

ОТЗЫВ

официального оппонента Ладугина Максима Анатольевича о диссертационной работе Бутаева Марата Раджабали оглы «Эпитаксия низкоразмерных гетероструктур соединений А2В6 и создание полупроводниковых дисковых лазеров на их основе», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 – «Лазерная физика».

Диссертационная работа Бутаева М.Р. посвящена полупроводниковым дисковым лазерам (ПДЛ), интенсивно развивающимся в настоящее время во многих лабораториях развитых стран мира. Повышенный интерес к данному типу лазеров обусловлен возможностью достижения в них малой расходимости (~5-10 мрад) при больших мощностях (до ~100 Вт в непрерывном режиме) в широком спектральном диапазоне (от УФ до ТГц). В отличие от твердотельных дисковых лазеров полупроводниковые лазеры имеют более широкую и плавную спектральную перестройку, высокую стабильность параметров генерации, и в них отсутствуют релаксационные колебания. А в отличие от лазерных диодов полупроводниковые дисковые лазеры имеют высокое качество пучка при мощностях в несколько десятков ватт, что вместе с протяженным резонатором дает возможность осуществления различных нелинейных процессов внутри резонатора, тем самым перекрыть более широкий спектральный диапазон (от УФ до ТГц). Благодаря вышесказанному, ПДЛ является перспективным лазером для широкого применения в различных областях науки и техники: в медицине, спектроскопии сложных молекул, лазерной локации летающих объектов и загрязнений атмосферы, в дисплейных применениях, для продольной накачки твердотельных лазеров, для получения коротких импульсов, в беспроводной оптической связи.

Выбор темы диссертации связан с отсутствием ПДЛ, излучающих в синезеленом диапазоне спектра на основной частоте. Кроме того, разработка ПДЛ в этом диапазоне позволила бы достаточно легко с помощью внутрирезонаторного удвоения частоты перекрыть актуальный средний УФ диапазон.

Таким образом, диссертационная работа Бутаева М.Р., посвященная созданию и исследованию ПДЛ, работающего в синезеленой области спектра, является несомненно **актуальной**.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы.

Во введении обоснована актуальность выбранной темы исследования, описаны цель, научная новизна и решаемые задачи, а также сформулированы научные положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена обзору научной литературы по теме диссертации, в котором описывается современное состояние исследований и разработок в области ПДЛ, пути освоения актуальных спектральных диапазонов и создания новых перспективных гетероструктур (ГС) для более эффективных ПДЛ.

Во второй главе приведено обоснование выбора новых ГС 2-го типа Cd(Zn)S/Zn(S)Se для ПДЛ, работающих в голубой и зеленой областях спектра. Перечислены преимущества и недостатки этих ГС по сравнению с наиболее известными и широко исследованными ГС типа ZnCdSe/ZnSe или ZnSe/ZnMgSSe.

Третья глава в основном посвящена моделированию и расчету исследуемых ГС 2-го типа с учетом различных эффектов.

В четвертой главе приведены экспериментальные результаты исследования выращенных ГС 2-го типа CdS/ZnSe. Описывается как разработка технологии получения полупроводниковых ГС, так и современные методы их анализа.

В пятой главе приводятся характеристики полупроводниковых лазеров, созданных на основе выращенных ГС. Преимущественно внимание уделено ПДЛ на основе ГС 2-го типа Cd(Zn)S/Zn(S)Se.

В заключении приведены основные результаты, достигнутые в ходе выполнения диссертационной работы.

В рамках работы диссертантом подробно и всесторонне изучены люминесцентные и структурные свойства выбранной ГС 2-го типа CdS/ZnSe для создания ПДЛ, а также на ее основе впервые получена лазерная генерация при оптической накачке. В работе рассмотрены различные геометрии оптической накачки лазерных структур (как поперечная, так и продольная с микрорезонатором и внешним резонатором). Существенным достижением среди полученных результатов, с точки зрения поставленной цели, на мой взгляд, является первая реализация ПДЛ с оптической накачкой, который на основной частоте излучает в сине-зеленом диапазоне спектра (~500-530 нм). Результаты работы в принципе могут быть использованы для дальнейшего освоения среднего УФ диапазона.

