

На правах рукописи



Тропина Наталья Эдуардовна

**ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ
ЛЕГИРОВАННЫХ КОМПОЗИТНЫХ ПЛЕНОК $PbSe$ И
ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ $Pb_{1-x}Cd_xSe$**

Специальность: 01.04.10 – Физика полупроводников

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург
2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор Ильин Владимир Иванович.

Официальные оппоненты: Немов Сергей Александрович
доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры технологии и исследования материалов ФГБОУ ВПО «СПбГПУ»

Ишанин Геннадий Григорьевич.
доктор технических наук, профессор, заместитель заведующего кафедрой экологического приборостроения и мониторинга ФГБОУ ВПО «СПбНИУ ИТМО»

Ведущая организация: Учреждение Российской академии наук Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе

Защита состоится «30» мая 2013 года в 14 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.229.01 при ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29, корп. 4, ауд. 305.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан « » апреля 2013 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.229.01, профессор, доктор технических наук



А. С. Коротков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

В современной оптоэлектронике одним из приоритетных является направление, связанное с разработкой и созданием полупроводниковых источников инфракрасного (ИК) излучения для спектрально-аналитической аппаратуры различного назначения. Такие источники должны обладать высоким быстродействием, малым энергопотреблением, небольшими габаритно-весовыми параметрами и быть неприхотливыми к условиям эксплуатации.

Анализ существующих разработок по созданию ИК полупроводниковых источников показывает, что одним из наиболее перспективных приборов для работы в спектральном диапазоне 2.0–5.0 мкм являются фотолюминесцентные излучатели на основе пленок $PbSe$ и $Pb_{1-x}Cd_xSe$.

Основным недостатком широкополосных полупроводниковых источников ИК излучения является их низкая оптическая мощность. Несмотря на то, что известно достаточно большое количество способов увеличения мощности выходного излучения светодиодных структур, исследования, направленные на повышение эффективности излучения фотолюминесцентных излучателей на основе пленок $PbSe$ и $Pb_{1-x}Cd_xSe$ до недавнего времени не проводились.

Отметим также, что для формирования фотолюминесцентных структур на основе пленок $PbSe$ и $Pb_{1-x}Cd_xSe$ необходимо проведение таких технологических операций, как высокотемпературная обработка пленок в кислородсодержащей среде и обработка сформированных структур в парах йода. Изготовленные таким образом структуры представляют собой гетерогенные системы - $PbSe$, окруженный «стекловидной» фазой. Это обстоятельство существенным образом осложняет исследование физических процессов, обуславливающих достаточно высокую эффективность подобных излучателей, и затрудняет поиски путей улучшения их характеристик.

Таким образом, актуальность работы определяется, с одной стороны, необходимостью дальнейшего развития представлений о физических процессах, имеющих место в пленках $PbSe$ и $Pb_{1-x}Cd_xSe$, а с другой – необходимостью повышения выходной мощности этих источников ИК излучения.

Целью диссертационной работы является исследование фотолюминесцентных структур на основе пленок $PbSe$ и $Pb_{1-x}Cd_xSe$, направленное на улучшение их фотоэлектрических параметров, с целью создания полупроводниковых источников ИК излучения, отвечающих современным требованиям.

Для достижения поставленной в работе цели необходимо решить следующие задачи:

1. Методами растровой электронной микроскопии (РЭМ) и рентгенофазового анализа (РФА) изучить морфологию фотолюминесцентных пленок $PbSe$ на всех этапах их формирования.
2. Методами рентгеноструктурного анализа (РСА) и фотолюминесценции (ФЛ) исследовать влияние «стекловидной» диэлектрической фазы, как на кристаллиты $PbSe$, так и на фотолюминесцентные и оптические свойства структуры в целом.
3. Разработать комплекс спектрально–измерительной аппаратуры для исследования ФЛ композитных структур на основе пленок $PbSe$ и $Pb_{1-x}Cd_xSe$.
4. Исследовать возможность увеличения мощности фотолюминесцентного излучения в композитных пленках $PbSe$ за счет введения донорных (Bi и Cl) примесей.

5. Определить механизм увеличения мощности фотолюминесцентного излучения в композитных пленках $PbSe$, обработанных в парах йода.

6. Исследовать возможность увеличения эффективности вывода излучения фотолюминесцентных композитных структур на основе пленок $PbSe$.

Объектом исследования являются тонкопленочные структуры на основе $PbSe$ и его твердых растворов, сформированные вакуумным напылением на подложках из CaF_2 и на стеклянных подложках, в том числе, подвергнутые последующей температурной обработке в кислородсодержащей среде.

Предметом исследования являются оптические и фотоэлектрические свойства пленок $PbSe$ и $Pb_{1-x}Cd_xSe$.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Показано, что в состав «стекловидной» диэлектрической фазы фотолюминесцентных композитных структур входит алмазит $PbSiO_3$, который может находиться, как в кристаллическом, так и в аморфном состоянии, в зависимости от способа формирования композита.

2. Установлено, что оптические переходы на пороге межзонного поглощения пленок $PbSe$ и $Pb_{1-x}Cd_xSe$ прямые, разрешенные, а наблюдаемое дополнительное поглощение может быть ассоциировано с "хвостами" плотности локализованных состояний, простирающимися вглубь запрещенной зоны полупроводникового материала.

3. Впервые экспериментально подтверждено, что легирование приграничных слоев кристаллитов $PbSe$ кислородом в процессе высокотемпературной обработки пленок в кислородсодержащей среде является объемным эффектом.

4. Впервые показано, что в процессе высокотемпературной обработки, в том числе и в парах йода, пленок $PbSe$, сформированных на стеклянных подложках, происходит незначительное сжатие кристаллитов $PbSe$, которое не приводит к радикальным изменениям зонной структуры полупроводника.

5. Установлено, что увеличение мощности фотолюминесцентного излучения композитных пленок $PbSe$ достигается путем увеличения объема области пространственного заряда с пониженной концентрацией носителей заряда.

6. Показано, что коротковолновая граница спектра ФЛ в композитных пленках $PbSe$ при $h\nu > E_g$ связана с межзонной рекомбинацией, а при $h\nu < E_g$ соответствует «хвостам» плотности состояний, обусловленными флуктуациям примесного потенциала.

7. Впервые показано, что при высокотемпературной обработке композитных пленок $PbSe$ в парах йода, йод адсорбируется на поверхности кристаллитов $PbSe$.

8. Впервые в приближении теории эффективной среды определены дисперсионные зависимости эффективных показателей преломления и поглощения композитного излучающего слоя на основе $PbSe$ в спектральном диапазоне 2.0–7.0 мкм.

9. Впервые предложена методика расчета толщины дополнительного просветляющего слоя для увеличения эффективности вывода излучения фотолюминесцентных композитных структур на основе пленок $PbSe$.

Практическая значимость результатов, полученных в работе:

1. Разработан комплекс спектрально-измерительной аппаратуры для исследования ФЛ композитных структур на основе пленок $PbSe$ и $Pb_{1-x}Cd_xSe$.

2. Получена информация о механизмах возникновения ФЛ и фотопроводимости (ФП) в композитных пленках $PbSe$, которая может быть использована для дальнейшего совершенствования оптоэлектронных приборов на их основе.

3. Показано, что применение в качестве подложек стекол с различным ТКЛР не приводит к заметным изменениям значений ширины запрещенной зоны E_g в композитных пленках $PbSe$, найденных из спектров ФЛ.

4. Разработана методика расчета дополнительного просветляющего покрытия для увеличения эффективности ИК источников излучения на основе композитных пленок $PbSe$.

5. Показано, что нанесение пленки AsS_4 с оптимальной толщиной позволяет увеличить величину интегральной (по спектру) интенсивности ФЛ композитных пленок $PbSe$ до 60 %.

