

На правах рукописи

Лузянин Сергей Евгеньевич

**Электрические свойства ограниченных полупроводников
с естественными и искусственными неоднородностями**

Специальность 1.3.11. Физика полупроводников

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Липецк – 2023

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Липецкий государственный педагогический университет имени П.П. Семенова-Тян-Шанского»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, доцент
Филиппов Владимир Владимирович

Официальные оппоненты:

Калинин Юрий Егорович,
доктор физико-математических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
технический университет», профессор кафедры
твердотельной электроники

Япрынец Максим Николаевич,
кандидат физико-математических наук,
ФГАОУ ВО «Белгородский государственный
национальный исследовательский университет»,
доцент кафедры материаловедения и
нанотехнологий

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники»

Защита состоится «29» июня 2023 г. в 12.00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.435.01, созданном на базе Юго-Западного государственного университета по адресу: 305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Юго-Западного государственного университета и на сайте <https://www.swsu.ru>.

Автореферат разослан «__» мая 2023 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета 24.2.435.01,
к.ф.-м.н., доцент

Кочура Алексей Вячеславович

Актуальность темы исследования и степень её разработанности

Непрерывное развитие современной полупроводниковой микро- и нано-электроники тесно связано как с разработкой новых материалов, так и с совершенствованием технологии их получения. В условиях сокращения базового размера $p-n$ переходов (с достигнутым уровнем 2-3 нм [1, 2]) актуализируются проблемы обеспечения высокого уровня качества измерительных и функциональных контактов, а также исключения их паразитных влияний на работу и электрические свойства производимых электронных элементов и устройств. Широкое применение при легировании полупроводников находят процессы синтеза, такие как диффузионные, ионно-легирующие, атомно-слоевые, гетеро- и молекулярно-лучевые эпитаксиальные. Данные технологические процессы при получении необходимых структур интегральных схем и дискретных приборов цифровой электроники и оптоэлектроники неизбежно сопровождаются формированием как естественных, так и специально задаваемых неоднородностей в твердотельных полупроводниковых материалах [3].

При проектировании полупроводниковых приборов и интегральных схем широко используются известные в литературе зависимости пространственного залегания легирующих примесей при диффузии, ионном внедрении, эпитаксии. Геометрические параметры распределения примесей, несомненно, определяют важнейшие электрофизические параметры полупроводниковых материалов (удельное сопротивление, концентрация и подвижность свободных носителей заряда), критически определяющих их дальнейшую применимость. Соответственно возрастает существенное значение развития методов исследования кинетических параметров таких материалов, включая, например, зондовые методы, контактные методики Лео Ван дер Пау и другие. Используемые лабораторные методы исследования неоднородностей в полупроводниках приводят к разрушению образцов (метод последовательного удаления слоев), нарушению условий на поверхности (применение протяженных омических контактов) или изменению внутренней структуры исследуемых объектов (рентгеновские исследования, электронная просвечивающая микроскопия). Соответственно, сохраняется необходимость в надежных, неразрушающих методах исследований полупроводниковых материалов с естественными и/или искусственными неоднородностями. Однако необходимая для этого теория расчета электрических полей в легированных полупроводниковых структурах разработана недостаточно. В частности, в обзримой литературе отсутствуют необходимые аналитические расчеты электрических полей при установившихся токах в ограниченных диффузионных или ионно-легированных полупроводниковых материалах. Данные аналитические выражения для электрических полей являются необходимой теоретической базой для построения новых (зондовых) методов измерений основных электрических параметров неоднородных полупроводниковых материалов и структур.

Таким образом, **существующий уровень разработанности** методов измерений кинетических коэффициентов неоднородных полупроводниковых материалов свидетельствует о востребованности их дальнейшего развития. Необходимость комплексного учета физических эффектов концентрирования электрических полей в приконтактных областях, а также влияния распределений

примесей и границ на основании анализа электрических свойств с привлечением математического и компьютерного моделирования подтверждает **актуальность исследований** по данной проблеме.

Цель работы: экспериментальное подтверждение модельно обоснованного влияния естественных и создаваемых примесных неоднородностей на электрические свойства ограниченных полупроводников.

Задачи исследования

1. На основе решения краевой электродинамической задачи аналитически описать распределение потенциала стационарных электрических полей, согласующееся с 4-х зондовыми и холловскими измерениями в ограниченных полупроводниках.
2. На основе предложенной теоретической модели построить распределения потенциала стационарных электрических полей при зондовых измерениях для выявления естественных локальных неоднородностей в ограниченных полупроводниках прямоугольной и круглой формы.
3. Построить модель распределений потенциала стационарных электрических полей в ограниченных неоднородных полупроводниковых материалах с созданными искусственно примесными включениями, основанную на решении уравнений Пуассона с учетом характерных законов изменений электропроводимости по глубине.
4. Выявить влияние распределения примесей в ограниченных полупроводниках с искусственными неоднородностями на концентрирование стационарного электрического поля и распределение плотности тока при контактных методах измерений удельной электропроводности.
5. Выявить роль типа проводимости (n и p) в полупроводнике GaAs прямоугольной и круглой формами по вольтамперным характеристикам, измеренным с помощью никелевого контакта.

Объект исследования: диффузионно- и ионно-легированные полупроводниковые материалы, эпитаксиальные структуры, естественные неоднородности в ограниченных полупроводниках.

Предмет исследования: изменения электрических свойств с учетом естественных и созданных диффузионно- и ионно-легированных неоднородностей в ограниченных полупроводниковых материалах на примере Si и GaAs.

Научная новизна

Построена и экспериментально подтверждена теоретическая модель расчета трехмерных распределений потенциалов в объеме образцов полупроводниковых материалов в форме параллелепипеда, содержащего структурные неоднородности однослойных материалов с характерными для планарной технологии законами изменений электропроводимости по глубине, и двуслойных структур $n-n^+$ и $p-p^+$ со скачкообразным изменением проводимости, представленная рядом Фурье из специальных ортогональных функций.

По оригинальной методике определения сопротивлений растекания и переходного в контактах металл-неоднородный полупроводник в ограниченной области построена трехмерная модель распределений статических потенциалов, подтвержденная результатами экспериментальных измерений.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Концентрирование плотности электрического тока и потенциала в приконтактных областях ограниченных полупроводников с неоднородностями, определяемое геометрическими параметрами диффузионного легирования и площадью сечений контактов, подтвержденное зондовыми измерениями и согласующееся с расчетами трехмерных распределений потенциалов.
2. Снижение отношения удельной проводимости контактирующего полупроводникового слоя к проводимости подложки полупроводниковых эпитаксиальных $n-n^+$ и $p-p^+$ структур с резкими границами (σ/σ^+) при протекании постоянного электрического тока приводит к возрастанию градиента потенциала в приконтактных областях и концентрированию плотности тока в высоколегированной подложке, подтвержденному расчетами электрических полей и согласующееся с результатами проведенных зондовых измерений.
3. Результаты контактных двух- и четырехзондовых измерений величин поверхностной и средней удельной электропроводности для диффузионно- и ионно-легированных полупроводников, эпитаксиальных $n-n^+$ и $p-p^+$ структур, основанные на аналитическом решении уравнений Лапласа и Пуассона и учитывающие концентрирование потенциала в приконтактной области при сопряженном эффекте вытеснения плотности электрического тока в высоколегированную область.

Теоретическая и практическая значимость работы

Полученные в работе выражения для распределений электрических полей в ограниченных неоднородных и однородных полупроводниковых образцах использованы при расчетах удельной электропроводности и коэффициента Холла. Представлены аналитические соотношения, с помощью которых можно контролировать однородность образцов по величине удельной проводимости и коэффициента Холла на основе зондовых измерений. Для полупроводниковых дисков получена удобная методика моделирования электрических полей при помещении образца с током в однородное магнитное поле, разработана соответствующая компьютерная программа, зарегистрированная в ФИПС.

Выявлена и определена аналитическая нелинейная зависимость электрического напряжения между измерительными зондами от параметров распределения примесей в ограниченных неоднородных диффузионно-легированных и ионно-имплантированных полупроводниках реальных образцов при проведении исследований на постоянном токе.

