

*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  $\text{ZnTe}$ ,  $\text{ZnSe}/\text{ZnCdSe}$
- 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  $\text{Yb}^{3+}$  введённых в монокристаллические слои  $\text{ZnTe}$  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  $\text{Yb}^{3+}$  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  $\text{ZnTe}$  люминесцентного центра.
- Показано что введение люминесцентных центров на основе иттербия в квантовую яму увеличивает квантовую эффективность люминесценции.

# Глава 1

---

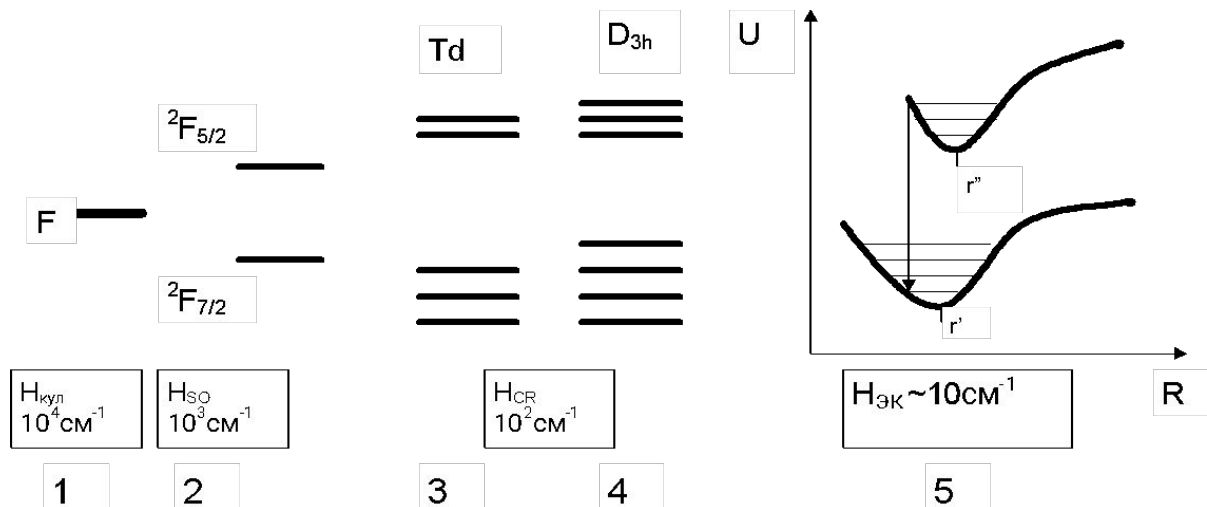
- Теоретическое описание системы полупроводник-ион редкоземельного элемента.
- Расчёт положения линий соответствующих экситонам локализованным в квантовых ямах структур на основе  $\text{ZnSe}/\text{Zn}_{(1-x)}\text{Cd}_x\text{Se}$

# 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.



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

$T_d$  :

$${}^2F_{5/2} \rightarrow \Gamma_7 + \Gamma_8$$

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

$T_d \rightarrow D_{3h}$  :

$$\Gamma_6 \rightarrow E_{1/2}$$

$$\Gamma_7 \rightarrow E_{1/2}$$

$$\Gamma_8 \rightarrow E_{1/2} + E_{3/2}$$

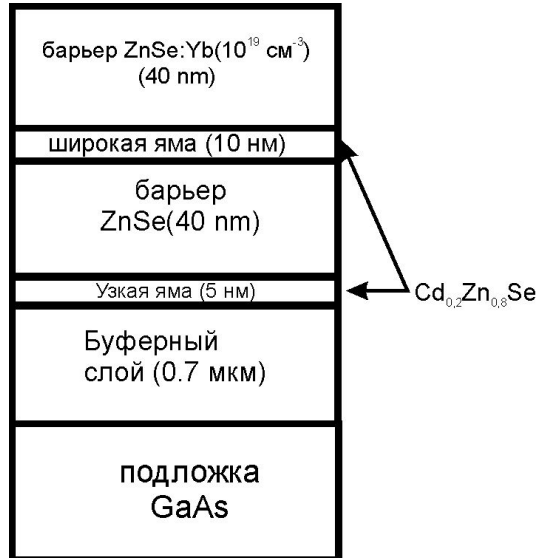
$D_{3h}$  :

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

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

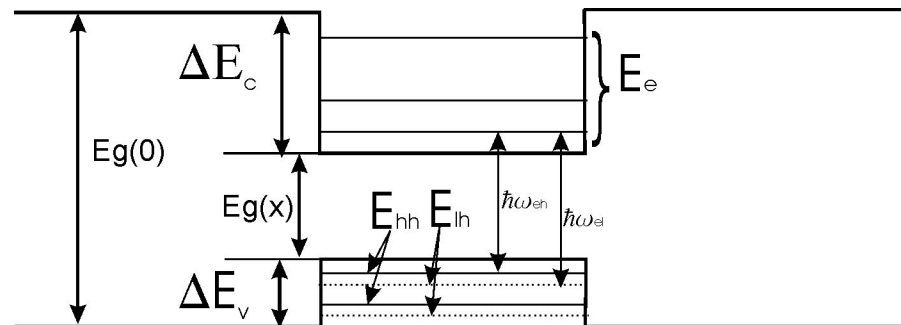
# Глава 1.

