

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по НИР

ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»

Алексей Александрович Короновский

2018 г.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения  
высшего образования «Саратовский национальный исследовательский  
государственный университет имени Н.Г. Чернышевского»

по диссертации Евтеева Сергея Геннадиевича

«СВЧ фотонный кристалл с электрически управляемыми характеристиками и  
возможность его использования в ближнеполевом сканирующем СВЧ-микроскопе»  
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по  
специальностям 01.04.03 – Радиофизика  
05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и  
наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах  
выполненной на кафедре физики твердого тела факультета нано- и биомедицинских  
технологий.

Тема диссертационной работы утверждена приказом ректора от 19.09.2018 года  
№157-Д.

Соискатель Евтеев Сергей Геннадиевич в 2013 г. окончил Федеральное  
государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального  
образования «Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского»  
по специальности «Нанотехнология в электронике» с присвоением квалификации  
инженер.

Справка об обучении № 90-2018 выдана 08.10.2018 года Федеральным  
государственным бюджетным образовательным учреждением высшего образования  
«Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени  
Н.Г. Чернышевского».

Диплом об окончании аспирантуры по направлению подготовки 11.06.01  
Электроника, радиотехника и системы связи. выдан 03.07.2017 года № 106404 0031645  
Федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего

образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г.Чернышевского».

В период подготовки диссертации с 2013 по 2017 г.г. соискатель обучался в аспирантуре ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского» по направлению подготовки кадров высшей квалификации 11.06.01 Электроника, радиотехника и системы связи. В настоящее время является соискателем (Приказ №157-Д от 19.09.2018 г.) для подготовки диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальностям 01.04.03 – Радиофизика и 05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах, работает в должности инженера лаборатории физики полупроводников НИИМФ.

Научные руководители: Усанов Дмитрий Александрович, ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского», заведующий кафедрой физики твердого тела, заслуженный деятель науки РФ, профессор, доктор физико-математических наук и Скрипаль Александр Владимирович, ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского», профессор кафедры физики твердого тела, профессор, доктор физико-математических наук представили положительный отзыв о диссертации и соискателе.

Научную экспертизу диссертация проходила на объединенном заседании кафедры физики твердого тела и кафедры физики полупроводников факультета нано- и биомедицинских технологий с приглашением специалистов по профилю диссертации из других структурных подразделений СГУ и других научных учреждений. На заседании присутствовали:

1. Усанов Д.А., заслуженный деятель науки РФ, д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой физики твердого тела,
2. Скрипаль Ал.В., д.ф.-м.н., профессор кафедры физики твердого тела,
3. Скрипаль Ан.В., д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой медицинской физики,
4. Михайлов А.И. д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой физики полупроводников,
5. Аникин В.М., д.ф.-м.н., профессор, декан физического факультета, заведующий кафедрой компьютерной физики и метаматериалов на базе Саратовского филиала института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
6. Роках А.Г., д.ф.-м.н., профессор кафедры физики полупроводников,

7. Попов В.В., д.ф.-м.н., профессор, заведующий лабораторией нанофотоники Саратовского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
8. Кузнецов С.П., д.ф.-м.н., профессор, главный научный сотрудник Саратовского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
9. Безручко Б.П., д.ф.-м.н., профессор кафедры динамического моделирования и биомедицинской инженерии,
10. Трофимова Н.Б., к.ф.-м.н., доцент кафедры физики твердого тела,
11. Феклистов В.Б., к.ф.-м.н., доцент кафедры физики твердого тела,
12. Пономарев Д.В., к.ф.-м.н., доцент кафедры физики твердого тела,
13. Постельга А.Э., к.ф.-м.н., доцент кафедры физики твердого тела,
14. Добдин С.Ю., к.ф.-м.н., доцент кафедры физики твердого тела,
15. Калинин М.Ю., к.ф.-м.н., доцент кафедры медицинской физики,
16. Рытик А.П., к.ф.-м.н., доцент кафедры медицинской физики,
17. Сагайдачный А.А., к.ф.-м.н., доцент кафедры медицинской физики,
18. Латышева Е.В., к.ф.-м.н., старший преподаватель кафедры физики твердого тела.

