

Отзыв официального оппонента, доктора физико-математических наук,
научного руководителя общества с ограниченной ответственностью «АФС 52»
Канакова Владимира Анатольевича
о диссертации Королёва Сергея Александровича
«Микроволновая микроскопия полупроводниковых структур»
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
по специальности 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики

Диссертационное исследование С.А. Королёва посвящено одной из важнейших проблем физики полупроводников – созданию и развитию неразрушающих методов диагностики полупроводниковых структур и материалов. Среди неразрушающих методов всё большее место занимают методы микроволнового зондирования. К их числу относится ближнепольная сканирующая микроволновая микроскопия, обеспечивающая субмикронное пространственное разрешение. Однако остаётся актуальной разработка методов количественного анализа электрофизических характеристик исследуемых полупроводниковых структур и анализа объектов со сложной внутренней структурой микро-масштаба.

Цель работы – развитие теории и практики применения ближнепольного сканирующего микроволнового микроскопа (БСММ) в области количественной характеристики полупроводниковых материалов и структур и ближнепольной микроволновой томографии (БМТ).

Для достижения поставленной цели решены следующие основные задачи:

1. электродинамическая задача взаимодействия коаксиального зонда (КЗ) со средой, имеющей произвольный глубинный профиль комплексной диэлектрической проницаемости, построенная модель взаимодействия апробирована в эксперименте;
2. метод микроволновой микроскопии распространён на измерение сопротивления проводящего слоя многослойной полупроводниковой структуры;
3. с помощью БСММ исследованы монокристаллические алмазные подложки и дельта-легированные эпитаксильные алмазные слои;
4. разработан и исследован метод БМТ микронного латерального разрешения.

Кроме того, соискателем разработаны практические методики измерения сопротивления проводящих слоёв многослойных полупроводниковых структур, калибровки измерительной аппаратуры и алгоритмы обработки экспериментальных данных.

На основании полученных результатов соискатель выносит на защиту следующие положения.

1. Взаимодействие КЗ БСММ с плоскостной средой может быть количественно описано предложенной аналитической моделью, основанной на квазистатическом решении задачи об излучении в ближней зоне асимметричной электродипольной антенны с заданной формой распределения переменного заряда на электродах. В случае трёхмерного растекания тока в среде антенна КЗ является монополюсом, т.е. её импеданс определяется зарядом, сосредоточенным на конце центрального игольчатого электрода.

2. Метод микроволновой микроскопии позволяет бесконтактным способом измерять сопротивление проводящих слоёв многослойных полупроводниковых структур с микронным латеральным разрешением. Повышение точности измерения слоевого сопротивления достигается за счёт использования в качестве эталонов образцов плёночных полупроводниковых структур. В диапазоне сопротивлений слоёв $\sim 0,1 - 15$ кОм/□ точность составляет $\sim 10\%$.

3. Метод микроволновой микроскопии даёт возможность исследовать плёночные полупроводниковые структуры в условиях гигантской неоднородности проводимости, как плёнки, так и подложки. Для эпитаксиальных структур алмаза удаётся выявить мезоскопические неоднородности сопротивления эпитаксиального слоя и установить их связь со структурной дефектностью подложки. В процессе комплексных исследований (БСММ в сочетании с методами ван дер Пау и вторично-ионной масс-спектрокопии) может быть получен набор электрофизических характеристик эпитаксиального слоя: проводимость, концентрация примеси и степень её ионизации.

4. Метод БМТ позволяет получить трёхмерное распределение электрических характеристик полупроводниковых структур с микронным латеральным разрешением.

Защищаемое положение 1 обосновано достаточно прозрачным теоретическим анализом, в котором все принятые допущения подробно описаны и обоснованы, и подтверждено результатами экспериментальных исследований. Защищаемые положения 2 – 4 обоснованы экспериментальными результатами, полученными соискателем. Для измерений использовалось современное измерительное оборудование, объём экспериментальных данных достаточен для получения статистически обеспеченных результатов, результаты измерений, проведённых с помощью исследуемых методик, сравнивались с априорной информацией об образцах и контрольными результатами, полученными с помощью традиционных контактных методик.

Достоверность полученных результатов подтверждается их согласованностью с известными положениями физики полупроводников, корректной постановкой экспериментальных исследований, анализом погрешностей проведённых измерений и чёткими указаниями на принятые допущения.

Научная новизна диссертационного исследования подтверждена подробным аналитическим обзором источников научно-технической информации (134 ссылки), а также тем, что основные результаты работы опираются на вновь полученные экспериментальные данные:

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. В качестве эталонов предложено использовать полупроводниковые плёнки вместо объёмных образцов, достигнута микронная разрешающая способность за счёт использования КЗ.

