

*Московский Государственный
Университет им. М.В. Ломоносова
физический факультет*

Трушин Арсений Сергеевич

Фотолюминесценция иттербия в полупроводниковых
структурах и наноструктурах.

Специальность 01.01.21 – Лазерная физика

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва, 2004 г.

Содержание работы

- Введение
- Глава 1
 - Теоретическое описание системы полупроводник-ион редкоземельного элемента.
 - Расчёт положения линий соответствующих экситонам локализованным в квантовых ямах структур на основе $\text{ZnSe}/\text{Zn}_{(1-x)}\text{Cd}_x\text{Se}$
- Глава 2
 - Методы изготовления и исследования полупроводниковых структур.
- Глава 3
 - Исследование методом фотолюминесценции структур ZnTe , $\text{ZnSe}/\text{ZnCdSe}$
- Глава 4
 - Интерпретация результатов
- Заключение

Введение

Задачи диссертационной работы

- Изучение фотолюминесценции иттербия в полупроводниковых структурах и наноструктурах.
- Экспериментальное исследование характеристик фотолюминесценции в структурах на основе ZnTe и ZnSe/ZnCdSe.
- Оптимизация условий формирования люминесцентных центров на основе иттербия в полупроводниковых структурах на основе ZnTe и ZnSe/ZnCdSe.
- Экспериментальное исследование люминесценции как объёмных материалов так и наноструктур, содержащих люминесцентные центры на основе иттербия.

Введение

Выносимые на защиту положения

- Получено устойчивое и воспроизводимое характеристическое излучение ионов Yb^{3+} введённых в монокристаллические слои ZnTe как в процессе создания структур методом молекулярно лучевой эпитаксии, так и методом ионной имплантации. Определены оптимальные условия проведения имплантации кислорода и последующего отжига.
- Получено устойчивое и воспроизводимое характеристическое излучение ионов Yb^{3+} введённых в монокристаллические слои $\text{ZnSe}/\text{ZnCdSe}$ в процессе получения этих слоёв методом молекулярно лучевой эпитаксии. Определены оптимальные условия проведения имплантации кислорода и последующего отжига.
- На основании исследования зависимости спектра характеристического излучения от температуры образца построена энергетическая схема доминирующего в ZnTe люминесцентного центра.
- Показано что введение люминесцентных центров на основе иттербия в квантовую яму увеличивает квантовую эффективность люминесценции.

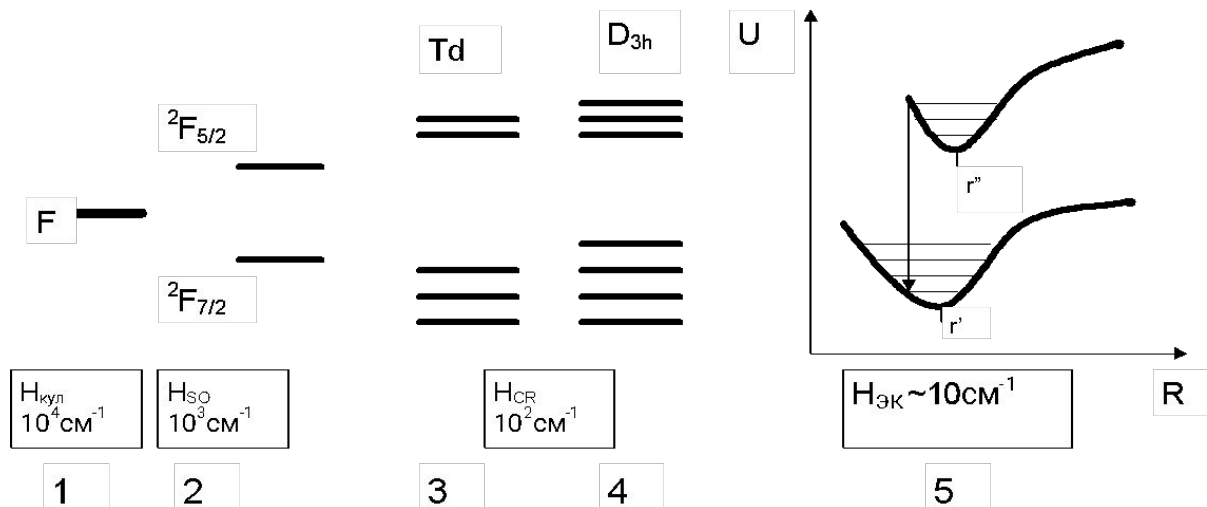
Глава 1

- Теоретическое описание системы полупроводник-ион редкоземельного элемента.
- Расчёт положения линий соответствующих экситонам локализованным в квантовых ямах структур на основе $\text{ZnSe}/\text{Zn}_{(1-x)}\text{Cd}_x\text{Se}$

Глава 1. Особенности редкоземельных (РЗ) элементов

- Редкоземельные элементы:
 - 4f оболочка экранирована. Состояния слабо гибридизованы с состояниями кристалла, имеющими непрерывный энергетический спектр.
 - Наличие РЗ центров => узкие линии в спектрах поглощения и люминесценции.
- Ионные кристаллы:
 - Учёт динамической части кристаллического поля => зависимость спектра люминесценции от температуры
- Полупроводниковые матрицы
 - Наличие электронной подсистемы => добавляются механизмы возбуждения

Глава 1. Принципиальная схема расчёта энергетической схемы люминесцентного центра на основе иттербия.



