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 $ZnSe/Zn_{(1-x)}Cd_xSe$
- Глава 2
  - Методы изготовления и исследования полупроводниковых структур.
- Глава 3
  - Исследование методом фотолюминесценции структур ZnTe, ZnSe/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 ZnSe/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.

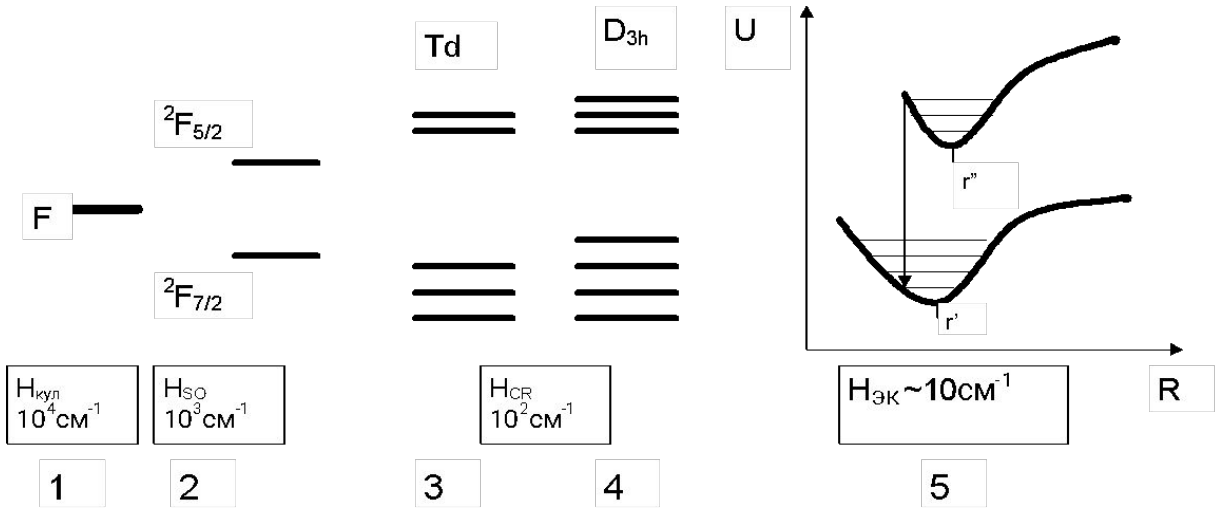
Глава 1

- Теоретическое описание системы полупроводник-ион редкоземельного элемента.
- Расчёт положения линий соответствующих экситонам локализованным в квантовых ямах структур на основе $ZnSe/Zn_{(1-x)}Cd_xSe$

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.



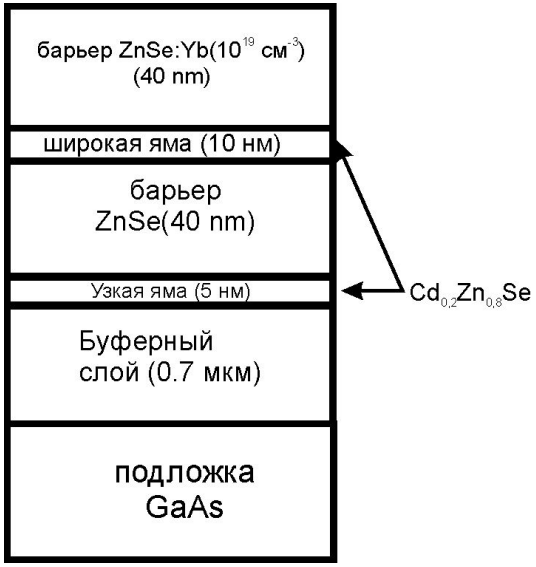
$H_{4f}=H_{кул}+H_{so}+H_{CR}+H_{ЭК}$

Td :
$^2F_{5/2} \rightarrow \Gamma_7+\Gamma_8$
$^2F_{7/2} \rightarrow \Gamma_6+\Gamma_7+\Gamma_8$

Td → D3h:
$\Gamma_6 \rightarrow E_{1/2}$
$\Gamma_7 \rightarrow E_{1/2}$
$\Gamma_8 \rightarrow E_{1/2} + E_{3/2}$

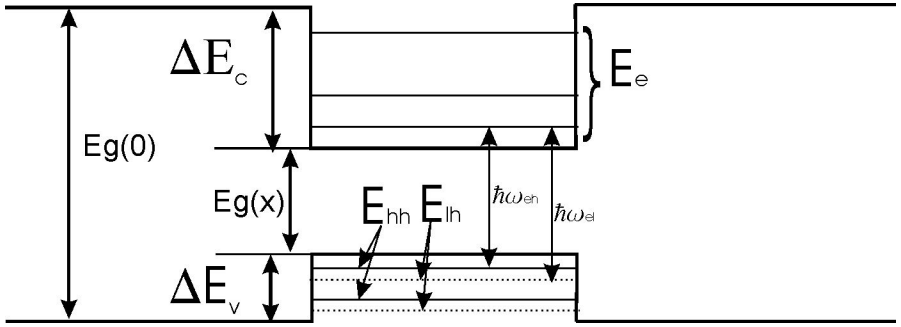
D3h:
$^2F_{5/2} \rightarrow 2E_{1/2} + E_{3/2}$
$^2F_{7/2} \rightarrow 3E_{1/2} + E_{3/2}$

Глава **1.**
Расчёт положения экситонной линии.

