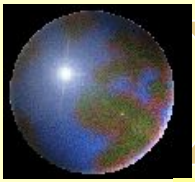




Молекулярно-лучевая эпитаксия и люминесценция GaN/AlN квантовых точек

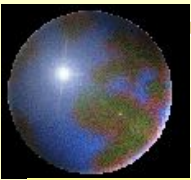
К.С. Журавлев

Институт Физики Полупроводников СО РАН,
Новосибирск, Россия



План выступления

- *Информация о лаборатории МЛЭ материалов типа A_3B_5*
- *МЛЭ GaN квантовых точек в матрице AlN*
- *Фотолюминесценция GaN/AlN КТ*
- *Заключение*

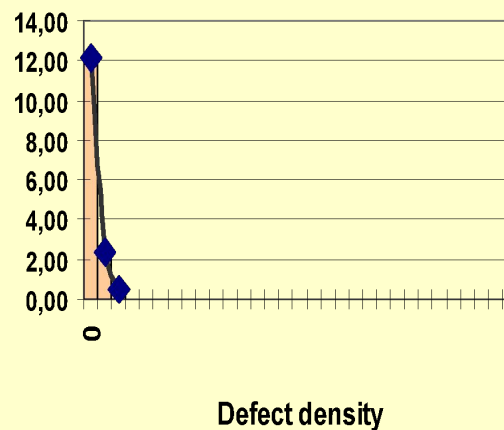
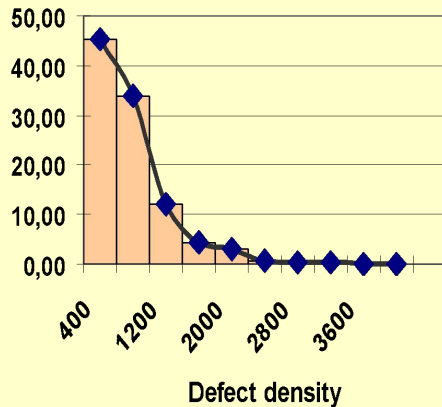
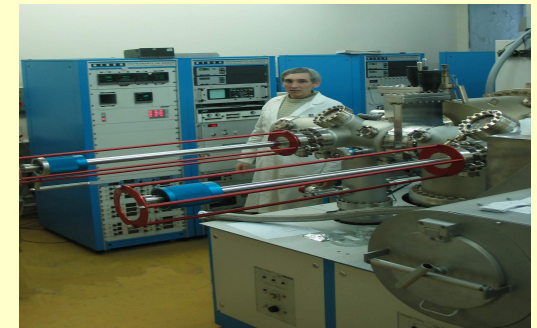
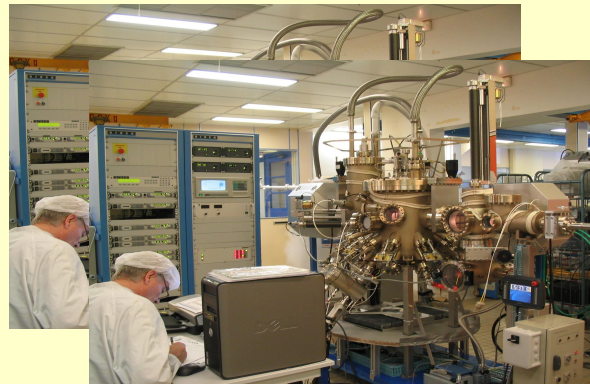


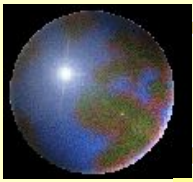
Лаборатория МЛЭ материалов типа A_3B_5

Riber-32P

Compact 21T

Riber-32P CBE



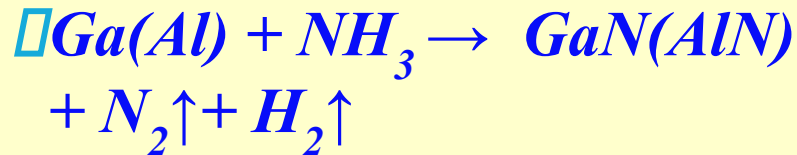


Методы эпитаксии III-нитридных гетероструктур

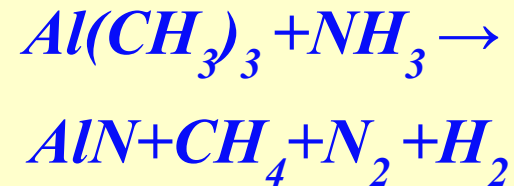
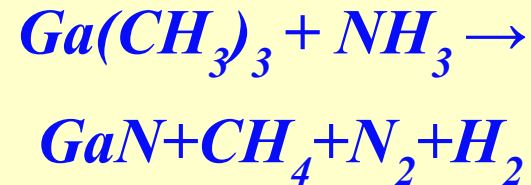
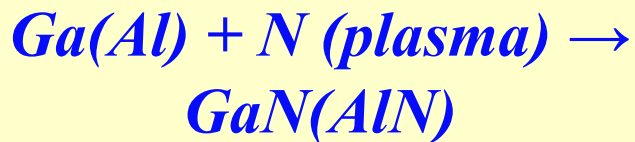
Молекулярно-лучевая
эпитаксия

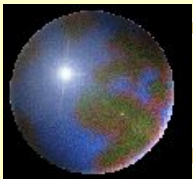
Газофазная эпитаксия

□ Аммиачная МЛЭ

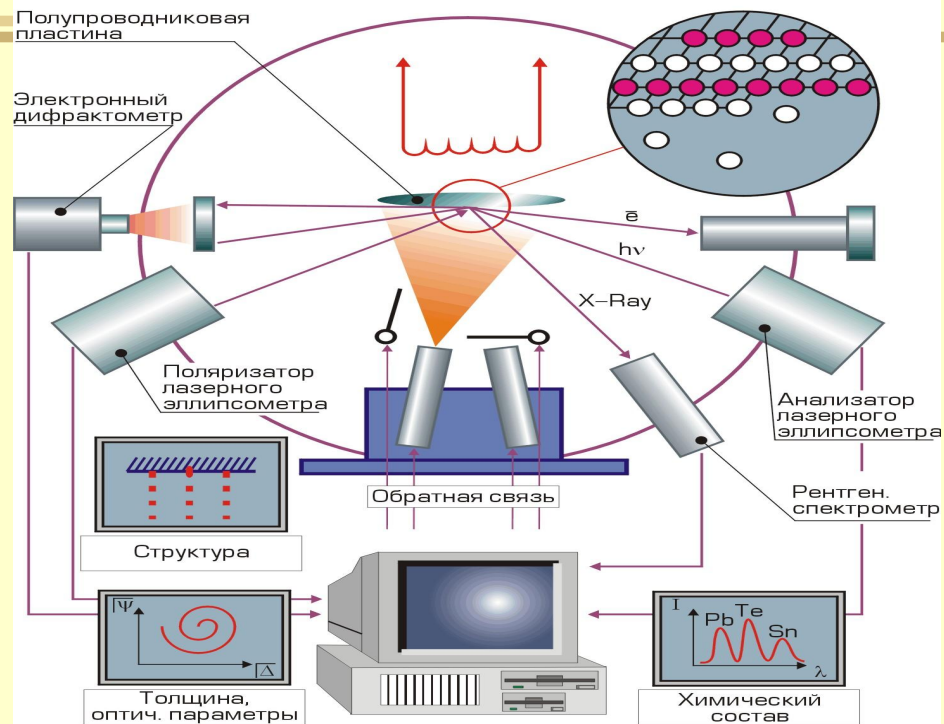


□ рч-МЛЭ



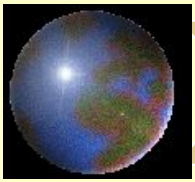


Молекулярно-лучевая эпитаксия



Достоинства МЛЭ технологии:

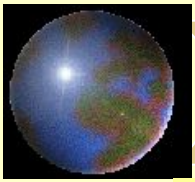
- низкая скорость роста слоев (1 мкм/час = 1 нм/сек),
- быстрая скорость управления потоками исходного вещества,
- *in situ* контроль ростового процесса.



Проблемы МЛЭ GaNAlGaN гетроструктур

✓ Отсутствие GaN подложки

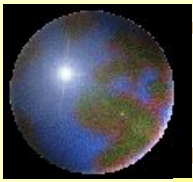
- ✓ Технология начала роста: полярность и морфология.
- ✓ Управление упругими напряжениями в гетроструктуре.
- ✓ Уменьшение концентрации дефектов и примесей.
- ✓ Получение требуемой морфологии поверхности и границ раздела.



Встроенное электрическое поле в вюрцитных GaN/AlN КТ

Optical properties of wurtzite GaN/AlN QDs are significantly affected by the presence of a strong built-in electric field

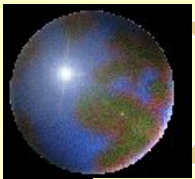
- *Origin of electric field: spontaneous polarization at the GaN/AlN interfaces and piezoelectric polarization of strained GaN*
- *Resulting electric field value: a few MV/cm*
- *Direction of electric field: vertical - along the (0001) growth axis*



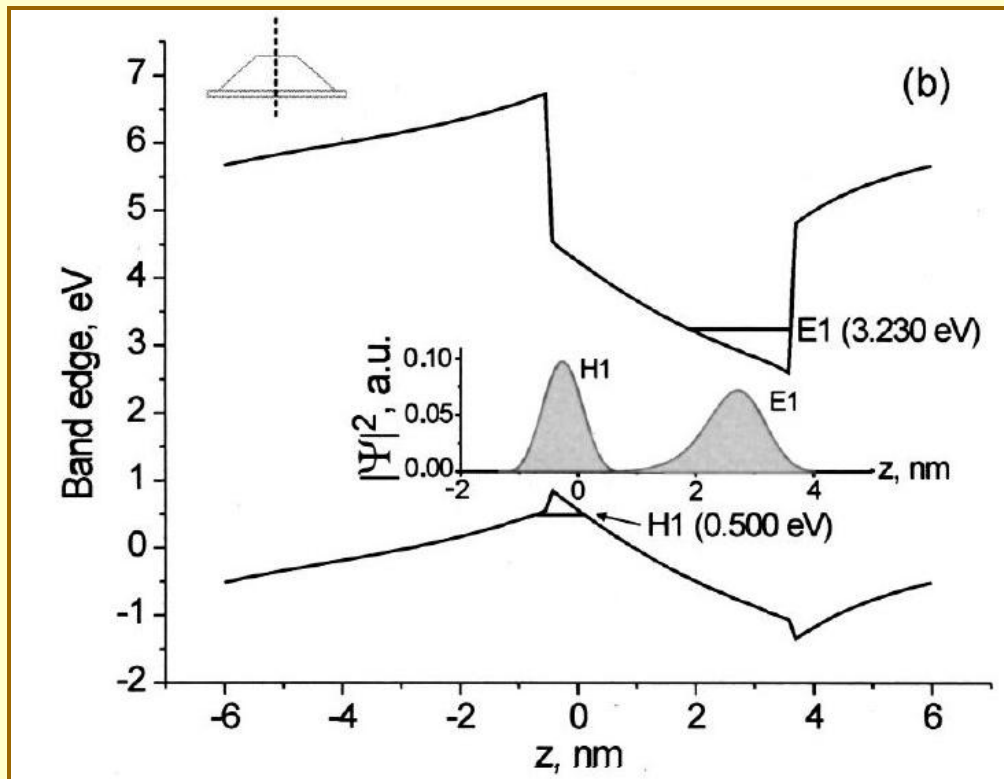
Эффекты встроенного электрического поля в GaN/AlN КТ

Presence of a strong built-in electric field in GaN/AlN QDs results in:

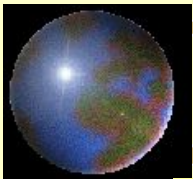
- *Quantum-confined Stark effect*
- *Exponential dependence of PL decay times on the QDs size*
- *Strong dependence of the PL peak energy on the excitation power as a consequence of the screening of electric field?*