$$H_{4f} = H_{крл} + H_{со} + H_{кр} + H_{эК}$$

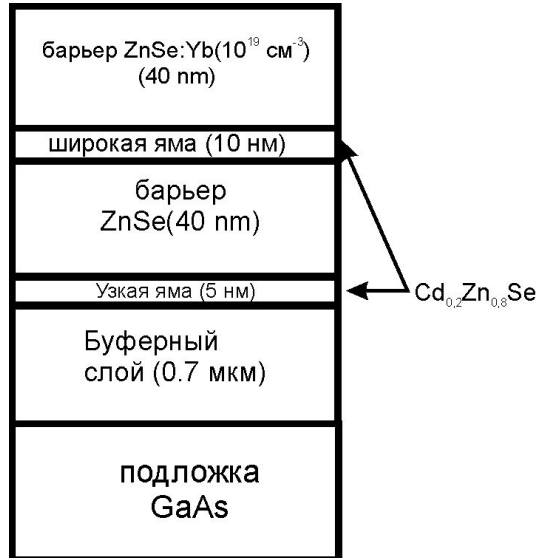
$$\begin{aligned} T_d : \\ {}^2F_{5/2} &\rightarrow \Gamma_7 + \Gamma_8 \\ {}^2F_{7/2} &\rightarrow \Gamma_6 + \Gamma_7 + \Gamma_8 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_d \rightarrow D_{3h} : \\ \Gamma_6 &\rightarrow E_{1/2} \\ \Gamma_7 &\rightarrow E_{1/2} \\ \Gamma_8 &\rightarrow E_{1/2} + E_{3/2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} D_{3h} : \\ {}^2F_{5/2} &\rightarrow 2E_{1/2} + E_{3/2} \\ {}^2F_{7/2} &\rightarrow 3E_{1/2} + E_{3/2} \end{aligned}$$

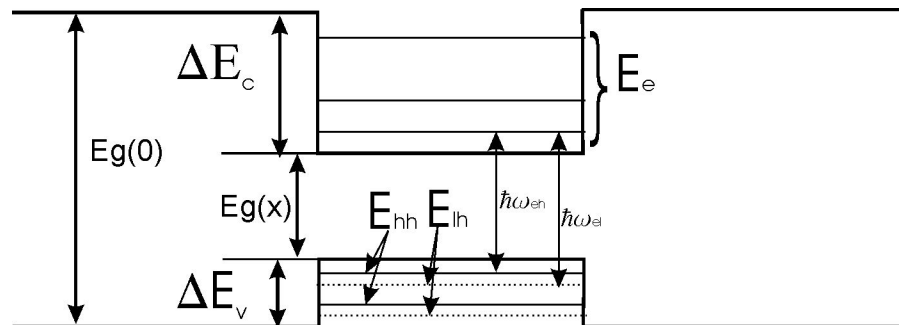
Глава 1.

Расчёт положения экситонной линии.

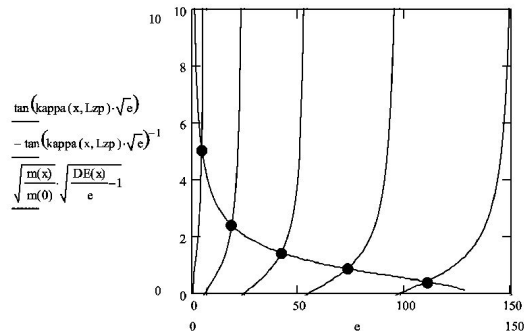


- Поперечное сечение структуры второго типа.

- Энергетическая диаграмма одной квантовой ямы.



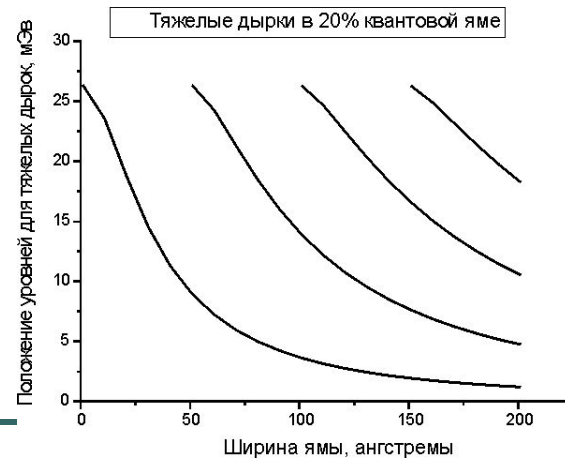
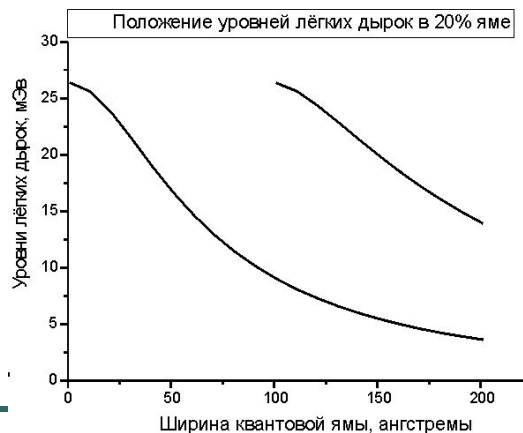
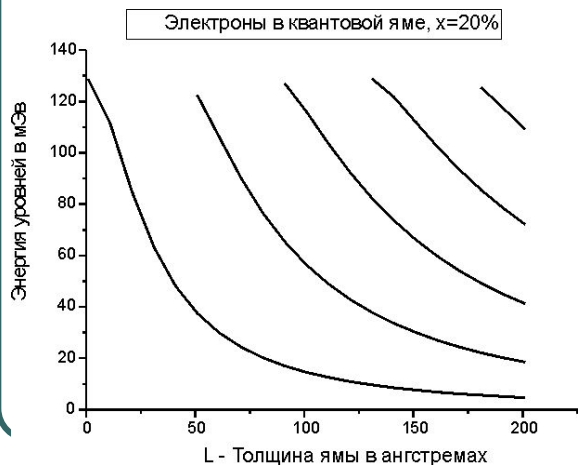
Глава 1. Нахождение уровней носителей, локализованных в КВАНТОВЫХ ЯМАХ.



- Графическое представление транцендентного уравнения

$$\tan \left(8.101 \cdot 10^{-3} \cdot L_{zp} \cdot \sqrt{E_{np} m_p^w} + \frac{\pi}{2} \cdot n \right) = \sqrt{\frac{m_p^w}{m_p^b}} \cdot \sqrt{\frac{\Delta E}{E_{np}} - 1}, n \in \mathbb{Z}$$

- Уровни различных носителей, локализованных в КВАНТОВОЙ ЯМЕ.