## Расчёт положения экситонной линии.



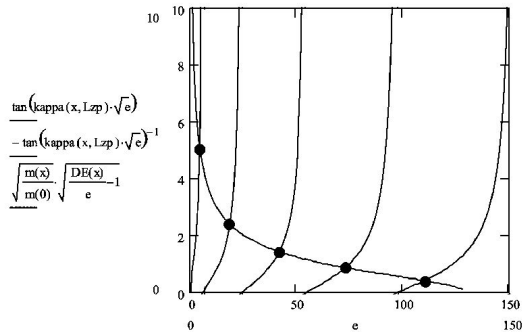
- Поперечное сечение структуры второго типа.

- Энергетическая диаграмма одной квантовой ямы.





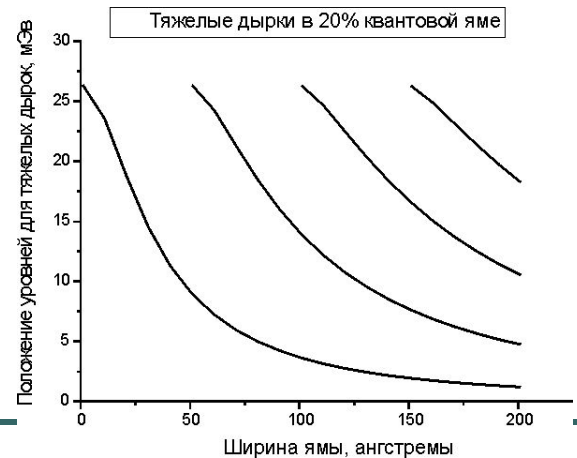
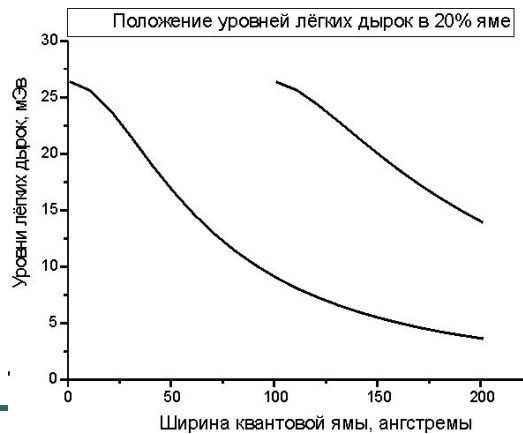
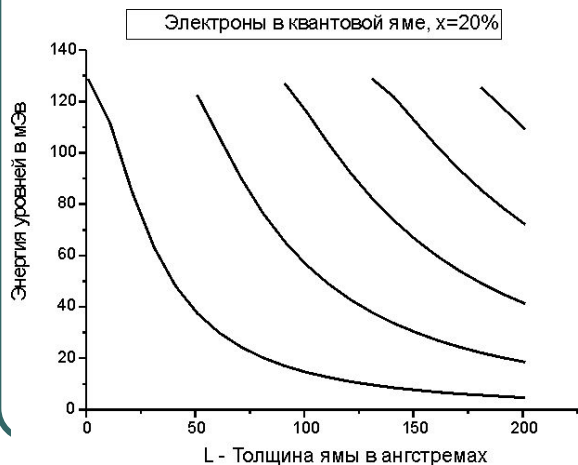
# Глава 1. Нахождение уровней носителей, локализованных в КВАНТОВЫХ ЯМАХ.



- Графическое представление транцендентного уравнения

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

- Уровни различных носителей, локализованных в КВАНТОВОЙ ЯМЕ.



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

---

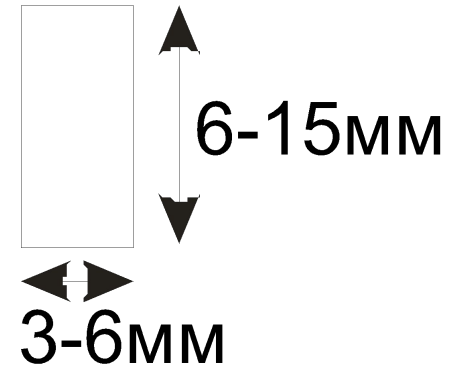
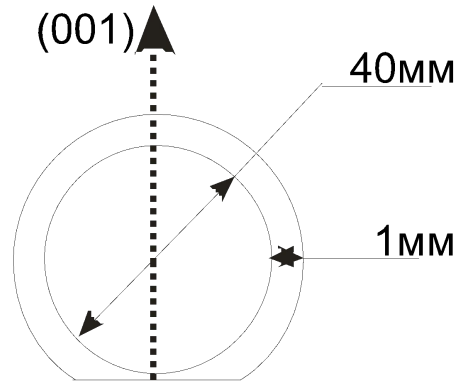
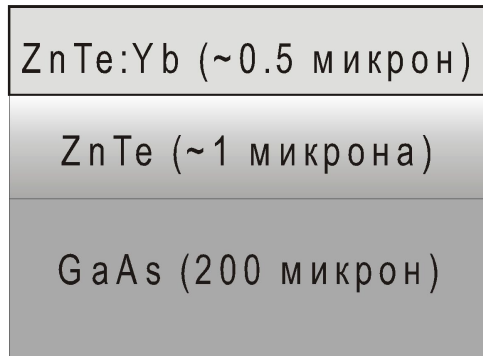
- Методы изготовления и модифицирования:
  - Молекулярно лучевая эпитаксия
  - Ионное легирование
  - Фотостимулированный отжиг
- Методы исследования:
  - Фотолюминесценция
  - Масс-спектроскопия вторичных ионов
  - Дифракция быстрых электронов

