

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.238.02,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
БЮДЖЕТНОГО НАУЧНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ «ФЕДЕРАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИКИ
ИМ.А.В. ГАПОНОВА-ГРЕХОВА РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»
МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ, ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ
КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 03.10.2024 № 11

О Присуждении Уточкину Владимиру Васильевичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Генерация излучения среднего ИК-диапазона в гетероструктурах с квантовыми ямами на основе HgCdTe» по специальности 2.2.2 — Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств – принята к защите 15 июля 2024 г. (протокол заседания №6) диссертационным советом 24.1.238.02, созданным на базе Федерального государственного бюджетного научного учреждения (ФГБНУ) «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, 603950 г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46, приказ о создании диссертационного совета номер 670/нк от 30 июня 2017 года.

Соискатель Уточкин Владимир Васильевич, 1997 года рождения, в 2020 году окончил Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» по направлению «Физика», освоил программу подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре ИФМ РАН (срок обучения 01.09.2020 –

31.08.2024), работает в должности младшего научного сотрудника Института физики микроструктур РАН – филиала Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» (ИФМ РАН).

Диссертация выполнена в отделе физики полупроводников Института физики микроструктур РАН – филиала Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» (ИФМ РАН).

Научный руководитель – Морозов Сергей Вячеславович, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией физики полупроводниковых гетероструктур и сверхрешёток отдела физики полупроводников Института физики микроструктур РАН – филиала Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук».

Официальные оппоненты:

1. Хохлов Дмитрий Ремович, доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, заведующий кафедрой физического факультета Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова.
2. Фирсов Дмитрий Анатольевич, профессор Высшей инженерно-физической школы Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН) – в своем **положительном отзыве**, составленном и подписанном кандидатом физико-математических наук, ведущим научным сотрудником лаборатории терагерцовой спектроскопии твёрдого тела ФИАН Митягиным Юрием Алексеевичем, и утвержденном Рябовым Владимиром Алексеевичем,

заместителем директора по научной работе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук, указала, что «К наиболее значимым новым результатам работы можно отнести следующие: Получено стимулированное излучение при непрерывной оптической накачке в узкозонных структурах с КЯ $\text{HgCdTe}/\text{CdHgTe}$ в диапазоне длин волн 10.3-14 мкм. Продемонстрировано, что в волноводных структурах с квантовыми ямами $\text{HgCdTe}/\text{CdHgTe}$ при понижении содержания Cd в квантовых ямах наблюдается увеличение пороговой энергии оже-рекомбинации, что подавляет нежелательный разогрев носителей заряда при большой разнице в энергии квантов накачки и стимулированного излучения и обеспечивает увеличение температуры генерации стимулированного излучения с 70-80 К до значений в 100 К и выше. За счет оптимизации конструкции диэлектрического волновода удалось существенно снизить уровень модовых потерь в диапазоне длин волн 20 - 30 мкм и получить стимулированное излучение на длинах волн 26-27 мкм. Получено стимулированное излучение при комнатной температуре в волноводной структуре с квантовыми ямами $\text{Hg}_{0.82}\text{Cd}_{0.18}\text{Te}/\text{Cd}_{0.6}\text{Hg}_{0.4}\text{Te}$ в диапазоне 2.65-2.75 мкм при внутриямном импульсном оптическом возбуждении. Разработано теоретическое описание процессов межзонной рекомбинации носителей заряда в гетероструктурах с множественными квантовыми ямами $\text{HgCdTe}/\text{CdHgTe}$, проведены оценки модовых потерь в структурах с длинами волн стимулированного излучения в диапазоне 3-5 мкм и, соответственно, оценки возможностей увеличения максимальной температуры генерации для структур с различным числом квантовых ям» В конце отзыва делается заключение, что диссертация Уточкина Владимира Васильевича полностью удовлетворяет требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (пункты 9-11,13,14 «Положения ВАК о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842 (в редакциях постановления Правительства РФ)), а он сам несомненно заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по

специальности 2.2.2 — Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств.

