

На правах рукописи

Гронин Сергей Вячеславович

**НИЗКОПороГОВЫЕ ЛАЗЕРНЫЕ ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ ЗЕЛЕНОГО И
ЖЕЛТОГО СПЕКТРАЛЬНОГО ДИАПАЗОНА НА ОСНОВЕ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК
CdSe/Zn(Cd)Se, ВЫРАЩЕННЫЕ НА АРСЕНИДЕ ГАЛЛИЯ МЕТОДОМ
МОЛЕКУЛЯРНО-ПУЧКОВОЙ ЭПИТАКСИИ**

специальность

01.04.10 - физика полупроводников

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург

2015

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки
Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук

Научный руководитель: **Иванов Сергей Викторович**
доктор физико-математических наук, профессор
зав. лабораторией Квантоворазмерных гетероструктур
ФТИ им. А.Ф. Иоффе

Официальные оппоненты: **Козловский Владимир Иванович**
доктор физико-математических наук, профессор
зав. лабораторией, ФГБУН Физический институт
им. П.Н. Лебедева Российской академии наук

Новиков Алексей Витальевич
кандидат физико-математических наук
зав. лабораторией ФГБУН Институт физики
микроструктур Российской академии наук

Ведущая организация: Институт физики, нанотехнологий и телекоммуникаций (ИФНиТ),
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет (СПбГПУ), Санкт-
Петербург

Защита состоится "17" декабря 2015 г. в ____ час. на заседании диссертационного
совета Д 002.205.02 при ФТИ им. А.Ф. Иоффе по адресу: 194021, Санкт-Петербург,
ул. Политехническая, д.26.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФТИ им. А.Ф. Иоффе, адрес
сайта: www.ioffe.ru

Отзывы о диссертации в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по
вышеуказанному адресу ученому секретарю диссертационного совета. Д 002.205.02.

Автореферат разослан " ____ " _____ 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор физико-математических наук

Л.М. Сорокин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Одной из основных задач физики и технологии, полупроводниковых гетероструктур в течение последних десятилетий является развитие высокоэффективной оптоэлектроники, освоение новых ранее не доступных спектральных диапазонов. В последние 20-25 лет одним из наиболее перспективных направлений в данной области является создание полупроводниковых излучателей (лазеров, светодиодов) в видимой области спектра, от синей (490 нм) до желтой (590 нм). Актуальность зеленой ($\lambda=500 - 550$ нм) области спектра, пока еще освоенной лишь частично, вызвана широкой сферой практических применений. Одно из них - портативные лазерные проекционные устройства, как ожидается, в ближайшее десятилетие станет движущей силой рынка компактных полупроводниковых лазеров зеленого спектрального диапазона. Стоит также отметить практические применения, связанные с окнами прозрачности атмосферы и морской воды, а именно возможность обеспечения всепогодной навигации морских и воздушных судов, возможность реализации систем беспроводной связи. Лазеры, излучающие в желтой области (550-590 нм) видимого спектра интересны, во-первых, благодаря возможности расширения цветового диапазона проекционных устройств, во-вторых, для использования в медицине, в частности, в офтальмологии для операции фотокоагуляции.

Несмотря на жесткую конкуренцию с лазерными диодами (ЛД) на основе InGaN [1,2], обострившуюся в 2012 г., гетероструктуры (ГС) широкозонных соединений A^2B^6 по-прежнему являются перспективными полупроводниковыми материалами, для получения стимулированного излучения в зеленой (530-550 нм), а тем более в желтой (550-590 нм) областях спектра. Зеленые ЛД на основе ZnSe были впервые продемонстрированы в 1991 г. [3], а в 1993г. благодаря быстрому развитию технологии широкозонных материалов A^2B^6 , в основном молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ), были экспериментально реализованы ЛД, работающие при комнатной температуре в непрерывном режиме. Тем не менее, максимальное достигнутое время жизни таких приборов составило всего 400 часов [4], при этом основной причиной деградации в отсутствие структурных дефектов явилась нестабильность азотного акцептора [5]. При использовании оптической накачки не требуется создание p-n перехода, что позволяет избежать проблем связанных с p-легированием.

На момент начала диссертационной работы (2007 г.) в ФТИ им. А.Ф. Иоффе были разработаны основы технологии МПЭ широкозонных ГС A^2B^6 , излучающих в зеленой области спектра (500-550 нм), и достигнуты значительные успехи в получении и исследовании нелегированных лазерных ГС на основе ZnSe с квантовыми точками (КТ) CdSe/ZnSe в активной области. В частности, при оптической накачке таких гетероструктур получена высокая квантовая эффективность ($\sim 40\%$) и рекордно низкая пороговая плотность мощности (~ 2.5 кВт/см², $T=300$ К) [6]. Также продемонстрирована возможность использования подобных наноструктур в качестве активных элементов фиолетово-зеленого лазерного конвертера, использующего излучение оптически накачиваемого A^3N лазера для возбуждения лазерной гетероструктуры A^2B^6 [7].

Несмотря на то, что использование оптически накачиваемых нелегированных ГС позволяет уйти от проблем p-легирования A^2B^6 и связанного с ними малого времени жизни ЛД на основе ZnSe, необходимость снижения пороговой плотности мощности лазерных ГС A^2B^6 , повышения выходной мощности лазерных конвертеров A^3N/A^2B^6 , расширения спектрального диапазона в желтую область спектра предъявляла повышенные требования к дальнейшей разработке конструкции таких ГС и технологии их выращивания ме-

тодом МПЭ. В частности, в области технологии МПЭ требовалось оптимизировать начальную стадию гетероэпитаксиального роста на подложках GaAs с целью минимизации плотности дефектов упаковки, возникающих на гетеровалентном интерфейсе GaAs/ZnSe, обеспечить высокую точность контроля температуры эпитаксии в диапазоне 250-350°C из-за сильной температурной зависимости коэффициентов встраивания основных элементов, а также реализовать прецизионную компенсацию упругих напряжений в гетероструктурах, вызванных сильным различием постоянной решетки бинарных соединений A^2B^6 .

Цель работы заключалась в создании методом МПЭ и комплексном исследовании структурных, фотолуминесцентных и лазерных характеристик ГС с активной областью на основе КТ CdSe/Zn(Cd)Se, излучающих в зеленой (500-550 нм) и желтой (550-590 нм) областях видимого спектра и предназначенных для использования в качестве активных элементов инжекционных лазерных конвертеров A^2B^6/A^3N .

Для достижения поставленной цели в ходе работы решались следующие **основные задачи**:

1. изучение физических закономерностей и отработка технологических режимов МПЭ тройных и четверных твердых растворов ZnS_xSe_{1-x} и $Zn_{1-x}Mg_xS_ySe_{1-y}$ при низких и высоких температурах эпитаксии.
2. разработка конструкции и технологических режимов роста методом МПЭ лазерного волновода с плавным изменением показателя преломления на основе короткопериодных сверхрешеток (СР), включающих слои ZnSe, а также тройных и четверных твердых растворов ZnS_xSe_{1-x} и $Zn_{1-x}Mg_xS_ySe_{1-y}$, согласованного по постоянной решетки с подложкой GaAs.
3. разработка технологических подходов для выращивания методом МПЭ ГС на основе полупроводников A^2B^6 на подложках GaAs, обладающих плотностью дефектов упаковки, зарождающихся на гетеровалентном интерфейсе ZnSe/GaAs, менее 10^5 см^{-2} .
4. решение задачи по снижению плотности неравновесных точечных дефектов, возникающих в активной области с КТ CdSe/Zn(Cd)Se в процессе МПЭ лазерных ГС A^2B^6 ;
5. проведение теоретической оценки максимальной достижимой длины волны излучения в системе КТ CdSe/Zn(Cd)Se, с учетом ограничений, накладываемых как критической толщиной формирования оптически активных КТ, так и критической толщиной пластической релаксации структуры в целом;
6. разработка оригинальных технологических подходов МПЭ и конструктивных решений, позволяющих преодолеть ограничения критической толщины при формировании ГС с несколькими плоскостями КТ CdSe/ZnSe, а также с КТ CdSe в матрице ZnCdSe, и их экспериментальная проверка;
7. исследование взаимосвязи различных условий эпитаксиального роста и способов формирования активной области с величиной внутреннего квантового выхода ГС с КТ CdSe/Zn(Cd)Se.
8. исследование методом оптической спектроскопии и просвечивающей электронной микроскопии эффекта сегрегации Cd в процессе МПЭ КТ CdSe в матрице ZnCdSe и его влияния на однородность массива КТ, их состав и размер.
9. исследование влияния конструкции активной и волноводной областей лазерных ГС (количество плоскостей КТ, их расположение в волноводе и т.д.) на их лазерные характеристики.

10. реализация компактных эффективных источников когерентного излучения (инжекционных лазерных конвертеров A^2B^6/A^3N) излучающих в зеленом и желтом диапазонах спектра (530-590 нм) на основе наногетероструктур A^2B^6 , изорешеточных с GaAs.

