



**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**  
федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение  
высшего образования  
«Санкт-Петербургский политехнический  
университет Петра Великого»  
(ФГАОУ ВО «СПбПУ»)

В диссертационный совет  
24.1.238.02  
при ФИЦ ИПФ РАН

### **Отзыв**

официального оппонента, доктора физико-математических наук, профессора, профессора Высшей инженерно-физической школы Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого Фирсова Дмитрия Анатольевича на диссертационную работу **Уточкина Владимира Васильевича** "Генерация излучения среднего ИК-диапазона в гетероструктурах с квантовыми ямами на основе HgCdTe", представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 2.2.2 - Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств

Актуальность. Расширение рабочего спектрального диапазона полупроводниковых источников излучения всегда вызывало большой интерес как с точки зрения фундаментальной науки, так и для практических применений. В настоящее время физика и технология полупроводниковых лазеров ближнего инфракрасного диапазона находятся на довольно высоком уровне. Важной задачей остается расширение спектрального диапазона полупроводниковых источников излучения в диапазон более длинных волн. Область использования источников излучения среднего и дальнего инфракрасного диапазонов весьма широка и включает, например, спектроскопию, мониторинг окружающей среды, диагностику, связь в окнах прозрачности атмосферы, медицину и пр. В длинноволновом спектральном диапазоне можно выделить такие важные области, как окно прозрачности атмосферы 3–5 мкм и терагерцовый диапазон 20–55 мкм, особенно сложный для создания эффективных источников. Развитие технологии и результаты проведенных исследований свидетельствуют о перспективности создания источников длинноволнового излучения в этих диапазонах на основе твердых растворов кадмий-ртуть-теллур (КРТ). Особый интерес вызывает использование структур с квантовыми ямами на основе этих твердых растворов, поскольку в этом случае существенно расширяются возможности управления зонным спектром и излучательными характеристиками источников. В настоящей работе исследуются структуры с квантовыми ямами HgCdTe/CdHgTe, позволяющие получать стимулированное излучение в диапазонах 2.5–5 и 25–31 мкм и лазерную генерацию диапазона 9 мкм.

Опираясь на вышеизложенное, можно сделать вывод о несомненной актуальности темы диссертационной работы.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы и списка публикаций

автора. Диссертация содержит 142 страницы текста, 60 рисунков, список литературы из 159 наименований и список 11 публикаций автора.

Новизна результатов. В работе получено значительное количество новых важных научных результатов. Приведу лишь некоторые из них, представляющиеся мне наиболее важными и интересными.

Полученные результаты по исследованию стимулированного и лазерного излучения в структурах с квантовыми ямами HgCdTe/CdHgTe можно разделить на три группы. Это исследование стимулированного излучения в диапазоне 10–31 мкм, исследование стимулированного излучения в диапазоне прозрачности атмосферы 3–5 мкм при повышенных температурах и спектроскопия лазерного излучения в гребенчатых волноводах с торцевыми резонаторами Фабри-Перо. Для каждого из этих направлений в работе была проведена оптимизация параметров исследуемых гетероструктур.

#### 1. Диапазон 10–31 мкм.

При исследовании длинноволнового излучения впервые получено стимулированное излучение при непрерывном оптическом возбуждении в диапазоне длин волн 10.3–14 мкм. Рекордные результаты удалось получить за счет использования относительно широких квантовых ям, что снизило влияние флуктуаций ширины ямы на уширение спектра усиления.

Разработан и реализован оригинальный дизайн диэлектрического волновода, обеспечивающий уменьшение модовых потерь. Это позволило на порядок уменьшить пороговые мощности и получить стимулированное излучение на длинах волн 26–27 мкм.

За счет оптимизации гетероструктур (снижение доли кадмия) удалось существенно повысить пороговую энергию оже-рекомбинации, что подавляет нежелательный разогрев носителей заряда, и добиться рабочей температуры около 100 К, т.е. выше температуры жидкого азота.

#### 2. Диапазон 3–5 мкм

Впервые получено стимулированное излучение на длинах волн до 2.75 мкм при комнатной температуре и импульсной накачке.

