

На правах рукописи



ЕГОРОВА Екатерина Дмитриевна

**МУЛЬТИПЕРИОДИЧЕСКИЕ БРЭГГОВСКИЕ СТРУКТУРЫ
ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ МОЩНОГО КОГЕРЕНТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
МИКРОВОЛНОВОГО, ТЕРАГЕРЦОВОГО И ИНФРАКРАСНОГО
ДИАПАЗОНОВ**

1.3.4 – радиофизика

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» (ИПФ РАН, г. Нижний Новгород)

Научный руководитель: Песков Николай Юрьевич,
доктор физико-математических наук, профессор РАН, заведующий лабораторией, ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» (г. Нижний Новгород)

Официальные оппоненты: Рыскин Никита Михайлович,
доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник, Саратовский филиал ФГБУН Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук (г. Саратов)

Герасимов Василий Валерьевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, ФБГУ Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук (г. Новосибирск)

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет» (г. Новосибирск)

Защита состоится 28 сентября 2026 г. в 15.00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.238.01 в ИПФ РАН (603951, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46).

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на сайте ИПФ РАН: ipfran.ru

Автореферат разослан 17 августа 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физ.-мат. наук



Э. Б. Абубакиров

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

Актуальность темы диссертации

Создание мощных (10^3 – 10^9 Вт) источников когерентного электромагнитного излучения, работающих в коротковолновой части миллиметрового диапазона и субмиллиметровом диапазоне длин волн, остается одной из ключевых задач современной электроники больших мощностей (освоение так называемого «субтерагерцового / терагерцового провала»). Потребность в таких источниках обусловлена широким кругом фундаментальных задач и инженерных приложений [1–5].

К настоящему времени в режиме длинных импульсов (от микросекунд до непрерывного режима) наибольшая мощность излучения в указанных диапазонах (от $\sim 10^6$ Вт в суб-ТГц диапазоне [6–9] до $\sim 10^3$ – 10^4 Вт в ТГц-диапазоне [10–12]) получена с помощью гиротронов. Радикальное повышение мощности импульсного излучения (от единиц и десятков до сотен наносекунд) до уровня $\sim 10^7$ – 10^9 Вт в этих диапазонах может быть достигнуто в релятивистских генераторах на основе интенсивных электронных пучков с токами килоамперного уровня.

Одним из актуальных приложений мощного импульсного излучения, широко обсуждаемых в настоящее время, является создание так называемых ТГц-ускорителей [13–17]. Переход в высокочастотные диапазоны призван увеличить градиенты ускорения (вплоть до мульти-ГэВ/м) и обеспечить, таким образом, относительную компактность ускоряющих структур, а также снизить пробойные и тепловые ограничения в указанных структурах. Для запитки ускорителей подобного класса требуются узкополосные источники, работающие в диапазоне 0.1–0.3 ТГц и выше с мощностью на уровне $\sim 10^7$ – 10^8 Вт. В частности, в настоящее время развиваются различные схемы ускорителей данного типа в рамках проектов AXIS (DESY, Германия), CLARA (Daresbury Lab., Великобритания) и др. Однако вопрос об источниках, способных обеспечить формирование импульсов излучения с обсуждаемыми параметрами, фактически остается открытым. В частности, рассматриваются мощные оптические генераторы, которые обеспечивают формирование ТГц-импульсов требуемой интенсивности за счет эффектов выпрямления мощных фемто-аттосекундных лазерных импульсов при их взаимодействии с нелинейными средами [14]. Однако эффективность таких процессов крайне низка. В качестве альтернативы обсуждается также возможность компрессии импульсов от мегаваттных гиротронов [18]. Вместе с тем более эффективную генерацию импульсов излучения с требуемыми параметрами можно обеспечить в релятивистских мазерах на основе сильноточных электронных пучков.

В качестве еще одной перспективной возможности использования мощных суб-ТГц/ТГц-импульсов следует рассматривать разработку компактных рентгеновских ЛСЭ комптоновского типа [19–21], где для раскачки попереч-

ных баунс-осцилляций электронов вместо «традиционных» магнитостатических ондуляторов (формирующих периодическое магнитостатическое поле) используется электромагнитная волна накачки, формируемая в так называемых СВЧ-ондуляторах. Это позволяет кардинально увеличить баунс-частоту и тем самым существенно снизить энергии частиц, необходимые для генерации рентгеновского излучения. Разработка электромагнитных ондуляторов с запиткой мощным излучением от микроволнового до ТГц-диапазона активно ведется в настоящее время различными научными группами [22–24] как перспективный подход к созданию компактных рентгеновских ЛСЭ.

Высокую актуальность в настоящее время имеют также инженерные приложения, основанные на использовании мощных импульсных генераторов суб-ТГц/ТГц-диапазонов. Важным вызовом современного мира является обеспечение мер безопасности и противодействия терроризму, которое связано с созданием систем визуализации скрытых объектов, обнаружения и уничтожения террористических угроз [25]. Обсуждается возможность использования мощных импульсных источников для диагностики плазмы в разрабатываемых установках УТС нового поколения [26]. Ведутся исследования в области биомедицины (неинвазивное воздействие на ткани, лечение онкологических заболеваний и др.) и медицинской диагностики (спектроскопия тканей). Наконец, большой интерес к мощным импульсным генераторам, работающим в суб-ТГц/ТГц диапазонах, связан в последнее время с радиотехническими приложениями [27–29], включая развитие высокоскоростных беспроводных систем связи (вплоть до 6G), радиоастрономию (с использованием атмосферных «окон прозрачности», например, в областях частот 94 ГГц, 140 ГГц, 220 ГГц и др.) и создание систем мониторинга космических объектов, разработку систем локации с высоким временным и пространственным разрешением, систем радиоподавления, радиопротиводействия и др.

Увеличение мощности генераторов и их продвижение в высокочастотные диапазоны сопряжено с необходимостью увеличения их сверхразмерности. С точки зрения увеличения мощности это связано с требованием уменьшения напряженности ВЧ-полей, повышения электропрочности системы по отношению к ВЧ-пробою, снижению тепловых нагрузок на стенки и т. д. Переход в область более высоких частот при сохранении параметров электронного пучка также неизбежно влечет за собой увеличение поперечных размеров в масштабе длины волны излучения. Таким образом, одной из основных проблем на пути создания мощных высокочастотных генераторов становится проблема разработки электродинамических систем, способных обеспечить селективное возбуждение рабочей моды в условиях существенной сверхразмерности, а также ее вывод и транспортировку для последующего использования в потенциальных приложениях.

В электронике СВЧ накоплен большой опыт эффективного решения проблемы электродинамической и электронной селекции мод [30–35]. Одним из наиболее успешных решений явилось использование квазиоптических резо-

наторов в виде отрезков слабонерегулярных волноводов, в которых электронный поток возбуждает моды на квазикритических частотах. Такой метод селекции широко применяется в гиротронах [36] и оротронах [37], где он обеспечивает селекцию мод как по продольному, так и по поперечному индексам, позволяя использовать в этих приборах существенно сверхразмерные электродинамические системы. В результате, в современных мегаваттных гиротронах одномодовая генерация реализована при диаметрах резонатора, составляющих до 20–30 длин волн излучения λ [7–9]. Однако методы селекции, используемые в подобных генераторах, не применимы к релятивистским мазерам, в которых для обеспечения доплеровского повышения частоты используется взаимодействие с волнами, распространяющимися вдоль электронного потока.

Широкое применение как в электронике СВЧ, так и в квантовой электронике в качестве элементов электродинамических систем генераторов получили периодические структуры брэгговского типа, представляющие собой секции волноводов с неглубокой гофрировкой боковых поверхностей (стенок) в случае вакуумных СВЧ-приборов [38–40] или структур с периодической модуляцией показателя преломления в случае твердотельных лазеров [41, 42]. Использование брэгговских резонаторов позволило успешно реализовать мощные узкополосные релятивистские генераторы микроволнового диапазона, основанные на различных механизмах индуцированного излучения, такие как мазеры на свободных электронах (МСЭ), мазеры на циклотронном авторезонансе (МЦАР) и черенковские мазеры. Лазеры с распределенной обратной связью на основе брэгговских структур (как распределенных брэгговских отражателей, так и объемных брэгговских решеток) были реализованы в широком диапазоне частот: от терагерцового до ультрафиолетового, в инфракрасном диапазоне были реализованы квантовокаскадные лазеры с рекордными характеристиками (КПД до 27 % при комнатной температуре [43] и мощность излучения в непрерывном режиме до 5 Вт [44]).

В работе рассмотрены актуальные задачи разработки электродинамических систем, возникающие в разных классах генераторов: МСЭ, релятивистских черенковских генераторах поверхностной волны и гетеролазерах, основанных на использовании различных модификаций брэгговских структур.

I. МСЭ-генераторы

В настоящее время брэгговские структуры в виде гофрированных волноводных секций стали «традиционными» электродинамическими системами релятивистских мазеров на базе интенсивных электронных пучков [38–40]. Достоинством данных микроволновых структур являются: хорошая совместимость с электронно-оптической системой формирования сильноточных релятивистских электронных пучков (РЭП), способность обеспечения эффективной селекции по продольному индексу мод, а также по поперечным индексам мод при поперечных размерах, составляющих до $2\text{--}3\lambda$. Однако дальней-

шее увеличение поперечного размера подобных резонаторов приводит к потере их селективности по поперечным индексам мод в результате сближения, а затем перекрытия соседних брэгговских зон, соответствующих рассеянию волноводных мод с различной поперечной структурой.

Универсальным методом решения проблемы селекции мод в мощных пространственно-развитых релятивистских мазерах является использование двумерной распределенной обратной связи (РОС) [45, 46]. Механизм двумерной РОС реализуется в двумерных (двумерно-периодических) брэгговских структурах при возникновении дополнительных поперечных волновых потоков, обеспечивающих синхронизацию излучения широких электронных пучков ленточной и трубчатой конфигурации. Проведенные к настоящему времени теоретические и экспериментальные исследования продемонстрировали высокие потенциальные возможности использования двумерной РОС для получения мощного узкополосного излучения в релятивистских мазерах различных типов, поперечные размеры которых по одной из поперечных координат на порядок и более превосходят длину волны [47, 48]. Работоспособность нового механизма обратной связи продемонстрирована в МСЭ, успешно реализованных в предшествующих совместных экспериментах ИПФ РАН (Нижний Новгород) и ИЯФ СО РАН (Новосибирск) в сотрудничестве со специалистами Исследовательского центра Карлсруэ (Германия) (планарная геометрия) [49, 50] и Статклайдского университета (Великобритания) (коаксиальная геометрия) [51].

