

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Королева Сергея Александровича, выполненной на тему «Микроволновая микроскопия полупроводниковых структур», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики

Одной из важнейших задач, возникающей в области микро- и наноэлектроники, является количественная характеристика исследуемого материала: от полупроводниковых структур до биологических объектов. В последние несколько десятилетий развитие нанотехнологий и лазерной техники привело к становлению и развитию ближнепольной микроскопии в СВЧ, терагерцовом и оптическом спектральных диапазонах. Актуальность темы диссертационной работы обусловлена общей направленностью работы на исследования в данном научном направлении. Диссертация посвящена развитию теории ближнепольного сканирующего микроволнового микроскопа (БСММ), развитию метода количественной характеристики полупроводниковых материалов и структур с помощью БСММ, исследованию полупроводниковых материалов и структур с помощью БСММ, развитию метода ближнепольной микроволновой томографии.

В диссертации развита как теоретическая модель, так и изложены результаты экспериментальных исследований. Экспериментальная часть посвящена экспериментальным исследованиям с использованием методов микроскопии ближнего поля в СВЧ диапазоне пространственных распределений параметров ряда различных объектов. В теоретической части предложено развитие теории БСММ, позволяющая описывать взаимодействие коаксиального зонда с произвольной плоскостойкой средой. В рамках данной теории получено аналитическое выражение для импеданса зонда, позволяющее с использованием эквивалентной схемы резонатора рассчитывать экспериментально измеряемые характеристики прибора «резонансную частоту и добротность резонатора».

Объем диссертационной работы составляет 106 стр. Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, двух приложений (А, В) и списка цитируемой литературы из 134 наименований.

**Введение** посвящено обзору литературы по экспериментальным и теоретическим методам ближнепольной микроскопии. Автор описывает главные особенности методов ближнепольной микроскопии в различных спектральных диапазонах, очерчен круг её применения, освещены важнейшие проблемы в области ближнепольной диагностики. Сформулированы цели и задачи диссертационной работы, ее научная новизна,

практическая значимость и защищаемые положения. Понимание автором современного состояния исследований не вызывает сомнения.

**В первой главе** описан принцип работы и устройство БСММ. Развита квазистатическая теория ближнепольного зондирования плоскостной среды, имеющей произвольный глубинный профиль комплексной диэлектрической проницаемости. На основе решения уравнений электродинамики со сторонним источником поля в виде несимметричной электродипольной антенны, на апертуре которой распределение заряда задается некоторой модельной функцией, проведен расчёт импеданса ближнепольной антенны. Сделан вывод о том, что антенна представляет собой электрический монополь в случае трехмерного растекания тока в среде. В главе также описывается лабораторный макет БСММ. Приведены результаты экспериментальной верификации разработанной теоретической модели БСММ. Для этого были выполнены исследования высотных зависимостей резонансной частоты  $f_0(h)$  и добротности  $Q_0(h)$  ряда образцов. В качестве тестовых образцов были использованы объемно-однородные пластина сапфира и несколько пластин кремния с различной проводимостью. Экспериментальные результаты хорошо согласуются с результатами расчета, проведенного на основе построенной модели БСММ.

**Во второй главе** представлены экспериментальные результаты по диагностике полупроводниковых структур с помощью БСММ. Описывается процедура получения спектральной характеристики коэффициента отражения  $\Gamma(f)$  в режиме сканирования поверхности исследуемого образца и методика калибровки микроскопа. Экспериментально было выявлено, что параметры модели БСММ: параметр затухания резонатора  $\delta$ , апертура антенны  $D$  и эффективная высота зонда  $h_{\text{eff}}$  зависят от проводящих свойств исследуемого образца и поэтому необходимо их определять при помощи калибровочных измерений на эталонных образцах. Описана методика определения параметров образца путем решения обратной задачи с помощью минимизации функции невязки. Проведены экспериментальные исследования слоевого сопротивления пленок GaN на сапфировой подложке. Результаты измерений, проведенных с помощью полоскового зонда и коаксиального зонда, сопоставлялись с данными, полученными контактным методом. Было показано, что для полоскового зонда наблюдается вполне удовлетворительное согласие со значениями, полученными контактным методом: в диапазоне сопротивлений 0.07–14 кОм/□, ошибка не превышает 40%, с коаксиальным зондом - расхождения значительно больше. Полученную существенную разницу результатов связывают с разной структурой квазистатического поля и размеров монопольной и дипольной антенн соответствующих зондов. Был исследован латеральный

профиль сопротивления проводящего канала двух полупроводниковых гетероструктур, выращенных 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. Для коаксиального зонда были использованы две различные системы калибровочных эталонов: объемно-однородные пластины и полупроводниковые пленки GaN на диэлектрической подложке. Результаты измерений БСММ методом сравнивались с данными, полученными контактным методом. Было продемонстрировано, что точность при использовании коаксиальных зондов существенно удается повысить за счет применения системы эталонов в виде пленок GaN. Расхождение с измерениями сопротивления с данными, полученными контактным методом, в среднем составило < 10%.

