

*На правах рукописи*

**Королев Сергей Александрович**

**МИКРОВОЛНОВАЯ МИКРОСКОПИЯ  
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР**

Специальность 01.04.01 — Приборы и методы экспериментальной физики

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород — 2018

Работа выполнена в Институте физики микроструктур РАН — филиале Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»

Научный руководитель: Резник Александр Николаевич,  
доктор физико-математических наук,  
ведущий научный сотрудник,  
Институт физики микроструктур Российской академии наук

Официальные оппоненты: Канаков Владимир Анатольевич,  
доктор физико-математических наук,  
научный руководитель,  
ООО "АФС 52"

Трухин Валерий Николаевич,  
кандидат физико-математических наук,  
старший научный сотрудник,  
Физико-технический институт имени  
А.Ф. Иоффе Российской академии наук

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»

Защита состоится 25 октября 2018 г. в \_\_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д 002.069.03 при Институте физики микроструктур РАН по адресу: 603087, Нижегородская обл., Кстовский р-н, д. Афонино, ул. Академическая, д. 7, ауд. 237.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института физики микроструктур РАН и на сайте [http://ipmras.ru/UserFiles/Diss/KorolevSA/Dissertation\\_KorolevSA.pdf](http://ipmras.ru/UserFiles/Diss/KorolevSA/Dissertation_KorolevSA.pdf).

Автореферат диссертации разослан \_\_\_\_\_ сентября 2018 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 002.069.03  
доктор физико-математических наук

Водолазов Д. Ю.

# Общая характеристика работы

## Актуальность темы

Для исследования проводящих свойств полупроводниковых материалов и структур особенно ценными представляются неразрушающие методы. Среди них интенсивно развиваются микроволновые методы, использующие объёмные резонаторы и волноводы различной конфигурации. С уменьшением размеров полупроводниковых структур появилась необходимость создания измерительных систем, способных изучать свойства объектов на микро- и наномасштабах. Однако на этом пути возникает трудность, связанная с ограничением на разрешающую способность волновой диагностики, которая по порядку величины не может быть лучше длины волны  $\lambda$ . Данное ограничение можно преодолеть, используя ближнее электромагнитное поле, которое локализовано на масштабе размера апертуры антенны  $D$ . Масштаб  $D$  определяет разрешающую способность устройства. При  $D \ll \lambda$  достигается субволновое разрешение.

Зонд ближнепольного сканирующего микроволнового микроскопа (БСММ), как правило, представляет собой микроволновый резонатор, на одном из концов которого сформирована электрически малая антенна [1]. Измеряются характеристики микроволнового резонатора — резонансная частота  $f_0$  и добротность  $Q_0$ , которые меняются при взаимодействии антенны с образцом. Современные серийно выпускаемые БСММ обладают микронным и субмикронным разрешением вплоть до 30 – 50 нм [2, 3], а в приборе, работающем в режиме туннельного пробоя, достигается атомарное (субнанометровое) разрешение [4]. Большой объем исследований выполнен с микроскопами среднего (1 – 1000 мкм) разрешения [5–7], которые также имеют хорошие перспективы практических применений. Однако, несмотря на достигнутые высокие эксплуатационные характеристики БСММ, до сих пор не выработан практически пригодный метод количественного определения электрических параметров исследуемых объектов. Для решения этой проблемы предпринимаются огромные усилия, включая данную работу. Здесь можно выделить два основных подхода. В эмпирическом подходе определение параметров образца производится по калибровочной характеристике, полученной в измерениях эталонных образцов. Недостатком данного подхода является то, что требуется достаточно большое число эталонов, по своим свойствам предельно близких к исследуемым образцам. Более предпочтительным представляется подход, в котором связь данных измерений БСММ с параметрами среды устанавливается с помощью теоретической модели. В этом случае параметры среды определяются путём решения обратной задачи.

Успех решения обратной задачи во многом зависит от точности используемой теоретической модели БСММ. Достаточную точность обеспечивает решение уравнений электродинамики методом конечных элементов [8–10]. Вместе с тем, такой недостаток данного подхода, как большое время вычислений, дела-

ет его малопригодным для практического применения. Наибольшие надежды в настоящее время связаны с аналитическими моделями, обеспечивающими высокую скорость расчётов. Реальная форма зондов БСММ, как правило, не поддаётся простому описанию, необходимому для определения функции источников ближнего поля при построении электродинамической модели. В результате, приходится использовать различные упрощающие предположения, следствием чего стало появление большого числа разнообразных аналитических моделей [5, 11, 12]. Практически все они разработаны применительно к достаточно простым объектам — объёмно-однородным образцам, либо структурам плёнка-подложка. В работе [13] предложена модель, позволяющая описывать взаимодействие БСММ со средой, имеющей произвольный глубинный профиль электрических параметров (комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей). Данное качество модели чрезвычайно полезно при исследовании полупроводниковых структур, как правило, представляющих собой многослойные планарные среды. Предложенная модель основана на решении уравнений электродинамики со сторонним источником поля в виде симметричной электродипольной антенны, распределение тока которой задаётся некоторой модельной функцией. Результаты работы [13] неприменимы для зонда коаксиальной геометрии (КЗ), который наиболее перспективен для использования в микроскопии микронного и нанометрового разрешения. Такое ограничение модели [13] связано с тем, что симметричная электродипольная антенна не описывает функцию источника ближнего поля КЗ, в котором переменный заряд сконцентрирован на центральном (игольчатом) проводнике коаксиала. В данной работе построена теоретическая модель БСММ на основе КЗ, взаимодействующего с произвольной плоскостойкой средой.

Одним из основных факторов, снижающих точность аналитических моделей, как было сказано, является упрощенное описание зонда. При этом геометрия модели зонда заметно отличается от его реальной формы. В результате, в процессе диагностики возникает необходимость определять не только параметры образца, но также и модели зонда. Другими словами, описание взаимодействия БСММ с образцом должно быть самосогласованным. В работе [14] предложен способ решения указанной проблемы путем использования дополнительных калибровочных измерений для определения подгоночных параметров аналитической модели. В качестве калибровочных эталонов применяются образцы с простой внутренней структурой для характеристики сложноструктурированных полупроводников. На основе данного подхода в [14] разработан метод измерения слоевого сопротивления полупроводниковых плёнок на диэлектрической подложке. В настоящей диссертации метод [14] распространён на измерение сопротивления проводящего слоя многослойной полупроводниковой структуры. Использование КЗ в данной работе позволило достичь микронного разрешения, которое не достигалось в работе [14], где применялся зонд полосковой геометрии (ПЗ). Возможности разработанного метода продемонстрированы на ряде структур, включая плёнки GaN на сапфировой подложке, транзисторные гетероструктуры на основе твёрдых растворов (Al,Ga)N и (Al,Ga,In)As. Наиболее отчётливо достоинства метода проявились

в исследованиях структур полупроводникового алмаза, имевших сильную латеральную неоднородность проводимости как подложки, так и эпитаксиального слоя.

Развитие методов ближнепольной микроскопии стимулировало постановку задач диагностики сложных объектов, внутренняя структура которых характеризуется большим числом параметров. Подобные задачи принято называть томографией, в общем случае подразумевающей получение послойного изображения объекта. Толщины слоёв полупроводниковых структур могут достигать значений  $\sim 1$  нм, что требует соответствующего разрешения измерительного устройства. При этом зачастую стоит задача исследования латеральной неоднородности структур, вследствие чего томографические методы должны иметь микро- и наноразрешение не только по глубине, но и вдоль поверхности образца. Указанное разрешение может быть достигнуто при помощи БСММ. Возможность реализации ближнепольной микроволновой томографии (БМТ) полупроводниковых структур с микро- и наноразрешением продемонстрирована в [15] на основе теории [13] путём компьютерного моделирования. В данной работе указанная возможность впервые подтверждена экспериментально на примере двухслойной среды, характеризуемой тремя искомыми параметрами.