# Глава 3

---

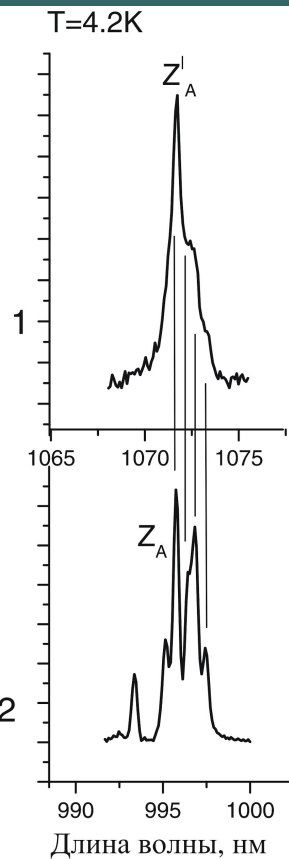
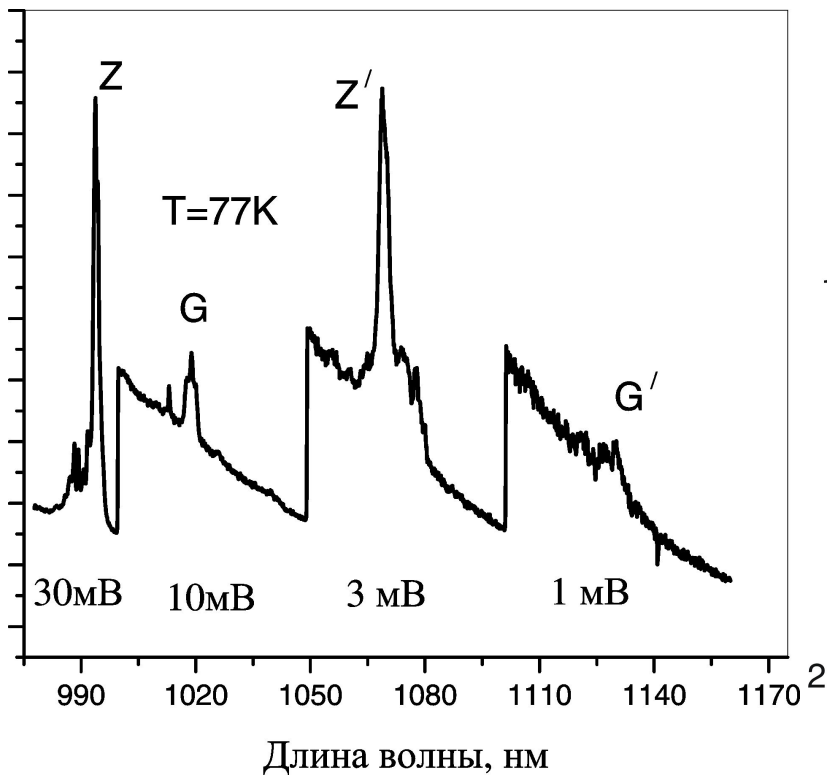
- Исследование методом фотолюминесценции структур ZnTe, ZnSe/ZnCdSe