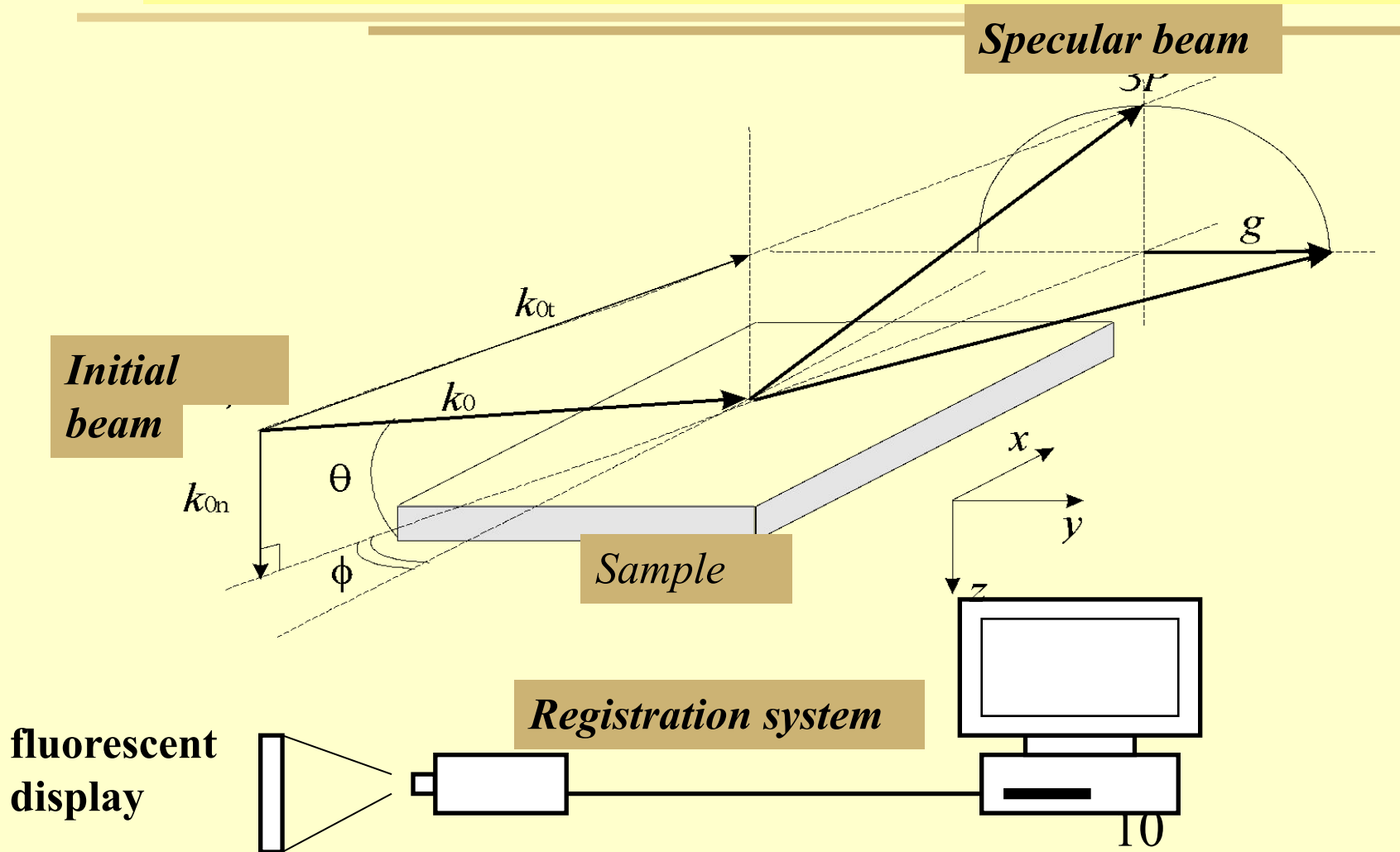
Энергетическая диаграмма GaN/AlN КТ

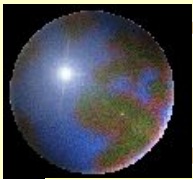


A.D. Andreev and E.P. O'Reilly, Appl. Phys. Lett., 79, 521 (2001)



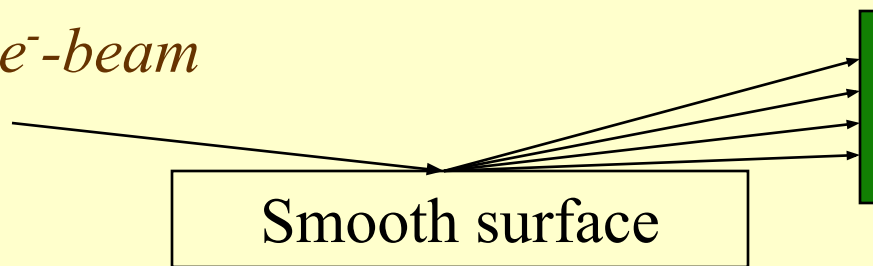
Дифракция быстрых электронов на отражение



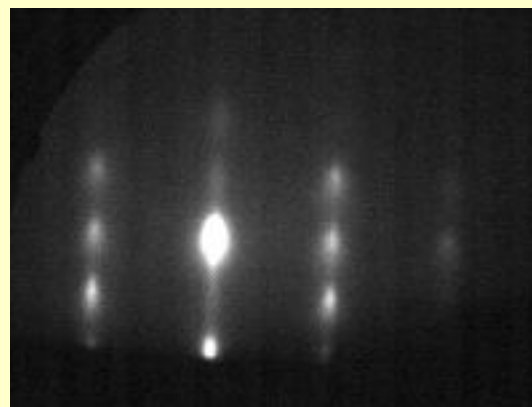
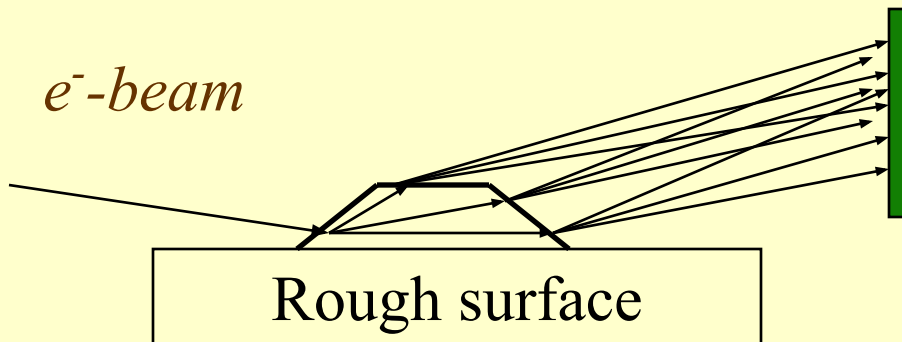


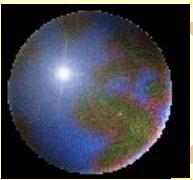
ДБЭО: 2D и 3D дифракционные картины

e⁻-beam



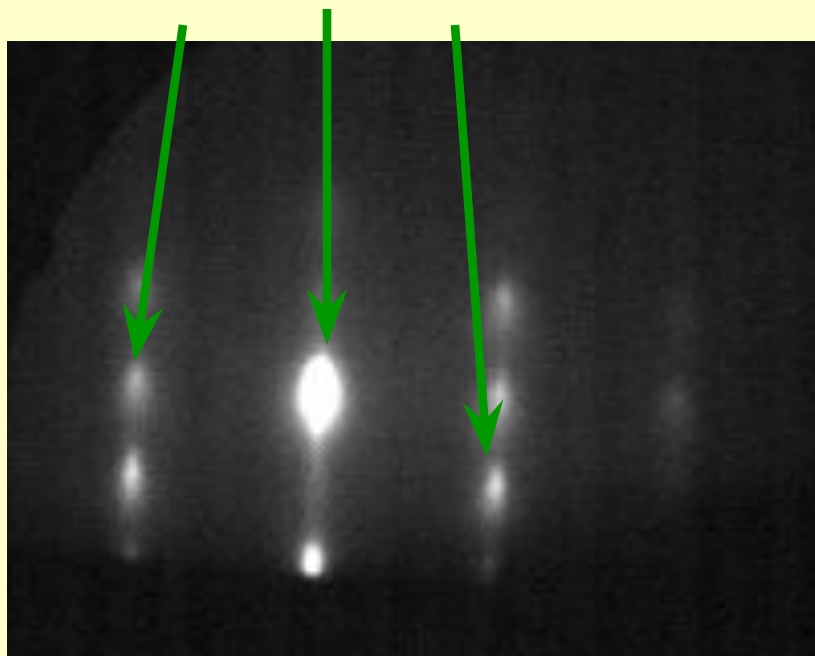
e⁻-beam





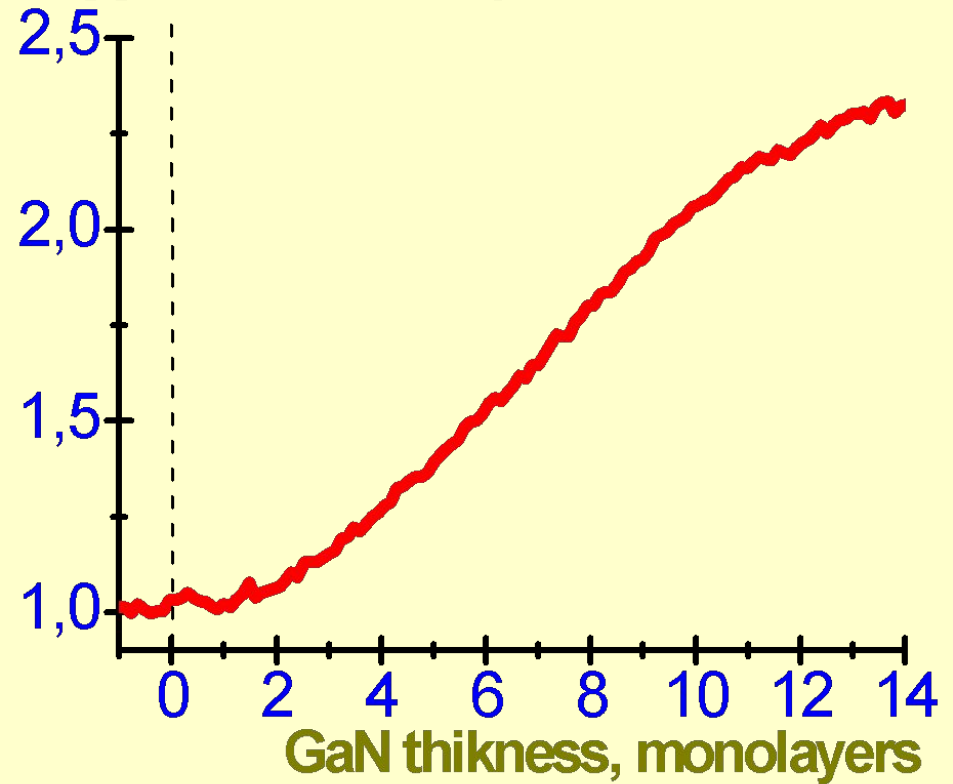
ДБЭО исследования

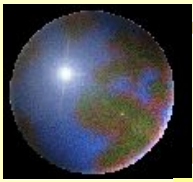
Bragg's spots



2D --> 3D transition

Bragg's spot intensity, a.u.



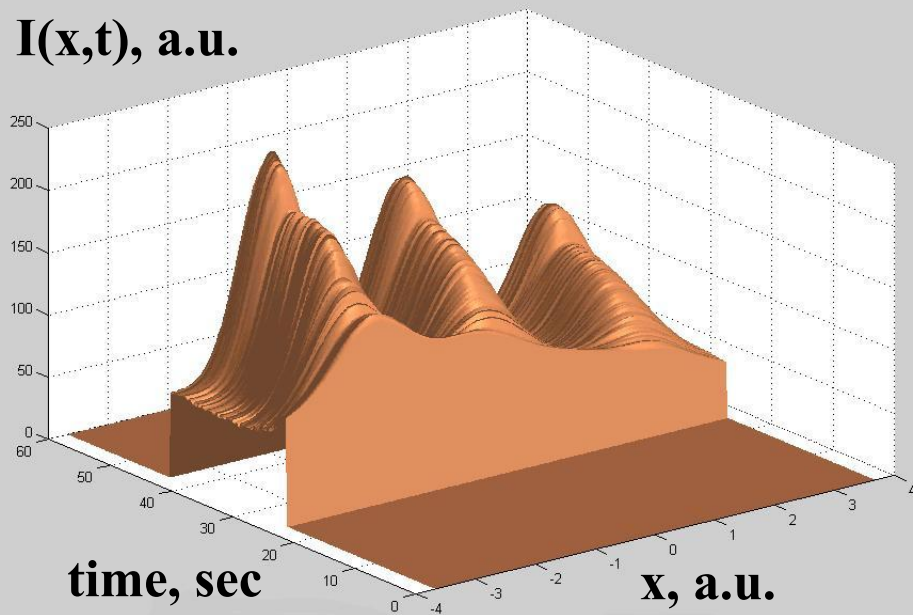


Анализ роста КТ с помощью ДБЭО

Reflexes intensity evolution

Spot's shape (Gauss function):

$I(x,t)$, a.u.

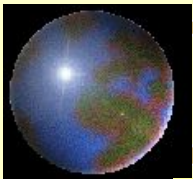


$$I(x) = \sum I_0 \cdot e^{-\sigma \cdot (x-x_0)^2}$$

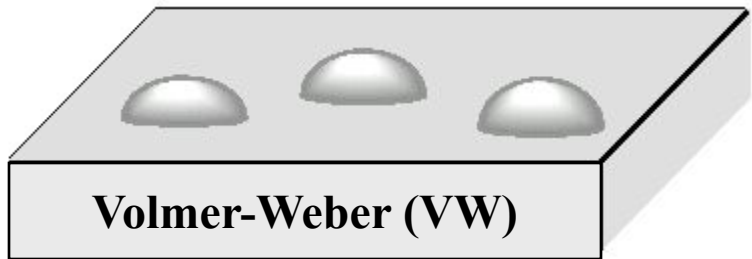
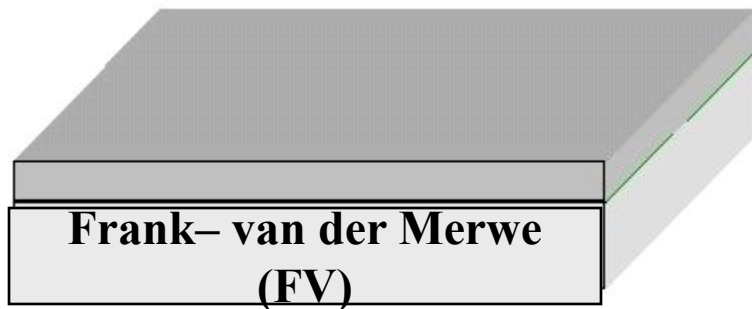
□ $I_0(t)$ – GaN islands density

□ $\sigma(t)$ – effective average dimension of GaN islands

□ $x_0(t)$ – reflex position, strain



Механизмы эпитаксиального роста



- Frank–van der Merwe (FV)

$$E_{\text{layer}} + E_{\text{in}} + E_{\text{el}} < E_{\text{sub}}$$

- Volmer-Weber (VW) E_{layer}
 $+ E_{\text{in}} + E_{\text{el}} > E_{\text{sub}}$

