

УТВЕРЖДАЮ

Руководитель Саратовского филиала  
Института радиотехники и электроники  
им. В.А. Котельникова РАН

доктор физ.-мат. наук

Филимонов Ю.А.

«27» ноября 2014 г.

### ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Саратовского филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
«Институт радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова РАН»

по диссертации Фадеева Алексея Владимировича

на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.

Тема диссертации «Ближнеполевая СВЧ-микроскопия и её использование для  
определения характеристик элементов твердотельной СВЧ электроники».

Специальности: 05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты,  
микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах и 01.04.03 – Радиофизика.

Несколько десятилетий назад были изобретены туннельный микроскоп и атомно-силовой микроскоп, которые к настоящему времени стали рабочим инструментом во многих лабораториях, промышленных предприятиях, НИИ и вузах. Ближнеполевой сканирующий СВЧ-микроскоп, как коммерческий объект, появился в последнее десятилетие. Его принцип действия и устройство достаточно сложны и требуют дальнейшего исследования в плане совершенствования характеристик и расширения областей применения значимых для науки и практики. В этой связи проведение исследований в выбранном автором диссертации направлении представляется, несомненно, актуальным.

Диссертационная работа нацелена на то, чтобы предложить новые радиофизические подходы для специфических задач, решение которых могло бы способствовать улучшению характеристик ближнеполевого СВЧ-микроскопа, и задач твердотельной электроники, демонстрирующих уникальные возможности именно ближнеполевой СВЧ-микроскопии. В связи с этим следует признать обоснованным представление диссертации, как работы на стыке двух специальностей 05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах и 01.04.03 – Радиофизика.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы. Работа изложена на 106 страницах, содержит 38 рисунков и список литературы из 104 наименова-

ний. По структуре и объему работа соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

*Во введении* обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель работы, приведены основные положения, выносимые на защиту, описаны структура и объем работы.

*В первой главе*, которая носит обзорный характер, представлен анализ современного состояния исследований полупроводниковых СВЧ-приборов с использованием ближнеполевой СВЧ-микроскопии.

*Во второй главе* показана возможность применения сканирующего ближнеполевого СВЧ-микроскопа на основе системы «емкостная диафрагма – индуктивная диафрагма» для определения анизотропных свойств диэлектрических материалов. В работе впервые представлены результаты локального измерения анизотропии диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь в СВЧ керамике.

*В третьей главе* приведено описание и рассмотрен принцип действия ближнеполевого СВЧ-микроскопа на основе системы из емкостной диафрагмы и близкорасположенного металлического зонда, не имеющего гальванического контакта с диафрагмой, а также результаты, полученные с его помощью. Показано, что с применением данного варианта ближнеполевого СВЧ-микроскопа можно производить измерение величины диэлектрической проницаемости и проводимости материала с повышенной степенью локальности. На устройство микроскопа получен патент Российской Федерации. В диссертации приводятся результаты перестройки низкоразмерного резонатора на основе системы «два штыря – близко расположенный поршень» посредством изменения магнитного поля.

*Четвертая глава* содержит результаты численного и экспериментального определения параметров низкоразмерного резонатора на основе системы «металлический штырь с зазором – короткозамыкающий поршень с выемкой», при этом определена область максимальной локализации поля в резонаторе, являющаяся оптимальным местом для размещения элемента связи зонда с резонатором.

*Пятая глава* посвящена изложению результатов исследования напряженности электрического поля и концентрации носителей заряда в объеме арсенид-галлиевого диода Ганна, проведенного численными методами и, что представляет особый интерес, в экспериментах с применением ближнеполевого СВЧ-микроскопа. При этом оказалось возможным провести наблюдения реализующейся многодоменной структуры в более широком диапазоне плотностей тока через диод, чем это было получено ранее.

*В шестой главе* представлены результаты численного моделирования распределения напряженности электрического поля и концентрации носителей заряда в кремниевом p-i-n дио-

де. Автор указывает на принципиальную важность учета зависимости коэффициента диффузии от электрического поля для основных носителей заряда при описании процессов в р-і-п диодах. Впервые обнаружен эффект возникновения пространственных осцилляций в р-і-п диодах в распределении концентрации носителей заряда и напряженности электрического поля в них, что ставит полученные результаты в контекст нелинейной динамики, теории самоорганизации и образования паттернов. Результаты расчета качественно согласуются с экспериментом, выполненным с использованием ближнеполевого СВЧ-микроскопа.

*В заключении* приведены основные результаты и сформулированы выводы по диссертационной работе.

Диссертант продемонстрировал владение широким набором методов исследования, как экспериментальных, так и вычислительных. Следует подчеркнуть, что результаты работы, касающиеся расчета распределения электрического поля в резонаторе, позволили существенным образом модернизировать ближнеполевой СВЧ-микроскоп, обеспечив тем самым возможность исследования процессов в р-і-п диоде и диоде Ганна. Использование модифицированного устройства позволило автору получить результат принципиальной важности, заставляющий во многом пересмотреть представления о функционировании р-і-п диодов, и состоящий в обнаружении пространственных осцилляций в распределении напряженности поля и концентрации носителей заряда в противовес традиционно принятой картине плавного распределения. Убедительность этого результата определяется тем, что примененная в экспериментах методика является бесконтактной. Также в работе представлены результаты численного решения системы нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих процессы в р-і-п диодах, причем выявлена необходимость модификации обычно используемой теоретической модели, состоящая в учете зависимости коэффициента диффузии и подвижности электронов и дырок от напряженности поля.

