ОТЗЫВ

официального оппонента Рыскина Никиты Михайловича
на диссертационную работу Егоровой Екатерины Дмитриевны
«Мультипериодические брэгговские структуры для генерации мощного пространственно-когерентного излучения микроволнового, терагерцового и инфракрасного диапазонов» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4. Радиофизика

Одной из наиболее значительных проблем современной радиофизики является освоение коротковолновой части миллиметрового и субмиллиметрового (терагерцевого) диапазонов. Импульсные источники когерентного излучения с высокой мощностью (десятки–сотни мегаватт) в этих диапазонах могут представлять интерес для различных приложений, включая ускорительную технику, накачку рентгеновских лазеров на свободных электронах (ЛСЭ), системы дистанционного контроля, диагностику плазмы. Однако повышение мощности при продвижении в высокочастотные диапазоны как правило требует использования сверхразмерных электродинамических структур. В связи с этим особое внимание привлекают приборы вакуумной электроники с планарной геометрией, использующие пространственно-развитые релятивистские ленточные электронные потоки. Однако в таких приборах обостряется проблема обеспечения пространственной когерентности генерируемого излучения. Таким образом, актуальность и научная значимость диссертации Е.Д. Егоровой, в которой для улучшения селекции мод развивается подход, основанный на использовании мультипериодических брэгговских структур, не вызывает сомнений.

В диссертации предложены новые мультипериодические брэгговские структуры для решения различных задач. В главе 1 анализируются планарные мазеры на свободных электронах (МСЭ). Для подобных приборов ранее были разработаны структуры в виде планарных резонаторов с одномерной и двумерной гофрировкой, реализующие принцип распределенной обратной связи (РОС). В диссертации предложены структуры с двоякопериодической гофрировкой, что позволяет реализовать связь бегущих в двух направлениях волновых потоков и квазикритической волны, которая представляет собой стоячую волну между пластинами планарного волновода с несколькими

вариациями в вертикальном направлении (брэгговские 3D резонаторы). Развиты методы теоретического анализа подобных структур и разработаны конструкции резонаторов различных диапазонов (вплоть до 600 ГГц). На основе этих электродинамических структур разработаны и исследованы конструкции МСЭ-генераторов W-диапазона (75 ГГц) с рекордной сверхразмерностью (300-400 длин волн). Согласно численному моделированию, в них можно обеспечить выходную мощность 10-15 ГВт при использовании односекционного 3D резонатора и до 20 ГВт в структуре с комбинированным (1D–3D) резонатором.

Во второй главе развиваются мультипериодические брэгговские структуры для черенковских генераторов поверхностной волны (ГПВ). Предложена структура с одномерной двоякопериодической гофрировкой, которая обеспечивает связь волн, распространяющихся вдоль структуры и по нормали к ней, что позволяет осуществить вывод энергии в вертикальном направлении. В ГПВ с такой структурой можно получить выходную мощность ~70 МВт при КПД около 25% в диапазоне 150 ГГц. Также разработана структура с 2D периодической гофрировкой, имеющая высокую сверхразмерность (~ 60λ). Показано, что на ее основе можно реализовать ГПВ диапазона 300 ГГц с электронным КПД ~ 17%.

Подчеркнем, что при анализе выходных характеристик генераторов автор ориентируется на параметры существующих источников сильноточных ленточных электронных пучков: в случае МСЭ — это ускоритель У-2 в ИЯФ СО РАН (г. Новосибирск), в случае черенковского ГПВ — ускоритель «Синуки» в ИПФ РАН. Таким образом, вероятность физической реализации генераторов представляется достаточно высокой.

Наконец, в 3-й главе развиваемый в диссертации подход используется для улучшения характеристик твердотельного гетеролазера инфракрасного диапазона. Исследование проводится на примере гетероструктуры кадмий-ртуть-теллур (КРТ) с длиной волны генерации 14 мкм. Предложено нанесение гофрировки на поверхность гетероструктры для вывода излучения под углом к ее поверхности, что минимизирует паразитные отражения от торцов. В ходе исследования электродинамических характеристик найдены параметры гофрировки, позволяющие выводить излучение под желаемым углом. Моделирование на основе самосогласованных уравнений типа Максвелла–

Блоха показывает установление одночастотного стационарного режима генерации. Также представлены результаты экспериментальных исследований прототипа КРТ-гетеролазера, изготовленного в ИФМ РАН. Измерения диаграммы направленности выходного излучения достаточно хорошо согласуются с теоретическими результатами.

Во всех трех главах автором развиты «квазиоптические» модели на основе теории связанных волн, описывающие динамику медленно меняющихся амплитуд взаимодействующий волн. Электродинамические свойства исследуются путем теоретического анализа на основе этих моделей, а также сопоставляются с результатами численного моделирования, в том числе, с помощью мощного и универсального пакета CST. Моделирование процессов электронно-волнового взаимодействия также осуществляется как на основе уравнений для медленно меняющихся амплитуд, так и с помощью трехмерного PIC моделирования. Хорошее соответствие результатов, полученных на основе различных подходов, а также сравнение с результатами экспериментов свидетельствуют о достоверности представленных результатов и подтверждают обоснованность защищаемых положений.

Однако диссертация имеет ряд недостатков, по поводу которых можно сделать следующие замечания:

1) Основные уравнения, описывающие динамику полей в брэгговских структурах, везде даются без вывода. Автор ограничивается ссылками на предшествующие работы. Однако в диссертации рассматриваются нетривиальные структуры, отличающиеся от известных из литературы. Учитывая это, считаю, что было бы методически правильно привести подробный вывод основных уравнений.

