

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д002.069.03,  
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
БЮДЖЕТНОГО НАУЧНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ «ФЕДЕРАЛЬНЫЙ  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИКИ  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК», МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ, ПО  
ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА  
НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от 25.10.2018 № 14

О присуждении Королеву Сергею Александровичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Микроволновая микроскопия полупроводниковых структур» по специальности 01.04.01 – «Приборы и методы экспериментальной физики» – принята к защите 28 июня 2018 г. (протокол заседания № 3) диссертационным советом Д002.069.03, созданным на базе Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, 603950 г. Нижний Новгород, БОКС - 120, ул. Ульянова. 46, приказ от 30 июня 2017 года номер 670/нк о создании диссертационного совета.

Соискатель Королев Сергей Александрович, 1989 года рождения, в 2012 году окончил Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» по направлению "Радиофизика", освоил программу подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре Института физики микроструктур РАН — филиала Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный

исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» Федерального агентства научных организаций Российской Федерации (срок обучения 01.09.2012 – 31.08.2016), работает в должности младшего научного сотрудника отдела технологии наноструктур и приборов Института физики микроструктур РАН — филиала Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Диссертация выполнена в Институте физики микроструктур РАН — филиале Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, Резник Александр Николаевич, ведущий научный сотрудник отдела физики полупроводников Института физики микроструктур РАН — филиала Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Официальные оппоненты:

1. Канаков Владимир Анатольевич, доктор физико-математических наук, доцент, научный руководитель Общества с ограниченной ответственностью «АФС 52»,

2. Трухин Валерий Николаевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории нелинейных оптических и фотоэлектрических явлений в полупроводниках Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технического института имени А.Ф. Иоффе Российской академии наук

**дали положительные отзывы** на диссертацию.

Ведущая организация – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» (СПбГЭТУ «ЛЭТИ», г. Санкт-Петербург) – в своем **положительном отзыве**, составленном и подписанном Тупиком Виктором Анатольевичем, доктором технических наук, профессором, заведующим кафедрой микрорадиоэлектроники и технологии радиоаппаратуры СПбГЭТУ «ЛЭТИ», и утвержденном Гайворонским Дмитрием Вячеславовичем, кандидатом технических наук, проректором по научной работе СПбГЭТУ «ЛЭТИ», указала, что рецензируемая диссертационная работа посвящена решению актуальной задачи развития методов ближнепольной микроскопии для постановки и решения проблем диагностики сложных объектов, внутренняя структура которых характеризуется большим числом параметров. Отмечено, что диссертация «представляет собой законченное научное исследование, содержащее решение актуальной задачи, характеризующейся теоретической новизной и практической полезностью». «Основные положения и выводы диссертации прошли апробацию и достаточно полно отражены в опубликованных работах». «Автореферат соответствует диссертации и достаточно полно отражает её содержание». «Представленная работа в полной мере соответствует требованиям Положения ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 — Приборы и методы экспериментальной физики, а её автор, С.А. Королев, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук».

Соискатель имеет 45 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 17 работ, из них 4 статьи в рецензируемых научных журналах:

1. A. N. Reznik and **S. A. Korolyov**. Monopole antenna in quantitative near-field microwave microscopy of planar structures. J. Appl. Phys. **119**, 094504 (2016).

2. A. N. Reznik, **S. A. Korolyov** and M. N. Drozdov. Microwave microscopy of diamond semiconductor structures. J. Appl. Phys. **121**, 164503 (2017).
3. A. N. Reznik, N. V. Vostokov, N. K. Vdovicheva, **S. A. Korolyov** and V. I. Shashkin. Near-field microwave tomography of planar semiconductor microstructures. J. Appl. Phys. **122**, 244505 (2017).
4. **S. A. Korolyov** and A. N. Reznik. Quantitative characterization of semiconductor structures with a scanning microwave microscope. Rev. Sci. Instrum. **89**, 023706 (2018).

Недостовверные сведения об опубликованных соискателем работах в диссертации отсутствуют. Личный вклад соискателя в опубликованные по теме диссертации работы является определяющим.

На автореферат диссертации поступило 4 отзыва. Все отзывы положительные:

1) Кошелец Валерий Павлович, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией сверхпроводниковых устройств для приёма и обработки информации Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, в своем отзыве на автореферат диссертации отмечает «глубину и комплексный характер» проведённых исследований, новизну и достоверность полученных результатов, законченность исследования и актуальность решаемой проблемы, имеющей «большое практическое приложение»; отмечает, что «основные результаты работы опубликованы в ведущих научных журналах, и докладывались на представительных российских конференциях», и хорошо известны специалистам».

Отзыв не содержит замечаний.

