

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.262.01 НА БАЗЕ
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ
НАУКИ ФИЗИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА ИМ. П.Н. ЛЕБЕДЕВА РОССИЙСКОЙ
АКАДЕМИИ НАУК ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ
СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 02 октября 2023 г № 52

О присуждении Бутаеву Марату Раджабали оглы, гражданину Российской Федерации, учёной степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Эпитаксия низкоразмерных гетероструктур соединений A^2B^6 и создание полупроводниковых дисковых лазеров на их основе» по специальности 1.3.19 – Лазерная физика принята к защите 14 июня 2023 года, (протокол заседания № 51) диссертационным советом 24.1.262.01, созданным 11 апреля 2012 года приказом № 105/нк на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН), 119991 ГСП-1 Москва, Ленинский проспект, д. 53.

Соискатель Бутаев Марат Раджабали оглы, 12 ноября 1991 года рождения, в 2017 году с отличием окончил магистратуру Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»» по направлению «Ядерная энергетика и теплофизика» (профиль образовательной программы - «Физика и технологии полупроводниковых лазеров»). С 2018 года обучался в аспирантуре Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»» по направлению «Физика и астрономия» (специальность - «Лазерная физика») и закончил её в 2022 году.

Справка об обучении и сдаче кандидатских экзаменов выдана НИЯУ МИФИ в 2023 году. Бутаев М.Р. с 2017 года работает в ООО "Лассард" и по совместительству с 2020 года в Троицком обособленном подразделении, включающем «Троицкий Технопарк ФИАН» (ТОП) ФИАН. В настоящее время работает в должности инженера-технолога 2-ой категории в ООО "Лассард" и по совместительству – высококвалифицированного младшего научного сотрудника лаборатории лазеров с катодно-лучевой накачкой отдела лазерных технологий ТОП ФИАН.

Диссертационная работа Бутаева М.Р. выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН (ФИАН) и в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»».

Научный руководитель: доктор физико-математических наук Козловский Владимир Иванович, высококвалифицированный главный научный сотрудник, и.о. заведующего лабораторией лазеров с катодно-лучевой накачкой ТОП ФИАН (профессор НИЯУ МИФИ по совместительству).

Официальные оппоненты:

1. Ладугин Максим Анатольевич, доктор физико-математических наук, начальник научно-производственного комплекса АО НИИ «Полус» им. М.Ф. Стельмаха»;
2. Тункин Владимир Григорьевич, доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» (МГУ)

дали положительные отзывы о диссертации.

Ведущая организация — Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук (ФТИ им. А.Ф. Иоффе), город Санкт-Петербург, в своем положительном отзыве, подписанном кандидатом физико-математических наук Сорокиным Сергеем Валерьевичем, старшим научным сотрудником Лаборатории квантовой фотоники Центра физики наногетероструктур ФТИ им. А.Ф. Иоффе, доктором физико-математических наук Тороповым Алексеем Акимовичем, руководителем Лаборатории квантовой фотоники Центра физики наногетероструктур ФТИ им. А.Ф. Иоффе, и утвержденном доктором физико-математических наук Брунковым Павлом Николаевичем, заместителем директора по науке Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН, указала, что диссертация удовлетворяет всем требованиям к кандидатским диссертациям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г., а соискатель, Бутаев Марат Раджабали оглы, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19—Лазерная физика.

Соискатель имеет 29 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 28 работ, из них в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus, опубликовано 9 работ.

В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем Бутаевым М.Р. работах.

Наиболее значимые результаты по теме диссертации опубликованы в следующих статьях:

- 1) Бутаев, М.Р. Исследование полупроводникового дискового лазера на гетероструктуре CdS/ZnSe/ZnSSe с оптической накачкой лазерным диодом / М.Р. Бутаев, В.И. Козловский, Я.К. Скасырский, Н.Р. Юнусова // Краткие сообщения по физике. - 2023. - Т. 50. - № 2. - С. 41-50.

