

## ОТЗЫВ

официального оппонента Тункина Владимира Григорьевича о диссертационной работе Бутаева Марата Раджабали оглы «Эпитаксия низкоразмерных гетероструктур соединений  $A_2B_6$  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 созданию и исследованию полупроводниковых дисковых лазеров (ПДЛ) с оптической накачкой, излучающих в сине-зеленой области спектра на основной частоте. Внутриврезонаторная генерация второй гармоники в таких лазерах позволит относительно легко освоить актуальный средний ультрафиолетовый диапазон спектра (~240-280 нм). Создание полупроводниковых дисковых лазеров видимого диапазона на основной частоте и среднего ультрафиолетового диапазона на второй гармонике является перспективным направлением развития лазерной техники.

Интенсивное развитие и многочисленные применения ПДЛ в целом связаны с высоким качеством лазерного пучка при больших (до ~100 Вт в CW режиме) мощностях, возможностью плавной перестройки длины волны излучения и освоением актуальных спектральных диапазонов: УФ, видимого, среднего ИК и терагерцового диапазонов. На их основе реализуются оптические параметрические генераторы среднего ИК диапазона, терагерцовые когерентные излучатели, высокочастотные генераторы коротких импульсов. Они имеют применения в разных областях науки и техники, в медицине, спектроскопии, лазерной локации летающих объектов и загрязнений атмосферы, в дисплейных применениях, для продольной накачки длинных лазерных сред, беспроводной оптической связи. Несмотря на высокий потенциал ПДЛ, к сожалению, они практически не разрабатываются в России.

Наиболее впечатляющие достижения в области разработок ПДЛ в настоящее время основываются на эпитаксиальной технологии изготовления гетероструктур  $A_3B_5$ , излучающих в основном на длине волны вблизи 1 мкм. Освоение видимого и ближнего УФ диапазона относительно легко осуществляется путем внутриврезонаторной генерации второй гармоники в этих лазерах. Однако, для дальнейшего продвижения в УФ область спектра, в частности в актуальный средний УФ необходимо осуществить с помощью генерации третьей или четвертой гармоники в ПДЛ на основе структур соединений  $A_3B_5$ , что приводит к существенному усложнению конструкции лазерной системы и понижению эффективности лазерной системы в целом. Для решения этой проблемы

целесообразно реализовать ПДЛ, излучающий в видимом диапазоне на основной частоте.

В связи с этим актуальным является использование резонансно-периодических структур из широкозонных соединений типа  $A_2B_6$  или  $A_3N$ . На основе нитридной технологии в настоящее время созданы эффективные InGaN/GaN лазерные диоды фиолетового диапазона и светодиоды синего и зеленого диапазонов. Однако возникли существенные трудности получения активных гетероструктур InGaN/GaN для полупроводниковых дисковых лазеров. С одной стороны, остается практически нерешенной проблема создания встроенного высокоотражающего бездефектного брэгговского зеркала. С другой стороны, активную часть гетероструктуры практически невозможно перенести с ростовой подложки (обычно это  $Al_2O_3$ ) на другую прозрачную теплопроводящую подложку, чтобы использовать внешнее высокоотражающее зеркало.

Проблема переноса активной гетероструктуры  $A_2B_6$  соединений на другую подложку решается относительно просто путем селективного травления ростовой подложки (GaAs). Лазерный диод на соединениях  $A_2B_6$  (гетероструктуры ZnSe/ZnMgSSe) был впервые запущен в 1991 году. Однако до сих пор не удалось решить проблему деградации этих лазеров, связанную в основном с деградацией р-типа проводимости и контактов. В полупроводниковых дисковых лазерах с оптической накачкой лазерными диодами такой проблемы нет. Для накачки не требуется создания р-п перехода и контактов. Гетероструктуры  $A_2B_6$  зеленого, желтого или красного излучения могут быть накачены излучением фиолетовых InGaN/GaN лазерных диодов, которые коммерчески доступны в настоящее время.

Таким образом, в связи с вышесказанным, диссертационная работа М.Р. Бутаева, посвященная эпитаксиальному росту гетероструктур  $A_2B_6$  и созданию на их основе ПДЛ, работающего в сине-зеленой области спектра, является несомненно **актуальной**.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Полный объем диссертации составляет 190 страниц, включая 12 таблиц и 106 рисунков. Список использованной литературы содержит 151 наименование.

Во **введении** подробно обосновывается актуальность выбранной темы исследования, характеризуется степень ее разработанности, определяются цель и задачи, а также формулируются основные положения, выносимые на защиту и научная новизна работы.

**Первая глава** посвящена литературному обзору по теме диссертации. В этой главе автором: приведена классификация полупроводниковых ГС по разрыву зон;

проведен анализ современного состояния развития ПДЛ; описаны принципы работы современных ПДЛ; приведены пути освоения зеленого и среднего УФ диапазонов с помощью ПДЛ, а также перечислены возможные области применения таких лазеров; дан краткий обзор использования гетероструктур АЗВ5 2-го типа в ПДЛ.