Разработан и практически реализован метод получения омических измерительных контактов к GaAs. Показаны особенности протекания постоянного тока через полученный электрохимическим методом контакт Ni-GaAs. Выявлено, что структуры Ni-p-GaAs проявляют омические свойства, а вольтамперные характеристики контактов Ni-n-GaAs имеют нелинейную область при напряжениях менее 1,5 вольт.

Представленные в работе выражения в виде рядов специальных ортогональных функций для распределений электрических полей в неоднородных полупроводниковых пленках и образцах могут быть использованы при анализе

экспериментальных данных зондовых измерений, в том числе при рассмотрении результатов сканирующей зондовой микроскопии методом сопротивления растекания. Полученные и проанализированные в работе выражения для электрических полей могут быть использованы для моделирования электрофизических свойств реальных неоднородных материалов электроники и легированных полупроводников.

Достоверность результатов исследования, представленных в работе, обеспечивается выбором надежных методов математической физики для решения требуемых электродинамических краевых задач, подбором поверенного и сертифицированного оборудования для проведения экспериментальных работ, сопоставлением с результатами работ, принятых и опубликованных в рейтинговых отечественных и зарубежных издательствах. Основные результаты работы теоретически обоснованы и проверены экспериментально. Используемые в диссертационной работе алгоритмы для расчета электрических полей выполнены автором с применением стандартных компьютерных прикладных программ.

Апробация и реализация полученных результатов

Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 14 российских и международных конференциях: Всероссийской научно-технической конференции «Диагностика веществ, изделий и устройств» (Орел, ОрелГТУ, 1999); Международной научно-технической конференции «Электроника и информатика – XXI век» (Москва, МИЭТ, 2000); 1-й Российской конференции молодых ученых по физическому материаловедению (Калуга, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001), Международной конференции «Физика электронных материалов» (Калуга, КГПУ им. К.Э. Циолковского, 2002); XV Международной конференции «Радиолокация, навигация, связь» (Воронеж, ВГУ, 2011); Международном семинаре «Физико-математическое моделирование систем» (Воронеж, ВГТУ, 2014, 2017, 2018); VIII Международной конференции «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов. DFMN-2019» (Москва, ИМЕТ РАН, 2019); 4-й Международной научной конференции перспективных разработок молодых ученых «Наука молодых - Будущее России» (Курск, ЮЗГУ, 2019); Международной конференции «International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA» (Липецк, ЛГТУ, 2019, 2020, 2022); Всероссийской научно-практической конференции «Проблемы естественных, математических и технических наук в контексте современного образования» (Липецк, ЛГПУ имени П.П. Семенова-Тян-Шанского, 2022).

Реализация результатов работы

Результаты диссертационной работы были использованы при проведении НИР № 2271 «Особенности электронного переноса в ограниченных анизотропных и неоднородных полупроводниках» в базовой части Государственного задания №2014/351 (2014, 2015 г.г.), а также используются в учебном процессе при изучении дисциплин «Общая и экспериментальная физика» и «Методы математической физики» (направление подготовки 03.03.02 «Физика») в Липецком государственном педагогическом университете имени П.П. Семенова-Тян-

Шанского и могут быть рекомендованы к внедрению в профильные дисциплины по направлениям подготовки высшего образования, связанными с необходимостью изучения современных материалов электронной техники («Радиофизика», «Техническая физика», «Электроника и наноэлектроника» и др.).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 23 научные работы, в том числе 5 – в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, и 4 – в изданиях, входящих в наукометрические базы данных Scopus и Web of Science, получено авторское свидетельство на программу для ЭВМ. Список публикаций приведен в конце автореферата.

Личный вклад соискателя состоит в получении и анализе теоретических результатов работы, в проведении экспериментов, обработке опытных данных, подготовке и написании научных статей, представлении докладов на научных конференциях и оформлении диссертационной работы.

Соответствие паспорту научной специальности. Диссертация соответствует требованиям паспорта специальности 1.3.11. Физика полупроводников: п. 3. Примеси и дефекты в полупроводниках и композитных структурах; п. 4. Поверхность и граница раздела полупроводников, полупроводниковые гетероструктуры, контактные явления; п. 6. Электронный транспорт в полупроводниках и композиционных полупроводниковых структурах; п. 17. Моделирование свойств и физических явлений в полупроводниках и структурах; п. 19. Разработка методов исследования полупроводников и композитных полупроводниковых структур.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, содержащего 117 наименований. Работа изложена на 154 страницах, содержит 74 рисунка и 18 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационного исследования, сформулированы цели и основные задачи работы, практическая значимость полученных результатов, научная новизна, перечислены основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава содержит обзор и анализ литературных данных по теме диссертации. Рассмотрены основные способы внедрения примесей в полупроводниковые материалы, используемые в технологии современной твердотельной электроники. Особое внимание уделено аналитическим зависимостям распределений примесей в процессах ионного внедрения, термодиффузии и эпитаксии. После получения кристаллов высокой степени чистоты для контроля качества широко применяют контактные методы измерений. В соответствии с этим во второй части главы рассмотрены зондовые методы исследований элек-

трических свойств полупроводниковых материалов. Приводится сравнение актуальных методов измерения удельного сопротивления полупроводниковых структур и концентрации носителей тока. Показана необходимость оптимизации и модернизации современных методик измерения полупроводниковых материалов. Надежность работы полупроводниковых приборов напрямую зависит от технологии их производства и в первую очередь связана с процессами получения контактных соединений. Соответственно, в последней части первой главы выполнен обзор публикаций, посвященных проблеме получения качественного омического контакта к полупроводниковым кристаллам и пленкам.

Вторая глава содержит подробное описание расчетных схем математической физики, используемых в диссертационном исследовании. Для разработки методов контроля параметров полупроводников целесообразно рассмотреть особенности распределений электрических полей при проведении измерений.

Для плотности тока проводимости и электрического потенциала в ограниченных полупроводниках при стационарных токах выполняются следующие математические соотношения:

$$\operatorname{div} \mathbf{j} = 0, \quad \mathbf{j} = -\sigma \cdot \operatorname{grad} \varphi. \quad (1)$$

В главе 2 первоначально выполнен расчет распределения электрического потенциала в области прямоугольных и круглых тонких однородных полупроводников (рис. 1), на периметре которого созданы два металлических контакта. Площадь контакта принимается много меньше площади контактной грани полупроводника, поэтому смешанная краевая задача приводится к задаче Неймана. Распределения электрических полей описаны удобными формулами для расчетов потенциалов в виде сходящихся тригонометрических рядов.

В случае прямоугольного образца с двумя токовыми электродами на противоположных гранях (рисунок 1,а) выражение для потенциала в области образца принимает вид:

$$\varphi(x, y) = -\frac{I_{12}}{d\sigma} \left(\frac{x}{b} - \frac{2}{\pi} \sum_{n=2,4,\dots}^{\infty} \left\{ \frac{(-1)^{n/2} \sin(\beta_n \varepsilon) \cos(\beta_n y)}{n \beta_n \varepsilon \operatorname{sh}(\beta_n a)} \left[\operatorname{ch}(\beta_n (x-a)) - \operatorname{ch}(\beta_n x) \right] \right\} \right), \quad (2)$$

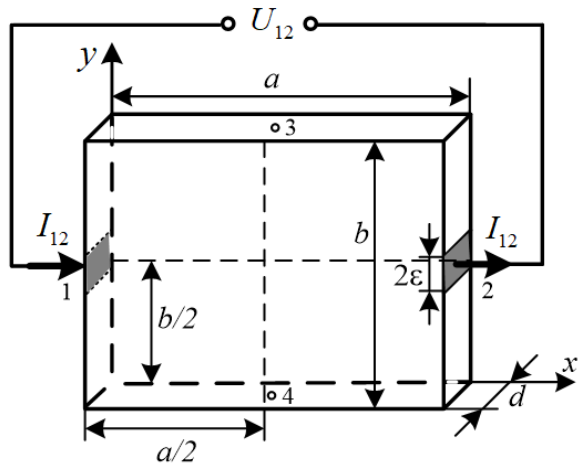
где I_{12} – ток, протекающий через контакты 1 и 2, σ – удельная электропроводность полупроводника, $\beta_n = \pi n / b$.