2) Недостаточно описаны особенности моделирования в пакете CST. Моделирование структур со столь высокой сверхразмерностью, которые имеют несколько характерных масштабов, отличающихся на порядки, представляет собой нетривиальную задачу. Однако в диссертации отсутствует обсуждение численных параметров, при которых обеспечивается необходимая точность моделирования. Не указано, каким образом вычислялся электронный КПД; как производилось вычисление мощности в случае открытой структуры. Также ничего не говорится о том, как задавались начальные условия для частиц электронного пучка: учитывался ли начальный

разброс по скоростям и углам, неоднородность распределения плотности тока по сечению пучка.

3) При расчете омических потерь выбирается значение проводимости чистой меди $5 \cdot 10^7$ См/м (по крайней мере, так указано в разделе 1.1 на стр. 28; в остальных разделах значение проводимости не приводится). Однако при моделировании устройств суб-ТГц и ТГц диапазонов это значение как правило уменьшают в 2–3 раза, в зависимости от частоты и шероховатости поверхности. Обсуждение этого вопроса в диссертации отсутствует.

4) При описании экспериментальных исследований брэгговской структуры в разделе 1.1.5 утверждается, что используемая технология 3D-печати имеет погрешность не хуже 1 мкм (стр. 43). Однако представляется, что эта погрешность определяется размерам вокселя 3D принтера, которые скорее всего значительно больше 1 мкм (информация об используемом оборудовании и его характеристиках в диссертации не приводится). Кроме того, чтобы напечатать регулярную периодическую структуру больших размеров, необходимо, чтобы латеральные размеры были кратны размерам вокселя. Этот вопрос в диссертации не обсуждается. Не приводятся результаты микроскопического и морфологического анализа изготовленной структуры, которые подтвердили бы качество её изготовления. Недостаточно комментируется сопоставление экспериментальных результатов и моделирования, просто утверждается, что они хорошо согласуются.

5) В п. 1.4.3 представлена система вывода излучения в виде рупора. Отсутствует какое-либо обсуждение принципов, на основе которых осуществлялась разработка конструкции этой системы.

6) На рис. 2.9 представлена схема магнитной системы, которая позволяет осуществить вывод энергии в вертикальном направлении. Однако какая-либо конкретная информация об этой магнитной системе отсутствует. Утверждается (стр. 83): «Моделирование показывает, что использование дополнительных корректирующих катушек и ферромагнитных вставок позволяет в данной конфигурации сформировать профиль магнитного поля, достаточно однородный для обеспечения транспортировки ленточного электронного пучка через пространство взаимодействия …». Однако никаких результатов, подтверждающих это утверждение, не приводится.

7) В разделе 2.3.2 говорится, что производилась оптимизация геометрии гофрировки (стр. 86). Нет никакой информации о том, как проводилась эта оптимизация (простым перебором параметров, с помощью каких-либо известных методов оптимизации, с помощью встроенных средств оптимизации пакета CST или как-либо еще). Отсутствуют какие-либо подтверждения того, что геометрия действительно является оптимальной.

8) В разделе 3.2 утверждается: «Результаты моделирования уравнений (3.15) … демонстрируют широкую область параметров, при которых лазер работает в одночастотном одномодовом режиме». Неясно, на основе чего сделан этот вывод, поскольку в диссертации представлен результат моделирования лишь для единственного набора параметров (рис. 3.7).

9) Формулировки в разделе «Заключение» скорее характеризуют описание проделанной работы, а не полученные результаты.

Однако отмеченные недостатки касаются не столько существа полученных в диссертации результатов, сколько характера изложения, и не снижают общей положительной оценки работы.

Оценивая диссертацию Е.Д. Егоровой в целом, можно заключить, что она является законченной научно-квалификационной работой, в которой представлен большой объем интересных и оригинальных исследований. Материал диссертации представляет несомненный интерес для широкого круга исследователей, работающих в различных областях, таких как распространение волн в периодических средах, вакуумная СВЧ электроника больших мощностей, твердотельная электроника. Самостоятельность и оригинальность исследования не вызывают сомнений. Также не вызывает сомнений личный вклад автора, который довольно подробно обоснован в диссертации. Результаты диссертации обладают новизной, научной и практической значимостью, основные выводы и положения, выносимые на защиту, представляются обоснованными и достоверными. Содержание диссертации в полной мере соответствует специальности 1.3.4. Радиофизика. Автореферат адекватно отражает содержание диссертации.

Результаты диссертации широко опубликованы, включая большое количество статей в авторитетных российских и зарубежных научных изданиях, таких как IEEE Electron Device Letters, Physical Review Applied, Изв. вузов. Радиофизика, Физика и техника полупроводников, Письма в ЖТФ и др. Работа также прошла широкую апробацию, в том числе, на крупных

международных конференциях. Получен патент на изобретение. Отмечу, что работа научного коллектива, в состав которого входила Е.Д. Егорова, был удостоен медали РАН для молодых ученых.

Таким образом, диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям пп. 9–11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней» (утверждено постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г.), предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор Егорова Екатерина Дмитриевна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4. Радиофизика.

Официальный оппонент:
Рыскин Никита Михайлович
д.ф.-м.н. (01.04.03 и 01.04.04), профессор, главный научный сотрудник лаборатории вакуумной микро- и наноэлектроники (СФ-1),
Саратовский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН
410019, г. Саратов, ул. Зеленая, 38.
e-mail: ryskin_sb@cplire.ru
Тел. 8(8452)391225

Выражаю свое согласие на обработку моих персональных данных и включение их в аттестационные документы соискателя учёной степени кандидата физико-математических наук Егоровой Е.Д.

«03» сентября 2026 г.

Подпись Рыскина Н.М. заверяю:

Заместитель директора по научной работе
СФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН,
к.ф.-м.н. Д.В. Фатеев