

## ОТЗЫВ

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

### Актуальность темы диссертации

Современная физическая электроника развивается по двум основным направлениям: миниатюризация структурных элементов известных полупроводников и получение качественно новых материалов с широким применением методов легирования и технологий атомно-слоевого осаждения. Развитие полупроводниковой микроэлектроники в значительной степени связано с использованием новых материалов, применение которых основано на существенно иных свойствах, проявляемых как внутри кристаллов, так и макроскопических эффектов при воздействии на них внешних электрических и магнитных полей. К таковым, в частности, относятся слоистые системы с ярко выраженной неоднородностью электрофизических и оптических свойств. Для более широкого практического применения рассматриваемых полупроводников требуется построение соответствующих моделей, адекватно описывающих распределения электрического тока и потенциала в ограниченных макроскопических образцах. При построении моделей необходимо учитывать особенности распределения электрического потенциала и плотности тока в полупроводниковых кристаллах и пленках с неоднородными электрофизическими параметрами. Очевидно, что применение новых полупроводниковых материалов в электронике приводит к необходимости разработки новых и усовершенствования уже существующих методик исследования их свойств, а также исследования физических параметров контактов к ним с учетом неоднородности материала.

Учитывая сказанное выше, можно считать **актуальной** выбранную диссертантом тему исследования, основной целью которого явилось изучение особенностей явлений электронного переноса в неоднородных полупроводниках с последующей разработкой методов измерений кинетических коэффициентов электронного переноса в полупроводниковых материалах.

### Цель и задачи

Целью диссертационной работы явилось исследование особенностей распределений электрических полей, возникающих при зондовых измерениях в ограниченных неоднородных полупроводниковых материалах.

Задачи:

- Получить теоретические выражения для потенциалов электрических полей в изучаемых материалах.
- Путем физико-математического анализа и компьютерного моделирования исследовать структуру электрических полей с учетом влияния границ.
- Разработать методики определения электрических параметров неоднородных полупроводников и качеств металлических контактов к ним.

### **Общая характеристика диссертации.**

Диссертация включает в себя введение, четыре главы основного текста, заключение и список литературы. Общий объем диссертации составляет 154 страницы текста, список литературы - 117 источников.

Во введении работы описываются актуальность, цель, защищаемые положения и другие стандартные вступительные пункты диссертационного исследования.

**Первая глава** работы, как и в большинстве случаев, является обзорной. Автор описал основные зондовые методы, применяемые в диагностике свойств полупроводников, указал их особенности. Диссертант очертил наиболее применяемые методы легирования полупроводников и получения неоднородных материалов.

**Во второй главе** диссертантом описывается математический метод решения теоретических задач по нахождению электрических потенциалов при контактных методах измерений электропроводимости и величины эффекта Холла. Автор описывает методы решения задач в декартовой и цилиндрических координатах, это позволяет создавать теоретическую базу для методов контроля однородности прямоугольных образцов и подложек в виде дисков. Теоретические расчёты позволили выполнять детальное компьютерное моделирование электрических потенциалов и токов в исследуемых образцах. Получаемые автором основные выражения проверены экспериментально на образцах кремния и арсенида галлия.

**В третьей главе** автором описывается метод определения контактного сопротивления структуры металл-полупроводник. Характерной новизной работы является учет размеров контактов и их геометрического положения на боковых гранях. Таким образом, полученные теоретические выражения позволяют максимально снизить погрешности при подобного рода измерениях. Для получения металлических контактов к полупроводникам была использована оригинальная установка применительно для нанесения никелевых контактов. Подобная методика успешно применяется во многих атомно-силовых микроскопах для получения квантовых точек на проводящих подложках. На основе экспериментально полученных вольт-амперных характеристик, выявлены омические свойства контактов Ni-p-GaAs. Была определена нелинейная область ВАХ для получаемых электрохимическим методом контактов Ni-p-GaAs.

**Четвертая глава** работы являлась основой для разработки авторских методик исследований электрических свойств искусственно неоднородных полупроводниковых подложек. Автором рассмотрен строгий алгоритм решения уравнения Пуассона в ограниченной области полупроводника. Получаемые выражения представлены в виде рядов аналитических функций, что существенно повышает их значимость при проведении практических расчетов. В сравнении с часто используемыми на практике численными методами решений уравнения Пуассона, авторские решения существенно выигрывают как в точности, так и в возможности их применений к методикам исследований электрических параметров полупроводников. В главе на основе теорети-

ческого обоснования разработаны и экспериментально апробированы зондовые методы контроля электрических параметров неоднородных полупроводников, получаемых методами диффузии и эпитаксии.

