В диссертационный совет 24.1.238.02
при ФИЦ ИПФ им. А. В. Гапонова-Грехова
Российской академии наук

Отзыв
официального оппонента

о диссертационной работе Разовой Анны Александровны "Лазерная генерация в волноводных гетероструктурах с квантовыми ямами на основе HgCdTe в среднем инфракрасном диапазоне", представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальностям 2.2.2 – Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств и 1.3.19 – Лазерная физика.

Актуальность темы исследования. Расширение спектрального диапазона источников излучения продолжает оставаться важной задачей. В полной мере это относится к полупроводниковым лазерам. Физика и технология полупроводниковых источников стимулированного излучения ближнего инфракрасного диапазона в настоящее время находятся на довольно высоком уровне. В то же время, спектральные диапазоны "атмосферных окон" 3–5 и 8–14 мкм остаются не до конца охваченными доступными и эффективными источниками излучения. В последние годы также возрос интерес к длинноволновому спектральному диапазону с длинами волн излучения более 20 мкм. Область применений такого излучения довольно обширна, однако пригодные для практических применений полупроводниковые лазеры практически отсутствуют, что не в последнюю очередь связано с ограничениями в использовании хорошо известных каскадных лазеров из-за сильного решеточного поглощения в соединениях A3B5, которые активно в них используются. Все это обуславливает интерес к "обычным" полупроводниковым лазерам на межзонных переходах электронов. Как показали исследования, проведенные в научной группе, к которой принадлежит диссертант, достичь существенного продвижения в длинноволновый спектральный диапазон позволяет использование в активной области твердого раствора кадмий-ртуть-теллур (КРТ) и наноструктур с квантовыми ямами на его основе. Существенным фактором является развитая к настоящему времени технология выращивания совершенных структур такого типа в ИФП им. А.В. Ржанова СО РАН. Работа А.А Разовой посвящена исследованию особенностей стимулированного и лазерного излучения в длинноволновых областях ИК спектра с длиной волны 3–5 и более 20 мкм, включающему оптимизацию параметров, используемых для лазерной генерации оптических резонаторов. С учетом вышесказанного тема диссертационной работы, несомненно, является актуальной, а сама работа представляется необходимой и своевременной.

Новизна и достоверность результатов. Исследования проводились в двух спектральных диапазонах: 3–5 и около 20 мкм. В работе получено значительное число новых научных результатов. Укажем лишь некоторые из них, по нашему мнению, наиболее важные и интересные.

1. Основная часть работы посвящена оптическим исследованиям стимулированного и лазерного излучения из структур КРТ различных типов, однако, поскольку для получения стимулированного излучения впервые были использованы микродисковые и торцевые гребенчатые лазеры, значительное внимание в работе было уделено отработке технологии формирования мезаструктур. В результате оптимизации процессов формирования мезаструктур с помощью ионного травления, что особенно важно дли структур длинноволнового диапазона, удалось создать микродисковые и торцевые гребенчатые лазеры с рекордными характеристиками.

2. Стимулированное излучение из структур КРТ с длиной волны до 31 мкм было получено ранее другими авторами, однако только в импульсном режиме возбуждения. В настоящей работе в результате оптимизации дизайна структуры удалось получить стимулированное излучение в квазинепрерывном режиме с невысокой пороговой плотностью мощности 2 Вт/см^2 при температуре 8 К на длине волны около 24 мкм.

3. Лазерные резонаторы на модах шепчущей галереи уже продемонстрировали свои возможности на других материалах. В работе А.А. Разовой впервые такие резонаторы были изготовлены и использованы для лазерной генерации в структурах с твердыми растворами КРТ. Впервые была получена лазерная генерация в микродисковых резонаторах с квантовыми ямами на основе КРТ в диапазоне 3–5 мкм при температурах, достижимых при термоэлектрическом охлаждении.

4. В микродисковых лазерах на основе КРТ впервые получено лазерное излучение на модах шепчущей галереи в области 20 – 26 мкм при криогенных температурах.

