



УТВЕРЖДАЮ
Директор ИПФ РАН,
академик РАН Г.Г. Денисов
« 10 » июля 2025 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» (ИПФ РАН)

по диссертации Егоровой Екатерины Дмитриевны «Новые типы мультипериодических брэгговских структур для генерации мощного пространственно-когерентного излучения микроволнового, терагерцового и инфракрасного диапазонов» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по научной специальности: 1.3.4. Радиофизика.

Работа выполнена в отделе высокочастотной релятивистской электроники (отд. 110) Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук».

Научный руководитель – Песков Николай Юрьевич, заведующий лабораторией пространственно-развитых генераторов и усилителей ИПФ РАН, доктор физико-математических наук, профессор РАН.

В 2021 г. соискатель учёной степени окончил магистратуру в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» по направлению подготовки 03.04.03. Радиофизика.

Сроки обучения в аспирантуре Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук»: с 1 сентября 2021 года по 31 августа 2025 года.

Свидетельство об окончании аспирантуры № 105200 00000029 от 10 июля 2025 года.

В период подготовки диссертации соискатель Егорова Екатерина Дмитриевна работала младшим научным сотрудником в отделе высокочастотной релятивистской электроники (отд. 110) Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук».

Личное участие аспиранта в получении результатов, изложенных в диссертации

Основные результаты, представленные в диссертации, получены либо автором лично, либо при непосредственном участии автора. Вклад соискателя состоит в

аналитическом исследовании новых типов брэгговских структур, представленных в работе, численном моделировании их электродинамических характеристик, электронно-волнового взаимодействия и нелинейной пространственно-временной динамике генераторов на их основе. Расчеты выполнялись на основе оригинальных программ, созданных автором самостоятельно, а также с помощью вычислительных кодов, разработанных А.С. Сергеевым. Теоретические исследования проводились автором при консультативной поддержке со стороны научного руководителя, Н.Ю. Пескова, а также Н.С. Гинзбурга и соавторов совместных работ. Постановка задач, обсуждение и интерпретация результатов проводилась совместно с научным руководителем и соавторами.

Научная новизна и основные результаты диссертационного исследования

1. Предложен новый тип брэгговских структур - так называемые «трехмерные» (3D) брэгговские структуры, позволяющие осуществить связь и взаимное рассеяние волновых потоков, распространяющихся в трех взаимно-перпендикулярных направлениях и реализующий, таким образом, механизм трехмерной распределенной обратной связи (РОС). Проведено исследование электродинамических характеристик 3D брэгговских резонаторов в рамках метода связанных волн (квазиоптического и геометрооптического приближений). Показано, что резонаторы данного типа позволяют обеспечить эффективную селекцию мод при поперечных размерах, составляющих от нескольких десятков до сотен длин волн по всем трем пространственным координатам. Результаты теоретического анализа подтверждены полным РЭС - моделированием. Разработаны высокоселективные 3D брэгговские резонаторы для их дальнейшего использования в проектах МСЭ - генераторов суб-ТГц и ТГц диапазона частот.

2. Для описания динамики МСЭ с трехмерной РОС развита оригинальная квазиоптическая модель в рамках метода связанных волн. В рамках проведенного на основе данной модели моделирования исследован процесс установления автоколебаний в различных схемах МСЭ на основе 3D брэгговских структур, обладающих высокой степенью сверхразмерности, включая односекционные и комбинированные двухзеркальные схемы резонаторов. Показано, что использование механизма трехмерной РОС в резонаторах данных типов позволяет при оптимальных параметрах обеспечить устойчивый одномодовый режим генерации в МСЭ при поперечных размерах, на порядки превышающих длину волны излучения λ . Продемонстрированы преимущества комбинированных двухзеркальных резонаторов на основе трехмерных и «традиционных» одномерных брэгговских структур с точки зрения повышения КПД электронно-волнового взаимодействия и снижения уровня омических потерь в МСЭ-генераторах.