# Глава 3. Полупроводниковые структуры на основе ZnTe



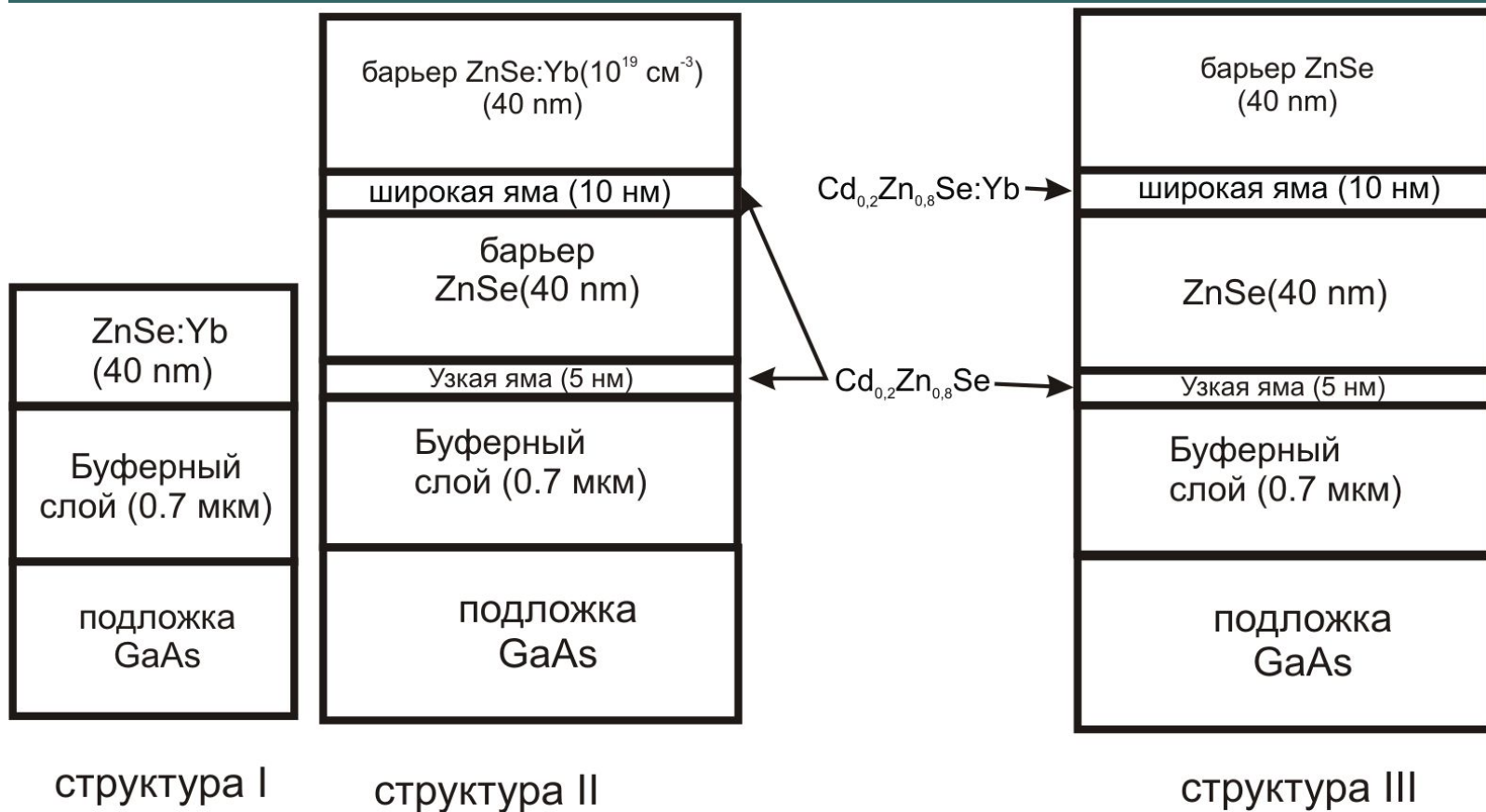
- Поперечный срез
  - Внешний вид ростовой шайбы
  - Характерные размеры образца
- Перед проведением имплантации половина образца маскируется фольгой и называется контрольной.

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



$Z'$  – фонное повторение полосы  $Z$

# Глава 3. Поперечное сечение структур ZnSe/ZnCdSe



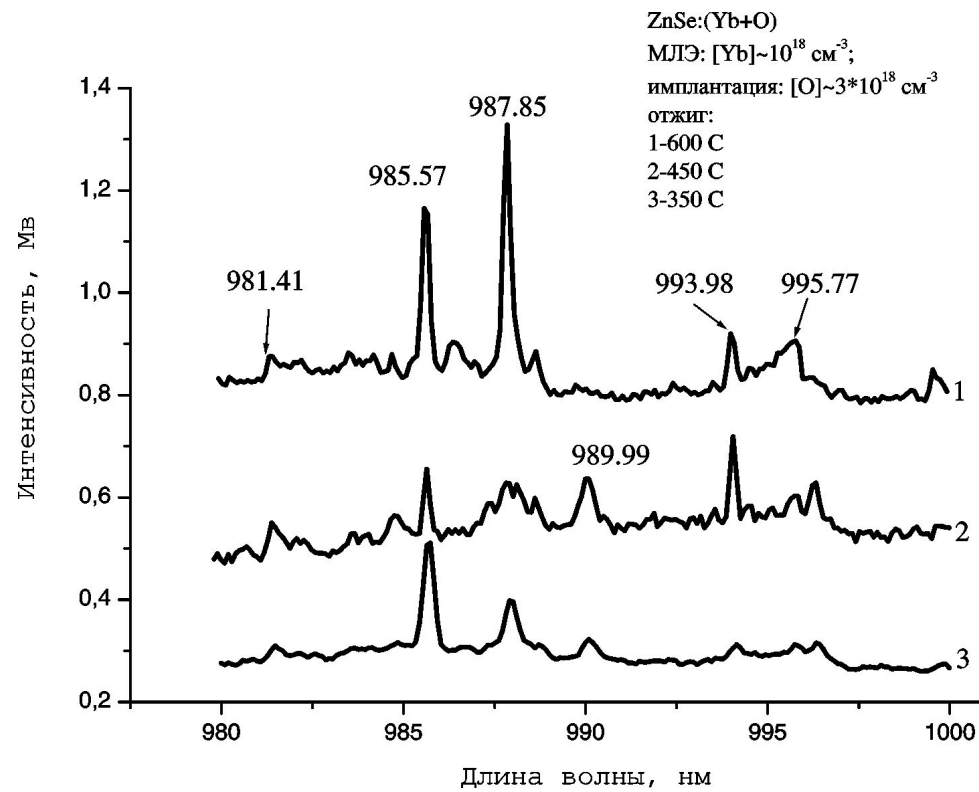
# Глава 3. Нахождение оптимальной температуры отжига.

