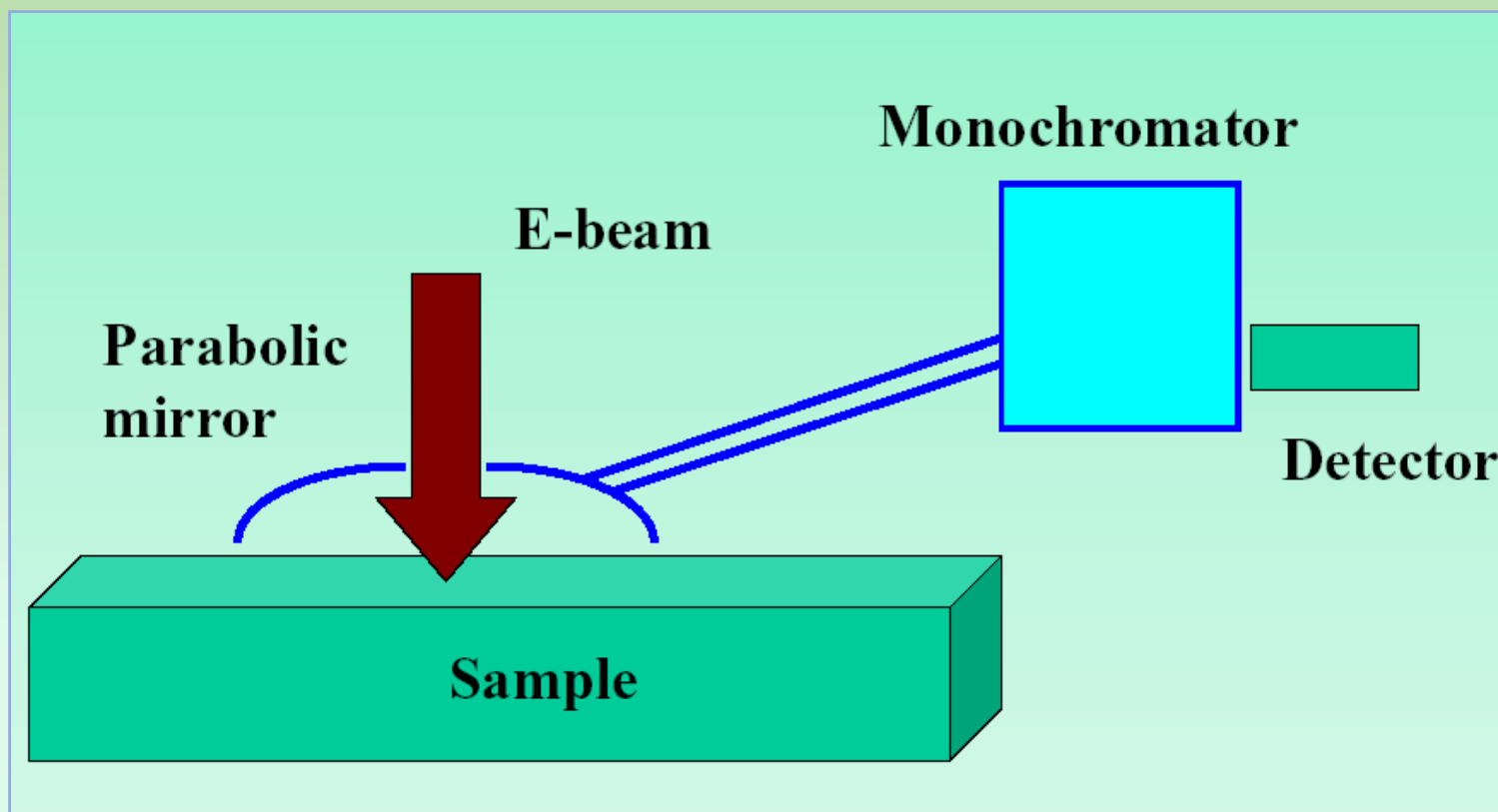