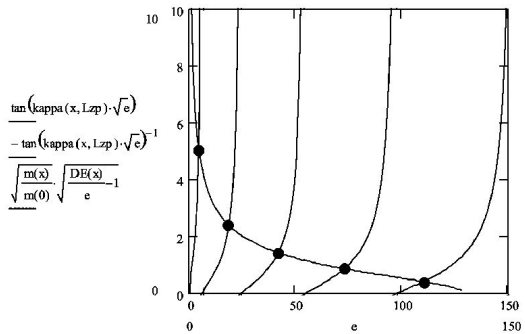


- Поперечное сечение структуры второго типа.

- Энергетическая диаграмма одной квантовой ямы.



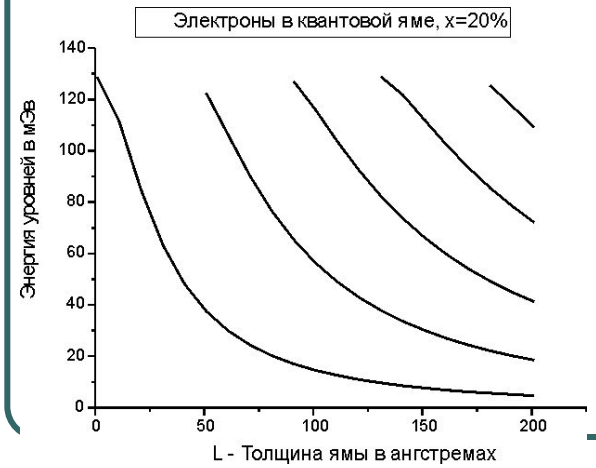
Глава 1. Нахождение уровней носителей, локализованных в квантовых ямах.

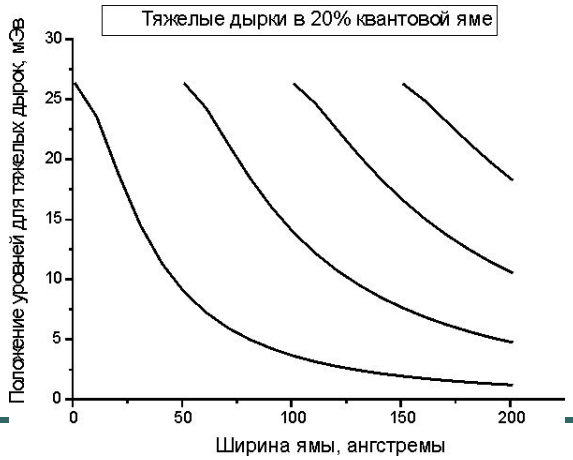


- Графическое представление транцендентного уравнения

$$\tan\left(8.101\cdot10^{-3}\cdot L_{xp}\cdot\sqrt{E_{xp}m_p^w}+\frac{\pi}{2}\cdot n\right)=\sqrt{\frac{m_p^w}{m_p^b}}\cdot\sqrt{\frac{\Delta E}{E_{xp}}-1},n\in\mathbb{Z}$$

- Уровни различных носителей, локализованных в квантовой яме.





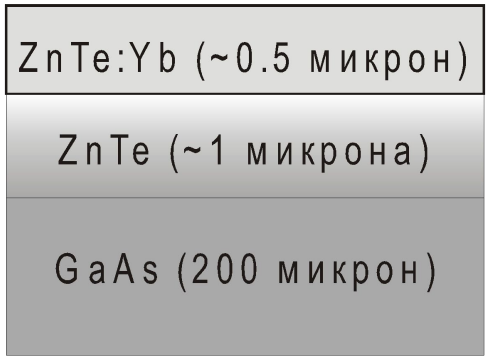
Глава 2. Методы изготовления и исследования полупроводниковых структур.

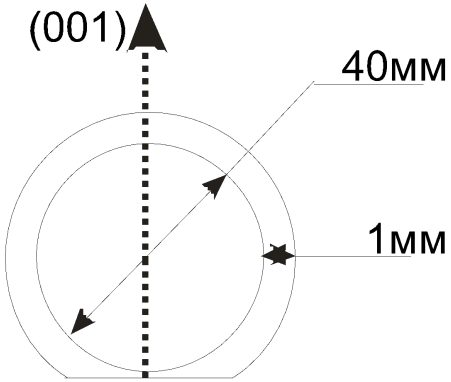
- Методы изготовления и модифицирования:
  - Молекулярно лучевая эпитаксия
  - Ионное легирование
  - Фотостимулированный отжиг
- Методы исследования:
  - Фотолюминесценция
  - Масс-спектроскопия вторичных ионов
  - Дифракция быстрых электронов