- 2) Butaev, M.R. Optical gain in CdS/ZnSe/ZnSSe heterostructures with type II band offsets / M.R. Butaev, V.I. Kozlovsky, Y.K. Skasyrsky // Optics and Laser Technology. - 2023. - Vol. 158. - P. 108890.
- 3) Бутаев, М.Р. Полупроводниковый лазер на основе гетероструктуры CdS/ZnSe с продольной оптической накачкой излучением лазерного диода / М.Р. Бутаев, В.И. Козловский, Я.К. Скасырский // Квантовая электроника. - 2022. - Т. 52. - № 4. - С. 359-361.
- 4) Butaev, M.R. Cd diffusion in CdS/ZnSe MQW heterostructures grown by MOVPE for semiconductor disk lasers / M.R. Butaev, V.I. Kozlovsky, V.P. Martovitsky, Y.K. Skasyrsky, D.E. Sviridov // Journal of Alloys and Compounds. - 2021. - Vol. 880. - P. 160555.
- 5) Бутаев, М.Р. Наносекундный полупроводниковый дисковый лазер с длиной волны излучения 496.5 нм / М.Р. Бутаев, В.И. Козловский, Я.К. Скасырский // Квантовая электроника. - 2020. - Т. 50. - № 10. - С. 895-899.

На автореферат диссертации поступили отзывы от кандидата технических наук Курочкина Александра Сергеевича, ведущего научного сотрудника ООО "Специальный Технологический центр" (ООО «СТЦ») и кандидата физико-математических наук Санникова Дениса Александровича, заместителя заведующего лабораторией Гибридной фотоники Сколковского института науки и технологий (Инновационный Центр "Сколково"). В обоих отзывах отмечается актуальность выбранной темы исследования и ее практическая значимость. В отзывах указано, что соискатель Бутаев М.Р. заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук.

Выбор официальных оппонентов обосновывается их высокой квалификацией и наличием достижений мирового уровня в области лазерной физики и физики полупроводников, а ведущей организации – ее репутацией признанного научного центра, проводящего исследования в области

эпитаксиального выращивания квантоворазмерных гетероструктур с целью создания на их основе различных полупроводниковых лазеров.

Диссертация Бутаева М.Р. посвящена эпитаксиальному выращиванию новых гетероструктур 2-го типа CdS/ZnSe/ZnSSe с резонансно-периодическим усилением, теоретическому и экспериментальному исследованию полученных структур, а также созданию на их основе полупроводниковых лазеров с оптической накачкой, в частности полупроводникового дискового лазера, излучающего в сине-зеленой (~480-550 нм) области спектра на основной частоте. Актуальность выбранной темы диссертации подтверждается интенсивным развитием полупроводниковых дисковых лазеров в последние 10-15 лет многими лабораториями в различных странах мира, что связано с рядом преимуществ данных лазеров (малая расходимость, широкий спектральный диапазон, высокая мощность излучения, стабильность параметров генерации, малые шумы, отсутствие релаксационных колебаний).

На основании проведенных соискателем исследований были получены следующие основные результаты:

1. Теоретически обоснована возможность использования гетероструктуры CdS/ZnSe/ZnSSe с разрывами зон 2-го типа для создания полупроводниковых лазеров с оптической накачкой, излучающих в зеленой области спектра.
2. Методом газофазной эпитаксии из элементоорганических соединений выращены гетероструктуры 2-го типа CdS/ZnSe/ZnSSe. Для этого найдены оптимальные режимы роста лазерных резонансно-периодических гетероструктур с одинаковыми квантовыми ямами CdS/ZnSe по их глубине.
3. На основании экспериментально наблюдаемого коротковолнового сдвига линии излучения гетероструктуры с увеличением уровня возбуждения и пространственного разделения неравновесных носителей (электроны в

слое CdS, а дырки в соседних слоях ZnSe), обнаруженного в зондовом микроскопе в режиме измерения сопротивления растеканию тока, установлено, что полученные при оптимальных ростовых условиях гетероструктуры CdS/ZnSe/ZnSSe, относятся к гетероструктурам с разрывами зон 2-го типа.

4. На выращенных гетероструктурах CdS/ZnSe/ZnSSe с резонансно-периодическим усилением, впервые реализованы различные (как с микрорезонатором, так и с внешним зеркалом обратной связи) полупроводниковые лазеры с продольной оптической накачкой, излучающие в зеленой области спектра. При продольной накачке микрорезонатора излучением «фиолетового» лазерного диода, достигнута импульсная мощность до 0.32 Вт на длине волны 525 нм с эффективностью 10%. В случае полупроводникового дискового лазера, при использовании резонатора, близкого к полуконцентрическому, получена импульсная мощность 57 мВт на длине волны ≈ 521 нм с углом расходимости около десяти градусов. Расходимость излучения уменьшалась до ~ 5 мрад при использовании полуконфокального резонатора.

Все результаты, представленные автором в работе, являются новыми. Новизна полученных результатов заключается в следующем:

- Впервые методом газофазной эпитаксии из элементоорганических соединений выращены гетероструктуры 2-го типа CdS/ZnSe/ZnSSe с резонансно-периодическим усилением для создания полупроводниковых лазеров зеленого диапазона спектра с продольной оптической накачкой.