Рецензенты диссертации:

Попов Вячеслав Валентинович, д.ф.-м.н., профессор, заведующий лабораторией нанофотоники Саратовского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН представил положительный отзыв,

Пономарев Денис Викторович, к.ф.-м.н., доцент кафедры физики твердого тела представил положительный отзыв.

По итогам обсуждения диссертации принято следующее заключение:

Диссертационная работа Евтеева Сергея Геннадиевича «СВЧ фотонный кристалл с электрически управляемыми характеристиками и возможность его использования в ближнеполевом сканирующем СВЧ-микроскопе» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальностям 01.04.03 – Радиофизика, 05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах, представляет законченное исследование, посвященное созданию нового типа СВЧ фотонного кристалла на основе резонансных диафрагм с электрически управляемыми характеристиками с помощью  $n-i-p-i-n$ -структур и его использованию для совершенствования параметров ближнеполевого СВЧ-микроскопа. и соответствует требованиям п.9-11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней» для кандидатских диссертаций.

*Актуальность темы* диссертационной работы обусловлена необходимостью разработки нового типа СВЧ фотонного кристалла на основе резонансных диафрагм с электрически управляемыми характеристиками с помощью *n-i-p-i-n*-структур и его использования для совершенствования характеристик ближнеполевого СВЧ-микроскопа.

*Новизна исследований, проведенных в ходе диссертационной работы, состоит в следующем:*

Теоретически обоснована и экспериментально показана возможность использования предложенного зонда ближнеполевого СВЧ-микроскопа в виде резонансной диафрагмы с резонатором на основе волноводного фотонного кристалла с диэлектрическим заполнением с нарушением периодичности для достижения чувствительности ближнеполевого СВЧ-микроскопа при измерениях диэлектрической проницаемости материалов, превышающей 100 дБ на единицу диэлектрической проницаемости.

Обосновано теоретически и подтверждено экспериментально чередование «разрешенных» и «запрещенных» зон на амплитудно-частотных характеристиках структуры, представляющей собой периодически расположенные в волноводе металлические резонансные диафрагмы на диэлектрических подложках. В запрещенной зоне наблюдаются ярко выраженные пики пропускания, количество которых на единицу меньше числа диафрагм, образующих фотонный кристалл.

Установлено, что при увеличении ширины щели резонансной диафрагмы при фиксированной диэлектрической проницаемости подложки и увеличении диэлектрической проницаемости подложки при фиксированной ширине щели, увеличивается ширина и глубина запрещенной зоны фотонного кристалла на основе резонансных диафрагм. В этом случае, низкочастотная граница запрещенной зоны остается практически неизменной, а увеличение ширины запрещенной зоны происходит за счет смещения её высокочастотной границы в сторону высоких частот.

Показано, что введение нарушения в фотонном кристалле в виде уменьшенного расстояния между центральными диафрагмами приводит к возникновению в запрещенных зонах пиков пропускания.

Обосновано теоретически и подтверждено экспериментально существование примесных мод колебаний на двух частотах в запрещенной зоне фотонного кристалла при изменении тока в *n-i-p-i-n*-диодной матрице, выполняющей роль нарушения в виде проводящего слоя в фотонном кристалле на резонансных диафрагмах.

Показана возможность создания электрически управляемого модулятора и переключателя СВЧ-сигнала, работающего как в прямом, так и в инверсном режимах, с динамическим диапазоном более 40 дБ на основе фотонного кристалла на резонансных диафрагмах при изменении тока в  $n-i-p-i-n$ -диодной матрице, выполняющей роль нарушения.

Предложен, теоретически и экспериментально исследован фотонный кристалл на резонансных диафрагмах, в котором размер центральной диафрагмы, выполняющей роль нарушения, электрически управляется с помощью  $n-i-p-i-n$ -диодной структуры.

Показана возможность использования отражательных свойств фотонных кристаллов с диэлектрическим заполнением и на основе резонансных диафрагм в схеме с  $Y$ -циркулятором для реализации системы, обладающей разрешенной зоной с частотно-независимой передаточной характеристикой при коэффициенте прохождения близком к единице.

