

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники

УДК 535.337

НАГОРНЫЙ
Алексей Валерьевич

Оптические свойства лазерных гетероструктур на основе твердых растворов
цинк-кадмий-селен

АВТОРЕФЕРАТ

на соискание степени магистра технических наук

по специальности 1-41 80 01 Твердотельная электроника, радиоэлектронные
компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах



Научный руководитель

Степанов Андрей Анатольевич

Канд. техн. наук, доцент



Минск 2018

Работа выполнена на кафедре микро- и наноэлектроники учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Научный руководитель:

Степанов Андрей Анатольевич,
кандидат технических наук, доцент кафедры микро- и наноэлектроники учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Рецензент:

Бойправ Ольга Владимировна
кандидат технических наук, доцент кафедры защиты информации наноэлектроники учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Защита диссертации состоится «15» июня 2018 г. года в 9⁰⁰ часов на заседании Государственной комиссии по защите магистерских диссертаций в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г.Минск, ул. П.Бровки, 6, 1 уч. корп., ауд. 115, тел.: 293-89-92, e-mail: kafei@bsuir.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

ВВЕДЕНИЕ

В течение длительного времени спектральный диапазон излучения полупроводниковых (ПП) лазеров был ограничен инфракрасной и красной областями спектра (вплоть до примерно 600 нм), что было связано с различными физическими и технологическими причинами. Первые синезеленые лазеры появились лишь в начале 90-х годов. Они были созданы на основе гетеросистемы ZnMgSSe/ZnCdSSe. В середине 90-х годов был продемонстрирован первый ультрафиолетовый полупроводниковый лазер на основе соединения AlInGaN. Многочисленные научные исследования и высокий уровень технологии привели к значительному прогрессу в физике и технике лазеров на основе широкозонных полупроводников. Тем не менее, задача перекрытия излучением полупроводниковых лазеров всего видимого диапазона спектра встречает серьезные препятствия. Промежуток между красной и синей областями спектра остается незаполненным, а дальнейшее продвижение в ультрафиолетовую область затруднено.

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.

Компактные полупроводниковые лазеры, излучающие в жёлтой области спектра необходимы для улучшения цвета рендеринга лазерного телевизора и мультимедийные устройства. Желтый оптический диапазон в оптических волокнах РММА делает возможным использование желтых лазеров для многоканальных телекоммуникаций внутри промышленных зданий, самолетов, автомобилей, для волокна зондирования и т.д. Стоит выделить медицинские применения, в частности офтальмологию, где лазерное излучение в зелёной и жёлтой областях спектра успешно применяется для операции фотокоагуляции.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Одной из основных задач физики и технологии, полупроводниковых гетероструктур в течение последних десятилетий является развитие высоко-эффективной 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).

Несмотря на жесткую конкуренцию с лазерными диодами (ЛД) на основе InGaN, 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., 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, при этом основной причиной деградации в отсутствие структурных дефектов явилась нестабильность азотного акцептора. При использовании оптической накачки не требуется создание p-n перехода, что позволяет избежать проблем связанных с p-легированием.

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 методом 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 постоянных решетки бинарных соединений A^2B^6

Цель и задачи исследования

Целью диссертации заключалась исследовать оптические свойства лазерных гетероструктур созданных методом МПЭ 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 выполнения поставленной цели в работе были сформулированы **следующие задачи:**

- исследовать методом оптической спектроскопии гетероструктур с квантовыми точками CdSe в матрице ZnCdSe и его влияния на однородность массива квантовых точек;
- исследовать пространственное распределение фотолюминесценции исследуемых гетероструктур;
- исследовать влияния температур на оптические свойства гетероструктур с квантовыми точками и ямами.

Объектом исследования является лазерные гетероструктуры на основе твердых растворов ZnCdSe.

Предметом исследования выступают спектры фотолюминесценции исследуемых гетероструктур.

Область исследования. Содержание диссертационной работы соответствует образовательному стандарту высшего образования второй ступени (магистратуры) специальности 1-41 80 01 «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах».

Теоретическая и методологическая основа исследования

В основу диссертации легли результаты зарубежных исследований по формированию квантовых точек в гетероструктурах с помощью метода пучковой эпитаксии, а также исследованию их свойств при различных температурах.

Информационная база исследования квантоворазмерных структур на основе ZnCdSe с помощью оптических методов была сформирована на основе статистических данных.

Научная новизна диссертационной работы заключается в получение новых знаний о полупроводниковых квантоворазмерных структурах на основе ZnCdSe.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Исследование пространственного распределения 1. Установлено, что интенсивность спектров фотолюминесценции исследуемого образца варьируется в пределах 55% от ее пикового значения на длине волны 520 нм в зависимости от исследуемой области образца, пиковая длина волны сдвигается на 6 нм в длинноволновую область с увеличением ширины полосы ФЛ от 9,6 нм до ~ 11 нм, что может быть вызвано локальным увеличением концентрации атомов Cd в квантовых точках ZnCdSe из-за неоднородного нагрева подложки GaAs во время роста.

2 Установлено что, при увеличении температуры от $T = 100$ К до $T = 300$ К относительная эффективность фотолюминесценции уменьшается с 0,88 до 0,33, что может быть вызвано увеличением ширины запрещенной зоны.

3. Установлено что, при увеличении температуры образца гетероструктуры ZnCdSe/ZnSe с термической активацией квантовых точек происходит сдвиг пика фотолюминесценции в дальневолновую область на $\lambda = 10,47$ нм в интервале температур от $T = 18^\circ\text{C}$ до $T = 190^\circ\text{C}$.