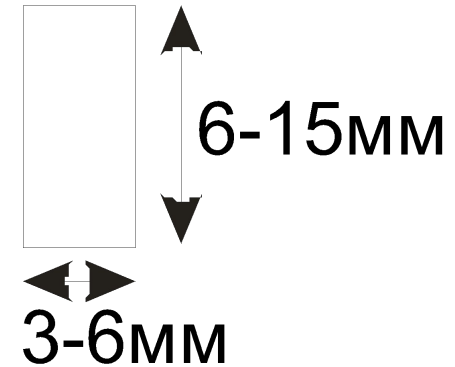
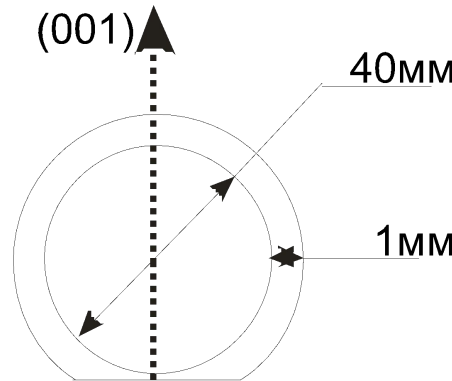
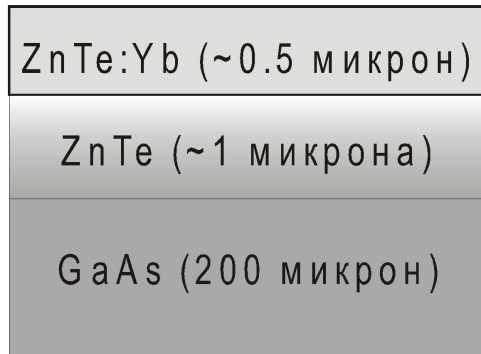
Глава **2.** Методы изготовления и исследования полупроводниковых структур.

- Методы изготовления и модифицирования:
 - Молекулярно лучевая эпитаксия
 - Ионное легирование
 - Фотостимулированный отжиг
- Методы исследования:
 - Фотолюминесценция
 - Масс-спектроскопия вторичных ионов
 - Дифракция быстрых электронов

Глава 3

- Исследование методом фотолюминесценции структур ZnTe, ZnSe/ZnCdSe

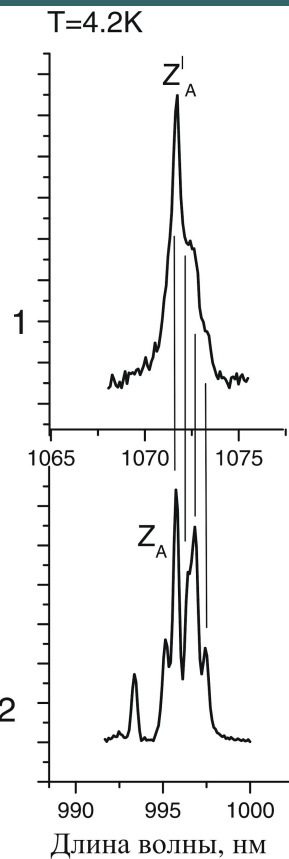
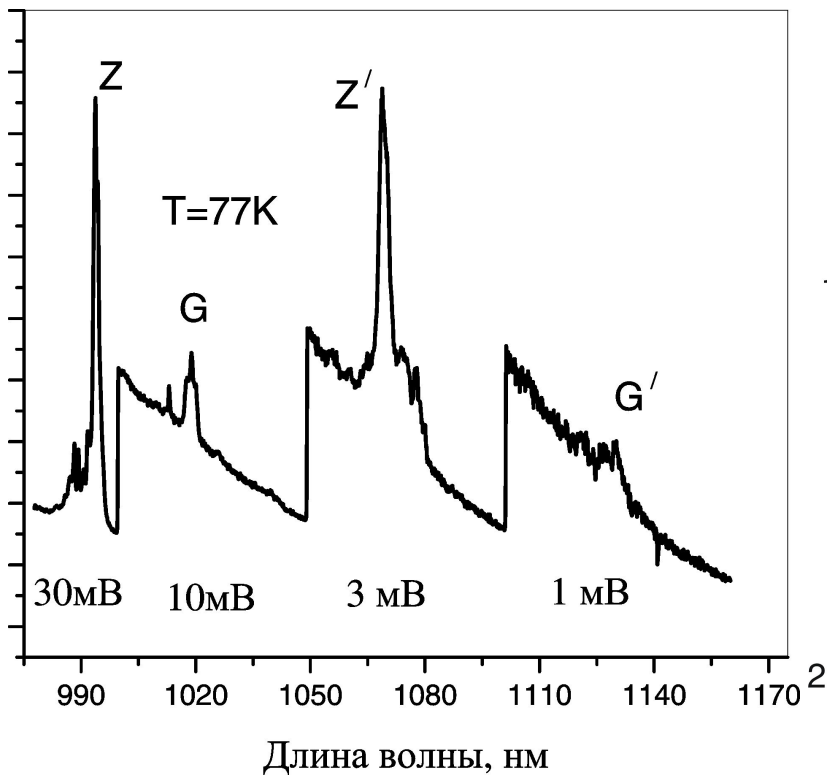
Глава 3. Полупроводниковые структуры на основе ZnTe



