

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 212.243.01 НА БАЗЕ
Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего профессионального образования
«Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского»
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

Решение диссертационного совета от 29.12.2014 № 35
О присуждении Фролову Александру Павловичу, гражданину РФ, ученой
степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Структуры с фотонной запрещенной зоной и их использование в ближнеполевой СВЧ-микроскопии» по специальностям 01.04.03 – Радиофизика и 05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах принята к защите 27 октября 2014 г., протокол № 31, диссертационным советом Д 212.243.01 на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования (ФГБОУ ВПО) «Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского» (Министерство образования и науки Российской Федерации, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83); совет утвержден приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от 15.02.2013, № 75-нк.

Соискатель Фролов Александр Павлович 1985 года рождения, в 2009 году окончил ГОУ ВПО «Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского», в 2012 году освоил программу подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре на кафедре физики твердого тела ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского», работает инженером учебной лаборатории по полупроводниковой технике кафедры физики твердого тела ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского», Министерство образования и науки Российской Федерации.

Диссертация выполнена на кафедре физики твердого тела ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный университет имени Н.Г.Чернышевского», Министерство образования и науки Российской Федерации.

Научные руководители:

Усанов Дмитрий Александрович – доктор физико-математических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный университет имени Н.Г.Чернышевского», кафедра физики твердого тела, заведующий кафедрой;

Скрипаль Александр Владимирович – доктор физико-математических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный университет имени Н.Г.Чернышевского», кафедра физики твердого тела, профессор.

Официальные оппоненты:

Неганов Вячеслав Александрович – Заслуженный работник высшей школы РФ, доктор физико-математических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики (ПГУТИ)», кафедра основ конструирования и технологий радиотехнических систем, заведующий кафедрой;

Сивяков Борис Константинович – доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», кафедра «Электротехника и электроника», заведующий кафедрой, дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – Саратовский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки (ФГБУН) Институт радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова РАН, г. Саратов, – в своем положительном заключении, подписанном заведующим лабораторией фотоники, доктором физико-математических наук, профессором Поповым Вячеславом Валентиновичем и заведующим лабораторией субмикронной электроники, доктором физико-математических наук, профессором Ушаковым Николаем Михайловичем, указала, что в диссертационной работе Фролова А.П. на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, решена имеющая существенное значение для радиофизики и твердотельной электроники задача по исследованию структур с фотонной запрещенной зоной и их использования в ближнеполевой СВЧ-микроскопии. Диссертационная работа Фролова А.П. «Структуры с фотонной запрещенной зоной и их использование в ближнеполевой СВЧ-микроскопии» соответствует критериям п. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемым к кандидатским диссертациям, а автор работы заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальностям 01.04.03 – Радиофизика и 05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах.

Соискатель имеет 13 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации – 13; работ, опубликованных в рецензируемых научных изданиях, – 3, в трудах международных и Всероссийских научных конференций – 7, конференций, получены 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ – 1, патентов РФ на полезную модель – 1.

Наиболее значимые работы:

1. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Абрамов А.В., Боголюбов А.С., Коротин Б.Н., Феклистов В.Б., Пономарев Д.В., Фролов А.П. Ближнеполевая СВЧ-микроскопия нанометровых слоев металла на диэлектрических подложках// Известия вузов. Электроника. 2011. №5(91). С. 83–90. (Предложена конструкция ближнеполевого СВЧ-микроскопа на основе полупроводникового автодинного генератора на диоде Ганна с подключенным к нему зондом, включающим микрокоаксиально-волноводный переход с отрезком микрокоаксиала с центральным проводником, выступающим за пределы внешнего проводника микрокоаксиала. Созданный микроскоп позволяет визуализировать с высоким пространственным разрешением рельеф и электрофизические свойства поверхности керамической пластины с нанесенным нанометровым слоем металла как в режиме прямого доступа к объекту сканирования, так и в режиме подповерхностного зондирования).
2. Усанов Д.А., Никитов С.А., Скрипаль А.В., Горбатов С.С., Пономарев Д.В., Фролов А.П., Кваско В.Ю. Ближнеполевая СВЧ-микроскопия наноструктур металл-диэлектрик// Электронная техника. Серия 1 «СВЧ-техника». 2012, вып. 3 (512). С. 71–81. (Дана математическая модель взаимодействия электромагнитного излучения СВЧ-диапазона с одномерными волноводными фотонными кристаллами и доказана возможность создания ближнеполевого СВЧ-микроскопа на основе полупроводникового автодинного генератора на диоде Ганна с подключенным к нему зондом).
3. Усанов Д.А., Никитов С.А., Скрипаль А.В., Фролов А.П. Ближнеполевой сверхвысокочастотный микроскоп на основе фотонного кристалла с резонатором и