## **Цели и задачи**

Целью диссертационной работы является развитие теории БСММ; развитие метода количественной характеристики полупроводниковых материалов и структур с помощью БСММ; исследование полупроводниковых материалов и структур с помощью БСММ; развитие метода БМТ.

Для достижения цели диссертации поставлены следующие задачи.

- Решение электродинамической задачи взаимодействия КЗ со средой, имеющей произвольный глубинный профиль комплексной диэлектрической проницаемости. Апробация построенной модели в эксперименте.
- Распространение метода микроволновой микроскопии на измерение сопротивления проводящего слоя многослойной полупроводниковой структуры. Достижение микронной латеральной разрешающей способности измерения сопротивления слоя. Применение метода в исследованиях полупроводниковых плёнок и транзисторных гетероструктур. Анализ точности метода.
- Исследование монокристаллических алмазных подложек и дельта-легированных эпитаксиальных алмазных слоёв с помощью БСММ. Сравнение результатов микроволновой микроскопии с измерениями альтернативными методами.
- Разработка и исследование метода БМТ микронного латерального разрешения и его демонстрация в эксперименте.

## Научная новизна

1. Получено аналитическое решение задачи об импедансе взаимодействия КЗ БСММ со средой, имеющей произвольный глубинный профиль комплексной диэлектрической проницаемости.
2. Метод микроволновой микроскопии распространён на измерение сопротивления проводящего слоя многослойной полупроводниковой структуры. Для повышения точности измерения слоевого сопротивления предложено использовать в качестве эталонных образцов полупроводниковые плёнки. Достигнута микронная разрешающая способность метода за счёт использования КЗ. Теоретической основой метода является разработанная модель монопольной антенны, описывающая взаимодействие КЗ с плоскостистой средой. С помощью сконструированного БСММ получены латеральные профили сопротивления канала транзисторных гетероструктур.
3. При помощи БСММ протестированы алмазные подложки и эпитаксиальные слои, в которых обнаружена гигантская латеральная неоднородность проводимости. Получены электрофизические характеристики эпитаксиального слоя, не искажённые шунтирующим влиянием неоднородно проводящей подложки. Установлена корреляция высокоомной области эпитаксиального слоя с низлежащим мезоскопическим дефектом подложки.
4. Разработан и апробирован в эксперименте метод БМТ с микронным латеральным разрешением.

## Научная и практическая значимость

- Полученное аналитическое решение составило теоретическую основу метода измерения сопротивления проводящего слоя многослойной полупроводниковой структуры при помощи КЗ. Метод позволяет локально и без разрушения измерять сопротивление с микронным латеральным разрешением.
- Исследования алмазных подложек и структур позволили выявить и измерить распределение проводимости с характерным размером неоднородностей 0.1 – 1 мм. Удалось определить электрофизические параметры эпитаксиального слоя, не искажённые шунтирующим влиянием неоднородно проводящей подложки.
- БМТ позволяет исследовать глубинные электрофизические свойства сложноструктурированных объектов с микронным латеральным разрешением.

## Методы исследования

Взаимодействие зонда БСММ с плосконеоднородной средой анализируется при помощи теории антенн и теории распространения электромагнитных полей. Импеданс зонда, рассматриваемого как антенна, находится с использованием теоремы Пойнтинга. Применяется разложение полей и источников в пространственный спектр Фурье, что позволяет корректно учесть волновую и квазистатическую части спектра. При расчёте спектральных компонент полей вводятся локальные коэффициенты отражения и прохождения, которые рассчитываются методом "итерационной прогонки".

Для определения параметров тестируемых структур используется метод микроволновой микроскопии. Применяются КЗ и ПЗ, встроенные в качестве сменных модулей в систему сканирующего зондового микроскопа (СЗМ) СММ-2000 (АО «Завод ПРОТОН»). Определение информативных параметров БСММ (резонансной частоты и добротности) производится на основе измерений резонансной характеристики зонда. В этих измерениях используется векторный анализатор цепей E8361A PNA Series (Keysight Technologies) и прилагаемые к прибору методики калибровки. Для решения обратной задачи диагностики с помощью КЗ используется разработанная модель монополярной антенны. Подгоночные параметры модели определяются из дополнительных калибровочных измерений. В качестве калибровочных эталонов используется два набора образцов с известными электродинамическими характеристиками: диэлектрические/полупроводниковые пластины и полупроводниковые плёнки на диэлектрической подложке. Экспериментальная верификация разработанного метода и оценка его точности выполнена путём сравнения данных измерений, полученных микроволновыми зондами разной геометрии, со стандартными измерениями методом ван дер Пау (ВДП).

Для исследования алмазных подложек и эпитаксиальных структур помимо разработанного метода микроволновой микроскопии и стандартного ВДП применены дополнительные методы диагностики — вторично ионная масс-спектрометрия (ВИМС) и интерферометрия белого света. Измерения ВДП проводились в двух геометриях: в геометрии образца (ВДП-О) и в локальной геометрии холловского креста (ВДП-Л). В случае ВДП-О омические контакты формировались по углам квадратного алмазного образца, и измерялось сопротивление, усреднённое по всей площади образца. Для реализации ВДП-Л на поверхности образца вытравливались пять холловских крестов, так что вне крестов эпитаксиальный слой удалялся. По углам каждого креста формировались омические контакты, и проводились локальные измерения сопротивления структуры в области креста.

Метод БМТ реализован в эксперименте с диодной структурой, на поверхность которой нанесена антенная матрица в виде концентрических микроконтактов. Спектр импеданса антенн измерен на зондовой станции PM5 (Cascade Microtech) с помощью микроволновых зондов |Z| Probe (Cascade Microtech). Предварительный анализ возможностей метода и его точности выполнен по данным компьютерного моделирования. Метод решения обратной задачи ос-

нован на минимизации многомерной функции невязки. Компьютерная программа минимизации написана с использованием алгоритма Нелдера-Мида.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Взаимодействие КЗ БСММ с плоскостойкой средой может быть количественно описано предложенной аналитической моделью, основанной на квазистатическом решении задачи об излучении в ближней зоне монополярной антенны.
2. Метод микроволновой микроскопии позволяет бесконтактным способом измерять сопротивление проводящих слоёв в диэлектрической матрице многослойных полупроводниковых структур с микронным латеральным разрешением.
3. Метод микроволновой микроскопии даёт возможность исследовать латеральное распределение проводимости плёнок в условиях шунтирующего влияния неоднородно проводящей подложки.
4. Метод БМТ позволяет получить трёхмерное распределение электрических характеристик полупроводниковых структур с микронным латеральным разрешением.

### **Степень достоверности и апробация результатов**

Теория БСММ разработана в рамках стандартных подходов теории антенн и теории распространения электромагнитных полей. Развита модель подтверждена экспериментально. В основе предложенного метода микроволновой микроскопии лежит верифицированная теория и хорошо известный метод решения обратной задачи. Метод апробирован на разнообразных структурах, полученные результаты согласуются с измерениями стандартным ВДП. Исследования алмазных структур были проведены различными методами, результаты измерений которых согласуются между собой. Измерения БМТ проводятся с помощью калиброванного коммерческого оборудования, результаты измерений обрабатываются с помощью протестированной программы, реализованной на основе хорошо известного алгоритма минимизации функции нескольких переменных. Результаты, полученные методом БМТ, согласуются со значениями, предоставленными производителем структур.