- Поперечный срез
- Внешний вид ростовой шайбы
- Характерные размеры образца

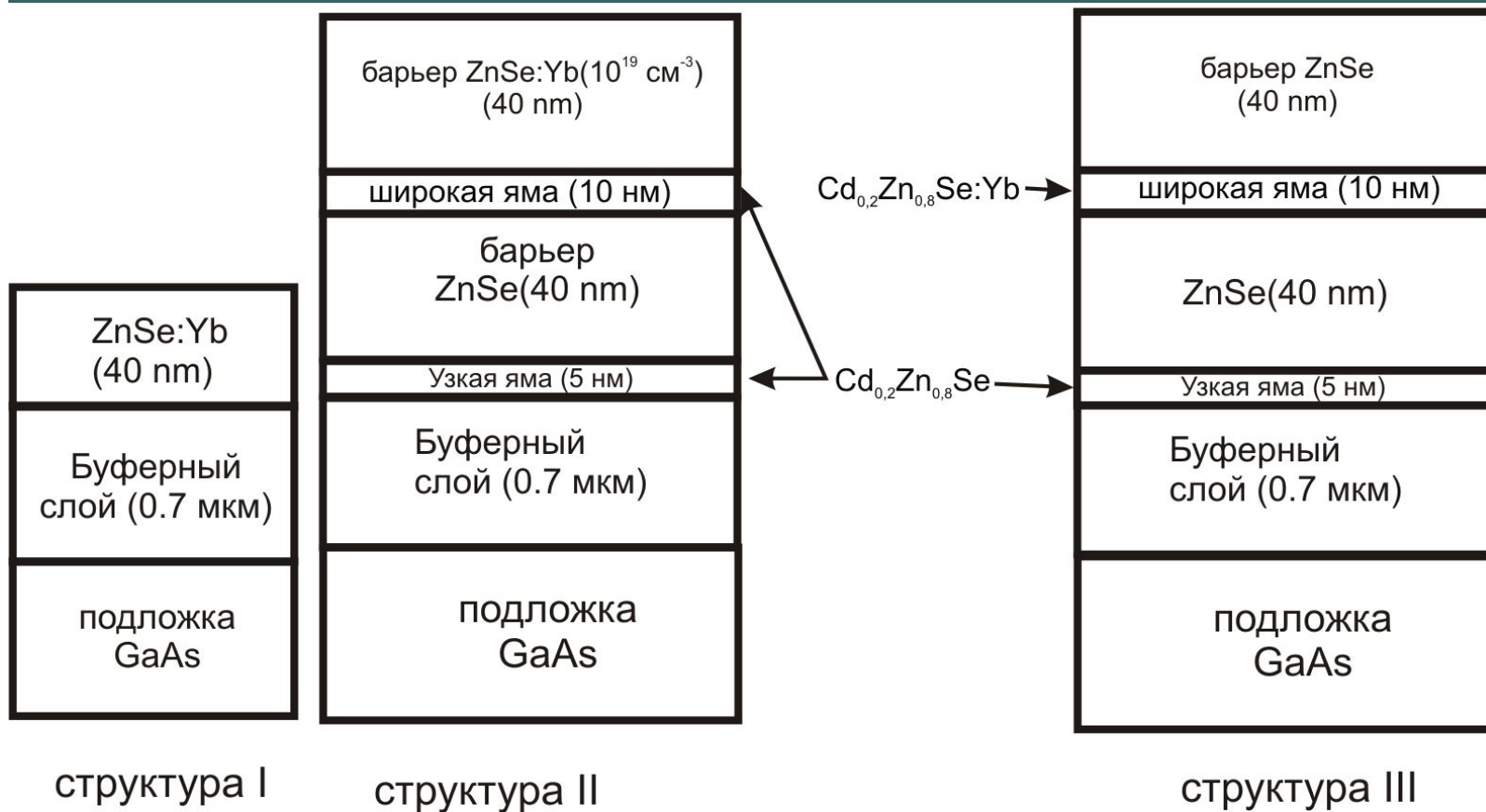
- Перед проведением имплантации половина образца маскируется фольгой и называется контрольной.

Глава 3. Спектр характеристического излучения ионов иттербия в ZnTe.



Z' – фононное повторение полосы Z

Глава 3. Поперечное сечение структур **ZnSe/ZnCdSe**

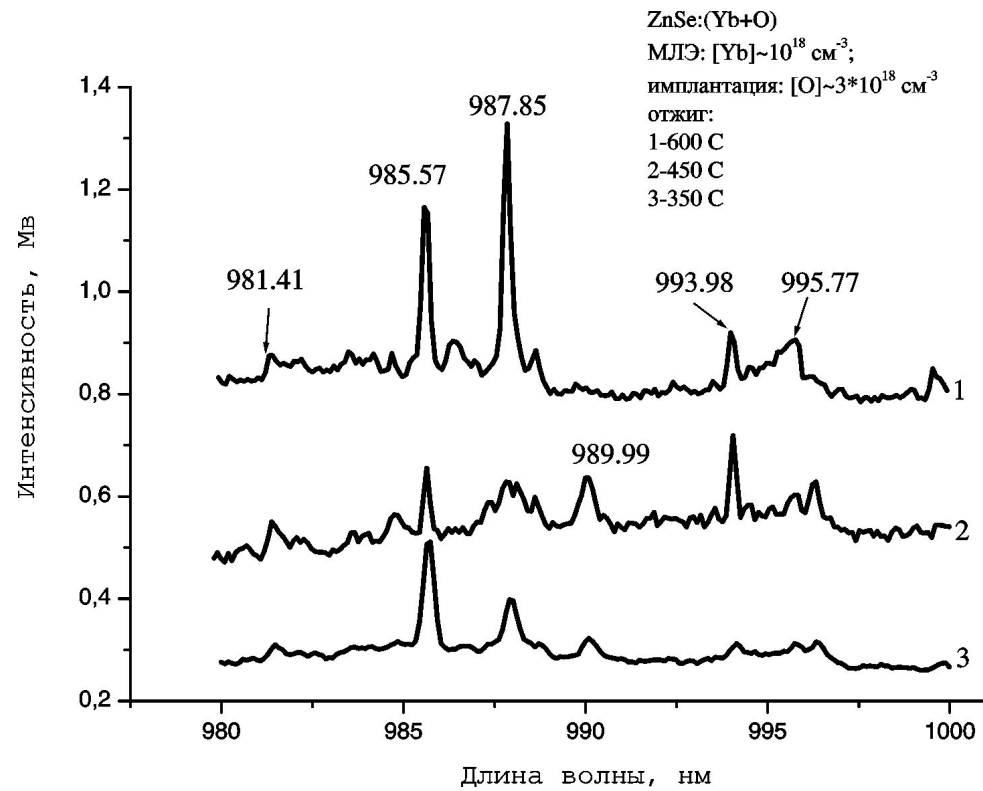


Глава 3. Нахождение оптимальной температуры отжига.