Для однородного круглого образца (рисунок 1,б) с диаметрально противоположно расположенными токовыми электродами размером $2\varepsilon \times d$ распределение потенциалов удобно представить в полярных координатах (r, θ) :

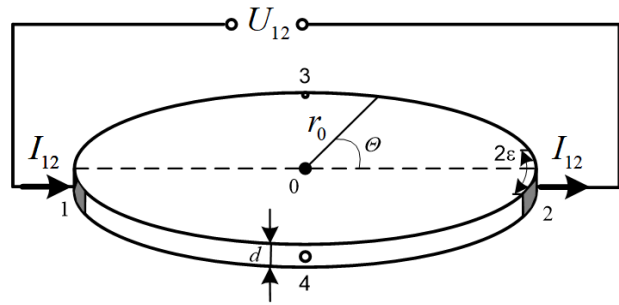
$$\varphi_0(r, \theta) = -\frac{2I_{12}}{\pi d \sigma} \sum_{m=1,3,\dots}^{\infty} \left\{ \left(\frac{r}{r_0} \right)^m \frac{\sin \lambda_m \varepsilon \cos(m\theta)}{\lambda_m \varepsilon m} \right\}, \quad (3)$$

где θ – угол между линией токовых контактов и выбираемым направлением на точку, $\lambda_m = m / r_0$.

Также выполнен расчет распределений потенциалов для случая наличия поперечного магнитного поля, что позволяет создавать теоретическую базу для проведения контроля распределений примесей по данным зондовых измерений ЭДС Холла между различными точками образцов.



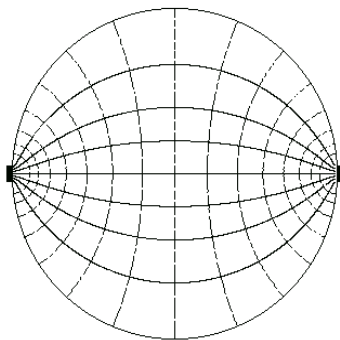
а) прямоугольный образец



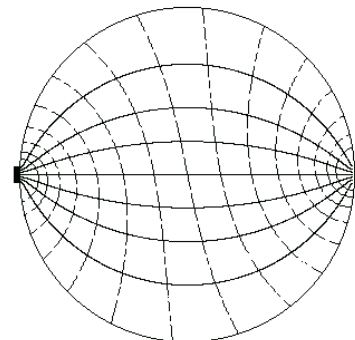
б) образец в форме диска

Рисунок 1 – Примеры положения металлических контактов на образцах в решаемых электродинамических задачах. 1, 2 – токовые контакты, 3, 4 – холловские контакты

Полученные распределения потенциалов позволили выполнить компьютерное моделирование электрических полей и токов в исследуемых полупроводниках. На рисунке 2 приведены результаты моделирования электрических и холловских полей в полупроводнике в форме диска.



а) $V=0$



б) $V \neq 0$

Рисунок 2 - Модели эквипотенциальных поверхностей и токовых линий в однородном полупроводниковом образце в форме диска

Для наиболее полного анализа рассмотрена объемная задача о распределении электрического поля токового зонда малой площади на однородной изотропной полупроводниковой пленке (рисунок 3).

Рассмотрены случаи, когда нижняя грань является проводящей (полупроводник на металлической подложке) и непроводящей. В нашей задаче контактная площадка зонда имеет форму квадрата со стороной 2ϵ (такая форма токового зонда позволяет получить аналитическое решение задачи распределения потенциала в пленке). Известно, что основным параметром, характеризующим растекание тока малого зонда, является площадь контактной поверхности, а не его форма.

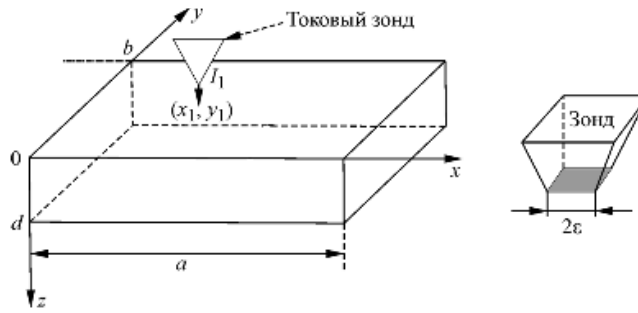


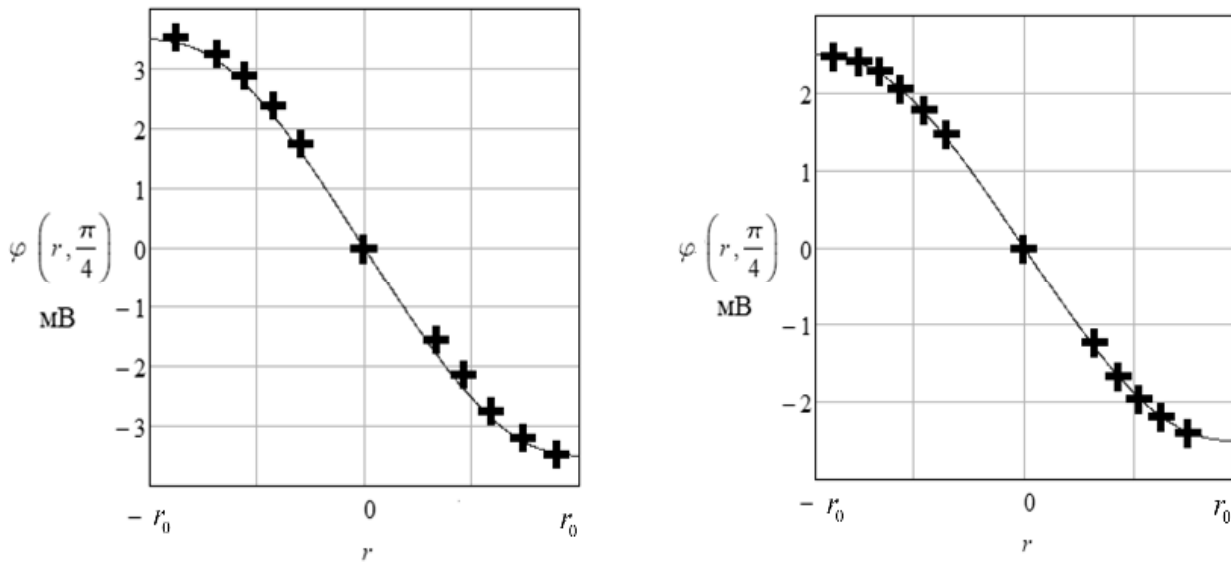
Рисунок 3 - Схема положения токового зонда к исследуемой пленке на металлической или полупроводниковой подложке. I_1 – ток зонда; (x_1, y_1) – координаты центра токового зонда; a, b, d – геометрические размеры пленки

Выражение для распределения потенциала в объеме однородного полупроводникового прямоугольного образца на металлической подложке представимо в виде:

$$\varphi(x, y, z) = \frac{I_1}{ab\sigma} \left[d - z - 4 \sum_{n,k=0}^{\infty} \Theta_{nk} \frac{\text{sh}(\eta_{nk}(z-d))}{\eta_{nk} \text{ch}(\eta_{nk}d)} \cdot \frac{\sin(\alpha_n \varepsilon)}{\alpha_n \varepsilon} \frac{\sin(\beta_k \varepsilon)}{\beta_k \varepsilon} \cos(\alpha_n x_1) \cos(\beta_k y_1) \cos(\alpha_n x) \cos(\beta_k y) \right]; \quad (4)$$

$$\Theta_{nk} = \begin{cases} 1, & n \neq 0 \wedge k \neq 0; \\ 1/2, & n = 0 \wedge k \neq 0 \vee n \neq 0 \wedge k = 0; \\ 0, & n = k = 0; \end{cases} \quad \alpha_n = \frac{\pi n}{a}, \quad \beta_k = \frac{\pi k}{b}, \quad \eta_{nk} = \sqrt{\alpha_n^2 + \beta_k^2}. \quad (5)$$

Приведенные теоретические выражения для двумерных и трехмерных распределений электрических полей проверены экспериментально на монокристаллических образцах кремния и арсенида галлия. Пример сравнения теоретических расчетов и экспериментальных зависимостей приведен на рисунке 4.