Научная новизна полученных результатов:

1. Впервые для ГС широкозонных полупроводников A^2B^6 разработана концепция плавного варьирования ширины запрещенной зоны (E_g) при одновременной компенсации локальных упругих напряжений за счет использования широкого набора переменнотензионных СП на основе соединений ZnMgSSe/ZnSe и ZnSSe/ZnSe, позволяющая выращивать методом МПЭ высокосовершенные псевдоморфные ГС с заранее заданным профилем E_g без изменения технологических параметров (температур подложки и источников молекулярных пучков) в процессе роста.
2. Разработана и экспериментально реализована конструкция лазерных ГС A^2B^6 с волноводом с плавным изменением показателя преломления на основе СП Zn(Mg)SSe/ZnSe, обладающих повышенным значением фактора оптического ограничения и улучшенным транспортом неравновесных носителей заряда к активной области, которые привели к двукратному снижению пороговой плотности мощности возбуждения (до 1.2-1.5 кВт/см²).
3. Разработан оригинальный метод снижения плотности неравновесных точечных дефектов в активной области лазерных ГС с КТ CdSe/ZnSe посредством роста барьерных слоев ZnSe методом эпитаксии с повышенной миграцией (ЭПМ) атомов и повышения температуры эпитаксии Zn(S)Se волновода за счет исключения использования элементарного источника Zn. Это привело к повышению внутренней квантовой эффективности ГС и снижению пороговой плотности мощности до 0.8 кВт/см².
4. Предложена оригинальная конструкция активной области на основе КТ CdSe, в которой для увеличения длины волны излучения в желтую область видимого спектра КТ CdSe помещаются в напряженную КЯ Zn_{1-x}Cd_xSe. На основании теоретических оценок методом огибающей волновой функции с учетом Гауссова размытия плоскости КТ и частичной релаксации их упругих напряжений определены области составов ($x=0.4-0.5$) и толщин (3-4 нм) КЯ, позволяющих достичь длины волны излучения 600 нм. Реализованы методом МПЭ ГС с КТ CdSe/Zn_{1-x}Cd_xSe и проведены комплексные исследования их структурных и фотолюминесцентных (ФЛ) свойств, подтвердившие теоретические оценки.
5. Впервые предложено для сохранения псевдоморфности активной области КТ CdSe в матрице КЯ Zn_{1-x}Cd_xSe, подверженной сильной упругой деформации сжатия, использовать короткопериодные СП ZnS_xSe_{1-x}/ZnSe ограничивающих волноводных слоев с упругой деформацией растяжения. Благодаря этому удалось преодолеть ограничения критической толщины КЯ Zn_{1-x}Cd_xSe с высоким $x \sim 50\%$ и существенно снизить плотность протяженных дефектов в активной области, что позволило достичь эффективной лазерной генерации на длине волны 593 нм при рекордно низкой пороговой плотности мощности 2.5 кВт/см².
6. Проведено комплексное исследование и выполнено детальное сравнение активных областей двух типов: симметричной, в которой КТ CdSe формируются в середине КЯ Zn_{1-x}Cd_xSe, и асимметричной, в которой КТ CdSe формируются на поверхности ZnSe с последующим зарастиванием КЯ Zn_{1-x}Cd_xSe. Установлено, что в асимметричном случае бинарная поверхность зарождения КТ и эффект более продолжительной сегрегации Cd

в процессе МПЭ КЯ приводит к повышению однородности массива КТ и увеличению содержания в них Cd, что способствует красному сдвигу и повышению интенсивности ФЛ по сравнению с симметричным случаем при одинаковых параметрах КТ и КЯ.

7. На основе оптимизированных лазерных характеристик ГС A^2B^6 (пороговой плотности мощности, характеристического усиления, внутренней квантовой эффективности и внутренних потерь) был определен диапазон длин лазерного резонатора (100-160 мкм), соответствующих минимальной пороговой мощности, необходимой для возбуждения структур с помощью ЛД InGaN в составе инжекционного лазерного конвертора.

Научная и практическая значимость работы:

1. Разработан и экспериментально апробирован комплекс мер по оптимизации начальной стадии формирования гетероинтерфейса ZnSe/GaAs, который позволяет воспроизводимо получать методом МПЭ гетероэпитаксиальные лазерные ГС на основе полупроводников A^2B^6 , а также структуры гетеровалентных солнечных элементов A^3B^5/A^2B^6 с предельно низкой плотностью протяженных дефектов $\sim 10^4 \text{ см}^{-2}$.
2. Разработана методика экспресс-контроля плотности и типов структурных дефектов в ГС A^2B^6/GaAs с помощью метода ФЛ микроскопии в видимом спектральном диапазоне.
3. Разработаны и созданы методом МПЭ полупроводниковые лазерные ГС в системе ZnMgSSe/ZnCdSe с одиночной плоскостью КТ CdSe/ZnSe, продемонстрировавшие излучение в диапазоне длин волн 530-550 нм с наименьшим значением пороговой плотности мощности 0.8 кВт/см^2 при комнатной температуре, что является рекордным значением в мире для данного диапазона и для полупроводников A^2B^6 .
4. Лазерные ГС, оптимизированные по максимальному фактору оптического ограничения, с активной областью, содержащей пять электронно-связанных плоскостей КТ CdSe/ZnSe и расположенной в асимметричном варизонном волноводе на основе CP Zn(Mg)SSe/ZnSe, продемонстрировали при оптической накачке азотным лазером (337.1 нм, 1 кГц, 10 нс) максимальную внутреннюю квантовую эффективность 80.5% и максимальную выходную импульсную мощность 25 Вт на зеркало на длине волны $\sim 540 \text{ нм}$ (300 К) при пороговой плотности мощности возбуждения 2 кВт/см^2 .
5. На основе низкопороговых лазерных ГС A^2B^6 , излучающих в зеленом спектральном диапазоне (520-550 нм), созданы прототипы инжекционных полупроводниковых лазерных конвертеров на микрочипе (ТО-18) с оптической накачкой коммерческим ЛД InGaN/GaN ($\lambda=437 \text{ нм}$), продемонстрировавшие максимальную выходную импульсную мощность 1.3 Вт ($\tau_n=4\text{нс}$) и 160 мВт ($\tau_n=200\text{нс}$) с максимальной квантовой эффективностью конверсии $\sim 14\%$ при пороговой мощности импульса накачки 0.5 Вт. Соответствующие параметры конвертеров для зелено-желтого спектрального диапазона (558-566 нм) составили 90 мВт ($\tau_n=200 \text{ нс}$) с квантовой эффективностью $\sim 4.5\%$ при пороговом токе 720 мА. По своим характеристикам данные компактные лазерные излучатели сопоставимы с лазерными диодами на основе InGaN в зеленом спектральном диапазоне, а в желто-зеленой области спектра не имеют аналогов.
6. Разработана конструкция лазерных ГС A^2B^6/GaAs с КТ CdSe (2.8-3 монослоя) в КЯ $\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Se}$ ($x=0.3-0.5$), упругие напряжения сжатия в которой компенсируются напряжениями растяжения в ограничивающей волноводной CP, излучающих в желтом спектральном диапазоне 570-595 нм, и впервые в мире получена лазерная генерация при

комнатной температуре на длине волны 593 нм с низкой пороговой плотностью мощности возбуждения 2.5 кВт/см².

7. На базе отечественного технологического оборудования МПЭ компании ЗАО «НТО» (Санкт-Петербург) разработана технология, позволяющая выращивать высокосовершенные полупроводниковые ГС А²В⁶ на подложках GaAs диаметром до 100 мм.

Положения, выносимые на защиту.

1. Использование волновода на основе переменного-напряженных CP ZnMgSSe/ZnSe и ZnSSe/ZnSe с плавно уменьшаемой в направлении активной области эффективной шириной запрещенной зоны и контролируемым рассогласованием параметра кристаллической решетки позволяет улучшить сбор неравновесных носителей заряда в активную область лазерной гетероструктуры ZnMgSSe/ZnSSe/CdSe и увеличить фактор оптического ограничения при сохранении ее общей когерентности по отношению к подложке GaAs, что, в свою очередь, приводит к двукратному снижению пороговой плотности мощности при оптической накачке.
2. Формирование лазерных ГС А²В⁶ зеленого спектрального диапазона (520-550 нм) в более равновесном режиме МПЭ, заключающемся в повышенной температуре роста тройных и четверных твердых растворов ZnSSe и ZnMgSSe при использовании только источников Zn, Mg и Se без добавочного потока Zn и применении эпитаксии с повышенной миграцией атомов для роста барьерных областей ZnSe КТ CdSe, позволяет повысить их внутреннюю квантовую эффективность за счет уменьшения плотности неравновесных дефектов в активной области и снизить пороговую плотность мощности с 1.1 до 0.8 кВт/см² при 300 К.
3. Использование КЯ ZnCdSe в качестве асимметричного ограничивающего слоя для КТ CdSe в активной области лазерных ГС А²В⁶, выращенных на подложках GaAs, одновременно с компенсацией сильных напряжений сжатия в активной области CdSe/ZnCdSe посредством введения упруго растянутых волноводных CP ZnSSe/ZnSe, позволяет увеличить длину волны низкороговой лазерной генерации из КТ CdSe до 593 нм при сохранении высокого кристаллического совершенства, причем доминирующее влияние на красный сдвиг длины волны оказывает увеличение содержания Cd в КЯ ZnCdSe до 45-50 мол.% при суммарной толщине КЯ не более 4 нм.
4. Длина резонатора в диапазоне 100-160 мкм соответствует минимальной пороговой мощности накачки лазерных ГС А²В⁶ с варизонным волноводом и КТ CdSe/ZnSe, необходимой для их возбуждения с помощью ЛД InGaN в составе инжекционного лазерного конвертора и достижения его максимальных выходной мощности и коэффициента конверсии.

Апробация работы. Материалы диссертационной работы докладывались и обсуждались на российских и международных конференциях и симпозиумах: 6, 9, 10, 11, 12 Российская конференция по физике полупроводников (Екатеринбург 2007, Новосибирск-Томск 2009, Нижний Новгород 2011, Санкт-Петербург 2013, Звенигород 2015); 13, 14, 15, 16, 17 Международная конференция по соединениям А²В⁶ (Корея 2007, Россия 2009, Мексика 2011, Япония 2013, Франция 2015); 3 Всероссийский симпозиум "Полупроводниковые лазеры: физика и технология" (Санкт-Петербург 2012); Международный форум по нанотехнологиям (Rusnanotech) (Москва 2008); Международная конференция по оптике лазеров (Санкт-Петербург 2008); 7, 8, 9, 10 Беларусско-Российский семинар «Полупро-

водниковые лазеры и системы на их основе» (Минск, Беларусь 2009, 2011, 2013, 2015); 16, 21 Международный симпозиум «Наноструктуры: Физика и технология» (Владивосток 2008, Санкт-Петербург 2013); 17 Европейская конференция по МПЭ (Финляндия 2013); 15, 16, 18 Международная конференция по МПЭ (Канада 2008, Германия 2010, США 2014); Конференция по физике и астрономии для молодых ученых Санкт-Петербурга и Северо-Запада "ФизикА.СПб" (Санкт-Петербург 2010); 37, 44 Международная школа по физике полупроводниковых соединений (Польша 2008, Польша 2014); 9 Всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике (Санкт-Петербург 2007).

Публикации. По теме диссертации опубликовано более 19 работ, включая 14 статей в рецензируемых научных журналах, соответствующих перечню, рекомендованному ВАК.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Общий объем работы составляет 154 страницы, включая 69 рисунков, 8 таблиц и список цитируемой литературы из 113 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность проведенных в работе исследований, сформулирована основная цель и задачи работы, показаны научная новизна и практическая значимость полученных результатов, приведены выносимые на защиту научные положения.