Показана возможность использования отражательных свойств фотонных кристаллов с диэлектрическим заполнением и резонансными диафрагмами в схеме с  $Y$ -циркулятором для создания фильтров заграждения с управляемыми  $n-i-p-i-n$ -диодами характеристиками, обладающих уровнем заграждения в полосе заграждения более 43 дБ и потерями вне полосы менее 0.8 дБ.

Новизна проведенных исследований подтверждается также полученным патентом РФ на изобретение №2 658 113 С1 «СВЧ фотонный кристалл».

*Практическая значимость* полученных результатов заключается в следующем:

Предложено использование зонда ближнеполевого СВЧ-микроскопа в виде резонансной диафрагмы с резонатором на основе волноводного фотонного кристалла с диэлектрическим заполнением с нарушением периодичности для достижения чувствительности ближнеполевого СВЧ-микроскопа при измерениях диэлектрической проницаемости материалов, превышающей 100 дБ на единицу диэлектрической проницаемости.

Показано, что изменением апертуры зонда ближнеполевого СВЧ-микроскопа в виде резонансной диафрагмы с резонатором на основе волноводного фотонного кристалла с нарушением периодичности обеспечивается выбор диапазонов значений диэлектрической проницаемости с максимальной чувствительностью коэффициента отражения к изменению диэлектрической проницаемости исследуемого образца.

Предложен и экспериментально реализован СВЧ фотонный кристалл, выполненный в виде периодически расположенных в волноводе металлических

резонансных диафрагм на диэлектрических подложках и характеризующийся наличием разрешенных и запрещенных зон на АЧХ фотонного кристалла, размеры которых определяются расстоянием между диафрагмами и их числом, размерами щелей и величиной диэлектрической проницаемости диэлектрической подложки.

Реализован электрически управляемый модулятор и переключатель СВЧ-сигнала на основе фотонного кристалла на резонансных диафрагмах, в котором размер центральной диафрагмы, выполняющей роль нарушения, электрически управляется с помощью *n-i-p-i-n*-диодной структуры, выполняющей роль нарушения периодичности.

Реализована система, обладающая разрешенной зоной с частотно-независимой передаточной характеристикой при коэффициенте прохождения близком к единице, использующая отражательные свойства фотонных кристаллов с диэлектрическим заполнением и на основе резонансных диафрагм в схеме с *Y*-циркулятором.

Предложены фильтры заграждения с управляемыми *n-i-p-i-n*-диодами характеристиками на основе фотонных кристаллов с диэлектрическим заполнением и резонансными диафрагмами с плоской разрешенной зоной, формируемой в схеме на отражение с *Y*-циркулятором, обладающие уровнем запираения в полосе заграждения более 43.0 дБ и потерями вне полосы менее 0.8 дБ.

*Личный вклад* автора выразился в проведении всего объема экспериментальных работ, в создании теоретических моделей, описывающих результаты экспериментов, проведении компьютерного моделирования и анализе полученных результатов.

*Достоверность* результатов диссертации обеспечивается обоснованностью выбранного метода теоретического описания исследованного фотонного кристалла, использованием современной измерительной аппаратуры и апробированных методов измерений при выполнении экспериментальных исследований, обработкой экспериментальных данных с использованием стандартных методов, качественным и количественным соответствием выводов теории основным результатам, полученным экспериментально.

*Апробация работы.* Работа выполнена на кафедре физики твердого тела Саратовского государственного университета имени Н.Г. Чернышевского в 2013-2018 годы. Основные положения и результаты, полученные в ходе выполнения диссертационной работы, докладывались и обсуждались на:

- XIV, XV и XVI Международной научно-технической конференции «Физика и технические приложения волновых процессов». 22-24 ноября 2016 г. Самара 2016., 20 – 24 ноября 2017 г. Казань, 10-14 сентября 2018 г. г. Миасс.

- IV и V Всероссийской научной школе-семинаре «Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами»: Саратов, 18–19 мая 2017 г., Саратов, 16–17 мая 2018 г.

- 27-ой и 28-ой Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2017). Севастополь, 10—16 сентября 2017 г., (КрыМиКо'2018). Севастополь, 9–15 сентября 2018 г.