6. Результаты работы использованы при выполнении ряда опытно – конструкторских работ, проводимых на предприятии ОАО «НИИ «Гириконд» по заказу ЗАО «Российские Электронные Компоненты и Системы» (ОКР «Факел», «Взрыв», «Резервуар») и Министерства Промышленности и Торговли РФ (ОКР «Матрица-ТК») в период с 2007 по 2009 год.

Достоверность результатов работы обеспечивается их воспроизводимостью и согласием с результатами теоретических и экспериментальных исследований, использованием аттестованных методик и аппаратных средств измерений.

На защиту выносятся следующие **научные положения**:

1. Процесс создания композитной пленки сопровождается уменьшением концентрации свободных дырок вблизи поверхности кристаллитов $PbSe$ и межкристаллитных границ и появлением в ней ФЛ. Показано, что эффект легирования кислородом приграничных слоев кристаллитов является объемным.

2. Увеличение мощности фотолюминесцентного излучения композитных пленок $PbSe$ достигается путем увеличения объема области пространственного заряда с пониженной концентрацией носителей заряда в результате легирования донорными примесями.

3. Разработана методика расчета дополнительного просветляющего покрытия, позволяющего увеличить эффективность вывода излучения фотолюминесцентных структур на основе композитных пленок $PbSe$.

4. Использование фотолюминесцентных композитных структур на основе пленок $PbSe$ и $Pb_{1-x}Cd_xSe$ позволяет создавать высокоэффективные ИК полупроводниковые источники излучения для диапазона 2.0–5.0 мкм, удовлетворяющие требованиям современной оптоэлектроники.

Апробация результатов работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

- III, XI, XII, XIII – всероссийские молодежные конференции по физике полупроводников и полупроводниковой опто- и наноэлектронике. СПбГПУ, Санкт-Петербург, 2001, 2009 гг, 2010 г (*Диплом за доклад*) и 2011 г (*Диплом за доклад*).

- VI, VII – всероссийские межвузовские конференции молодых ученых. СПбГУ ИТМО, Санкт-Петербург, 2009 г. (*Диплом за лучший доклад на секции «Элементная база опико-электронных приборов»*), 2010 г.

- VI-я Международная конференция молодых ученых и специалистов «Оптика–2009». СПбГУ ИТМО, Санкт-Петербург, 19–21 октября, 2009 г.

- VII-я Международная конференция молодых ученых и специалистов «Оптика–2011». СПбГУ ИТМО, Санкт-Петербург, 17–21 октября, 2011 г.

Публикации. В диссертации обобщены результаты 14 работ автора, которые указаны в списке литературы. Пять работ опубликовано в журналах из перечня ведущих периодических изданий ВАК.

Личное участие автора. В материалах совместных работ личный вклад автора является определяющим. Основная часть теоретических и экспериментальных исследований выполнена автором самостоятельно. Формулировка направлений исследований, обсуждение и интерпретация результатов проводились совместно с научным руководителем.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы, включающего 193 наименования. Основная часть работы изложена на 152 страницах машинописного текста. Работа содержит 67 рисунков и 9 таблиц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы ее цели и задачи. Показана научная новизна полученных результатов и их практическая значимость. Перечислены основные положения, выносимые на защиту, приведены сведения об апробации работы, публикациях, структуре и объеме работы.

Глава 1 носит обзорный характер. Представлен анализ имеющихся на рынке полупроводниковых источников ИК излучения. Проведен обзор литературных данных, касающихся основных свойств халькогенидов свинца. Представлены имеющиеся в литературе модели, применяемые для описания фотоэлектрических свойств исследуемых структур. Отмечено, что тематика работы связана с дальнейшим развитием представлений о фотоэлектрических и оптических свойствах пленок $PbSe$ и $Pb_{1-x}Cd_xSe$, легированных различными примесями, а также с перспективами повышения выходных параметров источников ИК излучения.

В **Главе 2** приведено описание методик и экспериментального измерительного оборудования, используемых в работе для исследования оптических и электрофизических параметров образцов. В частности, приводится методика расчета оптических констант слоя $PbSe$ по спектрам пропускания и отражения с применением специально созданной компьютерной программы. Кроме того, приведено описание специально разработанного спектрально-измерительного оборудования для исследования ФЛ пленок $PbSe$ и $Pb_{1-x}Cd_xSe$ и оригинального программного обеспечения, позволяющего исследовать спектральное распределение и мощности фотолуминесцентного излучения образцов [1].

В **Главе 3** представлены результаты исследования пленок $PbSe$ и $Pb_{1-x}Cd_xSe$, сформированных на аморфных и кристаллических подложках. В частности, представлены результаты исследования коэффициента поглощения $\alpha(h\nu)$ пленок $PbSe$ и $Pb_{1-x}Cd_xSe$, спектров их ФЛ, морфологии и параметра решетки, а также некоторых электрофизических свойств. Исследования проводились на образцах, полученных термическим осаждением в открытом вакууме. В качестве подложек использовались подложки из CaF_2 со значением температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР) $18.38 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, близким к ТКЛР $PbSe$ ($19.4 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) и пластинки толщиной 150 мкм из стекол с различными значениями ТКЛР: $7.5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, $8.5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$,

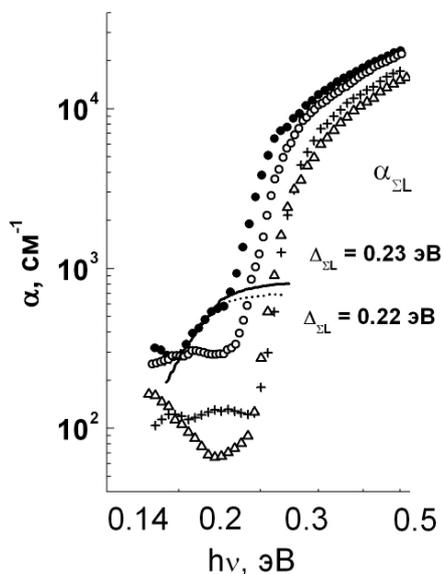


Рис. 1 Спектры оптического поглощения пленок $Pb_{1-x}Cd_xSe/CaF_2$.

Точки – эксперимент ($T=300 \text{ K}$):

- - $x=0$, ○ - $x=0.04$,
- △ - $x=0.1$, × - $x=0.2$.

Линии – расчет при:

$\Delta_{EL} = 0.23 \text{ эВ}$, $\Delta_{EL} = 0.22 \text{ эВ}$

$10 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ [2]. После напыления образцы, сформированные на стеклянных подложках, подвергались высокотемпературной обработке и воздействию паров йода [3]. Для ясного понимания излагаемого в работе материала были введены следующие терминологические определения: *поликристаллическая пленка* – это пленка $PbSe$, полученная вакуумным осаждением на стеклянную подложку и на подложку из CaF_2 , *композитная пленка* или *композит* – это поликристаллическая пленка $PbSe$, сформированная на стеклянной подложке и подвергнутая высокотемпературной обработке.

В результате было установлено, что в пленках $PbSe$ и $Pb_{1-x}Cd_xSe$, выращенных на подложках из CaF_2 , оптические переходы на пороге межзонного поглощения прямые, разрешенные, а наблюдаемые в спектрах $\alpha(h\nu)$ (рис. 1) участки, спрямляющиеся в координатах $\alpha^{1/2}(h\nu)$ (рис. 2), связаны с “хвостами” плотности локализованных состояний, простирающимися вглубь запрещенной зоны. Показано, что при введении в $PbSe$ селенида кадмия в количестве до $x = 0.1$ край собственного поглощения смещается в коротковолновую область спектра (рис. 1) [4, 5, 6].