Диссертация выполнена в ИФМ РАН в период с 2012 по 2018 гг. Основные положения и результаты диссертационной работы обсуждались на семинарах ИФМ РАН, а также были представлены на российских и международных конференциях: II Всероссийской микроволновой конференции (Москва, 2014 г.), XIX Международном симпозиуме "Нанозлектроника и нанопластика" (Нижний Новгород, 2015 г.), VI Всероссийской молодёжной конференции по фундаментальным и инновационным вопросам современной физики (Москва, 2015 г.), II Российско-белорусской научно-технической конференции "Элементарная база отечественной радиоэлектроники: импортозамещение и применение" им. О. В.



Лосева (Нижний Новгород, 2015 г.), III Всероссийской микроволновой конференции (Москва, 2015 г.), X Всероссийском семинаре по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн (Нижний Новгород, 2016 г.), XX Международном симпозиуме "Нанозлектроника и нанозлектроника" (Нижний Новгород, 2016 г.), IV Всероссийской микроволновой конференции (Москва, 2016 г.), XXI Международном симпозиуме "Нанозлектроника и нанозлектроника" (Нижний Новгород, 2017 г.), XIX Координационном научно-техническом семинаре по СВЧ технике (Нижний Новгород, 2017 г.), V Всероссийской микроволновой конференции (Москва, 2017 г.), XXII Международном симпозиуме "Нанозлектроника и нанозлектроника" (Нижний Новгород, 2018 г.), VII Всероссийской научно-технической конференции "Электроника и микрозлектроника СВЧ" (Санкт-Петербург, 2018 г.).

### **Личный вклад автора**

Вклад автора является определяющим в экспериментах по исследованию точности разработанной теоретической модели, в исследовании эпитаксиальных полупроводниковых плёнок и транзисторных гетероструктур. Вклад автора является равнозначным с научным руководителем в создании микроволнового микроскопа, в разработке метода измерения сопротивления проводящего слоя многослойной полупроводниковой структуры, в комплексном исследовании структур полупроводникового алмаза. В работе по БМТ автором совместно с научным руководителем проводилось компьютерное моделирование, обработка и интерпретация экспериментальных данных.

### **Структура и объём диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, приложения, списка работ автора по теме диссертации, списка цитируемой литературы из 134 работ. Общий объём диссертации 106 страниц, включая 26 рисунков и 9 таблиц.

### **Основное содержание работы**

Во **Введении** обоснована актуальность выбранной темы, раскрыто состояние проблемы исследования, сформулированы цели и задачи диссертационной работы, перечислены методы исследования, подтверждена достоверность результатов, описана новизна, а также научная и практическая значимость работы, сформулированы выносимые на защиту положения, приведены сведения по публикациям автора и апробации работы.

**Первая глава** посвящена развитию теоретической модели БСММ.

В п. 1.1 описан принцип работы и устройство БСММ. Субволновое разрешение микроскопа достигается за счёт использования электрически малой антенны, излучение которой локализовано вблизи источника на масштабе размера апертуры  $D \ll \lambda$ . Для согласования антенны с источником/приёмником

излучения, как правило, используется резонатор, поэтому измеряемая спектральная характеристика прибора, в нашем случае — зависимость коэффициента отражения резонатора от частоты  $\Gamma(f)$ , имеет провал вблизи резонансной частоты. Измеряемые параметры резонансной характеристики — резонансная частота  $f_0$  и добротность  $Q_0$  — являются источником информации о свойствах исследуемой среды. Одним из основных типов зондов БСММ является КЗ, с помощью которого достигается наилучшее на сегодняшний день разрешение. Резонатор КЗ представляет собой отрезок коаксиальной линии передачи; антенной служит остриё иглы, присоединённой к центральному электроду на одном из концов резонатора.

В п. 1.2 выводятся формулы для расчёта спектральной характеристики зонда. Зонд БСММ моделируется эквивалентной схемой, состоящей из отрезка двухпроводной линии передачи, на одном из концов которого подключена нагрузка с импедансом  $Z$ , описывающая взаимодействие зонда с исследуемой средой. Коэффициент отражения зонда  $\Gamma(f)$  определяется входным импедансом резонатора  $Z_{in}$ , который рассчитывается с помощью теории линий передач. Окончательная формула для  $Z_{in}$  содержит импеданс нагрузки  $Z$ , расчёт которого представляет собой основную задачу при построении теоретической модели микроскопа.

В п. 1.3 решается электродинамическая задача взаимодействия антенны КЗ со средой, имеющей произвольный глубинный профиль комплексной диэлектрической проницаемости  $\varepsilon(z)$ ; выводится аналитическое выражение для импеданса антенны  $Z$ .

Антенна рассматривается как открытый конец коаксиальной линии (рис. 1(а)). Основное приближение состоит в том, что распределение источников ближнего поля описывается модельной функцией, точность которой определяется экспериментально. В нашем представлении источниками служат переменные заряды, равномерно распределенные на торцах электродов коаксиальной линии и противоположные по фазе (рис. 1(б)).

Расчёты импеданса  $Z$  основаны на использовании теоремы Пойнтинга в комплексной форме, которая устанавливает связь между импедансом  $Z$  и создаваемым антенной полем. Плоскостойкая среда представляется в виде  $M$  однородных слоёв с комплексными проницаемостями  $\varepsilon_j = const$  и толщинами  $d_j$  ( $j = 1, 2, \dots, M$ ). Источники и поля в такой среде раскладываются в пространственный спектр по поперечным волновым векторам  $\kappa$ . В результате, расчёт поля сводится к хорошо известной в электродинамике задаче распространения плоских волн в кусочно-однородной среде, причём в рассматриваемом квазистатическом приближении поле полностью определяется спектральными компонентами с комплексной продольной составляющей волнового вектора  $k_z = \pm i\kappa$ . В итоге, структура полученного решения имеет вид:

$$Z = \frac{1}{2\pi i \varepsilon_0 c} \int_0^\infty \Phi(x)^2 \left( U_a(x) + U_b(x) + \sum_{j=1}^{M+1} G_j(x) \right) dx. \quad (1)$$

Интегрирование ведётся по безразмерной переменной  $x = \kappa/k_0$ , где  $k_0 =$

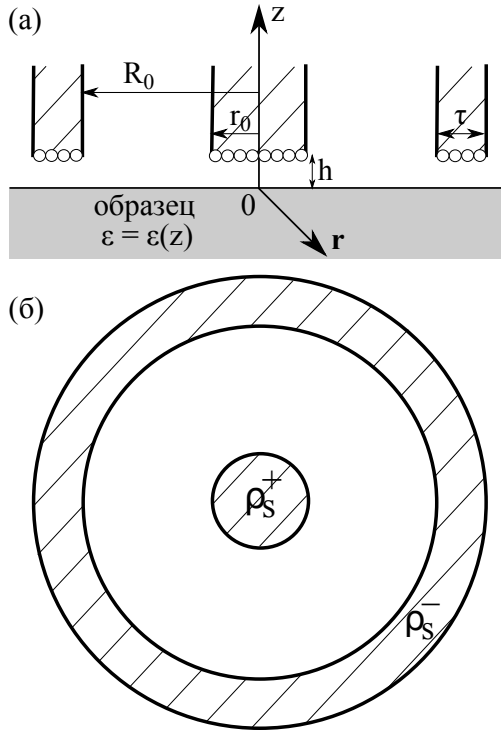


Рис. 1. Геометрия антенны КЗ: (а) вид сбоку, (б) вид с торца.

$2\pi f/c$ ,  $c$  — скорость света в вакууме;  $\varepsilon^0$  — электрическая постоянная. Функции  $G_j(x)$  включают в себя проницаемости  $\varepsilon_j$  и толщины  $d_j$  слоёв среды и вычисляются по определённому рекуррентному алгоритму, передаточная характеристика антенны  $\Phi(x)$  определяется ее геометрическими параметрами.