- Впервые проведен теоретический расчет гетероструктуры 2-го типа CdS/ZnSe/ZnSSe с целью определения возможности использования данной гетероструктуры в полупроводниковых лазерах зеленого диапазона спектра с оптической накачкой.

- Впервые найдены режимы роста резонансно-периодических гетероструктур с квантовыми ямами 2-го типа CdS/ZnSe с помощью метода газофазной эпитаксии из элементоорганических соединений, при которых подавляется взаимная диффузия атомов Cd и Zn.

- Впервые с помощью зондового (атомно-силового) микроскопа обнаружено пространственное разделение носителей заряда в выращенных гетероструктурах CdS/ZnSe, подтверждающее принадлежность этих гетероструктур к гетероструктурам с разрывами зон 2-го типа.

- Впервые на выращенных гетероструктурах 2-го типа CdS/ZnSe/ZnSSe с резонансно-периодическим усилением реализованы и исследованы полупроводниковые лазеры с микрорезонатором и с внешним зеркалом обратной связи при продольной оптической накачке, излучающие в зеленой области спектра.

Практическая значимость работы заключается в создании полупроводникового дискового лазера с оптической накачкой на основе новой гетероструктуры 2-го типа CdS/ZnSe/ZnSSe из соединений A^2B^6 , излучающего в зеленой области спектра на основной частоте. Использование гетероструктур из этих соединений расширяет набор полупроводниковых материалов, из которых может быть создан полупроводниковый дисковый лазер. Кроме того, внутрирезонаторное удвоение частоты в полупроводниковых дисковых лазерах на основе данных соединений может позволить перейти в актуальный средний УФ диапазон спектра, где отсутствуют компактные, перестраиваемые, а также недорогие лазерные источники.

Полученные в диссертации результаты могут быть использованы в таких организациях как Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, «Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, ООО «Лассард», АО НИИ «Полюс» им. М.Ф.

Стельмаха.

Достоверность представленных в диссертации результатов подтверждается их повторяемостью в различных экспериментах, согласием полученных с использованием современного сертифицированного оборудования экспериментальных данных с результатами проведенных теоретических расчетов, а также успешным представлением основных результатов диссертации на ведущих российских и международных конференциях. Справедливость некоторых представленных в диссертации результатов подтверждается их согласием с данными, полученными в работах других авторов.

Все основные научные результаты, представленные в диссертации Бутаева М.Р., получены соискателем лично, либо при его непосредственном участии. В частности, соискатель внес существенный вклад в модернизацию и запуск экспериментальной установки газофазной эпитаксии из элементоорганических соединений для выращивания полупроводниковых квантоворазмерных гетероструктур из соединений A^2B^6 . Им лично был найден оптимальный режим роста структур, были выращены все эпитаксиальные квантоворазмерные гетероструктуры 2-го типа $CdS/ZnSe/ZnSSe$ для создания различных полупроводниковых лазеров на их основе. Бутаев М.Р. лично проводил все представленные в работе теоретические расчеты. Исследование выращенных гетероструктур и обработка полученных при этом результатов, изготовление активных элементов полупроводниковых лазеров на основе полученных гетероструктур, создание лазеров на их основе, а также подготовка публикаций проводились совместно с соавторами, однако, при этом вклад автора диссертационной работы был основным.

В ходе защиты соискатель Бутаев М.Р. аргументированно ответил на заданные ему вопросы членов диссертационного совета, а также на замечания ведущей организации и оппонентов.

На заседании 02 октября 2023 года диссертационный совет принял решение присудить Бутаеву М.Р. учёную степень кандидата физико-математических наук за решение научной задачи о разработке технологии выращивания новых гетероструктур 2-го типа CdS/ZnSe/ZnSSe с резонансно-периодическим усилением, всестороннем исследовании полученных структур и создании на их основе полупроводниковых лазеров с оптической накачкой, излучающих в сине-зеленой (~480-550 нм) области спектра.

При проведении тайного голосования члены диссертационного совета в количестве 21 человека, из них 6 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации (1.3.19 – Лазерная физика), участвовавшие в заседании, из 26 человек, входящих в состав совета, проголосовали:

за присуждение учёной степени - 21,
против присуждения учёной степени - 0,
недействительных бюллетеней - 0.

Заместитель председателя диссертационного совета
член-корр. РАН, д.ф.-м.н.

Ионин Андрей Алексеевич

Учёный секретарь диссертационного совета
д.ф.-м.н.

Золотько Александр Степанович

02 октября 2023 г.