Кроме того, в спектрах оптического поглощения были выявлены особенности, свидетельствующие о сложности физических процессов, протекающих при формировании пленок. Во-первых, край собственного поглощения в исследованной пленке $PbSe/CaF_2$ расположен при более низких энергиях квантов света, что объясняется существенной ролью обменного взаимодействия свободных дырок в исследуемых пленках, приводящей к сужению запрещенной зоны $PbSe$. Во-вторых, наблюдаемый излом зависимостей $\alpha^2(h\nu)$, представляющий собою совокупность двух прямолинейных участков (рис. 3), свидетельствует о том, что исследованные пленки растянуты в плоскости подложки

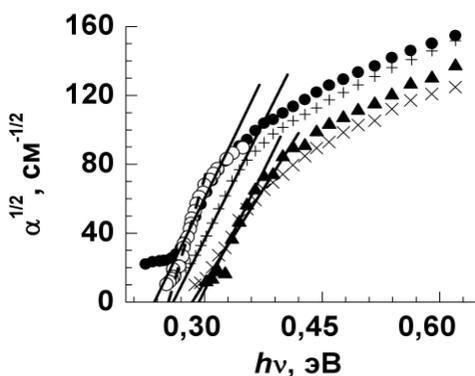


Рис. 2. Зависимости $\alpha^{1/2}(h\nu)$ в $Pb_{1-x}Cd_xSe$

● - $x=0$; + - $x=0.04$; Δ - $x=0.1$;
 × - $x=0.2$, ○ – данные источника¹

вследствие различий в ТКЛР материалов пленок и подложки.

Также, в спектре $\alpha(h\nu)$ $PbSe/CaF_2$ была выявлена полоса поглощения α_{SL} , характерная именно для $PbSe$ с проводимостью p -типа (рис. 1), связанная с оптическими переходами электронов между неэквивалентными экстремумами валентной зоны ($\Sigma_5 \rightarrow L_6^+$).

Как уже было сказано выше, композитные пленки представляют собой сложные, малоизученные структуры. Поэтому, прежде всего, были необходимы сведения об их строении. С этой целью в работе с помощью РЭМ была изучена морфология пленок, и были выполнены РФА и РСА.

Как и ожидалось, в процессе высокотемпературной обработки в кислородсодержащей среде происходит рекристаллизация $PbSe$, в результате которой пленка приобретает структуру, составленную цепочками отдельных, плотно прижатых друг другу кристаллитов с разными размерами, достигающими 1 мкм, разделенных порами, углубляющимися в подложку.

Обработка пленок $PbSe$ в парах йода сопровождается дальнейшей трансформацией их морфологии – размеры пор увеличиваются, а размеры зерен $PbSe$ уменьшаются (рис. 4).

¹ Равич Ю.И., Ефимов Б.А., Смирнов И.А. Методы исследования полупроводников в применении к халькогенидам свинца $PbTe$, $PbSe$, PbS . – М.: Наука, 1968. – 383 с.

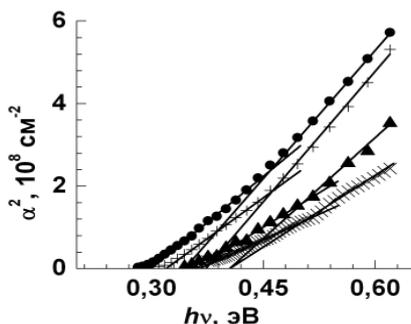


Рис. 3. Зависимости $\alpha^2(h\nu)$ в $Pb_{1-x}Cd_xSe$

● - $x=0$; + - $x=0.04$; Δ - $x=0.1$; \times - $x=0.2$.

РСА пленок с использованием дифракционной линии (600). Это позволило снизить величину инструментальной погрешности при определении параметра решетки a_0 до 0.001 \AA . Полученные результаты обобщены в таблице 1. Видно, что параметр решетки изменяется сложным образом, что может свидетельствовать, как о деформации $PbSe$ со стороны «стекловидной» фазы (ее удаление в трилоне Б, который не оказывает воздействия на $PbSe$, сопровождается восстановлением a_0 до значений, свойственных поликристаллическим образцам), так и о вариациях в составе и количестве собственных дефектов. Последнее обстоятельство вносит в величину a_0 дополнительную погрешность, оценка которой $\pm 0.002 \text{ \AA}$ была получена нами на основании анализа представленных в литературе данных о величине a_0 .

Представлялось целесообразным исследовать оптические свойства композитных пленок $PbSe$ с целью определения ширины запрещенной зоны (E_g) $PbSe$ и степени влияния на этот параметр «стеклообразной» диэлектрической фазы. В качестве экспериментального метода исследования был выбран метод исследования спектров ФЛ, которая обнаруживалась в композитных пленках $PbSe$, в отличие от поликристаллических пленок.

Исследования показали, что в спектрах ФЛ появляются длинноволновые «хвосты» (рис. 6), расположенные при $h\nu \ll E_g$ в $PbSe$. Это свидетельствует о том, что в формировании спектров ФЛ участвуют, не только зонные, но и локализованные состояния, ответственные за появление особенностей в спектрах $\alpha(h\nu)$ пленок $PbSe/CaF_2$. Прямое подтверждение этому предположению было получено при расчете спектров ФЛ с использованием экспериментально определенной зависимости $\alpha(h\nu)$ в пленках $PbSe/CaF_2$, без учета α_{SL} , по формуле:

$$r_v = f_e(E_c)f_h(E_v) \cdot \frac{8\pi^2 v^2 \alpha}{c^2} \quad (1)$$

Кроме этого, методами РФА было установлено, что в процессе обработки композитных пленок $PbSe$ в парах йода уменьшается доля фазы $PbSe$ и возрастает доля диэлектрической «стекловидной» фазы, в составе которой, помимо селенита свинца $PbSeO_3$, впервые обнаружен алмазит $PbSiO_3$. Было установлено, что, в зависимости от технологии формирования композитов, $PbSiO_3$ может находиться, как в кристаллическом (рис.5 а), так и в аморфном состояниях (рис.5 б).

Для того, чтобы оценить влияние диэлектрической фазы на $PbSe$, в работе выполнен

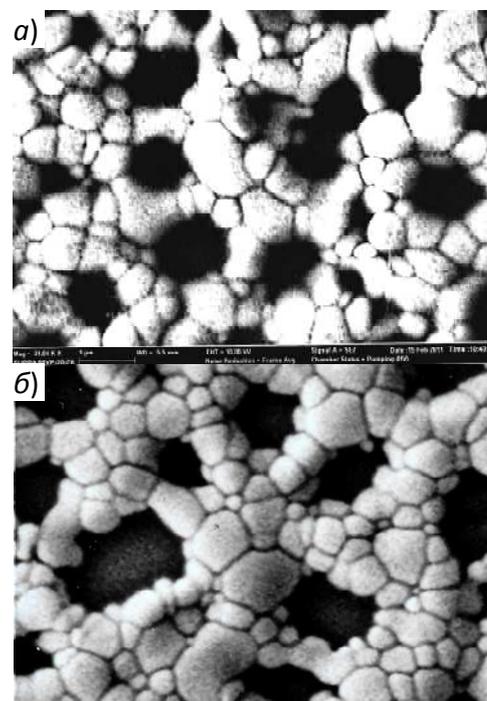


Рис. 4. Микроструктура композитной пленки $PbSe$

а) с удаленной «стекловидной» диэлектрической фазой;

б) обработанной в парах йода с удаленной «стекловидной» диэлектрической фазой;

Изображения выполнены в одинаковом масштабе

где $f_e(E_c)$ и $f_h(E_v)$ – фермиевские функции, n_r – показатель преломления.