Обсуждались на семинарах кафедры физики твердого тела.

Полученные в диссертационной работе результаты использованы при выполнении государственного задания Минобрнауки России в сфере научной деятельности (базовая часть) 8.7628.2017/БЧ, код проекта 7628 по теме «Разработка новых типов функциональных устройств СВЧ, КВЧ и терагерцового диапазонов и методов диагностики с использованием ближнеполевой СВЧ-микроскопии на основе фотонных кристаллов», проектной части государственного задания в сфере научной деятельности Министерства образования и науки Российской Федерации по теме «Исследование эффектов резонансного взаимодействия электромагнитного излучения сверхвысокочастотного и терагерцового диапазонов с неоднородными микро- и наноструктурами и композитами» №16.1575.2014/К, шифр: «Наноскоп-2»; государственного задания Министерства образования и науки РФ НИР «Разработка на основе фотонных кристаллов СВЧ-методов контроля высокого разрешения параметров наноструктур и нанокомпозитов» на 2012–2014 годы, шифр «Нанокомплекс».

Результаты, полученные в ходе выполнения диссертационной работы, использованы в учебном процессе СГУ для подготовки студентов факультета нано- и биомедицинских технологий, обучающихся по направлениям бакалавриата и магистратуры «Электроника и наноэлектроника», «Физика».

Диссертационная работа Евтеева С.Г. соответствует специальностям 01.04.03 – Радиофизика, 05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах.

Материалы диссертации в полном объеме изложены в 11 печатных работах, в том числе 4 статьи в журналах, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России, 1 статья в

научных изданиях, входящих в международные наукометрические базы (Scopus, Web of Science), получен 1 патент РФ на изобретение.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ ИЗЛОЖЕНЫ  
В СЛЕДУЮЩИХ ПУБЛИКАЦИЯХ:

В научных изданиях, входящих в международные наукометрические базы  
(Scopus, Web of Science)

1. Усанов Д.А., Никитов С.А., Скрипаль А.В., Мерданов М.К., Евтеев С.Г. Волноводные фотонные кристаллы на резонансных диафрагмах с управляемыми  $n-i-p-i-n$ -диодами характеристиками// Радиотехника и электроника. 2018. № 1. С. 65–71.

В изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ

2. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Мерданов М.К., Евтеев С.Г. Волноводные фотонные структуры на резонансных диафрагмах// Радиотехника. 2015. № 10. С. 108–113.

3. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Мерданов М.К., Пономарев Д.В., Евтеев С.Г. СВЧ фотонные кристаллы – новый тип функциональных структур, применяемых в радиоэлектронике// Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2016. Т. 19. №3. С. 17–24.

4. Усанов Д.А., Никитов С.А., Скрипаль А.В., Мерданов М.К., Евтеев С.Г., Фролов А.П. СВЧ фотонные кристаллы с электрически управляемыми характеристиками// Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2017. Том: 20. № 3. С. 43–51.

В других изданиях

5. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Мерданов М.К., Пономарев Д.В., Евтеев С.Г. СВЧ фотонные кристаллы–новый тип функциональных структур, применяемых в радиоэлектронике//Материалы XIV Международной научно-технической конференции «Физика и технические приложения волновых процессов». 22-24 ноября 2016 г. Самара 2016. Казань: Изд-во ООО «16ПРИНТ», 2016. С. 110–113 (272 с.) ISBN 978-5-9907911-3-8

6. Усанов Д.А., Никитов С.А., Скрипаль А.В., Мерданов М.К., Евтеев С.Г. Характеристики СВЧ фотонных кристаллов на основе резонансных диафрагм с нарушением периодичности в виде  $n-i-p-i-n$ -диодной матрицы// Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами: Материалы четвертой Всерос. научной школы-семинара / под ред. проф. Д. А. Усанова. – Саратов: изд-во Саратовский источник, 2017. С.84–86.