Соискатель по теме диссертации имеет 6 опубликованных работ в рецензируемых научных журналах, которые приведены ниже:

1. Непрерывное стимулированное излучение в области 10-14 мкм при оптической накачке в структурах с квантовыми ямами HgCdTe/CdHgTe с квазирелятивистским законом дисперсии / В. В. Уточкин [и др.] // **Физика и техника полупроводников**. – 2020. – Т. 54. – no. 10. – С. 1169.
2. Stimulated emission in 24–31 μm range and “Reststrahlen” waveguide in HgCdTe structures grown on GaAs / V. V. Rumyantsev, A. A. Dubinov, V. V. Utochkin [et al.] // **Applied Physics Letters**. – 2022. – Vol. 121. – no. 18. – P. 182103.
3. Генерация длинноволнового стимулированного излучения в квантовых ямах HgCdTe с увеличенным энергетическим порогом оже-рекомбинации / К. А. Мажукина, В. В. Румянцев, А. А. Дубинов, В.В. Уточкин [и др.] // **Письма в ЖЭТФ**. – 2023. – Т. 118. – № 5-6 (9). – С. 311-316.
4. Stimulated Emission up to 2.75 μm from HgCdTe/CdHgTe QW Structure at Room Temperature / V. V. Utochkin [et al.] // **Nanomaterials**. – 2022. – Vol. 12. – no. 15. – P. 2599.
5. Balancing the Number of Quantum Wells in HgCdTe/CdHgTe Heterostructures for Mid-Infrared Lasing / M. A. Fadeev, A. A. Dubinov, A. A. Razova, A. A. Yantser, V. V. Utochkin [et al.] // **Nanomaterials**. – 2022. – Vol. 12. – no. 24. – P. 4398.
6. Mid-IR lasing in HgCdTe multiple quantum well edge-emitting ridges / V. Utochkin [et al.] // **Applied Optics**. – 2023. – Vol. 62. – no. 32. – P. 8529.

Недостовверные сведения об опубликованных соискателем работах в диссертации отсутствуют. Личный вклад соискателя в опубликованные по теме диссертации работы является определяющим.

На автореферат диссертации поступило 2 отзыва (**положительных**):

- 1) Соколовский Григорий Семёнович, доктор физико-математических наук, профессор РАН, заведующий лабораторией интегральной оптики на

гетероструктурах Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН, в своем отзыве на автореферат диссертации отмечает, что в работе получен ряд новых важных результатов, в том числе демонстрация лазерной генерации среднего ИК-диапазона в мезоструктуре на основе HgCdTe. **Отзыв содержит 2 замечания:**

1. Цветные рисунки даны, к сожалению, в черно-белом исполнении без различия форматов кривых. Это несколько затрудняет восприятие, особенно в сочетании со ссылками на цвет линий в тексте.
 2. В автореферате указано, что по теме работы опубликовано 48 печатных работ включая 17 статей в рецензируемых журналах, однако в списке основных публикаций автора по теме диссертации дано лишь 11 из них.
- 2) Цырлин Георгий Эрнстович, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией эпитаксиальных нанотехнологий Санкт-Петербургского национального исследовательского Академического университета имени Ж.И. Алфёрова Российской академии наук, в своем отзыве на автореферат диссертации отмечает, что «Научные положения и выводы, сделанные в диссертационной работе В.В. Уточкина, без сомнения обладают научной ценностью и имеют практическую значимость для развития физики и технологии гетероструктур с квантовыми ямами HgCdTe/CdHgTe». **Отзыв не содержит замечаний.**

Выбор ведущей организации и официальных оппонентов обосновывается тематической близостью диссертационного исследования соискателя и их научных исследований, посвященных в том числе физике полупроводниковых лазеров, инфракрасной оптоэлектронике, узкозонным полупроводникам на основе HgCdTe (ведущая организация – более 10 публикаций, оппонент Фирсов Д.А. – более 15 публикаций, оппонент Хохлов Д.Р. – более 10 публикаций, за последние 5 лет).

Диссертационный совет отмечает, что в работе, на основании выполненных соискателем исследований:

Продемонстрирована генерация стимулированного излучения в диапазоне 10–14 мкм при непрерывном оптическом возбуждении в гетероструктурах с КЯ на основе HgCdTe. **Показано**, что для генерации стимулированного излучения в таком режиме предпочтительны структуры с большой шириной КЯ(6-8нм), в которых флуктуации толщины ямы не приводят к размытию плотности состояний и уменьшению коэффициента усиления.

В гетероструктурах с квантовыми ямами HgCdTe/CdHgTe, рассчитанных на генерацию в диапазоне $\lambda > 20$ мкм, **подтверждена** возможность получения стимулированного излучения при температурах, превышающих температуру жидкого азота, при оптимизации параметров квантовых ям и волноводных слоёв.

Продемонстрирована генерация стимулированного излучения при комнатной температуре в спектральном диапазоне с длинноволновой границей 2.75 мкм в гетероструктурах с квантовыми ямами на основе HgCdTe при импульсном внутриямном оптическом возбуждении.