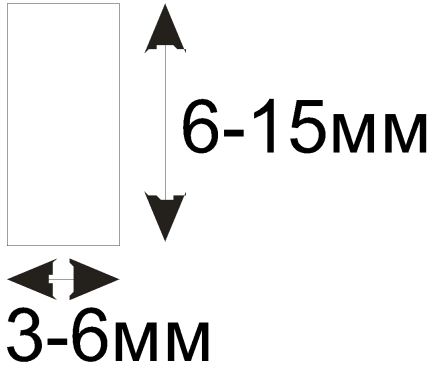
Глава 3

- Исследование методом фотолюминесценции структур ZnTe, ZnSe/ZnCdSe

Глава **3.**Полупроводниковые структуры на основе **ZnTe**



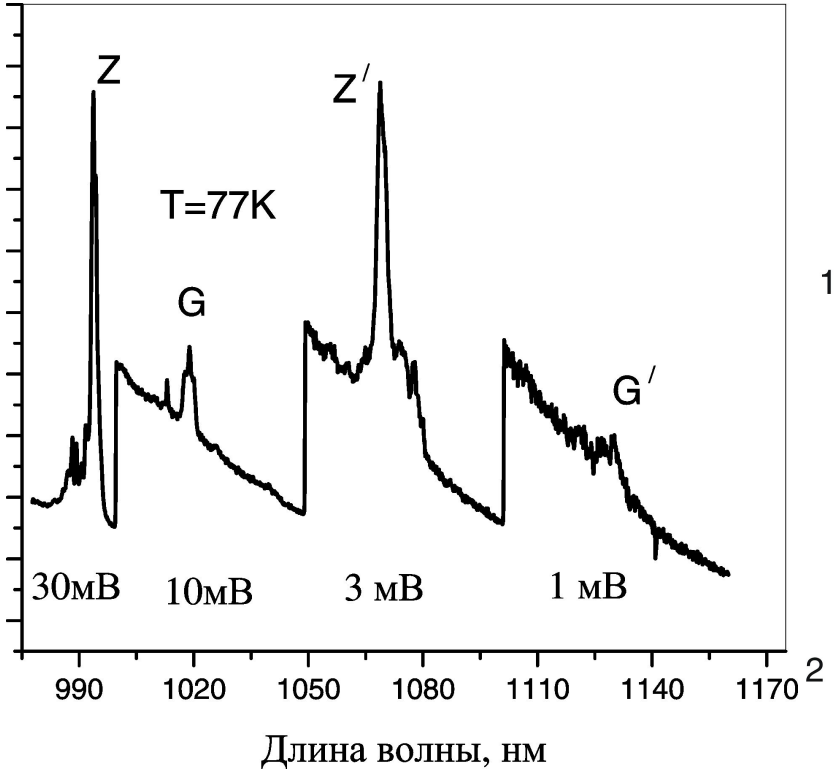


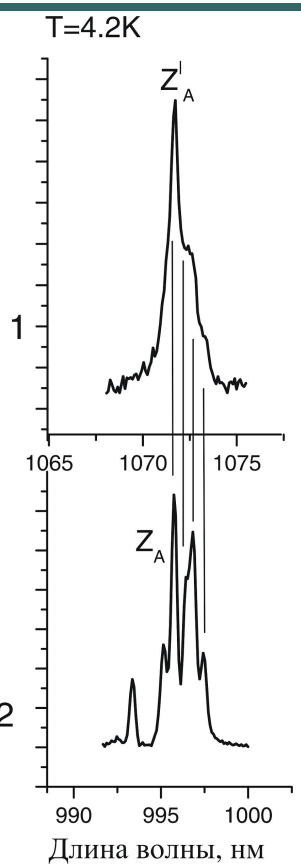


- Поперечный срез
- Внешний вид ростовой шайбы
- Характерные размеры образца

- Перед проведением имплантации половинка образца маск**и**руется фольгой и называется контрольной.