а) Экспериментальный образец p-GaAs

б) Экспериментальный образец n-Si

Рисунок 4 – Зависимость экспериментально измеряемого потенциала (мВ) от координаты зонда в круглых образцах при токе $I=10\text{мА}$. Сплошная линия – теоретическая зависимость, экспериментальные значения отмечены «+»

В качестве токовых контактов использовались никелевые контакты, полученные капельным электрохимическим методом, а измерительные - прижим-

ные вольфрамовые зонды. Измерения напряжений проводились дважды при противоположных токах, на рис. 4 представлены средние значения. Получено соответствие теоретических и экспериментальных данных для опытных образцов. Холловские измерения проводились в области слабых магнитных полей (не более 1,2 Тл). В области проводимых измерений наблюдали линейные зависимости токов от напряжений, а также зависимости ЭДС Холла от величины внешнего магнитного поля.

Приведенные в главе 2 расчеты и математические схемы являлись необходимой теоретической базой для предлагаемых методик определения параметров полупроводниковых материалов, приводимых в главах 3 и 4.

В главе 3 рассматриваются методы исследования сопротивлений измерительных омических контактов к полупроводниковым материалам.

В пункте 3.1 предлагается методика исследования переходных сопротивлений контактов на основе двухзондового метода измерения электропроводимости полупроводникового образца. Предложен и испытан достаточно простой метод измерения сопротивлений контактов металл-полупроводник с одновременным контролем проводимости кристаллов и пленок после изготовления контактов. Построена математическая модель растекания тока в приконтактных областях образца. Полученные формулы представлены в удобном для расчетов виде с использованием компьютерной техники. Расчеты были применены для измерения электропроводимости арсенида галлия и определения омических свойств никелевых контактов.

В пункте 3.2 данной работы представлена методика получения никелевых контактных пленок нанометровой толщины на поверхности арсенида галлия. Была изготовлена экспериментальная установка по получению электрохимических пленок на поверхности полупроводника локальным капельным методом, принципиальная схема которой изображена на рисунке 5; для минимизации шероховатости поверхности никеля использовался режим малых токов со временем электролиза 2-10 мин. Для получения металлических контактов никеля в качестве электролита использовался раствор Уоттса.

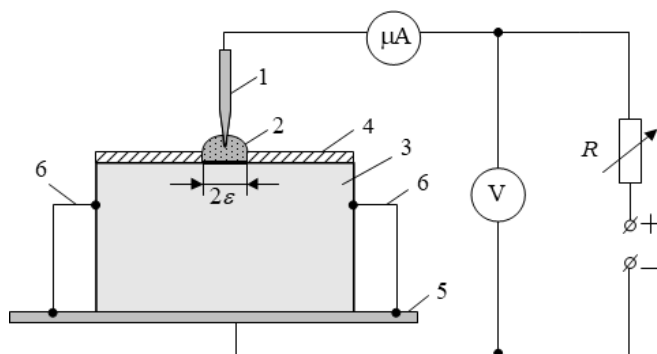


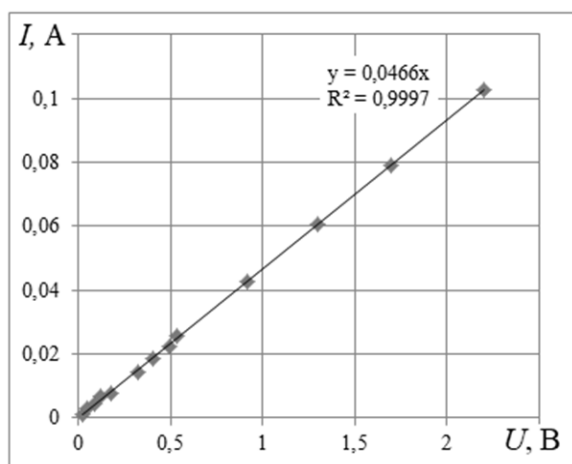
Рисунок 5 - Схема установки по получению металлических точечных контактов на поверхности полупроводника. 1 – металлический зонд; 2 – капля электролита; 3 – арсенид галлия; 4 – оксидный слой на поверхности полупроводника; 5 – металлический столик, 6 – контактные провода

Рассмотрены условия формирования цельной пленки нанометровой толщины и изучены свойства поверхности никелевых контактов на арсениде гал-

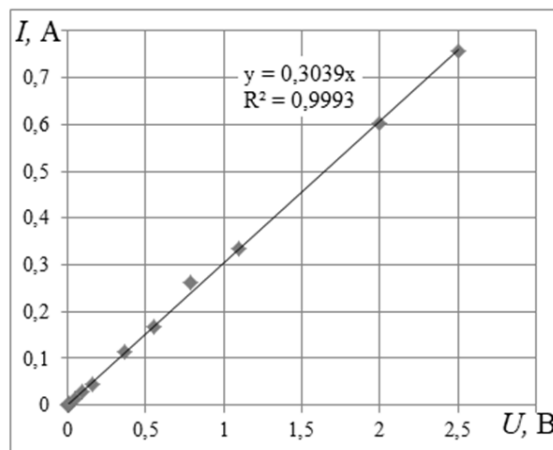
лия. С использованием зондовой микроскопии (СММ-2000) определены параметры шероховатости поверхности никеля, влияющие на эксплуатационные свойства контактных структур. Показано, что формирование цельной никелевой пленки на поверхности GaAs возможно при толщине слоя Ni, превосходящей среднюю шероховатость подложки. С использованием теоретической модели и экспериментальных данных вычислены сопротивления контактов металл-полупроводник и построены их вольтамперные характеристики. Выявлены особенности протекания тока через полученный электрохимическим методом контакт Ni-GaAs. Показано, что структуры Ni-p-GaAs проявляют омические свойства, а вольтамперные характеристики контактов Ni-n-GaAs имеют нелинейную область при напряжениях менее 1,5 вольт.

Выбранная геометрическая форма опытных образцов (рисунок 1) позволяет однозначно определять распределение потенциалов внутри полупроводника и теоретически вычислить величину объемного сопротивления кристалла.

Экспериментальные вольтамперные характеристики полученных опытным путем структур представлены на рисунках 6 и 7. На данных рисунках приведено уравнение прямой зависимости тока от напряжения в линейной области ВАХ и величина достоверности R^2 данной зависимости.

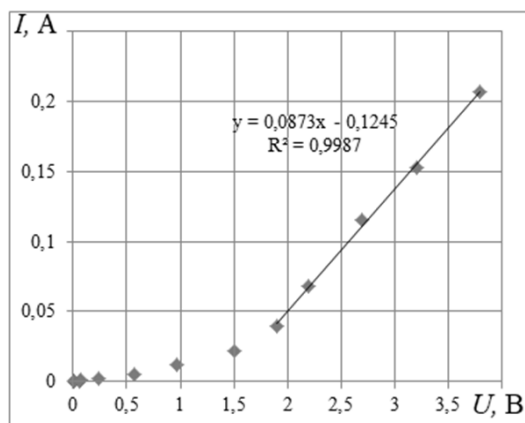


а) образец №1

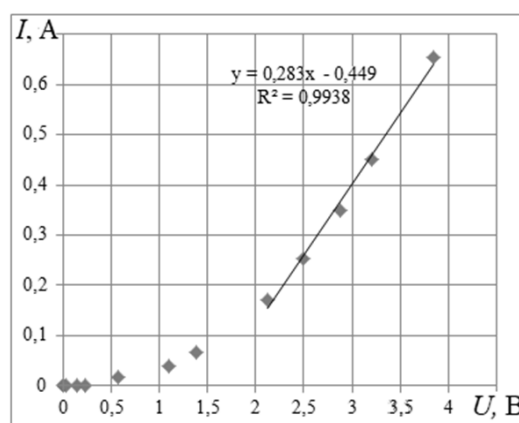


а) образец №2

Рисунок 6 - Вольтамперные характеристики контактов Ni-p-GaAs



а) образец №3



а) образец №4

Рисунок 7 - Вольтамперные характеристики контактов Ni-n-GaAs

Таким образом, описанная технология получения пленок никеля на арсениде галлия позволяет изготавливать качественные однородные измерительные контакты, проявляющие омические свойства для p-GaAs и имеющие нелинейную область для n-GaAs при напряжениях менее 1,5 В.