регулируемым элементом связи в качестве зонда// Радиотехника и электроника. 2013. Т. 58. № 12. С. 1071–1078. (Предложена новая конструкция ближнеполевого СВЧ-микроскопа с резонатором и регулируемым элементом связи в качестве зонда. Показана возможность использования одномерного фотонного кристалла с нарушением периодичности в качестве перестраиваемого резонатора, обеспечивающего управление резонансными особенностями в спектре отражения зонда ближнеполевого СВЧ-микроскопа на основе цилиндрического резонатора с рамочным элементом связи. Продемонстрирована высокая чувствительность данного типа зонда к изменению параметров исследуемых диэлектрических пластин с различными значениями диэлектрической проницаемости, достигающая значения 39,5 дБ/ε, и толщин нанометровых металлических слоев, нанесенных на диэлектрические пластины, достигающая значения 10,6 дБ/нм, что позволяет реализовать возможность контроля параметров данного типа структур, размещаемых как на фиксированном расстоянии вблизи острия зонда, так и в режиме касания).

На диссертацию и автореферат поступило 6 положительных отзывов: из ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»» от главного научного сотрудника, профессора кафедры «Электронные приборы», д.т.н. Соколова Игоря Вячеславовича; из Московского авиационного института (национального исследовательского университета) от заведующего кафедрой «Теоретическая радиотехника», профессора, д.т.н. Кузнецова Юрия Владимировича; из ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный университет» от заведующего кафедрой электроники, профессора, д.ф.-м.н. Бобрешова Анатолия Михайловича; из ИНЭП Южного федерального университета от заведующего кафедрой радиотехнической электроники, профессора, д.т.н. Червякова Георгия Георгиевича; из института физики полупроводников имени В.Е. Лашкарева НАН Украины от заведующего лабораторией Физико-технологических проблем твердотельной СВЧ электроники, профессора, д.т.н. Конаковой Раисы Васильевны; из ООО НПП «НИКА-СВЧ» от ведущего научного сотрудника, к.т.н. Корчагина Алексея Игоревича.

В качестве замечаний в отзывах отмечается: отсутствие данных о предельных значениях толщины и электропроводности проводящего покрытия при подповерхностном зондировании с помощью ближнеполевого СВЧ-микроскопа; отсутствие фазочастотных характеристик предложенного автором СВЧ-устройства на основе диафрагмы и системы связанных рамочных элементов.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается близким соответствием проводимых исследований тематике диссертации, высокой квалификацией и компетентностью оппонентов, известностью и общепринятыми достижениями организации в радиофизике и твердотельной электронике, а также в смежных областях; отсутствием совместных печатных работ с соискателем и способностью определить научную и практическую ценность диссертационной работы.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработана новая экспериментальная методика, основанная на использовании эффекта автодинного детектирования в генераторе на диоде Ганна и позволяющая визуализировать электрофизические свойства тонких металлических пленок, нанесенных на диэлектрическое основание, как в режиме прямого доступа к объекту сканирования, так и в режиме подповерхностного зондирования;