**Вторая глава** посвящена обоснованию выбора новых гетероструктур 2-го типа Cd(Zn)S/Zn(S)Se из соединений  $A^2B^6$  для разработки ПДЛ. Для зеленой области спектра наиболее перспективной является гетероструктура CdS/ZnSe/ZnSSe.

**Третья глава** посвящена моделированию и расчету исследуемых гетероструктур. С целью определения возможности использования гетероструктур CdS/ZnSe/ZnSSe в полупроводниковых лазерах зеленого диапазона с оптической накачкой, в частности в ПДЛ, особое внимание уделено расчетам спектров оптического усиления и люминесценции исследуемых гетероструктур в зависимости от уровня накачки, которая основана на согласованном решении уравнений Пуассона и Шредингера. Рассчитаны зонные диаграммы гетероструктур и интеграл перекрытия волновых функций электрона и дырки, которые сильно зависят от уровня возбуждения для структур с разрывами зон 2-го типа. В результате расчетов показано, что при комнатной температуре на длине волны вблизи 525 нм расчетное значение коэффициента оптического усиления в гетероструктуре CdS/ZnSe/ZnSSe может превышать  $5000 \text{ см}^{-1}$  ( $\sim 10^{-3}$  на одну КЯ) при достижимых уровнях концентрации неравновесных носителей  $1.5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ . Такое усиление достаточно для реализации полупроводниковых лазеров зеленого диапазона с оптической накачкой на основе гетероструктуры с 10 КЯ при использовании зеркал с реально достижимыми коэффициентами отражения  $R_1 \cdot R_2 \approx 0.98$ .

В этой главе также рассчитаны критические толщины всех слоев, входящих в гетероструктуру, рассчитаны упругие напряжения в слоях, формирующих квантовые ямы, и на основе этого определены составы барьерных слоев, необходимые для компенсации данных упругих напряжений в гетероструктурах. Установлено, что для компенсации упругих напряжений, возникающих в гетероструктурах с десятью КЯ CdS/ZnSe/ZnSSe, необходимо повысить содержание S в барьерных слоях до  $\approx 10\%$ . Также рассчитаны толщины буферного, барьерных и покровного слоев для достижения резонансно-периодического усиления на заданной длине волны генерации ПДЛ.

Кроме того, в данной главе проведены расчеты зонной диаграммы гетероструктуры для случая взаимной диффузии атомов Cd и Zn в процессе выращивания гетероструктуры методом газофазной эпитаксии из элементоорганических соединений (ГФЭЭОС).

**Четвертая глава** посвящена выращиванию квантоворазмерных гетероструктур CdS/ZnSe/ZnSSe методом ГФЭЭОС и их диагностике методами люминесцентной микроскопии, фото- и катодолюминесценции, атомно-силовой и просвечивающей электронной микроскопии, рентгеновской дифрактометрии. Сначала приведено описание лабораторной установки ГФЭЭОС и подробно описана технология выращивания исследуемых гетероструктур. Обнаружено, что при температуре роста  $\sim 450^\circ\text{C}$  и соотношении потоков элементноорганических соединений VI/II  $> 10$ , обычно используемых при эпитаксии соединений  $A_2B_6$ , наблюдается взаимная диффузия атомов Cd и Zn в процессе эпитаксиального роста, что приводит к неоднородности КЯ по глубине гетероструктуры и ухудшению характеристик лазера. Найдено, что понижение соотношения VI/II до 2-4 при выращивании тонких слоев CdS и ZnSe существенно подавляет эту диффузию.

В этой главе также описана технология изготовления активных элементов (АЭ) полупроводниковых лазеров с продольной накачкой из выращенных ГС соединений  $A^2B^6$ , которая включает нанесение зеркального покрытия на поверхность ГС, приклеивание этой поверхностью к сапфировой подложке, удаление ростовой подложки GaAs. В случае лазера с микрорезонатором (МР), на освободившуюся поверхность ГС наносится второе зеркальное покрытие. В ПДЛ используется внешнее зеркало.

**Пятая глава** посвящена описанию и обсуждению различных полупроводниковых лазеров, реализованных на основе выращенных гетероструктур. Были реализованы лазеры с микрорезонатором и полупроводниковые дисковые лазеры при продольной оптической накачке как излучением азотного лазера на длине волны 337 нм, так и излучением лазерного диода на длине волны  $\sim 440$  нм.