В четвертой главе диссертации рассмотрены теоретические основы для проведения двух- и четырехзондовых измерений удельной электропроводности неоднородных полупроводниковых материалов. Приведены методики контроля распределения концентрации примесей на основе холловских зондовых измерений.

В пункте 4.1 приведены необходимые теоретические расчеты для обоснования оригинальной методики контроля однородности полупроводниковых пластин по величине удельной электропроводности, учитывающей границы и размеры реального полупроводника, а также координаты токовых и измерительных контактов. Рассмотрены различные случаи расположения токовых и измерительных контактов на прямоугольной и круглой пластинах.

В пункте 4.2 приведены разработанные методики контроля однородности примесей в полупроводниках по данным измерений эффекта Холла. Для экспериментально применяемых слабых магнитных полей $((\mu B)^2 \ll 1)$ рассмотрен общий случай измерения ЭДС Холла при двухзондовых измерениях, позволяющий контролировать распределение примесей в плоскости прямоугольных и круглых полупроводниковых тонких образцов.

В пункте 4.3 диссертации выполнен физико-математический анализ распределения электрических полей при зондовых измерениях в ограниченных искусственно неоднородных полупроводниках, создаваемых методами диффузионного легирования и ионного внедрения примесей.

На практике электропроводимость для диффузионно легированного полупроводника может изменяться в образце с глубиной по более простому экспоненциальному закону [6, 7]:

$$\sigma_1(z) = \sigma_0 \exp(-2pz), \quad (6)$$

или более точно описываться функцией распределения Гаусса:

$$\sigma_2(z) = \sigma_0 \exp(-2\lambda z^2), \quad (7)$$

где σ_0 – поверхностная электропроводимость образца, p и λ – постоянные параметры, определяемые технологией получения неоднородного слоя.

Для полупроводника с ионной имплантацией изменение электропроводности с глубиной может быть описано формулой

$$\sigma_3(z) = \sigma_a \cdot \exp[-2\lambda_a(z - a_0)^2], \quad (8)$$

где a_0 – глубина с максимальной концентрацией примеси, σ_a – пиковая (максимальная) электропроводность (на глубине a_0), λ_a – параметр, определяемый условиями процесса внедрения примесей.

Рассмотренные закономерности изменения проводимости вместе с выражениями для стационарных токов (1) приводят к необходимости решения уравнения Пуассона в ограниченной области полупроводника при неоднородных граничных условиях. В работе впервые получено и проанализировано решение

для распределений электрических полей в неоднородных полупроводниковых структурах с зависимостями проводимости (6) - (8) при зондовых измерениях. Данная задача нами решена с использованием метода разделения переменных.

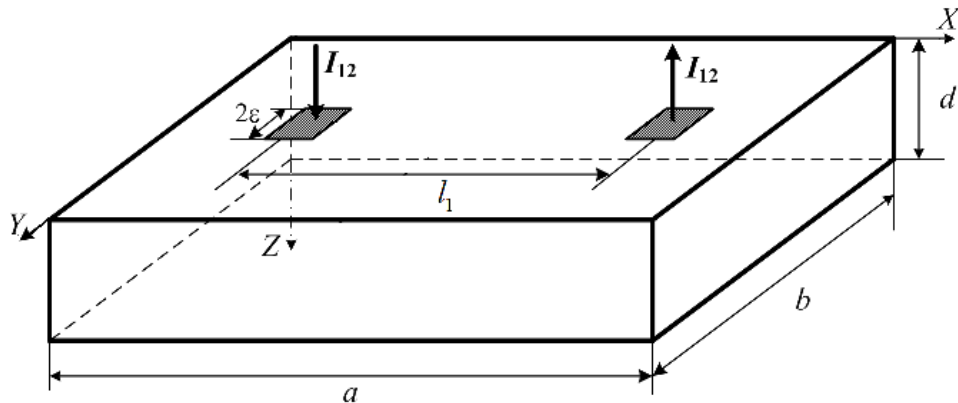


Рисунок 8 - Схема расположения токовых контактов на поверхности исследуемого образца, находящегося на диэлектрической подложке

В частности, для случая зависимости (6) при расположении измерительных контактов по схеме, изображенной на рисунке 8, электрический потенциал в образце имеет вид:

$$\varphi(x, y, z) = \frac{8I_{12}}{\sigma_0 ab \varepsilon^2} \sum_{\substack{k=1,3,5,\dots \\ n=0,2,4,\dots}}^{\infty} \Theta_n (-1)^{\frac{k+n-1}{2}} \frac{\sin(\beta_n \varepsilon) \sin(\alpha_k \varepsilon) \sin(\alpha_k l_1 / 2)}{\alpha_k \beta_n \eta_{kn}^2} \times \\ \times \frac{(\xi_{kn} - p) \exp(-2\xi_{kn} d) \exp(z(p + \xi_{kn})) + (\xi_{kn} + p) \exp(z(p - \xi_{kn}))}{e^{-2\xi_{kn} d} - 1} \cos(\alpha_k x) \cos(\beta_n y), \quad (9)$$

$$\Theta_n = \begin{cases} 1, & \text{при } n \neq 0, \\ 1/2, & \text{при } n = 0, \end{cases} \quad \alpha_k = \frac{\pi k}{a}, \quad \beta_n = \frac{\pi n}{b}, \quad \eta_{kn}^2 = \alpha_k^2 + \beta_n^2, \quad \xi_{kn} = \sqrt{p^2 + \eta_{kn}^2}. \quad (10)$$

Полученные выражения для потенциала позволяют проанализировать распределение потенциала и плотности тока в неоднородном по глубине образце. На основании полученных расчетных формул для потенциала первоначально было выполнено построение эквипотенциальных поверхностей для однородного образца в приближении точечных токовых контактов со следующими относительными размерами: $b/a=1$, $d/a=0,01$, координатами токовых зондов $x_1 = 0,1a$; $x_2 = 0,9a$; $y_1 = y_2 = b/2$. Результат построения распределения потенциала внутри образца на срезе в плоскости контактов представлен на рисунке 9. При проведении расчетов для достижения погрешности вычислений не более 2% потребовалось суммировать ряды Фурье до 400 слагаемых по каждому из индексов. На представленных ниже рисунках масштабы по оси $0x$ и $0z$ не совпадают для наглядности полученных результатов.

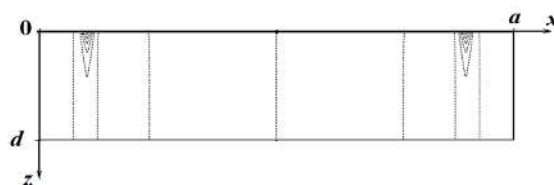


Рисунок 9 – Распределение эквипотенциальных линий в однородном полупроводнике

На рисунке 10 представлен результат распределения эквипотенциальных линий в неоднородном по глубине полупроводнике при экспоненциальной зависимости изменения электропроводимости с глубиной (б) для следующих параметров неоднородности: $p=10/a$ (а), $p=10^2/a$ (б), $p=10^3/a$ (в), $p=10^4/a$ (г).