Площадь внешнего электрода антенны БСММ обычно намного превышает площадь внутреннего электрода. В этом случае заряд внешнего электрода практически не влияет на значение  $Z$ , т. е. антенна представляет собой электрический монополь. Тогда передаточная характеристика  $\Phi(x)$  даётся выражением

$$\Phi(x) = \frac{J_1(xk_0r_0)}{xk_0r_0}, \quad (2)$$

где  $J_1(u)$  — функция Бесселя первого рода,  $r_0$  — радиус центрального электрода. Упрощенное выражение (2) для функции  $\Phi(x)$  неприменимо для сред, в которых реализуется двумерное растекание тока. В этом случае нужно учитывать заряд как внутреннего, так и внешнего электродов антенны.

В п. 1.4 описывается лабораторный макет микроскопа, схема которого представлена на рис. 2(а). Источником/приёмником микроволнового излучения служит векторный анализатор цепей. Зонд БСММ вмонтирован в каче-

стве сменного модуля в систему сканирующего зондового микроскопа. Образец крепится на диэлектрическом столике, расположенном на подвижной платформе. Перемещение платформы в направлениях  $x$  и  $z$  осуществляется с помощью трех пьезотрубок. Подача на трубки электрического импульса приводит к их изгибу, за счёт чего платформа смещается на один шаг. Изготовлены ПЗ и КЗ диапазона 1 – 3 ГГц с разрешающей способностью 250 и 70 мкм соответственно, которые схематично изображены на рис. 2(б,в).

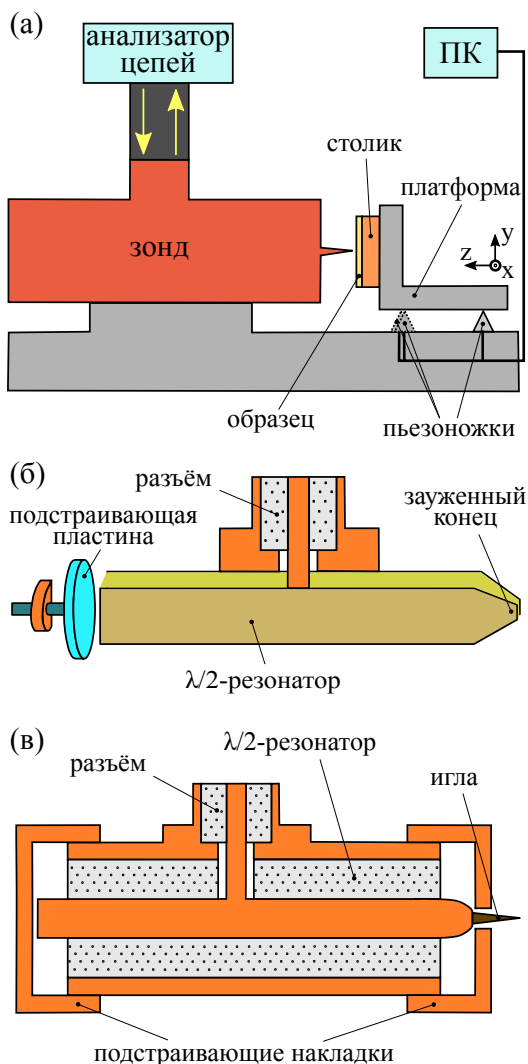


Рис. 2. (а) Схема лабораторного макета БСММ. (б) Схема ПЗ. (в) Схема КЗ.

В п. 1.5 выполнена экспериментальная верификация разработанной гео-

ретической модели БСММ. В качестве тестовых образцов используются объёмно-однородные пластина сапфира и несколько пластин кремния разной проводимости. Измеряются высотные зависимости резонансной частоты  $f_0(h)$  и добротности  $Q_0(h)$ . Полученные экспериментальные зависимости хорошо согласуются с результатами расчёта, проведённого на основе построенной модели БСММ.

**Вторая глава** посвящена развитию метода диагностики полупроводниковых структур с помощью БСММ.

В п. 2.1 излагается процедура получения спектральной характеристики  $\Gamma(f)$  в режиме сканирования поверхности исследуемого образца.

В п. 2.2 изложена методика калибровки микроскопа. Модель БСММ содержит несколько параметров, требующих определения при помощи калибровочных измерений на эталонных объектах. Зависимость распределения заряда на антенне от проводящих свойств исследуемого образца приводит к соответствующей зависимости параметров модели. Для самосогласованного определения параметров модели используется несколько эталонных образцов, отличающихся проводимостью  $\sigma$ . В качестве калибровочных эталонов используются образцы с достаточно простой внутренней структурой и заранее установленными диэлектрическими/проводящими характеристиками. В наших измерениях первичными эталонами служили однородные пластины кварца (EQ), сапфира (ES) и кремния с разной степенью легирования (E0–E6). В ходе калибровки определяются значения параметра затухания резонатора  $\delta$ , размера апертуры антенны  $D$  и эффективной высоты зонда  $h_{eff} = h + h_0$ , где  $h$  — геометрическое расстояние.

Указанные параметры определяются следующим образом. По данным измерений на эталонах рассчитывается калибровочная кривая  $\eta_c(\xi_c)$  в плоскости безразмерных параметров  $\xi = (f_0^{ref} - f_0)/f_0^{ref}$ ,  $\eta = 1/2(1/Q_0 - 1/Q_0^{ref})$ , где  $f_0^{ref}$  и  $Q_0^{ref}$  — резонансная частота и добротность, измеренные на диэлектрической пластине с проницаемостью, близкой к значению проницаемости диэлектрической матрицы исследуемого образца. В исследованиях алмаза таким диэлектриком служила пластина EQ, в остальных исследованиях — ES. Опорные точки калибровочной кривой  $\{\xi_E, \eta_E\}$  получаются из измерений на эталонах E0–E6. В опорных точках вычисляются параметры модели зонда. В промежутках между опорными точками кривая  $\eta_c(\xi_c)$  рассчитывается с использованием параметров модели, полученных линейной интерполяцией значений в опорных точках. В процессе диагностики исследуемого образца измеренное значение  $\{\xi_S, \eta_S\}$  проецируется на кривую  $\eta_c(\xi_c)$ , после чего подгоночные параметры модели выбираются равными их значениям в точке проекции. В результате, рассчитывается импеданс зонда  $Z_c(\mathbf{V})$  как функция параметров исследуемой структуры  $\mathbf{V} = \{d_1, \varepsilon_1, \dots, d_M, \varepsilon_M\}$ , т. е. мы находим решение прямой задачи.

В п. 2.3 описана методика определения параметров образца путём решения обратной задачи. Это решение находится минимизацией функции невязки сле-

дующего общего вида:

$$F(\mathbf{V}) = \sum_{j=1}^N \left( \frac{\sqrt{(R_c^j(\mathbf{V}) - R_m^j)^2}}{R_m^j} + \frac{\sqrt{(X_c^j(\mathbf{V}) - X_m^j)^2}}{X_m^j} \right). \quad (3)$$

В определённой точке поверхности образца проводится  $N$  независимых измерений зондами с разным размером апертуры и/или рабочей частотой. Экспериментальные данные представлены значениями комплексного импеданса  $Z_m^j = R_m^j - iX_m^j$  ( $j = 1, \dots, N$ ). Функция  $Z_c^j(\mathbf{V}) = R_c^j(\mathbf{V}) - iX_c^j(\mathbf{V})$  — результат расчёта импеданса для некоторого (произвольного) набора параметров образца, задающих вектор  $\mathbf{V}$ . Решением обратной задачи является вектор  $\mathbf{V}_m$ , для которого функция (3) достигает минимума. Разработанная компьютерная программа осуществляет пошаговый итерационный спуск к минимуму  $F(\mathbf{V}_m)$ , начиная от заданного начального значения  $\mathbf{V}_0$ .