Первая глава представляет собой литературный обзор, в котором описаны основные структурные, электронные и оптические свойства бинарных широкозонных соединений A^2B^6 и твердых растворов на их основе. При этом особое внимание уделялось исследованиям дисперсии показателя преломления этих соединений, использованной далее в расчетах лазерных волноводов. Приведен обзор исследований по созданию полупроводниковых лазеров, излучающих в зеленой и желтой областях видимого спектра, на основе различных соединений A^3P , A^3N и A^2B^6 , включая и предыдущие работы, выполненные в ФТИ им. А.Ф. Иоффе. Показана перспективность полупроводников A^2B^6 для создания эффективных лазеров с оптической накачкой для данной спектральной области, в том числе компактных лазерных конвертеров, в которых накачка ГС A^2B^6 осуществляется излучением ЛД A^3N . Выполнена постановка задач, направленных на существенное улучшение лазерных характеристик ГС A^2B^6 и снижение их пороговой плотности мощности накачки.

Во **второй главе** описано применявшееся технологическое оборудование и основные методики исследования структурных, оптических и лазерных свойств выращенных ГС. Дано подробное описание установки МПЭ на примере отечественной двухреакторной установки SemiTEq STE3526 разработки компании ЗАО «НТО» (г. С.-Петербург, Россия). Для *in situ* диагностики роста использовались: ионизационный манометр Байярда-Альперта для измерения эквивалентного давления в молекулярных пучках в ростовом положении подложки и система дифракции быстрых электронов на отражение (ДБЭО), позволяющая контролировать доминирующий (2D или 3D) механизм роста эпитаксиального слоя, шероховатость поверхности и ее стехиометрию, а также измерять скорость роста и состав твердого раствора по монослойным осцилляциям интенсивности отраженного

электронного пучка. Значительное внимание уделено методике определения и контроля истинной температуры подложки (T_s) в низкотемпературном процессе МПЭ соединений A^2B^6 при использовании радиационного нагрева.

Для структурной характеристики использовались методы рентгеновской дифрактометрии (РД) и просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) как в геометрии поперечного сечения, так и с поверхности образца, включая и высокоразрешающую растровую ПЭМ с регистрацией высокоугловых прошедших электронов. Предложена оригинальная методика контроля плотности и типов дефектов в ГС с КТ CdSe, излучающих в видимом спектральном диапазоне, с помощью метода люминесцентной микроскопии (ЛМ). Фотолюминесцентные (ФЛ) свойства синтезируемых ГС исследовались в диапазоне 77-300К при возбуждении непрерывными лазерами: He-Cd ($\lambda = 325$ нм) и «Cube» (Coherent, $\lambda = 404$ нм) и детектировании спектров с помощью CCD камеры по стандартной методике «lock-in». Лазерные характеристики ГС при оптической накачке были исследованы при комнатной температуре в поперечной геометрии возбуждения. Для накачки использовалось излучение импульсного N_2 -лазера ($\lambda = 337.1$ нм $\tau = 10$ нс, $f < 1$ кГц), сфокусированное в полосу шириной 200 мкм.

Особое внимание уделено разработке комплексной методике формирования гетероинтерфейса $A^2B^6/GaAs$ для получения методом МПЭ ГС с низкой плотностью протяженных дефектов [A3], которая является также ключевым условием формирования структурно совершенного когерентного интерфейса Zn(Cd)Se/Ga(In)As при выращивании ГС многопереходных гибридных солнечных элементов [A4]. Разработанная методика позволяет получать ГС A^2B^6 с рекордно низкой плотностью дефектов упаковки $\sim 10^4$ - 10^5 см $^{-2}$ (рис. 1).

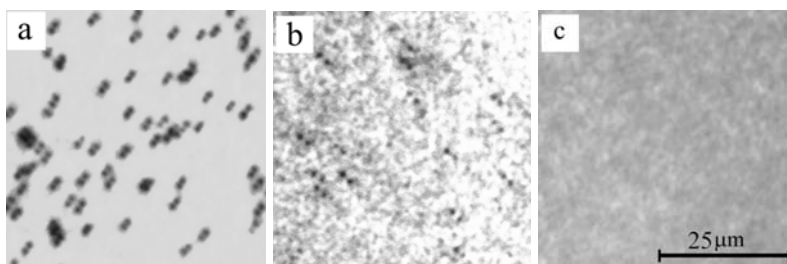


Рис. 1. ЛМ-изображения с поверхности ГС с КТ CdSe при различных режимах начальной стадии формирования гетеровалентного интерфейса GaAs/ZnSe: а) МПЭ при $T_s=270^\circ\text{C}$, плотность ДУ – 10^6 см $^{-2}$, в) ЭПМ при $T_s=210^\circ\text{C}$, плотность ДУ – 10^5 см $^{-2}$ с) ЭПМ при $T_s=210^\circ\text{C}$ и снижении температуры источника ZnS на 200°C относительно рабочего значения, плотность ДУ – 10^4 см $^{-2}$.

Третья глава диссертационной работы посвящена разработке оригинальной конструкции и технологии МПЭ низкопороговых лазерных ГС с КТ CdSe зеленого спектрального диапазона и исследованию их структурных, оптических и лазерных свойств.

В §3.1 для снижения порога лазерных ГС A^2B^6 предложено использовать волновод с переменным показателем преломления (ПП), позволяющий как увеличить фактор оптического ограничения (Γ), так и улучшить сбор носителей заряда в активную область КТ CdSe вследствие встроенного электрического поля. Конструкция волновода с переменным ПП реализуется на основе набора короткопериодных переменного-напряженных СР типа $Zn_{1-x}Mg_xS_ySe_{1-y}/ZnSe$ и $ZnS_ySe_{1-y}/ZnSe$ с плавно изменяемыми периодом и отношением толщин ям и барьеров при неизменной концентрации Mg и S в слоях. Расчет параметров

СР $Zn_{1-x}Mg_xS_ySe_{1-y}/ZnSe$ в модели бесконечной одномерной СР позволил обеспечить максимальное перекрытие минизон тяжелых дырок (hh) между соседними СР в градиентной части волновода и обеспечить монотонное снижение энергии дна hh -минизоны к активной области (рис. 2) [A5]. При такой конструкции возможно выращивание лазерных ГС в безостановочном режиме без изменения основных параметров технологического процесса МПЭ, таких как температуры подложки и молекулярных источников, что принципиально важно для снижения центров безызлучательной рекомбинации в активной области. Однако при условии изопериодичности с GaAs твердого раствора ограничивающего слоя лазерной ГС $Zn_{1-x}Mg_xS_ySe_{1-y}$, используемого в СР $ZnMgSSe/ZnSe$, такие СР неизбежно вносят в ГС напряжения растяжения ($\Delta a/a > 0$), равно как и активная область с КТ CdSe. Эти напряжения были скомпенсированы упруго растянутыми волноводными СР $ZnSSe/ZnSe$ ($\Delta a/a < 0$) с постоянной E_g , позволяющими сохранить изопериодичность лазерной ГС к подложке GaAs как целого, что сильно уменьшает вероятность релаксации упругих напряжений с образованием протяженных дефектов [A14] (рис. 3).

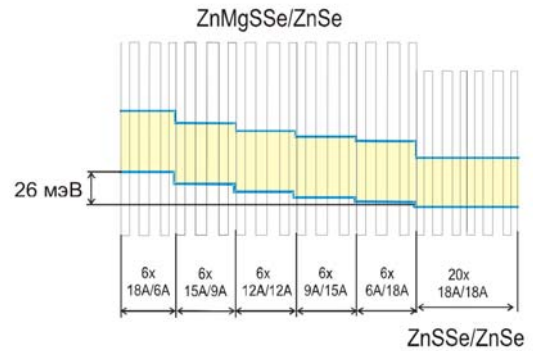


Рис.2. Расчетная структура минизоны тяжелых дырок для волноводных СР $ZnMgSSe/ZnSe$ и $ZnSSe/ZnSe$.

Для оптимизации конструкции волновода с переменным ПП в лазерной ГС в при-

ближении плоских волн (ТЕ-поляризация) производился расчет распределения фундаментальной моды (ФМ) электромагнитного поля и величины фактора оптического ограничения (Γ). Максимальному значению Γ соответствовало асимметричное расположение активной области в волноводе, в месте нахождения максимума ФМ (рис. 3). Также было установлено, что дальнейшее увеличение Γ с целью снижения порога генерации и увеличения эффективности ГС возможно при увеличении числа плоскостей КТ CdSe/ZnSe в активной области лазерной ГС, причем структура с 5-ю электронно-связанными плоскостями является оптимальной. Свыше 5 плоскостей КТ CdSe Γ увеличивается незначительно, но при этом возможна релаксация упругих напряжений в структуре, индуцируемых слоями КТ CdSe ($\Delta a/a \sim 7\%$). Для структуры с волноводом с переменным ПП и пятью плоскостями КТ CdSe/ZnSe при оптимальном соотноше-

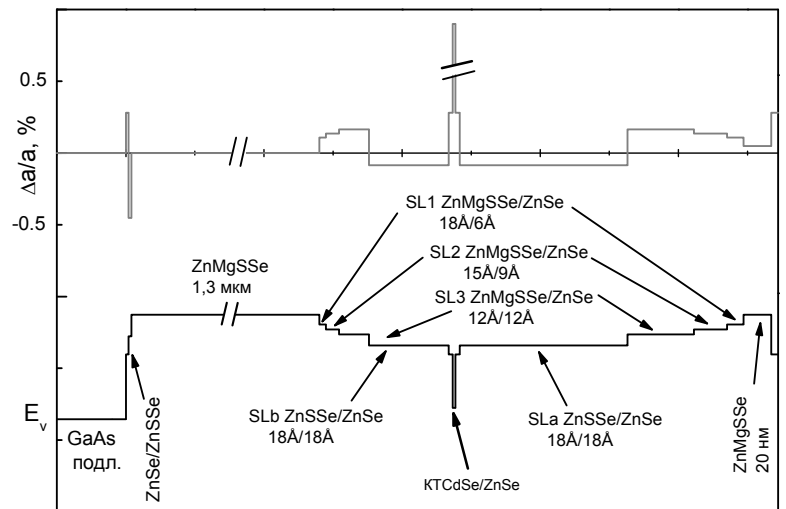


Рис. 3. Схематический профиль валентной зоны (E_v) и среднее рассогласование по постоянной решетки ($\Delta a/a$) относительно подложки GaAs для ГС с волноводом с переменным ПП и одной вставкой КТ CdSe/ZnSe номинальной толщиной 2.8-3 монослоя (МС) в активной области.