3. Проведена оценка параметров для реализации проекта сверхмощного планарного МСЭ с трехмерной РОС в W-диапазоне частот (рабочая частота около 75 ГГц) на базе ускорительного комплекса «У-2» (ИЯФ СО РАН), формирующего релятивистские электронные пучки (РЭП) 1 МэВ / 140 кА / 10 мкс, которые имеют ленточную конфигурацию с поперечным сечением 1 см $\times$ 140 см. В рамках РЭС - моделирования исследован процесс формирования интенсивного магнитонаправленного ленточного РЭП в планарном ондуляторе с высокой поперечной неоднородностью поля. Разработана

высокоселективная электродинамическая система на основе 3D брэгговской структуры и выходная система для создания и вывода волнового пучка с высоким гауссовым содержанием. Выполнено моделирование электронно-волнового взаимодействия, продемонстрирована возможность получения в проектируемом генераторе устойчивого одномодового режима генерации при рекордных поперечных размерах, составляющих до $10\lambda \times 400\lambda$. При проектных параметрах выходная мощность МСЭ-генератора может достигать до 15 ГВт, а энергосодержание в импульсах излучения $\sim 10^4 - 10^5$ Дж, что на порядки превосходит известные мировые аналоги.

4. Предложено использование дополнительной гармоники гофрировки в замедляющей системе генераторов поверхностной волны (ГПВ), которая обеспечивает рассеяние поверхностных волн в волновые потоки, распространяющиеся в поперечном направлении, и, таким образом, реализует эффективный вывод излучения. Исследованы электродинамические свойства мультипериодических замедляющих систем на основе брэгговских структур 1D и 2D типа, прослежена их аналогия с 3D брэгговскими структурами. В рамках теоретического анализа и моделирования проведена оптимизация геометрии данных гофрировок. Показано, что использование двоякопериодических 1D замедляющих структур позволяет обеспечить в ГПВ вывод более 90% генерируемой мощности в поперечном направлении. В ГПВ на основе мультипериодических 2D замедляющих структур эффективность поперечного вывода излучения составляет до 65% по мощности.

5. Для описания пространственно-временной динамики ГПВ, основанных на использовании мультипериодических замедляющих систем, развита квазиоптическая модель в рамках метода связанных волн. Результаты теоретического анализа подтверждены трехмерным РИС - моделированием. Показано, что добавление дополнительных гармоник гофрировки, обеспечивающих поперечный вывод излучения, не нарушает селективных свойств основных 1D и 2D брэгговских структур и при оптимальных параметрах не влияет на устойчивость одномодового режима генерации в ГПВ. Проведена оценка параметров для реализации поперечного вывода излучения в проектах планарных генераторов поверхностной волны G-диапазона (рабочая частота около 150 ГГц) на базе ускорительных комплексов «Синуки» (ИПФ РАН) и «ЭЛМИ» (ИЯФ СО РАН).

6. Исследована возможность реализации поперечного вывода излучения в квантово-каскадных гетеролазерах с РОС на основе КРТ - структур. Предложена модификация мультипериодической брэгговской гофрировки, в которой основная компонента обеспечивает обратную связь, а добавление дополнительной гармоники позволяет осуществить рассеяние волновых потоков в поперечном направлении. В рамках проведенного теоретического анализа, подтвержденного прямым численным моделированием, продемонстрирована возможность реализации вывода излучения под углом к гофрированной поверхности, зависящим от номера гармоники гофрировки. Разработан проект двоякопериодической структуры для прототипа кадмий-ртуть-теллур гетеролазера, позволяющей обеспечить вывод до 40% мощности генерируемого излучения на третьей гармонике гофрировки под углом 20° к гофрированной поверхности. В рамках моделирования динамики РОС лазера на основе балансных уравнений показана

возможность установление стационарного режима генерации при использовании мультипериодических структур нового типа. При этом реализация поперечного вывода излучения в данных структурах позволяет добиться более равномерной инверсии населенности по всей активной области лазера.