В п. 2.4 представлены результаты исследования некоторых полупроводниковых структур, изучена точность разработанного метода. С помощью БСММ измерялось слоевое сопротивление  $R_{sh}$  плёнок GaN на сапфировой подложке. Результаты измерений ПЗ и КЗ сопоставлялись с данными ВДП. Отметим, что для интерпретации данных измерений ПЗ использовалась модель симметричной электродипольной антенны БСММ, разработанная в [13]. Для ПЗ наблюдается вполне удовлетворительное согласие со значениями, полученными ВДП: в диапазоне  $R_{sh} = 0.07 - 14$  кОм/□ расхождение не превышает 40%. Иначе дело обстоит с КЗ, где расхождение с данными ВДП  $< 40\%$  имеет место лишь в диапазоне  $R_{sh} > 1$  кОм/□. Для  $R_{sh} < 1$  кОм/□ наблюдается систематическое превышение  $R_{sh}^{KЗ}$  над  $R_{sh}^{ВДП}$ . Полученная существенная разница результатов для КЗ и ПЗ может быть связана с разной структурой квазистатического поля и размеров monopольной и дипольной антенн соответствующих зондов. Точность определения сопротивления тонкой плёнки с использованием данных калибровочных измерений на объёмно-однородных образцах, по всей вероятности, зависит от указанных особенностей зондов этих двух типов. Точность измерения КЗ может быть повышена, если использовать в качестве калибровочных эталонов образцы, имеющие более близкую структуру с измеряемым объектом. Справедливость сделанного утверждения продемонстрирована на примере исследования транзисторных гетероструктур.

Были исследованы две полупроводниковые гетероструктуры, выращенные для создания транзисторов с высокой подвижностью электронов (high electron mobility transistors, HEMTs): структура на основе гетероперехода AlGaIn/GaN и структура на основе квантовой ямы AlGaAs/GaAs/InGaAs/GaAs/AlGaAs. Исследовался латеральный профиль сопротивления проводящего канала  $R_{sh}(x)$  обеих структур. В случае КЗ профили  $R_{sh}(x)$  были получены с использованием двух различных систем калибровочных эталонов. Первая система — объёмно-однородные пластины, вторая система — полупроводниковые плёнки на диэлектрической подложке. Результаты исследования транзисторных структур БСММ мы сопоставили с измерениями ВДП. Сканирование транзисторных структур ПЗ дало удовлетворительную точность измерения  $R_{sh}$

(лучше 50%), сходную с аналогичными результатами для плёнок GaN. В измерениях КЗ точность удалось существенно повысить за счёт применения системы эталонов в виде плёнок GaN. Расхождение с измерениями  $R_{sh}$  ВДП в среднем составило  $< 10\%$ . Для сравнения, использование в качестве эталонов объёмно-однородных пластин даёт погрешность  $\sim 50 - 100\%$ .

**Третья глава** посвящена исследованию полупроводникового алмаза с помощью разработанного метода микроволновой микроскопии в комплексе со стандартными методами диагностики.

В п. 3.1 описывается современное состояние проблемы создания и исследования полупроводниковых структур на основе алмаза. Полупроводниковый алмаз рассматривается в качестве перспективного материала для приборов электроники и фотоники. Одной из основных проблем является получение подложек достаточно больших размеров, в результате чего обычно исследуются образцы размером несколько миллиметров. Кроме того, подложки часто содержат микро- и макроскопические дефекты и неоднородности, которые могут влиять на свойства выращиваемых структур.

В п. 3.2 приведены параметры образцов и методы их исследования. Образцы представляют собой эпитаксиальные алмазные структуры, выращенные на монокристаллических подложках с ориентацией поверхности (001), имеющие латеральный размер  $\approx 3 \times 3$  мм<sup>2</sup>. Структуры дельта-легированы бором; толщина дельта-слоёв составляет 2 – 4 нм. Типичная толщина эпитаксиальных слоёв —  $\sim 100$  нм, хотя для некоторых образцов — 10 – 20 нм. В исследованиях БСММ применялся КЗ диапазона 1.3 – 1.5 ГГц с разрешением  $\Delta = 70$  мкм. Для каждого образца проводилось сканирование по трём линиям вдоль координаты  $x$  с шагом  $\Delta x \sim \Delta$ . Для подложек измерялись профили удельного сопротивления  $\rho(x)$ , для эпитаксиальных плёнок — слоевого сопротивления  $R_{sh}(x)$ . Измерение электрических характеристик также проводилось ВДП в двух геометриях. В случае, когда омические контакты формировались по углам образца, определялись средние по поверхности параметры. Локальные измерения производились в пяти точках поверхности с помощью холловских крестов. Макроскопические дефекты в некоторых подложках были выявлены при помощи интерферометра белого света. Концентрация легирующей примеси (бора) измерялась методом ВИМС.

В п. 3.3 приводятся результаты исследования монокристаллических алмазных подложек. Основываясь на данных БСММ, было установлено, что многие алмазные подложки имеют латерально неоднородную проводимость. Типичное распределение удельной проводимости  $\rho(x, y)$  исследованных подложек — высокоомный регион с  $\rho \sim 10$  кОм $\times$ см в центральной части с понижением сопротивления к краям до  $\rho \sim 0.1 - 1$  кОм $\times$ см. Установлено, что для некоторых подложек область повышенного удельного сопротивления коррелирует с мезоскопическим дефектом кристаллической структуры.

В п. 3.4 изложены результаты исследования эпитаксиальных дельта-легированных слоёв алмаза. Для получения латеральных профилей сопротивления  $R_{sh}$  эпитаксиального слоя, выращенного на неоднородно проводящей подложке, предварительно измеряется распределение  $\rho(x, y)$  подложки. После

выращивания дельта-легированного эпитаксиального слоя система плёнка-подложка сканируется БСММ вдоль тех же линий. Проводимость подложки исключается при вычислении сопротивления эпитаксиального слоя  $R_{sh}$  в соответствии с методом, описанным в гл. 2.

Проводимость подложки наиболее сильно искажает измерения БСММ  $R_{sh}$  структур с высокоомным эпитаксиальным слоем. Для одного из таких образцов проводимость меняется более чем на порядок, что, как установлено, целиком обусловлено неоднородностью подложки. После исключения шунтирующего влияния подложки наблюдалось достаточно однородное распределение сопротивления эпитаксиального слоя со средним значением  $R_{sh} = 250 \text{ кОм}/\square$ .

На примере другого образца продемонстрировано влияние макроскопического дефекта кристаллической структуры подложки на электрические свойства эпитаксиального слоя. Высокоомная область слоя была локализована над дефектом подложки. Сопротивление в этой части более чем на порядок превышало значения  $R_{sh}$  окружающей дефект низкоомной области. По данным ВИМС, глубинный профиль концентрации примеси  $N_B(z)$  оказался одинаковым как в дефектной области, так и вне её. Анализируя измерения БСММ, нам удалось привязать полученные данные ВДП к невозмущённой дефектом низкоомной части структуры. В результате комплексных исследований для этой части структуры получены следующие характеристики: слоевое сопротивление —  $R_{sh} = 8 \text{ кОм}/\square$ , слоевая концентрация дырок —  $N_p = 6.0 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$ , подвижность —  $\mu = 15 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ . Указанные параметры, скорее всего, характеризуют электрические свойства дельта-слоя. Используя пиковую концентрацию бора  $N_B = 10.5 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$  (данные ВИМС), получено значение степени ионизации примеси в дельта-слое на уровне  $N_p/N_B \times 100\% = 57\%$ .

