

## Отзыв

официального оппонента на диссертацию Фадеева Алексея Владимировича «Ближнеполевая СВЧ-микроскопия и её использование для определения характеристик элементов твердотельной СВЧ электроники», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальностям 05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах и 01.04.03 – Радиофизика.

Диссертационная работа А.В. Фадеева посвящена поиску путей совершенствования характеристик ближнеполевого СВЧ-микроскопа и определению с его помощью характеристик элементов твердотельной электроники, измерение которых другими методами либо крайне затруднительно, либо связано с источниками трудно учитываемых погрешностей. Такого рода формулировка цели исследования позволяет рассчитывать на получение научных результатов, характеризующихся высоким уровнем научной новизны. Новая информация о физике работы приборов твердотельной электроники, перспектива получения которой открывается при достижении сформулированной цели, открывает пути совершенствования технологии их изготовления. Это позволяет сделать вывод об актуальности темы диссертации.

Для совершенствования характеристик ближнеполевого СВЧ-микроскопа необходимо решить ряд специфических задач радиофизики, в частности предложить новый тип резонансной высокоселективной системы, введение которой в микроскоп способно обеспечить его повышенную чувствительность к изменению параметров исследуемых материалов или приборов твердотельной электроники.

Следует отметить, что в настоящее время в печати известны лишь единичные публикации, посвященные исследованию параметров приборов твердотельной электроники с использованием ближнеполевого СВЧ-



микроскопа.

Диссертация содержит результаты большого объема оригинальных теоретических и экспериментальных исследований. В первой главе приведены результаты критического анализа состояния исследований по направлению диссертационных исследований. Результаты анализа позволяют сделать вывод о том, что проведенные в работе исследования и полученные результаты оригинальны.

Во второй главе показана возможность локального измерения анизотропии диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь диэлектриков, используемых при создании микрополосковых СВЧ схем. При измерениях использовалась оригинальная конструкция ближнеполевого СВЧ-микроскопа, в котором в качестве высокоселективной системы использовался резонатор типа «индуктивная диафрагма – емкостная диафрагма», по аналогии с приборами нанoeлектроники названный низкоразмерным. В используемый резонатор включены два заостренных на конце зонда. Созданная система может быть применена для получения новой научной информации о ряде других элементов микроэлектроники и контроля параметров изделий электронной техники.

В третьей главе приведено описание предложенного с участием автора диссертации ближнеполевого СВЧ-микроскопа с высокоселективной резонансной системой в виде диафрагмы с расположенным на ней слоем диэлектрика, на котором размещен заостренный на конце зонд. Возможность измерений с помощью такого микроскопа продемонстрирована на примере встречно-штыревой системы СВЧ акустических линий задержки. Новизна предложенного устройства подтверждается полученным автором патентом на изобретение.

В четвертой главе приведены результаты теоретических исследований полученные путем численного решения соответствующей электродинамической задачи для низкоразмерного резонатора типа



«металлический штырь с зазором – короткозамыкающий поршень с выемкой». Результаты расчета распределения поля хорошо согласуются с результатами измерений.

В пятой главе созданный с использованием такого резонатора микроскоп применен для измерения распределения поля и концентрации электронов в диоде Ганна. Эти измерения были сопоставлены с результатами численного моделирования. Многодоменная структура поля в диоде Ганна была обнаружена ранее. Наибольшее число обнаруженных экспериментально доменов было равно трем. Введение в схему с диодом низкочастотного фильтра позволило обнаружить, при соответствующей плотности тока через диод, возникновение четвертого домена.

В шестой главе автору с использованием ближнеполевого СВЧ-микроскопа удалось экспериментально обнаружить появление с увеличением плотности тока пространственных осцилляций концентрации и распределения электрического поля в базовой области р-і-п диода. Такого рода осцилляции были получены и теоретически. Следует отметить, что проблема определения распределения концентрации и поля в р-і-п диоде имеет довольно большую историю. В рецензируемой работе её решение было впервые представлено на основании численного моделирования и подтверждено экспериментально. По-существу удалось предложить новое представление о физике работы одного из самых распространенных приборов твердотельной СВЧ электроники.

В качестве недостатков работы можно отметить следующее:

1. Несмотря на то, что автор, рассматривая один из типов резонансных систем, убедительно продемонстрировал способность решать сложные радиотехнические задачи, не все рассмотренные типы резонаторов исследовались теоретически.

2. При теоретическом описании распределения концентрации и поля в р-і-п диоде автор не рассматривал возможность изменения граничных условий



при увеличении плотности тока через диод.

Высказанные замечания не изменяют общего положительного впечатления о работе.

Работу характеризует высокая степень обоснованности защищаемых научных положений благодаря тому, что она, как правило, содержит результаты их теоретического рассмотрения в сочетании с экспериментом, хорошо согласующимся с теорией. Диссертация представляет собой законченное исследование. Она содержит результаты исследований, приведших к созданию новых научно обоснованных типов ближнеполевых СВЧ-микроскопов, отличающихся улучшенными основными характеристиками. С помощью этих микроскопов впервые удалось решить задачу по бесконтактному определению распределения концентрации носителей заряда и поля в р-і-п диодах – приборах, имеющих широкое применение в радиолокационных системах. Неразрушающий контроль при изготовлении этих приборов имеет важное практическое значение. Отметим, что известны работы, в которых сравниваются изображения нанообъектов, полученные с помощью туннельного или атомно-силового микроскопов и с помощью ближнеполевого СВЧ-микроскопа. Отмечается их сходство и близкая разрешающая способность. В рецензируемой диссертационной работе по- существу определена своего рода «ниша», в которой СВЧ-микроскопы могут обладать преимуществами и быть успешно использованы для контроля параметров приборов микро- и нанoeлектроники в рабочем режиме, что представляется важным для науки и практики. Основные научные результаты диссертации достаточно полно опубликованы в рецензируемых научных изданиях из перечня Министерства образования и науки РФ, доложены на международных и республиканских конференциях, защищены патентом на изобретение.

Диссертация изложена хорошим литературным языком и хорошо оформлена. Автореферат соответствует материалам диссертации.

Считаю, 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, а автор работы заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальностям 05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах и 01.04.03 – Радиофизика.

02.12. 2014 г.

Официальный оппонент

Быков Виктор Александрович

Почтовый адрес: 141700, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, д.9; Телефон: 8(495) 229-70-94;

e-mail: [spm@ntmdt.ru](mailto:spm@ntmdt.ru)

ФГАОУ ВПО «Московский физико-технический институт (государственный университет)»

д.т.н., профессор кафедры микро- и наноэлектроники

Подпись Быкова В.А. заверяю

Ученый секретарь

ФГАОУ ВПО «Московский физико-технический институт (государственный университет)»

кандидат физико-математических наук, доцент

*Ю. И. Скалько* Ю. И. Скалько