**В заключении** перечислены основные выводы работы.

**Научная новизна** работы заключается в том, что в ней впервые: а) методом газофазного осаждения из элементноорганических соединений выращены гетероструктуры CdS/ZnSe/ZnSSe с резонансно-периодическим усилением для полупроводниковых лазеров, излучающих в зеленой области спектра; б) проведен расчет коэффициента оптического усиления для гетероструктуры CdS/ZnSe с разрывами зон 2-го типа; в) с помощью атомно-силового микроскопа обнаружено разделение носителей заряда в гетероструктуре 2-го типа CdS/ZnSe; г) найден способ подавления обнаруженного эффекта взаимной диффузии атомов Cd и Zn в гетероструктуре CdS/ZnSe, приводящий к размазыванию квантовой ямы в процессе выращивания структуры; д) на выращенных гетероструктурах CdS/ZnSe/ZnSSe с резонансно-периодическим усилением реализованы различные (лазер с

микрорезонатором, ПДЛ) полупроводниковые лазеры с продольной оптической накачкой, излучающие в зеленой области спектра.

**Научная и практическая ценность** диссертации в основном заключается в реализации ПДЛ на основе новой гетероструктуры CdS/ZnSe/ZnSSe с разрывами зон 2-го типа из соединений  $A^2B^6$ , который излучает в зеленой области спектра на основной частоте. Это является важным этапом для продвижения в востребованный средний УФ диапазон с помощью генерации второй гармоники внутри резонатора ПДЛ зеленого диапазона.

Вместе с тем, по диссертации имеются следующие **замечания**:

1. Наиболее важный для практического применения непрерывный режим пока не достигнут. Желательно было бы привести некоторые оценки возможности достижения непрерывного режима на основании полученных значений пороговой интенсивности генерации в импульсном режиме.

2. Достигнутые характеристики дискового лазера пока недостаточно высоки. В диссертации указываются возможные причины, однако они еще не проверены.

3. В §3.1.3 диссертации при расчете компенсации упругих напряжений, кроме толщины квантовой ямы должны были быть указаны толщины также всех других слоев гетероструктуры, так как изменяемой величиной является только состав серы вне квантовой ямы. Только прочитав другие параграфы диссертации, можно понять, что для типичной гетероструктуры с одиночными квантовыми ямами, буферный слой имеет толщину, равную  $2 \cdot \lambda/2n$  (~190 нм), а барьерные слои и покровной слой имеют примерно одинаковые толщины в  $\lambda/2n$  (~95 нм).

Вышеуказанные замечания не носят принципиальный характер и не снижают научную ценность достигнутых в диссертации результатов. Сделанные выводы и защищаемые научные положения достаточно **обоснованы**. Работа выполнена на высоком научном уровне, в ней получены ряд новых и практически значимых результатов, достоверность которых не вызывает сомнений. Результаты, достигнутые в диссертации опубликованы в девяти рецензируемых научных

статьях. Автореферат правильно и достаточно хорошо отражает содержание диссертации.

На основе всего вышесказанного, 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,  
ведущий научный сотрудник  
физического факультета  
МГУ имени М.В.Ломоносова,  
д.ф.-м. наук

Тункин Владимир Григорьевич

«10» сентября 2023 г.

Тел. +7-910-088-30-13; e-mail: vladimirtunkin@mail.ru

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», физический факультет, 119991 Москва, Ленинские горы, д.1, корп.2.

Декан физического факультета  
МГУ имени М.В.Ломоносова,  
профессор

В.В.Белокуров

## Список публикаций

официального оппонента В.Г. Тункина в рецензируемых научных изданиях по тематике диссертации Бутаева Марата Раджабали оглы «Эпитаксия низкоразмерных гетероструктур соединений A<sub>2</sub>B<sub>6</sub> и создание полупроводниковых дисковых лазеров на их основе» за последние пять лет

1) E.A.Cheshev, M.V.Gorbunkov, P.V.Kostryukov, M.S.Krivos, V.G.Tunkin. Asymmetric behavior of threshold pump power of Nd:YAG diode end-pumped laser in critical cavity configurations. *Laser Physics Letters* 16 (2019) 03501.

2) M.V.Gorbunkov, P.V.Kostryukov, V.G.Tunkin. Sharp focusing of superpositions of Hermite-Gaussian modes locked in fractionally degenerate cavity. *Laser Physics* 29 (2019) 15003.

3) M.V.Gorbunkov, Yu.Maslova, Yu.V.Shabalin, V.G.Tunkin. Analysis of self-starting harmonic mode-locking in a electro-optic feedback laser. *IEEE Journal of Quantum Electronics* 57, 1300208 (2021).

4) V.Morozov, A.Olenin, V.Tunkin, D.Yakovlev, V.Rusov, A.Gorchakov, S.Doroganov. Picosecond pulsed-periodic high-peak power Nd:YAG laser operationally controlled by KTP based Pockels cell. *Crystals* 2022, 12, 368.

5) M.V.Gorbunkov, Yu.Y.Maslova, Y.V.Shabalin, V.G.Tunkin. Variable repetition rate picosecond master oscillator for photoelectron gun. *Photonics* 2022, 9, 106.