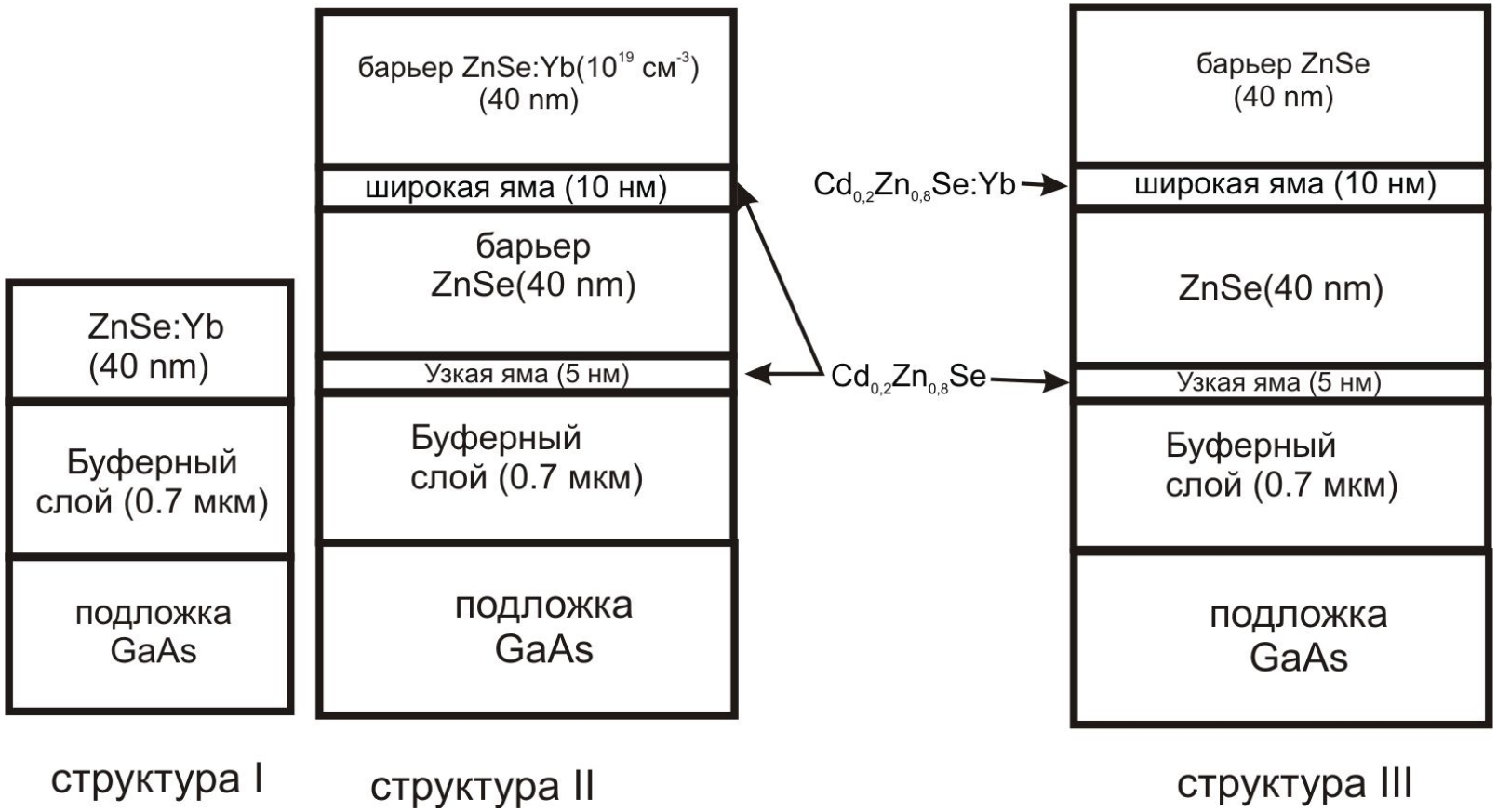
Глава **3.**Спектр характеристического излучения ионов иттербия в **ZnTe.**





Z’ – фононное повторение полосы Z

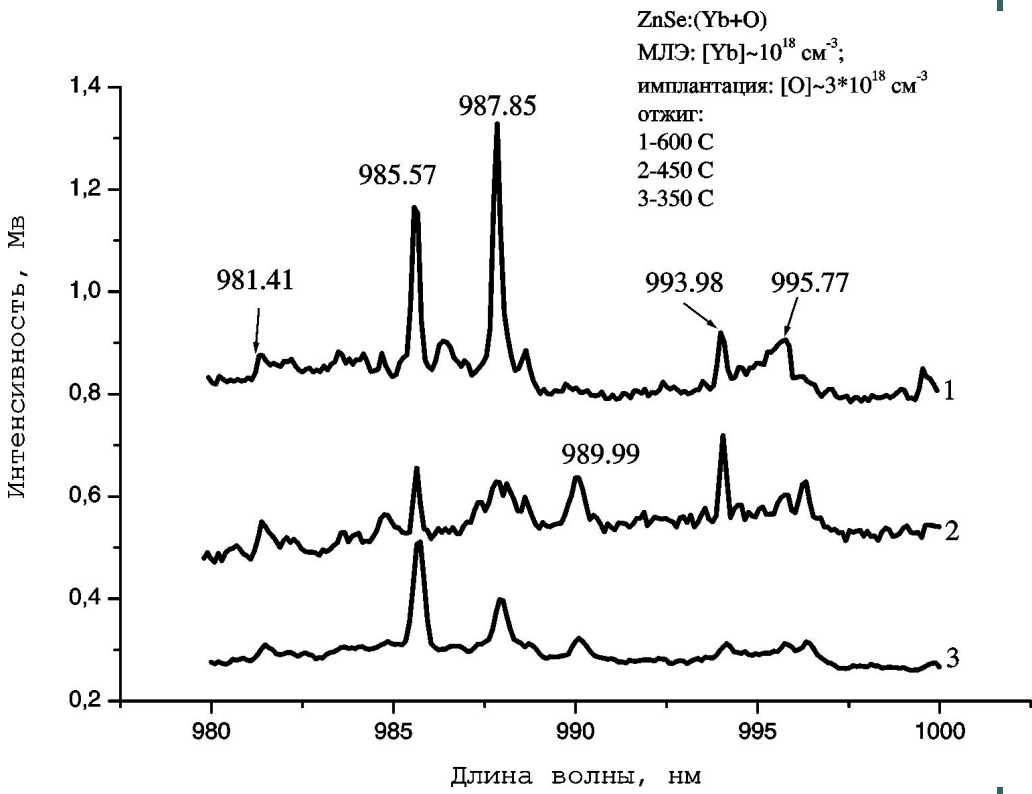
Глава **3.** Поперечное сечение структур **ZnSe/ZnCdSe**



Глава **3.** Нахождение оптимальной температуры отжига.

