

В диссертационный совет 24.1.238.02  
при Федеральном государственном бюджетном  
научном учреждении «Федеральный  
исследовательский центр Институт прикладной  
физики Российской академии наук»  
603087, Нижегородская область, Кстовский район,  
д. Афонино, ул. Академическая, д. 7

### ОТЗЫВ официального оппонента

о диссертационной работе **МОРОЗОВА Сергея Вячеславовича**  
«Стимулированное излучение в среднем и дальнем инфракрасном диапазонах в  
гетероструктурах с квантовыми ямами на основе HgCdTe», представленной на соискание  
ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 2.2.2 - Электронная  
компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств

**Актуальность** диссертационной работы Морозова С.В. обусловлена тем, что она посвящена исследованию оптических свойств длинноволновых квантовых ям на основе твердых растворов теллурида кадмия-ртути разработке твердотельных оптических источников для спектральных диапазонов 3-5 мкм и свыше 20 мкм. Востребованность источников излучения, способных работать на этих длинах волн, обусловлена потребностями спектроскопии молекул, в том числе для целей обнаружения утечек газов и атмосферных загрязнений, различных медицинских и специальных применений. Однако хорошо развитая технология лазерных диодов, работающих на межзонных переходах в материалах АЗВ5, не способна перекрыть этот диапазон длин волн из-за ограничений на ширину запрещенной зоны материалов. Квантово-каскадные лазеры обладают хорошими приборными характеристиками в диапазоне длин волн примерно до 20 мкм и ограничены фононным поглощением в фосфидах и арсенидах. В то же время, возможность перестройки длины волны в ККЛ ограничена. При этом востребованность именно перестраиваемых твердотельных (полупроводниковых) излучателей связана с присущей им малыми размерами, высокой прочностью и устойчивостью к вибрациям, низкими потребляемыми мощностями и относительно низкой стоимости. Все это делает потенциально возможным их использование в полевых условиях и в массовом сегменте.

Конкретные **научные и практические задачи**, на решение которых преимущественно нацелена диссертационная работа, состоят в следующем:

- Исследование оптических свойств структур (слоев и квантовых ям) на основе HgCdTe, в том числе свойств, связанных с наличием в них примесей и дефектов, с целью определения возможности достижения излучения в требуемых спектральных интервалах и выбора оптимальных структур;
- Исследование кинетики неравновесных носителей заряда с целью определения времен жизни, доминирующих механизмов рекомбинации и определения возможности подавления безызлучательных каналов;
- Проектирование волноводных структур на основе HgCdTe с целью достижения стимулированного, а в перспективе и лазерного,
- Исследование оптических свойств таких структур с целью экспериментальной верификации возможности достижения стимулированного излучения и определения оптимальных параметров конструкции.



В своей работе Морозов С.В. развивает подход, основанный на применении в качестве активной области излучателей среднего ИК диапазона квантовых ям Hg(Cd)Te, особенностью которых, помимо возможности перекрыть требуемый диапазон длин волн при соответствующем выборе химического состава и толщины ямы, является формирование графеноподобной зонной структуры. Основной акцент в работе сделан на разработку такой конструкции квантовых ям Hg(Cd)Te/CdHgTe, которая позволила бы наиболее эффективно подавить безызлучательную Оже рекомбинацию – одну из основных проблем при реализации стимулированного излучения в узкозонных материалах – за счет управления законом дисперсии. В этом отношении полученные в работе результаты могут представлять интерес также и для других материалов с похожим законом дисперсии (графен, PbSnSe, PbSnTe). В работе также затронуты вопросы реализации волноводного ограничения оптической моды. Традиционный метод оптического ограничения, основанный на контрасте показателя преломления, в случае большой длины волны света оказывается чрезвычайно затратным, т.к. требует применения слоев волновода и обкладок с толщинами порядка длины волны. В связи с этим поднятые в работе вопросы представляют несомненный интерес для длинноволновой оптоэлектроники в целом, не зависимо от типа используемой активной среды.

**Диссертация состоит** из введения, шести основных глав и заключения. Во введении описаны объект и предмет исследования, дано обоснование актуальности работы, дано описание степени разработанности темы на момент начала диссертационных исследований, приведены цели и задачи работы, научная новизна, научная и практическая значимость работы, кратко описана методология выполненных исследований и личный вклад автора, сформулированы пять выносимых на защиту положений, даны сведения об апробации.