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 полученных результатов определяется бурным прогрессом в технологиях разработки, производства и применения полупроводниковых структур, отсутствием верифицированных неискажающих методик измерения их внутренних характеристик и состоит в повышении разрешающей способности, точности и информативности метода ближнепольной сканирующей микроволновой микроскопии.

Считаю важным отметить большой объём и трудоёмкость проведённых С.А. Королёвым экспериментальных исследований.

Диссертация С.А. Королёва соответствует паспорту специальности 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики, является законченной научно-квалификационной работой, содержащей решение задачи, имеющей значение для развития бесконтактных методов диагностирования полупроводниковых материалов и структур.

Личный вклад автора подтверждается его публикациями по теме диссертации. Все основные положения диссертации им опубликованы в рецензируемых научных изданиях. Всего опубликовано 15 работ, из них 4 статьи в рецензируемых научных изданиях, входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования, сделано 11 докладов на международных, всероссийских и одной отраслевой конференциях. Все материалы, научные положения и результаты, принадлежащие другим авторам и использованные в диссертации, снабжены соответствующими ссылками.

Текст диссертации оформлен в соответствии с требованиями, установленными Министерством образования и науки Российской Федерации. Автореферат диссертации полностью соответствует ее содержанию.

К тексту диссертации имеется ряд замечаний.

1. В тексте встречаются опечатки.

2. На мой взгляд, текст диссертации, посвященной развитию метода бесконтактной диагностики полупроводниковых структур, перегружен рассуждениями о возможных причинах рассогласования результатов измерений, полученных различными методиками, которые не влекут каких-либо конструктивных последствий.

3. При чтении текста возникает ощущение смысловой неоднозначности. В первой половине диссертации говорится об измерениях распределений параметров плоскостных образцов с произвольным (видимо, большим) числом слоёв, отличающихся толщиной и комплексной диэлектрической проницаемостью. При том, что по одной резонансной кривой коэффициента отражения оцениваются значения двух действительных величин – резонансной частоты и добротности микроволнового резонатора, слабосвязанного с исследуемой средой. Очевидно, что при таком объеме измерительной информации можно обоснованно оценить один, максимум, два измеряемых параметра, принимающих действительные значения, или один параметр, принимающий комплексное значение. Во второй половине диссертации это

подтверждается – при измерениях оценивается значение чаще одного параметра, реже двух, измерение распределений параметров образца по глубине производится посредством смены зондов, измерение распределений в плоскости образца осуществляется сканированием зонда. Таким образом, оценка распределений измеряемого параметра сводится к нескольким сериям независимых послойных измерений, полное число которых соответствует числу оцениваемых величин. С одной стороны, это правильно, с другой стороны, термин «томография» может означать не только «получение послойного изображения внутренней структуры объекта», но и чаще употребляемое «реконструкция внутренней структуры объекта по проекционным данным».

Сделанные замечания не препятствуют общей положительной оценке диссертации С.А. Королёва.

Заключение

Диссертация является законченной научно-исследовательской работой, выполненной автором самостоятельно на высоком научном уровне. В работе приведены новые научно обоснованные теоретические и экспериментальные результаты, имеющие значение для развития бесконтактных методов диагностирования полупроводниковых материалов и структур. Полученные автором результаты достоверны, выводы и заключения обоснованы. Работа базируется на большом количестве результатов экспериментальных исследований. В диссертации приведены сведения и даны рекомендации по использованию полученных научных результатов. Текст диссертации ясен, содержит незначительное количество опечаток, аккуратно оформлен. Текст автореферата соответствует тексту диссертации.

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.

Официальный оппонент,

лауреат Премии Правительства РФ в области науки и техники,

научный руководитель ООО «АФС 52»,

доктор физико-математических наук, доцент

603950, г. Нижний Новгород, ул. Юбилейная, д. 2.

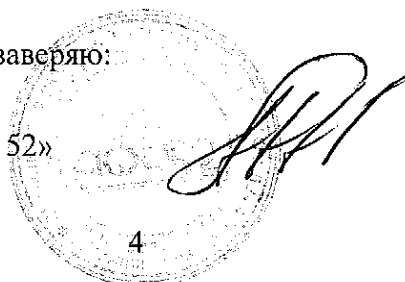
Тел.: (831) 435-21-72; e-mail: kanakov@afs52.ru



В.А. Канаков

Подпись официального оппонента заверяю:

Генеральный директор ООО «АФС 52»



А.Г. Панкратов