Однако дальнейшее увеличение мощности и частоты генераторов данного типа требует увеличения сверхразмерности пространства взаимодействия по второй поперечной координате. В этих условиях использование брэгговских структур, реализующих двумерную РОС, становится не эффективно, т. к. они также (подобно «традиционным» одномерно-периодическим аналогам) теряют свои селективные свойства. Таким образом, встает проблема разработки электродинамической системы, способной обеспечить эффективную селекцию мод в условиях существенной сверхразмерности по обеим поперечным координатам.

II. Генераторы поверхностной волны

Черенковские генераторы поверхностной волны (ГПВ) на основе сильноточных РЭП привлекают в настоящее время значительное внимание как один из перспективных видов источников мощного узкополосного излучения, работающих вплоть до суб-ТГц- и ТГц-диапазонов частот [52–56]. В этих приборах используется резонансное взаимодействие прямолинейного электронного пучка с медленной основной гармоникой ВЧ-поля в замедляющей системе (так называемый режим π -вида), что обеспечивает высокий импеданс электронно-волнового взаимодействия. Это открывает возможность увеличения сверхразмерности данных генераторов и, в итоге, выходной мощности по сравнению с другими типами черенковских приборов: лампами бегущей вол-

ны (ЛБВ) и лампами обратной волны (ЛОВ).

Поверхностную волну можно рассматривать как «супермоду», которая представляет собой набор нескольких волноводных мод с коррелированными фазами, прижатых к поверхности замедляющей системы. Это решает проблему пространственной когерентности излучения в направлении по нормали к поверхности (радиальном в случае цилиндрической геометрии) при произвольных поперечных размерах системы. Использование двумерных (двумерно-периодических) замедляющих структур, реализующих механизм двумерной РОС, позволяет решить проблему селекции по «широкой» поперечной (азимутальной) координате и обеспечить реализацию одномодового режима генерации в ГПВ при поперечных размерах, составляющих до десятков и сотен длин волн [57, 58]. При этом выходная мощность суб-ТГц/ТГц-излучения может достигать суб-ГВт-уровня.

Однако структура поля прижатой к поверхности замедленной волны затрудняет вывод генерируемого излучения как в случае одномерной (1D), так и двумерной (2D) замедляющих систем. В этой связи возникает проблема разработки электродинамической системы, обеспечивающей эффективный вывод излучения из генератора.

III. Гетеролазеры

Генерация мощного пространственно-когерентного излучения остается одной из важных задач физики полупроводниковых лазеров. Расширение активного объема является естественным способом увеличения мощности излучения. Одной из проблем обеспечения селекции мод в лазерах с активной средой, характеризующейся большим коэффициентом усиления за один проход, является отражение от краев волновода. Однако данные отражения могут создавать «паразитную» цепь обратной связи, которая увеличивает добротность многих мод и потенциально затрудняет установление одномодового режима генерации. Перспективным решением для подавления указанных негативных эффектов является разработка брэгговской структуры, позволяющей одновременно обеспечить необходимую обратную связь и, в то же время, рассеяние основной части генерируемого излучения в когерентные пучки, распространяющиеся под углом к поверхности структуры [59, 60].

Цель диссертационной работы

Целью диссертационной работы является исследование возможности использования электродинамических систем на основе нового типа брэгговских структур с мультипериодической гофрировкой для решения указанных задач в описанных классах генераторов. В рамках данного направления в настоящей работе проведено:

- исследование электродинамических характеристик и селективных свойств предложенных брэгговских структур;

- моделирование пространственно-временной динамики генераторов на их основе и исследование условий установления одномодовых и многомодовых режимов работы;

- оценка параметров для реализации генераторов, основанных на использовании разработанных электродинамических систем, на базе существующих сильноточных ускорительных комплексов и перспективы их продвижения в суб-ТГц- и ТГц-диапазоны на высоком уровне мощности и стабильности одномодового режима генерации в условиях существенной сверхразмерности;

- моделирование и разработка брэгговской структуры с мультипериодической гофрировкой и реализация на ее основе гетеролазера с эффективным наклонным выводом излучения.

Научная ценность и новизна результатов

1. Предложены брэгговские структуры с мультипериодической гофрировкой поверхности и исследована возможность их использования:

- в качестве высокоселективных резонаторов, реализующих механизм так называемой «трехмерной» обратной связи в МСЭ-генераторах планарной геометрии путем взаимного рассеяния волновых потоков, распространяющихся в трех взаимно перпендикулярных направлениях;

- в качестве замедляющих систем в планарных черенковских генераторах поверхностной волны для организации поперечного (по отношению к замедляющей структуре) вывода излучения;

- в качестве электродинамических систем (диэлектрических брэгговских решеток) квантово-каскадных гетеролазеров на основе КРТ (кадмий-ртуть-теллур)-структур для реализации вывода излучения под углом к их поверхности.

2. Развиты оригинальные модели для описания электронно-волнового взаимодействия в предложенных схемах генераторов. В рамках этих моделей исследована пространственно-временная динамика генераторов новых типов, результаты теоретического анализа подтверждены PIC (*particle-in-cell* – метод частиц в ячейках)-моделированием с использованием универсальных коммерческих кодов. Определены оптимальные условия для обеспечения стабильного одномодового режима генерации с высоким уровнем выходной мощности в условиях существенной сверхразмерности пространства взаимодействия.

3. Разработаны проекты пространственно-развитых релятивистских генераторов на основе предложенных электродинамических систем, обеспечивающие достижение рекордных уровней мощности импульсного излучения в микроволновом, субтерагерцовом и терагерцовом диапазонах. Проведена оценка параметров для реализации данных проектов на базе ускорительных комплексов, формирующих интенсивные релятивистские электронные пучки ленточной конфигурации.

4. Разработан проект квантово-каскадного гетеролазера ИК-диапазона с выводом излучения под углом к поверхности структуры. Результаты теоретического анализа и электродинамического моделирования подтверждены экспериментальным исследованием КРТ-лазера.

Практическая значимость работы

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 релятивистских 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 перспективны для использования в ряде фундаментальных и инженерных приложений.

Положения, выносимые на защиту

1. «Трехмерные» брэгговские резонаторы планарной геометрии с мультипериодической гофрировкой поверхности позволяют реализовать связь и взаимное рассеяние волновых потоков, распространяющихся в трех взаимно перпендикулярных направлениях, и, в результате, обеспечить высокую селективность основной высокодобротной моды в условиях существенной сверхразмерности по всем трем пространственным координатам.

2. Использование брэгговских резонаторов, основанных на трехмерном рассеянии волновых потоков, в планарных мазерах на свободных электронах позволяет обеспечить одномодовый режим генерации при поперечных размерах, достигающих от десятков до сотен длин волн по обоим поперечным координатам. Это открывает возможность получения в суб-ТГц-диапазоне частот выходного излучения с мультигигаваттным уровнем мощности и энерго-содержанием в импульсах до 10^4 – 10^5 Дж на базе существующих сильнооточных релятивистских электронных пучков.

3. В релятивистских генераторах поверхностной волны планарной геометрии использование дополнительной гармоник гофрировки, обеспечивающей рассеяние поверхностных волн в волновые потоки, распространяющиеся в поперечном направлении, позволяет реализовать вывод излучения по нормали к гофрированной области с высоким гауссовым содержанием выходной волны.

4. В гетеролазерах на основе кадмий-ртуть-теллур структур наличие поверхностного диэлектрического слоя с брэгговской гофрировкой, содержащей несколько пространственных гармоник, позволяет организовать распределенную обратную связь и одновременный вывод генерируемого излучения

под углом к поверхности. При этом направление распространения излучения зависит от номера гармоники гофрировки.

Апробация результатов работы

Основные результаты работы опубликованы в российских и зарубежных журналах и трудах конференций [A2–A34], в том числе в рецензируемых журналах 10 публикаций [A3, A5, A9, A11, A14–A16, A23, A26, A28] и докладывались автором и соавторами на XLV и XLVI Международных симпозиумах по фотонике и электромагнетизму (PIERS) (Чэнду, Китай, 2024 и Абу-Даби, ОАЭ, 2025), XXIV Международной конференции по вакуумной электронике (IVEC) (Чэнду, Китай, 2023), Международной конференции «Синхротронное излучение и лазеры на свободных электронах» (SFR) (Новосибирск, Россия, 2024), V Международной конференции «Терагерцовое и СВЧ-излучение: генерация, детектирование и приложения» (TERA) (Москва, Россия, 2023), XXIV, XXV и XXVI Международных симпозиумах «Нанопизика и наноэлектроника» (Нижний Новгород, 2020, 2021 и 2023), XII, XIII и XIV Всероссийских конференциях «Электроника и микроэлектроника СВЧ» (Санкт-Петербург, 2023, 2024 и 2025), IX Всероссийской микроволновой конференции (RMC) (Москва, 2024), а также Нижегородских сессиях молодых ученых и внутренних семинарах ИПФ РАН и ИЯФ СО РАН. 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 доклады на конкурсах работ молодых ученых ИПФ РАН удостоены поощрительной премии XXV конкурса в 2023 году и второй премии XXVIII конкурса в 2026 году. Полученные в диссертационной работе результаты вошли в цикл работ *«Формирование килоамперных пучков релятивистских электронов и их применение для генерации мультимегаваттных потоков миллиметрового и терагерцового излучения в плазме и электродинамических системах»* (совместно с сотрудниками ИЯФ СО РАН Е.С. Сандаловым и Д.А. Самцовым), который в 2025 году удостоен медали РАН с премией для молодых ученых по направлению «общая физика и астрономия».