**Четвёртая глава** посвящена развитию метода ближнепольной микроволновой томографии.

В п. 4.1 приводится описание тестовой структуры и методики измерений [16]. В качестве тестового образца была выбрана структура низкобарьерного диода Мотта, представляющая собой дельта-легированную кремнием плёнку GaAs толщиной  $d \approx 100 \text{ нм}$  (изолирующий слой) на сильнолегированной подложке  $n^+$ -GaAs с напылённой на поверхности структуры плёнкой Al толщиной 150 нм. Из слоя Al методами фотолитографии на всей поверхности образца диаметра 2 дюйма формировалась система зондов (антенная система). Каждый пиксель ( $1.5 \times 1.5 \text{ мм}^2$ ) антенной системы состоит из девяти антенн. Внутренний электрод антенны имеет форму круга радиуса  $a$ ; внешний электрод — квадрат с длиной стороны  $c = 0.45 \text{ мм}$  с вырезанным в центре кругом радиуса  $b$ . В измерениях мы использовали три антенны различных размеров: 1)  $a = 5.5 \text{ мкм}$ ,  $b = 30 \text{ мкм}$ ; 2)  $a = 11 \text{ мкм}$ ,  $b = 35 \text{ мкм}$ ; 3)  $a = 25 \text{ мкм}$ ,  $b = 50 \text{ мкм}$ . Как показывают теоретические оценки, импеданс антенны в условиях нашей задачи определяется областью вблизи внутреннего контакта, размер которого определяет разрешающую способность метода. С помощью микроволновых зондов |Z| Probe (Cascade Microtech) измеряется частотный спектр комплексного импеданса  $Z_m(f) = R_m(f) - iX_m(f)$ . Измерения проводятся на  $1.6 \times 10^4$  дискретных частотах в диапазоне  $f = 0.1 - 67 \text{ ГГц}$ .



В п. 4.2 описанный в п. 2.3 метод детализирован применительно к рассматриваемой обратной задаче. Исследуемая структура характеризуется вектором  $\mathbf{V} = \{\sigma, d, \sigma_s\}$ , где  $\sigma$  и  $d$  — проводимость и толщина плёнки соответственно,  $\sigma_s$  — проводимость подложки. Функция невязки (3) минимизируется в пространстве этих трёх параметров. В данной работе для секционирования образца мы использовали спектральные измерения, поэтому в формуле (3) суммирование выполняется по  $N$  выбранным частотам  $f_j$  ( $j = 1, 2, \dots, N$ ) из указанного выше набора. Импеданс  $Z_c(f, \mathbf{V})$  рассчитывается в рамках разработанной теоретической модели monopольной антенны по формуле (1). Трёхмерное изображение исследуемой структуры строится по данным измерений путём последовательного приведения зонда в контакт с антеннами каждого пикселя.

В п. 4.3 описана процедура и приведены результаты компьютерного моделирования, на основании которого строится оптимальный алгоритм поиска параметров структуры. На рис. 3 представлены смоделированные зависимости относительной ошибки  $\Delta_k$  для каждой компоненты вектора  $\mathbf{V}$  от частоты  $f$ . Минимальная ошибка определения параметров  $\sigma$ ,  $d$  достигается в частотном диапазоне  $f < f_g \sim 5$  ГГц, а параметра  $\sigma_s$  — в диапазоне  $f > f_g$ . Таким образом, алгоритм поиска решения выглядит следующим образом. На первом этапе задаётся некоторое оценочное значение  $\sigma_s$ , после чего параметры  $\sigma$ ,  $d$  находятся из измерений  $Z_m$  в диапазоне  $f < f_g$ . Проводимость  $\sigma_s$  определяется на втором этапе по величине  $Z_m$ , измеренной в диапазоне  $f > f_g$ , с использованием предварительно найденных параметров  $\sigma$ ,  $d$ .

В п. 4.4 приводятся экспериментальные результаты. Для определения параметров плёнки  $d$ ,  $\sigma$  мы выбрали 20 точек из спектра  $Z_m(f)$ , которые равномерно заполняют интервал  $0.1 \text{ ГГц} < f < 2 \text{ ГГц}$ . Предполагалось, что проводимость подложки равна номинальному значению  $\sigma_s = 3.8 \times 10^2 \text{ 1/(Ом}\times\text{см)}$ . Для каждого  $Z_m$  решалась обратная задача, после чего рассчитывались усреднённые по спектру  $0.1 \text{ ГГц} < f < 2 \text{ ГГц}$  значения  $\langle d \rangle$ ,  $\langle \sigma \rangle$  и их среднеквадратичные отклонения  $\delta_{d,\sigma}$ . Результаты приведены в табл. 1 для трёх зондов различного радиуса  $a$ . Проводимость подложки  $\sigma_s$  определялась из измерений в диапазоне  $30 \text{ ГГц} < f < 67 \text{ ГГц}$  с помощью антенны минимального радиуса  $a = 5.5 \text{ мкм}$ . Полученное среднее значение проводимости близко к номинальному:  $\langle \sigma_s \rangle = 3.6 \times 10^2 \text{ 1/(Ом}\times\text{см)}$  при  $\delta_{\sigma_s}/\langle \sigma_s \rangle = 0.15$ .

N	$a$ (мкм)	$\langle d \rangle$ (нм)	$\delta_d/\langle d \rangle$ (%)	$\langle \sigma \rangle$ (1/(Ом×см))	$\delta_\sigma/\langle \sigma \rangle$ (%)
1	5.5	92.9	1.4	$0.82 \times 10^{-3}$	3.2
2	11	97.6	0.8	$1.42 \times 10^{-3}$	0.7
3	25	95.3	0.5	$1.23 \times 10^{-3}$	0.5

Таблица 1. Параметры изолирующего слоя, измеренные антеннами  $N = 1 - 3$  разного размера.

Вариации параметров  $d$ ,  $\sigma$  в измерениях разными антеннами связаны с латеральной неоднородностью плёнки, т. к. антенны разного радиуса  $a$  имеют

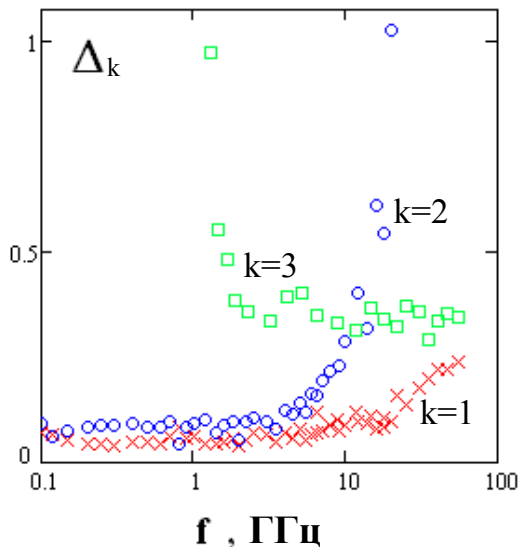


Рис. 3. Компьютерное моделирование относительной ошибки  $\Delta_k$  как функции частоты  $f$ . Кривые соответствуют следующим параметрам структуры: ( $k = 1$ ) —  $d$ , ( $k = 2$ ) —  $\sigma$ , ( $k = 3$ ) —  $\sigma_s$ .

различное положение на поверхности образца внутри пикселя. Измерения, выполненные в нескольких пикселях, показали, что проводимость  $\sigma$  варьирует в плоскости поверхности образца более чем на порядок, в то время как изменение толщины  $d$  составляет не более 10%. Значение проводимости подложки  $\sigma_s$  оказалось одинаковым в пределах точности измерений.

