

“Утверждаю”

Проректор Московского государственного
университета имени М.В.Ломоносова,

А.А. Федянин

“12” сентября 2014 г.

О Т З Ы В

ведущей организации на диссертацию Пашкеева Д.А. на тему: «Оптические свойства эпитаксиальных слоев твердого раствора $Pb_{1-x}Eu_xTe$ ($0 < x < 1$)», представленную на соискание ученой степени кандидата физико - математических наук по специальности 01.04.07 - физика конденсированного состояния.

Инфракрасная оптоэлектроника является одним из магистральных направлений развития современной физики конденсированного состояния. В рамках данного направления важной областью деятельности является разработка новых материалов для создания высокоэффективных твердотельных излучателей ИК-диапазона. Перспективной возможностью для этого является использование полупроводников группы A^4B^6 , характеризующихся, в частности, возможностью вариации их энергетического спектра при изменении состава твердого раствора. В работе Д.А. Пашкеева исследуется данная возможность в применении к твердым растворам $Pb_{1-x}Eu_xTe$ во всем диапазоне составов ($0 < x < 1$). Ранее такого рода исследования не проводились, что определяет актуальность диссертационной работы Д.А. Пашкеева.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения с основными выводами работы, списка используемой литературы и приложения. Материал диссертации изложен на 105 страницах и содержит 60 рисунков, 5 таблиц и 110 наименований цитируемых источников.

Во введении приводится обоснование актуальности исследований, сформулирована цель работы, поставлены конкретные задачи. Обсуждается научная новизна, практическая значимость работы. Представлены положения, выносимые на защиту.

В первой главе диссертации представлена методика создания качественных эпитаксиальных слоев твердого раствора $Pb_{1-x}Eu_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) и гетероструктур на их основе, получаемых с помощью молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ). Описана методика характеристики материала: определение толщины, состава и морфологии поверх-

ности слоев на растровом электронном микроскопе, проведение рентгеноструктурного анализа, определение электрофизических свойств, контроль однородности слоев при помощи низкотемпературной фотолюминесценции (ФЛ) (возбуждение осуществлялось в импульсном режиме с длиной волны $\lambda = 1$ мкм). Убедительно показывается что качественные однородные эпитаксиальные слои твердого раствора $\text{Pb}_{1-x}\text{Eu}_x\text{Te}$ получаются только при определенных условиях эпитаксиального выращивания (в частности, при температуре роста образцов от 400 до 420 °C).

Во второй главе работы приводятся результаты исследования излучению энергетического спектра и излучательной рекомбинации твердого раствора $\text{Pb}_{1-x}\text{Eu}_x\text{Te}$ ($0 \leq x \leq 1$) в зависимости от содержания Eu. Приводятся основные результаты измерений ФЛ эпитаксиальных слоев твердого раствора $\text{Pb}_{1-x}\text{Eu}_x\text{Te}$ ($0 \leq x \leq 0,32$), в частности: интегральной интенсивности и спектров излучения в зависимости от состава x , уровня возбуждения и температуры. Из измерений фотолюминесценции эпитаксиальных слоев твердого раствора $\text{Pb}_{1-x}\text{Eu}_x\text{Te}$ ($0 \leq x \leq 0,32$) установлено, что излучательная рекомбинация с увеличением содержания Eu падает, а форма спектров излучения симметризуется. Полученные из спектров ФЛ и спектров поглощения зависимости ширины запрещенной зоны от температуры для составов $0 \leq x \leq 0,11$, имеют широкую линейную область со стороны высоких (от 30 до 250 К) температур, с положительным коэффициентом dE_g/dT . С увеличением содержания Eu этот коэффициент уменьшается с 0,47 мэВ/К при $x = 0$ до 0,27 мэВ/К при $x = 0,11$.

