

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Пашкеева Дмитрия Александровича «Оптические свойства эпитаксиальных слоёв твердого раствора $\text{Pb}_{1-x}\text{Eu}_x\text{Te}$ ($0 \leq x \leq 1$)», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 - "Физика конденсированного состояния".

Полупроводники типа A^4B^6 широко используются в инфракрасной оптоэлектронике. В частности, на их основе разрабатываются инжекционные гомо- и гетеролазеры для области спектра 3 - 30 мкм. Улучшение характеристик таких источников излучения удаётся достичь с использованием тройных твердых растворов халькогенидов свинца на основе щелочноземельных и редкоземельных элементов. С этой точки зрения особый интерес представляет твердый раствор $\text{Pb}_{1-x}\text{Eu}_x\text{Te}$ ($0 \leq x \leq 1$), обладающий рядом уникальных свойств. Диссертационная работа Пашкеева Д.А. посвящена систематическому исследованию свойств данного соединения, чем и определяется её несомненная актуальность.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и приложения.

В первой главе дается описание методик синтеза и характеристики высококачественных эпитаксиальных слоев твердого раствора $\text{Pb}_{1-x}\text{Eu}_x\text{Te}$ ($0 \leq x \leq 1$) и гетероструктур на их основе. Слои и структуры выращивались методом молекулярно-пучковой эпитаксии на подложках BaF_2 . Для характеристики полученного материала была разработана специальная методика, которая включала проведение рентгеноструктурных и холловских измерений, а также рентгеновского микроанализа.

Во второй главе исследованы энергетический спектр и излучательная рекомбинация твердых растворов $\text{Pb}_{1-x}\text{Eu}_x\text{Te}$. Приведены результаты измерения фотолюминесценции эпитаксиальных слоев твердого раствора для составов $x \leq 0,32$ в широкой области температур, от 7,5 до 250 К. Установлено, что с увеличением содержания европия интенсивность люминесценции уменьшается, а форма спектров излучения симметризуется. Полученные результаты позволили впервые предложить модель, описывающую изменение зонной структуры твердого раствора в зависимости от содержания европия.

В третьей главе приведены результаты исследования оптических свойств твердого раствора $\text{Pb}_{1-x}\text{Eu}_x\text{Te}$. Даются описание и способ применения методики определения по спектрам пропускания эпитаксиальных слоев дисперсии показателя преломления на энергиях ниже края фундаментального поглощения. Приводятся основные результаты измерения дисперсии показателя преломления твердого раствора $\text{Pb}_{1-x}\text{Eu}_x\text{Te}$ во всем диапазоне концентрации европия x , от 0 до 1, и при температурах 80 К и 295 К. Также проводится сравнение измеренных спектров пропускания с модельными спектрами, рассчитанными методом матрицы переноса с использованием частотных зависимостей показателя преломления, полученных из эксперимента.

Четвёртая глава посвящена разработке и созданию на основе твердого раствора $\text{Pb}_{1-x}\text{Eu}_x\text{Te}$ ($0 \leq x \leq 1$) четвертьволновых брэгговских зеркал и микрорезонаторов для средней инфракрасной области спектра. Представлены результаты анализа спектров пропускания таких структур методом матрицы переноса. Разработаны одномодовые лазеры с вертикальным выводом излучения и определены их основные характеристики: зависимости интегральной интенсивности излучения от уровня возбуждения, спектральный состав излучения и диапазон перестройки длины волны излучения при изменении температуры.

В качестве основных результатов работы можно выделить следующие:

1. Разработана и реализована методика характеристики эпитаксиальных слоев твердого раствора $\text{Pb}_{1-x}\text{Eu}_x\text{Te}$ ($0 \leq x \leq 1$) на подложке BaF_2 , выращиваемых методом молекулярно-пучковой эпитаксии. Определены оптимальные условия роста, при которых удается получать качественные слои и гетероструктуры.
2. Впервые получены данные по интегральной интенсивности и спектрам фотолюминесценции эпитаксиальных слоев твердого раствора $\text{Pb}_{1-x}\text{Eu}_x\text{Te}$ для составов $x \leq$

0,32 при температурах от 7,5 до 250 К. Определены значения дисперсии показателя преломления материала для всей области составов при двух температурах 80 К и 295 К.

3. Впервые предложена феноменологическая модель, описывающая перестройку потолка валентной зоны и дна зоны проводимости твердого раствора $Pb_{1-x}Eu_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$ при изменении содержания европия. Показано, что в области составов $x \sim 0,1$ происходит смена абсолютного минимума дна зоны проводимости с L -точки зоны Бриллюэна ($6p$ -орбиталь Pb) на X -точку ($5d$ -орбиталь Eu). Установлено также, что при $x \sim 0,85$ изменяется абсолютный максимум валентной зоны с L -точки ($5p$ -орбиталь Te) на Γ -точку ($4f$ -орбиталь Eu).
4. Продemonстрирована эффективная работа брэгговских зеркал и микрорезонаторов на основе гетеропары $Pb_{0,94}Eu_{0,06}Te/EuTe$. Созданы одномодовые лазеры с вертикальным выводом излучения при оптической накачке и азотной температуре, излучающие в области окна прозрачности атмосферы 4,2 – 5,3 мкм.

Достоверность полученных в диссертации результатов подтверждается согласием с результатами, полученными другими авторами.

По работе можно высказать следующие замечания:

1. В работе дисперсия показателя преломления материала определялась для энергий ниже ширины запрещенной зоны, что ограничивает анализ оптических свойств, как отдельных слоев, так и многослойных структур. Представляется интересным проведение измерений в более широкой области энергий фотона.
2. Отсутствуют измерения и обсуждение влияния вклада свободных носителей на величину и дисперсию показателя преломления твердого раствора $Pb_{1-x}Eu_xTe$. В работе приводятся результаты электрофизических измерений только для составов с $x < 0,1$ с концентрацией свободных носителей около $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$.
3. В тексте диссертации присутствует ряд стилистических и грамматических ошибок.

Отмеченные недостатки носят второстепенный характер и не влияют на общую положительную оценку выполненного исследования. В целом диссертация представляет собой логически завершенную научно-исследовательскую работу на актуальную тему. Автореферат полностью отражает содержание диссертационной работы. Представленные результаты могут быть полезны для дальнейшего всестороннего изучения физических свойств твердых растворов на основе халькогенидов свинца и имеют очевидную практическую ценность. Основные результаты опубликованы в трёх работах в журнале «Физика и техника полупроводников», входящего в перечень рецензируемых научных журналов ВАК, и неоднократно докладывались на крупных российских научных конференциях.

Считаю, что диссертационная работа «Оптические свойства эпитаксиальных слоев твердого раствора $Pb_{1-x}Eu_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$)» удовлетворяет требованиям ВАК, предъявляемым к работам на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук, а ее автор Пашкеев Д. А. заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 — "Физика конденсированного состояния".

Заведующий Лабораторией
субмиллиметровой диэлектрической
спектроскопии ИОФ РАН,
д.ф.-м.н.

10 сентября 2014 г.

Б.П.Горшунов

Подпись д.ф.-м.н. Горшунова Б.П. заверяю:

Ученый секретарь ИОФ РАН

д. ф.-м. н.



Андреев С.Н.