### **Новизна и практическая значимость полученных результатов.**

1. Теоретически разработанные и физически обоснованные автором модели обеспечивают довольно строгий расчет макроскопических явлений электронного переноса в неоднородных полупроводниковых монокристаллах и пленках. В диссертации смоделированы и получили количественные выражения для следующих важных явлений:
  - эффект концентрирования потенциала и плотности тока в диффузионных структурах при контактных измерениях;
  - эффект вытеснения свободных носителей заряда в низкоомную область при протекании тока в  $n-n^+$  и  $p-p^+$  структурах.
2. Построена теоретическая модель расчета трехмерных распределений потенциалов в объеме неоднородного полупроводника с плоскими границами, возникающих при контактных электрических методах измерений. Получены выражения для потенциалов полей в виде рядов специальных ортогональных функций для практически важных случаев неоднородностей: безпереходные  $n-n^+$ -и  $p-p^+$ -структуры, экспоненциальная, гауссова и нормальная зависимость проводимости по глубине.
3. Разработан точечный (локальный) электрохимический метод получения контактов никеля из раствора Уоттса на поверхности арсенида галлия. Определены необходимые оптимальные условия получения омических контактов с низкой шероховатостью поверхности образуемой никелевой пленки. На основе экспериментальных ВАХ показано, что полученные автором структуры  $Ni-p-GaAs$  проявляют омические свойства, при этом для ВАХ структур  $Ni-n-GaAs$  выявлена нелинейная область при напряжениях на контактах менее 1.5 В.
4. Обоснованы новые методики контроля качества и выявления локальных неоднородностей полупроводниковых образцов с наиболее распространенным видом пространственных границ (диски и прямоугольные пластины) по величине удельной электропроводности и данных зондовых измерений ЭДС Холла. Приведены выражения для необходимых разностей потенциалов, учитывающих неоднородное распределение плотности тока вблизи токовых контактов.
5. Разработаны оригинальные зондовые методики определения и контроля величин поверхностной электропроводимости и геометрических параметров распределения примесей диффузионных полупроводниковых подложек, а также эпитаксиальных  $n-n^+$ - и  $p-p^+$  структур.

### **Достоверность основных результатов и выводов диссертации**

Достоверность основных результатов и выводов представленной работы обусловлена четкой математической формулировкой соответствующих краевых задач для электрического потенциала поля в ограниченных полупроводниках и применением надежных методов математической физики для их интегрирования. Основные результаты теоретических расчетов и разрабо-



танных в диссертации методов измерения тензоров кинетических коэффициентов проверены диссертантом экспериментально, а также подтверждаются результатами, полученными ранее другими авторами. Выводы автора диссертации, содержащие научную новизну, не противоречат общепризнанным положениям кинетической теории явлений электронного переноса в полупроводниках.

### **Замечания по диссертации**

#### **По главе 1:**

- Недостаточно описано применение диффузионных и эпитаксиальных структур в актуальной микро- и наноэлектронике. В частности, в литературном обзоре доля иностранных источников литературы порядка 25-30%, поэтому применение и получение наиболее перспективных полупроводниковых неоднородных материалов освящено не в полном объеме.
- Поставленная автором в конце главы задача «построение математических компьютерных моделей электрических полей в ограниченных полупроводниках, позволяющих контролировать однородность электрических параметров в области образцов», не вполне корректна, поскольку математические модели не позволяют контролировать однородность материалов, но являются теоретической базой для разработки методов.

#### **По главе 2:**

- Экспериментальная проверка для распределений электрических полей двух зондов на однородном полупроводниковом кристалле (формулы 2.5.11, 2.5.12) автором не представлена.

#### **По главе 3:**

- Для полного описания электрических контактов Ni-n-GaAs и выявления их выпрямляющих свойств необходимо было представлять обратные ветви ВАХ.

#### **По главе 4:**

- Нет экспериментальной проверки для распределения потенциала в материалах получаемых ионной имплантацией примесей.
- Главу 4 практичнее было бы разделить на две: в 4 главе описать необходимые теоретические выкладки, а в главе 5 представить методики исследований параметров и их экспериментальную апробацию.

Вышеуказанные замечания не снижают высокого научного уровня диссертации Лузянина С.Е. и не могут повлиять на общую её положительную оценку.

### **Соответствие требованиям ВАК**

Основные результаты диссертации докладывались на международных и российских конференциях и опубликованы в 23 печатных работах, 9 из которых в журналах перечня ВАК и базы Scopus. Автореферат отражает основное содержание диссертации, а положения, выносимые на защиту, соответствуют результатам, полученным в работе.

Считаю, что диссертационная работа «Электрические свойства ограниченных полупроводников с естественными и искусственными неоднородностями», представленная на соискание учёной степени кандидата физико-

математических наук, является научно-квалификационной работой и удовлетворяет всем требованиям п. 9-14 «Положения о присуждении учёных степеней», а её автор С.Е. Лузянин заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11. Физика полупроводников.

*Согласен на обработку моих персональных данных.*

Официальный оппонент:

кандидат физико-математических наук  
(01.04.07. Физика конденсированного состояния),  
доцент кафедры материаловедения и нанотехнологий,  
института инженерных и цифровых технологий,  
Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Белгородский государственный национальный  
исследовательский университет»

Япрынцев Максим Николаевич

31 мая 2023 г.

Адрес: Россия, 308015, Белгородская область, г. Белгород, ул. Победы, д. 85

Тел.: +7(952) 431-67-38

E-mail: [yaprintsev@bsu.edu.ru](mailto:yaprintsev@bsu.edu.ru)