7. Разработан проект электродинамической системы для реализации поперечного вывода излучения в кадмий-ртуть-теллур гетеролазере с длиной волны 14 мкм. Изготовлены экспериментальные образцы структур. В сотрудничестве с ИФМ РАН проведены экспериментальные исследования, в которых продемонстрирована возможность реализации стабильной одночастотной генерации в разработанных структурах с выводом излучения под углом к поверхности лазера.

Степень достоверности результатов проведенных исследований

Все представленные результаты диссертационного исследования являются достоверными и обоснованными. В работе применялись надежные и апробированные методы и подходы. Разработанные алгоритмы и программы для численного моделирования тестировались на известных моделях. Полученные аналитические и численные результаты хорошо согласуются между собой. Часть результатов исследования подтверждена экспериментально. Положения и основные результаты диссертационной работы опубликованы в рецензируемых российских и зарубежных научных журналах и подвергались оценке независимых международных экспертов. Результаты докладывались на всероссийских и международных симпозиумах, конференциях, школах и обсуждались на научных семинарах.

Практическая и теоретическая значимость результатов исследования

В результате проведенных исследований разработаны новые типы электродинамических систем, позволяющие обеспечить селекцию мод в условиях существенной сверхразмерности в МСЭ - генераторах, осуществить эффективный вывод генерируемого излучения в генераторах поверхностной волны и гетеролазерах. Полученные в процессе выполнения диссертационной работы результаты могут быть также использованы при создании высокоселективных электродинамических систем и разработке других типов мощных узкополосных электронных мазеров суб-ТГц / ТГц диапазона с уникальными параметрами излучения. Данные генераторы имеют высокий потенциал применения в ряде фундаментальных и инженерных приложений.

Список работ, опубликованных в журналах из Перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук

1. Гинзбург Н.С., Сергеев А.С., Кочаровская Е.Р., Малкин А.М., Егорова Е.Д., Заславский В.Ю. *Дифракционная селекция мод в гетеролазерах с планарными брэгговскими структурами* // Физика и техника полупроводников. 2020. Т.54, №9. С.974-979.
2. Kocharovskaya E.R., Ginzburg N.S., Sergeev A.S., Malkin A.M., Egorova E.D., Zaslavsky V.Yu. *Diffraction mode selection in planar Bragg resonators of optical and microwave wavelength ranges* // Physics Letter A. 2020. V.384, No.10. Art.no.126219.

3. Malkin A.M., Fedotov A.E., Zaslavsky V.Yu., Sergeev A.S., Egorova E.D., Ginzburg N.S. *Relativistic sub-terahertz surface-wave oscillators with transverse Gaussian-like radiation output* // IEEE Electron Device Letters. 2021. V.42, No.5. P.751-754.
4. Песков Н.Ю., Егорова Е.Д., Сергеев А.С., Царьков И.М. *Высокоселективные брэгговские резонаторы, реализующие трехмерную распределенную обратную связь, для мощных пространственно-развитых лазеров на свободных электронах* // Письма в ЖТФ. 2023. Т.49, №8. P.16-20.
5. Песков Н.Ю., Егорова Е.Д., Гинзбург Н.С., Сергеев А.С., Аржанников А.В., Синицкий С.Л. *Мощные пространственно-развитые мазеры на свободных электронах с трехмерной распределенной обратной связью* // Изв. ВУЗов: Радиофизика. 2023. Т.66, №7-8. P.575-584.
6. Барышев В.Р., Егорова Е.Д., Гинзбург Н.С., Кочаровская Е.Р., Малкин А.М., Заславский В.Ю., Морозов С.В., Сергеев А.С. *Разработка одномодового РОС-гетеролазера с выводом излучения под углом к поверхности структуры* // Физика и техника полупроводников. 2023. Т.57, №5. С.362-368.
7. Peskov N.Yu., Egorova E.D., Sergeev A.S., Tsarkov I.M. *Using three-dimensional distributed feedback to enhance selectivity of Bragg structures for free-electron lasers operating at sub-THz to THz frequencies* // Physical Review Applied (letters). 2024. V.21, No.1. Art.no.L011003.
8. Песков Н.Ю., Егорова Е.Д., Гинзбург Н.С., Сергеев А.С., Аржанников А.В., Синицкий С.Л. *Использование комбинированного резонатора на основе трехмерного и одномерного брэгговских зеркал для получения сверхмощного когерентного излучения в планарном мазере на свободных электронах* // Известия ВУЗов: Радиофизика. 2024. Т.67, №11-12. С.969-978.
9. Федотов А.Э., Малкин А.М., Егорова Е.Д., Гинзбург Н.С. *Характеристики резонаторов поверхностной волны с поперечным выводом излучения* // Изв. ВУЗов: Радиофизика. 2024. V.67, №6. P.500-508.
10. Es'kin V.A., Davydov D.V., Egorova E.D., Malkhanov A.O., Akhukov M.A., Smorkalov M.E. *About optimal loss function for training physics-informed neural networks under respecting causality* // Доклады Российской академии наук. Математика, информатика, процессы управления. 2024. Т.520, №2. С.193-215.