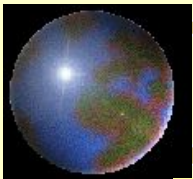
- Stranski- Krastanov (SK)

$$E_{\text{layer}} + E_{\text{in}} + E_{\text{el}} < E_{\text{sub}} \quad d < d_c$$

$$E_{\text{layer}} + E_{\text{in}} + E_{\text{el}} > E_{\text{sub}} \quad d > d_c$$

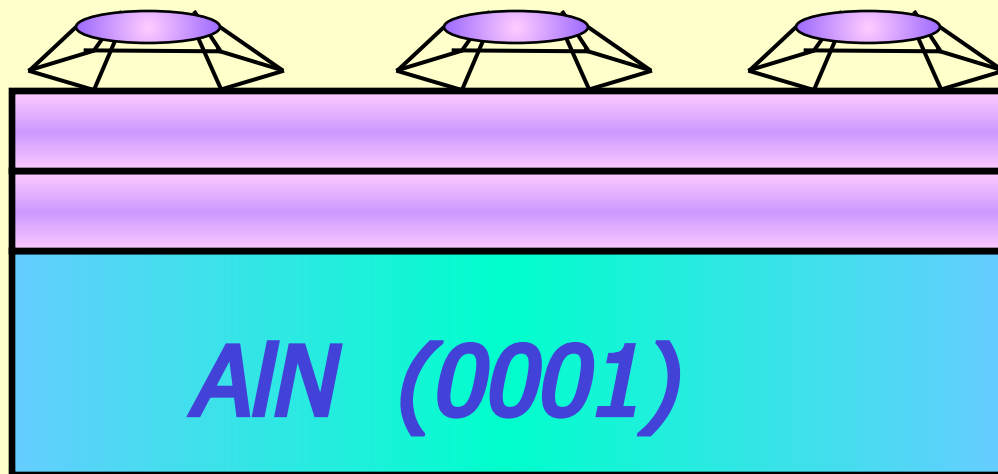
E_{layer} , E_{in} , E_{sub} - surface energies

E_{el} – elastic energy



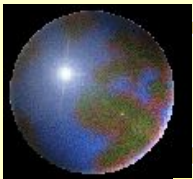
КТ, выращенные по методу Странского-Крастанова

GaN islands (self-organized
quantum dots)

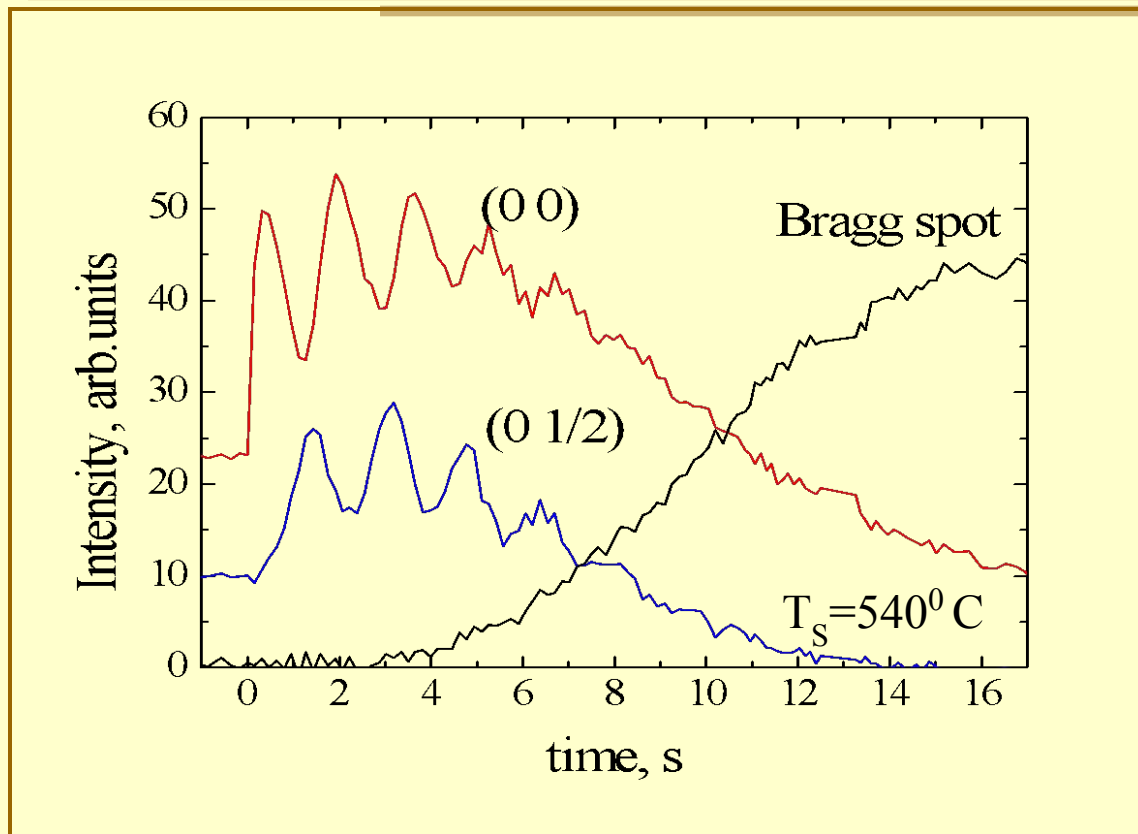


GaN wetting layer
(*critical thickness*
 $d \approx 2.5 \text{ ML}$)

AlN bufer layer



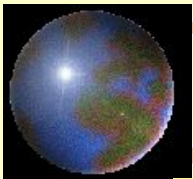
ДБЭО контроль моды роста



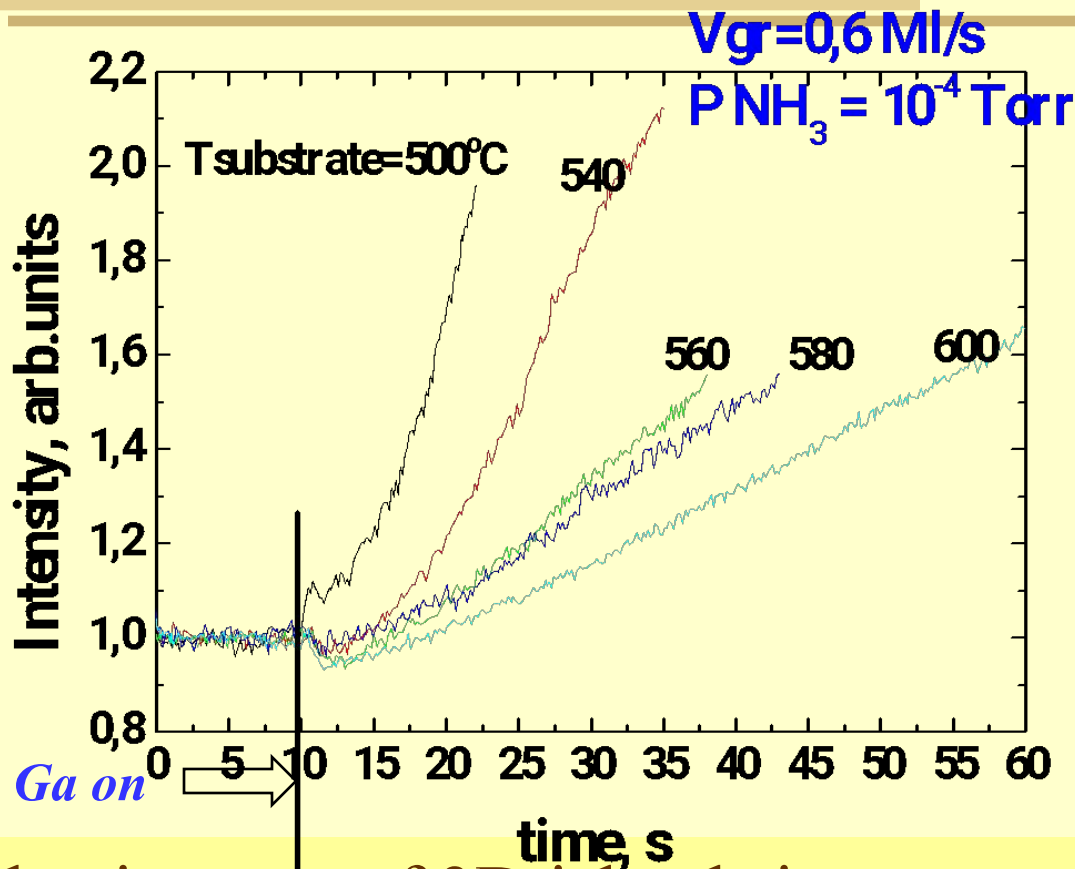
Intensity of 2D (0 0) (0 1/2) and 3D (Bragg Spot) reflexes

- Coexistence of 2D and 3D growth mode
- 3D nucleation without wetting layer

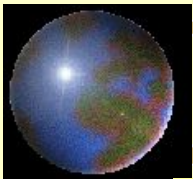
MBE growth of QDs without 2D \Rightarrow 3D transition



Кинетика роста GaN островков на поверхности AlN

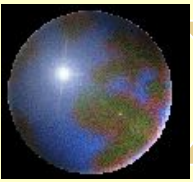


Nucleation rate of 3D islands increases with substrate temperature increasing

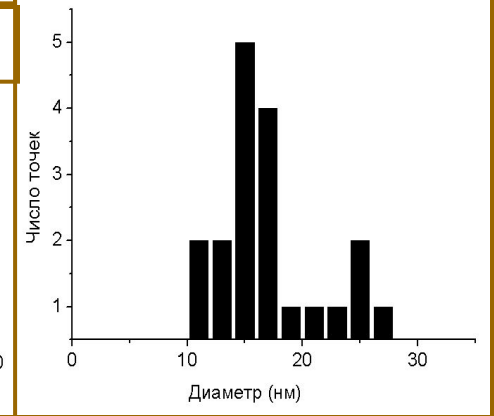
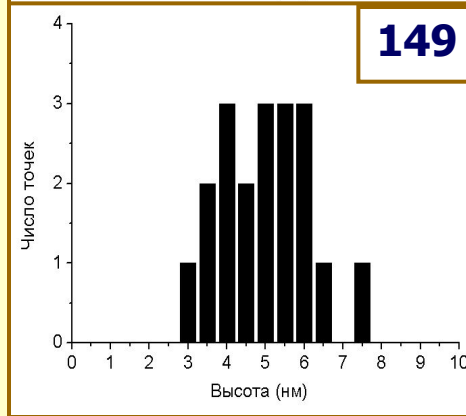
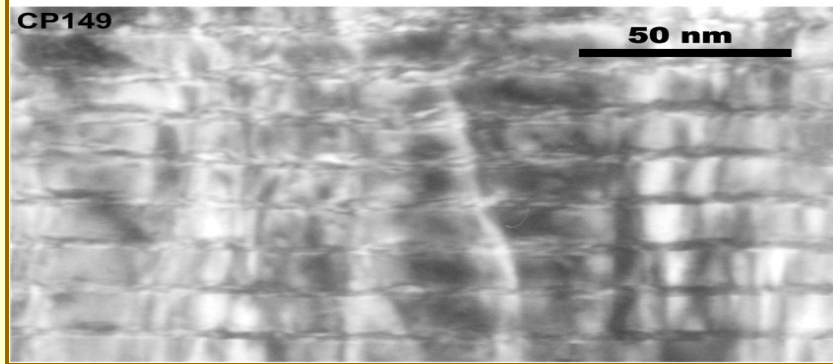
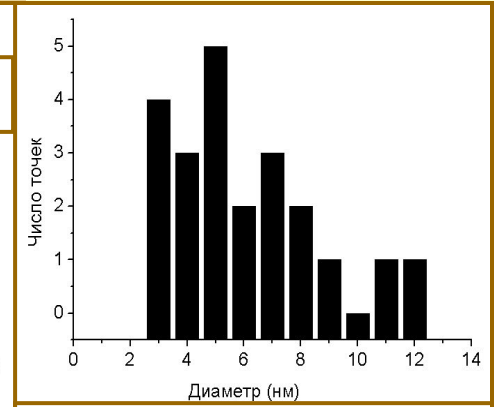
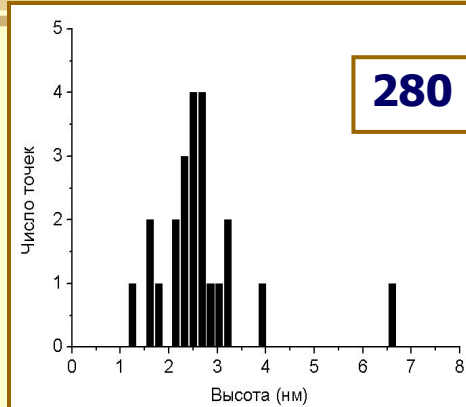
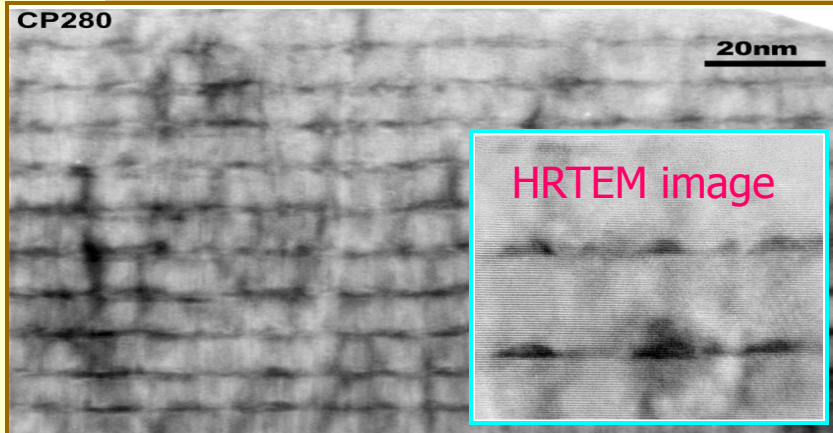