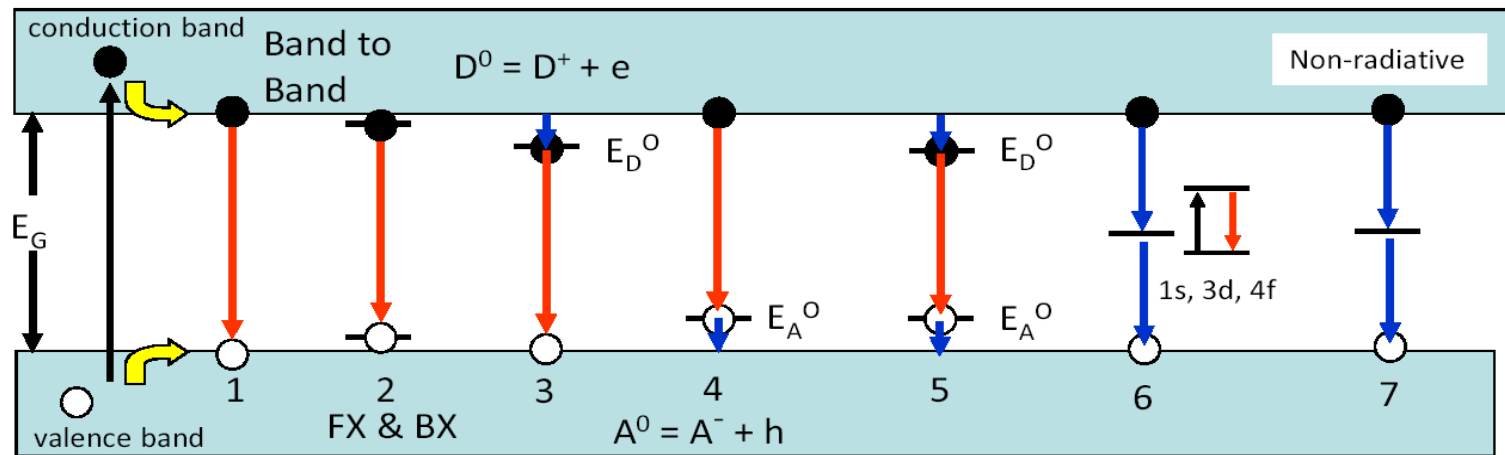


