

УЧРЕЖДЕНИЕ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ им. А.Ф. ИОФФЕ РАН

На правах рукописи

Шахмин Алексей Александрович

КАТОДОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ
ЛАЗЕРНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР НА ОСНОВЕ ZnSe

Специальность 01.04.10. – физика полупроводников

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург
2011

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе РАН

Научный руководитель:

кандидат физико-математических наук Заморянская Мария Владимировна

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор

Лебедев Александр Александрович

Учреждение Российской академии наук Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН

доктор физико-математических наук, профессор

Вывенко Олег Федорович

Санкт-Петербургский Государственный Университет

Ведущая организация – Санкт-Петербургский Государственный Политехнический Университет

Защита состоится «16» февраля 2012 г. в 13.00 на заседании диссертационного совета Д. 002.205.02 при Учреждении Российской академии наук Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе РАН

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Учреждения Российской академии наук Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН

Автореферат разослан «16» января 2012 года.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д. 002.205.02

доктор физико-математических наук



Сорокин Л.М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время полупроводниковые лазеры зеленого спектрального диапазона (500-550 нм) востребованы во многих областях техники – проекционное лазерное телевидение, оптическая связь, лазерные навигационные системы, высококачественная цветная печать. В 1991 году впервые реализован инжекционный лазер на основе ZnSe, излучающий в зеленой области спектра, но все усилия последующих лет по увеличению срока службы этого лазера до уровня, позволяющего перейти к промышленному производству, не увенчались успехом. Одной из причин деградации лазера это ухудшение р-типа проводимости используемых структур при высоких уровнях возбуждения. В этой связи, перспективными являются полупроводниковые лазеры с накачкой электронным пучком. Преимущество накачки электронным пучком над инжекционной накачкой связано с отсутствием необходимости создания высокой проводимости р- и n-типа в широкозонных материалах A^2B^6 , необходимой для реализации излучения в видимой области спектра.

В последние годы продемонстрирована перспективность использования квантоворазмерных гетероструктур в лазерах сине-зеленого диапазона. Применение многослойных квантоворазмерных гетероструктур (Zn)CdSe/ZnSe в лазерах с продольным возбуждением сканирующим электронным пучком позволило достичь средней мощности излучения в квазинепрерывном режиме в несколько ватт при комнатной температуре [1]. Использование квантовых точек (КТ) либо квантовых ям (КЯ) в качестве активной области позволяет существенно улучшить основные лазерные характеристики, такие как пороговая плотность тока, характеристическая температура, внешняя квантовая эффективность. В работе [2] продемонстрированы результаты работы зеленого лазера (535 нм) с накачкой электронным пучком на основе гетероструктуры с 10 активными слоями КЯ ZnCdSe/ZnSe. Достигнута эффективность преобразования энергии электронного пучка в свет, равная 7% с выходной мощностью 31 Вт в импульсе с одного лазерного элемента.

В настоящий момент, время жизни лазерных гетероструктур на основе широкозонных полупроводников A^2B^6 все еще слишком мало для использования в коммерческих целях. Основным ограничением, препятствующим быстрому прогрессу в этой области, является относительно низкая энергия активации образования и развития протяженных и точечных дефектов в активной области. Дефекты упаковки, сформировавшиеся на границе слой-подложка (слой ZnSe – буферный слой GaAs), прорастающие к поверхности, дислокации и другие протяженные дефекты приводят к безызлучательной рекомбинации электронно-дырочных пар, при генерации

электронным пучком, тем самым уменьшают эффективность лазерной структуры. Наличие точечных дефектов в слоях структуры приводит к захвату носителей и их локализации на дефектах, что в свою очередь также приводит к уменьшению эффективности лазера. В многослойных гетероструктурах ключевым фактором является транспорт носителей заряда в активную область, влияние интерфейсов и качества барьерных слоев и сверхрешеток на эффективность люминесценции. Использование катодолюминесценции (КЛ) при исследовании лазерных гетероструктур позволит быстрым и неразрушающим способом проводить диагностику гетероструктур, получать информацию о свойствах структур, которую зачастую трудно получить другими способами.

Совершенствование и разработка новых катодолюминесцентных методов изучения полупроводниковых гетероструктур является важным шагом, необходимым для разработки и оптимизации технологии выращивания перспективных лазерных гетероструктур с заданными люминесцентными свойствами. При этом решаются также и задачи фундаментальной науки, необходимые для более глубокого понимания процессов, происходящих в гетероструктурах при облучении их электронным пучком: образование и транспорт носителей заряда, захват носителей заряда ловушками. В связи с этим тема данной работы является актуальной.

Цель работы заключается в исследовании катодолюминесцентных свойств эпитаксиальных пленок и гетероструктур на основе ZnSe и разработка катодолюминесцентных методов изучения лазерных гетероструктур с (Zn)CdSe/ZnSe активной областью.