нии толщин волноводных СР ожидаемые потери в подложке составили 0.0109 см^{-1} , а фактор оптического ограничения возрос до $\Gamma=3.842\%$.

В §3.2 исследуются оптические и структурные свойства лазерных ГС с волноводом с переменным ПП, выращенных методом МПЭ псевдоморфно на подложках GaAs (001) при температуре 270-280°C. Лазерные ГС, общий дизайн которых представлен на рис. 3, содержали, активную область с одной или несколькими плоскостями КТ CdSe/ZnSe, разделенных туннельно-прозрачными барьерами 5 нм. В одной из ГС было произведено модулированное донорное легирование приграничных областей волноводных и ограничивающих слоев ($\text{Zn}_{1-x}\text{Mg}_x\text{S}_y\text{Se}_{1-y}$) в предположении, что увеличение концентрации равновесных электронов, собираемых в активную область лазерных гетероструктур, приведет к увеличению вероятности рекомбинации при низких уровнях возбуждения. Также для сравнения характеристик была выращена ГС со стандартным волноводом (с постоянным ПП, постоянной эффективной E_g) на основе короткопериодных СР $\text{ZnS}_y\text{Se}_{1-y}/\text{ZnSe}$, аналогичная реализованной ранее ГС, обладавшей минимальной пороговой плотностью мощности 2.5 кВт/см^2 [6]. В спектрах ФЛ всех выращенных гетероструктур доминировал пик, связанный с излучением

из КТ CdSe при $\lambda=520\text{-}550 \text{ нм}$, тогда как интенсивность коротковолновых пиков от волноводных СР составляла не более 2% от основного, что свидетельствует об эффективном транспорте неравновесных носителей к активной области даже при 77К (рис. 4а).

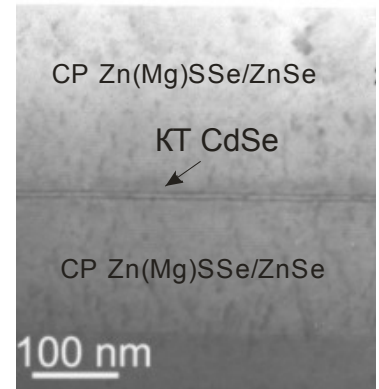
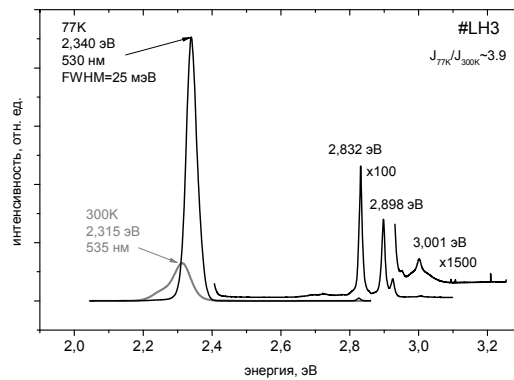


Рис. 4. Спектры ФЛ при 77К и 300К (а) и ПЭМ-микрофотография в геометрии поперечного сечения ($g=002$) (б) лазерной гетероструктуры с 2 плоскостями КТ CdSe/ZnSe.

Отношение интенсивностей ФЛ при 300 и 77К, косвенно характеризующее величину внутренней квантовой эффективности при низком уровне возбуждения варьировалось в диапазоне 0.2-0.5. Согласно данным анализа экспериментальных кривых Θ - 2Θ РД и изображениям ПЭМ (рис. 4б) отклонение параметров конструкции выращенных лазерных ГС от заданных значений не превышало 5%. Плотность дефектов упаковки определенная с помощью ЛМ во всех гетероструктурах составила менее 10^5 см^{-2} , что дополнительно было подтверждено методикой подсчета ямок в результате селективного травления.

В §3.3 приведены результаты исследования внутренних лазерных характеристик выращенных ГС. Применение асимметричного СР волновода с переменным ПП оптимизированной конструкции позволило более чем в 1.5 раза снизить пороговую плотность мощности до $I_{\text{пор}} \sim 1.41 \text{ кВт/см}^2$. Частичное n-легирование приграничных областей волноводных и ограничивающих слоев ЛГ привело к дальнейшему снижению $I_{\text{пор}}$ до 1.01 кВт/см^2 . Для определения внутренних параметров лазерных ГС, таких как внутренняя квантовая эффективность, внутренние потери и характеристическое усиление, были выполнены измерения зависимости внешних характеристик лазеров от длины резонатора L_{cav} [А6, А7].

В результате было установлено, что применение волновода с переменным ПП приводит к существенному увеличению внутренней квантовой эффективности с η_i с 65.4 до

80.5%, а также возрастанию величины характеристического усиления ΓG_0 с 114 до 135 см^{-1} , что может быть следствием как увеличения фактора оптического ограничения, так и улучшения транспорта носителей заряда к активной области. При этом такие характеристики как порог прозрачности и внутренние потери практически не изменились ($I_T=1.22-1.35 \text{ кВт/см}^2$, $\alpha_i=2.5-3.2 \text{ см}^{-1}$) [A7, A15] (рис. 5).

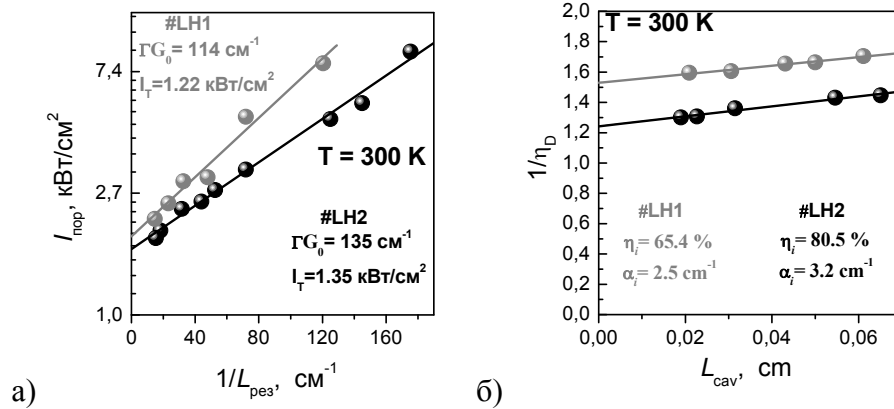


Рис. 5. Зависимости пороговой плотности мощности (а) и обратной дифференциальной квантовой эффективности (б) от длины резонатора для лазерных ГС с 5 плоскостями КТ CdSe и разным типом волновода: #LH1 (СР с постоянной E_g) и #LH2 (с переменным ПП).

Увеличение количества плоскостей КТ CdSe в активной области с 1 до 5 в ГС с одинаковой конструкцией волновода (волновод с переменным ПП) приводило к значительному увеличению η_i с 58.6 до 80.5%, а также двукратному росту ΓG_0 с 62 до 135 см^{-1} .

Параграф §3.4 посвящен описанию разработанных технологических подходов, направленных на снижение плотности неравновесных точечных дефектов в активной области лазерных ГС A^2B^6 , существование которых проявляется в увеличении интенсивности ФЛ лазерных ГС при длительном облучении УФ излучением возбуждающего лазера или ртутной лампы ЛМ [A16] и обусловлено большими отклонением от равновесия процесса МПЭ данных соединений. Достаточно высокая плотность неравновесных дефектов приводит к существенному снижению внутренней квантовой эффективности при низких уровнях возбуждения, что в свою очередь ведет к увеличению $I_{\text{пор}}$ лазерных ГС.

В качестве возможного решения предложено использовать режим эпитаксии с повышенной миграцией (ЭПМ) во всей активной области для облегчения миграции атомов на поверхности роста при низкой T_S . Дополнительно условия роста тройных (ZnSSe) и четверных (ZnMgSSe) твердых растворов при МПЭ лазерных гетероструктур могут быть сдвинуты в сторону равновесия посредством увеличения T_S и/или снижения скорости роста. Одновременно этого можно добиться, если исключить дополнительный поток элементарного Zn при МПЭ слоев ZnMgSSe и ZnSSe в ограничивающих и волноводных областях лазерной ГС. В случае, когда рост тройных и четверных твердых растворов ZnMgSSe и ZnSSe осуществляется только с использованием источников ZnS, Mg и Se, содержание S в них, в условиях стехиометричного роста ($VI/II \sim 1:1$), напрямую определяется коэффициентом встраивания серы, а следовательно T_S . Таким образом, возможно смещение ростовых условий при МПЭ в сторону более равновесных благодаря увеличению T_S на $\sim 30^\circ\text{C}$ при сохранении необходимой концентрации S в диапазоне $y=0.15-0.17$ [A8]. При этом

происходит почти двукратное снижение скорости роста, что также способствует уменьшению неравновесных дефектов.

С использованием данных технологических подходов была выращена серия ГС с волноводом с переменным ПП оптимизированной конструкции и одиночной вставкой КТ CdSe/ZnSe в активной области, которые при оптической накачке продемонстрировала генерацию в зеленом спектральном диапазоне на длине волны $\lambda=535$ нм с $I_{\text{пор}} < 1$ кВт/см² и минимальным значением $I_{\text{пор}} \sim 0.8$ кВт/см² (300К) (рис. 6), что является рекордным значением для лазеров А²В⁶ с оптической накачкой и соответствует в пересчете ~ 140 А/см².