**Научно-практическая значимость** проведенной работы заключается в том, что предлагаемая методика определения стационарной концентрации носителей заряда в зависимости от плотности тока через р-і-п диод дает возможность расширить представления о механизме функционирования р-і-п диодов, и позволит разработчикам уточнить условия эксплуатации полупроводниковых устройств на основе р-і-п диодов. Также следует выделить предложенный в работе новый способ неразрушающего локального определения анизотропии диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь СВЧ керамики с использованием сканирующего ближнеполевого СВЧ-микроскопа на основе системы «емкостная диафрагма – индуктивная диафрагма».

Принципиально важным достижением является разработка нового типа устройства ближне-неполевого сканирующего СВЧ микроскопа, на изобретение которого получен патент Российской Федерации.

Результаты диссертационной работы использованы при выполнении ряда научно-исследовательских работ в ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского» и в учебном процессе.

Защищаемые диссертантом положения характеризуются высокой степенью обоснованности, так как опираются на обширные экспериментальные исследования с применением созданных устройств, а также на адекватный теоретический анализ, компьютерное решение соответствующих дифференциальных уравнений с использованием апробированных численных методов и аккуратное сопоставление теоретических и экспериментальных результатов с установлением факта их взаимного соответствия.

Работа не лишена отдельных недостатков:

1. В диссертации описаны различные типы резонансных систем. Работа выиграла бы, если бы автор подробно сопоставил возможности соответствующих вариантов СВЧ-микроскопов в плане их использования для различных практических применений.

2. Автор уделяет основное внимание поиску путей повышения чувствительности СВЧ-микроскопов. Как представляется, следовало бы также рассмотреть гораздо более подробно проблему повышения локальности измерений, в частности, уделить внимание методам контроля расстояния между зондом и образцом.

3. Не проработан вопрос о влиянии электродинамических возмущений, неизбежных в присутствии зонда, на результаты измерений. Ясно, что в полной постановке этот вопрос весьма сложен, но его следовало бы прояснить хотя бы на уровне оценок.

4. Чрезвычайно интересные и новые результаты, относящиеся к обнаруженной сложной пространственной структуре распределения носителей заряда и полей в объеме исследованных устройств (диод Ганна, p-i-n диод), остались недостаточно осмысленными с точки зрения проработки и интерпретации в плане нелинейной динамики и теории самоорганизации.

Отмеченные недостатки не изменяют общей высокой оценки диссертации. Как представляется, работа в ее настоящем виде является законченным исследованием, свидетельствующем о высокой квалификации соискателя, и соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям. По материалам диссертации опубликовано 8 работ, в том числе, 3 статьи в журналах, рекомендованных ВАК; 4 работы опубликованы в трудах международных и Всероссийских конференций, получен 1 патент Российской Федерации на изобретение. Основные материалы диссертации широко апробированы и доложены на Международных

научно-технических конференциях. Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертации.

Результаты представленных в диссертации исследований могут быть *рекомендованы к использованию* на предприятиях и в организациях электронной промышленности, включая ЗАО «НПЦ «Алмаз-Фазотрон», г. Саратов, ФГУП «НПП «Контакт», г. Саратов, ФГУП «НПП «Исток», г. Фрязино, Московская область, в институтах Российской Академии Наук, включая Саратовский и Фрязинский филиалы ФГБУН ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН. Также можно рекомендовать использование в высших учебных заведениях Министерства образования и науки Российской Федерации: ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский университет «МИЭТ» г. Зеленоград, ФГБОУ ВПО «Московский авиационный институт (государственный технический университет)», г. Москва, ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского», ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный университет», ФГАОУ Таганрогский технологический институт Южного федерального университета.

Можно заключить, что диссертационная работа Фадеева А.В. «Ближнеполевая СВЧ-микроскопия и её использование для определения характеристик элементов твердотельной СВЧ электроники» соответствует критериям п. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. №842, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Автор работы заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальностям 05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах и 01.04.03 – Радиофизика.

Отзыв рассмотрен и одобрен на заседании Секции Ученого совета Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН в Саратовском филиале (протокол №14 от 26 ноября 2014 года).

**Отзыв составили:**

Заведующий лабораторией теоретической нелинейной динамики

СФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН,

д.ф.-м.н., профессор

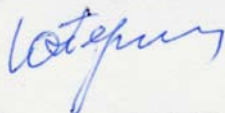
Ведущий научный сотрудник

СФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН,

к.ф.-м.н.



Кузнецов Сергей Петрович



Перепелицын Юрий Николаевич

**Почтовый адрес:** 410019, г. Саратов, ул. Зеленая, д. 38

**Телефон:** 8(8452)272401

**Электронная почта:** info@soire.renet.ru