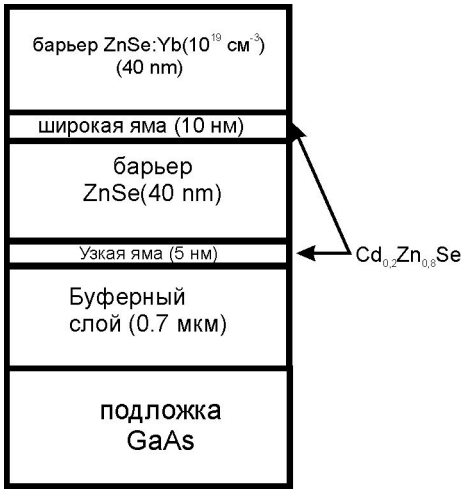
структура I

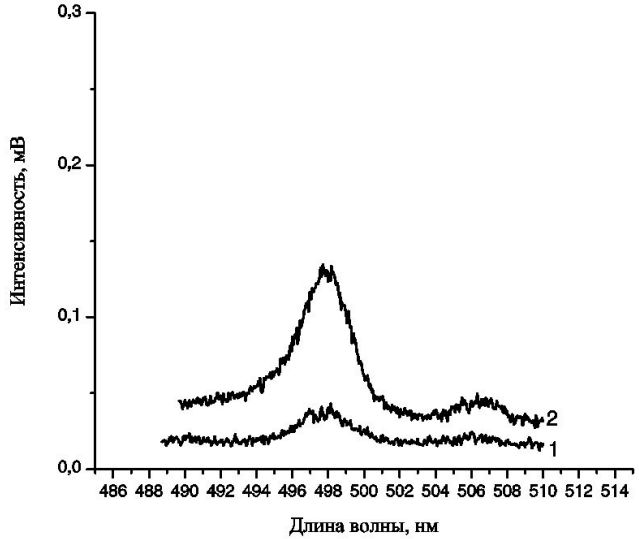
- Для образцов структуры I типа был найден оптимальный режим отжига.
- T_{opt}=450°C



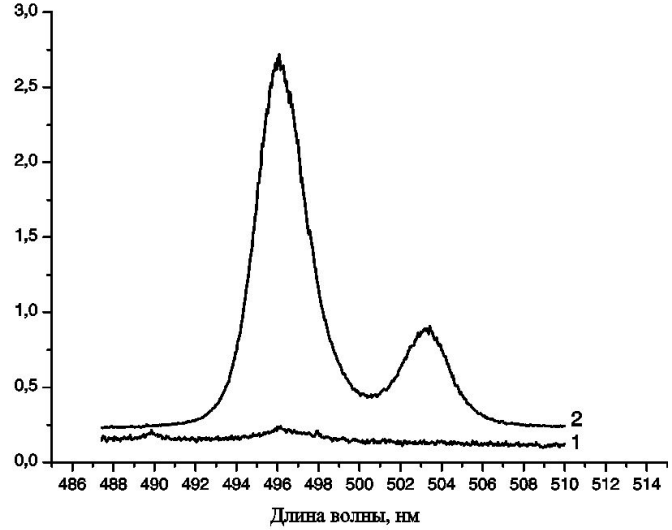
Глава **3.** Экситонное излучение сразу после проведения имплантации кислорода.

Структура II типа





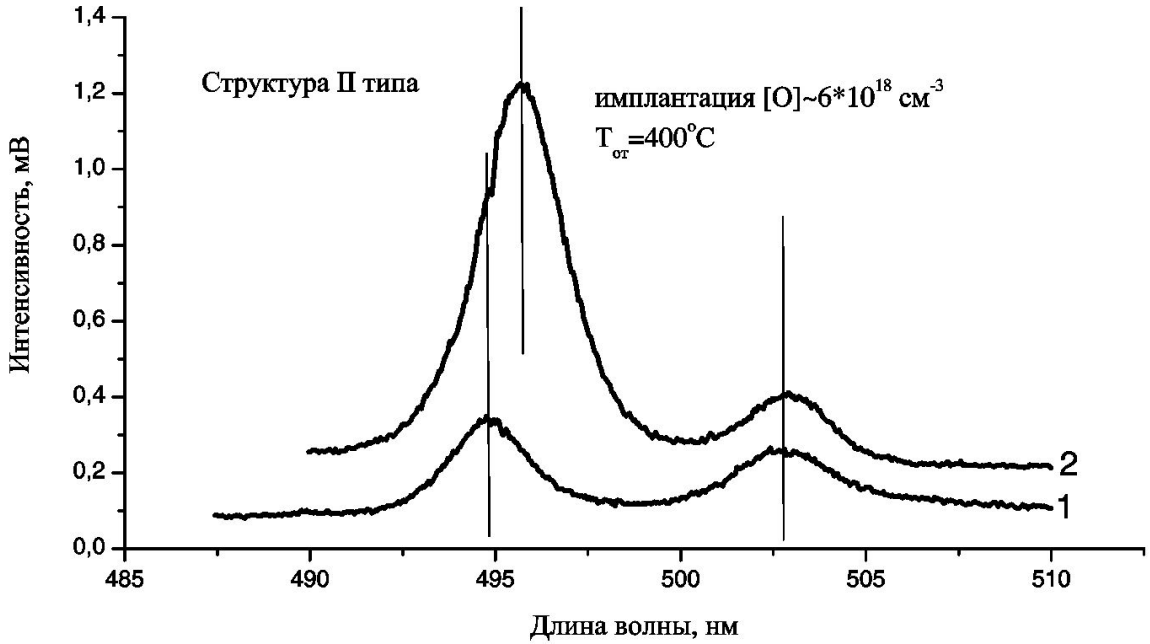
а)