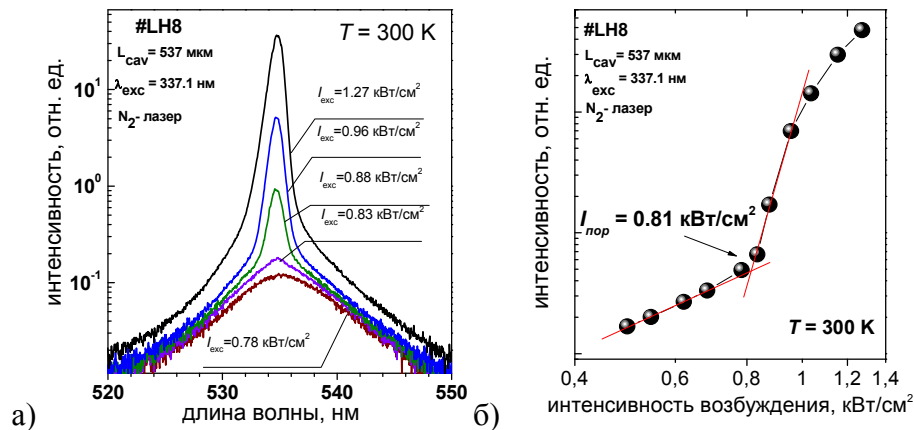


Рис. 6. Спектры торцевой ФЛ при различных интенсивностях возбуждения ниже и выше порога генерации (а) и порог генерации (б) лазерной гетероструктуры #LH8 с одиночной плоскостью КТ CdSe/ZnSe при $T=300$ К. Слой КТ CdSe и окружающая матрица КЯ ZnSe выращены в режиме ЭПМ.

Четвертая глава посвящена исследованию способов увеличения длины волны излучения в ГС с КТ CdSe/ZnSe, выращенных на подложках GaAs, с целью получения эффективной лазерной генерации в желтом спектральном диапазоне (560-600 нм).

В §4.1 описывается способ повышения длины волны излучения из активной области на основе КТ CdSe, выращенных в матрице ZnSe, основанный на увеличении номинальной толщины осаждаемого слоя CdSe. Показано, что для получения излучения с длиной волны, превышающей $\lambda=560$ нм (300 К), необходимо выращивать CdSe с номинальной толщиной не менее 3.4 МС, что больше «оптической» критической толщины (3МС), характеризующей начало частичной пластической релаксацией упругих напряжений с образованием оптически неактивных КТ CdSe [8], но меньше критической толщины образования сетки дислокаций (4МС). На основе предложенного подхода реализована лазерная ГС с 2 плоскостями КТ CdSe (~ 4 МС), которая продемонстрировала генерацию с $\lambda=566.7$ нм (300К), с пороговой плотностью мощности накачки 2.16 кВт/см², что сравнимо с лучшими образцами лазеров на основе ГС с КТ CdSe/ZnSe, излучающих в зеленом спектральном диапазоне. Тем не менее, дальнейшее увеличение λ с использованием предложенного подхода затруднено, поскольку возможно существенное снижение эффективности ФЛ и ухудшение кристаллического совершенства ГС [A2].

В §4.2 для увеличения λ излучения КТ CdSe предлагается вместо матрицы ZnSe использовать напряженную КЯ ZnCdSe [A9]. При этом возможны два эффекта: снижение высоты энергетических барьеров матрицы КТ, а, следовательно, заглубление уровней в КТ, с одной стороны, и увеличение максимального содержания Cd в КТ в результате эффекта объемной сегрегации CdSe из окружающих областей КЯ ZnCdSe. Оба эти эффекта

должны приводить к увеличению λ излучения КТ CdSe с номинальной толщиной менее 3 МС при сохранении кристаллического совершенства активной области и ГС в целом. Представлены расчеты энергий оптических переходов в системе КТ-CdSe/КЯ-ZnCdSe в упрощенной модели, в которой КТ CdSe заменяются на КЯ $Zn_{1-x_2}Cd_{x_2}Se$ с гауссовым профилем изменения состава, при этом площади под функцией Гаусса и под эквивалентной прямоугольной КЯ чистого CdSe с номинальной толщиной, равной толщине осаждаемого слоя (2.8 МС), берутся равными. Содержание Cd в максимуме гауссовой ямы варьировалось в диапазоне $x_2=0.85-0.95$, параметр уширения КЯ принимался равным 5-7 МС на основании результатов, полученных ранее в работах [9,10] (рис. 7а). Расчет проводился путем численного решения уравнения Шредингера с помощью метода конечных разностей и с учетом сложной картины упругих напряжений в ГС. Установлено что существует узкий

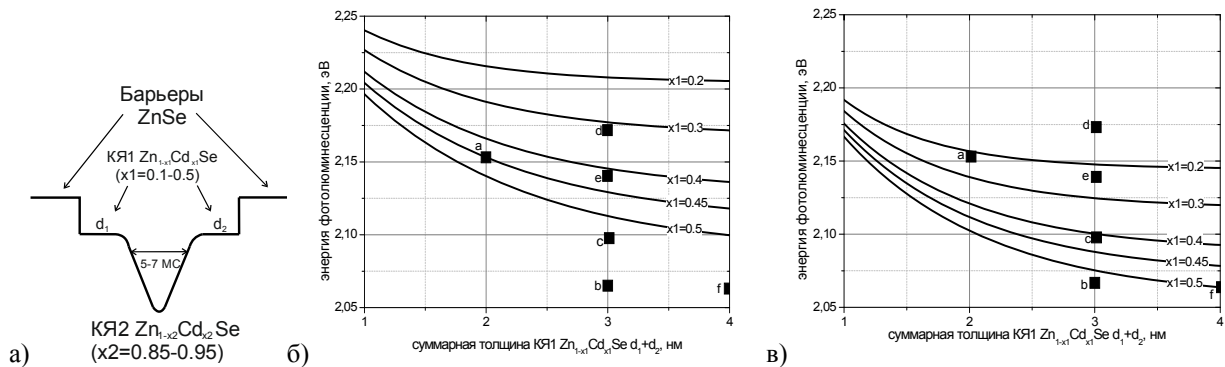


Рис. 7. Схематическое изображение профиля E_g активной области КТ-CdSe/КЯ- $Zn_{1-x_1}Cd_{x_1}Se$, используемой в теоретических расчетах (а). Результаты теоретических расчетов энергии ФЛ из КТ CdSe аппроксимированных гауссовой КЯ2 $Zn_{1-x_2}Cd_{x_2}Se$ ($x_2=0.95$), расположенных в КЯ1 $Zn_{1-x_1}Cd_{x_1}Se$ матрице, с параметром уширения 5 МС (б) и 7 МС (в). ■ - энергии максимумов пиков ФЛ экспериментальных тестовых структур.

рабочий диапазон толщин матричной КЯ $Zn_{1-x_1}Cd_{x_1}Se$ (2-4 нм), подходящий для получения излучения из активной области КТ-CdSe/КЯ-ZnCdSe в желтом диапазоне. При суммарной толщине КЯ менее 2 нм происходит быстрое увеличение энергии излучения, в свою очередь, при превышении 4 нм энергия оптических переходов в КТ CdSe весьма слабо зависит от толщины КЯ и определяется главным образом содержанием Cd (x_1) в КЯ $Zn_{1-x_1}Cd_{x_1}Se$ (рис.7б,в). Наиболее эффективным способом увеличения длины волны из КТ CdSe в матрице КЯ $Zn_{1-x_1}Cd_{x_1}Se$ является увеличение x_1 при суммарной толщине $d_1+d_2=3-4$ нм [A10, A18].

В подтверждение результатов теоретических расчетов представлены исследования методом ФЛ тестовых гетероструктур с активной областью КТ-CdSe/КЯ-ZnCdSe, выращенных методом МПЭ в оптимальных режимах (рис. 7б,в). Из рис. 7 видно, что при содержании Cd в КЯ1 $Zn_{1-x_1}Cd_{x_1}Se$ $x_1>0.3$ экспериментальные значения лучше соответствуют расчетам с параметром уширения 7МС, что вероятнее всего обусловлено увеличением фактора расплыва КТ CdSe в результате эффекта объемной сегрегации Cd из матричных областей КЯ1 при большом x_1 . Особенное внимание при синтезе ГС уделялось такому ключевому элементу конструкции, как компенсирующие переменнo-напряженные волноводные СР $ZnS_{0.15}Se_{0.85}/ZnSe$, обладающие напряжением растяжения относительно подложки GaAs [A10, A18]. Их намеренное введение позволило сохранить кристаллическое совершенство ГС благодаря компенсации сильных напряжений сжатия, возникающих из-за дополнительной КЯ1 $Zn_{1-x_1}Cd_{x_1}Se$.

В тестовых структурах экспериментально продемонстрировано излучение вплоть до 600 нм ($T=300\text{K}$), но при $\lambda > 590$ нм наблюдается сильный (2 порядка величины) спад интенсивности ФЛ КТ CdSe при переходе от 77К к 300К, связанный, по всей видимости, с возникновением высокой плотности оптически неактивных КТ. Делается вывод о том, что реализация активной области КТ-CdSe/КЯ-ZnCdSe в эффективных лазерных ГС требует значительного увеличения внутренней квантовой эффективности ФЛ в желтом спектральном диапазоне.

В §4.3 исследуется способ увеличения эффективности ФЛ из КТ CdSe в матрице КЯ ZnCdSe, заключающийся в использовании асимметричной активной области, в которой КТ CdSe формируются на поверхности ZnSe с последующим зарастиванием КЯ $\text{Zn}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Se}$. В этом случае, следует ожидать увеличения однородности массива КТ, а также максимального содержания Cd в КТ в условиях более продолжительной сегрегации Cd из КЯ в процессе роста, по сравнению с симметричным случаем, в котором КТ CdSe формируются в середине КЯ $\text{Zn}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Se}$.

Качественно, однородность КТ CdSe в тестовых структурах с различными типами активной области оценивалась на основании анализа контраста изображений ПЭМ с регистрацией высокоугловых прошедших электронов, полученных в геометрии поперечного сечения. Показано что в случае асимметричной активной области формируется более однородный массив КТ CdSe, прилегающий к нижнему интерфейсу с ZnSe, тогда как в симметричном случае присутствует сильная неоднородность КТ по размеру, при большой плотности крупных КТ. Полученные результаты также подтверждаются снимками, полученными методом ПЭМ в геометрии с поверхности образца (рис. 8), и данными ФЛ.