МЕТОД КАТОДОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ

Метод катодолюминесценции



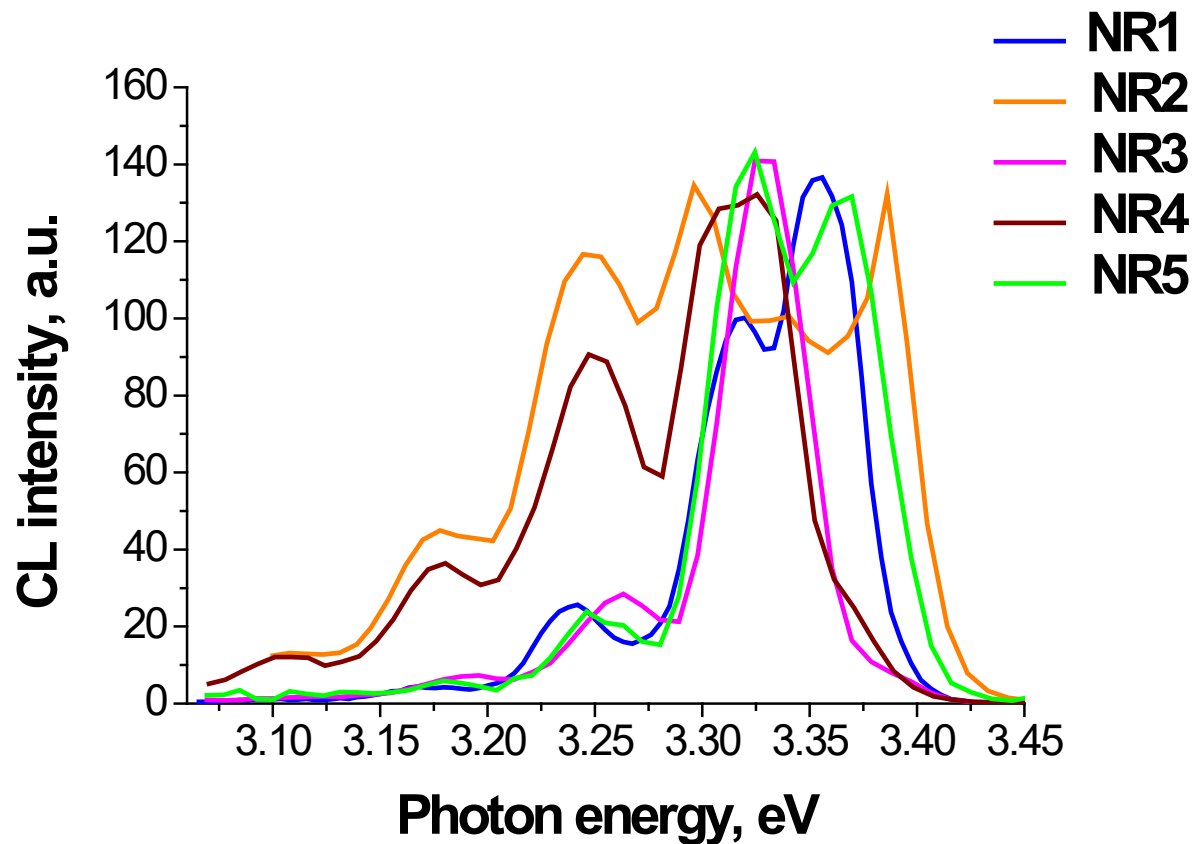
Основные механизмы люминесценции



Recombination Mechanisms

- 1 band to band $E_{CL} = E_G$
- 2 free and bound excitons $E_{CL} = E_G - E_{EX}$
- 3 free hole to donor bound electron $E_{CL} = E_G - E_D$
- 4 free electron to acceptor bound hole $E_{CL} = E_G - E_A$
- 5 donor - acceptor pair $E_{CL} = E_G - E_D - E_A + q^2/(4\pi\epsilon_0\epsilon r)$
- 6 internal excitation 1s levels point defects, 3d levels transition metals & 4f levels rare earth elements, information on oxidation state & coordination
- 7 Non-radiative process - thermal activation energy, $\exp(-E_A/k_B T)$