Личный вклад автора в проведенные исследования

Основные результаты, представленные в диссертации и вошедшие в работы [A1–A34], получены либо автором лично, либо при непосредственном участии автора. Вклад соискателя состоит в аналитическом исследовании новых типов брэгговских структур, описанных в работе, численном моделировании их электродинамических характеристик, электронно-волнового взаимодействия и нелинейной пространственно-временной динамики генераторов на их основе. Теоретические исследования предложенных схем генераторов проводились автором при консультативной поддержке со стороны Н.Ю. Пескова

(научного руководителя) и Н.С. Гинзбурга при участии соавторов совместных работ. Расчеты выполнялись на основе оригинальных программ, созданных автором самостоятельно, а также с помощью вычислительных кодов, разработанных А.С. Сергеевым. РИС-моделирование микроволновых генераторов проводилось с использованием программы *CST Studio Suite* при консультативной помощи В.Ю. Заславского. Электродинамическое тестирование «трехмерных» брэгговских структур выполнялось совместно с Д.И. Соболевым. Исследование черенковских ГПВ с одномерно-периодическими структурами, обеспечивающими поперечный вывод излучения, проводилось под руководством А.Э. Федотова. Моделирование черенковских ГПВ с поперечным выводом энергии выполнено в рамках квазиоптической теории, предложенной и развитой А.М. Малкиным.

Определяющая роль в изготовлении образцов, создании экспериментальной установки и проведении на ее основе исследований КРТ-гетеролазера ИК-диапазона принадлежит группе С.В. Морозова (ИФМ РАН), при этом автором была выполнена основная часть расчетов и моделирование схемы гетеролазера. Обсуждение и интерпретация результатов проводились совместно с соавторами.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения. Объем диссертации составляет 129 страниц, включая 2 таблицы и 61 рисунок, списки цитированной литературы (143 наименования) и авторских публикаций (34 наименования), 1 приложение.

Содержание работы

Глава 1 диссертации посвящена разработке нового типа высокоселективных планарных резонаторов, так называемых «трехмерных» (3D) брэгговских резонаторов и исследованию возможности их использования для создания мощных пространственно-развитых МСЭ на базе интенсивных ленточных РЭП. Структуры данного типа имеют гофрировку вида (рис. 1):

$$a = a_{3D,2} \cos(h_{3D}x) \cos(h_{3D}z) + a_{3D,1} [\cos(h_{3D}x + \varphi_x) + \cos(h_{3D}z + \varphi_z)], \quad (1)$$

где $h_{3D} = 2\pi/d_{3D}$, d_{3D} – период гофрировки, $a_{3D,1}$ и $a_{3D,2}$ – амплитуды ее соответствующих компонент. При выполнении условия брэгговского резонанса

$$h_{3D} \approx h \quad (2)$$

эта гофрировка обеспечивает рассеяние волновых потоков, распространяющихся в трех взаимно перпендикулярных направлениях

$$\left[(A_{+z} e^{-ihz} + A_{-z} e^{ihz} + A_{+x} e^{-ihx} + A_{-x} e^{ihx}) \vec{E}_A + B \vec{E}_B \right] e^{i\omega t}, \quad (3)$$

где $A_{\pm x, \pm z}$ и B – медленноменяющиеся амплитуды парциальных волн, $E_{A;B}$ – функции, описывающие поперечную (по оси y) структуру этих волн, которая совпадает с одной из собственных мод невозмущенного планарного волновода.

Волны $A_{\pm x; \pm z}$ относятся к низшему ТЕМ-типу, волна B принадлежит к TM_p -типу и имеет высокий поперечный индекс в условиях существующей сверхразмерности [A1].

В разделе 1.1 развиты теоретические модели для описания данных резонаторов в рамках метода связанных волн (квазиоптическое и геометрооптическое приближения), проведено исследование их электродинамических характеристик. В рамках теоретического анализа, подтвержденного численным моделированием на основе кода CST Microwave Studio, продемонстрированы высокие селективные свойства предложенных структур в условиях, когда поперечные размеры (длина l_z , ширина l_x и величина зазора a_0) существенно превышают длину волны излучения λ по всем трем пространственным координатам: $l_{z,x}/\lambda \sim 100$, $a_0/\lambda \sim 20$ (рис. 2). Разработаны высокоселективные 3D брэгговские резонаторы с рабочими частотами 75 ГГц, 300 ГГц и 600 ГГц, проведена оптимизация их параметров для дальнейшего использования в развиваемых проектах МСЭ-генераторов [A2–A8]. Проведено «холодное» тестирование 3D брэгговских структур планарной геометрии в W-диапазоне (частота ~ 75 ГГц), продемонстрирована их реализуемость и работоспособность (рис. 3). Измерены коэффициенты поперечного рассеяния в 3D брэгговской структуре, проведено сравнение ширины брэгговской полосы и положения собственных мод с расчетом. Показано хорошее соответствие экспериментальных данных, результатов теоретического анализа и моделирования.

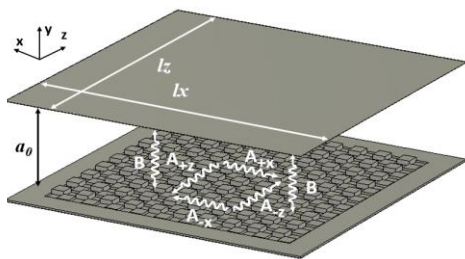


Рис. 1. Схема брэгговского резонатора планарной геометрии, реализующего трехмерное рассеяние волн. Стрелки показывают направления распространения парциальных волновых потоков

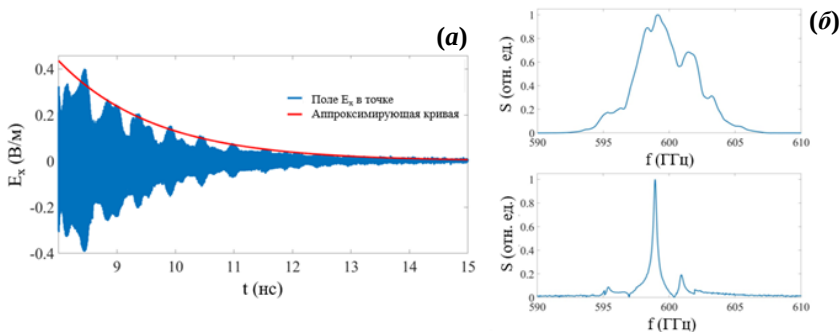


Рис. 2. Результаты CST-моделирования 3D брэгговского резонатора в диапазоне частот 0.6 ТГц: *a* – эволюция ВЧ-поля внутри резонатора и *б* – спектры ВЧ-поля на начальной (сверху) и конечной (внизу) стадиях ($l_{z,x}/\lambda \sim 100$, $a_0/\lambda \sim 20$)

В разделе 1.2 в рамках развитого квазиоптического приближения метода связанных волн проведено моделирование динамики МСЭ с односекционным 3D брэгговским резонатором, реализующим трехмерное рассеяние парциальных волновых потоков [A9, A10]. Продемонстрирована возможность установления стабильного одночастотного режима генерации при поперечных размерах системы $l_x/\lambda \sim 400$, $a_0/\lambda \sim 10$. Недостатком данной схемы МСЭ-генератора является относительно высокий уровень омических потерь, который связан с наличием в резонаторе квазикритических волновых потоков и может достигать до 10% от излученной пучком мощности.

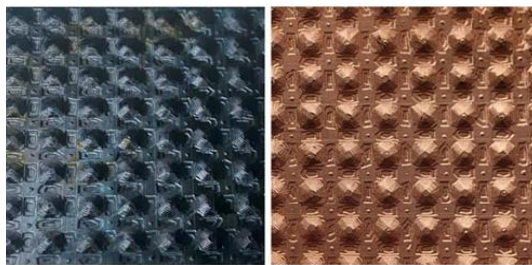


Рис. 3. Фотографии изготовленного макета 3D брэгговского резонатора планарной геометрии W-диапазона: на стадии фотополимерной печати (слева) и после нанесения медного слоя (справа)

Для решения указанной проблемы в разделе 1.3 предложено использование комбинированной двухзеркальной схемы резонатора на основе 3D и 1D брэгговских структур, выполняющих роль селективных рефлекторов (рис. 4) [A11–A12]. В данной схеме установленная на входе 3D брэгговская структура обеспечивает селекцию колебаний в условиях высокой сверхразмерности по обеим поперечным координатам. Усиление в основном имеет место в регулярной секции двухзеркального резонатора, а на выходе системы оказывается достаточным использование «традиционной» 1D брэгговской структуры с относительно небольшим (при использовании интенсивного РЭП) коэффициентом отражения для замыкания цепи обратной связи. Моделирование показывает, что в МСЭ с комбинированным двухзеркальным резонатором, реализующим механизм трехмерной обратной связи, при расчетных оптимальных па-

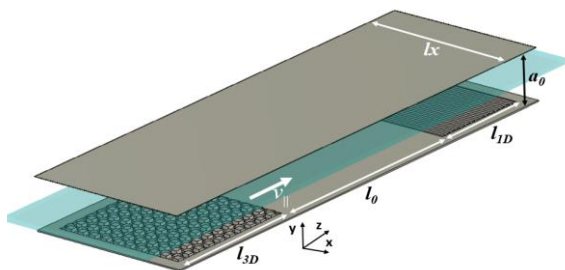


Рис. 4. Схема пространства взаимодействия МСЭ с комбинированным двухзеркальным резонатором на основе 3D и 1D брэгговских структур

раметрах также реализуется устойчивый одномодовый режим генерации в условиях указанной сверхразмерности. В то же время, амплитуда квази-критических волновых потоков, возникающих во входной 3D брэгговской структуре, относительно невелика, что позволяет снизить

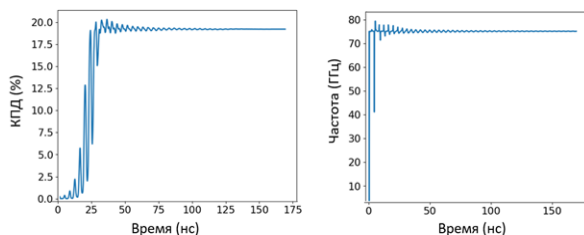


Рис. 5. Результаты моделирования планарного МСЭ с комбинированным резонатором, формируемым 3D и 1D брэгговскими структурами, на базе ускорителя «У-2». Установление стационарного режима генерации при оптимальных параметрах: зависимости от времени электронного КПД и «текущей» частоты излучения

омические потери до уровня $\sim 3\%$. При этом благоприятная для взаимодействия с электронным пучком продольная структура поля синхронной волны приводит к увеличению электронного КПД, который в данной схеме может достигать до 20% (рис. 5).