Ассиметричная активная область была реализована в лазерных ГС со СР волноводом с переменным ПП. Структуры были выращены на подложках GaAs(001) при температуре $T_S \sim 290^\circ\text{C}$ в оптимальной геометрии и режимах МПЭ, разработанных ранее для низкороговых лазерных ГС зеленого спектрального диапазона. Как и в §4.2 использовались компенсирующие напряжение волноводные СР $\text{ZnS}_{0.15}\text{Se}_{0.85}/\text{ZnSe}$. Параметры КЯ $\text{Zn}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Se}$ (толщина и x) в активной области $\text{ZnSe}/2.8\text{MC-CdSe КТ}/\text{Zn}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Se КЯ}/\text{ZnSe}$ составили (5нм и $x=0.35$) и (2 нм и $x=0.5$). Была продемонстрирована эффективная генерация при 300К на длинах волн $\lambda=573$ нм и $\lambda=593$ нм (рис. 9, #LH12), соответственно, с предельно низкой ранее недостижимой пороговой плотностью мощности $1.3\text{ кВт}/\text{см}^2$ и $2.53\text{ кВт}/\text{см}^2$ [A18,A19].

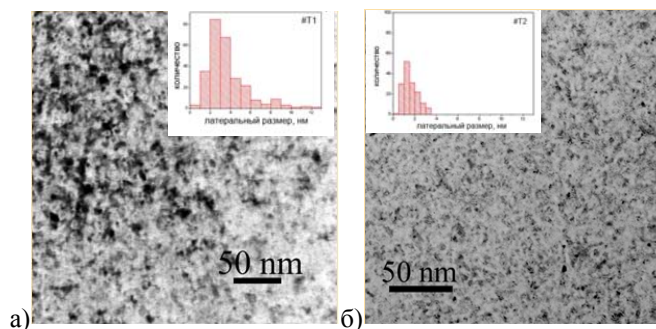


Рис. 8. Изображения, полученные методом ПЭМ в геометрии с поверхности образца для структур с симметричной (а) и асимметричной (б) активной областью КТ-CdSe/КЯ-ZnCdSe, с соответствующими гистограммами распределения КТ CdSe по латеральным размерам.

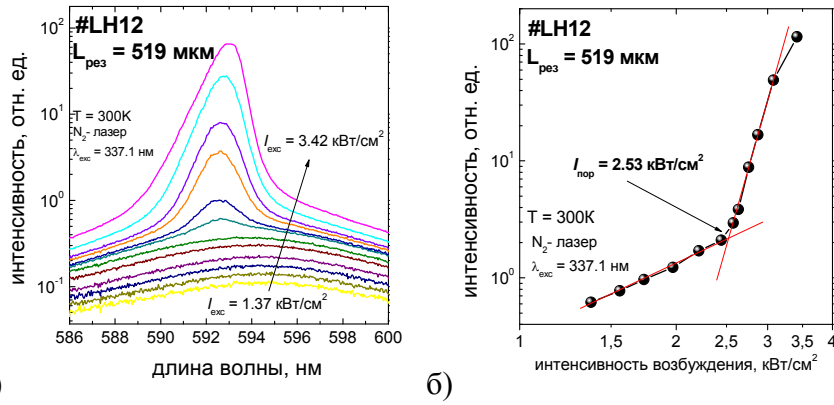


Рис. 9. Спектры излучения при различном уровне накачки, измеренные с торца лазерной ГС с асимметричной активной областью КТ-CdSe/КЯ-ZnCdSe в асимметричном СР волноводе с переменным ПП и компенсацией упругих напряжений в активной области (а) и интегральная интенсивность этого излучения в зависимости от импульсной мощности накачки (б).

В пятой главе представлены результаты разработки конструкции и исследования свойств инжекционных лазерных конверторов A^2B^6/A^3N для зеленого и желтого спектрального диапазона, в которых накачка нелегированных лазерных ГС A^2B^6 осуществляется синими ЛД A^3N ($\lambda=416-437 \text{ нм}$). Проведены исследования ватт-амперных характеристик коммерческих ЛД InGaN и продемонстрирована возможность достижения ими выходной импульсной мощности более 4.2 Вт ($\tau_{\text{н}}=200 \text{ нс}$) при токе накачки $\sim 3 \text{ А}$.

Для обеспечения максимально возможного превышения мощности накачки над пороговой, были определен теоретически и проверен экспериментально диапазон оптимальных длин резонатора лазерных кристаллов A^2B^6 , обеспечивающих минимальную пороговую мощность накачки в составе лазерных конвертеров. Как следует из выражения

$$P_{\text{пор}} = I_{\text{пор}} S = I_{\text{пор}} L_{\text{cav}} d = \frac{I_T}{\eta_i} \exp \left(\frac{\alpha_i + \frac{1}{L_{\text{cav}}} \ln \left(\frac{1}{R} \right)}{\Gamma G_0} \right) L_{\text{cav}} d$$

написанного по аналогии со случаем инжекционной накачки, где R – коэффициент отражения зеркал резонатора, d – ширина полоска накачки, $S = d L_{\text{cav}}$, а I_T – порог прозрачности, зависимость $P_{\text{пор}}(L_{\text{cav}})$ имеет минимум. Из рис. 10, который представляет теоретическую зависимость, рассчитанную с использованием внутренних параметров лазерных ГС A^2B^6 (см. §3.3), вместе с экспериментальными точками, полученными при накачке ГС N_2 -лазером, следует, что оптимальное значение L_{cav} находится в диапазоне 100-160 нм [A11].

Использование ГС 5 плоскостями КТ CdSe и СР волноводом с переменным ПП при длине резонатора $L_{\text{cav}}=103 \text{ мкм}$ в качестве ак-

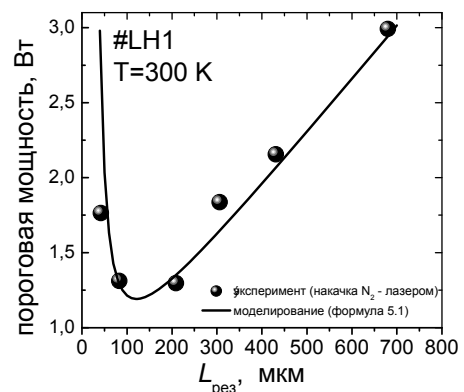
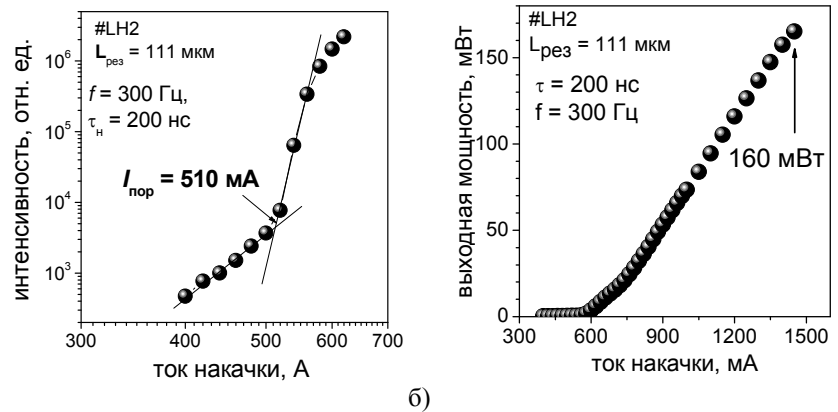


Рис. 10. Типичная зависимость пороговой мощности от длины резонатора лазерной ГС A^2B^6 с КТ CdSe.

тивного элемента конвертера позволило получить эффективную генерацию на длине волны $\lambda=543$ нм, причем пороговая мощность при накачке ЛД InGaN ($\lambda=416$ нм) составила $P_{\text{пор}}=0.32$ Вт. Продемонстрирована максимальная импульсная выходная мощность до 154 мВт при мощности накачки 1Вт с максимальной эффективностью конверсии 25.4% [A12].

Также описывается разработанная в процессе диссертационной работы конструкция лазерного микрочип конвертера, уместяющегося в корпусе ЛД (ТО-18), в котором накачка A^2B^6 лазера осуществляется излучением эффективного мощного ЛД InGaN ($\lambda\sim 437$ нм), используемого в DLP устройствах. Излучение ЛД InGaN фокусируется при помощи цилиндрической микролинзы (кварцевого волновода диаметром 100 мкм) в узкую полоску, ориентированную перпендикулярно сколам A^2B^6 ГС. В качестве активного элемента микрочип конвертера использовалась ГС с 5 плоскостями КТ CdSe и волноводом с переменным ПП, продемонстрировавшая пороговый ток $I_{\text{пор}} = 510$ мА (рис. 11а) при накачке импульсами длительностью $\tau_i=200$ нс ($f=300$ Гц). При увеличении тока через ЛД накачки до ~ 1500 мА была получена максимальная выходная импульсная мощность излучения A^2B^6/A^3N конвертера



а) б) Рис. 11. Зависимости интегральной интенсивности ФЛ (а) и выходной мощности (б) лазерного микрочип-конвертера от инжекционного тока протекающего через накачивающий InGaN ЛД.

в зеленом спектральном диапазоне ~ 160 мВт (рис. 11б). Эффективность конверсии синего излучения в зеленое составила $\sim 3\%$, что с учетом КПД InGaN ЛД ($\sim 30\%$) дает значение КПД конвертера $\sim 9\%$ [A17]. Низкопороговая ГС с одной плоскостью КТ CdSe и волноводом с переменным ПП ($L_{\text{cav}}=157$ мкм), продемонстрировавшая пороговую мощность лазерной генерации $P_{\text{пор}}=0.5$ Вт, испытывалась в лазерном микрочип конвертере с длительностью импульса накачки $\tau_i=4$ нс ($f=0.7$ кГц). Это привело к увеличению мощности ЛД InGaN до 10 Вт и позволило достичь максимальной выходной мощности излучения зеленого лазерного конвертера ~ 1.3 Вт при максимальной эффективности конверсии из голубого в зеленое 14.3% [A17].

Также был реализован микрочип конвертер на базе ГС A^2B^6 с двумя плоскостями КТ CdSe/ZnSe номинальной толщиной несколько более 3 МС, излучающей в желто-зеленом спектральном диапазоне ($\lambda = 560$ нм), и такого же ЛД InGaN. При максимальном токе инжекции 1.4 А ($\tau=200$ нс), была достигнута выходная мощность 89 мВт, что соответствует эффективности преобразования синего излучения в желто-зеленое $\sim 4.5\%$ [A2].