В качестве наиболее интересных и значимых новых результатов, полученных в работе, можно подчеркнуть следующие:

1) Впервые методом газофазного осаждения из элементоорганических соединений выращены ГС CdS/ZnSe/ZnSSe с резонансно-периодическим усилением для полупроводниковых лазеров, излучающих в зеленой области спектра.

2) Впервые проведен расчет коэффициента оптического усиления для ГС CdS/ZnSe с разрывами зон 2-го типа. Показано, что при поверхностной концентрации неравновесных носителей $\sim 10^{13} \text{ см}^{-2}$, которая достижима в ГС 2-го типа, коэффициент оптического усиления в квантовых ямах может достигать величины $\sim 5000 \text{ см}^{-1}$, достаточной для реализации полупроводниковых лазеров с оптической накачкой на ее основе при оптимальных зеркалах.

3) Впервые использовалась методика измерения сопротивления растекания тока при фиолетовой подсветке контакта зонда с поверхностью скола ГС в зондовом (атомно-силовом) микроскопе для обнаружения разделения носителей заряда в ГС с разрывами зон 2-го типа.

4) Обнаружена взаимная диффузия атомов Cd и Zn, приводящая к размазыванию квантовых ям в процессе выращивания ГС при температуре роста $\sim 450 \text{ }^\circ\text{C}$ и типичных соотношениях потоков элементоорганических соединений, содержащих атомы II и VI группы периодической таблицы элементов (соотношение VI/II ~ 10). Показано, что данный эффект может быть существенно подавлен, если рост проводить при пониженных соотношениях потоков в слоях квантовых ям ГС (VI/II $\sim 2-4$).

5) Впервые на выращенных ГС CdS/ZnSe/ZnSSe с резонансно-периодическим усилением реализованы различные (как лазер с микрорезонатором, так и с внешним зеркалом обратной связи) полупроводниковые лазеры с продольной оптической накачкой, излучающие в зеленой области спектра.

Результаты, полученные в диссертации, **достаточно обоснованы**, их **достоверность** обусловлена проведенными экспериментальными и теоретическими исследованиями, повторяемостью и воспроизводимостью экспериментальных результатов, полученных с использованием современного сертифицированного оборудования, корреляцией экспериментальных результатов с проведенными расчетами, сопоставлением достигнутых результатов с результатами теоретических работ других исследовательских групп там, где это возможно, а также успешным представлением основных результатов диссертации на ведущих российских и международных конференциях.

Научная и практическая значимость диссертации заключается в создании ПДЛ, излучающего в зеленой области спектра на основной частоте. Это является необходимым шагом на пути к созданию компактных, перестраиваемых, а также недорогих лазерных источников, излучающих в среднем ультрафиолетовом диапазоне. Также практически важным является результат использования

гетероструктуры из соединений A^2B^6 в ПДЛ, в частности новой структуры CdS/ZnSe/ZnSSe с разрывами зон 2-го типа, что расширяет набор полупроводниковых соединений, из которых может быть создан лазер. Полученные в диссертации результаты обладают несомненной научной ценностью и вносят важный вклад в развитие лазерной физики.

Тем не менее, по тексту диссертации имеются следующие **замечания**:

1. Не проанализировано влияние ориентации подложки арсенида галлия на качество выращиваемых слоев и гетероструктур, а выбирается лишь один тип подложки и ее ориентация.

2. В работе не показаны преимущества и недостатки тех или иных методов эпитаксиального выращивания по сравнению с выбранным автором.

3. Ввиду важности создания лазеров не только с высокой выходной мощностью и КПД, но и с приемлемым ресурсом работы, в диссертации, к сожалению, не оценена надежность разработанных ПДЛ.

4. При продольной оптической накачке существенна неоднородность возбуждения квантовых ям по глубине, особенно при накачке излучением азотного лазера, о чем указано в диссертации. Однако этот эффект не учитывается при анализе порогового условия.

5. Неточно сформулировано 4-е положение. Данная формулировка больше выглядит как один из выводов диссертации.