б)

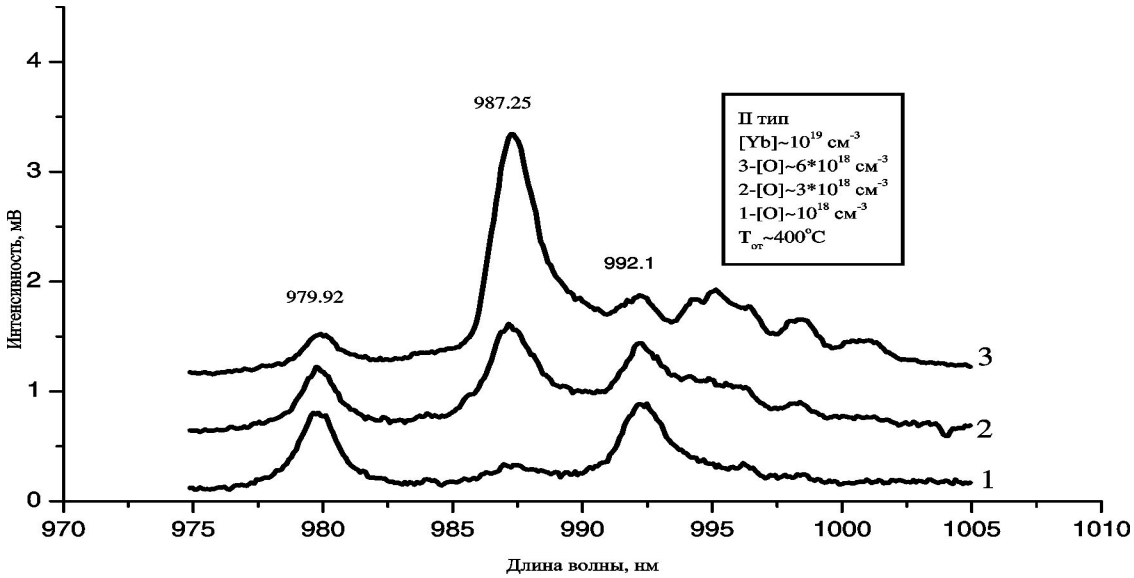
Спектры ФЛ в области излучения экситонов, локализованных в квантовых ямах, зарегистрированных как на рабочих (1), так и на контрольных (2) частях одних и тех же образцов структуры второго типа после проведения имплантации ионов кислорода до двух значений максимума его распределения по глубине. а - $5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

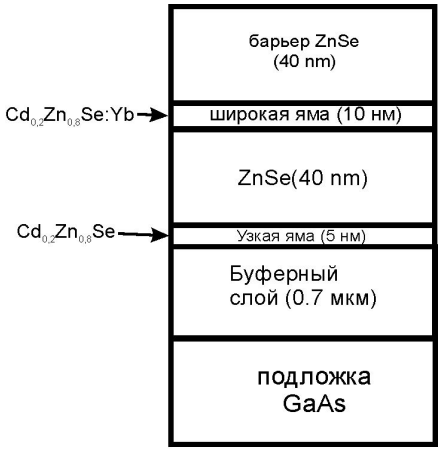
Глава **3.** Характеристическое излучение ионов иттербия**.** Структура **II.**



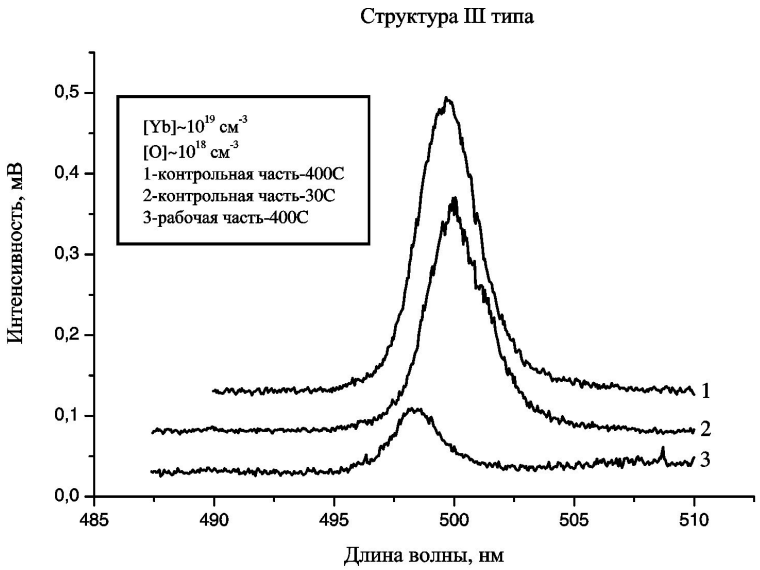
ФЛ спектры для трех образцов структуры второго типа, имплантированных ионами кислорода до концентраций в максимуме его распределения 10^{18} см$^{-3}$ (1), $3 \cdot 10^{18}$ см$^{-3}$(2) и $6 \cdot 10^{18}$ см$^{-3}$(3), а затем прошедших термоотжиг при температуре 400°C.