разработан новый тип волноводного СВЧ-устройства на основе диафрагмы и системы связанных рамочных элементов, обладающий фотонной запрещенной зоной с высокоселективным резонансом пропускания и фотонной разрешенной зоной с резонансом запираения;

предложено использование одномерного волноводного фотонного кристалла с нарушением периодичности в качестве резонатора ближнеполевого СВЧ-микроскопа для повышения чувствительности коэффициента отражения к изменению электрофизических параметров полупроводниковых и металло-диэлектрических структур;

доказана возможность использования структур с запрещенной и разрешенной зонами, содержащих в своем частотном спектре резонансную моду колебаний, в качестве резонатора ближнеполевого СВЧ-микроскопа для повышения его чувствительности;

введены новые принципы создания устройств, обладающих фотонной запрещенной зоной с высокоселективным резонансом пропускания и фотонной разрешенной зоной с резонансом запираения, отличительной особенностью которых является уменьшение числа входящих в их состав элементов и габаритных размеров данных устройств.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

доказано, что при увеличении количества слоёв N фотонного кристалла, представляющего собой одномерную структуру, с малым числом входящих в его состав элементов, симметричную относительно центрального слоя с фиксированным значением диэлектрической проницаемости, ширина запрещенной зоны монотонно уменьшается, а её глубина монотонно увеличивается, если количество слоёв N фотонного кристалла удовлетворяет только одной из последовательностей чисел $N = 4n - 1$, например, 3, 7, 11, 15 и т.д. или $N = 4n + 1$, например, 5, 9, 13, 17 и т.д., где n – целые числа;

Применительно к проблематике диссертации результативно (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов) использован комплекс аналитических и численных методов (метод матриц передачи, метод конечных элементов) описания взаимодействия СВЧ-излучения со структурами, характеризующимися наличием разрешенных и запрещенных зон и экспериментальных методов исследования, основанных на измерении амплитудно-частотных характеристик отражения и прохождения электромагнитного излучения;

изложены доказательства возможности создания регулируемых, высокоселективных, малогабаритных СВЧ фотонных структур и их использования в качестве элементов ближнеполевых сканирующих СВЧ-микроскопов для повышения их чувствительности к изменению параметров материалов и структур микро- и наноэлектроники;

раскрыты новые закономерности в изменении глубины и ширины запрещенных зон в спектре выходного сигнала фотонных кристаллов с малым числом входящих в его состав элементов, возникновения в запрещенной частотной зоне резонансной особенности типа «окна прозрачности», а в разрешенной зоне резонансной особенности типа «пика заграждения» при введении в рамочные элементы неоднородностей типа «штырь с зазором» и электрического управления коэффициентом пропускания с помощью $n-i-p-i-n$ -структуры, величина удельной эффективной электропроводности которой, вычислялась с учетом координатной зависимости распределения неравновесных носителей заряда в i -области;

изучены возможности использования эффекта автодинного детектирования в многоконтурном полупроводниковом генераторе на диоде Ганна, для создания ближнеполевого сканирующего СВЧ-микроскопа;

проведена модернизация модели, описывающей ближнеполевое взаимодействие электромагнитного излучения с исследуемыми полупроводниковыми структурами при наличии примесной моды колебаний в спектре СВЧ фотонного кристалла

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

разработана и внедрена конструкция ближнеполевого СВЧ-микроскопа с зондом в виде цилиндрического резонатора с регулируемым рамочным элементом связи и высокоселективной резонансной системой в виде фотонной структуры с неоднородностью, обеспечивающая высокую чувствительность измерительной системы к изменению толщины металлических слоев в нанометровом диапазоне и диэлектрической проницаемости;

предложен новый тип волноводного устройства на основе диафрагмы и системы рамочных элементов, характеризующийся наличием запрещенной и разрешенной зон в СВЧ-диапазоне частот. Показано, что введение в конструкцию неоднородностей типа «штырь с зазором» с электрически управляемым элементом в виде $n-i-p-i-n$ -структуры обеспечивает возможность создания СВЧ-устройства для управления выходной мощностью генератора на диоде Ганна;