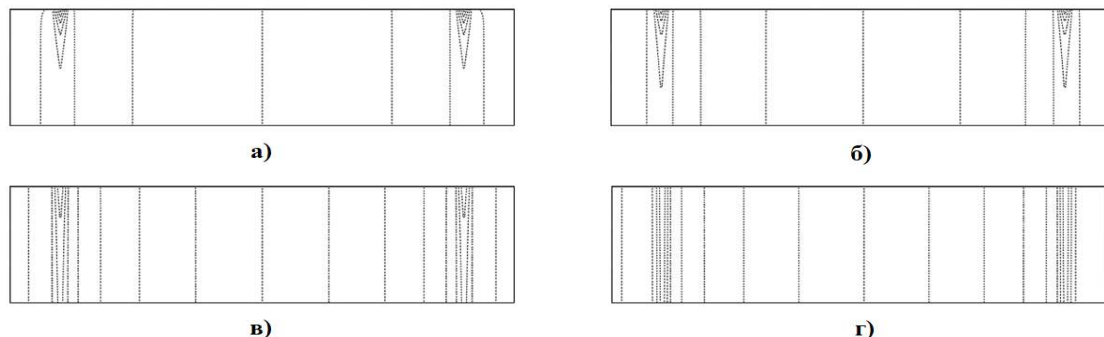


Рисунок 10 – Распределение эквипотенциальных линий в неоднородном полупроводнике для случая экспоненциальной зависимости $\sigma_1(z) = \sigma_0 \exp(-2pz)$,
 а) $p=10/a$, б) $p=10^2/a$, в) $p=10^3/a$, г) $p=10^4/a$

Проведенное моделирование показывает наличие существенного концентрирования электрического поля в приконтактной области, увеличение коэффициента неоднородности p приводит к уменьшению области резкого падения потенциала и более равномерному распределению электрического поля в объеме неоднородной полупроводниковой пластины.

Эквипотенциальные линии на срезе в плоскости Oxz для неоднородного образца, электропроводимость которого изменяется с глубиной по гауссову закону, построены на рисунке 11. При построении эквипотенциальных поверхностей использовались следующие параметры: $a/b=1$, $a/d=100$, $l_1=0,8a$, $\lambda=10a^{-2}$ (а), $\lambda=10^2a^{-2}$ (б), $\lambda=10^3a^{-2}$ (в), $\lambda=10^4a^{-2}$ (г).

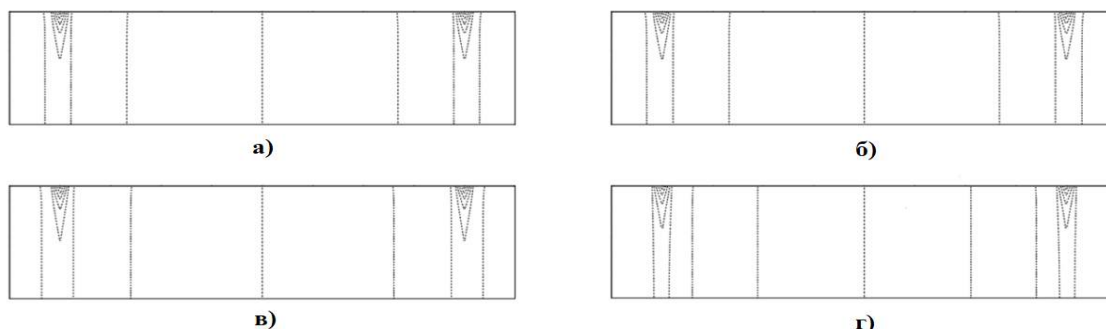


Рисунок 11 – Распределение эквипотенциальных линий в неоднородном полупроводнике для случая неоднородности $\sigma_2(z) = \sigma_0 \exp(-2\lambda z^2)$,
 $a/b=1$, $a/d=100$, $l_1=0,8a$, а) $\lambda=10a^{-2}$, б) $\lambda=10^2a^{-2}$, в) $\lambda=10^3a^{-2}$, г) $\lambda=10^4a^{-2}$

Для практического применения произведенных теоретических расчетов электрических полей предложена разработанная методика определения поверхностной проводимости, которая апробирована экспериментально на диффузионно-легированных образцах кремния. В качестве объекта исследований выбраны хорошо изученные образцы кремния, диффузионно легированные нио-

бием [4]. Результаты измерений и расчетов параметров неоднородных полупроводников представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры диффузионных образцов и опытные данные

№ образца	Параметры зависимости		Размеры образцов			$\langle I_{12}/U_{34} \rangle$, Ом ⁻¹	σ_0 , (Ом·м) ⁻¹
	N_0 , см ⁻³	p , мм ⁻¹	a , мм	b , мм	d , мм		
1	$4,51 \cdot 10^{22}$	$4,27 \cdot 10^4$	9,3	3,5	0,4	0,198	$4,31 \cdot 10^6$
2			9,3	7,0	0,4	0,153	$4,25 \cdot 10^6$
3			11,2	11,0	0,4	0,170	$4,21 \cdot 10^6$

В современной технологии полупроводниковых материалов [3, 5] практически значимы виды неоднородностей, реализуемые при производстве структур n^+-n и p^-p . Для таких структур в работе (пункт 4.4) определено распределение электрического потенциала при расположении двух токовых контактов на верхней грани неоднородного образца, находящегося на непроводящей и металлической подложках (рис. 12). Выражение для потенциала представлено в виде двойного ряда Фурье.

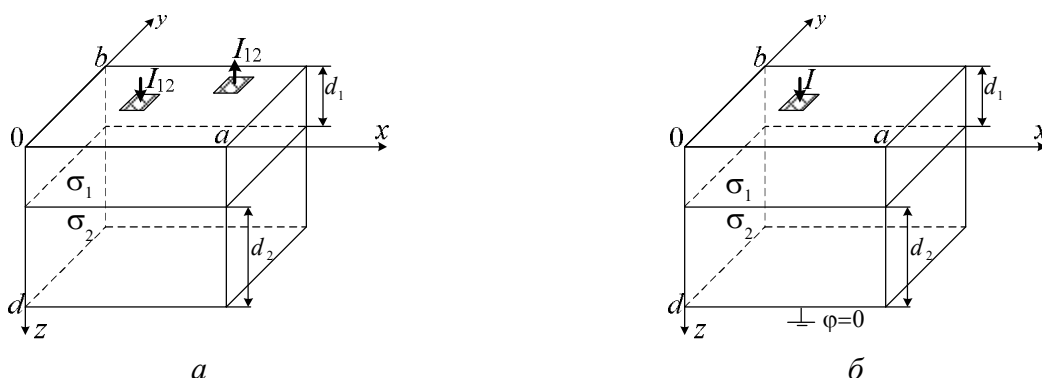


Рисунок 12 – Схема расположения контактов к неоднородной двухслойной структуре: а) два токовых контакта примыкают к одной плоской грани (непроводящая подложка), б) один токовый контакт на верхней грани, нижняя граница заземлена (металлическая подложка)

На практике форму зонда трудно контролировать, поэтому основным параметром здесь является активная площадь контакта. В нашей модели для получения расчетной формулы мы приняли, что токовые контакты представляют собой квадратные площадки малых размеров со стороной 2ε . Центр первого токового контакта, через который ток втекает в образец, имеет координаты (x_1, y_1) , второго токового контакта, через который ток вытекает из образца, – (x_2, y_2) .

Полученные нами расчетные формулы для вычисления потенциала внутри образца позволяют выполнить моделирование распределения электрического поля в двухслойных полупроводниковых структурах путем построения эквипотенциальных поверхностей и токовых линий. Такие компьютерные модели позволяют наглядно показать особенности конфигурации электрического поля в двухслойных структурах. На рисунке 13 представлены эквипотенциальные поверхности (обозначены пунктиром) и токовые линии (обозначены сплошной

линией) для образца, находящегося с малыми токовыми контактами в плоскости $y - y_1 = 0$. Размеры образца: $a = b = 5d$, $\varepsilon = 0,1d$. Толщина верхнего слоя полупроводника равна толщине нижнего слоя $d_1 = d_2$. Число эквипотенциальных поверхностей и токовых линий равно 20. Рисунок 13 (а – в) соответствует случаю, когда на верхнюю грань (проводимостью σ_1) в центре образца поставлен один токовый зонд, а нижняя грань образца находится на проводящей подложке, потенциал на которой равен нулю. Рисунок 13 (г – е) соответствует двухзондовому методу проведения измерений, при котором на верхней грани находятся два токовых зонда, а сам образец располагается на диэлектрической подложке. При этом координаты центров токовых зондов: $y_1 = y_2 = b/2$, $x_1 = a/4$, $x_2 = 3a/4$, $z = 0$.