2) Кревский Михаил Анатольевич, кандидат физико-математических наук, начальник отдела Научно-производственного предприятия «Салют», в своем отзыве на автореферат диссертации отмечает, что «в работе соискателя сделано существенное продвижение на пути создания метода количественной

диагностики с помощью микроволнового микроскопа». «Проведено большое количество экспериментов, подтверждающих работоспособность развитого метода». Подчеркивается, что важные результаты, полученные в исследованиях полупроводникового алмаза, подтверждают практическую значимость данной работы».

Отзыв содержит следующие замечания и вопросы:

1. В работе соискателя уделено недостаточное внимание вопросу границ применимости разработанного метода диагностики.

2. Недостаточно чётко определены частотные границы применимости предложенного метода. Результаты экспериментального исследования приборов короткого миллиметрового диапазона на основе многослойных диодных и транзисторных эпитаксиальных структур свидетельствуют о наличии специфических дефектов, проявляющихся в диапазоне выше 70 ГГц. Возможно ли проведение данными методами анализа эпитаксиальных структур в диапазоне 70-150 ГГц?

3. Существуют ли ограничения по толщинам и типам эпитаксиальных структур?

3) Селиверстов Сергей Валерьевич, кандидат физико-математических наук, старший преподаватель кафедры общей и экспериментальной физики Московского педагогического государственного университета, в своем отзыве на автореферат диссертации отмечает, что «содержание и оформление автореферата, актуальность полученных результатов, новизна и значимость основных положений, выносимых на защиту, безусловно, соответствуют требованиям «Положения о присуждении учёных степеней», предъявляемых ВАК к кандидатским диссертациям».

Отзыв не содержит замечаний.

4) Кукушкин Владимир Алексеевич, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник отдела физики плазменных технологий Института прикладной физики РАН, в своем отзыве на автореферат диссертации отмечает,

что «С.А. Королёв вполне заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук».

Отзыв не содержит замечаний.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обоснован тематической близостью их научных исследований и диссертационного исследования соискателя, посвященных исследованию механизмов и возможностей ближнепольной микроскопии, разработке методов диагностики микроволнового диапазона, изучению свойств твердотельных материалов и структур микроволновыми методами.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

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

Метод микроволновой микроскопии **применен** для измерений сопротивления проводящего слоя многослойной полупроводниковой структуры. При помощи зонда коаксиальной геометрии достигнуто микронное разрешение в измерении сопротивления. Взаимодействие коаксиального зонда с плоскостойкой 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.

С помощью микроволнового микроскопа диапазона 1.3-1.5 ГГц с разрешением  $\sim 70$  мкм **исследованы** проводящие свойства монокристаллических подложек и эпитаксиальных слоёв алмаза в условиях латеральной неоднородности проводимости. Разработанный метод позволил измерить сопротивление эпитаксиального слоя на фоне шунтирующего действия неоднородно проводящей подложки. Установлена корреляция области пониженной проводимости эпитаксиального слоя с нижележащим мезоскопическим дефектом кристаллической структуры подложки. Микроволновым методом в комплексе со стандартными методами диагностики полупроводников (метод ван дер Пау, вторично ионная масс-спектрометрия) получены электрические параметры эпитаксиальных слоёв алмаза: сопротивление, подвижность и концентрация свободных носителей заряда, концентрация примесных атомов и степень их ионизации.

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 низкobarьерного диода Мотта — дельта-легированный изолирующий слой на сильнолегированной подложке.

**Теоретическая значимость** исследования обоснована тем, что полученное аналитическое решение составило теоретическую основу метода измерения сопротивления проводящего слоя многослойной полупроводниковой структуры при помощи коаксиального зонда.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

- разработанный метод позволил получить латеральные профили сопротивления канала транзисторных гетероструктур бесконтактным образом с микронным 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;

- ближнепольная микроволновая томография позволила исследовать глубинный профиль проводимости структуры низкобарьерного диода Мотта с микронным латеральным разрешением.

**Оценка достоверности результатов исследования выявила:**

- теоретическая модель микроволнового микроскопа разработана в рамках стандартных подходов теории антенн и теории распространения электромагнитных полей, развитая 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 методом ван дер Пау;

- исследования алмазных структур проведены различными методами, результаты измерений которых согласуются между собой;

- измерения методом ближнепольной микроволновой томографии проводились с помощью серийного оборудования, результаты измерений обрабатывались с помощью программы, реализованной на основе стандартного алгоритма минимизации невязки функции нескольких переменных.

**Личный вклад соискателя:** Основные результаты, представленные в рассмотренной диссертационной работе, были получены автором лично, либо при непосредственном его участии. Постановка цели и задач диссертационного исследования, интерпретация полученных результатов и формулировка выводов осуществлена совместно с научным руководителем.