Раздел 1.4 посвящен разработке проекта сверхмощного МСЭ W-диапазона частот (рабочая частота около 75 ГГц) на базе ускорительного комплекса «У-2» (ИЯФ СО РАН) [A13, A14], формирующего ленточные электронные пучки $1\text{ МэВ} / 140\text{ кА} / 7\text{ мкс}$ с поперечным сечением до $1\text{ см} \times 140\text{ см}$. Приведены расчеты электронно-оптической и магнитной систем формирования электронного пучка (планарного ондулятора и соленоида, осуществляющего фокусировку и транспортировку РЭП), электродинамической системы на основе 3D брэгговской структуры и выходной системы формирования волнового пучка с высоким гауссовым содержанием (для его вывода, транспортировки и дальнейшего использования в рамках потенциальных приложений). В рамках моделирования пространственно-временной динамики МСЭ показано, что разработанная электродинамическая система позволяет обеспечить стабильный одночастотный режим генерации при поперечных размерах, составляющих $\sim 8\lambda \times 250\lambda$, что является рекордной сверхразмерностью как для релятивистских мазеров [3], так и для мощных гиротронов [9, 10]. При этом выходная мощность может достигать экстремально высокого уровня $\sim 10\text{--}15\text{ ГВт}$, а энергосодержание в импульсах излучения до $10^4\text{--}10^5\text{ Дж}$.

Глава 2 посвящена разработке нового типа замедляющих систем для генераторов черенковского типа с целью повышения эффективности вывода излучения. Рассмотрены замедляющие системы ГПВ планарной геометрии на основе 1D-периодических и 2D-периодических брэгговских структур. Исследована возможность использования дополнительной гармоники гофрировки, обеспечивающей рассеяние волн, бегущих в плоскости гофрировки, в волновые потоки, распространяющиеся в поперечном направлении по нормали к замедляющей структуре.

В разделе 2.1 проведено исследование электродинамических характеристик 1D-периодических замедляющих структур с дополнительной гармоникой, период которой в 2 раза больше периода основной гофрировки [A15]:

$$a = a_d \cos(\bar{h}z + \varphi) + a_{2d} \cos(\bar{h}z/2). \quad (4)$$

При выполнении условия брэгговского резонанса

$$\bar{h} \approx 2h_0 \quad (5)$$

($\bar{h} = 2\pi/d$) на основной решетке с периодом d имеет место эффективная связь двух волн ТМ-типа, распространяющихся вдоль поверхности пластины во взаимно противоположных направлениях:

$$E_y = H_x = \text{Re} \left(A_+(z, y, t) e^{-ih_0 z} + A_-(z, y, t) e^{ih_0 z} \right) e^{i\omega_0 t}, \quad (6)$$

$$E_z = \text{Re} \frac{i}{h_0} \left(\frac{\partial A_+}{\partial y} e^{-ih_0 z} + \frac{\partial A_-}{\partial y} e^{ih_0 z} \right) e^{i\omega_0 t}. \quad (7)$$

Добавление дополнительной гофрировки с периодом $2d$ обеспечивает связь этих волн с волновым потоком, распространяющимся перпендикулярно поверхности пластины:

$$H_x = E_z = \text{Re} \left(B(z, t) e^{-ih_0 y} \right) e^{i\omega_0 t}. \quad (8)$$

Расчет структуры и оптимизация параметров предложенных двоякопериодических структур выполнен в рамках метода связанных волн и трехмерного моделирования с использованием кода CST Microwave Studio. Показана возможность вывода до 90 % мощности, излучаемой электронным пучком, в поперечном направлении с высоким гауссовым содержанием (рис. 6). На основе проведенного моделирования разработана двоякопериодическая замедляющая структура для использования в проекте ГПВ G-диапазона (рабочая частота ~ 150 ГГц), исследование которого ведется в ИПФ РАН на базе ускорителя «Синуки» 600 кэВ / 1 кА / 15 нс, формирующие ленточные РЭП с шириной $l_x \approx 2$ см (т. е. $l_x/\lambda \sim 10$).

Исследование динамики ГПВ с разработанной двоякопериодической замедляющей системой представлено в **разделе 2.2**. Проведен теоретический анализ в рамках квазиоптической модели метода связанных волн и прямое РИС-моделирование с использованием кода CST Studio Suite, показано хорошее соответствие результатов. Моделирование показывает, что в предложенной схеме ГПВ электронный КПД может составлять до 20 %, а выходная мощность ~ 70 МВт. При этом формируется благоприятная продольная

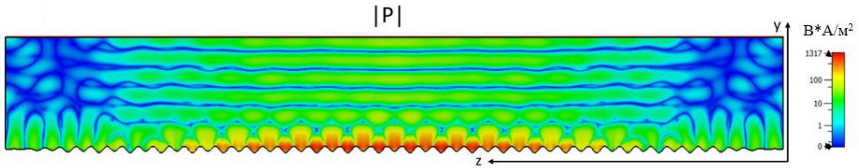


Рис. 6. Результаты CST-моделирования двоякопериодической замедляющей структуры для генератора поверхностной волны G-диапазона: мгновенная структура модуля вектора Пойнтинга $|P|$

структура поля, позволяющая повысить поперечную компоненту вектора Пойнтинга (по сравнению с «холодной» системой) до величины более 90 %. Предложенная модификация замедляющей системы позволяет разделить генерируемое излучение и интенсивный РЭП в области коллектора. При этом

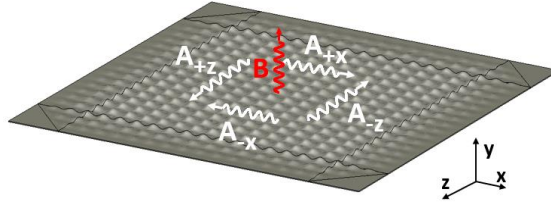


Рис. 7. Схема электродинамической системы ГПВ на основе мультипериодической замедляющей структуры, осуществляющей поперечный (по отношению к плоскости структуры) вывод излучения. Показаны параксиальные волновые потоки $A_{\pm z}$ и $A_{\pm x}$ и поперечно распространяющийся волновой поток B

структура поля выходного излучения имеет высокое гауссово содержание, что необходимо для эффективного вывода излучения из генератора, его транспортировки и дальнейшего использования [A16, A17].

Возможность развития поперечного сечения планарных ГПВ рассмотрена в **разделе 2.3**. В подобных пространственно-развитых генераторах (поперечный размер которых существенно превосходит параметр Френеля) предложено использование мультипериодических замедляющих структур (рис. 7) на основе брэгговских гофрировок вида (1) (профиль которых аналогичен 3D брэгговским структурам, рассмотренным в Главе 1 [A18, A19]). При выполнении условия брэгговского резонанса

$$h_{3D} \approx h_0 \quad (9)$$

на основной решетке (первый компонент в (1)) имеет место связь и взаимное рассеяние четырех парциальных волн ТМ-типа, поле которых может быть представлено в виде

$$\begin{aligned} H_x &= \text{Re} \left(A_{+z}(x, z, y, t) e^{-ih_0 z} + A_{-z}(x, z, y, t) e^{ih_0 z} \right) e^{i\omega_0 t}, \\ H_z &= \text{Re} \left(A_{+x}(x, z, y, t) e^{-ih_0 x} + A_{-x}(x, z, y, t) e^{ih_0 x} \right) e^{i\omega_0 t}. \end{aligned} \quad (10)$$

Дополнительная гофрировка (второй компонент в (1)) обеспечивает связь этих волн с волновым потоком, распространяющимся перпендикулярно поверхности пластины

$$H_x = \text{Re} \left(B_x(x, z, t) e^{-ih_0 y} \right) e^{i\omega_0 t}, \quad H_z = \text{Re} \left(B_z(x, z, t) e^{-ih_0 y} \right) e^{i\omega_0 t}. \quad (11)$$

Показано, что аналогично структурам с 1D-периодической гофрировкой, добавление дополнительной гармоники позволяет обеспечить эффективное рассеяние продольно и поперечно распространяющихся волновых потоков в плоскости структуры в волновой поток, излучаемый по нормали к этой структуре. В рамках CST-моделирования разработана мультипериодическая электродинамическая система с параметром сверхразмерности $l_x/\lambda \sim 60$, позволяющая осуществить вывод ~ 70 % мощности в поперечном направлении при

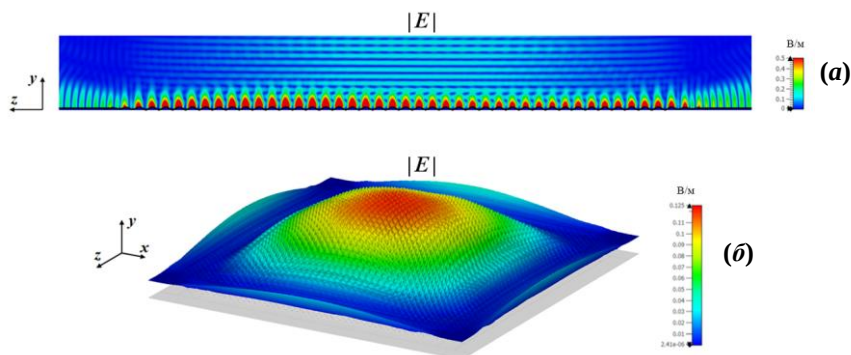


Рис. 8. Результаты моделирования замедляющей системы J-диапазона с мультипериодической гофрировкой, обеспечивающей поперечный вывод энергии: модуль электрического поля $|E|$ в сечениях (а) $y - z$ и (б) $x - z$

структуре поля выходного излучения, близкой к гауссовому распределению (рис. 8). Данная структура ориентирована на использование в проекте черенковского ГПВ J-диапазона, разрабатываемого на базе ускорительного комплекса «Синуки».