Из полученных результатов моделирования видно выполнение поставленных граничных условий на поверхностях полупроводников. Рисунок 13 применим для случаев резкого изменения проводимости по глубине, что находит применение для диффузионных и эпитаксиальных структур. Рисунок 13 (д – е) показывает значительную неоднородность распределения токовых линий в слоях с разной электропроводимостью для образца, находящегося на диэлектрической подложке, особенно в сравнении с в однородным образцом (рисунок 13,г).

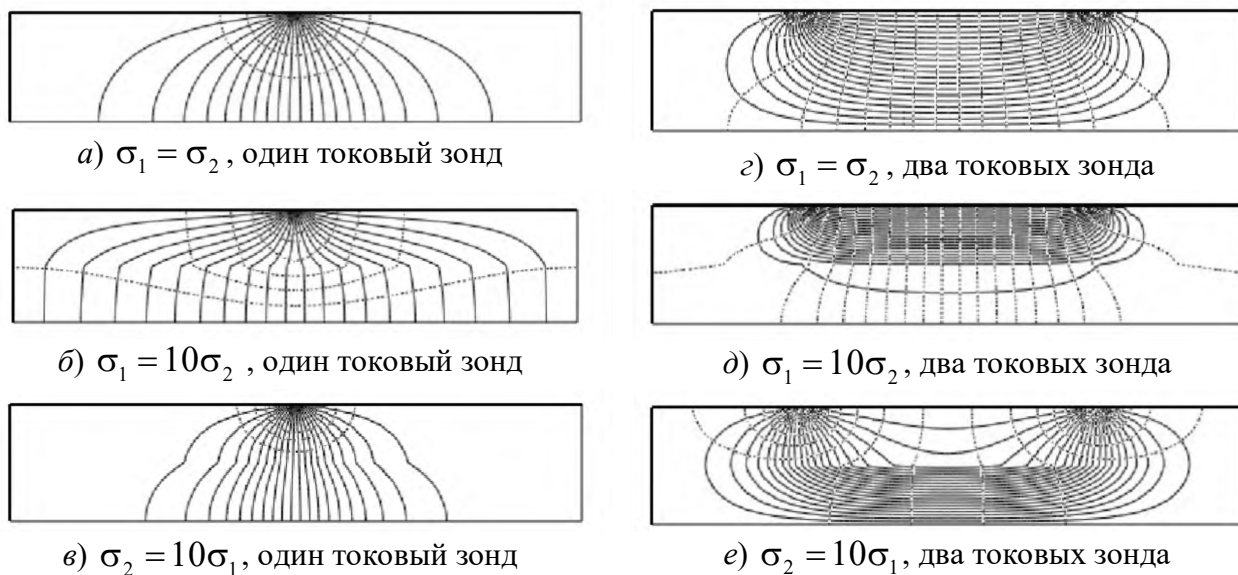


Рисунок 13 – Теоретические модели распределений эквипотенциальных поверхностей и токовых линий в двухслойных структурах

Полученные нами теоретические расчеты и компьютерные модели показывают, что неоднородность проводимости слоев существенно влияет на распределение электрического потенциала и токовых линий при зондовых методах исследования эпитаксиальных полупроводниковых структур. В частности, существенно отличается концентрирование плотности тока в слоях с различной проводимостью, электрическое поле в приконтактной области становится более неоднородным по отношению к случаю однородного полупроводника.

Для практического применения выполненных расчетов теоретически обоснована и экспериментально апробирована методика определения удельной электропроводности эпитаксиальных $n-n^+$ и $p-p^+$ полупроводниковых материалов. Результаты апробации предложенной методики представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Параметры эпитаксиальных структур $n-n^+$ и опытные данные

№ образца, материал	Толщина нижнего n^+ слоя d_2 , мкм	Толщина верхнего n слоя d_1 , мкм (примесь)	σ_2 (n^+ слоя), $(\text{Ом}\cdot\text{см})^{-1}$	$\left(\frac{U_{34}}{I_{12}}\right)_{\text{экс}}$, Ом	σ_1 (n слоя), $(\text{Ом}\cdot\text{см})^{-1}$		Отклонение эксп. значения
					Экспер. значения	Паспорт. данные образца	
№1 Si	400	15 (n, P)	1,43	$6,74\cdot 10^4$	0,103	0,095	8,4 %
№2 GaAs	20	15 (n, Te)	0,54	$2,98\cdot 10^6$	0,054	0,050	8,0 %

Полученное нами экспериментальное значение удельной электропроводности наименее легированного слоя находится в пределах погрешности менее 9% относительно паспортного значения.

Основные выводы и результаты

1. Получены выражения для распределений электрических полей при контактных методах измерений удельной проводимости и коэффициента Холла в ограниченных полупроводниковых прямоугольных и круглых образцах. Выполнено компьютерное моделирование полученных потенциалов и токов в исследуемых полупроводниках. Показано существенное концентрирование электрических полей в областях токовых контактов. Проведена экспериментальная проверка теоретических распределений потенциалов.
2. Выявлена более значимая локализация силовых характеристик электрического поля вблизи токовых контактов в диффузионно-легированных полупроводниках по отношению к однородным материалам. Показано существенное концентрирование потенциала в приконтактных областях и одновременное вытеснение плотности тока в объем высоколегированной подложки полупроводниковых эпитаксиальных $n-n^+$ и $p-p^+$ структур с плоскими границами при зондовых измерениях на постоянном электрическом токе. Электродинамические особенности протекания тока в неоднородных полупроводниках проверены на тестовых структурах при проведении двух- и четырехзондовых измерений.
3. Теоретически обоснованы новые методики контроля однородности и выявления локальных неоднородностей полупроводниковых дисков и образцов прямоугольной формы по величине удельной электропроводности и результатам зондовых измерений ЭДС Холла. Полученные методы позволяют контролировать однородность полупроводниковых материалов при различном положении зондов пробника на исследуемых образцах.

4. Разработаны специальные контактные методики определения величин поверхностной электропроводимости (σ_0) и геометрических параметров распределения (залегания) примесей диффузионно- и ионно-легированных полупроводников, также эпитаксиальных структур n-n⁺ и p-p⁺ с резким изменением удельного сопротивления по глубине. Получены выражения для необходимых разностей потенциалов и поправочных множителей, учитывающих концентрацию плотности тока вблизи токовых контактов.
5. Реализован точечный электрохимический метод получения контактов никеля из раствора Уоттса на поверхности арсенида галлия. Показана низкая шероховатость поверхности полученной металлической пленки на полупроводнике. Выявлены особенности протекания тока через полученный электрохимическим методом контакт Ni-GaAs. Показано, что исследуемые структуры Ni-p-GaAs проявляют омические свойства, а вольтамперные характеристики контактов Ni-n-GaAs имеют нелинейную область при напряжениях менее 1,5 вольт.

Цитированная литература

- [1]. Yadav, N. Impact of Gate Length and Doping Variation on the DC and Analog/RF Performance of sub – 3 nm Stacked Si Gate-All-Around Nanosheet FET / N. Yadav, S. Jadav, G. Saini // Silicon. – 2023. – V. 15. - P. 217-228.
- [2]. Yamamoto, T. Advanced process technologies for continuous logic scaling towards 2 nm node and beyond / T. Yamamoto // IEEE International Conference on Interconnect Technology, 27-30 June 2022. – P. 40-41.
- [3]. Sze, S.M. Physics of Semiconductor Devices 4th Edition / S.M. Sze, Y. Li, K.K. Ng. – Wiley, 2021. – 944 p.
- [4]. Гетеродиффузия ниобия, индия, олова при формировании двухслойных систем на монокристаллическом кремнии / Н.Н. Афонин [и др.] // Журнал неорганической химии. – 2011. – Т. 56, №5. – С. 821-825.
- [5]. Бахрушин, В.Е. Получение и физические свойства слаболегированных слоев многослойных композиций / В.Е. Бахрушин. – Запорожье: ЗИГМУ, 2001. – 248 с.
- [6]. Тилл, У. Интегральные схемы: Материалы, приборы, изготовление (пер. с англ.) / У. Тилл, Дж. Лаксон. – М.: Мир, 1985. – 504 с.
- [7]. Диффузия фосфора и галлия из напыленного слоя фосфида галлия в кремний / Н.Ф. Зикриллаев [и др.] // Физика твердого тела. – 2022. – Т. 64, №11. – С. 1648-1655.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Статьи в журналах перечня ВАК, в изданиях Scopus и Web of Science:

1. Лузянин, С.Е. Контроль однородности полупроводниковых пластин и структур по их электропроводимости / С.Е. Лузянин, Н.Н. Поляков // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2002. – Т. 68. – № 9. – С. 42-45.
2. Филиппов, В.В. Методика определения электропроводности неоднородных по глубине полупроводниковых пленок / В.В. Филиппов, С.Е. Лузянин, Е.Н. Бормонтов // Конденсированные среды и межфазные границы. – 2012. – Т. 14. – № 3. – С. 338-341.