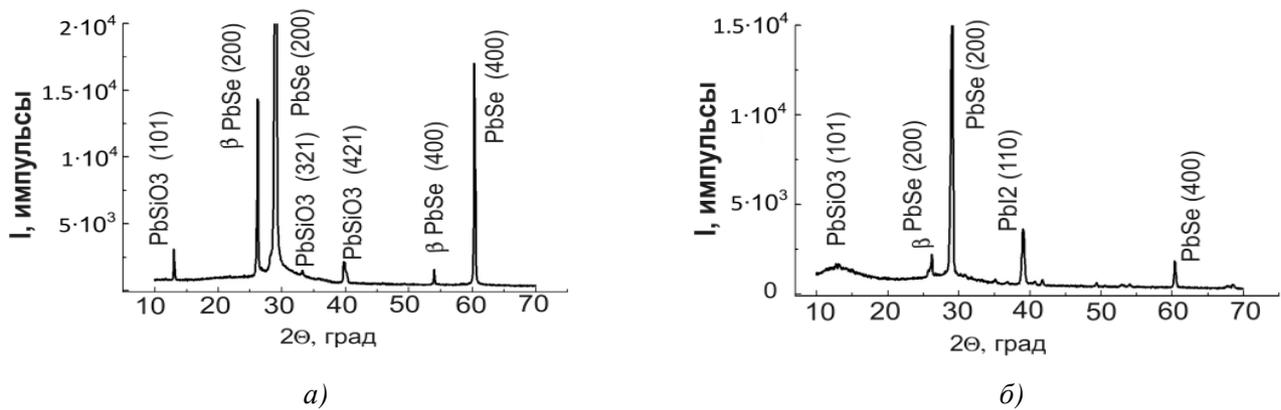


Рис. 5. Рентгенограммы композитной пленки $PbSe$

а) композитная пленка $PbSe$, без обработки в парах йода;
 б) композитная пленка $PbSe$, обработанная в парах йода

При расчете спектров ФЛ были существенно использованы результаты исследований спектров $\alpha(h\nu)$ в $Pb_{1-x}Sn(Ge)_xSe$, $x \leq 0.02$ ², в которых было установлено, что незначительные (в пределах ± 20 мэВ) вариации E_g в $Pb_{1-x}Sn(Ge)_xS$ не приводят к заметным изменениям спектральных зависимостей коэффициента межзонного поглощения $\alpha(h\nu - E_g)$.

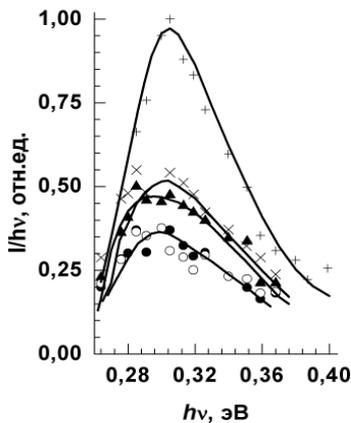


Рис. 6. Спектры ФЛ композитных пленок $PbSe$ при $T = 300$ К.

▲, ● – исходные пленки
 + – пленка, обработанная в парах йода,
 ○ – исходная пленка с удаленной “стекловидной” фазой,
 × – пленка, обработанная в парах йода с удаленной “стекловидной” фазой

Это позволило нам смещать кривую $\alpha(h\nu)$, полученную в пленках $PbSe/CaF_2$, вдоль оси энергии, добиваясь совпадения расчетных зависимостей и экспериментальных точек, и определить тем самым E_g в композитных пленках $PbSe$. Достигнутое согласие расчетных и экспериментальных точек указывает на то, что локализованные состояния, образующие “хвосты”, возникают на стадии роста пленок и не претерпевают заметных изменений в процессе формирования композита. Природа “хвостов” остается невыясненной. Близость полученных нами результатов к данным для монокристаллических образцов¹, дает основания предполагать, что “хвосты” присущи материалу, и обусловлены особенностями процессов дефектообразования в $PbSe$.

Полученные при помощи расчета спектров ФЛ значения $E_g = 0.284 \pm 0.003$ эВ оказались ниже порога $E_{g2} = 0.3$ эВ, обнаруженного при анализе спектров $\alpha(h\nu)$ в пленках $PbSe/CaF_2$, что указывает на сжатие пленок, происходящее в процессе рекристаллизации $PbSe$, под действием нарастающей вокруг них диэлектрической фазы [6].

Помимо этого, исследования спектров ФЛ, дополненные измерениями коэффициента Холла, показали, что концентрация дырок в светоизлучающих областях

² Вейс А. Н. Энергетический спектр вакансий халькогена в электронном селениде свинца по данным оптического поглощения / ДАН СССР. – 1986. – Т.289, № 6. – С.1355-1359.

композитных пленок *PbSe* снижается. Это указывает на то, что появление ФЛ в

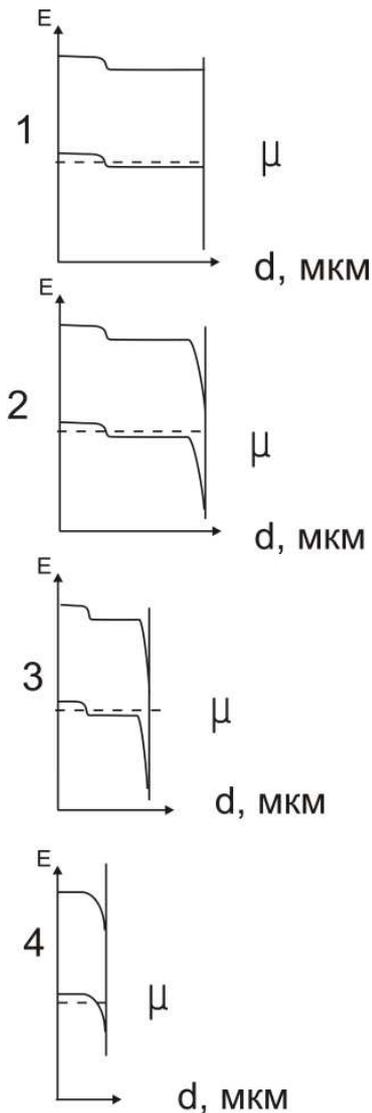


Рис. 7 Энергетические диаграммы *PbSe* без *Bi*, входящего в состав:

1- композитной пленки; композитных пленок при обработке в парах йода: 2- $t \approx 5$ с., 3 $t > 5$ с., 4- $t \approx 50$ с

обладает хорошей адгезией к стеклу. Именно это обстоятельство и не позволяет отдельным кристаллитам расширяться в направлениях, параллельных плоскости подложки. Однако, удаление диэлектрической фазы, позволяет пленке расширяться вверх, что и фиксируется методом РСА.

Обработка композитных пленок *PbSe* в парах йода приводит к увеличению в них интенсивности ФЛ (рис. 6) и, что самое главное, в них появляется ФП, которая отсутствовала, как в поликристаллических, так и в композитных пленках *PbSe*. Это

композиционных пленках *PbSe* обусловлено наличием областей с пониженной концентрацией носителей. Энергетическая диаграмма композитных пленок *PbSe*, отвечающая экспериментальным данным, представлена на рис. 7-1.

Отсутствие снижения интенсивности ФЛ, а так же отсутствие изменений в спектрах ФЛ (рис. 6) при удалении диэлектрической фазы в трилоне Б означает, что легирование пленок *PbSe* кислородом представляет собою объемный эффект [6].

Возможной причиной, вызывающей понижение концентрации дырок, как в приповерхностных областях композитных пленок, так и в области межкристаллитных границ, может служить компенсация акцепторного действия кислорода, захватываемого пленкой *PbSe* в процессе формирования композита, собственными донорными дефектами.

Факт отсутствия изменения в величине E_g *PbSe*, входящего в состав композитной пленки, после удаления диэлектрической фазы свидетельствует о том, что пленки по-прежнему сжаты. Однако параметр решетки возрастает в них до значений, характерных для исходных поликристаллических образцов, свидетельствуя о том, что удаление диэлектрической фазы сопровождается исчезновением сжимающих кристаллиты напряжений. Отмеченное несоответствие между характером изменения величин E_g и a_0 обусловлено особенностями измерения параметра решетки с использованием дифракционной линии (600), которые позволяют получать информацию, касающуюся приповерхностных слоев структуры.