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

структура I

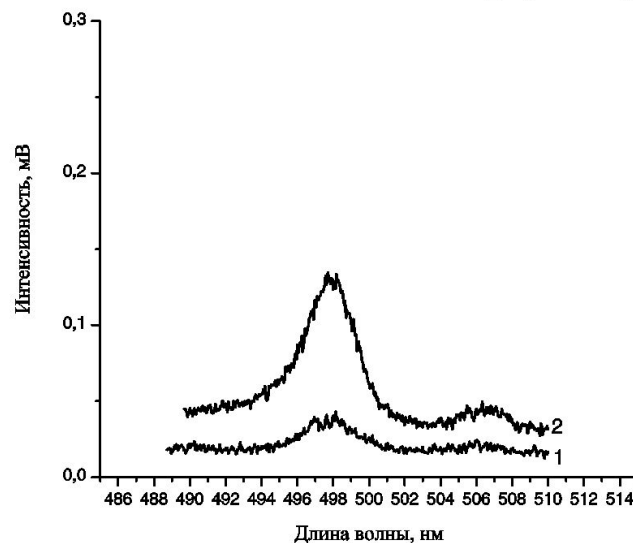
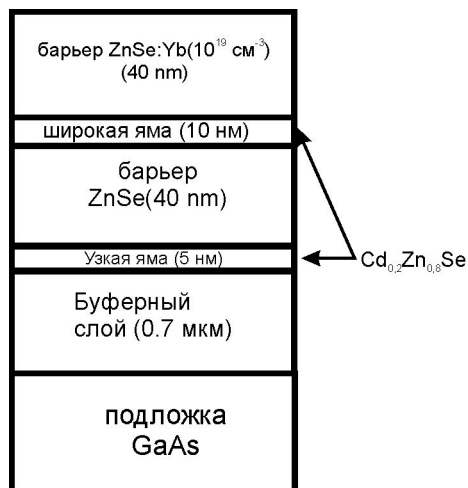
- Для образцов структуры I типа был найден оптимальный режим отжига.

- $T_{opt} = 450^{\circ}\text{C}$

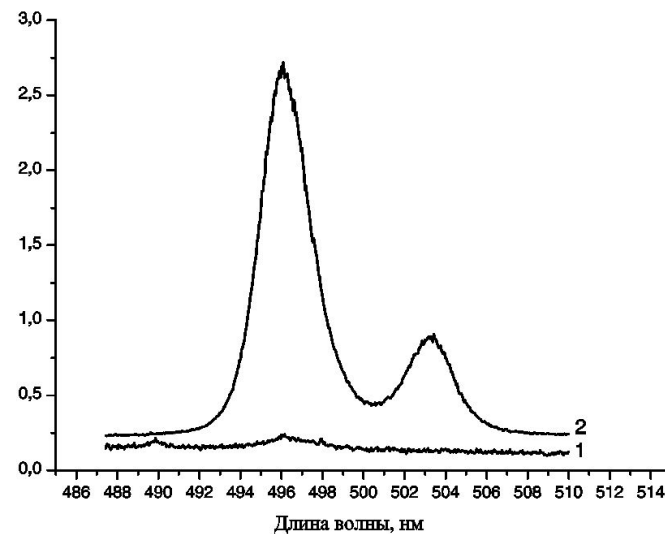


# Глава 3. Экситонное излучение сразу после проведения имплантации кислорода.

## Структура II типа



а)