Условия роста структур с квантовыми точками GaN в AlN

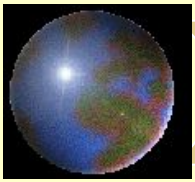
№ образца	Температура роста GaN, °C	Номинальное количество осажденного GaN, монослоев	Эквивалентное давление потока NH ₃ , Торр	Эквивалентное давление потока Ga, Торр	Количество слоев КТ
149	900	7.5	$6.5 \cdot 10^{-6}$	$1.3 \cdot 10^{-6}$	10
280	500	5	$2 \cdot 10^{-6}$	$9 \cdot 10^{-7}$	15
391	610	5	10^{-4}	$5.4 \cdot 10^{-7}$	1
415	540	4	10^{-4}	$5.4 \cdot 10^{-7}$	1
416	540	2	10^{-4}	$5.4 \cdot 10^{-7}$	1



Электронная микроскопия КТ

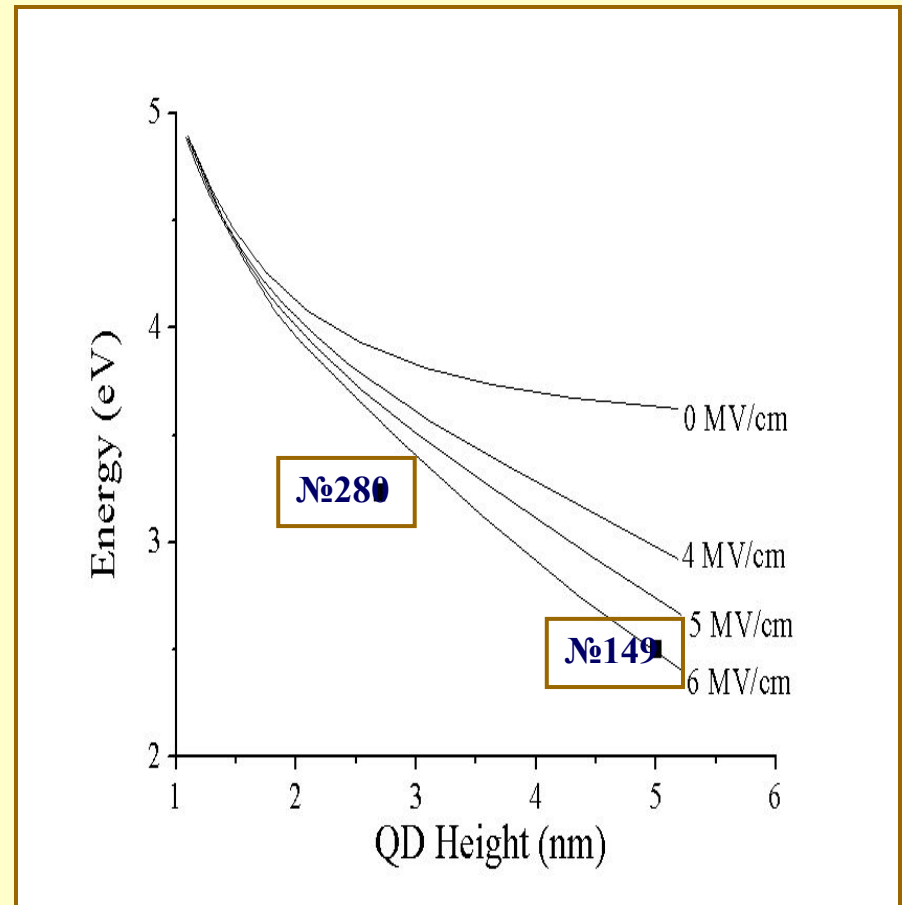
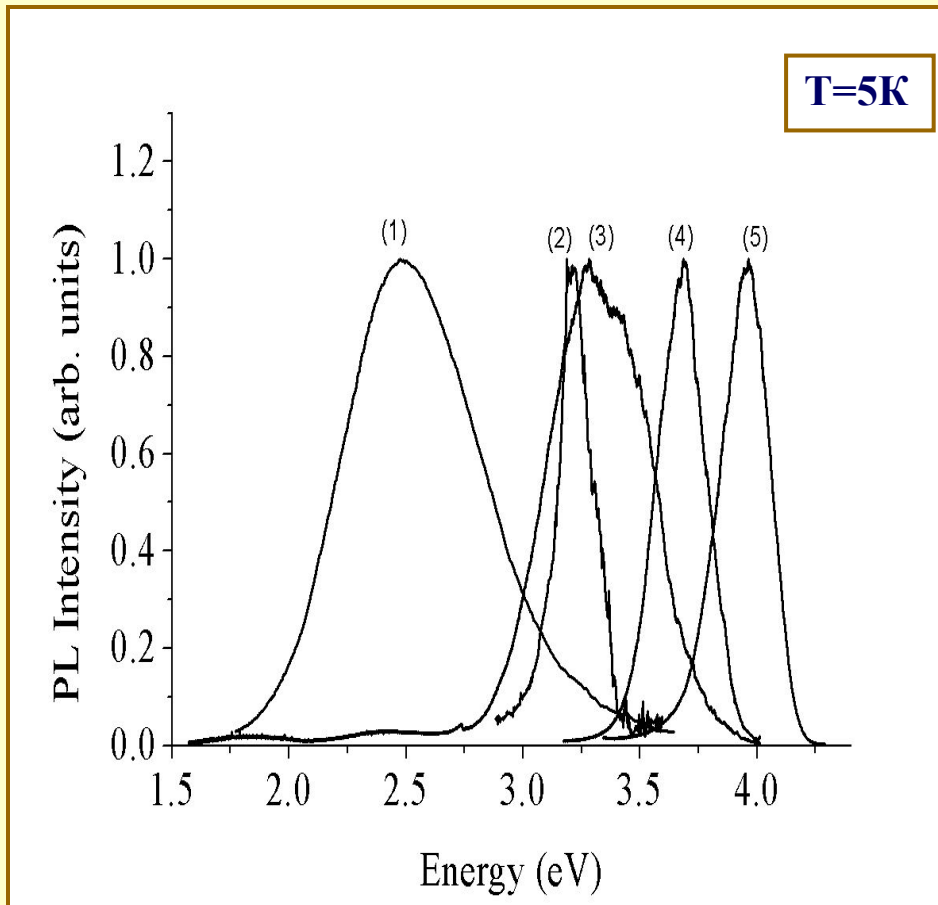


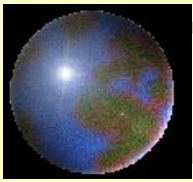
- Typical QDs density was in a range of $10^{10} - 10^{11} \text{ cm}^{-2}$.
- Height of QDs was in a range of 2.0-5.0 nm.



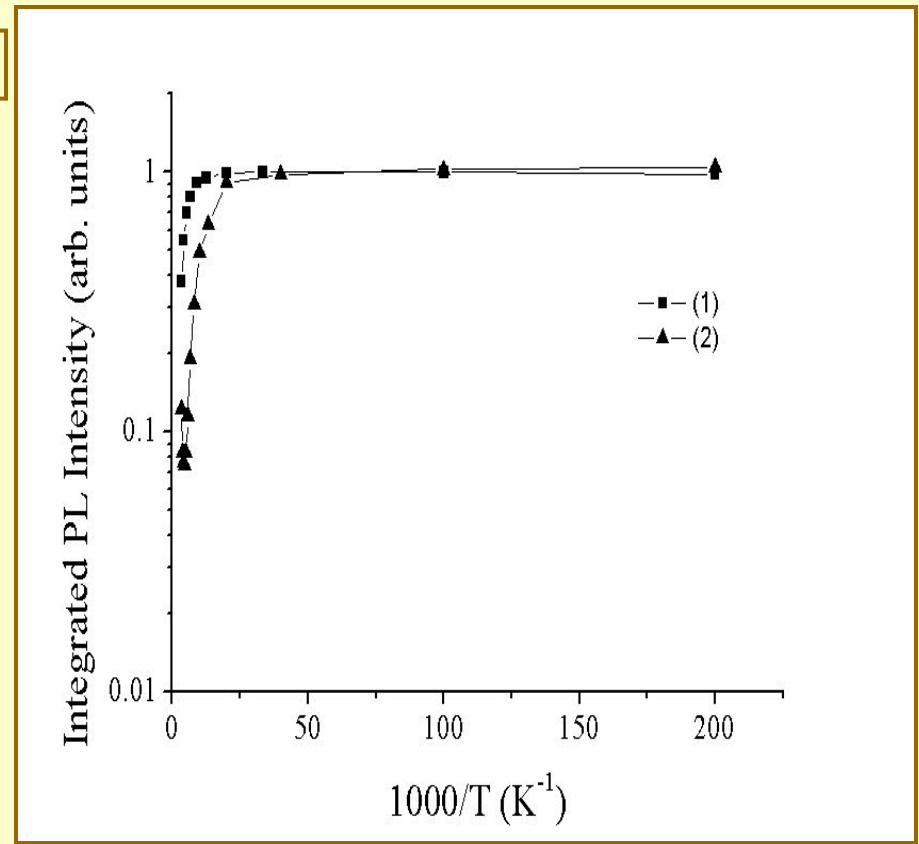
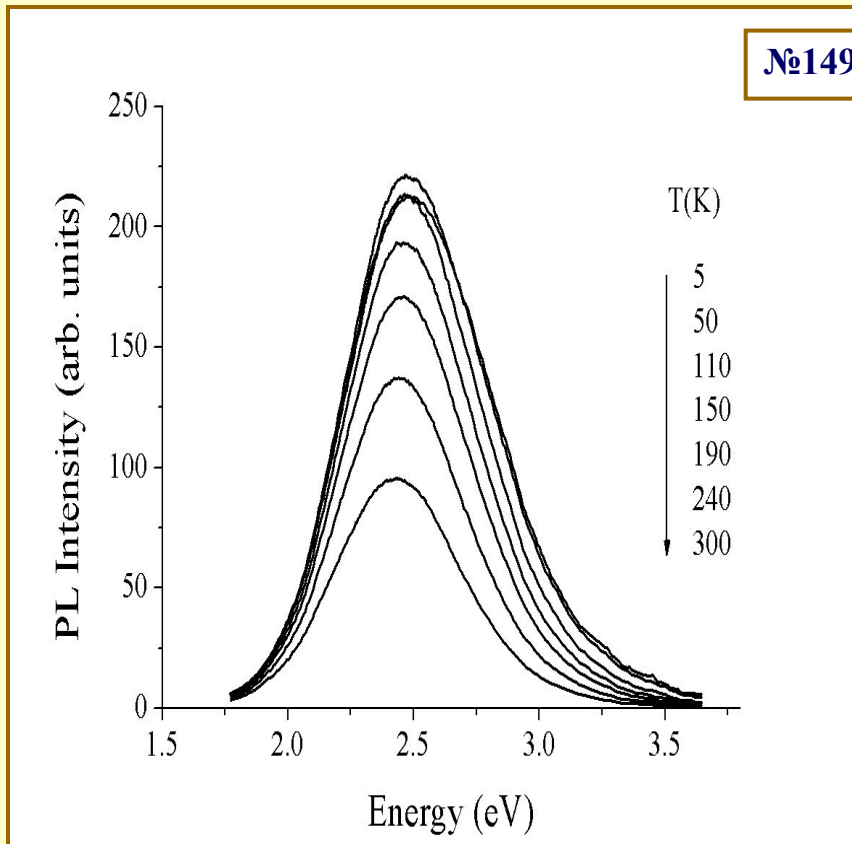
Спектры фотолюминесценции КТ

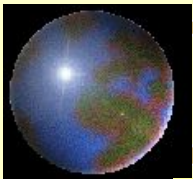
Зависимость энергии максимума ФЛ от средней высоты КТ