Теоретическая значимость диссертации заключается в том, что в ней предложен подход к анализу свойств полупроводниковых квантоворазмерных структур на основе ZnCdSe при различных температурах, а также предложен неразрушающий метод исследования оптического распределения фотолюминесценции.

Практическая значимость диссертации состоит в том, что на основе исследуемых гетероструктур можно создавать для практическое применения лазерные микрочип-конверторы излучающие в зелено-желтой области излучения. Работы настоящей диссертации ведутся по ГБ: Фотоника, опто- и микроэлектроника 2.1.01. «Создание и исследование AlInGaN гетероструктур, транзисторов, светоизлучающих и фотоприемных устройств для светотехники, СВЧ-техники и мониторинга окружающей среды», что подтверждает их высокую научную и практическую значимость.

Апробация и внедрение результатов исследования

Результаты исследования были представлены на XXV международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного

видения г. Москва 2018 г.

Публикации

Основные положения работы и результаты диссертации изложены в шести опубликованных работах общим объемом 5,0 п.л.

Структура и объем работы. Структура диссертационной работы обусловлена целью, задачами и логикой исследования. Работа состоит из введения, трёх глав и заключения, библиографического списка и приложений. Общий объем диссертации – 56 страниц. Работа содержит 9 таблиц, 30 рисунков. Библиографический список включает 42 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** рассмотрено современное состояние проблемы создания компактных лазеров излучающих в зелено-желтом спектральном диапазоне, определены основные направления исследований, а также дается обоснование актуальности темы диссертационной работы.

В **общей характеристике работы** сформулированы ее цель и задачи, показана связь с научными программами и проектами, даны сведения об объекте исследования и обоснован его выбор, представлены положения, выносимые на защиту, приведены сведения о личном вкладе соискателя, апробации результатов диссертации и их опубликованность, а также, структура и объем магистерской диссертации.

В **первой главе** представлен 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 . 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** посвящена описанию конструкции и технологии МПЭ низкопороговых лазерных гетероструктур с квантовыми точками CdSe зеленого спектрального диапазона и описанию ее основных элементов.

В **третьей главе** описано применявшееся технологическое оборудование и основные методики исследования структурных, оптических и лазерных свойств гетероструктур оптическим методом.

В **четвертой главе** описано оптические и структурные свойства лазерных гетероструктур с волноводом выращенных методом МПЭ псевдоморфно на подложках GaAs (001). Показано пространственное распределение фотolumинесценции методом оптической спектроскопии гетероструктур. Показаны спектры генерации гетероструктур с квантовыми точками и ямами в диапазоне температур от 77 до 300 К. Показано влияние температуры на относительную эффективность фотolumинесценции квантово-размерных структур в диапазоне от 10 до 300 К.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Собраны экспериментальные установки для проведения ФЛ картографии гетероструктур и для исследование оптических и люминесцентных свойств гетероструктуры при различных температурах

2. В результате проведения пространственного распределения ФЛ было показано, что максимальное пространственное изменение интенсивности фотолюминесценции достигает 55% от ее максимального уровня. Это уменьшение интенсивности происходит вместе с низким энергетическим сдвигом $\Delta\lambda_{\text{peak}} \approx 6$ нм максимального пика спектра фотолюминесценции и $\sim 20\%$ увеличением ширины полосы ФЛ от 9,6 нм до ~ 11 нм. Этот низкоэнергетический сдвиг фотолюминесценции может быть вызван локальным увеличением концентрации Cd в квантовых точках ZnCdSe из-за неоднородного нагрева подложки GaAs во время роста. Увеличение концентрации Cd приводит к усилению локальных колебаний профиля энергетической зоны, что приводит к увеличению ширины полосы ФЛ.

3. При исследовании фотолюминесценции гетероструктуры при различных температурах было получено излучение в зеленом (510-550 нм) и желто-зеленом (~ 560 нм) спектральном диапазоне. Установлено что, при увеличении температуры от $T = 100$ К до $T = 300$ К относительная эффективность фотолюминесценции уменьшилась с 0,88 до 0,33.

4. Были получены спектры фотолюминесценции при достижении порога генерации генерации гетероструктур. Было обнаружено что, при увеличении температуры образца гетероструктуры ZnCdSe/ZnSe с термической активацией квантовых точек происходил сдвиг пика фотолюминесценции в дальне-волновую область на $\lambda = 10,47$ нм в интервале температур от $T = 18^\circ \text{C}$ до $T = 190^\circ \text{C}$

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

[1-А] Жмерик В. Н., УФ фотоконверторы на основе А2В6 структур / В. Н. Жмерик, Д. В. Нечаев, А. Н. Семенов, Н. В. Ржеуцкий, А. В. Нагорный, В. Е. Земляков, Н. В. Атанов, В. В. Терещенко, В. И. Егоркин, Е. В. Луценко, С. В. Иванов / Сборник статей XXV международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения г. Москва – 2018. – С. 69-72

[2-А] Войнилович А. Г., Полупроводниковые II-VI-КТ/III-N лазерные конверторы, излучающие в желто-оранжевом спектральном диапазоне / А. Г. Войнилович, Е. В. Луценко, В. Н. Павловский, Г. П. Яблонский, А. Alyamani, M. Aljohani, A. Aljariwi, С. В. Сорокин, И. В. Седова, С. В. Гронин, Г. В. Климко, С. В. Иванов, А. В. Нагорный / Сборник статей 11-го Белорусско-Российского семинара «Полупроводниковые лазеры и системы на их основе». – 2017. – С. 128-132.