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

Глава 3. Экситонное излучение. Структура III типа.



структура III

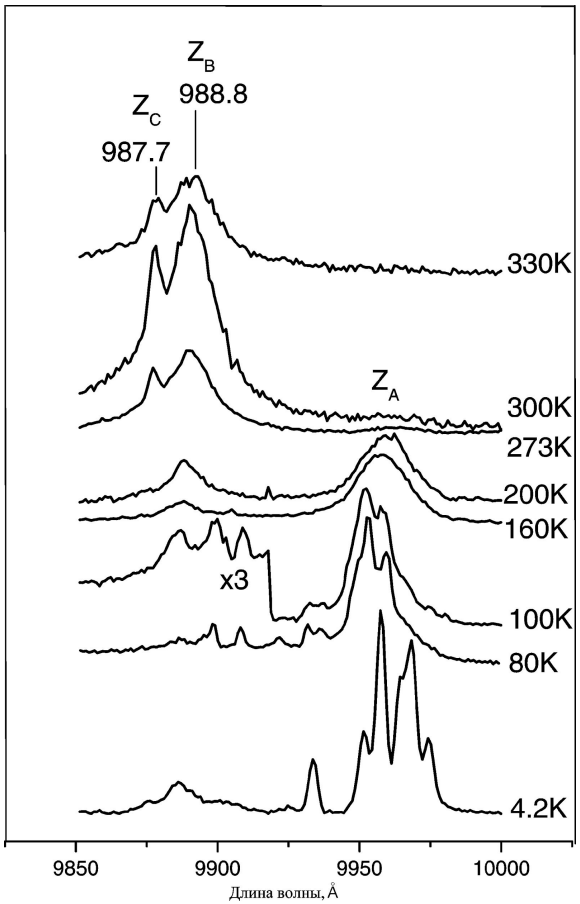


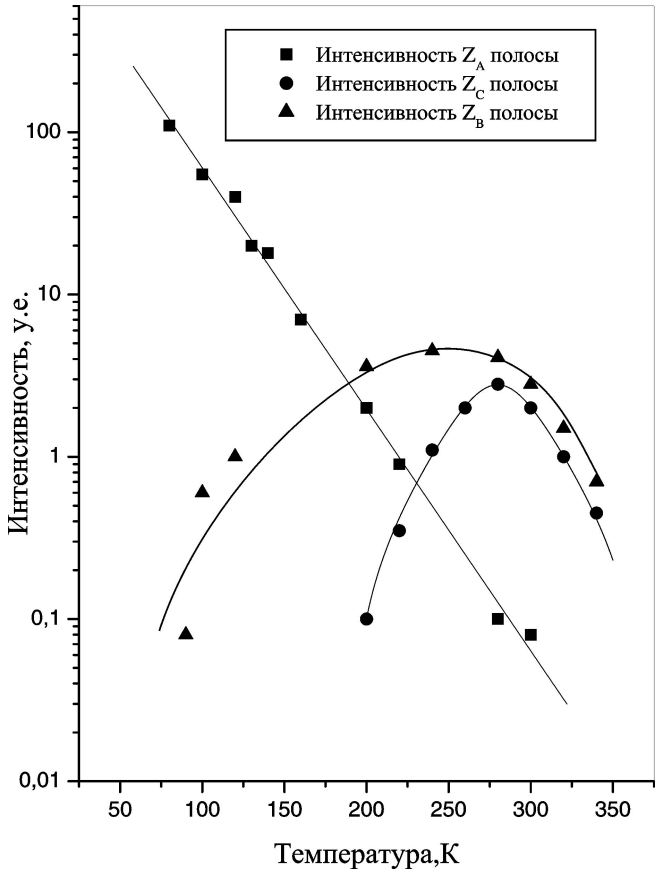
Спектры ФЛ в области излучения экситонов, локализованных в узкой квантовой яме, для образца структуры третьего типа. Образец содержал в широкой квантовой яме Yb с концентрацией 10^{19} см$^{-3}$. Укажем, что эта экситонная полоса на рабочей части была погашена имплантацией. 1 — спектр, зарегистрированный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