Выполнен анализ влияния числа КЯ в активной области на максимальную температуру генерации. Показано, что оптимальное число КЯ лежит в диапазоне 15–30.

#### 3. Лазерное излучение в волноводах с резонаторами Фабри-Перо.

Описанные выше результаты были получены в условиях однопроходовой генерации. Это несомненно отрицательным образом влияет на характеристики стимулированного излучения. В работе удалось продвинуться по пути создания лазерного источника с высокой добротностью получить узкие лазерные линии в диапазоне около 9 мкм с  $\Delta\lambda/\lambda \sim 10^{-4}$ . Резонатор Фабри-Перо был сформирован методом ионного травления.

Достоверность основных результатов работы не вызывает сомнений. Используются современные высокоточные экспериментальные методики и хорошо отработанные технологические подходы к изготовлению структур. Следует особо отметить согласие экспериментальных результатов с результатами расчетов и литературными данными (в тех случаях, когда подобные данные имелись), что также

подтверждает правильность основных выводов работы, а также высокий уровень научных журналов, в которых опубликованы результаты работы.

Научная и практическая значимость работы высока и несомненна. Она частично отражена в предыдущих разделах отзыва. Получена новая информация об оптических свойствах наноструктур на основе CdHgTe. Большое практическое значение имеют результаты по увеличению длины волны и увеличению рабочей температуры источников стимулированного излучения, позволяющие существенно расширить область их применения.

#### Замечания и вопросы.

1. При исследовании стимулированного излучения на длине волны около 10 мкм (рис. 2.4) были получены отличающиеся на два порядка пороговые энергии начала генерации при импульсном и непрерывном возбуждении. Видимо, некорректно в данном случае сравнивать импульсное и непрерывное возбуждение, поскольку использовались лазеры с разной длиной волны, однако все же в чем причина такого различия? Автор указывает, что различное поглощение возбуждающего излучения не может привести к столь большому различию.

2. При обсуждении разогрева электронов при оже-рекомбинации в разделе 2.5 на стр. 71 не учитывается рассеяние электронов на решетке, т.е. считается, что вся избыточная энергия электрона передается в электронную подсистему. Корректно ли это?

3. Из положения 3, выносимого на защиту, не ясно, при каких длинах волн наблюдается генерация: больше или меньше, чем 2.75 мкм.

4. В формуле (10), описывающей порог генерации, отсутствует фактор ограничения  $\Gamma$ .

Указанные замечания не являются принципиальными и не влияют на общую высокую оценку работы.

Оценивая диссертацию в целом, следует отметить высокий научно-методический уровень выполнения работы, внимание автора к деталям эксперимента, большой объем проведенных экспериментальных исследований на структурах различных типов, новизну полученных результатов. Работа является цельным и законченным исследованием. Несомненно, эта работа открывает дальнейшие перспективы разработки оптоэлектронных приборов и расширения спектра генерации полупроводниковых лазеров на основе твердых растворов CdHgTe в длинноволновую область.

Диссертация имеет четкую структуру, основные результаты четко сформулированы и опубликованы в ведущих научных журналах. Автореферат и опубликованные статьи правильно и достаточно полно отражают содержание диссертации. Результаты работы были представлены на ведущих российских и международных конференциях.

Таким образом, диссертация Уточкина Владимира Васильевича является законченной научно-исследовательской работой, выполненной на актуальную для современной физики полупроводников тему, и полностью удовлетворяет требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (Положение о присуждении ученых

степеней, утвержденное Постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013, ред. от 25.01.2024), а он сам несомненно заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 2.2.2 «Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств».

Профессор Высшей инженерно-физической школы,  
профессор, доктор физ.-мат. наук

Дмитрий Анатольевич Фирсов

02.09.2024

Согласен на обработку персональных данных

Д.А.Фирсов

02.09.2024

Контактные данные:

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Адрес: 195251 Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29

E-mail: dmfir@rphf.spbstu.ru

Тел.: +7-921-798-8231

