транспорт в полупроводниках и композиционных полупроводниковых структурах;
- моделирование свойств и физических явлений в полупроводниках и структурах;
- разработка методов исследования полупроводников и композитных полупроводниковых структур.

10. Заключение

Диссертационная работа на тему «Электрические свойства ограниченных полупроводников с естественными и искусственными неоднородностями» является научно-квалификационной работой и представляет собой самостоятельное исследование, выполненное по актуальной тематике на высоком научном уровне. Работа удовлетворяет критериям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, которые установлены пп. 9-14 «Положения о присуждении ученых степе-

ней», утвержденного постановлением Правительства РФ № 842, а ее автор С.Е. Лузянин заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11. Физика полупроводников.

Отзыв подготовили кандидат физико-математических наук, доцент, доцент Института физики и прикладной математики НИУ МИЭТ И.В. Лавров и доктор физико-математических наук, доцент, профессор Института физики и прикладной математики НИУ МИЭТ В.В. Бардушкин.

Доклад С.Е. Лузянина заслушан и обсужден на расширенном заседании научно-технического совета Института физики и прикладной математики НИУ МИЭТ 02 июня 2023 года (протокол № 3). Настоящий отзыв заслушан и одобрен на вышеуказанном заседании НТС ИФПМ НИУ МИЭТ.

Директор Института физики
и прикладной математики
НИУ МИЭТ, д.ф.-м.н., профессор
(01.04.10 – Физика полупроводников)

Николай Иванович Боргардт

Профессор Института физики
и прикладной математики
НИУ МИЭТ, д.ф.-м.н., доцент
(01.04.07 – Физика
конденсированного состояния)

Владимир Валентинович Бардушкин

Доцент Института физики
и прикладной математики
НИУ МИЭТ, к.ф.-м.н., доцент
(01.04.07 – Физика
конденсированного состояния)

Игорь Викторович Лавров

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники»

Адрес: 124498, Россия, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, дом 1.

Телефон: +7 (499) 731-44-41. E-mail: netadm@miee.ru. Сайт: <https://www.miet.ru>.

Институт физики и прикладной математики;
тел.: 8 (499) 720-85-58, e-mail: fpm@lenta.ru.

ПОДПИСИ

Боргардта Николая Ивановича, Бардушкина Владимира Валентиновича,
Лаврова Игоря Викторовича

УДОСТОВЕРЯЮ

Ученый секретарь