ZnSe:Yb (40 nm)
Буферный слой (0.7 мкм)
подложка GaAs

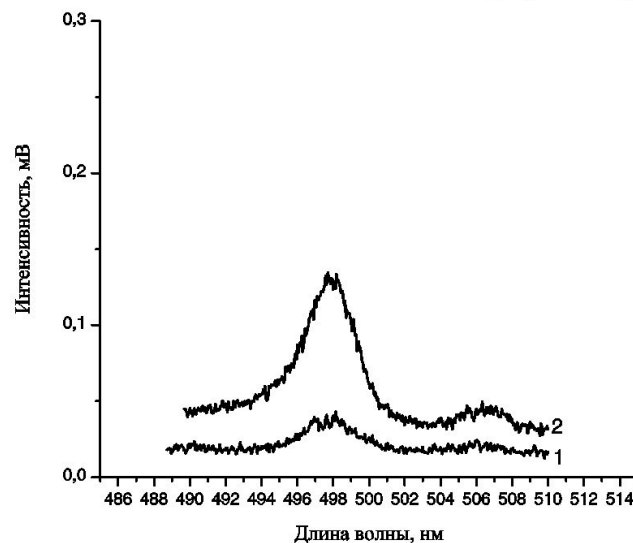
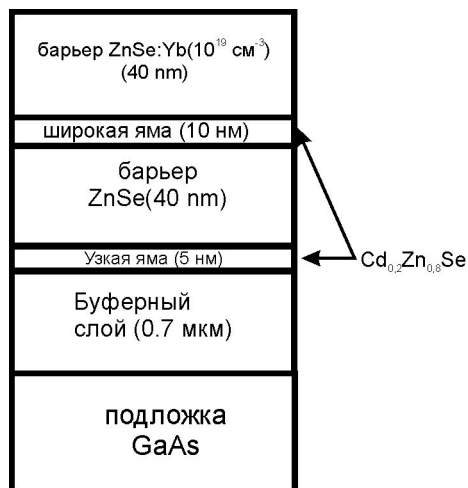
структура I

- Для образцов структуры I типа был найден оптимальный режим отжига.
- $T_{opt} = 450^{\circ}\text{C}$

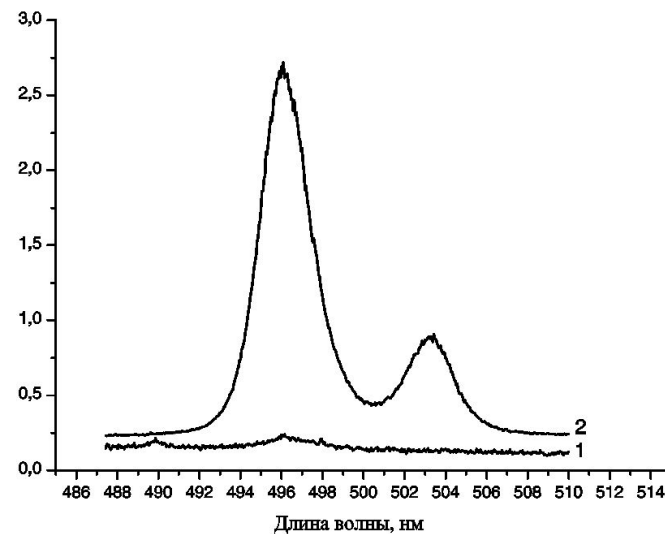


Глава 3. Экситонное излучение сразу после проведения имплантации кислорода.

Структура II типа



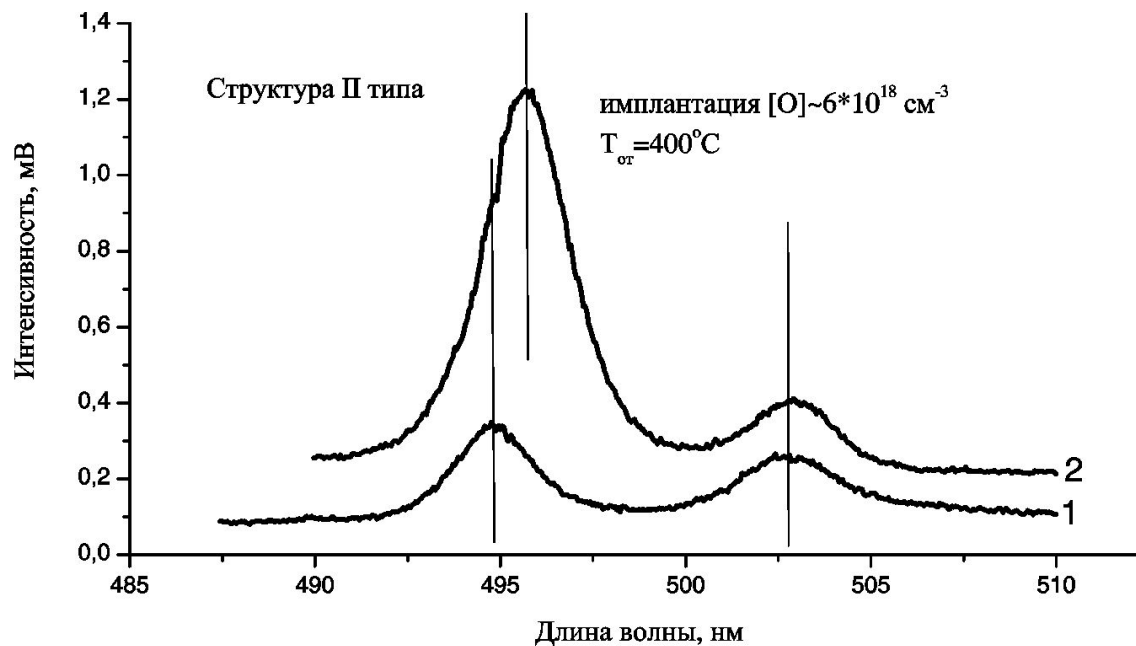
а)



б)