Спектры КЛ наностержней ZnO



Основные области применения

**Измерение локальных оптических свойств
(спектры излучения, температурные и
временные зависимости)**

Измерение диффузионной длины

Выявление протяженных дефектов

Диагностика приборов опто- и фотоэлектроники

Измерение диффузионной длины методом КЛ

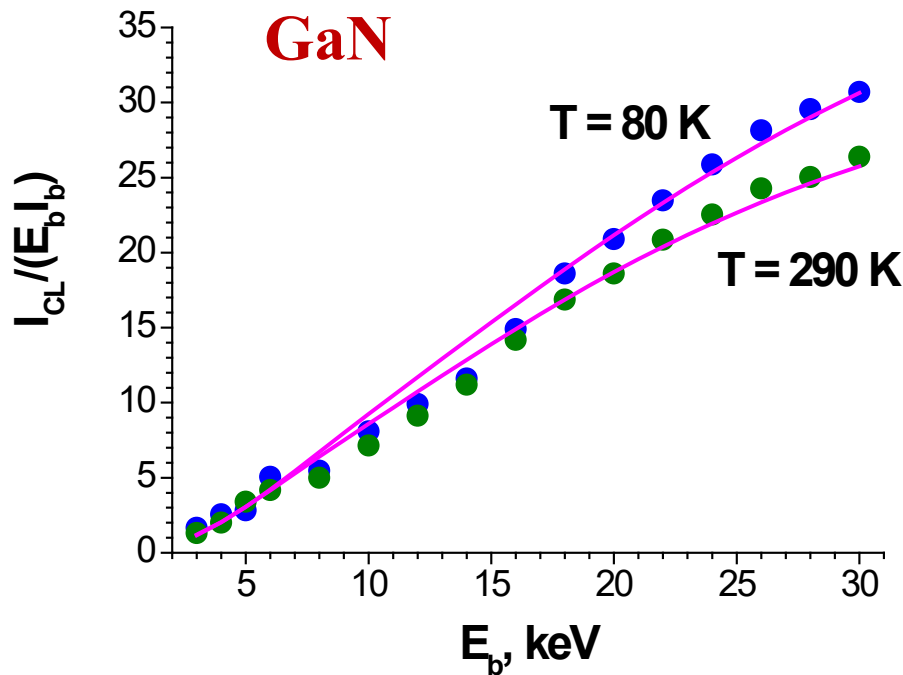
Важность этого параметра

**Определяет эффективность фотодетекторов
детекторов**

Моделирование полупроводниковых приборов

Индикатор качества материала

Измерение диффузионной длины методом КЛ

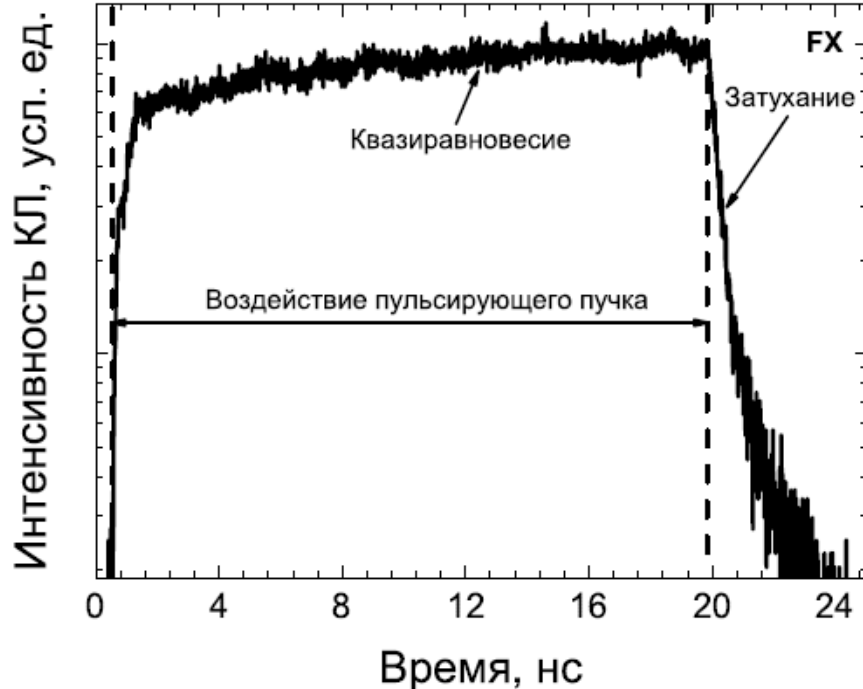
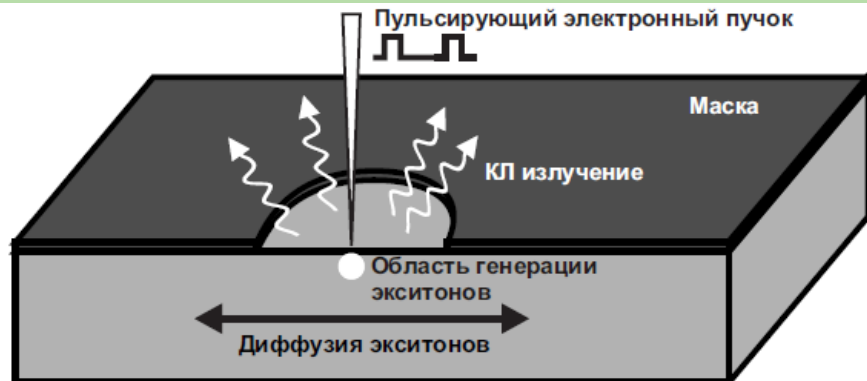


**Подгоночные параметры:
L, S, толщина «мертвого
слоя», коэффициент
поглощения.**

$$\Delta p(z) = (G_0 L_p / 2 D_p) \{ \exp(-|z - \xi| / L_p) + [(1 - S) / (1 + S)] \exp[-(z + \xi) / L_p] \}$$