В **заключении** приводятся основные результаты работы:

1. Впервые для ГС широкозонных полупроводников A^2B^6 разработана концепция плавного варьирования ширины запрещенной зоны (E_g) при одновременной компенсации локальных упругих напряжений за счет использования широкого набора переменнонапряженных СР на основе соединений ZnMgSSe/ZnSe и ZnSSe/ZnSe, позволяющая выращивать методом МПЭ высокосовершенные псевдоморфные ГС с заранее заданным

профилем E_g без изменения технологических параметров (температур подложки и источников молекулярных пучков) в процессе роста.

2. Разработана и экспериментально реализована конструкция лазерных ГС A^2B^6 с волноводом с плавным изменением показателя преломления на основе СР $Zn(Mg)SSe/ZnSe$, обладающих повышенным значением фактора оптического ограничения и улучшенным транспортом неравновесных носителей заряда к активной области, которые привели к двукратному снижению пороговой плотности мощности возбуждения (до 1.2-1.5 кВт/см²).

3. Разработан оригинальный метод снижения плотности неравновесных точечных дефектов в активной области лазерных ГС с КТ $CdSe/ZnSe$ посредством роста барьерных слоев $ZnSe$ методом ЭПМ и повышения температуры эпитаксии $Zn(Mg)SSe$ волновода за счет исключения использования элементарного источника Zn . Это привело к повышению внутренней квантовой эффективности ГС и снижению пороговой плотности мощности до 0.8 кВт/см² при комнатной температуре, что является рекордным значением в мире для данного спектрального диапазона и для полупроводников A^2B^6 .

4. Предложена оригинальная конструкция активной области на основе КТ $CdSe$, в которой для увеличения длины волны излучения в желтую область видимого спектра КТ $CdSe$ помещаются в напряженную КЯ $Zn_{1-x}Cd_xSe$. На основании теоретических оценок методом огибающей волновой функции с учетом Гауссова размытия плоскости КТ и частичной релаксации их упругих напряжений определены области составов ($x=0.4-0.5$) и толщин (3-4 нм) КЯ, позволяющих достичь длины волны излучения 600 нм. Реализованы методом МПЭ ГС с КТ $CdSe/Zn_{1-x}Cd_xSe$ и проведены комплексные исследования их структурных и фотолуминесцентных свойств, подтвердившие теоретически оценки.

5. Впервые предложено для сохранения псевдоморфности активной области КТ $CdSe$ в матрице КЯ $Zn_{1-x}Cd_xSe$, подверженной сильной упругой деформации сжатия, использовать короткопериодные СР $ZnS_xSe_{1-x}/ZnSe$ ограничивающих волноводных слоев с упругой деформацией растяжения. Благодаря этому удалось преодолеть ограничения критической толщины КЯ $Zn_{1-x}Cd_xSe$ с высоким $x \sim 50\%$ и существенно снизить плотность протяженных дефектов в активной области лазерной ГС, решеточно-согласованной с подложкой $GaAs$, что позволило достичь эффективной лазерной генерации на длине волны 593 нм при рекордно низкой пороговой плотности мощности 2.5 кВт/см².

6. Проведено комплексное исследование и выполнено детальное сравнение активных областей двух типов: симметричной, в которой КТ $CdSe$ формируются в середине КЯ $ZnCdSe$, и ассиметричной, в которой КТ $CdSe$ формируются на поверхности $ZnSe$ с последующим зарощиванием КЯ $ZnCdSe$. Установлено, что в ассиметричном случае бинарная поверхность зарождения КТ и эффект более продолжительной сегрегации Cd в процессе МПЭ КЯ приводит к повышению однородности массива КТ и увеличению содержания в них Cd , что способствует красному сдвигу линии ФЛ и повышению ее интенсивности по сравнению с симметричным случаем при одинаковых параметрах КТ и КЯ.

7. На основе оптимизированных лазерных характеристик ГС A^2B^6 (пороговой плотности мощности, характеристического усиления, внутренней квантовой эффективности и внутренних потерь) был определен диапазон длин лазерного резонатора (100-160 мкм), соответствующих минимальной пороговой мощности, необходимой для возбуждения структур с помощью ЛД на основе $InGaN$ в составе инжекционного лазерного конвертора.

8. Разработан и экспериментально апробирован комплекс мер по оптимизации начальной стадии формирования гетероинтерфейса $ZnSe/GaAs$, который позволяет воспроизво-

димо получать методом МПЭ гетероэпитаксиальные ГС полупроводников A^2B^6/A^3B^5 с предельно низкой плотностью протяженных дефектов $\sim 10^4 \text{ см}^{-2}$:

9. Разработана методика экспресс-контроля плотности и типов структурных дефектов в ГС A^2B^6/GaAs с помощью метода ЛМ в видимом спектральном диапазоне.

10. Лазерные ГС, оптимизированные по максимальному фактору оптического ограничения, с активной областью, содержащей пять электронно-связанных плоскостей КТ CdSe/ZnSe и расположенной в асимметричном варизонном волноводе на основе СР Zn(Mg)SSe/ZnSe, продемонстрировали при оптической накачке азотным лазером (337.1 нм, 1 кГц, 10 нс) максимальную внутреннюю квантовую эффективность 80.5% и максимальную выходную импульсную мощность 25 Вт на зеркало на длине волны ~ 540 нм (300 К) при пороговой плотности мощности возбуждения 2 кВт/см^2 .

11. На основе низкопороговых лазерных ГС A^2B^6 , излучающих в зеленом спектральном диапазоне (520-550 нм), созданы прототипы инжекционных полупроводниковых лазерных конвертеров на микрочипе (ГО-18) с оптической накачкой коммерческим ЛД InGaN/GaN ($\lambda=437$ нм), продемонстрировавшие максимальную выходную импульсную мощность 1.3 Вт ($\tau_{\text{и}}=4$ нс) и 160 мВт ($\tau_{\text{и}}=200$ нс) с максимальной квантовой эффективностью конверсии $\sim 14\%$ при пороговой мощности импульса накачки 0.5 Вт. Соответствующие параметры конвертеров для зелено-желтого спектрального диапазона (558-566 нм) составили 90 мВт ($\tau_{\text{и}}=200$ нс) с квантовой эффективностью $\sim 4.5\%$ при пороговом токе 720 мА. По своим характеристикам данные компактные лазерные излучатели сопоставимы с лазерными диодами на основе InGaN в зеленом спектральном диапазоне, а в желто-зеленой области спектра не имеют аналогов.

12. Разработана конструкция лазерных ГС A^2B^6/GaAs с КТ CdSe (2.8-3 МС) в асимметричной КЯ $\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Se}$ ($x=0.3-0.5$), упругие напряжения сжатия в которой компенсируются напряжениями растяжения в ограничивающей волноводной СР, излучающих в желтом спектральном диапазоне 570-595 нм, и впервые в мире получена лазерная генерация при комнатной температуре на длине волны 593 нм с низкой пороговой плотностью мощности возбуждения 2.5 кВт/см^2 .

13. На базе отечественного технологического оборудования МПЭ компании ЗАО «НТО» (С.-Петербург) разработана технология, позволяющая выращивать на подложках диаметром до 100 мм высокосовершенные ГС полупроводниковых лазеров A^2B^6/GaAs , а также ГС гетеровалентных солнечных элементов A^2B^6/A^3B^5 .

Публикации по теме диссертации

Публикации в периодических изданиях, рекомендованных ВАК:

- A1. Ivanov S.V. Compact green laser converter with injection pumping, based on MBE grown II-VI nanostructures / S.V. Ivanov, E.V. Lutsenko, S.V. Sorokin, I.V. Sedova, S.V. Gronin, A.G. Voinilovich, N.P. Tarasuk, G.P. Yablonskii, P.S. Kop`ev // J. Cryst. Growth – 2009. - Vol.311, № 7. – P.2120-2122.
- A2. Луценко Е.В. Лазер с оптической накачкой на квантовых точках Cd(Zn)Se/ZnSe и микрочип-конвертер для желто-зеленого диапазона спектра / Е.В. Луценко, А.Г. Войнилович, Н.В. Ржеуцкий, В.Н. Павловский, Г.П. Яблонский, С.В. Сорокин, С.В. Гронин, И.В. Седова, П.С. Копьев, С.В. Иванов, М. Аланзи, А. Хамидалдин, А. Альямани // Квантовая электроника – 2013. - Т.43, № 5. – P.418-422.
- A3. Gronin S.V. Structural and optical optimization of ZnSe-based laser heterostructures with graded index waveguide / S.V. Gronin, I.V. Sedova, S.V. Sorokin, G.V. Klimko, K.G. Belyaev, A.V. Lebedev, A.A. Sitnikova, A.A. Toropov, S.V. Ivanov // Phys. Stat. Sol. (c) – 2012. - Vol.9, № 8-9. – P.1833-1836.
- A4. Сорокин С.В. Молекулярно-пучковая эпитаксия короткопериодных сверхрешеток ZnSSe/CdSe для применения в многопереходных солнечных элементах $A^{III}B^V/A^{II}B^{VI}$ / С.В. Сорокин, С.В. Гронин, И.В. Седова, Г.В. Климко, Е.А. Европейцев, М.В. Байдакова, А.А. Ситникова, А.А. Торопов, С.В. Иванов // ФТП – 2015. – Т. 49 – С. 1024-1030.
- A5. Gronin S.V. ZnSe-based laser structures for electron-beam pumping with graded index waveguide / S.V. Gronin, S.V. Sorokin, I.V. Sedova, S.V. Ivanov, E.V. Zdanova, M.M. Zverev // Phys. Stat. Sol. (c) – 2010. - Vol.7, № 6. – P.1694-1696.
- A6. Vainilovich A.G. Internal parameters and optical properties of green II-VI heterostructure lasers with active region composed of multi-sheet electronically-coupled CdSe quantum dots / A.G. Vainilovich, E.V. Lutsenko, N.P. Tarasuk, V.N. Pavlovskii, A.L. Gurskii, G.P. Yablonskii, I.V. Sedova, S.V. Sorokin, S.V. Gronin, S.V. Ivanov, P.S. Kop`ev // Phys. Stat. Sol (c) – 2010. - Vol.7, №6. – P.1691-1693.
- A7. Lutsenko E.V. Laser characteristics of a heterostructure with a five Cd(Zn)Se QD sheet active region embedded in non-symmetrical superlattice graded-index waveguide / E.V. Lutsenko, A.G. Vainilovich, N.P. Tarasuk, V.N. Pavlovskii, G.P. Yablonskii, A. Alyamani, I.V. Sedova, S.V. Sorokin, S.V. Gronin, P.S. Kop`ev, S.V. Ivanov // Phys. Stat. Sol. (c) – 2012. - Vol.9, № 8-9. – P.1837-1839.
- A8. Сорокин С.В. Молекулярно-пучковая эпитаксия гетероструктур широкозонных соединений $A^{II}B^{VI}$ для низкопороговых лазеров с оптической и электронной накачкой / С.В. Сорокин, С.В. Гронин, И.В. Седова, М.В. Рахлин, М.В. Байдакова, П.С. Копьев, А.Г. Войнилович, Е.В. Луценко, Г.П. Яблонский, Н.А. Гамов, Е.В. Жданова, М.М. Зверев, С.С. Рувимов, С.В. Иванов // ФТП – 2015. - Т.49, № 3. – P.342-348.
- A9. Sedova I.V. CdSe quantum dots embedded in a ZnCdSe quantum well: towards efficient yellow photoluminescence / I.V. Sedova, O.G. Lyublinskaya, S.V. Sorokin, S.V. Gronin, A.A. Sitnikova, S.V. Ivanov // J. Korean Phys. Soc. – 2008. - Vol.53, № 2. – P.3012-3015.