Глава 4

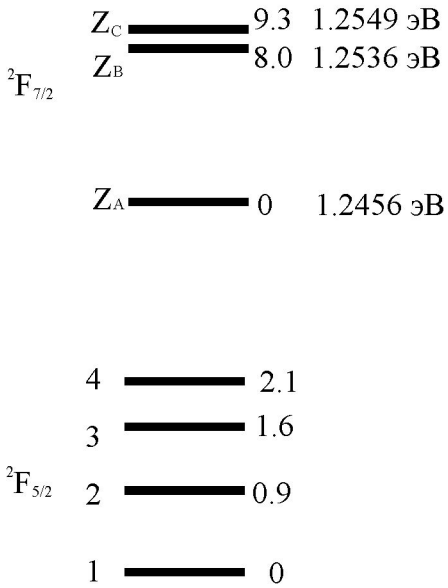
- Интерпретация результатов
  - Получение энергетической схемы люминесцентного центра на основе иттербия в ZnTe
  - Оценка состава материала квантовой ямы $Zn_{(1-x)}Cd_xSe$ по результатам исследования фотолюминесценции структур ZnSe/ZnCdSe.

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

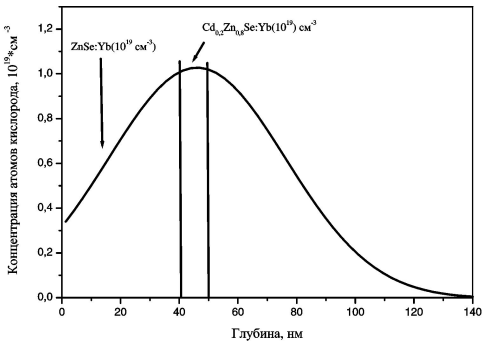




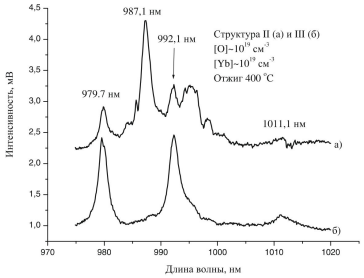
Энергетическая схема оптического центра [Yb^{3+}-C^{2-}]



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



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

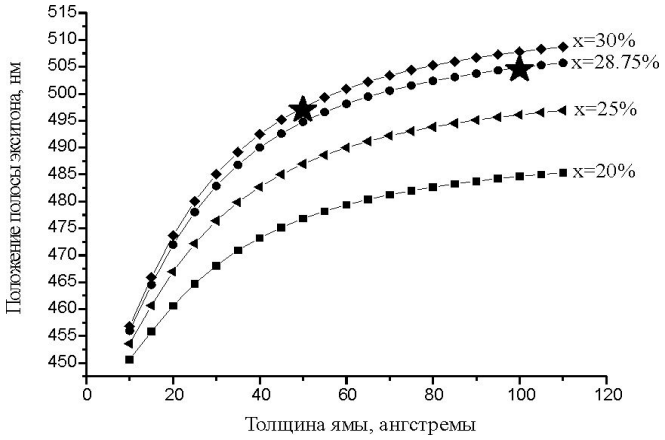


РЗ спектры образцов структуры II типа (а) и структуры III типа (б). Образец (а) содержал в барьере $ZnSe$ атомы Yb с концентрацией 10^{19} см$^{-3}$. Образец (б) содержал Yb с концентрацией $\sim 10^{19}$ см$^{-3}$ в материале ямы.Образцы были имплантированы ионами кислорода до концентрации в максимуме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

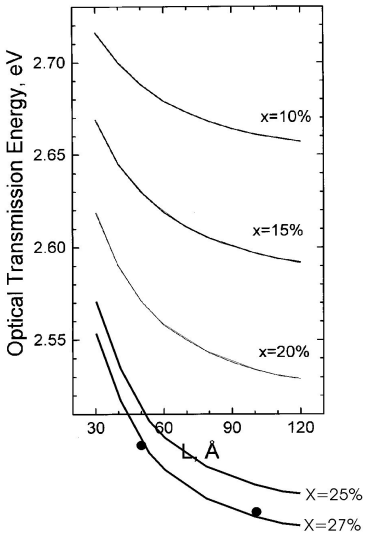
- Излучение центров расположенных в квантовой яме должно быть на полтора порядка слабее излучения центров помещённых в буферный слой.
- Интенсивность излучения имеет один порядок величины.
- Размещение люминесцентных центров в квантовой яме приводит к увеличению квантовой эффективности люминесценции.

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

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



- Звёздочками помечены точки, полученные из эксперимента.



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

«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 $\approx 5 \cdot 10^{19}$ см$^{-3}$, оптимальное отношение между концентрациями иттербия и кислорода 1:10 при концентрации Yb от 10^{17} см$^{-3}$ до $8 \cdot 10^{18}$ см$^{-3}$ и 1:(5-6) при концентрациях иттербия порядка 10^{19} см$^{-3}$. Постимплантационный отжиг следует проводить при температуре T≈400-450°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 $(3\text{-}6)\cdot 10^{18}$ см$^{-3}$, постимплантационный отжиг длительностью 5 минут проводится при температуре 400-600ºС. 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 размещения 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 $Zn_{0.73}Cd_{0.27}Se$.

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»