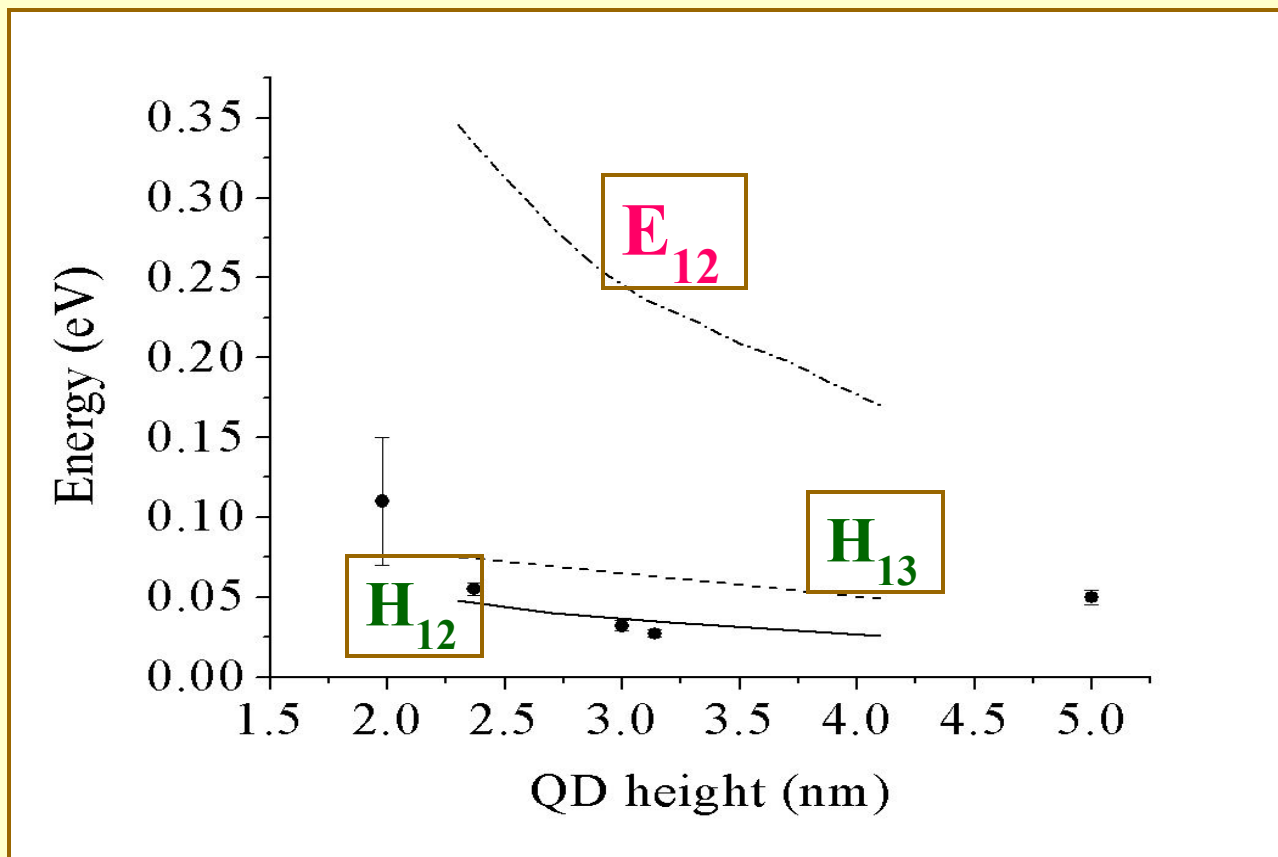


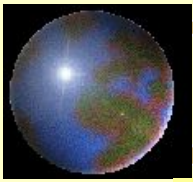
Безызлучательная рекомбинация в GaN/AlN КТ





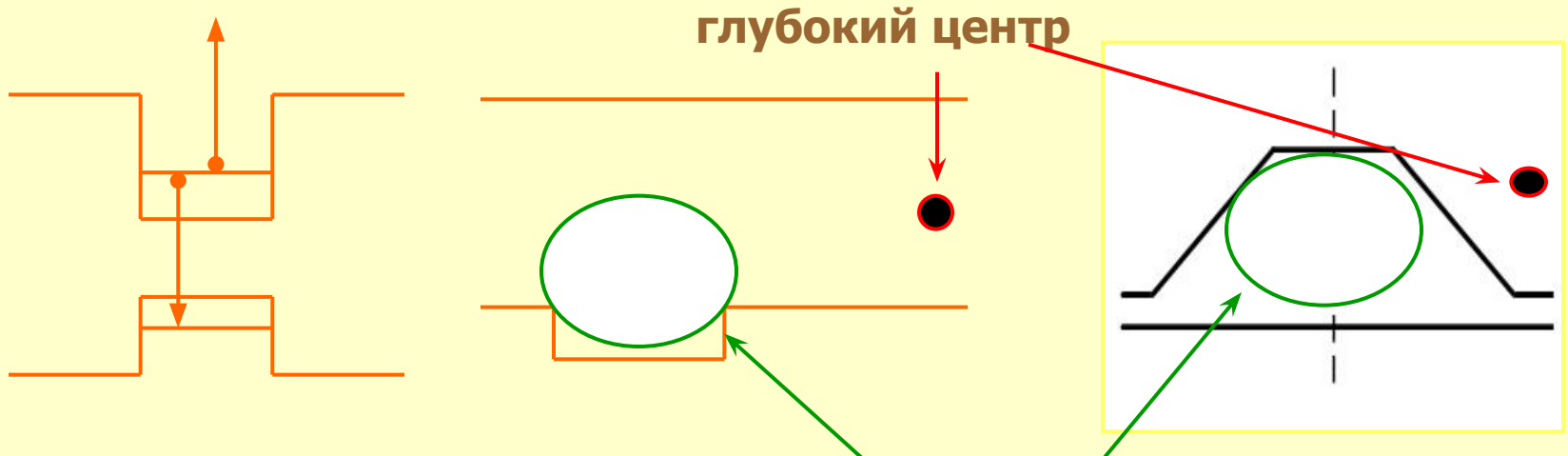
Зависимость энергии активации тушения ФЛ от средней высоты КТ

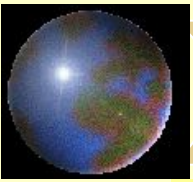




Возможные механизмы температурного тушения ФЛ КТ

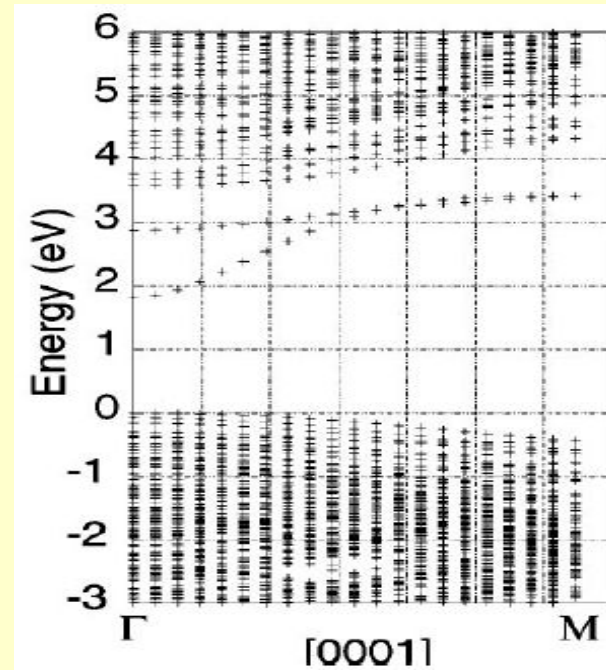
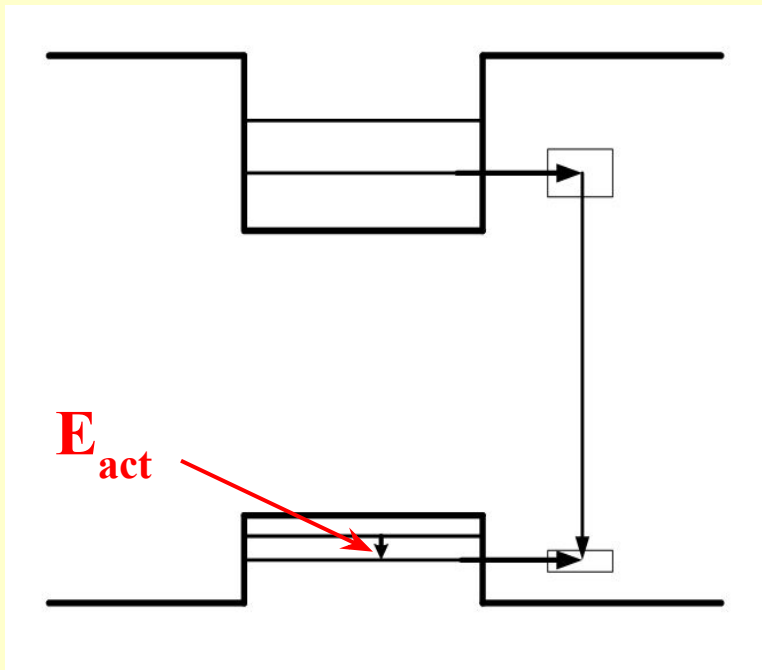
- Оже-рекомбинация
- Рекомбинация через глубокие центры
 - внутри квантовых точек
 - в матрице

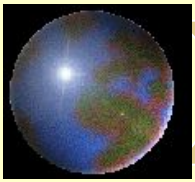




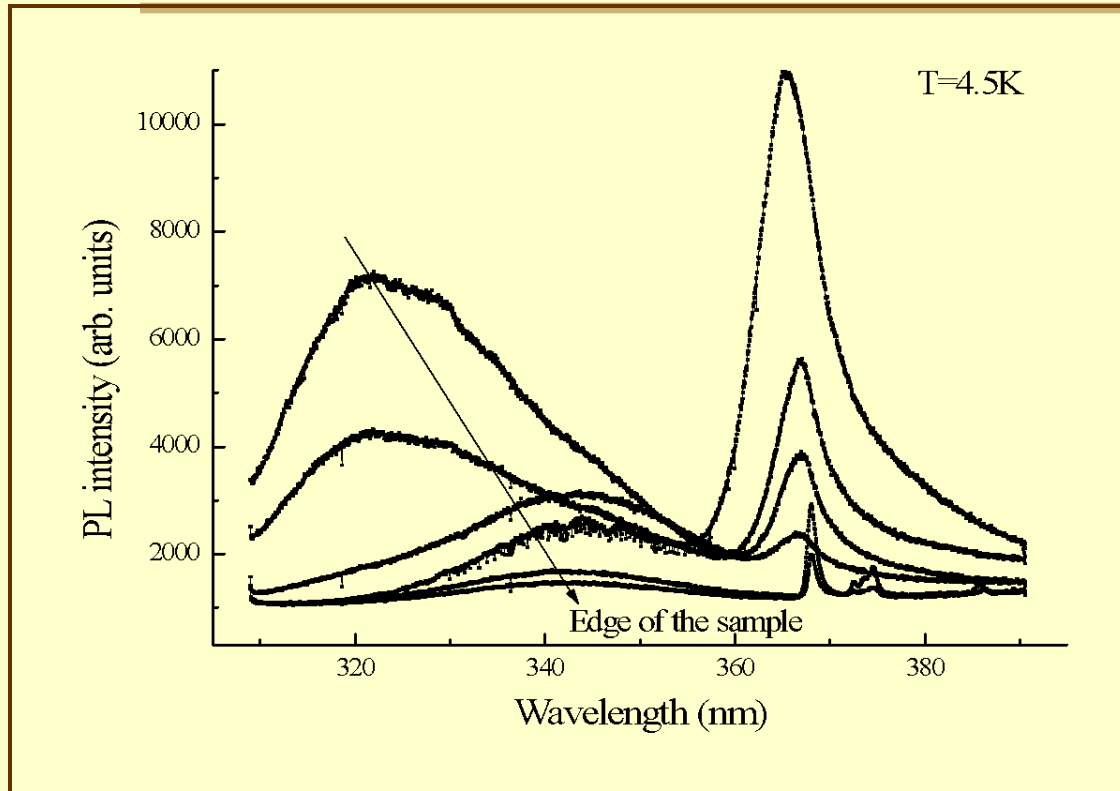
Термически активируемый захват на уровни дефектов, локализованных в окрестности КТ

Спектр дислокаций в AlN

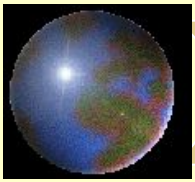




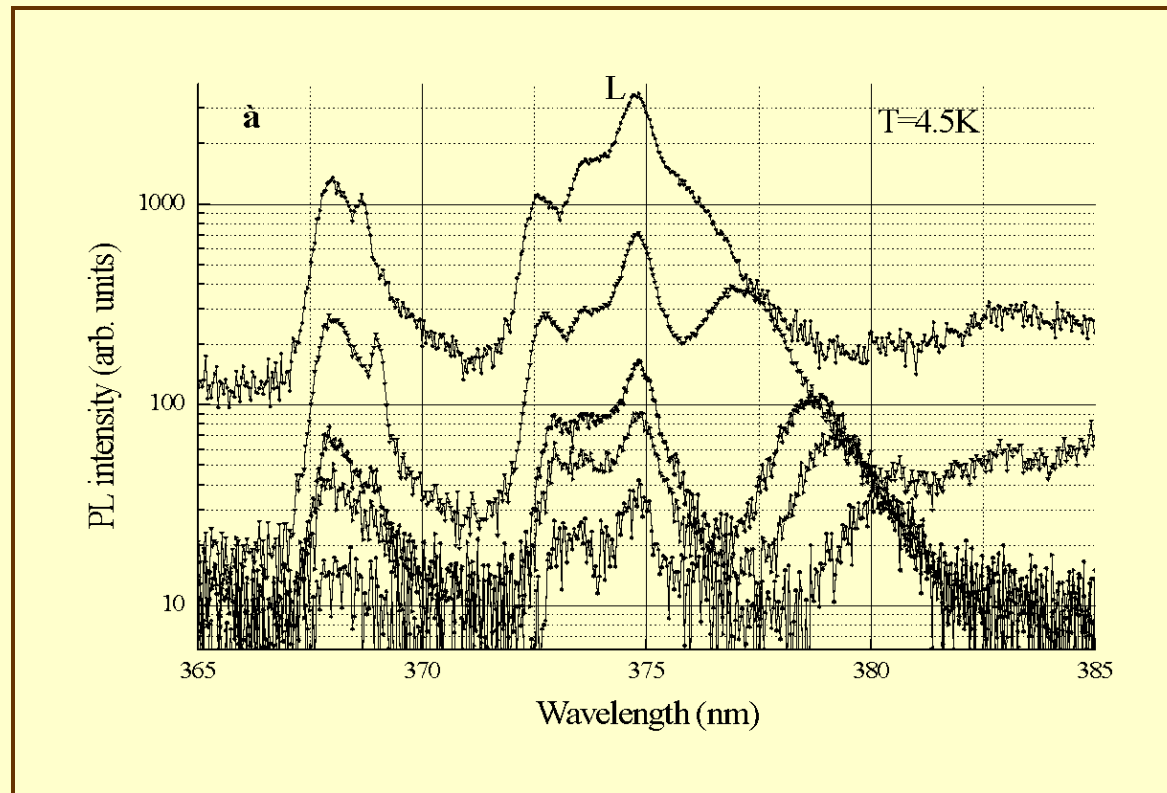
Микрофотолюминесценция GaN/AlN КТ

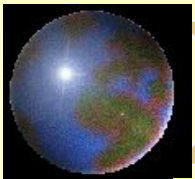


Fourth harmonic of a *cw* Nd:Vanadate laser, $\lambda = 266 \text{ nm}$ ($\hbar\omega = 4.66 \text{ eV}$).
The laser spot was about $1.5 \mu\text{m}$ in diameter .