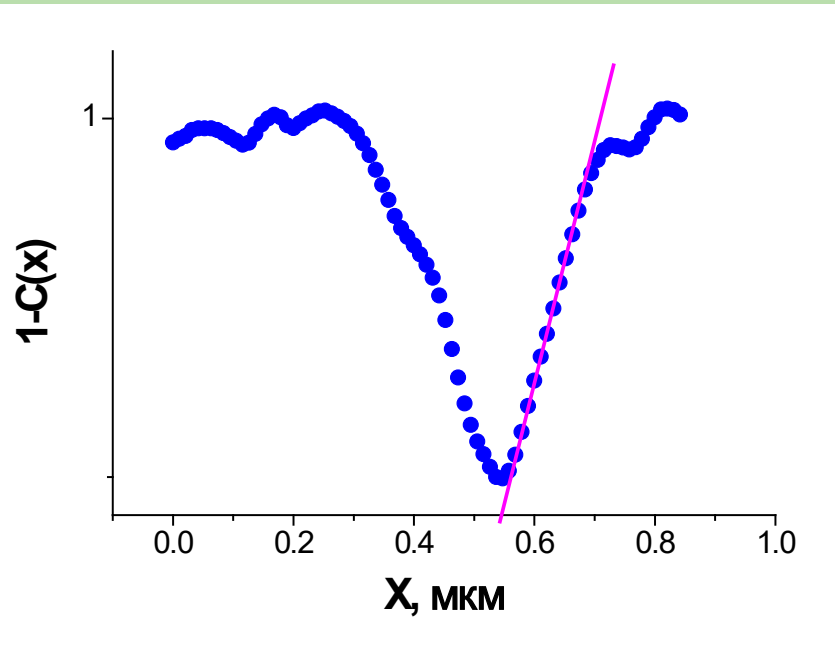
$$S = s / (L / \tau)$$

Измерение диффузионной длины методом КЛ



Сравнение скорости спада при облучении в отверстии и без маски позволяет оценить диффузии под маску.

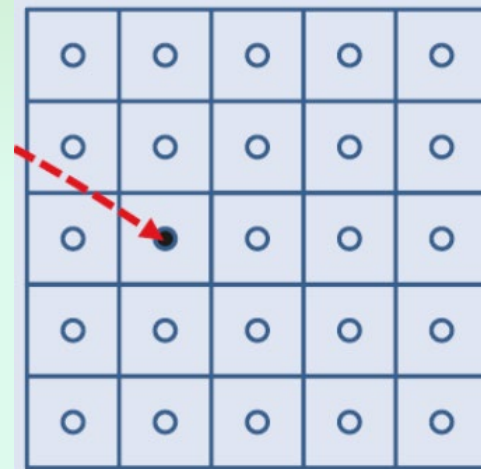
Измерения диффузионной длины по спаду КЛ контраста дислокации