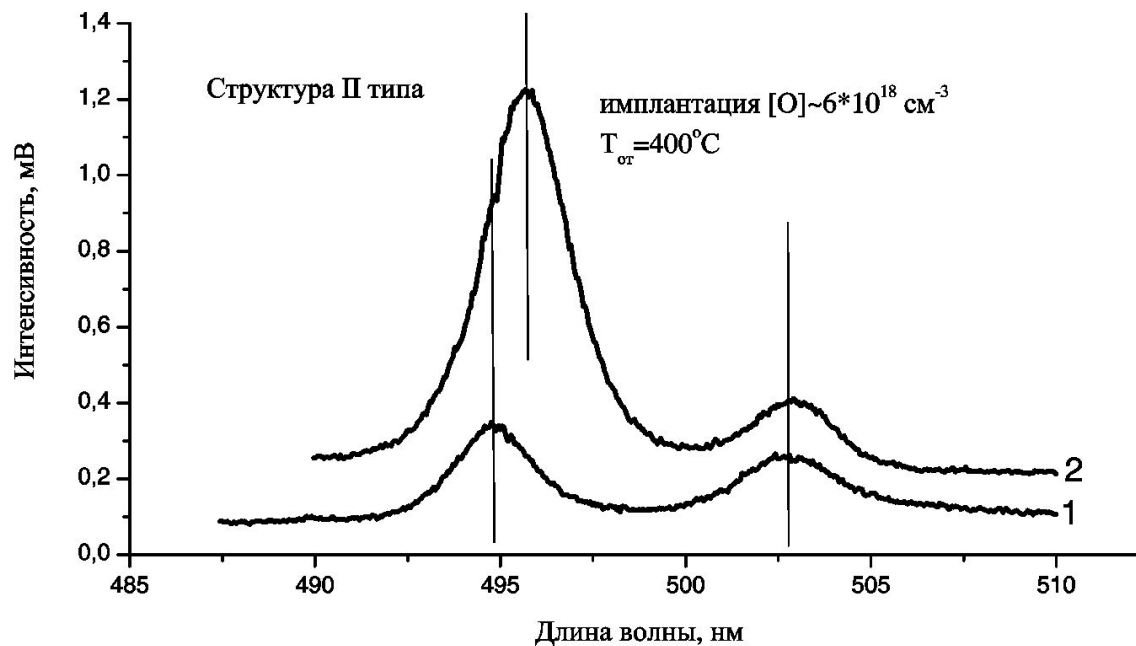


б)

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<sup>-3</sup> б -  $10^{18}$  см<sup>-3</sup>

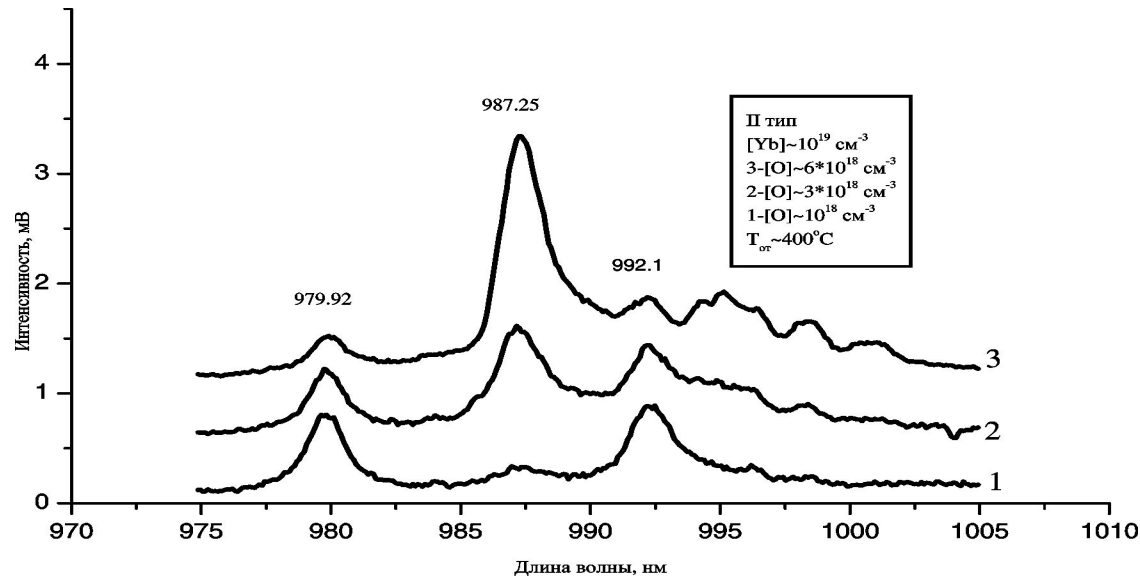


### Глава 3. Экситонное излучение после проведения отжига. Структура II типа.



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  $400^\circ\text{C}$  длительностью 5 мин.

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

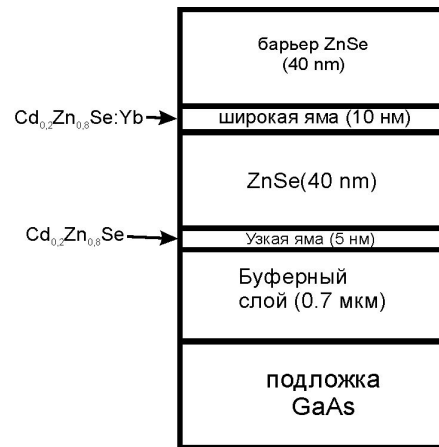


РЗ спектры для трех образцов структуры второго типа, имплантированных ионами кислорода до концентраций в максимуме его распределения  $10^{18} \text{ см}^{-3}$  (1),  $3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  (2) и  $6 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  (3), а затем прошедших термоотжиг при температуре  $400^\circ\text{C}$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