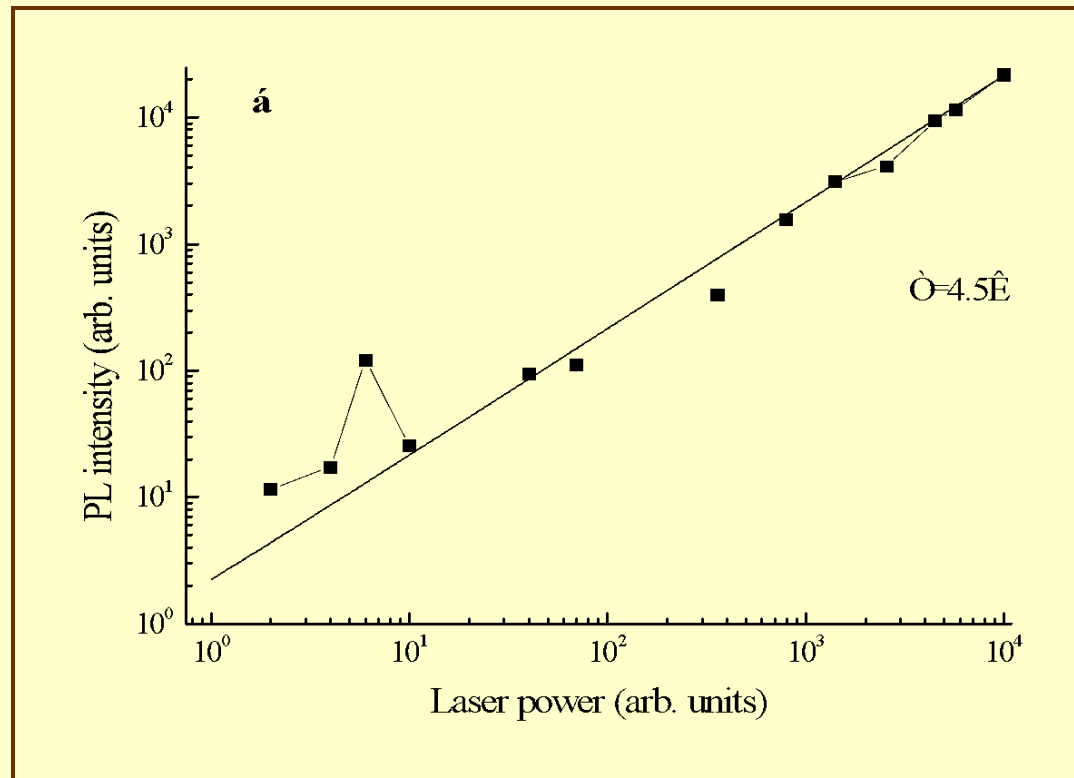


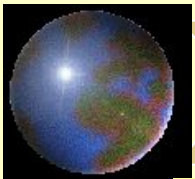
Микро-ФЛ GaN/AlN КТ при различной мощности возбуждения



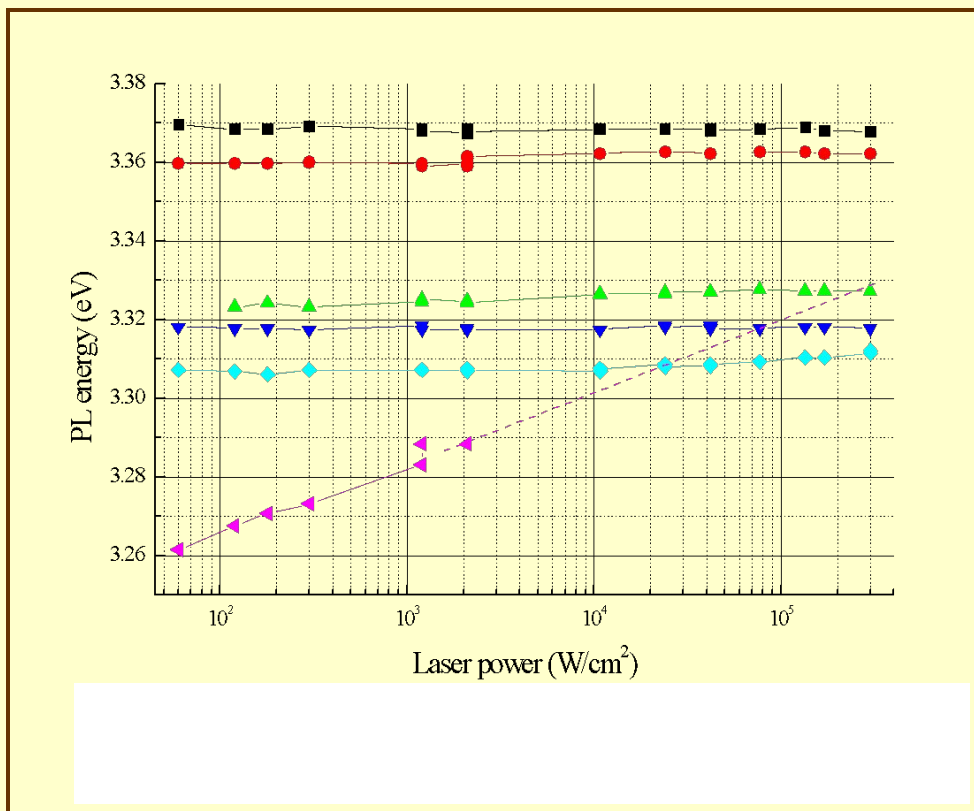


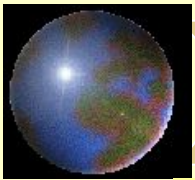
Зависимость интенсивности ФЛО от мощности возбуждения





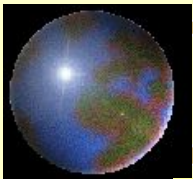
Зависимость энергии максимума полос ФЛ от мощности возбуждения



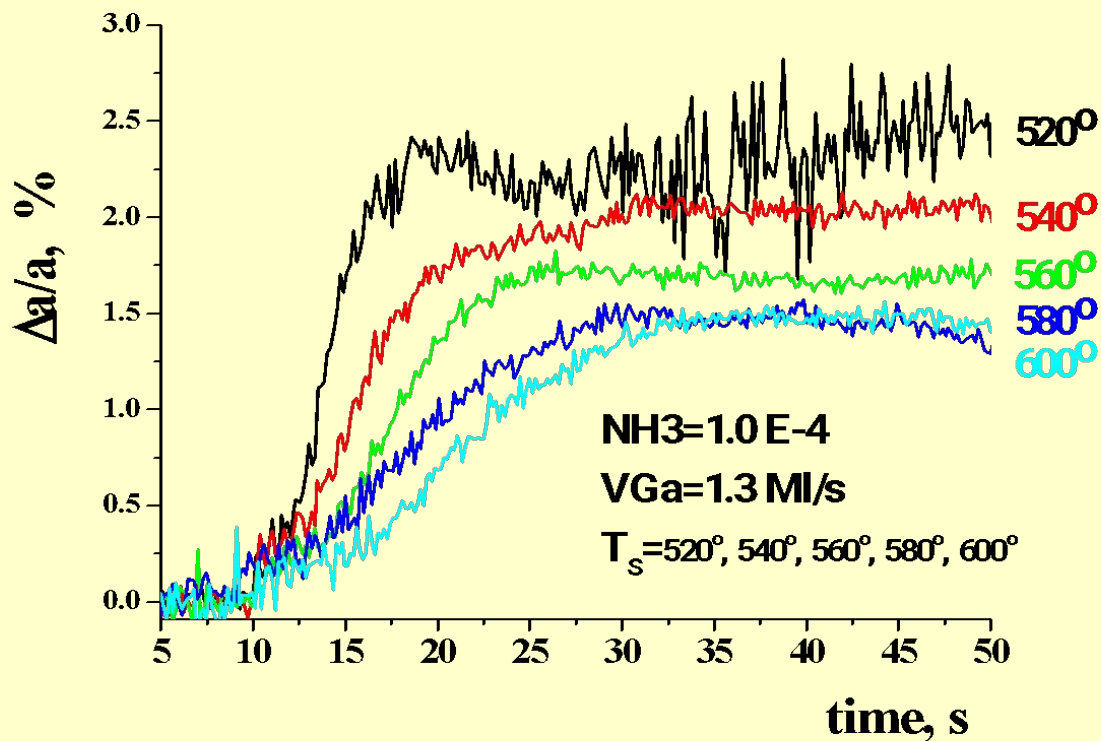


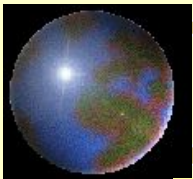
Причины независимости положения полос ФЛ от мощности возбуждения

- ✓ Small number of carriers in single QD: ≤ 1 e-h pair.
- ✓ The internal electric field in the explored structures is small in comparison with the value deduced from the piezoelectric constants and the spontaneous polarization.
- ✓ Small shift of particular PL bands can be due to recharging of defects located at distance of a few nm from QD.



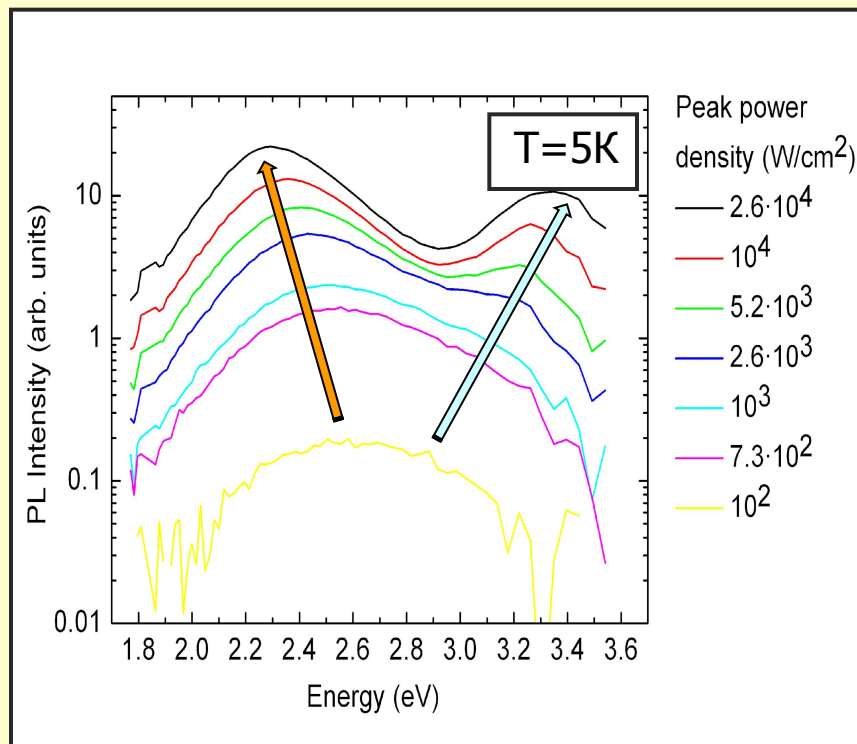
Изменение параметров решетки GaN КТ по данным ДБЭО



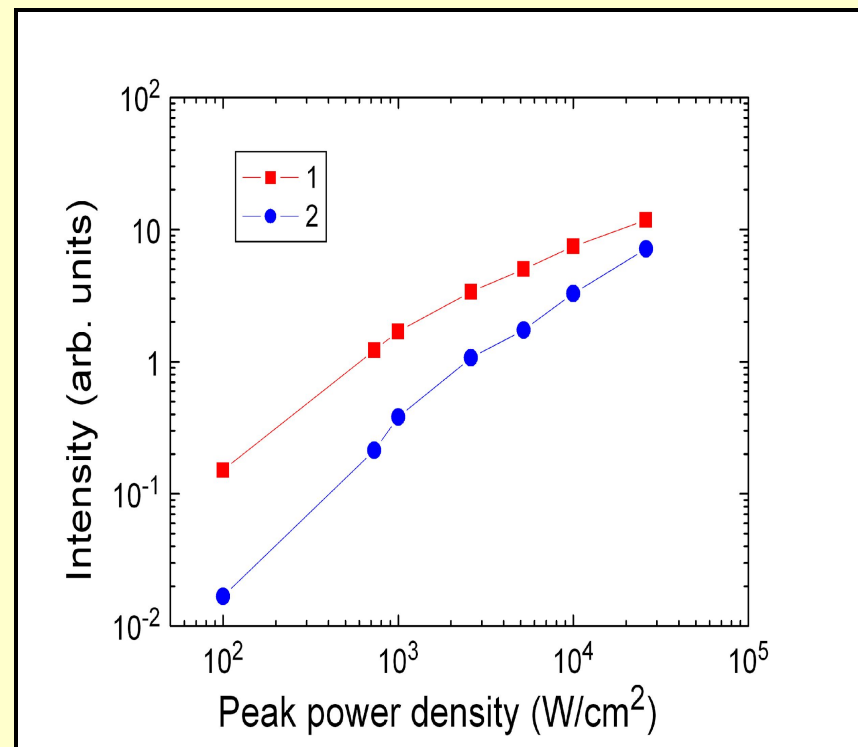


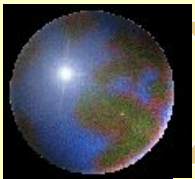
Фотолюминесценция КТ GaN/AlN при высокой мощности накачки