В разделе 2.4 проведено моделирование динамики ГПВ с мультипериодической брэгговской структурой, основанной на трехмерном рассеянии волновых потоков, которая позволяет реализовать вывод излучения по нормали к замедляющей системе. Разработан проект ГПВ J-диапазона (рабочая частота около 300 ГГц) на базе ускорителя «Синуки» с шириной $l_x \approx 2$ см (т. е. $l_x/\lambda \sim 20$). Проведена оптимизация параметров генератора в рамках развитой квазиоптической модели и верификация результатов путем прямого PIC-моделирования в среде CST Studio Suite. Согласно проведенному моделированию при оптимальных параметрах в данном генераторе при использовании предложенной мультипериодической замедляющей системы обеспечивается установление стабильного одномодового режима с электронным КПД до 17 % при выводе более 70 % генерируемого излучения по нормали к гофрированной структуре с преобразованием в волновой поток с высоким гауссовым содержанием.

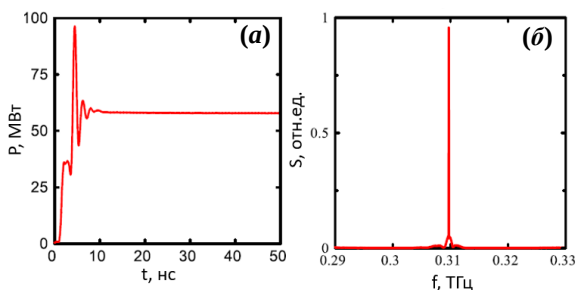


Рис. 9. Результаты CST-моделирования ГПВ J-диапазона на основе мультипериодической замедляющей системы: а – зависимость выходной мощности от времени и б – частотный спектр излучения в стационарном режиме генерации

Глава 3 описывает разработку электродинамической системы РОС-гетеролазеров, позволяющей осуществить вывод генерируемого излучения под углом к поверхности структуры (рис. 10). В отличие от «традиционного» варианта [60], где генерируемая мощность выводится с торца структуры, предложенный в работе метод позволяет свести к минимуму отражения от торцов структуры, которые могут приводить к образованию высокочастотных мод в паразитной цепи обратной связи и, как следствие, срыву генерации. Вместе с тем, распределенное по площади структуры излучение способствует равномерной генерации во всей активной области. Для реализации данного метода также предлагается использование гофрировки, включающей в себя несколько гармоник, нанесенной на поверхность многослойной диэлектрической структуры лазера. Прототипом данной структуры являются планарные наногетероструктуры КРТ, разрабатываемые в ИФМ РАН [61, 62].

В разделе 3.1 представлен теоретический анализ и трехмерное моделирование электродинамических характеристик брэгговской решетки предложенного типа для РОС-гетеролазера, которая может быть выполнена в виде гофрировки участка поверхности, модуляцией диэлектрической проницаемости в форме меандра

$$\varepsilon = 1 + \frac{\varepsilon_b - 1}{2} (1 + \text{sign}[\sin(\bar{h}z)]), \quad (12)$$

где $\bar{h} = 2\pi/d$, d – период гофрировки, ε_b – диэлектрическая проницаемость материала гофрировки. Показана возможность вывода генерируемого излучения в два луча, направленных под углом к гофрированной области, при этом угол зависит от периода гофрировки и номера гармоники, на которой происходит рассеяние

$$\text{tg}\phi_s = \sqrt{S^2/n_{\text{eff}}^2 (S - 2s)^2 - 1}, \quad (13)$$

где s – номер гармоники, на которой происходит рассеяние, n_{eff} – эффективный показатель преломления невозмущенного диэлектрического волновода на центральной частоте полосы усиления активной среды, S – порядок брэгговского резонанса $2h \approx Sh$. Однако в данной схеме образуются волновые потоки, идущие в подложку, которые являются паразитными. Проведена оптимизация параметров структуры, направленная на минимизацию указанных потоков. Результаты теоретического анализа подтверждены

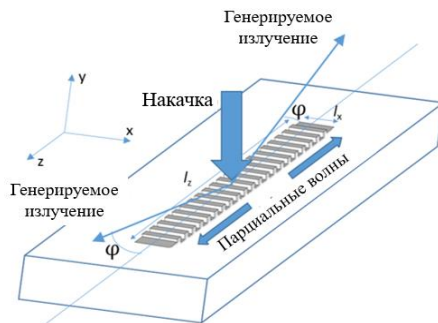


Рис. 10 Схема РОС-лазера с поперечным выводом излучения на основе КРТ-гетероструктур

3D-моделированием, в рамках которого проведена верификация оптимальных параметров разработанной брэгговской структуры (рис. 11) [A23, A24].

Моделирование динамики гетеролазеров с брэгговскими структурами нового типа проведено в **разделе 3.2**. Показана возможность установления стабильного одномодового режима генерации при равномерном распределении инверсии населенности по всей площади структуры [A26]. На основе рассчитанных параметров на базе ИФМ РАН изготовлены экспериментальные образцы КРТ-лазеров.

В **разделе 3.3** описаны экспериментальные исследования КРТ-гетеролазера с длиной волны 13.5 мкм, основанного на использовании предложенной электродинамической системы. Проведенные экспериментальные исследования продемонстрировали возможность установления одномодового режима генерации при различных способах накачки (импульсным и непрерывным CO₂-лазерами) и, в итоге, подтвердили эффективность предлагаемых брэгговских структур. В ходе экспериментов проведены измерения диаграммы направленности излучения, показано хорошее соответствие угла, полученного в рамках теоретического анализа и CST-моделирования, с результатами экспериментальных измерений.

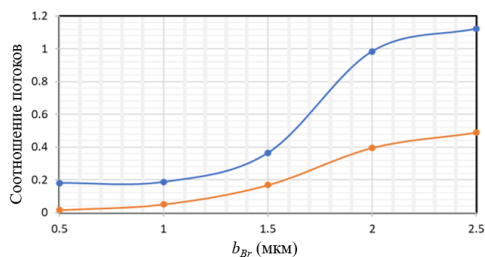


Рис. 11. Результаты CST-моделирования разработанной диэлектрической структуры КРТ-лазера: отношение мощности потока, выводимого из структуры, к мощности, идущей в подложку (голубая кривая) и к полной генерируемой мощности (оранжевая кривая) в зависимости от глубины гофрировки b_{Br}

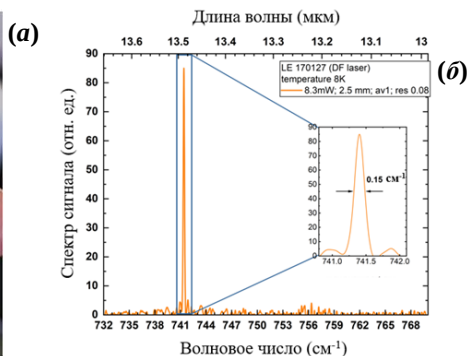
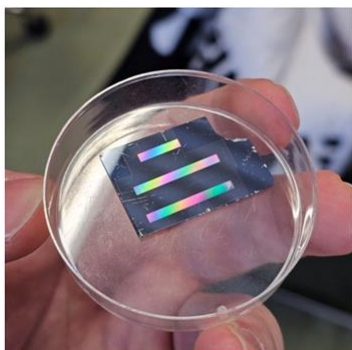


Рис. 12. Фотография изготовленного КРТ-лазера с брэгговскими структурами предложенного типа (а), б – результаты измерения спектра генерируемого излучения в КРТ-гетеролазере при использовании данных структур

Основные результаты диссертационной работы

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. 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 3D-моделированием на основе *CST Microwave Studio*, а также экспериментальными исследованиями параметров рассеяния в W-диапазоне. Разработаны высокоселективные 3D брэгговские резонаторы для их дальнейшего использования в проектах МСЭ-генераторов суб-ТГц- и ТГц-диапазона частот.

2. Для описания динамики планарных МСЭ-генераторов с новым типом электродинамической системы развита оригинальная квазиоптическая модель в рамках метода связанных волн. В проведенном на основе данной модели моделировании 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 обратной связи 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-генератора с трехмерной обратной связью 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 до 1 см $\times$ 140 см. В рамках PIC-моделирования исследован процесс формирования интенсивного магнитонаправляемого 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 экстремально высокого уровня ~ 15 ГВт, а энергосодержание в импульсах излучения до 10^4 – 10^5 Дж.

4. Исследована возможность использования дополнительной гармоники гофрировки в замедляющей системе релятивистских генераторов поверхностной волны (ГПВ), которая обеспечивает рассеяние поверхностных волн в волновые потоки, распространяющиеся в поперечном направлении, и, таким образом, реализует эффективный вывод излучения. В рамках квазиоптической модели метода связанных волн выполнено моделирование и оптимизация параметров мультипериодических замедляющих систем на основе брэгговских структур 1D и 2D типа, прослежена аналогия последних с 3D брэгговскими структурами. Результаты проведенного анализа подтверждены трехмерным моделированием в рамках PIC-кода *CST Studio Suite*. Показано, что использование дополнительной гармоники гофрировки в 1D замедляющих структурах позволяет обеспечить в ГПВ вывод более 90 % генерируемой мощности в поперечном направлении. В ГПВ на основе мультипериодических замедляющих структур, обеспечивающих трехмерное рассеяние волновых потоков, эффективность поперечного вывода излучения составляет ~ 70 % по мощности. Проведена оценка параметров для реализации поперечного вывода излучения в проектах планарных генераторов поверхностной волны G-диапазона (рабочая частота около 150 ГГц) и J-диапазона (частота ~ 300 ГГц) на базе ускорительного комплекса «Синуки» (ИПФ РАН).