В **первой главе** описаны особенности зонной структуры HgCdTe, представлены сведения по достигнутым при различных температурах значениям длины волны и типу излучения (стимулированное излучение при 300К на 2.5 мкм, лазерная генерация при 80К на 5.3 мкм, максимальная длина волны спонтанного излучения 18 мкм). Обсуждаются различные механизмы рекомбинации и связанные с ними времена жизни носителей заряда. Детально затронуты вопросы, связанные с Оже-рекомбинацией, темп которой пропорционален кубу концентрации и потому может доминировать при больших плотностях накачки. Обсуждается пороговая энергия Оже-процесса, зависящая от отношения эффективных масс, и упоминается, что в квантовой яме можно добиться приблизительно симметричного спектра носителей в центре зоны, увеличив тем самым порог Оже-рекомбинации. Кроме того, сделан важный вывод о том, что беспороговые Оже-процессы подавляются в узких квантовых ямах, имеющих при том малую (< 100 мэВ) ширину запрещенной зоны. Таким образом, анализ литературы позволил автору сформулировать стратегию продвижения в длинноволновый спектральный диапазон за счет управления зонной структурой, ведущей к подавлению как пороговых, так и беспороговых Оже-процессов. Кроме того, в главе проанализированы данные по примесям и дефектам в HgCdTe.

Во **второй главе** описаны исследования оптических свойств толстых слоев HgCdTe, синтезируемых методом низкотемпературной МПЭ, для оценки их совершенства и достижимых длин волн излучения. Из спектров фотопроводимости была извлечена величина энергии Урбаха, характеризующая размытие края запрещенной зоны. Ее низкие значения (1-2 мэВ), измеренные при температуре жидкого гелия, позволили сделать качественный вывод о высоком совершенстве слоев. Описана методика, позволяющая отстроить сигнал, связанный с межзонными оптическими переходами, от примесных с помощью изменения температуры или магнитного поля, и за счет этого добиться возможности определения энергетических параметров даже для образцов с шириной запрещенной зоны от нескольких десятков мэВ до нуля. Также следует отметить примененную автором методику Фурье-спектрометрии



длинноволновой люминесценции, основанную на измерениях с пошаговым перемещением зеркала спектрометра и позволяющую снизить влияние теплового излучения. При непрерывной накачке и 18 К наблюдалась фотолюминесценция с максимумом вплоть до 35 мкм. Анализ температурной зависимости ширины линии и ее сопоставление с теоретическим пределом ( $1.8kT$ ), достигаемом начиная приблизительно со 100 К, вновь позволяет сделать вывод о достаточно высоком качестве исследуемого материала. Эти результаты позволили автору сформулировать первое положение, выносимое на защиту. Кроме того, в данной главе представлена методика измерения динамики фотопроводимости (с временным разрешением вплоть до 1 нс), оценки времени жизни носителей заряда и определения доминирующего механизма рекомбинации.

**Третья глава** является, на мой взгляд, основной в диссертации. В ней описаны результаты исследований одиночных и множественных (до 20) квантовых ям HgCdTe различного химического состава и толщины. Были выполнены расчеты зонной структуры с использованием гамильтониана Кейна  $8 \times 8$ . Показано, что ямы с большим содержанием HgTe характеризуются более сильным температурным сдвигом ширины запрещенной зоны, что позволяет в ряде случаев независимо определять состав и толщину для квантовых ям, обладающих при некоторой температуре одинаковой длиной волны. Обнаружено, что квантовых ямах толщиной более 5 нм характерное размытие длинноволнового края спектра фотопроводимости остается достаточно низким (единицы мэВ) и, кроме того, практически не зависит от длины волны излучения ямы, а также от их числа в волноводном слое. Определенная по ширине линии фотолюминесценции неоднородность энергии оптического перехода составила около 6 мэВ, что по оценке автора примерно в три раза меньше энергии Ферми, необходимой для начала усиления. Еще одним важным выводом, сделанным автором в этой главе, является то, что не смотря на больший по сравнению с объемными слоями темп рекомбинации на дефектах, в не слишком длинноволновых структурах преобладающим при достаточных для достижения инверсии заселенности накачках становится излучательная рекомбинация. При этом квантовые ямы характеризуются менее выраженным температурным гашением люминесценции (вплоть до комнатной температуры), что связано автором работы с подавлением Оже-рекомбинации. При определенных параметрах ямы (малая толщина, низкое содержание кадмия) удастся реализовать ситуацию, когда кинетика носителей заряда практически полностью определяется излучательным процессом. На основе результатов, описанных в данной главе, автор делает вывод о приемлемом качестве квантовых ям HgCdTe и возможности достижения стимулированного излучения (первая часть положения №3).

**Четвертая глава** посвящена исследованию вакансии ртути, являющихся двукратно ионизируемым акцептором, и их проявления в спектрах фотопроводимости и фотолюминесценции структур HgCdTe. Я не буду подробно останавливаться на этой главе, которая, на мой взгляд несколько уходит в сторону основной идеи диссертационной работы. Отмечу лишь, что второе выносимое на положение в полной мере подтверждено как экспериментальными результатами, так и теоретическим анализом.