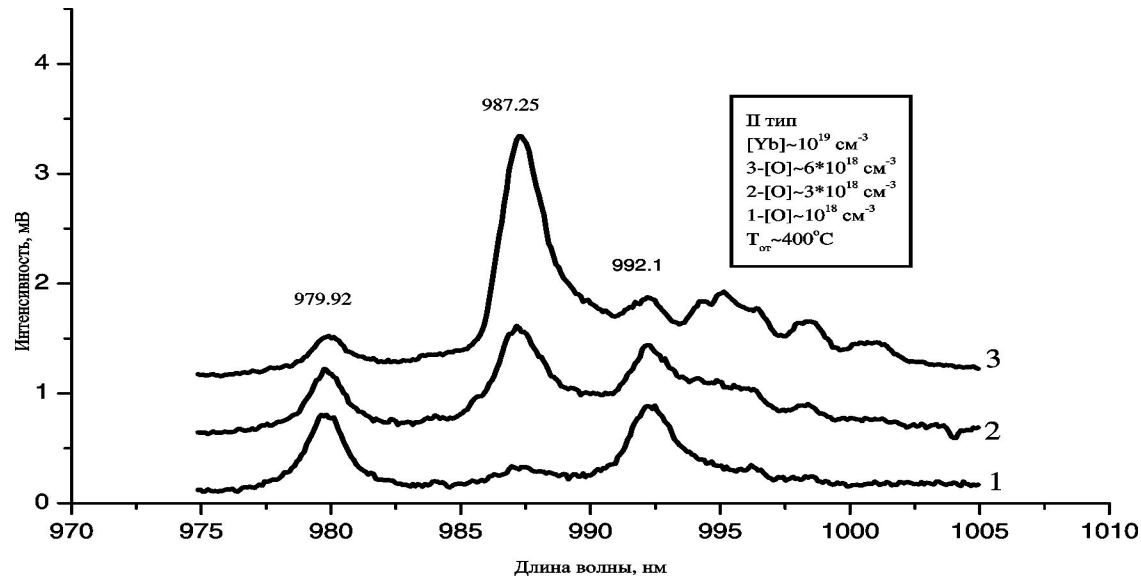
Спектры ФЛ в области излучения экситонов, локализованных в квантовых ямах, зарегистрированных как на рабочих (1), так и на контрольных (2) частях одних и тех же образцов структуры второго типа после проведения имплантации ионов кислорода до двух значений максимума его распределения по глубине. а - $5 \cdot 10^{16}$ см⁻³ б - 10^{18} см⁻³

Глава 3. Экситонное излучение после проведения отжига. Структура II типа.



Спектры ФЛ в области излучения экситонов, локализованных в квантовых ямах, зарегистрированные на рабочей (1) и контрольной (2) части одного и того же образца структуры второго типа после однократного отжига 400°C длительностью 5 мин.

Глава 3. Характеристическое излучение ионов иттербия. Структура II.

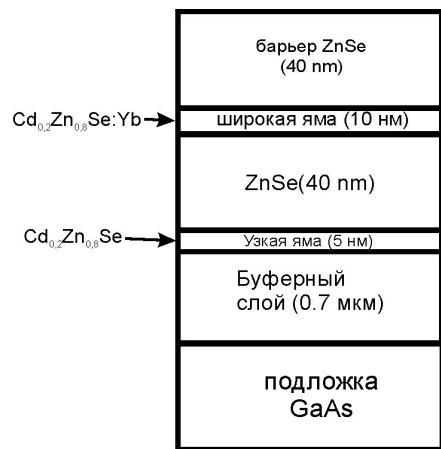


РЗ спектры для трех образцов структуры второго типа, имплантированных ионами кислорода до концентраций в максимуме его распределения 10^{18} см^{-3} (1), $3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ (2) и $6 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ (3), а затем прошедших термоотжиг при температуре 400°C .

- Поиск оптимальной концентрации имплантированного кислорода.
- $C_{\text{opt}} = 6 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$

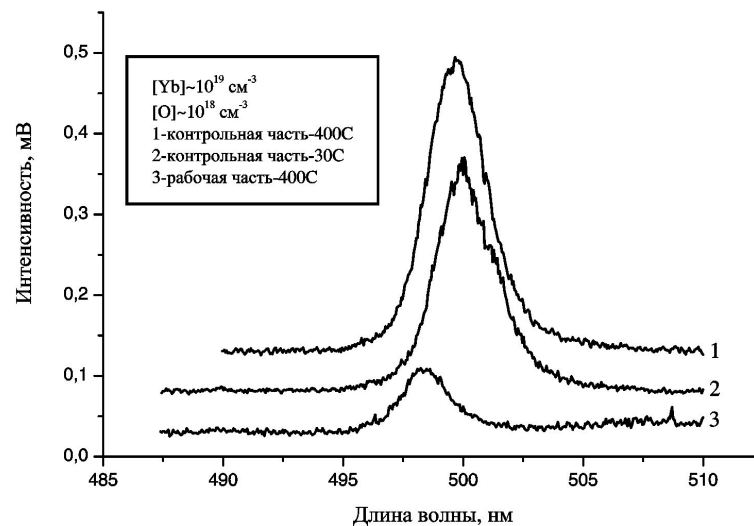
Глава 3. Экситонное излучение.

Структура III типа.