Были поставлены следующие основные задачи:

1. Исследование влияния точечных дефектов на люминесцентные свойства слоев четвертных твердых растворов ZnMgSSe. Разработка способа количественного определения точечных дефектов в слоях и гетероструктурах на основе ZnSe.
2. Создание методики рентгеноспектрального микроанализа для определения состава и глубины залегания слоя ZnCdSe КЯ в многослойных гетероструктурах на основе ZnSe.
3. Изучение катодолюминесцентных свойств гетероструктуры на основе ZnSe. Определение условий эксперимента для изучения транспорта носителей в гетероструктуре методом катодолюминесценции.
4. Развитие метода моделирования зависимостей интенсивности катодолюминесценции от энергии электронного пучка в гетероструктурах на основе ZnSe.

5. Разработка модели, позволяющей по экспериментальным данным оценивать транспортные свойства гетероструктур на основе ZnSe. Определение факторов влияющих на транспорт носителей в гетероструктуре. Разработка способа оценки качества гетероструктуры по транспорту неравновесных носителей, созданных электронным пучком в гетероструктуре.

Научная новизна работы состоит в разработке и применении новых методов катодолюминесценции и рентгеноспектрального микроанализа для исследования гетероструктур на основе ZnSe.

1. Исследованы медленные изменения интенсивности краевой полосы катодолюминесценции слоев ZnMgSSe при непрерывном облучении электронным пучком в зависимости от температуры образца и мощности электронного пучка.
2. Предложен способ количественной оценки точечных дефектов в слоях ZnMgSSe на основе измерений катодолюминесценции их излучательных полос.
3. Впервые предложен метод рентгеноспектрального микроанализа наноразмерных слоев и продемонстрирована возможность определения состава и глубины залегания слоя ZnCdSe толщиной 1-7 нм в гетероструктуре на основе ZnSe. Установлены возможности метода по определению состава слоя толщиной до 1 нм.
4. Показана возможность использования метода катодолюминесценции для исследования гетероструктур на основе ZnSe по глубине. Проведена оценка вертикального транспорта неравновесных носителей заряда, при генерации электронным пучком, в гетероструктурах с использованием моделирования экспериментальных результатов интенсивности КЛ при вариации энергии электронного пучка.

Практическая значимость работы состоит в том, что предложены и реализованы методики определения различных параметров гетероструктур на основе ZnSe, таких как состав и глубина залегания слоя квантовой ямы, содержание точечных дефектов в барьерных слоях, характеристика транспортных свойств многослойных гетероструктур A^2B^6 .

1. Показана возможность определения концентрации точечных дефектов в слоях системы A^2B^6 по их катодолюминесценции.
2. Предложен способ моделирования экспериментальных результатов изменения интенсивности КЛ при вариации энергии электронного пучка, позволяющий характеризовать транспортные свойства варизонного волновода использованного в дизайне лазерных гетероструктур на основе ZnSe.

3. Разработанные способы характеристики слоев и структур II-VI на основе ZnSe методами катодolumинесценции могут быть использованы для сравнения образцов в процессе отработки технологии их роста, а также могут быть использованы в разработке методов исследования других материалов и структур.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Зависимость интенсивности полосы катодolumинесценции, связанной с точечными дефектами в эпитаксиальных пленках ZnMgSSe имеет насыщение при увеличении плотности тока электронного пучка от 0,1 до 2 мА/см². Интенсивность насыщения пропорциональна содержанию этих дефектов в пленках ZnMgSSe.
2. Метод вариации энергии электронного пучка и математическое моделирование результатов измерений рентгеноспектрального микроанализа позволяет определять состав и глубину залегания слоя ZnCdSe толщиной 1-7 нм в гетероструктуре на основе ZnSe с погрешностью не хуже 10% относительных.
3. Модель расчета распределения носителей в гетероструктуре на основе ZnSe, созданных электронным пучком, основанная на использовании распределений потерь энергии электронов по глубине структуры может успешно применяться для описания вертикального транспорта неравновесных носителей, сгенерированных электронным пучком в гетероструктуре.

Апробация работы. Материалы диссертационной работы докладывались и обсуждались на российских и международных школах, конференциях и симпозиумах: XV Российский симпозиум по растровой электронной микроскопии и аналитическим методам исследования твердых тел (Черноголовка 2007 г.); 9 Всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике (Санкт-Петербург 2007 г.); 12, 13 International Conference on Defects-Recognition, Imaging and Physics in Semiconductors (DRIP) (Берлин Германия 2007 г.; Вилинг, США 2009 г.); Международная зимняя школа по физике полупроводников (Зеленогорск 2008 г., 2011 г.); XII Международный Симпозиум “Нанофизика и наноэлектроника” (Нижний Новгород 2008); 9, 10 International Workshop on Beam Injection Assessment of Microstructures in Semiconductors (BIAMS) (Толедо Испания 2008, Халле, Германия 2010); 25 Международная конференция по дефектам в полупроводниках (ICDS-25) (Санкт-Петербург 2009); 14, 15 Международная конференция по соединениям II-VI (Санкт-Петербург 2009, Маян Ривьера, Мексика 2011); 2-ой Российский симпозиум “Полупроводниковые лазеры: физика и технология” (Санкт-

Петербург 2010); 11 International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures (ACSIN) (Санкт-Петербург 2011).