**В пятой главе** в основном описаны результаты экспериментального наблюдения стимулированного излучения в структурах с квантовыми ямами оптимизированного дизайна (третье положение). Обсуждается конструкция исследуемых образцов, которая фактически представляет собой лазерную гетероструктуру с отдельным ограничением носителей заряда в квантовых ямах и световой волны в волноводном слое. Переход в режим стимулированного излучения подтверждается, во-первых, сужением спектра с более 10 до единиц мэВ и, во-вторых, резкое увеличение интенсивности сигнала. В этой главе получает экспериментальное подтверждение оптимальность узких квантовых ям с большим содержанием ртути для достижения режима стимулированного излучения (выше предельная температура, ниже



плотность мощности накачки). В структурах с локализацией света за счет скачка показателя преломления стимулированное излучение наблюдалось вплоть до 175 К (длина волны 7.5 мкм), при 20 К наибольшая длина волны составила 19 мкм. Экспериментально продемонстрирована корреляция между пороговой энергией Оже-рекомбинации и предельной температурой. Определен оптимальный для подавления Оже-рекомбинации химический состав материала барьера (рецензент не предполагал, что такая связь существует). Проанализирована зависимость интенсивности стимулированного излучения от температуры и интенсивности накачки и показано, что при больших мощностях накачки происходит гашение излучения, что было связано с разогревом, ведущим в свою очередь к появлению носителей заряда, энергия которых превышает порог Оже-рекомбинации. Построена модель, позволяющая количественно предсказать диапазон накачки, в котором возможно наблюдение стимулированного излучения вплоть до его гашения, его зависимость от температуры и предельную температуру. Разработана конструкция, позволяющая локализовать излучение с длиной волны более 20 мкм в волноводном слое за счет отражения со стороны подложки, возникающего в области остаточных лучей GaAs (четвертное положение). Наибольшая достигнутая длина волны стимулированного излучения составила 31 мкм (при 17 К). Отмечу, что в диапазоне длин волн 25-31 мкм стимулированное излучение продемонстрировано в структурах на основе HgCdTe впервые.

Наконец, **шестая глава** целиком посвящена доказательству пятого положения, вынесенного на защиту. Используя развитые автором методы подавления безызлучательных процессов, автору удалось достичь стимулированного излучения вплоть до 210 К (длина волны 3.5 мкм) и до 256 К (длина волны 2.8 мкм) и, таким образом, повысить предельную температуру до значений, которые можно реализовать с помощью термоэлектрического охладителя.

Диссертация характеризуется **большим числом значимых результатов**, они были выделены мной выше при анализе ее содержания. В качестве результатов, обладающих наибольшей, с моей точки зрения, **значимостью для фундаментальной науки**, я хотел бы выделить, во-первых, теоретическое обоснование и экспериментальное подтверждение возможности полного подавления Оже-рекомбинации и, во-вторых, демонстрация связи подавленных Оже-процессов с достижением стимулированного излучения в узкозонных материалах. **Научная новизна** работы прежде всего заключается в том, что в ней впервые продемонстрирована релаксация неравновесных носителей, темп которой полностью определяется излучательной рекомбинацией, впервые из времяразрешенных экспериментов оценена плотность мощности, требуемая для инверсии в квантовой яме с шириной запрещенной зоны, соответствующей длине волны 60 мкм, впервые предложена конструкция волноводной структуры с квантовыми ямами, локализующей фундаментальную моду с длиной волны до ~ 30 мкм за счет отражения в полосе остаточных лучей подложки.

Рассматриваемая диссертационная работа, по существу, выводит материалы кадмий-ртуть-теллур, ранее ограниченные лишь использованием толстых слоев в ИК фотоприемниках и их изучением в связи с переходом в полуметаллическое состояние, на принципиально новый уровень, позволяя создавать на их основе как светоизлучающую активную область, так и волноводные структуры. Это открывает перспективы создания на их основе различных устройств оптоэлектроники, таких как оптические усилители, светодиоды и лазерные диоды. Автору диссертации удалось поднять максимальную температуру, при которой в структурах на основе HgCdTe достигалось стимулированное излучение с длиной волны, соответствующей первому окну прозрачности атмосферы, до 240 К, а также достичь рекордно-высокой длины волн стимулированного излучения 31 мкм при 17 К. В связи с этим работа С.В. Морозова обладает высокой **практической значимостью**.



**Достоверность** научных положений, выводов и рекомендаций не вызывает сомнений. Они непротиворечивы, научно обоснованы, подтверждены результатами измерений с использованием различных современных методов анализа. Все вынесенные на защиту положения в полной мере подтверждены представленными в диссертации данными.