7. Усанов Д.А., Никитов С.А., Скрипаль А.В., Мерданов М.К., Евтеев С.Г. Волноводные фотонные кристаллы с управляемыми n-i-p-i-n-диодами характеристиками// Материалы 27-ой Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2017). Севастополь, 10—16 сентября 2017 г.: материалы конф. в 8 т. Т. 4, С. 894—900. УДК 621.3.029.62+621.39 ББК 32я431. Proceedings of the 27th Int. Conference “Microwave & Telecommunication Technology” (CriMiCo'2017). Sevastopol, Russia, 10—16 September, 2017
8. Усанов Д.А., Никитов С.А., Скрипаль А.В., Мерданов М.К., Евтеев С.Г., Фролов А.П. СВЧ фотонные кристаллы с электрически управляемыми характеристиками// II НАУЧНЫЙ ФОРУМ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ: ТЕОРИЯ И ТЕХНОЛОГИИ ТТТ-2017. Физика и технические приложения волновых процессов ФиТПВП-2017: материалы XV Международной научно-технической конференции «Физика волновых процессов и радиотехнические системы». Казань, 20 – 24 ноября 2017 года / под ред. О.И. Антипова. –Казань: КНИТУ-КАИ, 2017. – 304 с. ISBN 978-5-7579-2257-7 (отд.кн.) ISBN 978-5-7579-2251-5. С.158–162.
9. Евтеев С.Г., Усанов Д.А., Никитов С.А., Скрипаль А.В., Мерданов М.К., Пономарев Д.В. Полосовые СВЧ-фильтры на волноводных фотонных кристаллах с плоской частотной характеристикой в рабочей полосе// В сборнике: Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами. Материалы пятой Всероссийской научной школы-семинара, Под редакцией профессора Д.А. Усанова. Саратов: изд-во Саратовский источник, 2018. 152 с. С. 31–35.
10. Евтеев С.Г., Усанов Д.А., Скрипаль А.В. Использование резонансной диафрагмы в качестве зонда ближнеполевого СВЧ-микроскопа с резонатором на основе волноводного фотонного кристалла с нарушением периодичности// В сборнике: Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами. Материалы пятой Всероссийской научной школы-семинара, Под редакцией профессора Д.А. Усанова. Саратов: изд-во Саратовский источник, 2018. 152 с. С. 35–39.
11. Усанов Д.А., Никитов С.А., Скрипаль А.В., Мерданов М.К., Евтеев С.Г., Пономарев Д.В. Волноводные системы на основе СВЧ фотонных кристаллов с плоскими электрически управляемыми амплитудно-частотными характеристиками// Материалы 28-ой Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2018). Севастополь, 9—15 сентября 2018 г.:

материалы конф. в 8 т. Т. 4, С. 884—890. УДК 621.3.029.62+621.39 ББК 32я431. Москва; Минск ; Севастополь, 2018. —1951 с. Proceedings of the 28th Int. Confer-ence “Microwave & Telecommunication Technology” (CriMiCo’2018). Sevastopol, Russia, 9—15 September, 2018.

#### Патенты на изобретения РФ

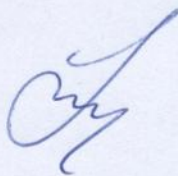
12. Патент РФ 2 658 113 С1 МПК Н01Р СВЧ фотонный кристалл Усанов Д.А., Никитов С.А., Скрипаль А.В., Мерданов М.К., Евтеев С.Г. 19.06.2018 Бюл. № 17. Заявка: 2017124293, 10.07.2017 Патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского».

Диссертация «СВЧ фотонный кристалл с электрически управляемыми характеристиками и возможность его использования в ближнеполевом сканирующем СВЧ-микроскопе» Евтеева Сергея Геннадиевича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальностям 01.04.03 – Радиофизика, 05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах как удовлетворяющая критериям, установленным «Положением о присуждении ученых степеней», для кандидатских диссертаций.

Присутствовало на заседании 9 докторов наук и 9 кандидатов наук по профилю диссертации.

Результаты открытого голосования: «за» – **18** чел.; «против» – **нет**, «воздержалось» – **нет** (протокол № 3 от «09» октября 2018 г.).

Председатель заседания



Михайлов Александр Иванович,  
д.ф.-м.н., профессор, заведующий  
кафедрой физики полупроводников