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в семи печатных работах, список которых представлен в конце автореферата, а также в семнадцати трудах и тезисах российских и международных конференций.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Работа содержит 133 страниц машинописного текста, включая 47 рисунков, 10 таблиц и библиографию из 151 наименования.

Основное содержание работы

Во введении дана общая характеристика работы, обоснована актуальность темы, определены цель и задачи исследований, изложена новизна и практическая значимость работы, сформулированы основные защищаемые положения.

В первой главе представлен обзор работ о люминесцентных свойствах эпитаксиальных пленок широкозонных полупроводников ZnSe, ZnSSe, ZnMgSSe и влияние точечных дефектов на спектры люминесценции. Большое внимание уделено обзору люминесцентных свойств гетероструктур на основе ZnSe с ZnCdSe/ZnSe слоями КЯ и CdSe/ZnSe КТ в активной области и причинам деградации слоев и структур под действием электронного пучка.

Вторая часть обзора посвящена рассмотрению современных моделей, используемых для описания взаимодействия электронного пучка с конденсированным веществом, расчеты распределения неравновесных носителей по области взаимодействия и функции генерации катодолюминесценции при различных энергиях электронного пучка. Сделан обзор работ использования метода КЛ с разрешением по глубине для определения распределения дефектов по глубине, изменения состава слоя и вертикального транспорта носителей по гетероструктуре, при генерации электронным пучком. Рассмотрены методы определения диффузионной длины носителей в гетероструктурах с помощью КЛ. Анализ литературных данных показал, что в настоящее время почти нет работ с применением неразрушающего катодолюминесцентного метода послойного анализа гетероструктур A^2B^6 .

Вторая глава посвящена описанию дизайна исследованных гетероструктур, аппаратуре и методам из исследования.

Образцы гетероструктур были выращены методом молекулярно-пучковой эпитаксии на буферном слое GaAs (001) на подложках GaAs. Структуры состоят из барьерного слоя ZnMgSSe толщиной $\sim 1,2$ μm на котором выращен варизонный волновод, состоящий из короткопериодных сверхрешеток

Zn(Mg)SSe/ZnSe и активная область с ZnCdSe/ZnSe КЯ или CdSe/ZnSe КТ, расположенная в центре волновода [3,4]. Дизайн лазерных гетероструктур предназначен либо для оптической накачки, либо для накачки электронным пучком с энергией 8-10 кэВ.

Все экспериментальные результаты были получены на катодоллюминесцентной системе, совмещенной с рентгеновским микроанализатором САМЕВАХ.

Определение состава эпитаксиальных слоев проводилось методом рентгеноспектрального микроанализа. Наряду со стандартным методом рентгеноспектрального микроанализа толстых пленок ZnMgSSe предложен новый разработанный метод определения состава слоев ZnCdSe толщиной 1-7 нм в многослойных лазерных гетероструктурах A^2B^6 . Методика основана на учете распределения рентгеновского излучения по глубине образца и его зависимости от энергии электронного пучка. Расчет распределений проводился методом Монте-Карло для исследованных гетероструктур, разных аналитических линий и энергий электронов. Способы расчета опубликованы в работе [5]. В разработанном методе искомая концентрация определяется из измеренных значений относительной интенсивности аналитического рентгеновского излучения линии Cd-L α с использованием данных просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) о толщине анализируемого слоя. Метод вариации энергии электронного пучка позволяет также определять глубину залегания слоя. В Таблице 1 приведены результаты анализа слоев ZnCdSe в гетероструктурах методом рентгеноспектрального микроанализа, данные исследований методом ПЭМ и параметры, заданные при выращивании структур.

Таблица 1. Результаты микроанализа $Cd_xZn_{1-x}Se$ слоя, глубина залегания слоя h (нм) и толщина слоя d (нм), состав x (образцы В, С со слоем CdSe КТ).

	Заданные параметры			ПЭМ		Микроанализ		
	h, нм	d, нм	x	h, нм	d, нм	h, нм	d, нм	x
#А	125	7	0,26	160		169 ± 10	7	0,27 ± 0,01
#В	175	1		225	1,6	213 ± 10	1,6	0,63 ± 0,03
#С	125	1		95	1	124 ± 10	1	0,66 ± 0,03
#D	156	7	0,26	190	6,6	168 ± 5	6,6	0,27 ± 0,01
#F	192	7	0,26			268 ± 5	7	0,31 ± 0,01

С учетом доли излучения, генерируемой в тонком слое на определенной глубине, минимальная определяемая концентрация составляет 2 атомных % Cd при толщине слоя 7 нм и глубине залегания 100 нм.

Также в этой главе представлена модель расчета распределения неравновесных носителей заряда, генерируемых электронным пучком, по глубине гетероструктуры. В модели используются распределения потерь энергии электронов по глубине, рассчитанные для разных энергий электронного пучка. Применение этой модели позволило корректно моделировать полученные экспериментальные зависимости интенсивности излучения КЯ(КТ) от энергии электронного пучка. При получении экспериментальных результатов были тщательно выбраны условия эксперимента.