Морфологическое строение композитных пленок *PbSe* таково, что кристаллиты *PbSe* плотно прижаты друг другу, а пленка

Таблица. 1. Изменения характеристик рентгеновского отражения (600) на разных стадиях формирования композитных пленок и их обработки

Образцы	a , Å
Поликристаллический образец	6.128
Композитный образец	6.125
Композитный образец, обработанный в парах йода	6.124
Композитный образец, обработанный в трилоне Б	6.129
Композитный образец, обработанный в парах йода и в трилоне Б	6.128

свидетельствует о том, что в приповерхностном слое кристаллитов $PbSe$ происходит инверсия типа проводимости от дырочного к электронному и возникают рекомбинационные барьеры (рис. 7-2), обуславливающие пространственное разделение фотовозбужденных носителей заряда. При этом снижается концентрация дырок в светоизлучающих областях, расположенных в пределах отдельных кристаллитов $PbSe$, что сопровождается уменьшением вклада оже - рекомбинации и возрастанием интенсивности ФЛ. При удалении диэлектрической фазы интенсивность ФЛ возвращается к своему исходному значению, определенному до обработки пленок в парах йода (рис. 6). Это свидетельствует о том, что инверсия типа проводимости $p \rightarrow n$ в приповерхностном слое кристаллитов $PbSe$ обусловлена поверхностным эффектом, возникающим в процессе обработки пленок в парах йода.

В Главе 4 представлены результаты исследований ФЛ, ФП композитных пленок $PbSe$, легированных Bi и Cl . Рассмотрена возможность повышения мощности ФЛ композитных пленок $PbSe$, легированных Bi и Cl за счет длительной обработки их в парах йода. Проведение такого рода исследований считали целесообразным на основании полученных представлений о механизмах возникновения ФЛ и ФП в композитных пленках $PbSe$. Предполагалось, что в пленках, легированных донорными примесями, удастся сформировать $p-n$ – переход уже на стадии формирования композита и сразу же получить в них ФЛ и ФП. В этом случае обработка, таких пленок, в парах йода могла бы привести к формированию второго $p-n$ – перехода, что способствовало бы увеличению мощности ФЛ.

Введение в материал донорной примеси Bi позволяло получать поликристаллические пленки $PbSe$ с проводимостью p -типа и величинами холловской концентрации дырок, определенными при $T=300$ К, изменяющимися от $2.8 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ при $N_{Bi}=0.0165$ вес. % до $4.7 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ при $N_{Bi}=0.15$ вес. %. При этом ни ФЛ, ни ФП, ни в одной из исследованных пленок $PbSe$ обнаружено не было [7].

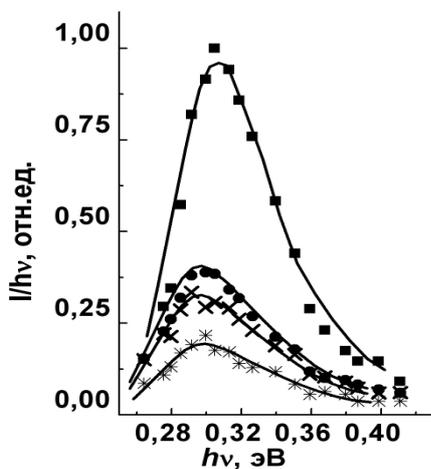


Рис. 8 Спектры ФЛ композитных пленок $PbSe$ при $T = 300$ К

- * – исходная пленка;
- х – исходная пленка;
- $PbSe:Bi$ $N_{Bi}=0.0165$ вес. %;
- – пленка, $PbSe:Bi$ $N_{Bi}=0.0165$ вес. %, обработанная йодом;
- – пленка, $PbSe:Bi$ $N_{Bi}=0.0165$ вес. %, обработанная йодом, и с удаленной «стекловидной» диэлектрической фазой;
- «сплошные» линии – расчет

Высокотемпературная обработка поликристаллических пленок $PbSe:Bi$ в кислородсодержащей среде приводила к радикальному изменению их свойств. Резко снижалась холловская концентрация дырок, на порядок более, чем в композитных пленках без Bi (при $N_{Bi} = 0.0165$ вес. % измеряемая величина $p_x = 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, а при $N_{Bi} = 0.08$ вес. % она составляет $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$; при более высоком содержании примеси Bi по данным эффекта Холла наблюдалось изменение типа проводимости в композитных пленках $PbSe$ от дырочного к электронному). При этом в пленках $PbSe:Bi$ ($N_{Bi} = 0.0165$ вес. %) происходило резкое увеличение мощности ФЛ, которая была сравнима с мощностью ФЛ композитных пленок $PbSe$ без Bi , прошедших обработку (длительностью около 5 с) в парах йода (рис. 8), и появлялась ФП, в 50 раз превосходящая ФП в композитных пленках $PbSe$, обработанных в парах йода (рис. 10). Приведенные факты указывают на то, что в процессе создания композитов в кристаллитах $PbSe:Bi$ происходит инверсия типа проводимости $p \rightarrow n$, а вблизи

их поверхности возникает рекомбинационный барьер, благодаря легирующему действию кислорода (рис. 11-1).

Поэтому мощность ФЛ возрастает за счет увеличения объема обедненной области, а ФП появляется благодаря возникающему в них потенциальному барьеру, способствующего пространственному разделению фотовозбужденных носителей заряда.

Обработка композитных пленок $PbSe:Bi$ ($N_{Bi} = 0.0165$ вес. %) в парах йода (продолжительностью примерно 5 с) приводила к резкому возрастанию ФЛ (рис. 8), что может свидетельствовать о возникновении второго барьера, расположенного в приповерхностных слоях кристаллитов (рис. 11-2). Травление композитных пленок $PbSe:Bi$, обработанных йодом, в трилоне Б, как и в случае композитных пленок без примесей (Глава 3), приводило к уменьшению ФЛ до исходных значений (до их обработки йодом, рис. 8). Этот факт может рассматриваться в качестве подтверждения того, что влияние йода на свойства $PbSe$ обусловлено поверхностным эффектом.

На основании полученных результатов по кратковременной обработке композитных пленок в парах йода было признано целесообразным проведение дополнительных исследований, направленных на выяснение возможности повышения ФЛ композитных пленок $PbSe$, как легированных донорными примесями, так и нелегированных, за счет длительной обработки в парах йода.

Для изучения динамики изменения свойств композитных пленок $PbSe$ после обработки в парах йода, обработка проводилась ступенчато, в течение ряда промежутков времени длительностью 5 с. При этом после каждого этапа изучались их ФЛ и ФП (рис. 9, 10). Видно, что динамика изменения свойств композитов, содержащих и не содержащих Bi в парах йода, качественно различна. Это позволило предполагать, что за изменение свойств композитных пленок $PbSe$ без Bi , происходящих при обработке их в парах йода, ответственна физическая адсорбция, в результате чего на поверхности этих

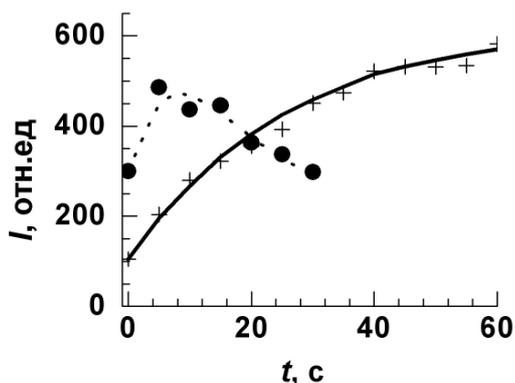


Рис. 9 Зависимость величины ФЛ композитных пленок $PbSe$ от времени обработки в парах йода.