создана модернизированная конструкция ближнеполевого СВЧ-микроскопа на основе полупроводникового автодинного генератора на диоде Ганна и показана возможность его использования для визуализации с высоким пространственным разрешением рельефа и электрофизических свойств поверхности керамической пластины с нанесенным нанометровым слоем металла;

представлена методика неразрушающего контроля элементов микро- и нанoeлектроники с использованием технологии подповерхностного зондирования с использованием ближнеполевого СВЧ-микроскопа.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

для экспериментальных работ достоверность результатов обеспечена применением современной измерительной аппаратуры (векторного анализатора цепей Agilent PNA-L Network Analyzer N5230A, спектроанализатора Agilent E4447A PSA), обработкой экспериментальных результатов с использованием стандартных численных методов;

теория построена с использованием матриц передачи для описания взаимодействия СВЧ-излучения с многослойными периодическими структурами и метода конечных элементов для описания ближнеполевого взаимодействия микрооаксиального зонда с исследуемыми полупроводниковыми и металло-диэлектрическими структурами;

идея базируется на использовании в качестве высокочувствительных резонансных систем, созданных на основе резонансной моды колебаний в спектре фотонного кристалла с нарушением периодичности и эффекта ближнеполевого взаимодействия СВЧ-излучения с зондируемым объектом;

использована зонная модель спектральных характеристик периодической структуры в СВЧ-диапазоне и эффектов ближнеполевого взаимодействия;

установлено качественное и количественное соответствие оригинальных и литературных результатов, описывающих взаимодействие СВЧ-излучения с

периодическими структурами, представленными в известных литературных источниках;

использованы методики численных расчетов на основе метода конечных элементов (САПР Ansoft HFSS v.15), позволяющие моделировать различные СВЧ-устройства и отдельные его части, рассчитывать с высокой точностью амплитудно-частотные и фазочастотные характеристики данных СВЧ-устройств.

Личный вклад соискателя состоит в проведении всего объема экспериментальных работ, в предложении теоретических моделей, описывающих результаты экспериментов, в проведении всего объема компьютерного моделирования и экспериментов и анализе полученных результатов, в личном участии в апробации результатов исследований, в подготовленных при участии автора основных публикаций по выполненной работе.

Результаты диссертации рекомендуются к использованию на предприятиях и в организациях электронной промышленности (ЗАО «НПЦ «Алмаз-Фазотрон», г. Саратов, ОАО НПП «Контакт», г. Саратов, АО НПП «Исток», г. Фрязино, Московская обл., ОАО «Центральный НИИ измерительной аппаратуры», г. Саратов; Саратовский и Фрязинский филиалы Института радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова РАН), а также в образовательных организациях (ФГАОУ ВПО «Национальный исследовательский университет «МИЭТ», г. Зеленоград, ФГБОУ ВПО «Московский авиационный институт (государственный технический университет)», Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», г. С.-Петербург, Южный федеральный университет (Инженерно-технологическая академия, г. Таганрог), ФБГОУ ВПО Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, г. Самара, Саратовский и Воронежский государственные университеты).

Диссертационная работа Фролова А.П. «Структуры с фотонной запрещенной зоной и их использование в ближнеполевой СВЧ-микроскопии» 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.

На заседании 29 декабря 2014 года диссертационный совет принял решение присудить Фролову А.П. ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 23 человек, из них по специальности рассматриваемой диссертации 01.04.03 «Радиофизика» – 10 докторов наук, по специальности рассматриваемой диссертации 05.27.01 «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах» – 7 докторов наук, участвовавших в заседании, из 31 человека, входящего в состав совета, проголосовал: за – 23, против – нет, недействительных бюллетеней – нет.

Исполняющий обязанности председателя

диссертационного совета



Рыскин Никита Михайлович

(фамилия, имя, отчество – при наличии)

Ученый секретарь

диссертационного совета



Аникин Валерий Михайлович

(фамилия, имя, отчество – при наличии)

29.12.2014