УТВЕРЖДАЮ

Ректор НГУ,
д.х.н., чл.-корр. РАН

_____ Пышный Д.В.

«07» сентября 2026 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ -
Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет»
на диссертационную работу Егоровой Екатерины Дмитриевны
«*Мультипериодические брэгговские структуры для генерации мощного пространственно-когерентного излучения микроволнового, терагерцевого и инфракрасного диапазонов*»,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
по специальности 1.3.4 – радиофизика

Актуальность. Создание импульсных источников когерентного электромагнитного излучения с уровнем мощности ~ 1 - 10^3 МВт в субтерагерцовом и терагерцовом диапазоне частот является важной задачей современной электроники больших мощностей (освоение так называемого «терагерцового провала»). Потребность в таких источниках обусловлена широким кругом фундаментальных задач и инженерных приложений, включая разработку высокоградиентных ускорителей нового поколения и компактных рентгеновских ЛСЭ комптоновского типа, развитие систем безопасности и противодействия терроризму (связанных с визуализацией скрытых объектов, обнаружения и дистанционного уничтожения террористических угроз), создание высокоскоростных беспроводных систем связи, систем мониторинга космических объектов (с использованием атмосферных «окон прозрачности»), систем локации с высоким временным и пространственным разрешением и другие радиотехнические приложения.

Диссертационная работа Егоровой Екатерины Дмитриевны посвящена актуальным проблемам разработки широкого класса мощных импульсных генераторов, работающих в суб-ТГц/ТГц диапазонах, включая лазеры/мазеры на свободных электронах (ЛСЭ/МСЭ), релятивистские черенковские

генераторы поверхностной волны, а также гетеролазеры инфракрасного диапазона. Ключевым связующим элементом работы является исследование возможности использования в указанных классах генераторов электродинамических систем на основе нового типа брэгговских структур с мультипериодической гофрировкой с целью увеличения эффективности электронно-волнового взаимодействия, выходной мощности и стабильности узкополосного режима генерации.

Научная новизна. В диссертации получен ряд новых результатов, среди которых наиболее важными представляются следующие:

1. Предложены брэгговские структуры с мультипериодической гофрировкой и исследована возможность их использования в качестве высокоселективных резонаторов, реализующих механизм «трехмерной» обратной связи в МСЭ-генераторах, в качестве замедляющих систем в планарных черенковских генераторах поверхностной волны для организации поперечного вывода излучения, а также в качестве электродинамических систем квантово-каскадных гетеролазеров на основе КРТ(кадмий-ртуть-теллур)-структур для реализации вывода излучения под углом к их поверхности.
2. Проведен теоретический анализ и моделирование пространственно-развитых релятивистских генераторов с использованием предложенных электродинамических систем и на этой основе разработаны проекты на базе существующих ускорительных комплексов, обеспечивающие достижение рекордных уровней мощности импульсного излучения в микроволновом, субтерагерцовом и терагерцовом диапазонах.
3. 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.

Научная и практическая значимость. 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 использованы для создания мощных узкополосных генераторов суб-ТГц/ТГц диапазона с уникальными параметрами излучения. Данные генераторы перспективны для использования в ряде фундаментальных и инженерных приложений.

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка цитированной литературы (143 наименования), списка авторских публикаций (34 наименования, в том числе 10 публикаций в рецензируемых журналах) и 1 приложение. Общий объем работы составляет 129 страниц и включает 61 рисунок и 2 таблицы.

Во **введении** обоснованы актуальность темы диссертации, кратко изложены цели и задачи, научная новизна и практическая значимость работы, степень достоверности и апробация результатов, личный вклад автора, положения, выносимые на защиту, а также структура, объем и краткое содержание диссертации.

Первая глава диссертации посвящена разработке нового типа планарных резонаторов брэгговского типа, основанных на трехмерном рассеянии волновых потоков - так называемых «трехмерных» (3D) брэгговских резонаторов. Развиты теоретические модели для описания данных резонаторов с использованием метода связанных волн. В рамках теоретического анализа, подтвержденного численным моделированием на основе кода *CST Microwave Studio*, исследованы электродинамические характеристики данных резонаторов и продемонстрированы высокие селективные свойства в условиях, когда их поперечные размеры существенно превышают длину волны излучения λ по всем трем пространственным координатам. 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. Проведены «холодные» электродинамические тесты 3D брэгговских структур в диапазоне 75 ГГц, показано хорошее соответствие экспериментальных данных, результатов теоретического анализа и моделирования.

Исследована возможность использования предложенных резонаторов для создания мощных пространственно-развитых МСЭ на базе интенсивных ленточных релятивистских электронных пучков (РЭП). Проведено моделирование и оптимизация параметров различных схем МСЭ-генераторов с резонаторами нового тип. Разработан проект сверхмощного МСЭ W-диапазона (рабочая частота ~ 75 ГГц) на базе ленточных РЭП, формируемых на ускорительном комплексе «У-2» в ИЯФ СО РАН (Новосибирск). В рамках проведенной оценки параметров и моделирования показана возможность достижения в данном МСЭ экстремально высокого уровня выходного излучения
~ 10 - 15 ГВт при рекордных поперечных размерах системы, достигающих до $10\lambda \times 400\lambda$.