В **Заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы.

В **Приложениях** приведён вывод формулы резонансной кривой (Приложение А) и описана процедура определения разрешающей способности микроскопа (Приложение В).

Диссертация завершается перечнем опубликованных работ автора и списком цитируемой литературы.

## Основные результаты работы

1. Развита теоретическая модель взаимодействия коаксиального зонда микроволнового микроскопа с плоскостойкой средой, имеющей произвольный глубинный профиль диэлектрической проницаемости. В рамках модели получено аналитическое выражение для импеданса зонда. На основании предложенной эквивалентной схемы микроскопа рассчитываются характеристики, содержащие информацию о параметрах исследу-

емого объекта. Продемонстрировано хорошее соответствие расчётных и экспериментальных данных в измерениях эталонных образцов.

2. Метод микроволновой микроскопии обобщен на измерение сопротивления проводящего слоя многослойной полупроводниковой структуры. При помощи зонда коаксиальной геометрии достигнуто микронное разрешение в измерении сопротивления. Взаимодействие коаксиального зонда с плоскостной средой описывается разработанной теоретической моделью. Точность измерения слоевого сопротивления повышена за счёт использования в качестве эталонных образцов полупроводниковых плёнок на диэлектрической подложке. Возможности метода продемонстрированы в экспериментальных исследованиях эпитаксиальных полупроводниковых плёнок и транзисторных гетероструктур. Латеральное разрешение сконструированного прибора диапазона 1 – 3 ГГц составило 50 – 500 мкм. Точность метода проанализирована в измерениях зондами разной геометрии (коаксиальной и полосковой) в сравнении с данными, полученными стандартным методом ван дер Пау. Показано, что в диапазоне сопротивлений слоёв  $\sim 0.1 - 15 \text{ кОм}/\square$  точность составляет  $\sim 10\%$ .
3. С помощью микроволнового микроскопа диапазона 1.3 – 1.5 ГГц с разрешением  $\sim 70 \text{ мкм}$  исследованы проводящие свойства монокристаллических подложек и эпитаксиальных слоёв алмаза в условиях гигантской латеральной неоднородности проводимости. Исследовались образцы размера  $3 \times 3 \text{ мм}^2$  с характерным масштабом неоднородности 0.1 – 1 мм. Разработанный метод позволил измерить сопротивление эпитаксиального слоя на фоне шунтирующего действия неоднородно проводящей подложки. Установлена корреляция области пониженной проводимости эпитаксиального слоя с низлежащим мезоскопическим дефектом кристаллической структуры подложки. Микроволновым методом в комплексе со стандартными методами диагностики полупроводников (метод ван дер Пау, вторично ионная масс-спектрометрия) были получены электрические параметры эпитаксиальных слоёв алмаза: сопротивление, подвижность и концентрация свободных носителей заряда, концентрация примесных атомов и степень их ионизации.
4. Разработан и апробирован в эксперименте метод микроволновой томографии с микронным латеральным разрешением. Параметры исследуемой структуры определялись с использованием развитой теоретической модели коаксиального зонда путем решения соответствующей обратной задачи. Экспериментальная демонстрация метода произведена на полупроводниковой структуре низкобарьерного диода Мотта — дельта-легированный изолирующий слой на сильнолегированной подложке. Зондирующая система представляла собой решётку коаксиальных антенн с радиусом центрального контакта 5 – 25 мкм. Исходными данными обратной задачи служили измерения частотного спектра им-

педанса антенн в диапазоне 0.1–67 ГГц. В нескольких точках поверхности образца получены толщина  $d$  и проводимость  $\sigma$  изолирующего слоя, проводимость подложки  $\sigma_s$ . Точность измерения параметров составила 1–3% для величин  $d$ ,  $\sigma$  и 15% для  $\sigma_s$ . Наблюдалась сильная (более чем на порядок) латеральная неоднородность  $\sigma$  при изменении  $d$  в пределах 10% и однородности  $\sigma_s$ .

## Список литературы

- [1] Scanning probe microscopy: electrical and electromechanical phenomena at the nanoscale / edited by S. Kalinin and A. Gruverman. — New York : Springer New York, 2007. — 980 p.
- [2] Huber, H. P. Calibrated nanoscale dopant profiling using a scanning microwave microscope / H. P. Huber, I. Humer, M. Hochleitner, M. Fenner, M. Moertelmaier, C. Rankl, A. Imtiaz, T. M. Wallis, H. Tanbakuchi, P. Hinterdorfer, P. Kabos, J. Smoliner, J. J. Kopanski and F. Kienberger // J. Appl. Phys. — 2012. — V. 111. — № 1. — P. 014301.
- [3] Tselev, A. Near-field microwave scanning probe imaging of conductivity inhomogeneities in CVD graphene / A. Tselev, N. V. Lavrik, I. Vlassiuk, D. P. Briggs, M. Rutgers, R. Proksch and S. V. Kalinin // Nanotechnology. — 2012. — V. 23. — № 38. — P. 385706.
- [4] Lee, J. Atomic resolution imaging at 2.5 GHz using near-field microwave microscopy / J. Lee, C. J. Long, H. Y. Yang, X.-D. Xiang and I. Takeuchi // Appl. Phys. Lett. — 2010. — V. 97. — № 18. — P. 183111.
- [5] Steinhauer, D. E. Surface resistance imaging with a scanning near-field microwave microscope / D. E. Steinhauer, C. P. Vlahacos, S. K. Dutta, F. C. Wellstood and S. M. Anlage // Appl. Phys. Lett. — 1997. — V. 71. — № 12. — P. 1736–1738.
- [6] Kantor, R. Method of increasing spatial resolution of the scanning near-field microwave microscopy / R. Kantor and I. V. Shvets // J. Appl. Phys. — 2003. — V. 93. — № 9. — P. 4979–4985.
- [7] Karbassi, A. Quadraxial probe for high resolution near-field scanning rf/microwave microscopy / A. Karbassi, C. A. Paulson, A. B. Kozyrev, M. Banerjee, Y. Wang and D. W. van der Weide // Appl. Phys. Lett. — 2006. — V. 89. — № 15. — P. 153113.
- [8] Steinhauer, D. E. Quantitative imaging of dielectric permittivity and tunability with a near-field scanning microwave microscope / D. E. Steinhauer, C. P. Vlahacos, F. C. Wellstood, S. M. Anlage, C. Canedy, R. Ramesh, A. Stanishevsky and J. Melngailis // Rev. Sci. Instrum. — 2000. — V. 71. — № 7. — P. 2751–2758.