5. Исследована возможность реализации поперечного вывода излучения в гетеролазерах с распределенной обратной связью (РОС) на основе кадмий-ртуть-теллур (КРТ) структур. Предложена модификация брэгговской гофрировки, в которой основная компонента обеспечивает обратную связь, а добавление дополнительной гармоники позволяет осуществить вывод излучения под углом к гофрированной поверхности, зависящим от номера гармоники. Проведен теоретический анализ электродинамических характеристик брэгговских структур данного типа и их прямое численное моделирование, продемонстрировано хорошее соответствие результатов в рамках этих подходов. Разработан проект двоякопериодической структуры для прототипа КРТ-гетеролазера, позволяющей обеспечить вывод до 40 % мощности генерируемого излучения на третьей гармонике гофрировки под углом 20° к его поверхности. В рамках моделирования динамики РОС-лазера на основе балансных уравнений показана возможность установления стационарного режима генерации при использовании предложенных брэгговских структур. При этом реализация поперечного вывода излучения в данных структурах позволяет добиться более равномерной инверсии населенности по всей активной области лазера.

6. Разработан проект электродинамической системы КРТ-гетеролазера с длиной волны 14 мкм для реализации поперечного вывода излучения, изготовлены экспериментальные образцы данных структур. В ходе проведенных в ИФМ РАН исследований продемонстрировано установление стабильной одномодовой генерации в разработанных гетеролазерах с реализацией вывода излучения под углом к поверхности при использовании различных типов накачки. Измеренный в экспериментальном прототипе КРТ-гетеролазера угол вывода излучения хорошо согласуется с расчетными данными.

Список публикаций автора по теме диссертации

A1. Песков Н.Ю., Егорова Е.Д., Сергеев А.С., Царьков И.М. *Брэгговская структура, обеспечивающая трехмерную распределенную обратную связь*. Патент на изобретение RU 2795733 C1 от 11.05.2023. Заявка № 2022132499 от 12.12.2022.

A2. Егорова Е.Д., Песков Н.Ю., Сергеев А.С., Царьков И.М. *Высокоselectивные «трехмерные» брэгговские резонаторы для мощных суб-ТГц ЛСЭ* // Электроника и микроэлектроника СВЧ. 2022. Т. 1. С. 150–153.

A3. Песков Н.Ю., Егорова Е.Д., Сергеев А.С., Царьков И.М. *Высокоselectивные брэгговские резонаторы, реализующие трехмерную распределенную обратную связь, для мощных пространственно-развитых лазеров на свободных электронах* // Письма в ЖТФ. 2023. Т. 49, № 8. С. 16–20.

A4. Egorova E.D., Peskov N.Yu., Sergeev A.S. *High-selective Bragg resonators with 3D distributed feedback for free-electron lasers of sub-THz/THz band* // IEEE Conferences Proceedings: The 24th International Vacuum Electronics Conference (IVEC-2023), Chengdu, China, Apr. 25–28, 2023. Art. no. 10156968.

A5. 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.

A6. Egorova E.D., Peskov N.Yu., Sergeev A.S. *High-selective spatially-extended Bragg reflectors based on three-dimensional scattering of wave-fluxes* // IEEE Conference Proceedings: The 9th All-Russian Microwave Conference (RMC-2024), Moscow, Russia, Nov. 25–29, 2024. P. 443–446.

A7. Egorova E.D., Peskov N.Yu., Sergeev A.S., Vkharev A.A. *Electrodynamic study of high-selective three-dimensional Bragg resonators for spatially-extended free-electron masers* // IEEE Conference Proceedings: The 2025 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS-2025), Abu Dhabi, UAE, May 4–8, 2025. Art. no. 241114194739.

A8. Peskov N.Yu., Savilov A.V., Egorova E.D., Sandalov E.S., Ginzburg N.S., Sergeev A.S., Arzhannikov A.V., Sinitsky S.L., Oparina Yu.S., Zaslavsky V.Yu., Niki-

forov D.A. *Powerful long-pulse FEL based on linac LIU: simulations and optimization of parameters for initial experiments at 0.3 THz range* // IEEE Conferences Proceedings: The 24th International Vacuum Electronics Conference (IVEC-2023), Chengdu, China, Apr. 25–28, 2023. Art. no. 10157814.

A9. 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* // Известия вузов. Радиофизика. 2023. Т. 66, № 7–8. С. 575–584.

A10. Egorova E.D., Peskov N.Yu., Sergeev A.S., Ginzburg N.S., Arzhannikov A.V., Sinitsky S.L. *Super-power Free-Electron Masers with 3D distributed feedback* // The 5th International Conference “Terahertz and Microwave Radiation: Generation, Detection and Applications” (TERA-2023), Moscow, Russia, Feb. 27–Mar. 2, 2023. Book of Abstracts. P. 51–52.

A11. 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.

A12. Egorova E.D., Peskov N.Yu., Sergeev A.S., Ginzburg N.S., Arzhannikov A.V., Sinitsky S.L. *Super-power W-band free-electron maser with combined two-mirror resonator consisting of 3D and 1D Bragg reflectors* // IEEE Conference Proceedings: The 2024 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS-2024), Chengdu, China, Apr. 21–25, 2024. Art. no. 10617936.

A13. Peskov N.Yu., Egorova E.D., Zaslavsky V.Yu., Leshcheva K.A., Vikharev A.A., Sergeev A.S., Ginzburg N.S., Arzhannikov A.V., Sandalov E.S., Samtsov D.A., Sinitsky S.L. *Project of multigigawatt power W-band free-electron maser with 3D distributed feedback driven by large-size sheet electron beam* // IEEE Conference Proceedings: The 2025 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS-2025), Abu Dhabi, UAE, May 4–8, 2025. Art. no. 241113152056.

A14. Песков Н.Ю., Егорова Е.Д., Гинзбург Н.С., Сергеев А.С., Аржанников А.В., Синицкий С.Л. *Мультигигаваттный суб-ТГц МСЭ планарной геометрии с трехмерной распределенной обратной связью: проектные параметры и моделирование* // Известия РАН: серия Физическая. 2025. Т. 89, № 9. С. 1452–1458.

A15. Федотов А.Э., Малкин А.М., Егорова Е.Д., Гинзбург Н.С. *Характеристики резонаторов поверхностной волны с поперечным выводом излучения* // Известия вузов. Радиофизика. 2024. Т. 67, № 6. С. 500–508.

A16. 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.

A17. Fedotov A.E., Malkin A.M., Zaslavsky V.Yu., Sergeev A.S., Egorova E.D., Ginzburg N.S. *Transverse radiation output for relativistic sub-terahertz Surface-Wave Oscillators* // IEEE Conferences Proceedings: The 22nd International Vacuum Electronics Conference (IVEC-2021), Rotterdam, Netherlands, Apr. 27–30, 2021. Art. no. 9722533.

A18. Egorova E.D., Ginzburg N.S., Peskov N.Yu., Malkin A.M., Zaslavsky V.Yu., Fedotov A.E. *Transverse radiation output in planar surface-wave oscillators based on 1D and 2D periodical slow-wave structures* // IEEE Conference Proceedings: The 9th All-Russian Microwave Conference (RMC-2024), Moscow, Russia, Nov. 25–29, 2024. P. 439–442.

A19. Egorova E.D., Ginzburg N.S., Peskov N.Yu., Malkin A.M., Sergeev A.S., Zaslavsky V.Yu. *Multi-periodic 1D and 2D slow-wave structures for Surface-wave Oscillators with transverse radiation output* // IEEE Conference Proceedings: The 2025 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS-2025), Abu Dhabi, UAE, May 4–8, 2025. Art. no. 241114195232.

A20. Peskov N.Yu., Zaslavsky V.Yu., Leshcheva K.A., Egorova E.D. *Surface-wave oscillators with advanced Bragg reflectors as a way to increase frequency stability and tuning* // IEEE Conference Proceedings: The 2024 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS-2024), Chengdu, China, Apr. 21–25, 2024. Art. no. 10618435.

A21. Egorova E.D., Ginzburg N.S., Malkin A.M., Peskov N.Yu., Sergeev A.S. *Optimization of radiation output in surface-wave oscillators based on 2D-periodical slow-wave structures of planar geometry* // IEEE Conference Proceedings: The 2024 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS-2024), Chengdu, China, Apr. 21–25, 2024. Art. no. 10617953.

A22. Arzhannikov A.V., Egorova E.D., Ginzburg N.S., Kalinin P.V., Peskov N.Yu., Sandalov E.S., Samtsov D.A., Sergeev A.S., Sinitsky S.L., Stepanov V.D., Zaslavsky V.Yu. *W-band planar Cherenkov maser with 2D-periodic slow-wave structure based on the ELMI accelerator: modeling and results of the first experiments* // IEEE Conference Proceedings: The 2025 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS-2025), Abu Dhabi, UAE, May 4–8, 2025. Art. no. 241113152739.

A23. 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.

A24. Egorova E.D., Baryshev V.R., Ginzburg N.S., Kocharovskaya E.R., Malkin A.M., Zaslavsky V.Yu., Morozov C.B., Sergeev A.S. *Development of*

a single-mode DFB heterolaser with surface-emitted radiation output // IEEE Conference Proceedings: The 2024 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS-2024), Chengdu, China, Apr. 21–25, 2024. Art. no. 10618753.

A25. Ginzburg N.S., Sergeev A.S., Kocharovskaya E.R., Malkin A.M., Egorova E.D., Zaslavsky V.Yu. *Diffraction mode selection in planar lasers with Bragg resonators* // ITM Web Conferences: The 29th International Crimean Conference “Microwave & Telecommunication Technology” (CriMiCo’2019), Sevastopol, Russia, Sept. 8–14, 2019. V. 30. Art. no. 06012.

A26. 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.

A27. 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* // XXVII Международный симпозиум «Нанозлектроника», Нижний Новгород, Россия, 13–16 марта 2023. Сборник трудов. Т. 2. С. 532–533.

A28. 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.

A29. Барышев В.Р., Гинзбург Н.С., Егорова Е.Д., Малкин А.М., Заславский В.Ю. *О возможности вертикального вывода в гетеролазерах с двумерной распределенной обратной связью* // XXIV Международный симпозиум «Нанозлектроника», Нижний Новгород, Россия, 10–13 марта 2020. Сборник трудов. Т. 2. С. 517–518.