Вышеуказанные замечания носят скорее рекомендательный характер и не оказывают заметного влияния на научную значимость и общую положительную оценку работы. Работа выполнена на очень высоком научном уровне и представляет собой законченное, ценное исследование, в котором решены поставленные задачи и достигнута поставленная цель. Материал, представленный в работе, характеризуется хорошей структурированностью, достаточно подробным изложением, четкостью и обоснованностью выводов. Следует отметить, что в рамках работы диссертантом проделан достаточно большой объем работы, начиная от роста квантоворазмерных гетероструктур (включая запуск и модернизацию самой установки МOCVD лабораторного варианта) до создания полупроводниковых лазеров с продольной оптической накачкой на основе полученных гетероструктур. В целом, продемонстрирована принципиальная возможность создания ПДЛ сине-зеленого диапазона на основе новой гетероструктуры 2-го типа CdS/ZnSe. Содержание диссертации подробно изложено в девяти научных рецензируемых статьях. Текст автореферата правильно и достаточно полно отражает содержание диссертации.

На основе всего вышеизложенного я считаю, что диссертация Бутаева Марата Раджабали оглы «Эпитаксия низкоразмерных гетероструктур соединений A2B6 и создание полупроводниковых дисковых лазеров на их основе» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, удовлетворяющую всем требованиям к кандидатским диссертациям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 года, а ее автор, Бутаев Марат Раджабали оглы, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 – «Лазерная физика».

Официальный оппонент:

Ладугин Максим Анатольевич, д.ф.-м.н. (05.27.03 – «Квантовая электроника»), начальник научно-производственного комплекса АО НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха», г. Москва, ул. Введенского, д.3, телефон +7-495-333-33-25; e-mail: maximladugin@mail.ru

«12» сентября 2023 г.

Ладугин М.А.

Подпись М.А. Ладугина удостоверяю.

Ученый секретарь, к.ф.-м.н.

Кротов Ю.А.



Список публикаций

официального оппонента М.А. Ладугина в рецензируемых научных изданиях по тематике диссертации Бутаева Марата Раджабали оглы «Эпитаксия низкоразмерных гетероструктур соединений A2B6 и создание полупроводниковых дисковых лазеров на их основе» за последние пять лет

1. Ладугин М.А., Андреев А.Ю., Яроцкая И.В., Рябоштан Ю.Л., Багаев Т.А., Падалица А.А., Мармалюк А.А., Васильев М.Г. Сравнительный анализ квантовых ям GaAs/GaInP и GaAs/AlGaAs, полученных в условиях МОС-гидридной эпитаксии // Неорганические материалы. - 2019. - Т.55. - №. 4. - С. 345-349.

2. Soboleva O., Podoskin A., Golovin V., Gavrina P., Zolotarev V., Pikhtin N., Slipchenko S., Bagaev T., Ladugin M., Marmalyuk A., Simakov V. Temperature

Dependence of the Turn-On Delay Time of High-Power Lasers-Thyristors // IEEE Transactions on Electron Devices. - 2019. - V. 66, - N. 4, - P. 1827.

3. Slipchenko S., Podoskin A., Golovin V., Romanovich D., Shamakhov V., Nikolaev D., Shashkin I., Pikhtin N., Bagaev T., Ladugin M., Marmalyuk A., Simakov V. High peak optical power of 1ns pulse duration from laser diodes – low voltage thyristor vertical stack // Optics Express. - 2019. - V. 27. - I. 22. - P. 31446-31455.

4. Ладугин М.А., Мармалюк А.А. Влияние параметров квантоворазмерной области (Al)GaAs/AlGaAs на пороговую плотность тока лазерных диодов // Квантовая электроника. - 2019. - Т. 49. - № 6, - С. 529-534.

5. Ладугин М.А., Гультиков Н.В., Мармалюк А.А., Коняев В.П., Соловьева А.В. Непрерывные лазерные диоды на основе эпитаксиально-интегрированных гетероструктур InGaAs/AlGaAs/GaAs // Квантовая электроника. - 2019. - Т.49. - № 10, - С. 905-908.

6. Ladugin M., Yarotskaya I., Bagaev T., Telegin K., Andreev A., Zaslavitskii I., Padalitsa A., Marmalyuk A. Advanced AlGaAs/GaAs heterostructures grown by MOVPE // Crystals. 2019. - V. 9. - N. 6, - P. 305-315.