В третьей главе описаны результаты измерений катодоллюминесцентного излучения эпитаксиальных пленок ZnSe, ZnSSe, ZnMgSSe. Исследования показали, что при непрерывном облучении электронным пучком эпитаксиальных пленок наблюдается медленное изменение интенсивности полосы КЛ (разгорания и затухания интенсивности КЛ). Данные процессы описываются при помощи предложенной модели захвата носителей на энергетические уровни ловушек в запрещенной зоне и безызлучательной рекомбинации через эти уровни. На Рис. 1 показаны экспериментальные результаты измерений зависимости интенсивности КЛ от времени облучения стационарным электронным пучком.

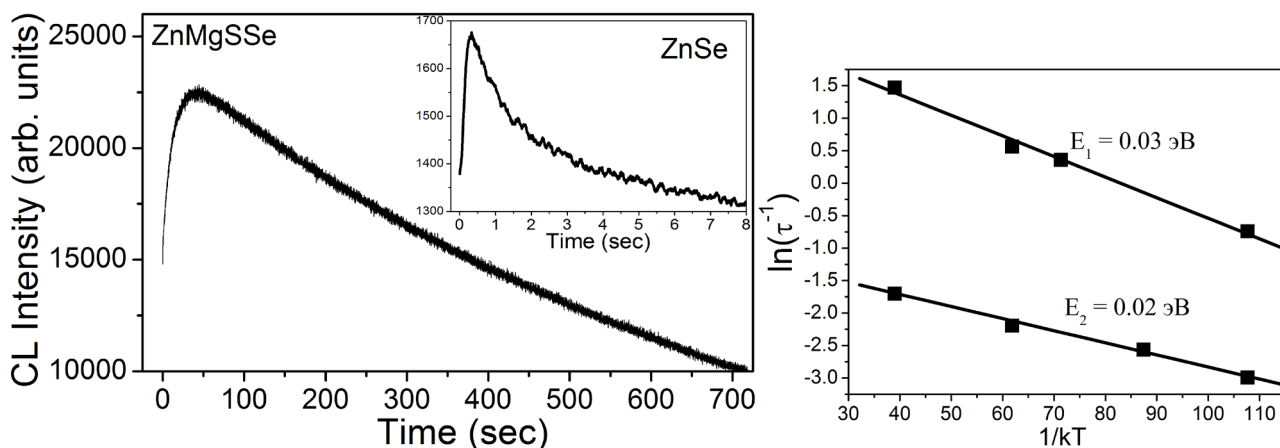


Рисунок 1. Изменение интенсивности полосы КЛ слоя ZnMgSSe (на вставке для ZnSe) во времени (слева). График Аррениуса, определение энергии активации уровней дефектов в слое ZnSe (справа).

Возрастание интенсивности связано с забрасыванием носителей с энергетического уровня ловушки в зону проводимости и рекомбинацией, падение интенсивности связано с преобладанием процессов захвата носителей на уровни ловушек над переходами в зону проводимости. Эти временные зависимости были измерены при различных токах электронного пучка в диапазоне температур образца от 300 К до 80 К. На основе этих результатов

получены зависимости времен процессов разгорания и затухания интенсивности КЛ от тока электронного пучка при различных температурах образца. Из расчета для предложенной модели определены энергии активации энергетических уровней ловушек, которые составили 0,02-0,04 эВ для разных образцов (Рис. 1). В результате проведенных исследований были установлены корреляции временных процессов и состава слоя для ряда образцов ZnSe, ZnSSe, ZnMgSSe. Характерные времена разгорания меняются от 1 до ~50 с, затухание от 10 до 800 с. Самые короткие времена процессов наблюдались в слоях ZnSSe по составу согласованных с GaAs по параметру решетки, самые длительные времена наблюдались в слоях ZnMgSSe с избытком Mg и S относительно стабильного твердого раствора согласованного с GaAs по параметру решетки.

Вторая часть главы посвящена определению концентрации точечных дефектов в слоях ZnMgSSe различного состава и структурного качества. При определенных условиях эксперимента интенсивность широкой полосы КЛ в спектре слоев ZnMgSSe связанной с точечными дефектами выходит на насыщение с увеличением плотности тока электронного пучка от 0,1 до 2 мА/см² (энергия электронов 10 кэВ), тогда как интенсивность краевой полосы КЛ возрастает линейно (Рис. 2). Для образцов различного состава уровень насыщения интенсивности полос КЛ разный, что говорит о различной концентрации люминесцентных центров связанных с точечными дефектами.