5. Наряду с получением рекордных характеристик лазерного и стимулированного излучения в структурах на основе КРТ в работе изучены различные явления, влияющие на характеристики лазеров. Так, например, показано, что максимальная температура генерации лазерного излучения диапазона 3–5 мкм в микродисках определяется оптическими потерями на вывод излучения, а не безызлучательной оже-рекомбинацией. При увеличении глубины травления продемонстрировано увеличение эффективности безызлучательных процессов рекомбинации через дефектные центры на боковой поверхности мезы, возникшие в результате ионного травления.

Достоверность основных результатов работы не вызывает сомнений. Используются современные высокоточные экспериментальные методики и экспериментальные образцы высокого качества. Результаты расчетов, проведенные другими авторами, хорошо согласуются с результатами экспериментов и служат подтверждением используемых моделей. Результаты работы опубликованы в высокорейтинговых рецензируемых изданиях и докладывались на международных конференциях.

Научная и практическая значимость работы высока и несомненна. Она частично отражена в предыдущих разделах отзыва. Дополнительно хотелось бы отметить полученное автором в квазинепрерывном режиме стимулированное излучение с длиной волны 24 мкм. Реализация такого режима, несомненно, стимулирует практическое использование источников излучения. В работе делаются оценки возможности увеличения длины волны стимулированного излучения в диапазоне 33–50 мкм, даются соответствующие практические рекомендации. Несомненную ценность имеют исследования оптических свойств и процессов рекомбинации в наноструктурах с квантовыми ямами на основе твёрдого раствора КРТ в длинноволновом инфракрасном диапазоне.

Замечания

1. Пороговая плотность мощности оптической накачки, полученная при исследовании лазерного излучения в структурах с микродисками в области длин волн излучения около 4 мкм и температурах менее 190 К, составила 50 кВт/см^2. В диссертации утверждается, что такая плотность мощности при токовом возбуждении соответствует плотности тока 500 А/см^2. Насколько корректно сравнивать пороговые характеристики для оптического и токового режимов возбуждения, учитывая, что структуры для токовой накачки содержат дополнительные легированные слои, увеличивающие потери?

2. В работе исследовались микродисковые лазеры, изготовленные из одной и той же структуры 190422, но с использованием различных технологий фотолитографии: с использованием маски и при лазерной засветке фоторезиста. В чем причина заметного различия длин волн генерации лазеров, изготовленных по различным технологиям (таблица 2.1)?

3. Можно ли говорить о лазерном излучении из торцевых гребенчатых лазеров (спектр излучения приведен на рис. 2.20), учитывая, что резонатор Фабри-Перо в таких лазерах не формируется из-за значительного наклона торцевых стенок гребня (рис. 2.4)?

Высказанные замечания носят уточняющий характер и не ставят под сомнение полученные научные результаты и общую высокую оценку выполненного диссертационного исследования.

Оценивая диссертацию в целом, следует отметить ее внутреннюю согласованность, высокий научно-методический уровень выполнения работы, большой объем проведенных исследований, новизну полученных результатов. Работа является цельным и законченным исследованием. Выполненные в диссертации исследования убедительно мотивированы, представлены оригинальные научные результаты, показана их прикладная ценность, а также обеспечена надёжность и обоснованность выводов. Автореферат и опубликованные статьи правильно и достаточно полно отражают содержание диссертации. Объём проведённых исследований и степень личного участия автора в получении

ключевых результатов соответствуют всем предъявляемым к кандидатской диссертации критериям.

Считаю, что диссертационная работа Разовой Анны Александровны "Лазерная генерация в волноводных гетероструктурах с квантовыми ямами на основе HgCdTe в среднем инфракрасном диапазоне" отвечает всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук (Положение о присуждении ученых степеней, утвержденное Постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24.09.2013), а она сама, несомненно, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальностям 2.2.2 – Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств и 1.3.19 – Лазерная физика.

Профессор Высшей инженерно-физической школы
Института электроники и телекоммуникаций
С.-Петербургского политехнического университета Петра Великого,
профессор, доктор физ.-мат. наук,
специальность 01.04.10 - физика полупроводников и диэлектриков

Дмитрий Анатольевич Фирсов

Согласен на обработку персональных данных Д.А.Фирсов

09.11.2026

Контактные данные:
Санкт Петербургский политехнический университет Петра Великого.
Адрес: 195251 Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.
E-mail: firsov.da@spbstu.ru.
Тел.: +7-921-798-8231.