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

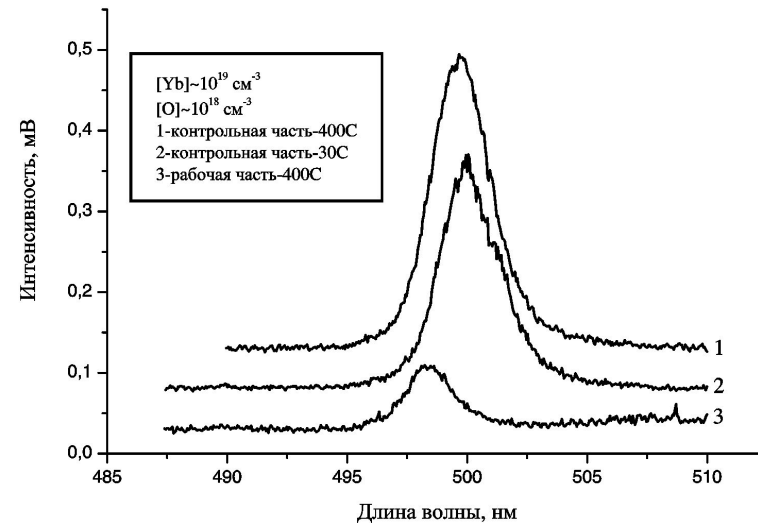
# Глава 3. Экситонное излучение.

## Структура III типа.



структура III

Структура III типа



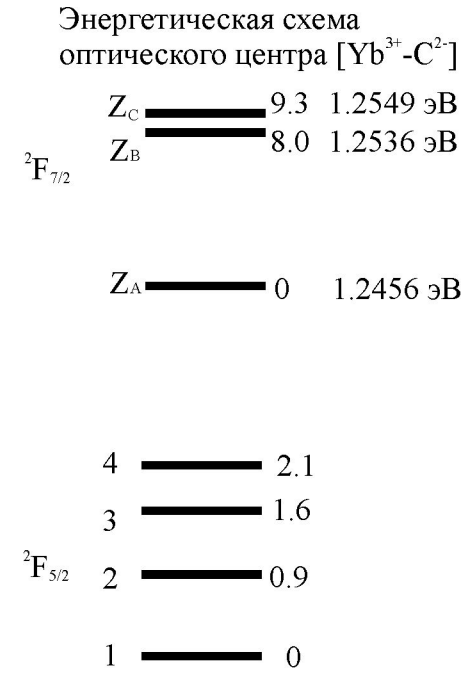
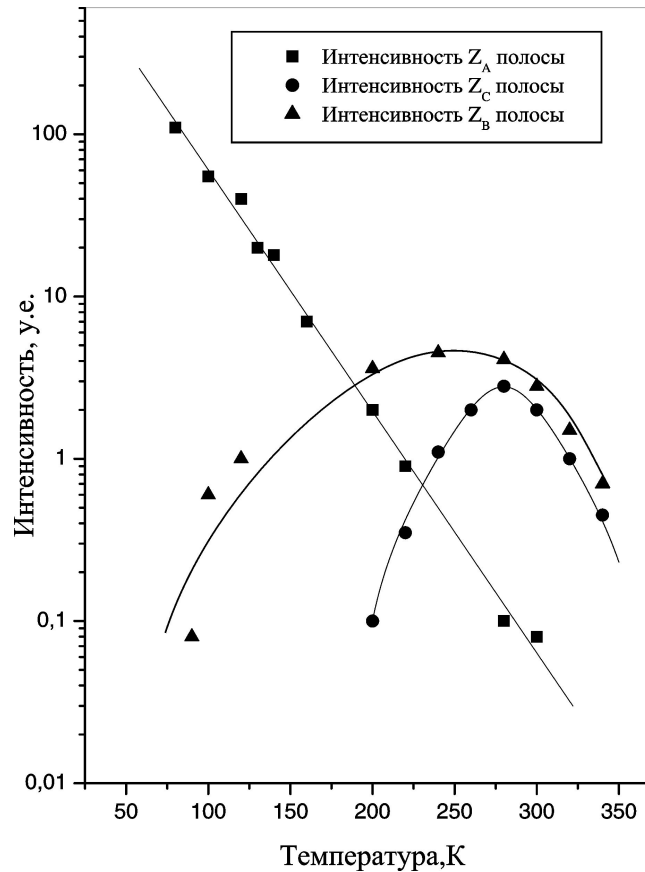
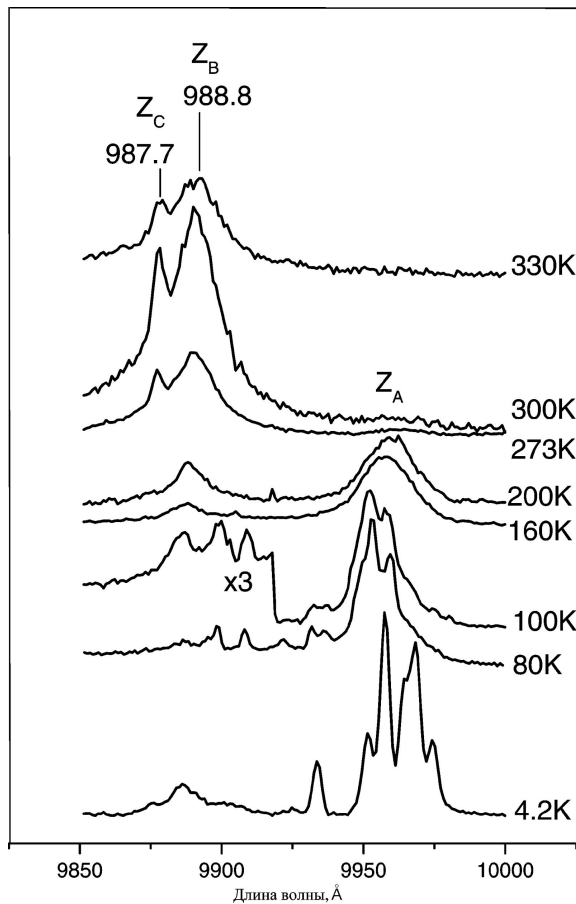
Спектры ФЛ в области излучения экситонов, локализованных в узкой квантовой яме, для образца структуры третьего типа. Образец содержал в широкой квантовой яме  $Yb$  с концентрацией  $10^{19} \text{ см}^{-3}$ . Укажем, что эта экситонная полоса на рабочей части была погашена имплантацией. 1 — спектр,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