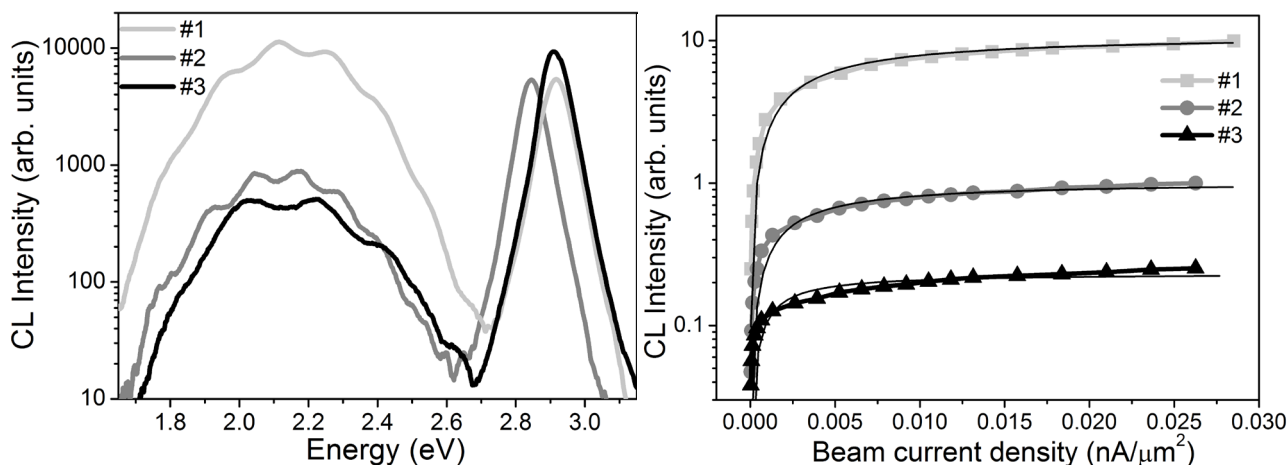


Рисунок 2. Спектры слоев ZnMgSSe с разным содержанием точечных дефектов (слева). Зависимость интенсивности полосы КЛ точечных дефектов от плотности тока электронного пучка (справа).

Сравнение с образцом с известной концентрацией люминесцирующих центров, измеренным при одинаковых условиях эксперимента позволило провести количественную оценку концентрации точечных дефектов в слоях. В качестве такого эталона был использован Al₂O₃:Cr. Времена послесвечения

полосы излучения, связанной с точечными дефектами, измерялись в режиме прерывания электронного пучка. Было установлено, что время послесвечения полосы излучения уменьшается с увеличением плотности точечных дефектов с 10 мс до 6 мс. Такая связь времени послесвечения и содержания точечных дефектов может быть объяснена возникновением взаимодействия между точечными дефектами соответственно, увеличению вероятности безызлучательной рекомбинации.

Описанная работа была необходима для проведения оценки качества барьерных слоев ZnMgSSe используемых в лазерных гетероструктурах. Концентрации точечных дефектов были определены также для барьерных слоев ZnMgSSe в лазерных гетероструктурах. В исследованных структурах концентрация дефектов в барьерных слоях на порядок меньше, чем в отдельно выращенном эпитаксиальном слое, времена дефектной полосы в два раза длиннее - 20 мс. При расчетах не учитывалось поглощение КЛ дефектов в барьерном слое верхними слоями структуры.

В четвертой главе проведены катодолюминесцентные исследования образцов лазерных гетероструктур на основе ZnSe. В спектрах КЛ структур определяются полосы соответствующие излучению (Zn)CdSe КЯ(КТ) при энергии 2,4 эВ, сверхрешеток (ZnSSe/ZnSe) 2,73-2,75 эВ, (ZnMgSSe/ZnSe) 2,80 эВ, ZnMgSSe нижнего барьерного слоя 2,9 эВ при 300 К (Рис. 3).