Во **второй главе** проведено исследование нового типа замедляющих систем для черенковских генераторов поверхностной волны (ГПВ) 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. На основе развитой квазиоптической модели метода связанных волн и трехмерного моделирования проведен анализ электродинамических

свойств, предложенных мультипериодических замедляющих систем, прослежена их аналогия с 3D брэгговскими структурами. 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 около 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).

Третья глава посвящена разработке электродинамической системы для РОС - гетеролазеров, которая позволяет осуществить вывод генерируемого излучения под углом к поверхности структуры. По сравнению с «традиционными» схемами предлагаемые структуры позволяют минимизировать отражения от торцов структуры, приводящие к образованию «паразитных» высокодобротных мод и срыву генерации, а также обеспечить равномерную инверсию населенности во всей активной области лазера. Проведен теоретический анализ электродинамических характеристик брэгговских структур данного типа и их прямое численное моделирование. Разработан проект КРТ-гетеролазера с длиной волны 14 мкм, позволяющей обеспечить вывод до 40% мощности генерируемого излучения на третьей гармонике гофрировки под углом 20° к его поверхности. Изготовлены экспериментальные образцы и проведены измерения в ИФМ РАН (Нижний Новгород), в которых продемонстрировано установление стабильной одномодовой генерации в разработанных гетеролазерах при использовании различных типов накачки. Также измеренный в эксперименте угол вывода излучения совпадает с рассчитанным аналитически, что подтверждает результаты аналитической модели и численного моделирования.

В **заключении** приводятся основные результаты диссертации.

По материалам диссертационной работы имеется ряд замечаний и вопросов, в частности:

1. В главе 1 исследованы 3D брэгговские резонаторы, основанные на трехмерном рассеянии волновых потоков, планарной геометрии. Почему выбрана такая геометрия и возможна ли реализация подобных резонаторов другой геометрии, например, цилиндрической? Очевидно, резонаторы данной геометрии представляют перспективу для создания генераторов на базе электронных пучков трубчатой и нитевидной конфигурации, которые формируются широким классом современных сильноточных ускорителей?
2. В работе возможность использования 3D брэгговских структур исследована в мазерах (лазерах) на свободных электронах. Каковы перспективы применения резонаторов данного типа в других типах релятивистских генераторов?

3. В разделе 1.4 обсуждается проект планарного МСЭ-генератора с 3D брэгговским резонатором на базе ускорителя У-2, способный обеспечить сверхвысокую мощность выходного излучения на уровне ~ 10 - 20 ГВт. Однако при этом не приводятся напряженности ВЧ-полей в генераторе. Очевидно, данный вопрос требует дополнительного анализа.
4. В главе 3 моделирование РОС-лазера с предложенной электродинамической структурой проводилось в рамках 2D - модели, в которой структура считалась бесконечной по поперечной координате *x*. Необходимо привести пояснения, когда применима данная модель, и когда нужно использовать 3D - модель для расчета подобных систем?
5. В разделе 3.3 описаны экспериментальные исследования РОС-гетеролазера на основе разработанных КРТ-структур. При изготовлении данных структур используется достаточно сложная технология изготовления. Какова точность изготовления указанных структур и как это исследовалось в расчетах (в частности, отличие профиля гофрировки от «идеального»)?

Вместе с тем отметим, что указанные замечания не снижают общую высокую оценку диссертационной работы Е.Д. Егоровой и носят скорее характер пожеланий для дальнейшего развития исследований. Работа выполнена на высоком содержательном уровне, выводы и научные положения диссертационной работы представляются достоверными и обоснованными. Полученные результаты, безусловно, имеют важное фундаментальное и прикладное значение и могут быть использованы для дальнейших исследований в ряде академических и других профильных организаций, в том числе, занимающихся практическими разработками.

Заключение

Диссертационная работа представляет собой законченный научный труд, основные положения диссертации в достаточной мере нашли отражение в печатных работах Е.Д. Егоровой, опубликованных в ведущих рецензируемых российских и зарубежных научных журналах. Работа прошла апробацию на всероссийских и международных конференциях. Автореферат работы и публикации Е.Д. Егоровой достаточно полно передают содержание и основные выводы работы.

Таким образом, диссертационная работа Егоровой Екатерины Дмитриевны соответствует всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям согласно Постановлению Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842 (действует с 01.01.2014) «О порядке присуждения ученых степеней», а сам автор, безусловно, заслуживает присуждения искомой ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4 - радиофизика.

Отзыв составил:
д.ф.-м.н., доцент кафедры Физики Ускорителей НГУ
Левичев Алексей Евгеньевич

«4» сентября 2026 г.

Я, Левичев Алексей Евгеньевич даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

/ А.Е. Левичев /
«4» сентября 2026 г.

Результаты диссертационной работы Е.Д. Егоровой были представлены и обсуждены на объединённом семинаре кафедр Физики Ускорителей и Физики Плазмы Физического факультета Новосибирского государственного университета 01 сентября 2026 года (630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева 11). Отзыв утвержден на заседании кафедр: протокол №1 от 01.09.2026 (кафедра Физики Ускорителей) и №171 от 02.09.2026 (кафедра Физики Плазмы).

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет»;
630090 г. Новосибирск, ул. Пирогова 2;
тел.: +7 (383) 363-40-00;
факс: +7 (383) 363-42-80;
e-mail: rector@nsu.ru;
сайт: www.nsu.ru

Подпись Левичева Алексея Евгеньевича удостоверяю.

Ученый секретарь НГУ,
к.х.н.
Е.А. Тарабан

«07» сентября 2026 г.