A30. Гинзбург Н.С., Сергеев А.С., Кочаровская Е.Р., Малкин А.М., Егорова Е.Д., Заславский В.Ю. *Дифракционная селекция мод в полупроводниковом лазере с планарной брэгговской структурой конечной ширины* // XXIV Международный симпозиум «Нанозлектроника», Нижний Новгород, Россия, 10–13 марта 2020. Сборник трудов. Т. 2. С. 539–540.

A31. Барышев В.Р., Гинзбург Н.С., Заславский В.Ю., Малкин А.М., Егорова Е.Д., Сергеев А.С. *Оптимизация условий поперечного вывода в РОС-лазерах на основе полупроводниковых гетероструктур* // XXV Международный симпозиум «Нанозлектроника», Нижний Новгород, Россия, 9–12 марта 2021. Сборник трудов. Т. 2. С. 576–577.

A32. 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.

A33. Peskov N.Yu., Egorova E.D. *Advanced Bragg structures open laterally as a way to enhance selectivity* // IEEE Conferences Proceedings: The 24th International Vacuum Electronics Conference (IVEC-2023), Chengdu, China, Apr. 25–28, 2023. Art. no. 10157267.

A34. Кирьянова Е.Н., Румянцев В.В., Разова А.А., Шенгуров Д.В., Гусев Н.С., Морозова Е.Е., Уточкин В.В., Барышев В.Р., Янцер А.А., Мажукина К.А., Фадеев М.А., Гинсбург Н.С., Малкин А.М., Егорова Е.Д., Михайлов Н.Н., Дворецкий С.А., Гавриленко В.И., Морозов С.В. *Лазерное излучение в мегаструктуре с квантовыми ямами на основе HgCdTe с периодической системой гребней* // Физика и техника полупроводников. 2025. Т. 59, № 10. С. 608–613.

Литература

1. Братман В.Л., Литвак А.Г., Суворов Е.В. *Освоение терагерцового диапазона: источники и приложения* // Успехи физических наук. 2011. Т. 181, № 8. С. 867–874.
2. Cairns R.A., Phelps A.D.R. (Eds.). *Generation and application of high power microwaves*. Boca Raton, USA: CRC Press, 2020.
3. Benford J., Swegle J.A., Schamiloglu E. *High Power Microwaves* (3rd ed.). Boca Raton, USA: CRC Press, 2015.
4. Okress E. C. (Ed.). *Microwave power engineering: Applications* // New Jersey, USA: Academic Press, 2013.
5. O'Shea P.G., Freund H.P. *Free-electron lasers: Status and applications* // Science. 2001. V. 292, no. 5523. Art. no. 1853.
6. Nusinovich G.S., Thumm M.K.A., Petelin M.I. *The gyrotron at 50: historical overview* // J. of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves. 2014. V. 35. P. 325–381.
7. Litvak A.G., Denisov G.G., Glyavin M.Yu. *Russian gyrotrons: achievements and trends* // IEEE J. of Microwaves. 2021. V. 1. P. 260–268.
8. Thumm M.K.A., Denisov G.G., Sakamoto K., Tran M.Q. *High-power gyrotrons for electron cyclotron heating and current drive* // Nuclear Fusion. 2019. V. 59, no. 7. Art. no. 073001.
9. Новожилова Ю.В., Денисов Г.Г., Глявин М.Ю., Рыскин Н.М., Бакунин В.Л., Богдашов А.А., Мельникова М.М., Фокин А.П. *Стабилизация частоты гиротрона под влиянием внешнего монохроматического сигнала или отраженной от нагрузки волны: обзор* // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2017. Т. 25, № 1. С. 4–34.

10. Glyavin M.Yu., Luchinin A.G., Golubiatnikov G.Yu. *Generation of 1.5-kW, 1-THz coherent radiation from a gyrotron with a pulsed magnetic field* // Physical Review Letters. 2008. V. 100. P. 015101.
11. Glyavin M.Y., Kuftin A.N., Morozkin M.V., Proyavin M.D., Fokin A.P., Chirkov A.V., Manuilov V.N., Sedov A.S., Soluyanov E.A., Sobolev D.I., Tai E.M., Tsvetkov A.I., Luchinin A.G., Kornishin S.Yu., Denisov G.G. *A 250-Watts, 0.5-THz continuous-wave second-harmonic gyrotron* // IEEE Electron Device Letters. 2021. V. 42, no. 11. P. 1666–1669.
12. Kalynov Yu.K., Bandurkin I.V., Osharin I.V., Savilov A.V. *Third-harmonic 1 THz large-orbit gyrotron with an improved quasi-regular cavity* // IEEE Electron Device Letters. 2023. V. 44, no. 10. P. 1740–1743.
13. Nanni E.A., Huang W.R., Hong K.-H., Ravi K., Fallahi A., Moriena G., Dwayne Miller R.J., Kartner F.X. *Terahertz-driven linear electron acceleration* // Nature Communication. 2015. V. 6, no. 1. Art. no. 8486.
14. Grishunin K.A., Ilyin N.A., Sherstyuk N.E., Mishina E.D., Kimel A., Mukhortov V.M., Ovchinnikov A.V., Chefonov O.V., Agranat M.B. *THz electric field-induced second harmonic generation in inorganic ferroelectric* // Scientific Reports. 2017. V. 7, no. 1. Art. no. 687.
15. Zhang D., Fallahi A., Hemmer M., Wu X., Fakhari M., Hua Y., Cankaya H., Calendron A.L., Zapata L.E., Matlis N.H., Kartner F.X. *Segmented terahertz electron accelerator and manipulator (STEAM)* // Nature Photonics. 2018. V. 12, no. 6. P. 336–342.
16. Ginzburg N.S., Fedotov A.E., Kuzikov S.V., Sharypov K.A., Shpak V.G., Shunailov S.A., Vikharev A.A., Yalandin M.I., Zotova I.V. *Demonstration of high-gradient electron acceleration driven by subnanosecond pulses of Ka-band super-radiance* // Physical Review Accelerators and Beams. 2023. V. 26, no. 6. Art. no. 060401.
17. Вихарев А.А., Зотова И.В., Федотов А.Э., Гинзбург Н.С., Яландин М.И. *Высокоградиентные структуры для ускорения электронов коротковолновыми импульсами черенковского сверхизлучения* // Известия вузов. Радиофизика. 2025. Т. 68, № 1. С. 29–35.
18. Denisov G.G., Palitsin A.V., Sobolev D.I., Kuftin A.N., Parshin V.V., Morozkin M.V., Chirkov A.V., Glyavin M.Yu. *Compression of 20 kW 170 GHz gyrotron output radiation by quasi-optical resonator with laser activated GaAs switch* // IEEE Electron Device Letters. 2024. V. 45, no. 10. P. 2040–2043.
19. Братман В.Л., Гинзбург Н.С., Петелин М.И. *Энергетические возможности релятивистского комптоновского лазера* // Письма в ЖЭТФ. 1978. Т. 28, № 4. С. 207–211.

20. McDermot D.B., Marshall T.C., Sclesinger S.E., Parker R.K., Granatstein V.L. *High-power free-electron laser on stimulated Raman backscattering* // Physical Review Letters. 1978. V. 41, no. 5. P. 1368–1371.
21. Gover A., Sprangle P. *A unified theory of magnetic bremsstrahlung, electrostatic bremsstrahlung, Compton-Raman scattering, and Cerenkov-Smith-Purcell free-electron laser* // IEEE J. Quantum Electronics. 1981. V. QE-17, no. 8. P. 1196–1215.
22. Kuzikov S.V., Jiang Y., Marshall T.C., Sotnikov G.V., Hirshfield J.L. *Configurations for short period RF undulators* // Physical Review ST – Accelerators and Beams. 2013. V. 16, no. 7. Art. no. 070701.
23. Tantawi S., Shumail M., Neilson J., Bowden G., Chang C., Hemsing E., Dunning M. *Experimental demonstration of a tunable microwave undulator* // Physical Review Letters. 2014. V. 112, no. 16. Art. no. 164802.
24. Абубакиров Э.Б., Вихарев А.А., Гинзбург Н.С., Денисенко А.Н., Заславский В.Ю., Крапивницкая Т.О., Кузиков С.В., Песков Н.Ю., Савилов А.В. *Системы накачки комптоновских лазеров на свободных электронах: источники и СВЧ-ондуляторы* // Известия ВУЗов: Радиофизика. 2019. Т. 62, № 7–8. С. 582–590.
25. Nusinovich G.S., Sprangle P., Semenov V.E., Dorozhkina D.S., Glyavin M.Yu. *On the sensitivity of terahertz gyrotron based systems for remote detection of concealed radioactive materials* // Journal of Applied Physics. 2012. V. 111, no. 12. Art. no. 124912.
26. Booske J.H. *Plasma physics and related challenges of millimeter-wave-to-terahertz and high power microwave generation* // Physics of Plasmas. 2008. V. 15, no. 5. Art. no. 055502.
27. Benford J. *Space applications of high-power microwaves* // IEEE Trans. on Plasma Science. 2008. V. 36, No. 3. P. 569–581.
28. Samsonov S.V., Denisov G.G., Glyavin M.Yu., Zheleznov I.V., Zotova I.V. *High-power Ka-band gyrotron rectifier for advanced systems of wireless power transmission* // J. of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves. 2025. V. 46, no. 1. P. 1–7.
29. Андрианов М.Н., Лихачев С.Ф., Рыскин Н.М., Торгашов Р.А., Черный Р.А. *Перспективы развития и создания высокоскоростных комплексов миллиметрового диапазона длин волн для дальней космической связи* // Известия вузов. Радиофизика. 2026. Т. 69, № 3. С. 147–158.
30. Рабинович М.И., Трубецков Д.И. *Введение в теорию колебаний и волн*. М.: Наука, 1984.
31. Ковалев Н.Ф., Петелин М.И. *Селекция мод в высокочастотных релятивистских электронных генераторах с распределенным взаимодействием*, в

кн: Релятивистская высокочастотная электроника. Горький: ИПФ АН СССР, 1981. Вып. 2. С. 62–101.