**В третьей главе** описываются исследования полупроводниковых структур на основе алмаза с помощью разработанного метода микроволновой микроскопии в комплексе со стандартными методами диагностики, который позволил измерить сопротивление полупроводниковых плёнок толщиной порядка 100 нм. Экспериментальные исследования выполнены с использованием коаксиального зонда в диапазоне 1.3-1.5 ГГц с размером апертуры порядка десятков микрон. Результаты измерений БСММ методом сравнивались с данными, полученными контактным методом. Для подложек измерялись профили удельного сопротивления  $\rho(x)$ , для эпитаксиальных пленок - слоевого сопротивления  $R_{sh}(x)$ . Основываясь на данных БСММ, было показано, что многие алмазные подложки имеют латерально неоднородную проводимость -высокоомный регион с  $\rho \sim 10 \text{ кОм} \cdot \text{см}$  в центральной части с понижением сопротивления к краям до  $\rho \sim 0.1 - 1 \text{ кОм} \cdot \text{см}$ . Для пленок с большим сопротивлением погрешность составила  $\sim 20\%$ . Используя метод, описанный во второй главе, удалось исключить шунтирующее влияние подложки и исследовать латеральный профиль сопротивления  $R_{sh}$  эпитаксиального слоя эпитаксиальных дельта-легированных слоев алмаза. После исключения шунтирующего влияния подложки регистрировалось однородное распределение сопротивления эпитаксиального слоя со средним значением  $R_{sh} = 250 \text{ кОм}/\square$ . Также было выявлено влияние макроскопического дефекта кристаллической структуры подложки на электрические свойства эпитаксиального слоя.

**В четвертой главе** приведены описание тестовой структуры и методики ее исследования на основе метода ближнепольной микроволновой томографии микронного латерального разрешения. Эксперименты были выполнены на полупроводниковой структуре низкочастотного диода Мотта - дельта-легированный изолирующий слой на

сильнолегированной подложке. Зондирующая система представляла собой решетку коаксиальных антенн с радиусом центрального контакта 5 – 25 мкм. С помощью микроволновых зондов | Z | Probe (Cascade Microtech) измерялся частотный спектр комплексного импеданса антенн в диапазоне 0.1–67 ГГц. В нескольких точках поверхности образца измерены 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  $\sigma_s$ .

Необходимо отметить, что предложенные в диссертации методы ближнепольной микроволновой микроскопии являются неинвазивными методами, что представляет особую ценность для решения задач диагностики микроструктурированных объектов. Кроме того, соискателем разработаны практические методики измерения сопротивления проводящих слоёв многослойных полупроводниковых структур, калибровки измерительной аппаратуры и алгоритмы обработки экспериментальных данных.

Приведенные автором описания экспериментальных методик, установок и способов теоретического исследования, корректная постановка экспериментальных исследований, анализ погрешностей проведённых измерений и чёткие указания на принятые допущения позволяют сделать вывод о достоверности полученных в диссертации результатов. Совокупность представленных в диссертационной работе экспериментальных и теоретических результатов и их интерпретация дают возможность говорить о достижении поставленной цели работы и получении новых результатов в области ближнепольной микроволновой микроскопии.

Вместе с тем, необходимо отметить некоторые замечания:

1. В тексте встречаются опечатки.
2. Думаю, некоторым опущением диссертации является сокращение вывода аналитического выражения для импеданса антенны (нет решений уравнений электродинамики), хотя в публикации он присутствует. Тем не менее, в тексте приводятся соотношения для величин, которые не используются (например, соотношение для  $\Gamma_j(x)$ ).
3. В диссертации используется простая модельная функция, описывающая распределение поверхностного заряда на апертуре зонда, а именно, равномерное распределение заряда на диске и кольце. В действительности, игла вне коаксиального резонатора представляет собой усеченный конус и распределение заряда на нем будет сильно неоднородно как в плоскости  $x, y$ , так по координате  $z$ . Думаю, что эта

одна из причин, из-за которой параметры предлагаемой модели зависят как от расстояния между концом иглы и образца, так и проводимости исследуемой среды. Оценка вклада импеданса самой иглы отсутствует, а также отсутствует обсуждение усиления поля за счет «эффекта громоотвода», которое будет влиять на распределение заряда.

4. В ряде работ, пространство под концом заостренного зонда, аппроксимируется емкостным импедансом [Alú, A.; Engheta, N. Nat. Photonics 2, pp.307–310(2008), Gyu Cheon Choa et al, Semicond. Sci. Technol. 20, S286–S292(2005)]. Было бы неплохо провести анализ возможности использования этого приближения.

Указанные недочеты, не ставят под сомнение достоверность полученных результатов и не снижают значимости работы. Выполненная экспериментальная работа и полученные теоретические результаты, несомненно, свидетельствуют о высокой квалификации С. А. Королева как физика, специализирующегося в области радиофизики – ближнепольной микроволновой микроскопии.

Автореферат дает полное представление об основном содержании диссертации. Основные результаты и выводы диссертации опубликованы в ведущих научных журналах, неоднократно докладывались на международных конференциях и известны специалистам.

Диссертационная работа «Микроволновая микроскопия полупроводниковых структур» отвечает критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней, а её автор Королёв Сергей Александрович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики.

Старший научный сотрудник лаборатории нелинейных  
оптических и фотоэлектрических явлений в полупроводниках  
Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе,  
кандидат физ.-мат. наук, с.н.с.

В.Н. Трухин

Почтовый адрес: 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26, ФТИ  
им.А.Ф.Иоффе РАН. Телефон: 8-812-2927936. E-mail: valera.truchin@mail.ioffe.ru .

Подпись В.Н. Трухина заверяю  
Ученый секретарь ФТИ им. А.Ф. Иоффе



А.П.Шергин

09.10.2018г