В третьей главе работы рассматриваются оптические свойства твердого раствора $\text{Pb}_{1-x}\text{Eu}_x\text{Te}$ ($0 \leq x \leq 1$). Приводится методика определения дисперсии показателя преломления ниже края поглощения по спектрам пропускания эпитаксиальных слоев. Дается описание метода матрицы переноса, позволяющего численно рассчитывать спектры пропускания и отражения для многослойных структур. По спектрам пропускания эпитаксиальных слоев определена дисперсия показателя преломления в диапазоне от 650 до 8000 см^{-1} и положение края поглощения в зависимости от состава x при двух температурах 80 и 295 К. Из этих данных следует, что в твердом растворе $\text{Pb}_{1-x}\text{Eu}_x\text{Te}$ при $x < 0,5$ ширина запрещенной зоны увеличивается с ростом температуры, а при $x > 0,5$ уменьшается. Для показателя преломления характерна обратная зависимость: при $x < 0,5$ величина N уменьшается с ростом температуры, а при $x > 0,5$ - увеличивается. Предложена модель зонной структуры твердого раствора $\text{Pb}_{1-x}\text{Eu}_x\text{Te}$ ($0 \leq x \leq 1$) в зави-

симости от содержания Eu. Она согласуется с теоретическим расчетом зонной структуры $\text{Pb}_{1-x}\text{Eu}_x\text{Se}$.

Наконец, в четвертой главе описаны результаты по 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 ИК области спектра. Дается описание основных принципов устройства подобных многослойных гетероструктур. Используя метод матрицы переноса, проведен численный анализ спектров пропускания брэгговских зеркал и микрорезонаторов на основе гетеропары $\text{Pb}_{1-x}\text{Eu}_x\text{Te}/\text{EuTe}$ в зависимости от целевой длины волны излучения и количества четвертьволновых пар в зеркалах. Показано, что оптимальным составом, при котором достигается высокое значение отражения в центре стоп-зоны при минимальном количестве четвертьволновых пар, является $x \approx 0,05$. При оптической накачки и азотных температурах продемонстрирована одномодовая работа лазеров с вертикальным выводом излучения для спектрального диапазона 4 – 5 мкм. Спектр излучения состоит из одной моды, диапазон температурной перестройки которой составляет $\Delta T \approx 15 - 20$ К, что соответствует диапазону перестройки по энергии $\Delta E \approx 2,2$ мэВ ($\Delta k \approx 15 \text{ см}^{-1}$).

В заключении приведены основные результаты работы.

Результаты исследований, проведенных Д.А. Пашкеевым, представляют несомненный практический интерес. Полученные в работе результаты рекомендуются к использованию в следующих организациях: МГУ им. М.В. Ломоносова, ФИАН им. П.Н. Лебедева, ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, ИФМ РАН (Нижний Новгород), ИФП СО РАН (Новосибирск), и в других институтах РАН и Министерства образования и науки.

Вместе с тем, по диссертации можно высказать ряд вопросов и замечаний:

1) В работе не комментируется тот факт, что при $x > 0.1$ резко падает концентрация свободных носителей заряда до, по-видимому, практически неизмеримых величин. Связано ли это с тем фактом, что зона проводимости в той же области составов перемещается в точку X зоны Бриллюэна? Если да, то почему?

2) Поскольку в области составов $x > 0.1$ валентная зона остается в точке L, удастся ли получить для этой области составов высокую проводимость p-типа при легировании акцепторами (например, таллием)?

3) В работе не обсуждается механизм падения интенсивности фотолюминесценции при увеличении температуры подложки выше 420 С.

4) Техническое замечание – в экземпляре диссертации, оказавшимся в распоряжении ведущей организации, отсутствует стр. 24, на которой, по всей вероятности, должны были находиться рисунки 1.6 и 1.7.

Отмеченные замечания не носят принципиального характера и не влияют на достоверность и значимость полученных результатов и выводов. Автореферат и опубликованные работы отражают основное содержание диссертации. В целом, исследование Д.А. Пашкеева удовлетворяет требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а сам автор заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Доклад Д.А. Пашкеева заслушан на заседании кафедры общей физики и физики конденсированного состояния физического факультета МГУ "11" сентября 2014 г., протокол №7. Отзыв подготовлен профессором Д.Р. Хохловым.

Зав. кафедрой общей физики и физики конденсированного состояния
физического факультета МГУ

член-корр. РАН, профессор



Д.Р.Хохлов