32. Barker R.J., Luhmann N.C., Booske J.H., Nusinovich G.S. (Eds.). *Modern microwave and millimeter-wave power electronics*. New York, USA: John Wiley & Sons, 2005.

33. Granatstein V.L., Parker R.K., Armstrong C.M. *Vacuum electronics at the dawn of the twenty-first century* // Proc. of the IEEE. 1999. V. 87, no. 5. P. 702–716.

34. Petelin M.I. *Mode selection in high power microwave sources* // IEEE Trans. on Electron Devices. 2001. V. 48, no. 1. P. 129–133.

35. Рыскин Н.М., Трубецков Д.И. *Нелинейные волны*. Москва: URSS, ЛЕНАНД, 2017.

36. Гапонов А.В., Гольденберг А.Л., Григорьев Д.П., Орлова И.М., Панкратова Т.Б., Петелин М.И. *Индукцированное циклотронное излучение электронов в открытых резонаторах* // Письма в ЖЭТФ. 1965. Т. 2, № 9. С. 430–435.

37. Русин Ф.С., Богомолов Г.Д. *Генерация электромагнитных колебаний в открытом резонаторе* // Письма в ЖЭТФ. 1966. Т. 4, № 6. С. 236–239.

38. Ковалев Н.Ф., Орлова И.М., Петелин М.И. *Трансформация волн в многомодовом волноводе с гофрированными стенками* // Известия вузов. Радиофизика. 1968. Т. 11, № 5. С. 783–786.

39. Bratman V.L., Denisov G.G., Ginzburg N.S., Petelin M.I. *FEL's with Bragg reflection resonators: cyclotron autoresonance masers versus ubitrons* // IEEE J. of Quantum Electronics. 1983. V. 19, no. 3. P. 282–296.

40. Денисов Г.Г., Резников М.Г. *Гофрированные цилиндрические резонаторы для коротковолновых релятивистских СВЧ генераторов* // Известия вузов. Радиофизика. 1982. Т. 25, № 5. С. 562–569.

41. Kogelnik H., Shank C.V. *Coupled-wave theory of distributed feedback lasers* // J. of Applied Physics. 1972. V. 43. P. 2327–2335.

42. Yariv A. *Quantum Electronics*. New York, USA: John Wiley & Sons, 1975.

43. Bai Y., Bandyopadhyay N., Tsao S., Slivken S., Razeghi M. *Room temperature quantum cascade lasers with 27% wall plug efficiency* // Applied Physics Letters. 2011. V. 98, no. 18. Art. no. 181102.

44. Tsekoun A., Lyakh A., Maulini R., Lane M., Macdonald T., Go R., Patel N. *High power and efficiency quantum cascade laser systems for defense and security applications* // Proc. SPIE. 2009. V. 7325. Art. no. 73250L.

45. Гинзбург Н.С., Песков Н.Ю., Сергеев А.С. *Использование двумерной распределенной обратной связи в лазерах на свободных электронах* // Письма в ЖТФ. 1992. Т. 18, № 9. С. 23–28.

46. Ginzburg N.S., Peskov N.Yu., Sergeev A.S., Arzhannikov A.V., Sinitsky S.L. *Super-power free electron lasers with two-dimensional distributed feedback* // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. 1995. V. 358, no. 1–3. P. 189–192.
47. Ginzburg N.S., Peskov N.Yu., Sergeev A.S., Phelps A.D.R., Konoplev I.V., Robb G.R.M., Cross A.W., Arzhannikov A.V., Sinitsky S.L. *Theory and design of a free-electron maser with two-dimensional feedback driven by a sheet electron beam* // Physical Review E. 1999. V. 60, no. 1. P. 935–945.
48. Гинзбург Н.С., Песков Н.Ю., Сергеев А.С., Заславский В.Ю., Аржанников А.В., Синицкий С.Л. *Двумерная распределенная обратная связь как метод генерации мощного когерентного излучения от пространственно-развитых релятивистских электронных пучков* // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2020. Т. 28, № 6. С. 575–632.
49. Аржанников А.В., Гинзбург Н.С., Заславский В.Ю., Иваненко В.Г., Иванов И.А., Калинин П.В., Кузнецов А.С., Кузнецов С.А., Песков Н.Ю., Сергеев А.С., Синицкий С.Л., Степанов В.Д. *Генерация пространственно-когерентного излучения в мазере на свободных электронах с двумерной распределенной обратной связью* // Письма в ЖЭТФ. 2008. Т. 87, № 11. С. 715–719.
50. Arzhannikov A.V., Ginzburg N.S., Kalinin P.V., Kuznetsov S.A., Malkin A.M., Peskov N.Yu., Sergeev A.S., Sinitsky S.L., Stepanov V.D., Thumm M., Zaslavsky V.Yu. *Using two-dimensional distributed feedback for synchronization of radiation from two parallel-sheet electron beams in a free-electron maser* // Physical Review Letters. 2016. V. 117, no. 11. Art. no. 114801.
51. Arzhannikov A.V., Cross A.W., Ginzburg N.S., He W., Kalinin P.V., Konoplev I.V., Kuznetsov S.A., Peskov N.Yu., Phelps A.D.R., Robertson C.W., Ronald K., Sergeev A.S., Sinitsky S.L., Stepanov V.D., Thumm M., Whyte C.G., Zaslavsky V.Yu. *Production of powerful spatially coherent radiation in planar and coaxial FEM exploiting two-dimensional distributed feedback* // IEEE Trans. on Plasma Science. 2009. V. 37, no. 9. P. 1792–1800.
52. Bugaev S.P., Cherepenin V.A., Kanavets V.I., Klimov A.I., Kopenkin A.D., Koshelev V.I., Popov V.A., Slepov A.I. *Relativistic multiwave Cerenkov generators* // IEEE Trans. on Plasma Science. 1990. V. 18. P. 525–536.
53. Vlasov A.N., Shkvarunets A.G., Rodgers J.C., Carmel Y., Jr. Antonsen T.M., Abuefadel T.M., Lingze D., Cherepenin V.A., Nusinovich G.S., Botton M., Granatstein V.L. *Overmoded GW-class surface-wave microwave oscillator* // IEEE Trans. on Plasma Science. 2000. V. 28, no. 3. P. 550–560.
54. Wang J., Wang G., Wang D., Li S., Zeng P., *A megawatt-level surface wave oscillator in Y-band with large oversized structure driven by annular relativistic electron beam* // Scientific Reports. 2018. V. 8, no. 1. Art. no. 6978.

55. Ginzburg N. S., Ilyakov E. V., Kulagin I. S., Malkin A. M., Peskov N. Yu., Sergeev A. S., Zaslavsky V. Yu. *Theoretical and experimental studies of relativistic oversized Ka-band surface-wave oscillator based on 2D periodical corrugated structure* // Physical Review Accelerators and Beams. 2018. V. 21. Art. no. 080701.
56. Annaka Y., Ogura K., Aoki M., Hamada S., Kato T., Ito M. *Effect of oversized factor on 0.1 THz surface wave oscillator* // Plasma and Fusion Research. 2022. V. 17. Art. no. 2406036.
57. Peskov N. Yu., Zaslavsky V. Yu., Denisenko A. N., Abubakirov E. B., Malkin A. M., Proyavin M. D., Sergeev A. S., Ginzburg N. S. *Sub-gigawatt W-band oversized Surface-Wave Oscillator with 2D-periodical slow-wave structure of cylindrical geometry* // IEEE Electron Device Letters. 2023. V. 44, no. 10. P. 1756–1759.
58. Zaslavsky V. Yu., Palitsin A. V., Rodin Yu. V., Goykhman M. B., Gromov A. V., Panin A. N., Parshin V. V., Gulyovsky D. R., Leshcheva K. A., Peskov N. Yu., Ginzburg N. S. *High-power G-band relativistic Surface-Wave Oscillator with 2D-periodic slow-wave structure of planar geometry* // IEEE Electron Device Letters. 2025. V. 46, no. 5. P. 848–851.
59. Zhou P., Niu L., Hayat A., Fengzhao C., Tianrui Z., Xinping Z. *Operating characteristics of high-order distributed feedback polymer lasers* // Polymers. 2019. V. 11, no. 2. P. 258–267.
60. Can L., Zhang P., Xiang M., Ma X., Jiang C., Tang B., Lu Q., Guo W. *Continuous-wave operation of DFB laser diodes based on GaN using 10th-order laterally coupled surface gratings* // Optics Express. 2020. V. 45, no. 13. P. 3573–3576.
61. Kudryavtsev K. E., Rumyantsev V. V., Aleshkin V. Ya., Dubinov A. A., Utochkin V. V., Fadeev M. A., Mikhailov N. N., Alymov G., Svintsov D., Gavrilenko V. I., Morozov S. V. *Temperature limitations for stimulated emission in 3–4 μm range due to threshold and non-threshold Auger recombination in HgTe/CdHgTe quantum wells* // Applied Physics Letters. 2020. V. 117. Art. no. 083103.
62. Morozov S. V., Rumyantsev V. V., Fadeev M. A., Zholudev M. S., Kudryavtsev K. E., Antonov A. V., Kadykov A. M., Dubinov A. A., Mikhailov N. N., Dvoretzky S. A., Gavrilenko V. I. *Efficient long wavelength interband photoluminescence from HgCdTe epitaxial films at wavelengths up to 26 μm* // Applied Physics Letters. 2017. V. 111. Art. no. 192101.

ЕГОРОВА Екатерина Дмитриевна

**МУЛЬТИПЕРИОДИЧЕСКИЕ БРЭГГОВСКИЕ СТРУКТУРЫ
ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ МОЩНОГО КОГЕРЕНТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
МИКРОВОЛНОВОГО, ТЕРАГЕРЦОВОГО И ИНФРАКРАСНОГО
ДИАПАЗОНОВ**

Автореферат

Подписано к печати 22.06.2026 г.
Формат 60 × 90¹/₁₆. Усл. печ. л. 2,0.
Тираж 100 экз. Заказ № 18 (2026).

Отпечатано на ризографе в типографии Института прикладной физики
им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук, 603951, г. Нижний Новгород,
ул. Ульянова, 46