По диссертации у меня возникли следующие **замечания**:

1. Автор утверждает, что «вероятность излучательной рекомбинации убывает с ростом ширины запрещенной зоны» (стр. 42). Вероятно, это опечатка, потому что в этом случае более узкозонный материал характеризовался бы **бОльшим** темпом излучательной рекомбинации и достичь длинноволнового излучения было бы, таким образом, проще.

2. Я не согласен с утверждением автора, что проблемы, связанные с флуктуациями состава твердого раствора, снимаются, поскольку современные методы МЛЭ позволяют проводить рост слоев HgCdTe высокого качества (стр. 56). Зависимость ширины запрещенной зоны  $Cd_xHg_{1-x}Te$  характеризуется изменением приблизительно 17 мэВ на % Cd. Это означает, что если желаемая ширина зоны составляет 40 мэВ (длина волны около 30 мкм), точность воспроизведения химического состава по пластине и от образца к образцу должна составлять порядка 0.2...0.3%, что трудно достижимо даже в случае AlGaAs. Более правильным мне представляется позиция, что отказ от Cd в активной области и переход к бинарным квантовым ямам HgTe позволяет полностью устранить эту проблему, хотя, несомненно, остается проблема воспроизводимости толщины квантовой ямы, которая должна быть на уровне 0.1 нм.

3. На стр. 100 автор утверждает, что «при изготовлении зеркал на гранях образца такие структуры будут представлять собой полноценные лазерные «чипы» с оптической накачкой.» Не вполне понятно, что помешало автору реализовать это на практике.

4. Автор справедливо отмечает, что «одинаковую ширину запрещенной зоны можно получить в структурах с различным дизайном» (стр. 104). Было бы желательно сопроводить это утверждение расчетными зависимостями ширины зоны от химического состава и ширины квантовой ямы. Еще интереснее было бы наложить на эти зависимости полученные в ходе работы экспериментальные данные.

5. Автором накоплено большое число экспериментальных данных по предельной температуре стимулированного излучения в зависимости от длины волны. Также в распоряжении автора есть данные построенной им модели, предсказывающей предельную температуру, обусловленную разогревом носителей заряда излучением накачки. Было бы интересно сопоставить эти результаты, а кроме того, и с результатами работ других авторов. В диссертации подобное обобщение, к сожалению, отсутствует, а чужие данные проиллюстрированы по состоянию на 1999 г (Рис. 1.1).

Указанные замечания не являются принципиальными, не затрагивают существа выносимых на защиту положений, и не меняют общую **высокую оценку** диссертационной работы. Некоторые из них могут рассматриваться как пожелания для дальнейших исследований.

Характеризуя диссертацию **в целом**, следует отметить чрезвычайно высокий научно-методический уровень ее выполнения, разнообразие и большое количество использованных в исследованиях эпитаксиальных образцов и полученных экспериментальных данных. В результате работы сформировано новое направление в российской науке – длинноволновые источники когерентного излучения на основе квантовых ям HgCdTe. Работа написана ясным языком, практически свободна от опечаток и неточностей. **Автореферат** достаточно полно и объективно отражает ее содержание. В основе диссертации лежат результаты, опубликованные в 43 статьях, опубликованной в рецензируемых научных журналах. Публикации отражают основные положения работы и позволяют подтвердить **личный вклад** автора, который был определяющим при формулировании цели и задач исследований, разработке конструкции

экспериментальных образцов, выборе и реализации методов диагностики, исследовании оптических характеристик. Цикл работ автора можно рассматривать как крупное научное достижение в области развития электронной компонентной базы микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств, а также физики конденсированного состояния и физики полупроводников.

Таким образом, диссертация Морозова С. В. **соответствует** требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней» (утверждено постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842) предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а ее автор, **Морозов Сергей Вячеславович, заслуживает** присуждения искомой ученой степени по доктору физико-математических наук по специальности 2.2.2 –Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств.

*Жуков*

Жуков Алексей Евгеньевич

доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН  
профессор, руководитель департамента, заместитель декана по научной работе

департамент физики,

Санкт-Петербургская школа физико-математических и компьютерных наук,

Санкт-Петербургский филиал федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования

«Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (НИУ ВШЭ – Санкт-Петербург)

194100, г. Санкт-Петербург, Кантемировская ул., д. 3, корп. 1, лит. А,

<https://spb.hse.ru/>, [office-spb@hse.ru](mailto:office-spb@hse.ru)

+7-921-9517190

[aezhukov@hse.ru](mailto:aezhukov@hse.ru); [zhuckale@yandex.ru](mailto:zhuckale@yandex.ru)

Даю согласие на обработку персональных данных

14 октября 2022 г.

Подпись Жукова



Начальник отдела кадров

Д. Н. Возиян