7. Slipchenko S., Ladugin M., Marmalyuk A., Simakov V., Podoskin A., Golovin V., Gavrina P., Shamakhov V., Nikolaev D., Zolotarev V., Pikhtin N., Bagaev T. Low-Voltage AlGaAs/GaAs Thyristors as High-Peak-Current Pulse Switches for High-Power Semiconductor Laser Pumping // IEEE Transactions on Electron Devices. - 2020. - V. 67. - I. 1, - P. 193-197.

8. Волков Н. А. Сравнение полупроводниковых лазеров AlGaInAs/InP ($\lambda = 1450\text{--}1500$ нм) со сверхузким и сильно асимметричным типом волноводов / Н. А. Волков, В. Н. Светогоров, Ю. Л. Рябоштан, А. Ю. Андреев, И. В. Яроцкая, М. А. Ладугин, А. А. Падалица, А. А. Мармалюк, С. О. Слипченко, А. В. Лютецкий, Д. А. Веселов, Н. А. Пихтин // 2021 - Квантовая электроника – Т.51:4, С.283–286.

9. Бобрецова Ю. К., Веселов Д. А., Подоскин А. А., Воронкова Н. В., Слипченко С. О., Пихтин Н. А., Ладугин М. А., Багаев Т. А., Мармалюк А. А. Экспериментальная методика исследования оптического поглощения в волноводных слоях полупроводниковых лазерных гетероструктур // "Квантовая электроника", т. 51, № 3, 2021, С. 124 - 128

10. Подоскин А. А., Гаврина П. С., Головин В. С., Слипченко С. О., Романович Д. Н., Капитонов В. А., Мирошников И. В., Пихтин Н. А., Багаев Т. А., Ладугин М. А., Мармалюк А. А., Симаков В. А. Исследование пространственной динамики включения лазера-тиристора (905 нм) на основе многопереходной гетероструктуры AlGaAs/InGaAs/GaAs // "Физика и техника полупроводников", т. 55, № 5, 2021, С. 466 - 472

11. Волков Н.А., Телегин К.Ю., Гультиков Н.В., Сабитов Д.Р., Андреев А.Ю., Яроцкая И.В., Падалица А.А., Ладугин М.А., Мармалюк А.А., Козырев А.А.,

Шестак Л.И., Панарин В.А. Улучшение параметров вольт-амперной характеристики полупроводниковых лазеров InGaAs/AlGaAs/GaAs (940-980 нм) с расширенным асимметричным волноводом // Квантовая электроника, т. 52, № 2, 2022 С. 179 - 181.

12. Багаев Т.А., Ладугин М.А., Мармалюк А.А., Слипченко С.О., Веселов Д.А., Пихтин Н.А., Гаврина П.С., Романович Д.Н. Мощные импульсные полупроводниковые лазеры (910 нм) мезаполосковой конструкции со сверхширокой излучающей апертурой на основе туннельно-связанных гетероструктур InGaAs/AlGaAs/GaAs // Квантовая электроника, т. 52, № 2, 2022. С. 174 - 178.

13. Slipchenko S.O. Podoskin A.A., Veselov D.A., Strelets V.A., Rudova N.A., Pikhtin N.A., Kor'ev P.S., Bagaev T.A., Ladugin M.A., Marmalyuk A.A. Tunnel-Coupled Laser Diode Microarray as a kW-Level 100-ns Pulsed Optical Power Source ($\lambda = 910$ nm) // IEEE Photonics Technology Letters, vol. 34, no. 1, 2022, P. 35 - 38.

14. Слипченко С.О., Подоскин А.А., Золотарев В.В., Вавилова Л.С., Лешко А.Ю., Растегаева М.Г., Мирошников И.В., Шашкин И.С., Пихтин Н.А., Багаев Т.А., Ладугин М.А., Падалица А.А., Мармалюк А.А., Симаков В.А. Источник мощного импульсного лазерного излучения (1060 нм) с высокой частотой следования импульсов на основе гибридной сборки линейки лазерных диодов и 2D массива оптодиодов как высокоскоростного токового ключа // Квантовая электроника, т. 53, № 1, 2023, С. 11–16.