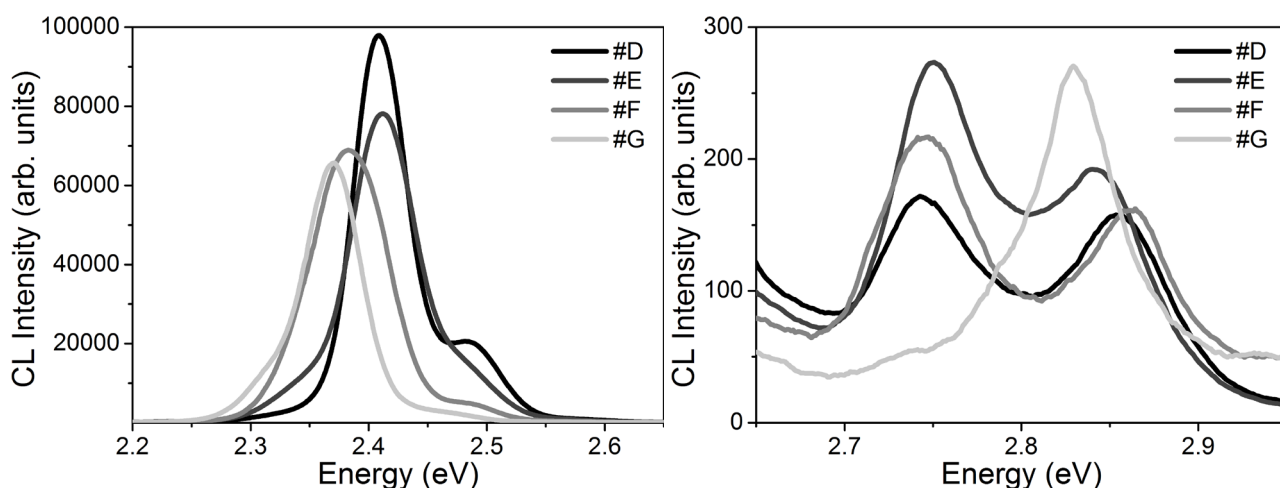


Рисунок 3. Спектры КЛ гетероструктур при 10 кэВ, 300 К. Образцы D,F с ZnCdSe КЯ, образцы E,G с одним и пятью слоями CdSe КТ в активной области гетероструктур.

Для двух серий структур схожего дизайна получены экспериментальные зависимости интенсивности полос КЛ КЯ(КТ) от энергии электронного пучка при двух разных условиях изменения мощности возбуждения – при постоянном токе электронного пучка (Рис. 4) и при постоянной мощности электронного пучка (путем изменения тока). Условия эксперимента были следующие: энергия

электронного пучка изменялась в диапазоне 2-25 кэВ, ток 1-10 нА, диаметре пучка 20 мкм. Для получения экспериментальных зависимостей интенсивности КЛ различных полос от энергии электронного пучка учитывалась интегральная интенсивность полосы соответствующей излучению КЯ(КТ). Эксперимент показал, что интенсивность полос КЛ КЯ(КТ) для всех образцов линейно зависит от тока электронного пучка во всем диапазоне энергий электронов. Аналогичные результаты получены для эпитаксиальных слоев ZnMgSSe. Это является важным условием корректного использования метода КЛ для определения транспорта носителей по гетероструктуре. Другим важным условием эксперимента является отсутствие деградации структуры за время измерения спектров КЛ.

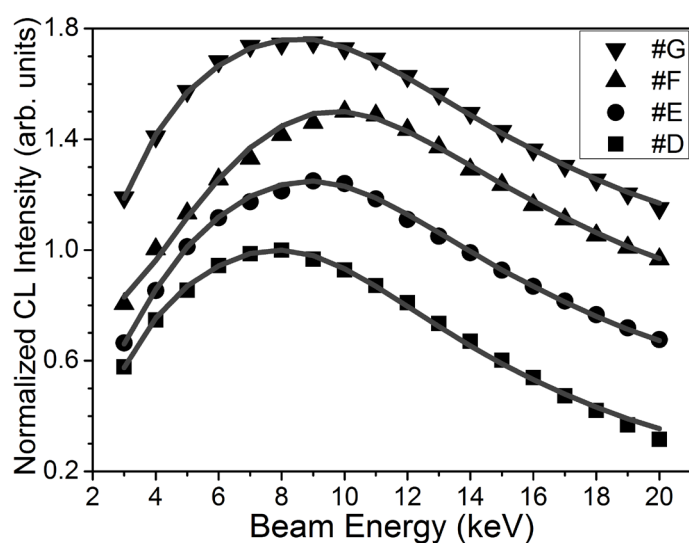


Рисунок 4. Экспериментальные результаты зависимости интенсивности полос КЛ (Zn)CdSe КЯ(КТ) от энергии электронного пучка (точки) и результаты моделирования (кривые).

Положение максимума интенсивности полосы КЛ КЯ(КТ) в зависимости от энергии электронного пучка определяется глубиной залегания слоя КЯ(КТ) и размерами области транспорта носителей заряда в структуре. Моделирование результатов эксперимента с помощью, описанной во второй главе, модели генерации носителей электронным пучком по структуре и учете транспорта в активную область позволили определить область транспорта носителей в активную область (Рис. 4). В модели предполагается, что все генерированные носители в области транспорта рекомбинируют в активной области. Положение верхней границы области транспорта составляет около 40-50 нм в глубину структуры для всех образцов. Это связано с высокой безызлучательной поверхностной рекомбинацией и рекомбинацией носителей в свёрхрешетках верхней части волновода при малых энергиях электронного пучка. Положение

нижней границы находится на глубине ~ 100 нм ниже границы волновода определенной просвечивающей электронной микроскопией. Это означает, что количество генерированных электронно-дырочных пар в ZnMgSSe слое, дающих вклад в рекомбинацию носителей в активной области, намного меньше, чем в волноводе. Увеличение рекомбинации носителей в барьерном слое ZnMgSSe приводит к уменьшению интенсивности КЛ КЯ(КТ) при энергиях электронного пучка выше 10 кэВ. Количество носителей в ZnMgSSe слое увеличивается по отношению к общему количеству генерированных носителей. Они рекомбинируют через межзонную рекомбинацию в слое или безызлучательно на дефектах структуры. Интенсивность полосы КЛ барьерного слоя ZnMgSSe линейно растет с увеличением энергии электронов при постоянном токе электронного пучка.