● - легированных висмутом $N_{Bi}=0.0165$ вес.%,
+ - без примесей

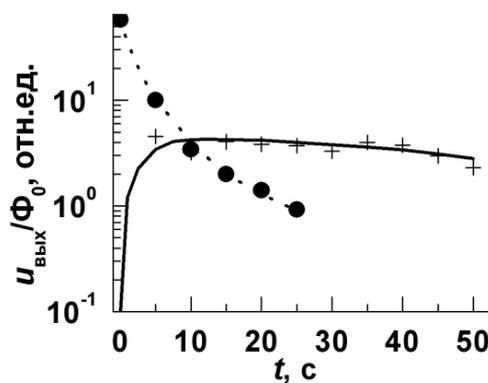


Рис. 10 Зависимость величины ФП композитных пленок $PbSe$ от времени обработки в парах йода.

● - легированных висмутом $N_{Bi}=0.0165$ вес.%,
+ - без примесей

пленок происходит индуцирование положительного заряда. Это в свою очередь приводит к инверсии типа проводимости $p \rightarrow n$ в приповерхностных областях кристаллитов, и к образованию барьера, способствующего разделению фотовозбужденных носителей тока (рис. 7-2).

В экспериментах было установлено, что длительная обработка композитных пленок $PbSe$ без Bi в парах йода приводит к уменьшению их толщины.

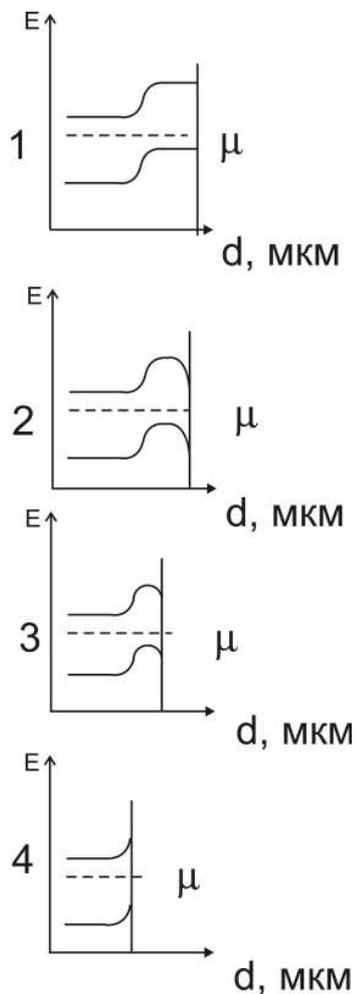


Рис. 11. Энергетические диаграммы $PbSe:Bi$ ($N_{Bi}=0.0165$ вес. %), входящего в состав:

1-компонитной пленки;
компонитных пленок при
обработке в парах йода.
2- $t \approx 5$ с, 3 $t > 5$ с,
4- $t \approx 50$ с

При этом, однако, не происходит изменения механизма адсорбции йода, поскольку обнажающиеся внутренние области кристаллитов $PbSe$ также обладают проводимостью p -типа (рис. 7-3,4). Кроме того, длительная обработка йодом композитных пленок $PbSe$ без Bi должна сопровождаться увеличением концентрации адсорбированного йода на их поверхности. Следствием чего является наблюдаемое улучшение их фотолуминесцентных и фотопроводящих свойств. В пользу этого предположения свидетельствуют, как изменение цвета композитной пленки от серого до огненно-рыжего в процессе обработки йодом, так и увеличение интенсивности рефлексов, соответствующих PbI_2 .

Особенности зависимостей ФЛ и ФП композитных пленок $PbSe:Bi$ ($N_{Bi} = 0.0165$ вес. %) от времени обработки в парах йода могут указывать на то, что в процессе такой обработки может меняться тип адсорбции йода на поверхности кристаллитов $PbSe$ (рис. 9, 10). При кратковременной обработке происходит образование второго барьера за счет физической адсорбции йода (рис. 11-2). Длительная обработка таких пленок в парах йода приводит к уменьшению толщины кристаллитов $PbSe$, вследствие чего, или существенно уменьшается толщина области с p -типом проводимости, или эта область полностью исчезает (рис. 11-3,4).

В итоге обнажается внутренняя часть кристаллитов $PbSe$ с проводимостью n -типа, что приводит к переходу от физической адсорбции йода к «прочной» форме хемосорбции (n -связь или акцепторную связь). На поверхности кристаллитов $PbSe$ накапливается отрицательный заряд, который компенсируется положительно заряженными донорами в объеме. Таким образом, вблизи поверхности возникает проводимость p -типа за счет изгиба зон вверх, и в результате опять же возникает $n-p$ -барьер (рис. 11-4). Это весьма вероятно ввиду того, что при достаточно высокой энергии ионизации йода – 9.97 эВ, сродство к электрону

у йода также велико $\chi = 3.08-3.23$ эВ а, следовательно, велика и вероятность захвата электрона из кристаллической решетки $PbSe$. Образованный $n-p$ -барьер, по-видимому, не столь совершенен, как в случае композитных пленок $PbSe:Bi$, не обработанных йодом. Поэтому в них ФП существенно ниже, а ФЛ монотонно снижается к своему исходному значению, характерному для пленок, не обработанных в парах йода.

В Главе 5 исследована возможность увеличения эффективности вывода излучения фотолуминесцентных структур на основе $PbSe$ путем нанесения дополнительного просветляющего слоя. При этом, для расчетов, связанных с определением показателя преломления и геометрической толщины дополнительного слоя было необходимо провести расчет спектральных характеристик отражения исходной полупроводниковой структуры.

Для учета интерференции и рассеяния в фотолуминесцентной структуре в работе предложена трехслойная модель с центральным слоем из композита на основе $PbSe$ и обрамляющими диэлектрическими слоями, основным компонентом которых является алмазит $PbSiO_3$ [8]. Предложенная модель по своим оптическим характеристикам эквивалентна объекту исследования – пленке $PbSe$, подвергнутой температурной

обработке. Центральный (излучающий) слой трехслойной модели представлен композитной средой с эффективными значениями показателей преломления и поглощения. Расчет эффективных значений n и k в спектральном диапазоне 2.0 – 7.0 мкм для этого слоя проводился по значениям диэлектрической проницаемости ε_{eff} в соответствии с положениями теории эффективной среды. В приближении фон Бруггемана, которое является хорошим приближением для систем, образованных агрегированными частицами, были вычислены дисперсионные зависимости эффективных показателей преломления и поглощения композитного излучающего слоя на основе $PbSe$ в спектральном диапазоне 2.0 – 7.0 мкм [9].

Эффективная величина ε_{eff} многокомпонентной системы была найдена по известным диэлектрическим функциям отдельных веществ, образующих гетерогенную систему, по формуле:

$$V_a \frac{\varepsilon_a - \varepsilon_{eff}}{\varepsilon_a + 2\varepsilon_{eff}} + V_b \frac{\varepsilon_b - \varepsilon_{eff}}{\varepsilon_b + 2\varepsilon_{eff}} = 0, \quad (2)$$

где ε_a , ε_b и V_a , V_b — диэлектрические функции и объемные доли компонент a и b , соответственно. При этом за компоненту a принимается $PbSe$, а за компоненту b — $PbSiO_3$.

Формализация предложенной трехкомпонентной системы сводится к определению параметров (физических толщин, а также показателей преломления и поглощения) всех трех слоев, образующих тонкопленочную модель.