3. Filippov, V.V. Mathematical modeling of electric potential in semiconductors with heterogeneous dopant profile / V.V. Filippov, S.E. Luzyanin // *Advanced Studies in Theoretical Physics*. – 2014. – Vol. 8. – No 26. – P. 1149-1156.
4. Филиппов, В.В. Моделирование электрических полей в неоднородных полупроводниках и композитных структурах при зондовых измерениях / В.В. Филиппов, С.Е. Лузянин, В.М. Емельянов // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии*. – 2019. – Т. 9. – № 3(32). – С. 64-78.
5. Technique of specific conductivity measurement of anisotropic semiconductor plates and films / V.V. Filippov, S.V. Mitsuk, S.E. Luzyanin, V.P. Tigrov // *Acta Physica Polonica A*. – 2020. – Vol. 138. – No 6. – P. 759-762.
6. Лузянин, С.Е. Методика измерения электропроводимости диффузионно-легированных полупроводников и сопротивления контактов металл-полупроводник / С.Е. Лузянин, В.В. Филиппов // *Прикладная физика*. – 2022. – № 6. – С. 43-50.
7. Филиппов, В.В. Особенности формирования контактов Ni-GaAs, получаемых при электролизе и их электрофизические свойства / В.В. Филиппов, С.Е. Лузянин, К.А. Богоносков // *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки*. – 2022. – № 4. – С. 76-91.
8. Filippov, V.V. Electric Field Mathematical Modelling at Probe Measurement in Anisotropic Semiconductor Films / V.V. Filippov, S.V. Mitsuk, S.E. Luzyanin // *Proceedings – 2019 1st International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA 2019*. Lipetsk, 20-22 November 2019. – Lipetsk: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. – P. 465-468.
9. Filippov, V.V. Measuring the Resistance of Metal-Semiconductor Contacts Produced by Drop Electrochemical Method / V.V. Filippov, S.V. Mitsuk, S.E. Luzyanin // *Proceedings – 2020 2nd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA 2020: 2, Virtual, Lipetsk, 10–13 November 2020*. – P. 871-875.

Объекты интеллектуальной собственности:

10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016616554 Российская Федерация. ModelHoll-2015: № 2016610419: заявл. 12.01.2016; опубл. 15.06.2016 / С.Е. Лузянин.

Публикации в других изданиях:

11. Лузянин, С.Е. Исследование переходных контактных сопротивлений к полупроводникам / С.Е. Лузянин, Н.Н. Поляков // *Сборник тезисов докладов Всероссийской научно-технической конференции «Диагностика веществ, изделий и устройств»*. – Орел: ОрелГТУ, 1999. – С. 191.
12. Лузянин, С.Е. Измерение сопротивлений контактов и контроль однородности по удельному сопротивлению полупроводниковых пластин / С.Е. Лузянин, Н.Н. Поляков // *Электроника и информатика – XXI век: Третья Междунар. науч.-техн. конф.* – М: МИЭТ, 2000. – С. 172-173.
13. Лузянин, С.Е. Моделирование эффекта Холла для полупроводниковых образцов круглой формы / С.Е. Лузянин // *Информационные технологии в процессе подго-*

- товки современного специалиста: Межвузовский сборник. – Липецк: ЛГПУ, 2001. – Т. 1. – С. 118-126.
14. Лузянин, С.Е. Измерение электропроводимости неоднородных полупроводников / С.Е. Лузянин, Н.Н. Поляков // Сборник тезисов докладов 1-й Российской конференции молодых ученых по физическому материаловедению. – Калуга: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – С. 86.
 15. Лузянин, С.Е. Об исследовании неоднородных по глубине полупроводниковых слоев контактными методами / С.Е. Лузянин, Н.Н. Поляков // Проблемы физики и технологии ее преподавания: Межвузовский сборник научных трудов Вып. 5. – Липецк: ЛГПУ, 2001. – С. 26-31.
 16. Лузянин, С.Е. Моделирование электростатических полей в неоднородных полупроводниковых пленках / С.Е. Лузянин, Н.Н. Поляков // Сборник тезисов докладов Международной конференции «Физика электронных материалов». – Калуга: КГПУ им. К.Э. Циолковского, 2002. – С. 406-407.
 17. Лузянин, С.Е. Методика определения электропроводности неоднородных по глубине полупроводниковых пленок / С.Е. Лузянин, Н.Н. Поляков, В.В. Филиппов // Радиолокация, навигация, связь: Материалы XV Международной конференции. – Воронеж: ВГУ, 2011. – Т. 1. – С. 818-823.
 18. Измерение сопротивления контактов металл-полупроводник, полученных капельным электрохимическим методом / Н.Н. Поляков, С.В. Мицук, В.В. Филиппов, С.Е. Лузянин // Вестник Липецкого государственного педагогического университета. Серия МИФЕ: математика, информационные технологии, физика, естествознание. – 2013. – № 1 (4). – С. 42-50.
 19. Распределение электрических полей при холловских измерениях в анизотропных полупроводниковых кристаллах / В.В. Филиппов, А.А. Заворотный, С.В. Мицук, С.Е. Лузянин // Физико-математическое моделирование систем: Материалы XVIII Международного семинара. Часть 1 – Воронеж: ВГТУ, 2017. – С. 77-82.
 20. Филиппов, В.В. Распределение электрических полей в полупроводниковых кристаллах с имплантированными примесями / В.В. Филиппов, С.Е. Лузянин // Физико-математическое моделирование систем: материалы XX Международного семинара. Часть 1 – Воронеж: ВГТУ, 2019. – С. 136-139.
 21. Лузянин, С.Е. Возможности исследования переходных сопротивлений контактов к полупроводниковым кристаллам / С.Е. Лузянин, Ю.Ю. Сысоева // Наука молодых – будущее России: сборник научных статей 4-й Международной конференции – Курск: ЮЗГУ, 2019. – С. 183-187.
 22. Филиппов, В.В. Компьютерное моделирование электрических полей в неоднородных полупроводниках и композитных структурах при зондовых измерениях / В.В. Филиппов, С.Е. Лузянин // Деформация и разрушение материалов и наноматериалов: VIII Международная конференция – М: ИМЕТ РАН, 2019. – С. 772-773.
 23. Филиппов, В.В. Исследование вольт-амперных характеристик контактов никель-арсенид галлия / В.В. Филиппов, С.Е. Лузянин // Проблемы естественных, математических и технических наук в контексте современного образования: материалы Всероссийской научно-практической конференции. Липецк, 27–28 ноября 2022 года. – Липецк: ЛГПУ имени П.П. Семенова-Тянь-Шанского, 2022. – С. 123-126.

Подписано в печать __. __. 2023 г.
Формат 60×84 1/16.
Бумага для копировальной техники. Гарнитура Таймс.
Усл. печ. л. 1.2. Тираж 100 экз.
Заказ № ____.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Липецкий государственный педагогический университет
имени П.П. Семенова-Тян-Шанского»
398020, г. Липецк, ул. Ленина, 42

Отпечатано в отделе редакционно-печатной деятельности
ЛГПУ имени П.П. Семенова-Тян-Шанского
398020, г. Липецк, ул. Ленина, 42