структура III

Структура III типа

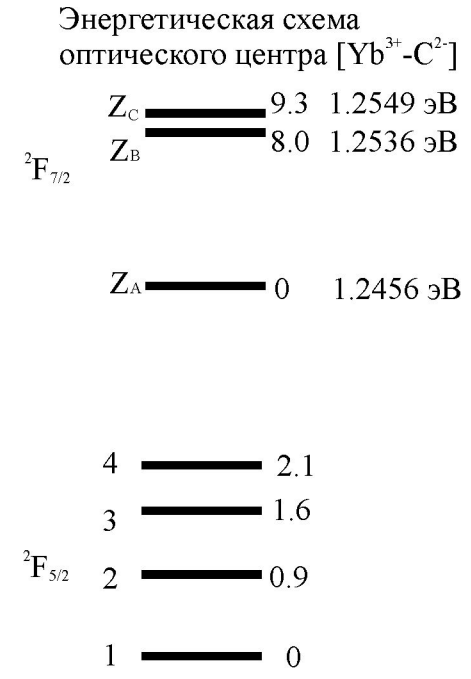
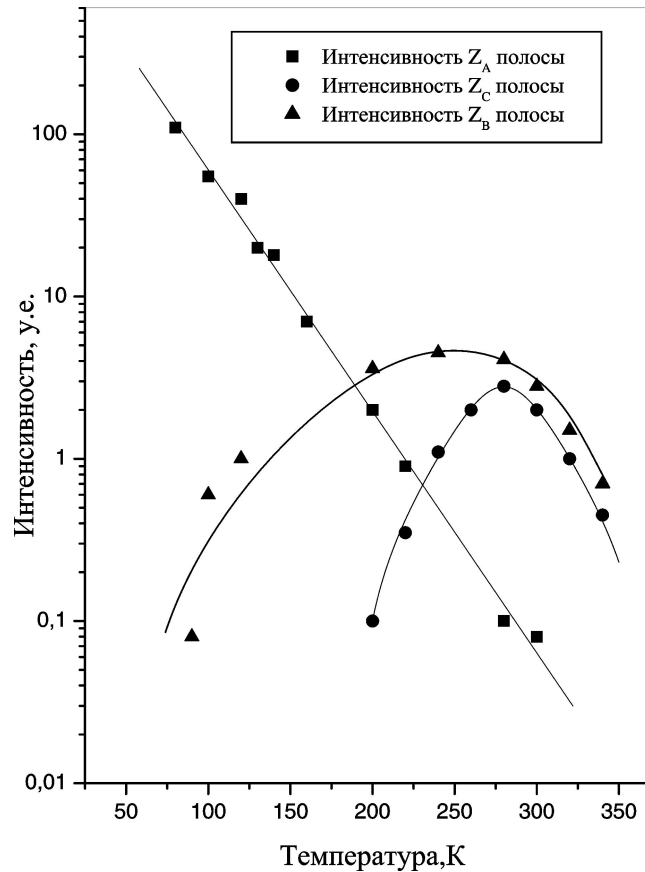
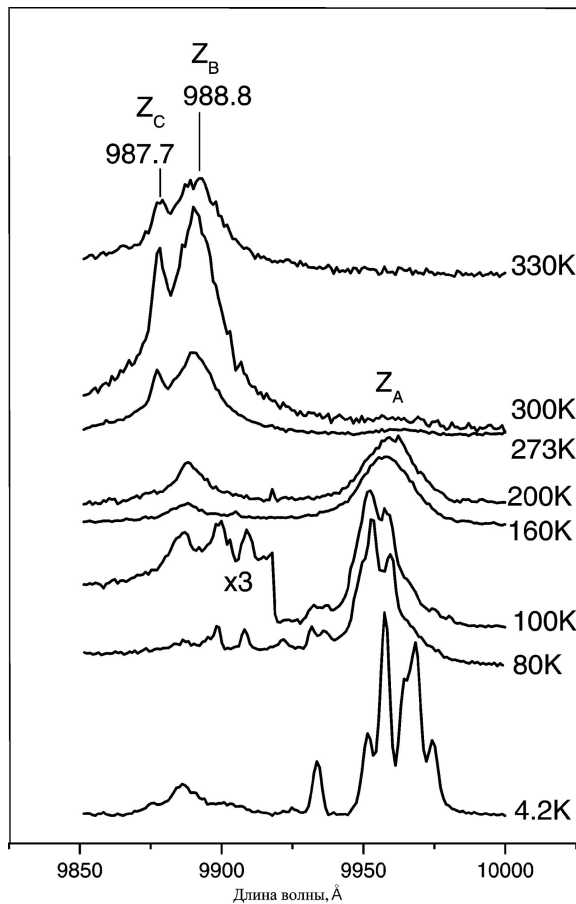


Спектры ФЛ в области излучения экситонов, локализованных в узкой квантовой яме, для образца структуры третьего типа. Образец содержал в широкой квантовой яме Yb с концентрацией 10^{19} см^{-3} . Укажем, что эта экситонная полоса на рабочей части была погашена имплантацией. 1 — спектр, зарегистрированный на контрольной части после отжига при 400°C . 2 — спектр, зарегистрированный на контрольной части образца сразу после проведения имплантации. 3 — спектр рабочей части.

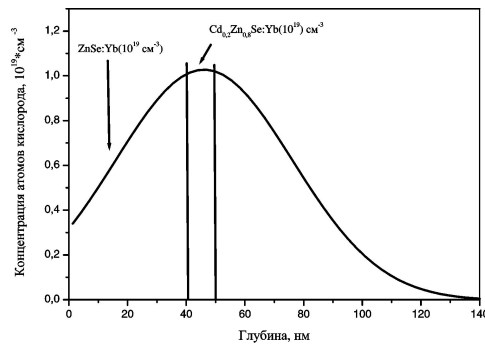
Глава 4

- Интерпретация результатов
 - Получение энергетической схемы люминесцентного центра на основе иттербия в ZnTe
 - Оценка состава материала квантовой ямы $\text{Zn}_{(1-x)}\text{Cd}_x\text{Se}$ по результатам исследования фотолюминесценции структур ZnSe/ZnCdSe.

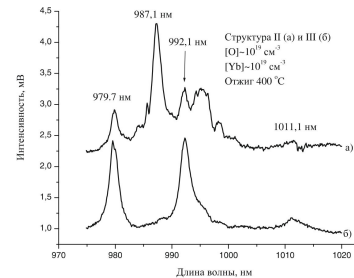
Глава 4. Зависимость вида спектров характеристического излучения ионов иттербия в системе **ZnTe** от температуры образца во время измерения спектра.



Глава 4. Распределение кислорода по глубине для структур I и III типов.



Распределение по глубине атомов кислорода, имплантированных в структуры второго и третьего типа с энергией 25 кЭв. По оси абсциссы показаны границы слоев первого барьера и квантовой ямы.