В работе расчет физических (геометрических) толщин пленок проводился по спектральным характеристикам зеркального отражения структуры в контексте вариационной постановки задачи с использованием концепции функции качества. При этом в пространстве параметров $\vec{D} = \{d_1, d_2, d_3\}$, где d_1 , d_2 и d_3 — физические толщины слоев предложенной трехслойной модели, строилась последовательность $\vec{D}_1 \rightarrow \vec{D}_2 \rightarrow \vec{D}_3 \rightarrow \dots$, доставляющая минимум функции качества $F(\vec{D}_1) > F(\vec{D}_2) > F(\vec{D}_3) > \dots$, а сама функция качества, определенная на дискретном множестве, содержащем L точек, записывалась в виде:

$$F(\vec{D}) = \frac{1}{L} \left\{ \sum_{i=1}^L w(\lambda_i) |R(\vec{D}, \lambda_i) - R_0(\lambda_i)|^q \right\}^{\frac{1}{q}}, \quad (3)$$

где $R(\vec{D}, \lambda)$ — текущее спектральное значение коэффициента отражения, $R_0(\lambda_i)$ — заданное значение коэффициента отражения, $w(\lambda_i)$ — весовая функция, q — целое положительное число. В работе параметр q был принят равным 2. В этом случае представление функции качества в виде (3) соответствовало среднеквадратичному приближению.

Задача отыскания вектора $\vec{D} = \{d_1, d_2, d_3\}$, обеспечивающего минимум функции качества (1), решалась наиболее употребительными для подобных задач градиентными методами многопараметрической оптимизации.

Расчетный спектр отражения, соответствующий найденному решению, достаточно точно совпадал с экспериментальными данными, что позволило применить предложенную модель для дальнейшего расчета просветляющего слоя.

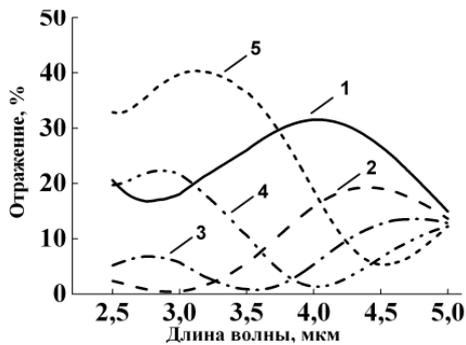


Рис. 12 Расчетные спектры отражения системы при различных толщинах просветляющего слоя AsS_4

1- без слоя, 2 – 120 нм, 3 – 240 нм,
4 – 338 нм, 5 – 450 нм

В качестве материала для изготовления просветляющего покрытия в работе использовалось халькогенидное стекло состава AsS_4 . Задача отыскания толщины слоя AsS_4 для достижения наилучшего просветления решалась также в контексте вариационной постановки [8, 9]. При этом функция качества минимизировалась относительно физической толщины просветляющего слоя AsS_4 в спектральном диапазоне 3.5 – 4.5 мкм. На рис. 12 представлены расчетные спектральные характеристики отражения системы при различных толщинах просветляющей пленки AsS_4 , иллюстрирующие наличие оптимальной толщины слоя AsS_4 для уменьшения отражения в области 3.5 – 4.5 мкм. Точное численное решение задачи дает величину толщины пленки $d_{AsS_4}=338$ нм.

Прямым экспериментальным подтверждением эффективности просветляющего покрытия являются результаты исследования интенсивности ФЛ от толщины слоя AsS_4 (рис. 13).

Результаты эксперимента свидетельствуют о том, что эффективность вывода излучения возрастает с увеличением толщины пленки AsS_4 до некоторого оптимального значения. По достижении толщины просветляющего слоя 350–360 нм интенсивность излучения снижается. Подобный экстремальный ход зависимости, характеризующийся наличием максимума, по всей видимости, обусловлен интерференционными эффектами, возникающими в тонкослойной системе [8, 9].

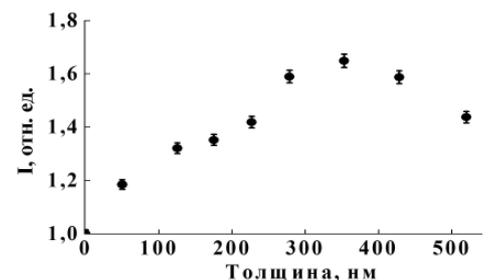


Рис. 13. Зависимость интенсивности ФЛ образца от толщины слоя AsS_4

В Главе 6 обобщены примеры практической реализации результатов, полученных в работе.

Приводятся описания и основные технические характеристики, как уже имеющихся, так и усовершенствованных источников ИК излучения и октронов (оптопар с открытым оптическим каналом) на основе $PbSe$ и $Pb_{1-x}Cd_xSe$ для диапазона 2.5 – 5.0 мкм [10]. Совокупность результатов, полученных в работе, позволила увеличить выходную оптическую мощность фотолюминесцентных источников излучения на основе пленок $PbSe$ и $Pb_{1-x}Cd_xSe$ до 1.5–2 раз, по сравнению с имеющимися приборами.

Кроме того, наряду с увеличением мощности фотолюминесцентного излучения композитных пленок, в работе было также отмечено увеличение фотопроводящих свойств таких пленок, обусловленное наличием рекомбинационных барьеров, способствующих пространственному разделению фотовозбужденных носителей заряда. Поэтому помимо исследований, связанных с ИК источниками, автором работы были также проведены исследования фотоэлектрических характеристик полученных многоэлементных фотогальванических структур на основе композитных пленок $PbSe$ и $Pb_{1-x}Cd_xSe$ и реализованных на технологической базе ОАО НИИ «Гириконд» [11-14]. Возможность использования таких приемников с узкополосными клиновыми интерференционными фильтрами в качестве фоточувствительного элемента в спектрально-аналитической аппаратуре нового поколения рассмотрена в работах [11-13]. Кроме этого в работе [14]

представлены результаты разработки иммерсионного фотогальванического инфракрасного приемника с малоразмерным фоточувствительным элементом (250×250 мкм) для использования в аппаратуре бесконтактного обнаружения перегрева букс железнодорожных вагонов на ходу состава.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в работе.

Основные результаты работы

1. Выполнены исследования спектральных зависимостей коэффициента поглощения в блочно – эпитаксиальных пленках $Pb_{1-x}Cd_xSe/CaF_2$, не содержащих легирующих примесей. Показано, что во всех твердых растворах на пороге межзонного поглощения реализуются прямые, разрешенные оптические переходы. Установлено, что исследуемые пленки испытывают деформацию растяжения в плоскости (111). Показано, что с возрастанием содержания кадмия в шихте ширина запрещенной зоны E_g $Pb_{1-x}Cd_xSe$ возрастает, причем при $x \leq 0.1$, по закону, близкому к линейному. Установлено, что при $h\nu \leq E_g$ во всех спектрах оптического поглощения присутствует дополнительное поглощение, которое может быть ассоциировано с "хвостами" плотности локализованных состояний в запрещенной зоне исследуемых материалов.

2. Методами РФА и РЭМ исследована морфология фотолюминесцентных композитных структур на всех этапах их формирования. Впервые установлено, что в состав «стекловидной» диэлектрической фазы, покрывающей полупроводниковый материал, входит алмаз $PbSiO_3$, который может находиться, как в кристаллическом, так и в аморфном состоянии, в зависимости от способа формирования композита. Показано, что в процессе высокотемпературной обработки происходит сжатие кристаллитов $PbSe$, обусловленное деформирующим воздействием со стороны диэлектрической «стекловидной» фазы.

3. Показано, что формирование композитных пленок $PbSe$, не содержащих легирующих примесей, сопровождается уменьшением концентрации свободных дырок вблизи поверхности кристаллитов $PbSe$ и появлением в них ФЛ. Показано, что коротковолновая граница спектра ФЛ во всех композитных пленках $PbSe$ при $h\nu > E_g$ связана с межзонной рекомбинацией, а при $h\nu < E_g$ соответствует "хвостам" плотности состояний, обусловленным флуктуациями примесного потенциала. Установлено, что "хвосты" плотности локализованных состояний не изменяются заметным образом на всех стадиях формирования композитных пленок. Установлено, что травление диэлектрической «стекловидной» фазы в трилоне Б не приводит к изменению мощности фотолюминесцентного излучения. Полученный результат является первым прямым экспериментальным подтверждением того, что легирование приграничных слоев кристаллитов $PbSe$ кислородом является объемным эффектом.