Ценность научных работ диссертанта отражается высоким уровнем публикаций в рецензируемых международных журналах. Результаты исследований многократно докладывались и обсуждались на Всероссийских и международных конференциях, получили высокую оценку ведущих специалистов и имеют хорошую цитируемость. Доклад, представленный на VIII Всероссийском молодежном научном форуме «Наука будущего - наука молодых» получил первую премию за лучшую научную работу в секции «физика и астрономия» в 2023 году, доклад на конференции PIERS-2025 удостоен второй премии в номинации работ молодых ученых, а доклад на XXV конкурсе работ молодых ученых ИПФ РАН в 2023 году - поощрительной премии.

Результаты, представленные в диссертационной работе, в полной мере изложены в работах, опубликованных соискателем ученой степени. Формулировки результатов изложены в соответствии с личным вкладом автора в каждую из опубликованных статей. Ссылки на источники заимствования материалов оформлены корректно.

Научная специальность, которой соответствует диссертация: 1.3.4. Радиофизика.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

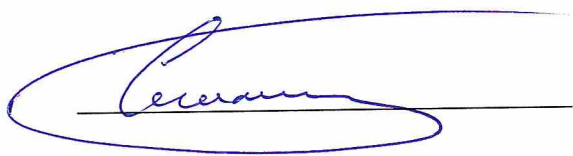
Диссертация соответствует критериям, установленным в соответствии с Федеральным законом Российской Федерации от 23 августа 1996 года № 127-ФЗ "О науке и государственной научно-технической политике".

Диссертация «Новые типы мультипериодических брэгговских структур для генерации мощного пространственно-когерентного излучения микроволнового, терагерцового и инфракрасного диапазонов» Егоровой Екатерины Дмитриевны рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по научной специальности: 1.3.4. Радиофизика.

Настоящее заключение составлено на основании решения Ученого совета отделения физики плазмы и электроники больших мощностей ИПФ РАН по проведению итоговой аттестации по программам подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре по научной специальности: 1.3.4. Радиофизика.

Присутствовало на заседании 22 чел.

Результаты голосования: «за» — 22 чел., «против» — 0 чел., «воздержалось» — 0 чел.
протокол № 3 от « 24 » июня 2025 г.



Скалыга Вадим Александрович,
доктор физико-математических наук,
Председатель Учёного совета отделения физики
плазмы и электроники больших мощностей



Моченева Ольга Станиславовна,
кандидат физико-математических наук,
Учёный секретарь отделения физики плазмы и
электроники больших мощностей,
научный сотрудник отдела 170