Спектры ФЛ



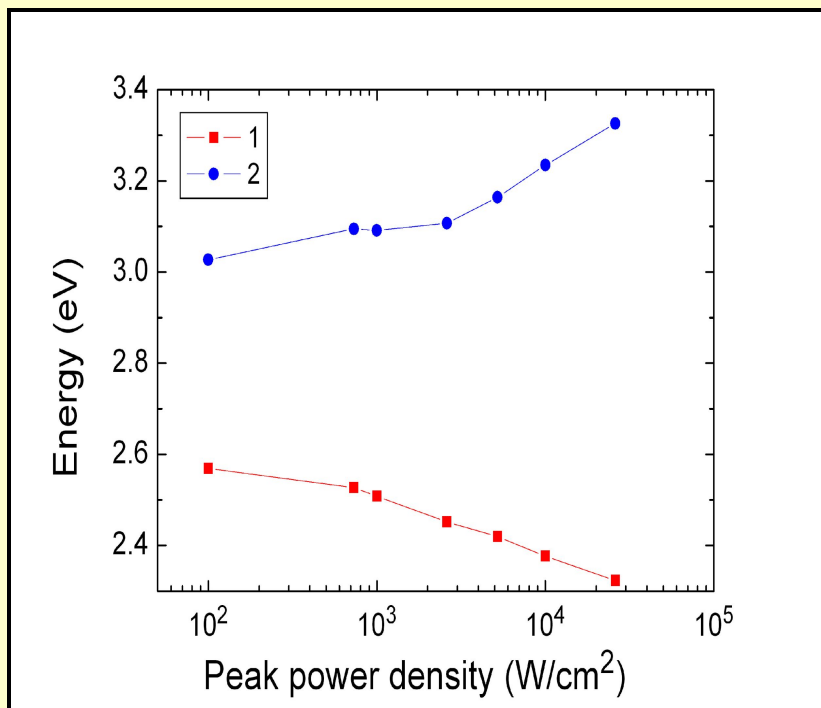
Зависимость интенсивности ФЛ от мощности лазера



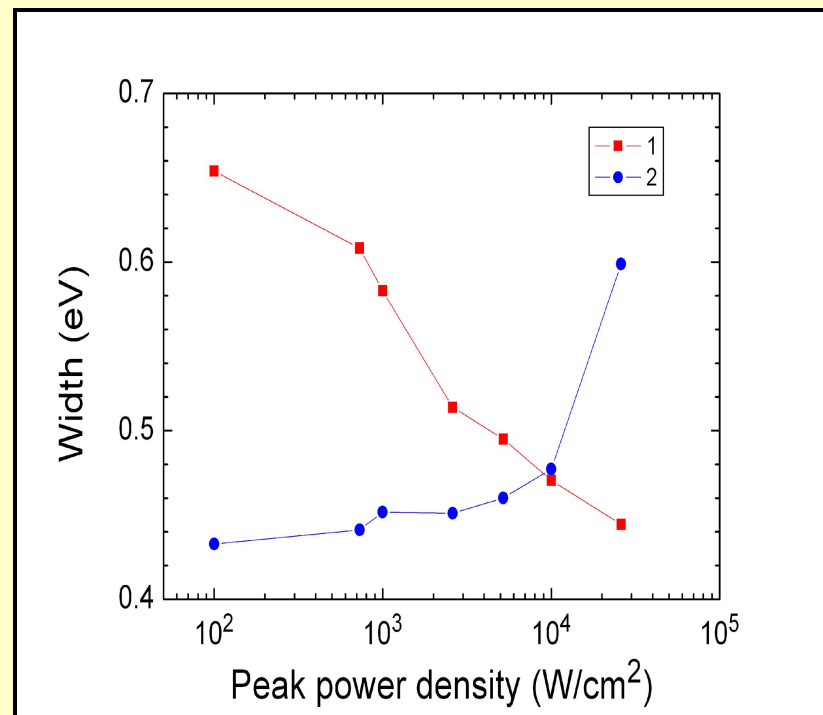


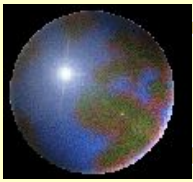
Зависимости положения и ширины полос ФЛ уровня накачки

Энергия максимума полосы ФЛ



Ширина полосы ФЛ





Перенормировка запрещенной зоны

Энергетический сдвиг из-за ренормализации запрещенной зоны в объемном GaN

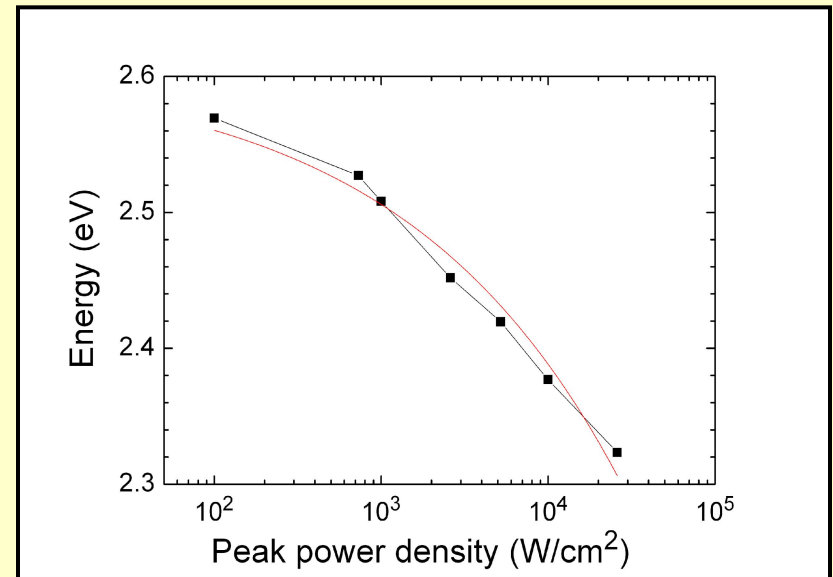
Зависимость энергии полосы ФЛ от мощности возбуждения

$$\Delta E = -K \cdot n^{\frac{1}{3}}$$

$$n = \frac{\alpha d J}{\hbar \omega n_{QD} V_{QD}}$$

α - коэффициент поглощения,
 d - толщина смачивающего слоя,
 J - плотность энергии в импульсе,
 V - объем всех КТ.

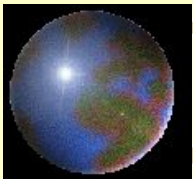
$$n_{\max} = 4 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$$



$$K_{QD} = 4.1 \cdot 10^{-8} \text{ eV cm}$$

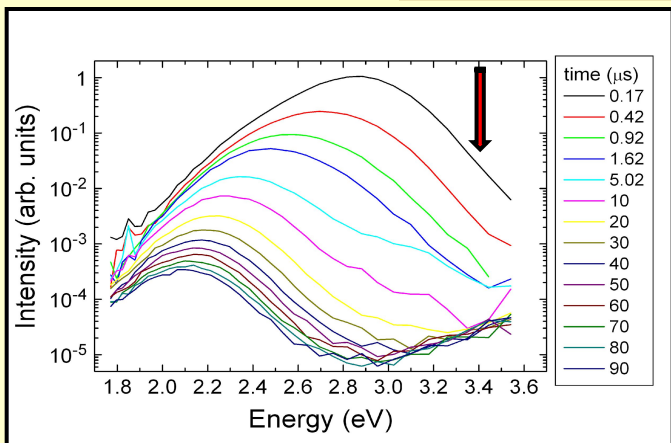
$$K_{Bulk} = 4.27 \cdot 10^{-8} \text{ eV cm}$$

M. Yoshikawa, J. Appl. Phys. 86, 4400 (1999)



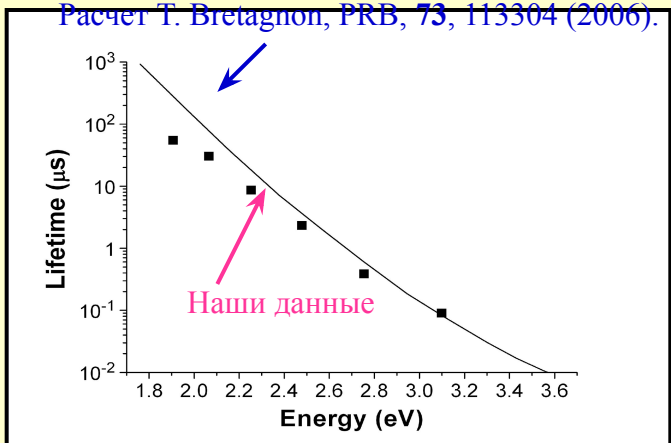
Нестационарная ФЛ КТ GaN/AlN

Спектры нестационарной ФЛ

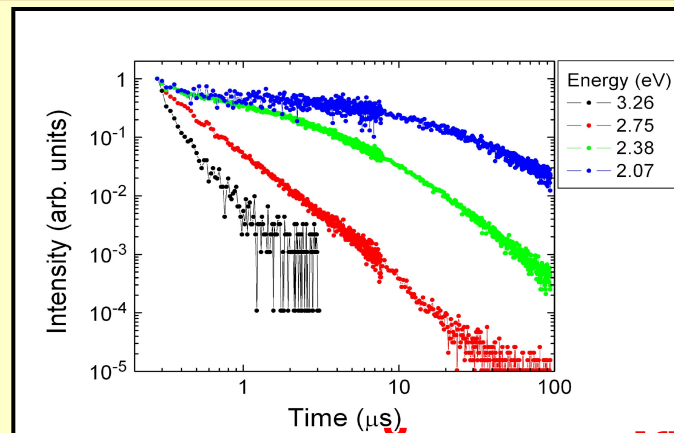


Время жизни в КТ

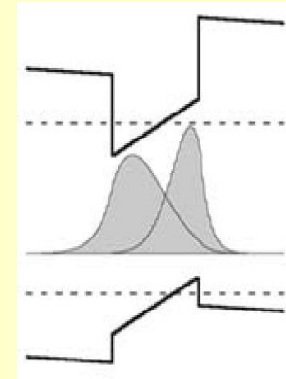
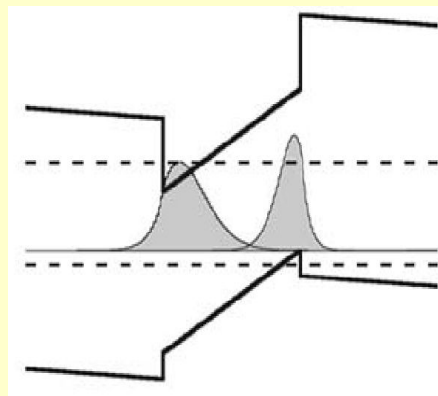
Расчет T. Bretagnon, PRB, 73, 113304 (2006).

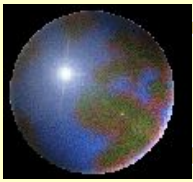


Кинетика ФЛ



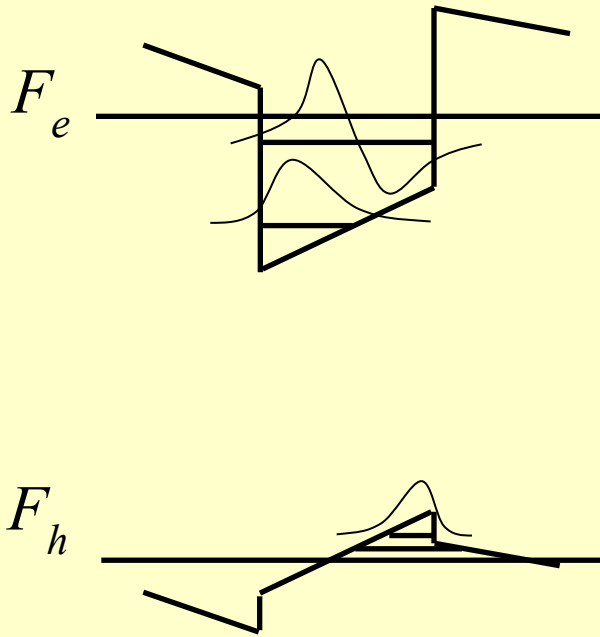
Энергетический спектр КТ разного размера



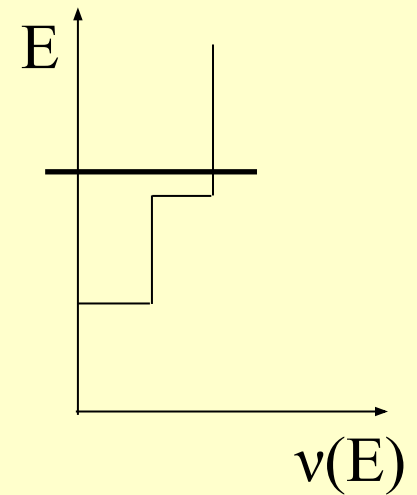
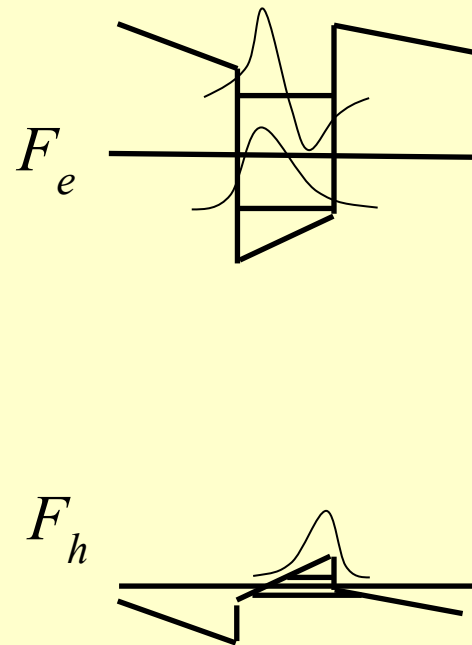


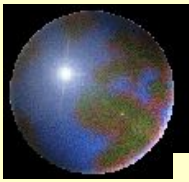
Заполнение энергетических состояний

Квантовые точки



Квантовые ямы





Тонкая структура экситонов в КТ

Momentum conservation law

Energy scheme of exciton

The **total angular momentum** of heavy-hole excitons in QDs $M=s+j$, $s=\pm 1/2$ (the electron spin), $j=\pm 3/2$ (the heavy-hole angular momentum).