4. Установлено, что мощность фотолюминесцентного излучения в композитных пленках $PbSe$ возрастает при введении Bi в полупроводниковый материал в процессе его синтеза. Предложена энергетическая диаграмма кристаллитов композитных пленок $PbSe:Bi$, предполагающая конверсию типа проводимости с p на n внутри кристаллитов на стадии синтеза материала при введении висмута $N_{Bi} \geq 0.0165$ вес. % и инверсию типа проводимости в поверхностных частях кристаллитов $n \rightarrow p$ в процессе высокотемпературной обработки поликристаллических пленок в кислородсодержащей среде. Показано, что ФЛ в композитных пленках $PbSe:Bi$ свидетельствует о появлении в них барьера, обуславливающего пространственное разделение фотовозбужденных носителей заряда, а рост ФЛ – увеличением объема области пространственного заряда с пониженной концентрацией носителей заряда.

5. Показано, что обработка композитных пленок $PbSe$, как содержащих, так и не содержащих легирующих примесей, в парах йода приводит к увеличению мощности фотолюминесцентного излучения. Установлено, что эффект легирования йодом является поверхностным. Показано, что экспериментальные данные могли быть непротиворечиво объяснены, если предположить, что при высокотемпературной обработке в парах йода, йод адсорбируется на поверхности кристаллитов $PbSe$. Причем адсорбция может переходить из физической в химическую, в зависимости от типа проводимости в приповерхностных слоях композитных пленок $PbSe$.

6. Показано, что нанесение дополнительного покрытия позволяет увеличить величину интегральной (в пределах всего измеряемого спектра) интенсивности фотолюминесценции композитных пленок $PbSe$. Разработана методика расчета оптимальной толщины дополнительного просветляющего слоя. Предложена трехкомпонентная тонкослойная модель, учитывающая интерференционные эффекты и рассеяние излучения на пространственных неоднородностях слоя $PbSe$, по своим оптическим свойствам эквивалентная реальному объекту исследования. Решением задачи многокритериальной оптимизации построенного соответствующим образом функционала качества определены параметры предложенной модели. Для корректного расчета оптических свойств тонкопленочной системы, в приближении фон Бруггемана впервые определены эффективные значения оптических констант композитного слоя $PbSe$ в области длин волн 2–7 мкм. Использование результатов расчета тонкопленочного покрытия в производстве позволило увеличить величину интегральной мощности ФЛ излучения композитных пленок на 60 %.

Основное содержание диссертации отражено в следующих работах автора:

1. Тропина, Н. Э. Спектрально-измерительная установка для исследования фотолюминесценции поликристаллических слоев $Pb_{1-x}Cd_xSe$ / Н. Э. Тропина, В. И. Ильин // Сборник трудов VII Всероссийской межвузовской конференции молодых ученых. СПбГУ ИТМО. – 2010 г. – С. 73–74.

2. Тропина, Н. Э. Влияние диэлектрической фазы на спектр фотолюминесценции фрактально структурированных нанокомпозитных пленок селенида свинца / Н. Э. Тропина, З. Н. Петровская, И. О. Черноглазова // ФТП. – 2009. – Т.43, вып. 11. – С. 1477–1480.

3. Мазина (Тропина), Н. Э. Тонкопленочные структуры на основе полупроводниковых материалов селенида свинца и твердых растворов селенида свинца и кадмия. Фотоэлектрические приборы на их основе / Н. Э. Мазина (Тропина), Л. К. Дийков // Сборник тезисов докладов. III всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и полупроводниковой опто- и наноэлектронике. СПбГТУ. – 2001. – С. 83.

4. Тропина, Н. Э. Особенности энергетического спектра пленок $PbSe$, сформированных на кристаллических и аморфных подложках / Н. Э. Тропина, В. И. Ильин, А. Н. Вейс / Сборник тезисов докладов. XIII – я Всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике. СПб ГПУ. – 2011 г. – С. 11.

5. Тропина, Н. Э. Исследование оптических свойств поликристаллических пленок $PbSe$ и $Pb_{1-x}Cd_xSe$ / Н. Э. Тропина, А. Н. Тропин // Сборник трудов VII-ой Международной конференции молодых ученых и специалистов «Оптика–2011». СПбГУ ИТМО. – 2011 г. С. 325.

6. Вейс, А. Н. Особенности энергетического спектра и свойств поликристаллических пленок $Pb_{1-x}Cd_xSe$, сформированных на подложках из фтористого кальция и стекла / А. Н. Вейс, В. И. Ильин, Н. Э. Тропина // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки.–2012 г. – Т.16. – № 2. – С. 7 – 17.

7. Тропина, Н. Э. Фотолюминесценция композитных пленок на основе $Pb_{1-x}Cd_xSe$, легированных висмутом / Н. Э. Тропина, В. И. Ильин // Сборник тезисов докладов. XII-я Всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике. СПбГПУ. – 2010 г. – С. 14.

8. Тропина, Н. Э. Уменьшение потерь на отражение в светоизлучающих структурах на основе поликристаллических слоев $PbSe$ / Н. Э. Тропина, Л. К. Дийков, А. Н. Тропин // Сборник тезисов докладов. XI-я Всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике. СПбГПУ. – 2009 г. – С. 33.

9. Анисимова, Н. П. Увеличение эффективности вывода излучения тонкопленочных фотолюминесцентных композитных структур на основе $PbSe$ / Н. П. Анисимова, Н. Э. Тропина, А. Н. Тропин // ФТП. – 2010. – Т.44, Вып. 12. – С. 1602–1606.

10. Тропина, Н. Э. Полупроводниковые источники излучения для инфракрасной области спектра / Н. Э. Тропина, А. Н. Тропин // Компоненты и технологии.– 2008. – № 11. – С. 152-153.

11. Тропина, Н. Э. Инфракрасные приемники на основе пленок селенида свинца для спектрально-аналитической аппаратуры / Н. Э. Тропина, Л. К. Дийков // Сборник трудов VI-ой Всероссийской межвузовской конференции молодых ученых. СПбГУ ИТМО. – 2009 г. – С. 7–11. *Диплом за лучший доклад на секции «Элементная база оптоэлектронных приборов».*

12. Тропина, Н. Э. Многоэлементные приемники на основе селенида свинца для области спектра 2–5 мкм / Н. Э. Тропина // Научно технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2009. – №6 (64). – С. 47–53.

13. Тропина, Н. Э. Многоэлементные многоспектральные приемники на $Pb_{1-x}Cd_xSe$ для области спектра 1.5–5.0 мкм / Н. Э. Тропина, А. Н. Тропин // Сборник трудов VI-ой Международной конференции молодых ученых и специалистов «Оптика–2009». СПбГУ ИТМО. – 2009 г. С. 310–313.

14. Мазина (Тропина), Н. Э. Иммерсионный фотогальванический приемник ИК-излучения для датчика перегрева букс / С. П. Варфоломеев, Н. Э. Мазина (Тропина) // Датчики и системы. – 2006. – Т.6, № 85. – С. 22–25.

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность за ценные советы, постоянное внимание и поддержку в процессе подготовки диссертационной работы, а так же за обсуждения результатов работы: проф., д.ф.-м.н. В. И. Ильину, проф., д.ф.-м.н. А. Н. Вейсу, к.т.н., лауреату Государственной премии СССР, доценту [Л. К. Дийкову], Н. П. Анисимовой, к.т.н., лауреату Государственной премии СССР, доценту В. П. Горохову, к.т.н., доценту Б. А. Таллерчику, к.ф.-м.н. А. Н. Тропину, С. П. Тесленко, С. В. Штельмах и В. А. Крупенникову. Автор также признателен всему коллективу НПО НПр, Ф и Д, предприятия ОАО «НИИ» Гириконд» (г. Санкт-Петербург).