# Глава 4

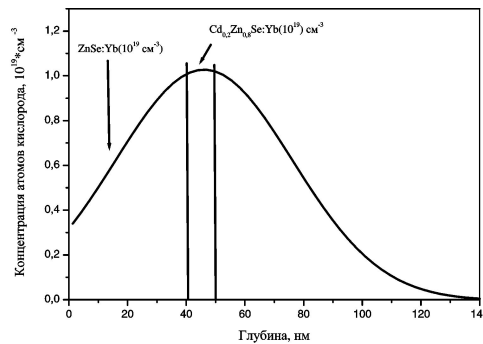
---

- 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.

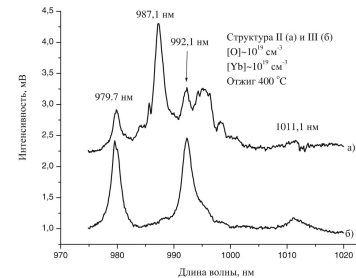
# Глава 4. Зависимость вида спектров характеристического излучения ионов иттербия в системе **ZnTe** от температуры образца во время измерения спектра.



# 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 абсцисс показаны границы слоев первого барьера и квантовой ямы.

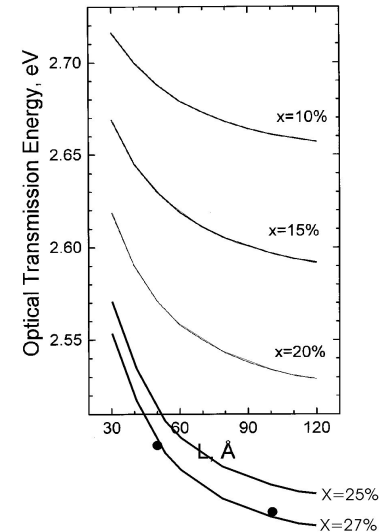
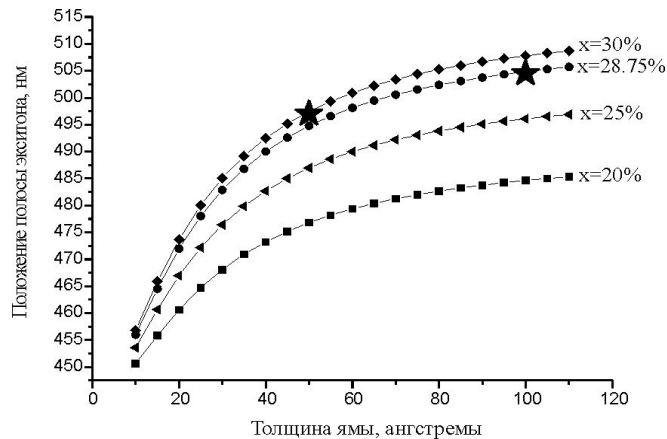


РЗ спектры образцов структуры II типа (а) и структуры III типа (б). Образец (а) содержал в барьере  $\text{ZnSe}$  атомы  $\text{Yb}$  с концентрацией  $10^{19} \text{ см}^{-3}$ . Образец (б) содержал  $\text{Yb}$  с концентрацией  $\sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$  в материале ямы. Образцы были имплантированы 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 Yb<sup>3+</sup>, 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  $10^{17} \text{ см}^{-3}$  до  $8 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  и 1:(5-6) при концентрациях иттербия порядка  $10^{19} \text{ см}^{-3}$ . Постимплантационный отжиг следует проводить при температуре  $T \approx 400\text{-}450^\circ\text{C}$ .
- В структуре ZnTe:(Yb+O) получена люминесценция центров на основе иттербия, наблюдаемая от 4К до температур порядка  $100^\circ\text{C}$  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»