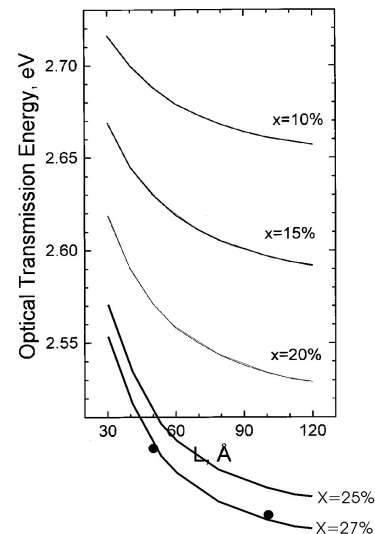
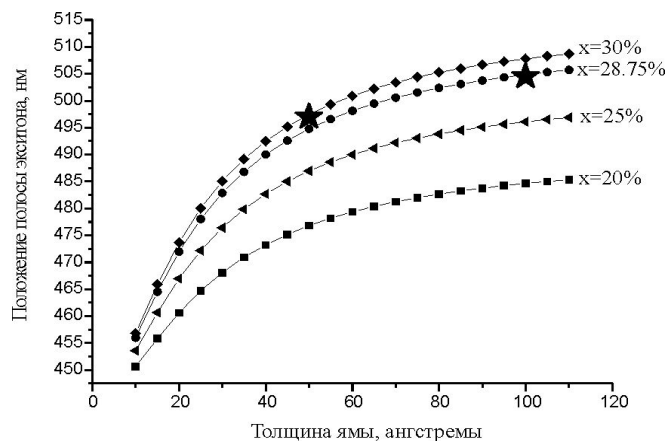


РЗ спектры образцов структуры II типа (а) и структуры III типа (б). Образец (а) содержал в барьере ZnSe атомы Yb с концентрацией 10^{19} см^{-3} . Образец (б) содержал Yb с концентрацией $\sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$ в материале ямы. Образцы были имплантированы ионами кислорода до концентрации в максимуме распределения $\sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$, а затем прошли однократный отжиг при температуре 400° С.

- Излучение центров расположенных в квантовой яме должно быть на полтора порядка слабее излучения центров помещённых в буферный слой.
- Интенсивность излучения имеет один порядок величины.
- Размещение люминесцентных центров в квантовой яме приводит к увеличению квантовой эффективности люминесценции.

Глава 4. Зависимости длины волны экситонного излучения от толщины ямы.

- Окончательный результат расчёта длины волны излучения, соответствующего экситонам, локализованным в квантовых ямах.



Зависимости расчетных энергий оптических переходов с участием тяжелых дырок от толщины квантовой ямы для различных составов.

- Звёздочками помечены точки, полученные из эксперимента.

«Расчёт уровней размерного квантования в напряженных ZnCdSe/ZnSe квантовых ямах», М.В. Максимов, И.Л. Крестников, С.В. Иванов, Н.Н. Леденцов, С.В. Сорокин, Физика и техника полупроводников, 1997, том 31, №8.

Основные результаты (ZnTe)

- Выполнены экспериментальные исследования фотолюминесценции иттербия в полупроводниковых структурах и наноструктурах на основе ZnTe и ZnSe/ZnCdSe.
- Получено устойчивое и воспроизводимое характеристическое излучение ионов Yb³⁺, введённых в монокристаллические слои ZnTe двумя способами: как в процессе МЛЭ, так и методом ионной имплантации. Показано, что одним из необходимых условий получения характеристического излучения является наличие определённой концентрации атомов кислорода в слое. Для получения максимальной интенсивности характеристического излучения концентрация иттербия в слоях теллурида цинка должна составлять $\approx 5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, оптимальное отношение между концентрациями иттербия и кислорода 1:10 при концентрации Yb от 10^{17} см^{-3} до $8 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ и 1:(5-6) при концентрациях иттербия порядка 10^{19} см^{-3} . Постимплантационный отжиг следует проводить при температуре $T \approx 400-450^\circ\text{C}$.
- В структуре ZnTe:(Yb+O) получена люминесценция центров на основе иттербия, наблюдаемая от 4К до температур порядка 100°C и обусловленная электрон-фононным взаимодействием. Исследована зависимость спектров люминесценции системы ZnTe:(Yb+O) от температуры. В качестве обобщения полученных результатов предложена энергетическая схема люминесцентного центра на основе РЗ иона и некоторой фоновой примеси, предположительно – углерода.

Основные результаты (ZnSe/ZnCdSe)

- В квантоворазмерных структурах ZnSe/ZnCdSe характеристическое излучение РЗ ионов и излучение, связанное с экситонами, локализованными в квантовых ямах, имеет максимум интенсивности при следующих условиях: концентрация имплантированного кислорода составляет $(3-6) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, постимплантационный отжиг длительностью 5 минут проводится при температуре 400-600°C. Таким образом продемонстрирована возможность восстановления интенсивности излучения, связанного с экситонами, без значительного уменьшения интенсивности характеристического излучения РЗ ионов.
- Наблюдалось увеличение не менее чем на порядок квантового выхода люминесценции центров на основе Yb при размещении их в квантовой яме наноструктуры на основе ZnSe/ZnCdSe.
- Проведены расчёты положения экситонной линии в спектре ФЛ, позволившие уточнить параметры ямы в квантоворазмерной структуре. Наилучшее соответствие между экспериментальными данными и результатами расчётов были получены в предположении состава тройного соединения $\text{Zn}_{0.73}\text{Cd}_{0.27}\text{Se}$.

Публикации

- Основные результаты опубликованы в следующих работах
 - Physica status solidi(B), v.229, Issue 1, January 2002, p. 317-321 “Photoluminescence of Yb doped ZnTe”
N.N. Loiko, V.M. Konnov, Yu.G. Sadofyev, E.I. Mahov, A.S. Trushin, A.A. Gippius
 - Физика и техника полупроводников, 2002, том. 36, вып. 11 «Излучение редкоземельных центров в системе ZnTe:(Yb+O)/GaAs» В.М. Коннов, Н.Н. Лойко, Ю. Г. Садофьев, Е.И. Махов, А.С. Трушин
 - Краткие сообщения по физике ФИАН, номер 8, 2003 г. «Люминесценция структур ZnSe/CdZnSe, включая структуры с пониженной размерностью, выращенные и легированные Yb в процессе молекулярно-лучевой эпитаксии»