Измерены спектры КЛ и построены зависимости интенсивности полос КЛ сверхрешеток от энергии электронного пучка. Условия эксперимента отличались от измерений спектров КЛ КЯ(КТ) в виду сильной разницы в интенсивности полос КЛ КЯ(КТ) и полос сверхрешеток и нижнего барьерного слоя ZnMgSSe на четыре порядка. Зависимости интенсивности полос КЛ сверхрешеток от энергии электронного пучка отличаются положением максимума при более низких энергиях электронного пучка, чем в зависимостях для излучения КЯ (КТ) и более быстрым спадом с увеличением энергии электронного пучка. Таким образом, основной вклад интенсивность полосы излучения вносит верхняя сверхрешетка относительно активной области, соответственно транспорт носителей по сверхрешетке хуже, чем в нижней части волновода. Это объясняется образованием протяженных дефектов в активной области гетероструктуры и проращением их к поверхности, что увеличивает безызлучательную рекомбинацию носителей при генерации электронным пучком. Как уже было отмечено интенсивность полосы КЛ слоя ZnMgSSe линейно возрастает (при условии постоянного тока электронного пучка), начиная с некоторой энергии электронов, при которой электроны пучка проникают в слой. Меньшая величина наклона зависимости интенсивности полосы КЛ барьерного слоя от энергии электронного пучка в сравнении с аналогичной зависимостью для отдельного эпитаксиального слоя ZnMgSSe свидетельствует о том, что большинство генерированных носителей рекомбинирует в активной области.

Сравнительный анализ зависимостей для разных образцов позволяет провести качественную оценку структурного совершенства лазерных гетероструктур. По результатам исследования можно сделать следующие заключения:

Размеры области транспорта носителей по глубине структуры, максимальные значения интенсивности полос КЛ КЯ(КТ), а также интенсивность люминесценции сверхрешеток определяют качество волновода. Концентрации точечных дефектов, характер зависимости КЛ барьерного слоя от энергии электронного пучка и размеры области транспорта в барьерном слое гетероструктуры говорят о качестве нижнего барьерного слоя с в гетероструктуре.

Основные результаты и выводы

1. Проведено исследование КЛ точечных дефектов центров люминесценции в слоях ZnMgSSe различного состава и определена их концентрация.
2. Разработан метод определения состава и глубины залегания слоев ZnCdSe КЯ в многослойных гетероструктурах на основе ZnSe методом рентгеноспектрального микроанализа.
3. С помощью разработанной методики микроанализа тонких нанометровых слоев в составе гетероструктур был определен состав и глубина залегания слоя ZnCdSe с толщинами 1-7 нм.
4. Изучены катодолуминесцентные свойства гетероструктур на основе ZnSe. Определены параметры характеризации качества гетероструктур по спектрам КЛ с разрешением по глубине.
5. Получены экспериментальные зависимости интенсивности полос в спектрах КЛ при изменении энергии электронного пучка для двух серий образцов гетероструктур с варизонным волноводом на основе ZnSe. Из моделирования этих зависимостей получены параметры для оценки вертикального транспорта носителей заряда при генерации электронным пучком.
6. Предложена модель расчета изменения интенсивности полос в спектрах КЛ по глубине структуры, определены параметры моделирования для гетероструктур на основе ZnSe. Разработан способ оценки качества гетероструктур по транспорту неравновесных носителей, созданных электронным пучком в гетероструктуре.

Список публикаций по теме диссертации

1. A.A. Shakhmin, M.V. Zamoryanskaya, I.N. Arsenyev, S.G. Konnikov, D.A. Vinokurov, A.L. Stankevich, I.S. Tarasov, GaAs quantum well structures investigation by local cathodoluminescence // Superlattices and Microstructures 2009, v. 45 No 4-5, p. 376-382
2. С.Г. Конников, А.А. Гуткин, М.В. Загорянская, Т.Б. Попова, А.А. Ситникова, А.А. Шахмин, М.А. Яговкина, Комплексная диагностика гетероструктур с квантоворазмерными слоями // ФТП 2009, т. 43 вып. 9, с. 1280-1287

3. A.A. Shakhmin, I.V. Sedova, S.V. Sorokin, H.-J. Fitting, M.V. Zamoryanskaya, ZnSe based films characterization by cathodoluminescence, // *Physica B: Condensed Matter* 2009, v. 404 No. 23-24, p. 5016-5018
4. M.V. Zamoryanskaya, Ya.V. Domracheva, A.A. Shakhmin, D.B. Shustov, A.N. Trofimov, S.G. Konnikov, Local cathodoluminescence study of defects in semiconductors and multilayer structures // *Physica B: Condensed Matter* 2009, v. 404 No. 23-24, p. 5042–5044
5. A.A. Shakhmin, I.V. Sedova, S.V. Sorokin, H.-J. Fitting, M.V. Zamoryanskaya, Cathodoluminescence of wide-band-gap II-VI quaternary alloys // *Physica Status Solidi (c)* 2010, v. 7 No. 6, p. 1457-1459
6. M.V. Zamoryanskaya, Y.V. Kuznetsova, T.B. Popova, A.A. Shakhmin, D.A. Vinokurov, A.N. Trofimov, Study of Semiconductor Multilayer Structures by Cathodoluminescence and Electron Probe Microanalysis // *Journal of Electronic Materials* 2010, v. 39 No. 6, p. 620-624
7. Т.Б. Попова, Л.А. Бакалейников, Е.Ю. Флегонтова, А.А. Шахмин, М.В. Заморянская, Рентгеноспектральный микроанализ гетероструктур с наноразмерными слоями // *ФТП* 2011, т. 45 вып. 2, с. 263-267