Four degenerate states:

$M=\pm 1$ (bright states), $M=\pm 2$ (dark states).

Emission of pure states is circular polarized.

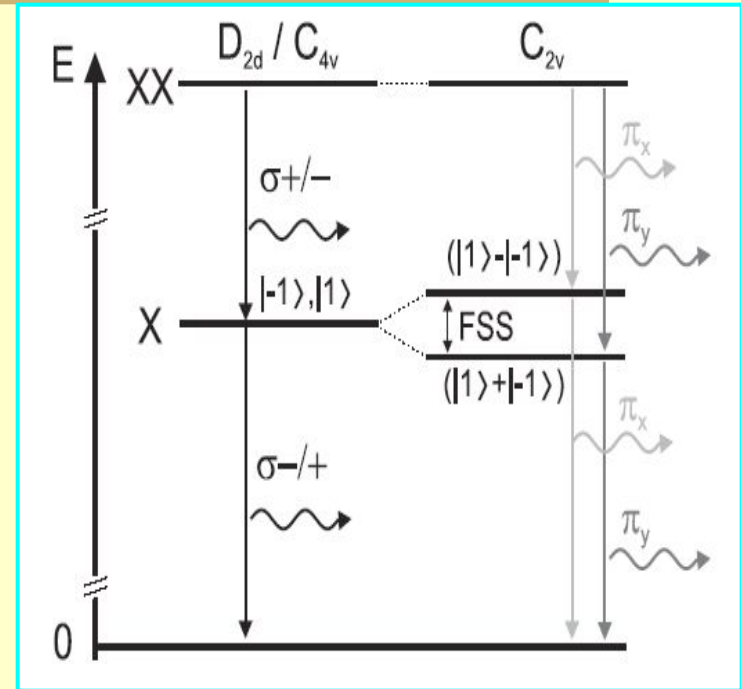
1. Electron-hole exchange interaction:

- causes a dark-bright splitting,
- mixes the dark states,
- lifts their degeneracy.

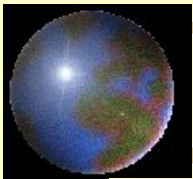
2. Lower symmetry of QDs:

- produces a nondegenerate bright doublet,
- mixes the bright states.

The mixed states usually produce lines showing linear polarization.



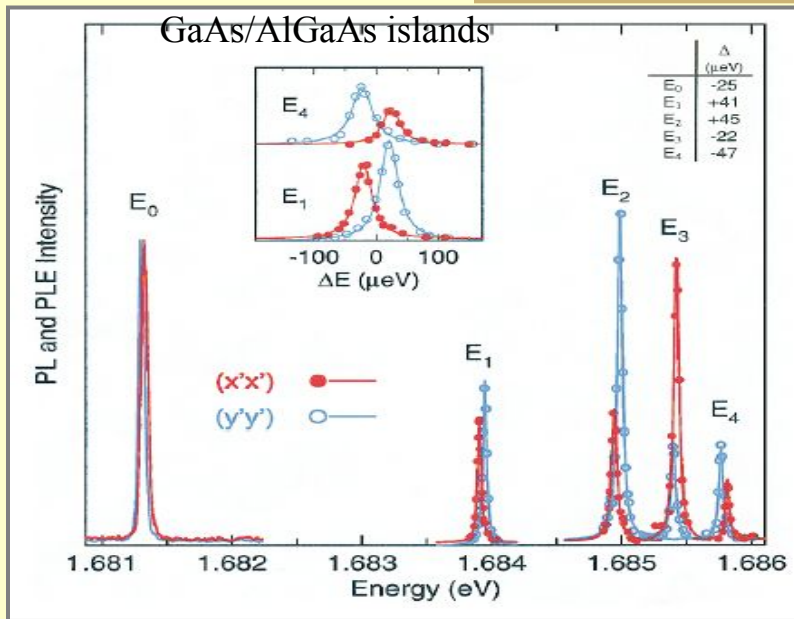
R. Seguin et al. PRL, 95, 257402 (2005).



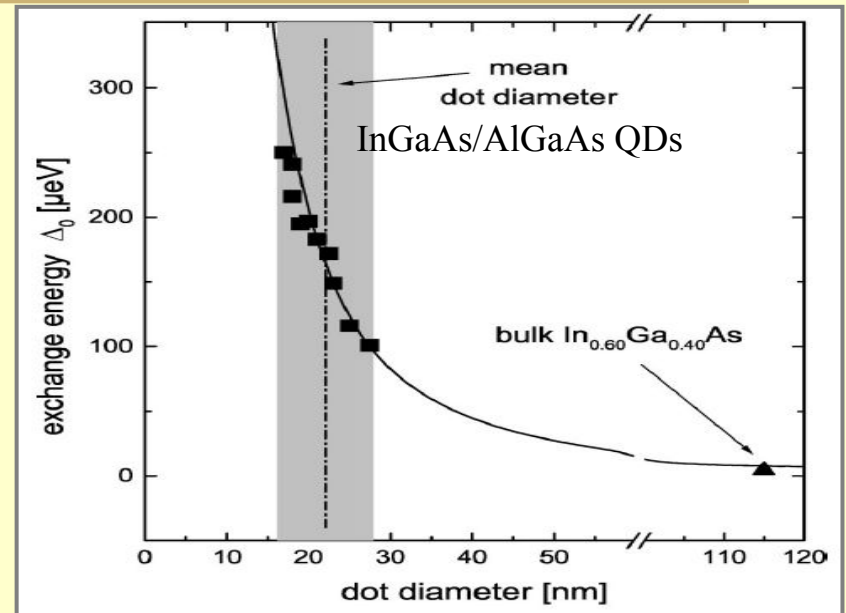
Линейно поляризованное излучение КТ

Micro-PL spectra of QDs

Electron-hole exchange energy in QDs

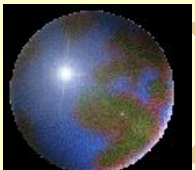


D. Gammon et al. PRL, 76, 3005 (1996).



M. Bayer et al. PRB, 65, 195315 (2002).

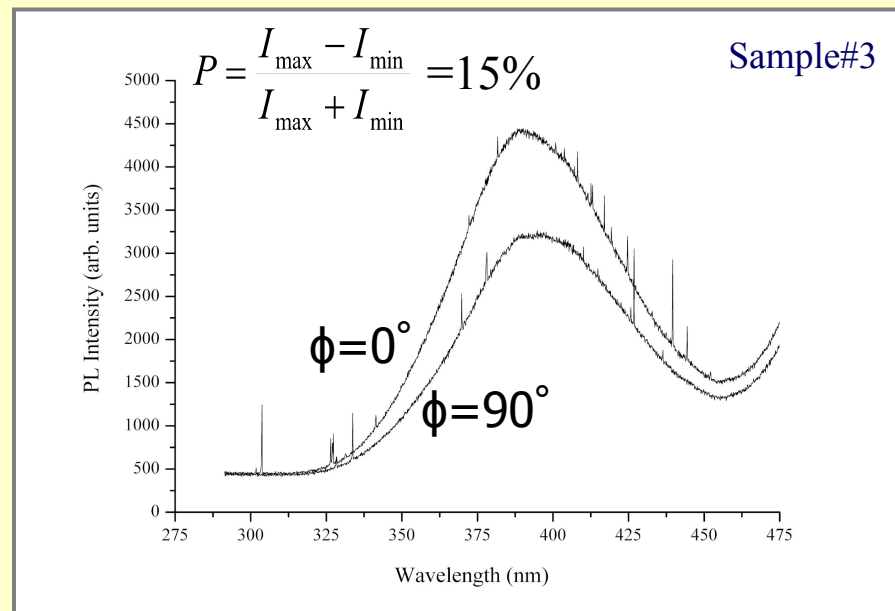
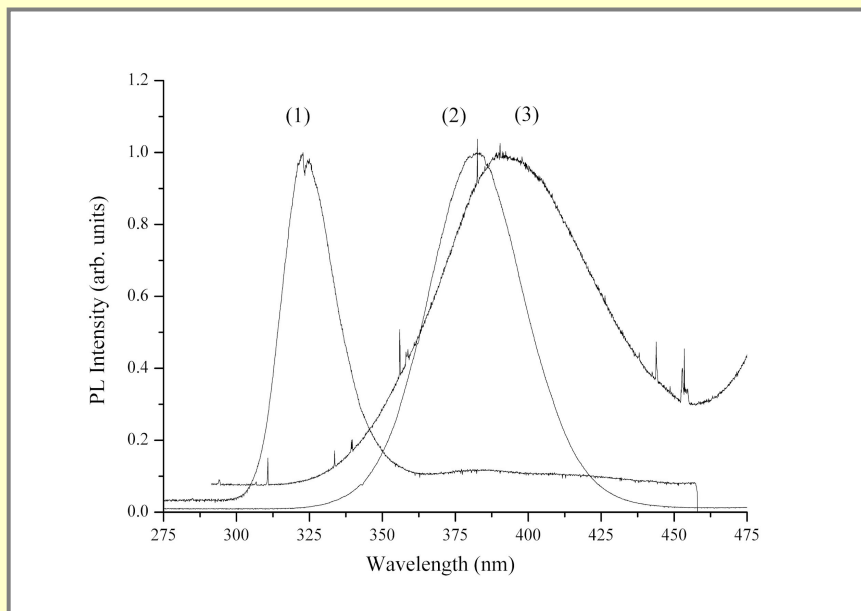
- Neutral exciton spectrum of single-QDs exhibits a doublet of lines that are linearly polarized along two perpendicular directions.
- Light-hole-to-heavy-hole valence band mixing modulates the oscillator strengths of the different components, in case of anisotropic confinement.



Линейно поляризованная ФЛ GaN/AlN КТ

Micro-PL of QDs
with different density and size

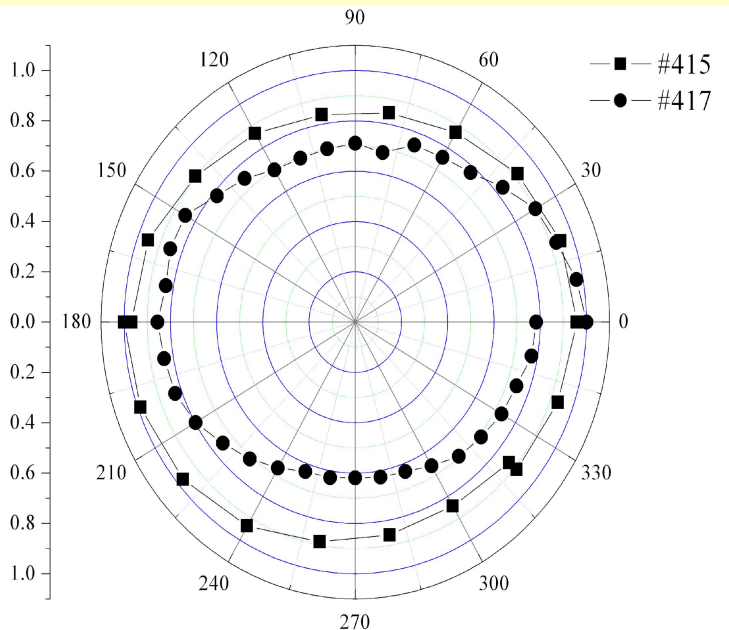
Polarized micro-PL of QDs



□ Polarization degree depends on density of QDs, it varies from 2% to 15%.

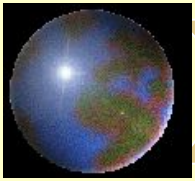


Micro-PL of QDs with different density

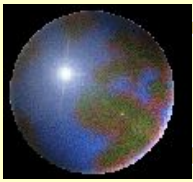


- GaN QDs are tend to be formed at elastic potential minima on AlN surface close to defects such as threading edge dislocations.
- This leads to anisotropy of strain and shape of a QD and linear polarization of PL emission of single QD.
- If the density of QDs is higher than density of dislocations one part of QDs will be formed close to dislocations and exhibit linearly polarized emission while other QDs will be dislocation free and exhibit unpolarized emission.

The higher degree of PL polarization of sample with lower QD_s density can be attributed to the larger part of QDs, which are located at vicinity of dislocations



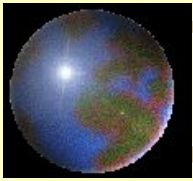
- ✓ В ИФП СО РАН развита МЛЭ технология GaN квантовых точек в матрице.
- ✓ Ведутся исследования механизмов роста, структурных и люминесцентных свойств структур с квантовыми точками



-
- В.Г.Мансуров, Ю.Г.Галицын, Т.В.Малин, А.Тихонов (*Рост*),
 - А.К.Гутаковский (*Микроскопия*),
 - И.Александров, А.М.Гишинский, (*Фотолюминесценция*).
 - ИФП СО РАН, Новосибирск

 - Ph. Vennegues (*Microscopy*)
Centre de Recherche sur l'Hetero-Epitaxie et ses Applications, Valbonne, France

 - P. P. Paskov, P.O.Holtz (*micro-Photoluminescence*)
Linköping University, Linköping, Sweden



Спасибо за внимание !