- A10. Gronin S.V. CdSe/ZnCdSe quantum dot heterostructures for yellow spectral range grown on GaAs substrates by molecular beam epitaxy / S.V. Gronin, S.V. Sorokin, D.R. Kazanov, I.V. Sedova, G.V. Klimko, E.A. Evropeytsev, S.V. Ivanov // *Acta Phys. Pol. A* – 2014. - Vol.126, №5. – P.1096-1099.
- A11. Lutsenko E.V. Violet-green laser converter based on MBE grown II-VI green lasers with multiple CdSe quantum dot sheets, pumped by InGaN laser diode / E.V. Lutsenko, S.V. Sorokin, I.V. Sedova, A.G. Vainilovich, N.P. Tarasuk, V.N. Pavlovskii, G.P. Yablonskii, S.V. Gronin, P.S. Kop`ev, S.V. Ivanov // *Phys. Stat. Sol. (b)* – 2010. - Vol.247, №6. – P.1557-1560.
- A12. Sorokin S.V. Violet-green electrically pumped laser converters with output power over 150 mW / S.V. Sorokin, I.V. Sedova, S.V. Gronin, G.V. Klimko, K.G. Belyaev, S.V. Ivanov, A. Alyamani, E.V. Lutsenko, A.G. Vainilovich, G.P. Yablonskii // *Electron. Lett.* – 2012. - Vol.48, №2. – P. 118-119.
- A13. Gronin S.V. Effective Green Semiconductor Lasers with Multiple CdSe/ZnSe QD Active Region for Electron Beam Pumping / S.V. Gronin, M.M. Zverev, S.V. Sorokin, I.V. Sedova, N.A. Gamov, D.V. Peregoudov, V.B. Studionov, P.S. Kop`ev, S.V. Ivanov // *Acta Phys. Pol. A* – 2008. - Vol.114, №5. – P.1115-1122.
- A14. Sedova I.V. Low-threshold green laser heterostructures with Zn(Mg)SSe/ZnSe graded-index superlattice waveguide: Structural and optical properties / I.V. Sedova, E.V. Lutsenko, S.V. Gronin, S.V. Sorokin, A.G. Vainilovich, A.A. Sitnikova, G.P. Yablonskii, A. Alyamani, D.L. Fedorov, P.S. Kop`ev, S.V. Ivanov // *Appl. Phys. Lett.* – 2011. - Vol.98, №17. – P.171103.

Труды конференций и тезисы докладов:

- A15. Vainilovich A.G. ZnMgSSe/ZnSe graded-index superlattice waveguide heterostructures with (Zn)CdSe quantum dot active region for green laser application / A.G. Vainilovich, E.V. Lutsenko, V.N. Pavlovskii, G.P. Yablonskii, I.V. Sedova, S.V. Sorokin, S.V. Gronin, S.V. Ivanov, P.S. Kop`ev, A. Alyamani // *PROCEEDINGS OF INTERNATIONAL CONFERENCE NANOMEETING 2011: PHYSICS, CHEMISTRY AND APPLICATIONS OF NANOSTRUCTURES* – 2011. – P.440-443.
- A16. Zverev M.M. The effect of mercury lamp irradiation on the threshold current density of electron beam pumped ZnSe-based lasers/ M.M. Zverev, N.A. Gamov, E.V. Zhdanova, D.V. Peregoudov, V.B. Studionov, S.V. Gronin, I.V. Sedova, S.V. Sorokin, S.V. Ivanov // *PROCEEDINGS - 2014 INTERNATIONAL CONFERENCE LASER OPTICS* – 2014. – P.101.
- A17. Ivanov S.V. II-VI/III-N based micro-chip green-yellow laser converters / S.V. Ivanov, S.V. Sorokin, S.V. Gronin, I.V. Sedova, A.G. Vainilovich, E.V. Lutsenko // *PROCEEDINGS - 2014 INTERNATIONAL CONFERENCE LASER OPTICS* – 2014. – P.87.
- A18. Гронин С.В. Лазерные гетероструктуры A2B6/GaAs(100) с квантовыми точками CdSe/ZnCdSe излучающие в желтой и оранжевой областях спектра / С.В. Гронин, С.В. Сорокин, И. В. Седова, Г.В. Климко, А. А. Торопов, К.Г. Беляев, С. Рувимов, Е.В. Луценко, А.Г. Войнилович, Г.П. Яблонский, С.В. Иванов // *PROCEEDINGS 10 Belarusian-Russian Workshop "Semiconductor Lasers and Systems"* – 2015. – P.106.

- A19. Gronin S.V. Molecular Beam Epitaxy of II-VI/GaAs Laser Heterostructures for Yellow-Orange Spectral Range / S.V. Gronin, S.V. Sorokin, I.V. Sedova, G.V. Klimko, S. Rouvimov, K.G. Belyaev, A.A. Toropov, E.V. Lutsenko, A.G. Vainilovich, G.P. Yablonskii, S.V. Ivanov // PROCEEDINGS - 17th (International Conferences on II-VI compounds and Related Materials – 2015. – P.208.

Список цитируемой литературы.

1. Yanashima K. Long-Lifetime True Green Laser Diodes with Output Power over 50 mW above 525 nm Grown on Semipolar {2021} GaN Substrates / K. Yanashima, H. Nakajima, K. Tasai, K. Naganuma, N. Fuutagawa, Y. Takiguchi, T. Hamaguchi, M. Ikeda, Y. Enya, S. Takagi, M. Adachi, T. Kyono, Y. Yoshizumi, T. Sumitomo, Y. Yamanaka, T. Kumano, S. Tokuyama, K. Sumiyoshi, N. Saga, M. Ueno, K. Katayama, T. Ikegami, T. Nakamura // Appl. Phys. Exp. – 2012. – Vol. 5, №8. – P. 082103.
2. Takagi S. High-Power (over 100 mW) Green Laser Diodes on Semipolar {2021} GaN Substrates Operating at Wavelengths beyond 530 nm / S. Takagi, Y. Enya, T. Kyono, M. Adachi et al. // Appl. Phys. Exp. – 2012. – Vol. 5, №8. – P. 082102.
3. Haase M.A. Blue-green laser diodes / M.A. Haase, J. Qiu, J.M. Depuydt, H. Cheng // Appl. Phys. Lett. – 1991. – Vol.59. – P.1272.
4. Kato E. Significant progress in II-VI blue-green laser diode lifetime / E. Kato, H. Noguchi, M. Nagai, et al. // Electron. Lett. - 1998. - Vol. 34, №3. - P. 282-284.
5. Gundel S. Stability of nitrogen in ZnSe and its role in the degradation of ZnSe lasers / S. Gundel, D. Albert, J. Nurnberger, W. Faschinger // Phys. Rev. B – Vol.60, №24. – P.R16271 – R16274.
6. Ivanov S.V. Correlation of CdSe quantum dot morphology, structure design and lasing properties of optically pumped green CdSe/ZnMgSSe lasers / S. V. Ivanov, O. G. Lyublinskaya, I. V. Sedova, S. V. Sorokin, A. A. Toropov, P. S. Kop'ev, E. V. Lutsenko, A. G. Voinilovich, N. P. Tarasuk, A. L. Gurskii, G. P. Yablonskii // Phys. Stat. Sol. (a) – 2007. – Vol. 204, №1. – P.251-256.
7. Sorokin S.V. High efficiency integral III-N/II-VI blue-green laser converter / S.V. Sorokin, I.V. Sedova, A.A. Toropov, G.P. Yablonskii, E.V. Lutsenko, A.G. Voinilovich, A.V. Danilchuk, Y. Dikme, H. Kalisch, B. Schineller, M. Heuken, S.V. Ivanov // Electron. Lett. – 2007. – Vol.43, №3. – P.162-163.
8. Ivanov S.V. CdSe fractional-monolayer active region of molecular beam epitaxy grown green ZnSe-based lasers / S.V. Ivanov, A.A. Toropov, S.V. Sorokin, T.V. Shubina, I.V. Sedova, A.A. Sitnikova, P.S. Kop'ev, Z.I. Alferov, A. Waag, H.-J. Lugauer, G. Reuscher, M. Keim, G. Landwehr // Appl. Phys. Lett. – 1999. – Vol.74. – P.498.
9. Peranio N. Structural and chemical analysis of CdSe/ZnSe nanostructures by transmission electron microscopy / N. Peranio, A. Rosenauer, D. Gerthsen, S.V. Sorokin, I.V. Sedova, S.V. Ivanov // Phys. Rev. B – 2000. – Vol.61, №23. – P.16015.
10. Kyutt R.N. Broadening of submonolayer CdSe sheets in CdSe/ZnSe superlattices studied by x-ray diffraction / R.N. Kyutt, A.A. Toropov, S.V. Sorokin, T.V. Shubina, S.V. Ivanov, M. Karlsteen, M. Willander // Appl. Phys. Lett. – 1999. – Vol.75. – P.373.