Публикации в трудах и тезисах конференций:

1. А.А. Шахмин, И.В. Седова, С.В. Сорокин, М.В. Заморянская, Характеризация пленок на основе ZnSe методом локальной катодолуминесценции // Тезисы докладов XV российского симпозиума по растровой электронной микроскопии и аналитическим методам исследования твердых тел (РЭМ 2007), с. 222-223
2. A.A. Shakhmin, I.V. Sedova, S.V. Sorokin, V.I. Sokolov, M.V. Zamoryanskaya, ZnSe based films characterization by local cathodoluminescence // Тезисы докладов 12th International Conference on Defects-Recognition, Imaging and Physics in Semiconductors (DRIP XII 2007), с. 116
3. А.А. Шахмин, М.В. Заморянская, С.Г. Конников, И.Н. Арсентьев, Д.А. Винокуров, А.Л. Станкевич, И.С. Тарасов, Исследование структур с GaAs квантовой ямой методом локальной катодолуминесценции // Труды XII Международного Симпозиума “Нанозифика и наноэлектроника” (2008), том 2, с. 513
4. А.А. Shakhmin, M.V. Zamoryanskaya, I.N. Arsenyev, S.G. Konnikov, D.A. Vinokurov, A.L. Stankevich, I.S. Tarasov, GaAs quantum well structures investigation by local cathodoluminescence // Тезисы докладов 9th International Workshop on Beam Injection Assessment of Microstructures in Semiconductors (BIAMS 2008), с. 77
5. A.A. Shakhmin, I.V. Sedova, S.V. Sorokin, H.-J. Fitting, M.V. Zamoryanskaya, ZnSe based films characterization by local cathodoluminescence // Тезисы

докладов 25th International Conference on Defects in Semiconductors (ICDS-25 2009), с. 295

6. A.A. Shakhmin, I.V. Sedova, S.V. Sorokin, H.-J. Fitting, M.V. Zamoryanskaya, ZnSe based films characterization by local cathodoluminescence // Тезисы докладов 14th International Conference on II-VI compounds (II-VI-2009), с. 303
7. A.A. Shakhmin, I.V. Sedova, S.V. Sorokin, M.V. Zamoryanskaya, Cathodoluminescence investigation of CdSe QD green laser heterostructures // Тезисы докладов 13th International Conference on Defects — Recognition, Imaging, and Physics in Semiconductors (DRIP XIII 2009), с. 4
8. A.A. Shakhmin, I.V. Sedova, S.V. Sorokin, M.V. Zamoryanskaya, Cathodoluminescence of ZnCdSe/ZnSe green laser heterostructures // Тезисы докладов 10th International Workshop on Beam Injection Assessment of Microstructures in Semiconductors (BIAMS 2010)
9. A.A. Shakhmin, I.V. Sedova, S.V. Sorokin, M.V. Zamoryanskaya, Cathodoluminescence of ZnSe-based II-VI green laser heterostructures // Тезисы докладов 15th International Conference on II-VI Compounds (II-VI 2011), с. 96.
10. A.A. Shakhmin, I.V. Sedova, S.V. Sorokin, M.V. Zamoryanskaya, Characterization of ZnCdSe/ZnSe green laser heterostructures by cathodoluminescence // Тезисы докладов 11th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures (ACSIN 2011) с. 286

Список литературы

1. N.G. Basov, E.M. Dianov, V.I. Kozlovsky, A.B. Krysa, A.S. Nasibov, Y.M. Popov, A.M. Prokhorov, P.A. Trubenko, E.A. Shcherbakov, Laser Physics 1996, v. 6 No. 3, с. 608-611
2. M.M. Zverev, S.V. Ivanov, N.A. Gamov, E.V. Zdanova, V.B. Studionov, D.V. Peregoudov, I.V. Sedova, S.V. Gronin, S.V. Sorokin, P.S. Kop'ev, I.M. Olikhov, Physica Status Solidi (b) 2010, v. 247 No. 6, с. 1561-1563
3. S.V. Gronin, S.V. Sorokin, I.V. Sedova, S.V. Ivanov, E.V. Zdanova, M.M. Zverev, Physica Status Solidi (c) 2010, v. 7 No. 6, p. 1694-1696
4. 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, Applied Physics Letters 2011, v. 98 No 17, p. 171103-171103
5. L. Bakaleinikov, Y. Domrachova, E. Kolesnikova, M. Zamoryanskaya, T. Popova, E. Flegontova, Semiconductors 2009, v. 43 No. 4, p. 544-549