Установлено, что увеличение числа квантовых ям HgCdTe/CdHgTe в пучности волноводной моды позволяет увеличить максимальную температуру наблюдения генерации стимулированного излучения в диапазоне 3–5 мкм в условиях внутриямной накачки. **Определено** оптимальное число квантовых ям (15–30 КЯ), дальнейшее увеличение их количества не приводит к пропорциональному росту температуры генерации.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики:

- Результаты исследований длинноволнового стимулированного излучения в диапазоне 25-30 мкм в структурах с различным дизайном диэлектрического волновода могут найти применение при разработке межзонных лазеров с квантовыми ямами на основе HgCdTe, а также квантово-каскадных лазеров

на основе HgCdTe, выращенных на альтернативных подложках GaAs (013) и рассчитанных на генерацию излучения в области терагерцового зазора (terahertz gap).

- Результаты проведенных в работе исследований стимулированного излучения в окне прозрачности атмосферы 3-5 мкм и примыкающем к нему диапазоне длин волн 2.5-3 мкм, а также способов увеличения рабочей температуры генерации могут найти прямое применение при разработке компактных перестраиваемых лазеров, работающих при температурах вплоть до комнатной в окне прозрачности атмосферы, охватывающем большое число линий поглощения распространённых биологических, промышленных газов и газообразных поллютантов.
- Результаты исследований лазерного излучения в изготовленных мезоструктурах различного дизайна были применены при улучшении технологии постростовой фабрикации лазерных мезоструктур на основе волноводных гетероструктур с КЯ HgCdTe/CdHgTe.

Оценка достоверности результатов исследования:

Достоверность полученных результатов подтверждается использованием для их получения ряда апробированных в ИФМ РАН и других мировых лабораториях экспериментальных методик и подкрепляется хорошим согласием эксперимента и теории.

Личный вклад соискателя состоит в получении всех основных экспериментальных данных работы и их анализе. Подготовка всех публикаций по выполненной работе проводилась с активным участием соискателя. Он также принимал непосредственное участие в постановке задач диссертационной работы.

В ходе защиты диссертации официальным оппонентом Д. А. Фирсовым было высказано следующее замечание:

«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?».

Соискатель Уточкин В.В. в своём ответе сообщил, что

«Безусловно, обсуждение разогрева носителей без учёта их взаимодействия с решёткой представляется неполным. Но в тексте на с. 71 приводятся лишь некоторые качественные рассуждения о перераспределении энергии между носителями за счёт оже-процессов при различных условиях: при низких температурах решётки и высоких, сравнимых или превышающих энергию активации оже-процессов, а также в условиях «горячей» и «холодной» оптической накачки. Приведённые качественные рассуждения не претендуют на подробное и точное описание динамики релаксации неравновесных носителей, они лишь призваны оценить, при каких условиях оже-рекомбинация должна быть «подавлена».»

Официальный оппонент Д. Р. Хохлов высказал следующее замечание:

«Возможно ли оптимизировать модовые потери за счет использования варизонных буферных слоев? Насколько известно рецензенту, структуры такого типа могут быть синтезированы в лаборатории Н.Н. Михайлова, в которой синтезированы все образцы, исследованные в работе.»

Соискатель Уточкин В.В. в своём ответе сообщил, что

«Вырастить структуры с варизонными барьерами, модовые потери в которых будут снижены, безусловно можно. Однако модовые потери преимущественно обусловлены поглощением в GaAs подложке. Поэтому основные усилия, на мой взгляд, должны быть направлены на минимизацию «вытекания» моды в подложку. Варизонные барьеры скорее могут улучшить оптическое ограничение моды в волноводном слое, чем предотвратить «вытекание» моды в подложку. Также стоит отметить, что рост структур с варизонными барьерами представляет более сложную технологическую задачу.»

На заседании 03.10.2024 г. диссертационный совет, за результаты исследования стимулированного излучения среднего ИК-диапазона в волноводных гетероструктурах с квантовыми ямами на основе HgCdTe, а также лазерного излучения в резонаторных мезоструктурах с квантовыми ямами на основе HgCdTe, принял решение присудить Уточкину В.В. ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 18 человек, из них 6 докторов науки по специальности рассматриваемой диссертации (2.2.2. - Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств), участвовавших в заседании, из 24 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за 18, против 0.

Заместитель председателя
диссертационного совета

Красильник З.Ф.

Ученый секретарь диссертационного совета

Водолазов Д.Ю.

Дата оформления Заключения 03.10.2024 г.