- [9] Golosovsky, M. Near-field of a scanning aperture microwave probe: a 3-D finite element analysis / M. Golosovsky, E. Maniv, D. Davidov and A. Frenkel // IEEE Trans. Instrum. Meas. — 2002. — V. 51. — № 5. — P. 1090–1096.
- [10] Balusek, C. A three-dimensional finite element model of near-field scanning microwave microscopy / C. Balusek, B. Friedman, D. Luna, B. Oetiker, A. Babajanyan and K. Lee // J. Appl. Phys. — 2012. — V. 112. — № 8. — P. 084318.
- [11] Gao, C. Quantitative microwave evanescent microscopy of dielectric thin films using a recursive image charge approach / C. Gao, B. Hu, P. Zhang, M. Huang, W. Liu and I. Takeuchi // Appl. Phys. Lett. — 2004. — V. 84. — № 23. — P. 4647–4649.
- [12] Imtiaz, A. Effect of tip geometry on contrast and spatial resolution of the near-field microwave microscope / A. Imtiaz and S. M. Anlage // J. Appl. Phys. — 2006. — V. 100. — № 4. — P. 044304.
- [13] Reznik, A. N. Electrodynamics of microwave near-field probing: application to medical diagnostics / A. N. Reznik and N. V. Yurasova // J. Appl. Phys. — 2005. — V. 98. — № 11. — P. 114701.
- [14] Reznik, A. N. Quantitative determination of sheet resistance of semiconducting films by microwave near-field probing / A. N. Reznik and E. V. Demidov // J. Appl. Phys. — 2013. — V. 113. — № 9. — P. 094501.
- [15] Reznik, A. N. The near-field microwave technique for deep profiling of free carrier concentration in semiconductors / A. N. Reznik, I. A. Shereshevsky and N. K. Vdovicheva // J. Appl. Phys. — 2011. — V. 109. — № 9. — P. 094508.
- [16] Vostokov, N. V. Experimental studies of the frequency dependence of the low-barrier Mott diode impedance / N. V. Vostokov and V. I. Shashkin // IEEE Trans. Electron Devices. — 2017. — V. 64. — № 1. — P. 109–114.

### **Список публикаций автора по теме диссертации**

В изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

- A1. Reznik A. N., Korolyov S. A. Monopole antenna in quantitative near-field microwave microscopy of planar structures // Journal of Applied Physics. — 2016. — V. 119. — № 9. — P. 094504.
- A2. Reznik A. N., Korolyov S. A., Drozdov M. N. Microwave microscopy of diamond semiconductor structures // Journal of Applied Physics. — 2017. — V. 121. — № 16. — P. 164503.
- A3. Reznik A. N., Vostokov N. V., Vdovicheva N. K., Korolyov S. A., Shashkin V. I. Near-field microwave tomography of planar semiconductor microstructures // Journal of Applied Physics. — 2017. — V. 122. — № 24. — P. 244505.

A4. Korolyov S. A., Reznik A. N. Quantitative characterization of semiconductor structures with a scanning microwave microscope // Review of Scientific Instruments. — 2018. — V. 89. — № 2. — P. 023706.

В других изданиях:

- A5. Королёв С. А., Резник А. Н. Определение импеданса туннельного контакта с помощью микроволнового ближнепольного микроскопа атомарного разрешения // II Всероссийская микроволновая конференция (Москва, 24–28 ноября 2014 г.): Доклады. — изд. JRE, Москва, 2014. — С. 9–14.
- A6. Королёв С. А., Резник А. Н. Микроволновый импеданс туннельного контакта в теории ближнепольного микроскопа атомарного разрешения // XIX Международный симпозиум "Нанозеллектроника" (Нижний Новгород, 10–14 марта 2015 г.): Труды. Том 1. — изд. Нижегородского госуниверситета им. Н. И. Лобачевского, Нижний Новгород, 2015. — ISBN 978-5-91326-322-3. — С. 270–271.
- A7. Королёв С. А., Резник А. Н. Монопольная антенна в теории микроволнового микроскопа // VI Всероссийская молодёжная конференция по фундаментальным и инновационным вопросам современной физики (Москва, 15–20 ноября 2015 г.): Сборник трудов. — изд. РИИС ФИАН, Москва, 2015. — С. 35.
- A8. Резник А. Н., Королёв С. А. Диагностика планарных полупроводниковых структур при помощи микроволнового ближнепольного микроскопа с монопольной антенной // II Российско-белорусская научно-техническая конференция "Элементная база отечественной радиоэлектроники: импортозамещение и применение" им. О. В. Лосева (Нижний Новгород, 17–19 ноября 2015 г.): Труды. — изд. типография ННГУ им. Н. И. Лобачевского, Нижний Новгород, 2015. — С. 232–236.
- A9. Королёв С. А., Резник А. Н. Модель монопольной антенны микроволнового ближнепольного микроскопа в задаче количественной характеристики планарных полупроводниковых структур // III Всероссийская микроволновая конференция (Москва, 25–27 ноября 2015 г.): Доклады. — изд. JRE, Москва, 2015. — С. 33–37.
- A10. Востоков Н. В., Королёв С. А., Резник А. Н., Шашкин В. И. Микроволновые методы исследования полупроводниковых наноструктур и приборов на их основе // X Всероссийский семинар по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн (Нижний Новгород, 29 февраля–3 марта 2016 г.): Тезисы докладов. — изд. редакционно-издательская группа ИПФ РАН, Нижний Новгород, 2016. — С. 116–118.
- A11. Королёв С. А., Резник А. Н. Микроволновая микроскопия планарных структур // XX Международный симпозиум "Нанозеллектроника" (Нижний Новгород, 14–18 марта 2016 г.): Труды. Том 1. — изд.

Нижегородского госуниверситета им. Н. И. Лобачевского, Нижний Новгород, 2016. — ISBN 978-5-91326-378-0. — С. 299–300.

- A12. Королёв С. А., Резник А. Н. Определение электрических характеристик планарных структур с помощью сканирующего микроволнового микроскопа // IV Всероссийская микроволновая конференция (Москва, 23–25 ноября 2016 г.): Доклады. — изд. JRE, Москва, 2016. — С. 33–38.
- A13. Резник А. Н., Королёв С. А. Микроволновая микроскопия полупроводниковых структур алмаза // XXI Международный симпозиум "Нанозифика и нанозлектроника" (Нижний Новгород, 13–16 марта 2017 г.): Труды. Том 1. — изд. Нижегородского госуниверситета им. Н. И. Лобачевского, Нижний Новгород, 2017. — ISBN 978-5-91326-371-1. — С. 322–323.
- A14. Королёв С. А., Резник А. Н. Микроволновая микроскопия полупроводниковых материалов и структур // XIX Координационный научно-технический семинар по СВЧ технике (Нижний Новгород, 5–7 сентября 2017 г.): Материалы. — изд. АО "Научно-производственного предприятия "Салют", Нижний Новгород, 2017. — ISSN 1816-434X. — С. 189–191.
- A15. Резник А. Н., Востоков Н. В., Вдовичева Н. К., Королёв С. А., Шашкин В. И. Микроволновая ближнепольная томография полупроводниковых структур // V Всероссийская микроволновая конференция (Москва, 29 ноября–1 декабря 2017 г.): Доклады. — изд. JRE, Москва, 2017. — С. 5–9.
- A16. Королёв С. А., Резник А. Н., Суrowегина Е. А., Катруша А. Н., Колядин А. В., Шашкин В. И. Картирование проводимости монокристаллических алмазных подложек // XXII Международный симпозиум "Нанозифика и нанозлектроника" (Нижний Новгород, 12–15 марта 2018 г.): Труды. Том 2. — изд. Нижегородского госуниверситета им. Н. И. Лобачевского, Нижний Новгород, 2018. — ISBN 978-5-91326-446-6. — С. 660–661.
- A17. Королёв С. А., Резник А. Н. Диагностика проводимости полупроводниковых материалов и структур с помощью СВЧ микроскопа // VII Всероссийская конференция "Электроника и микрозлектроника СВЧ" (Санкт-Петербург, 28–31 мая 2018 г.): Сборник статей. — изд. СПбГЭТУ "ЛЭТИ", Санкт-Петербург, 2018. — С. 267–271.

**Королев Сергей Александрович**

**МИКРОВОЛНОВАЯ МИКРОСКОПИЯ  
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР**

**А в т о р е ф е р а т**

Подписано к печати 29.06.2018 г. Тираж 100 экз.

---

Отпечатано на ризографе Института физики микроструктур РАН  
603087, Нижегородская обл., Кстовский р-н, д. Афонино, ул. Академическая,  
д. 7.