$$I(r) \sim \exp(-r/L)$$

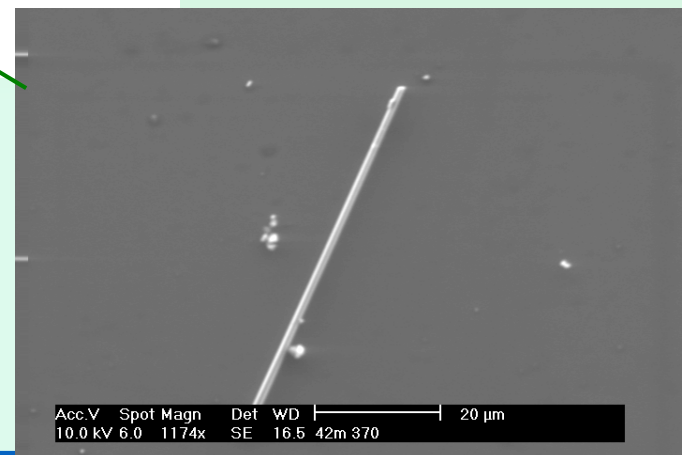
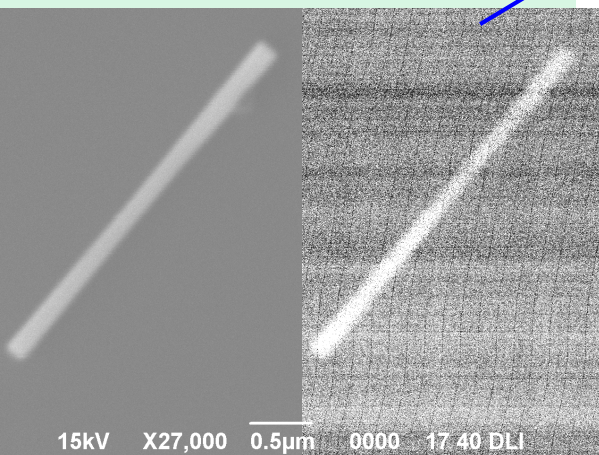
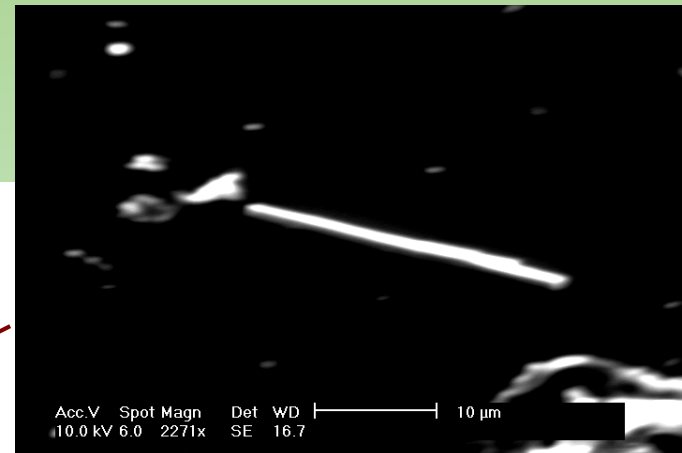
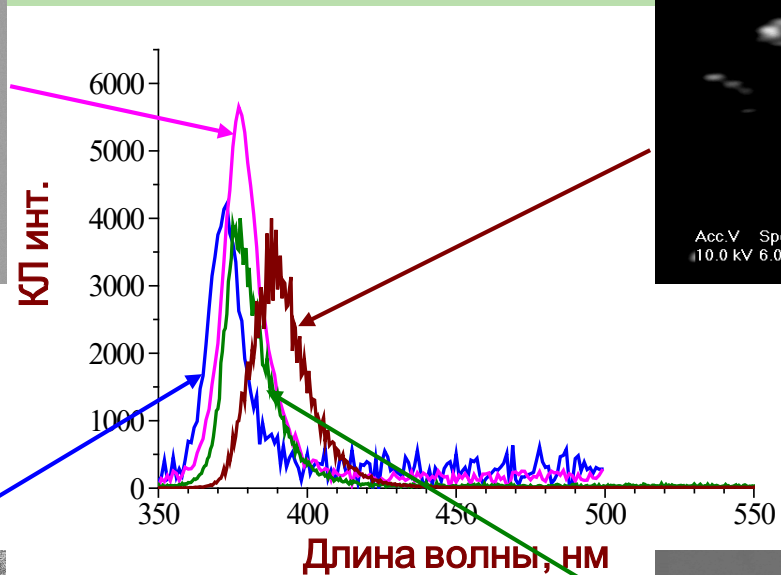
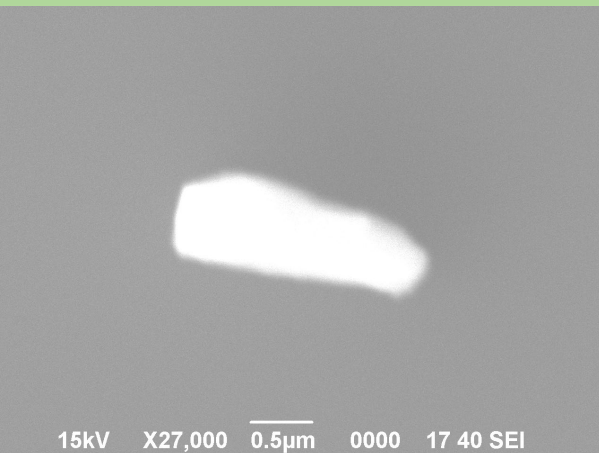
При однородном возбуждении

$$\Delta p = G\tau[1-K_0(r/L)/K_0(r_0/L)]$$

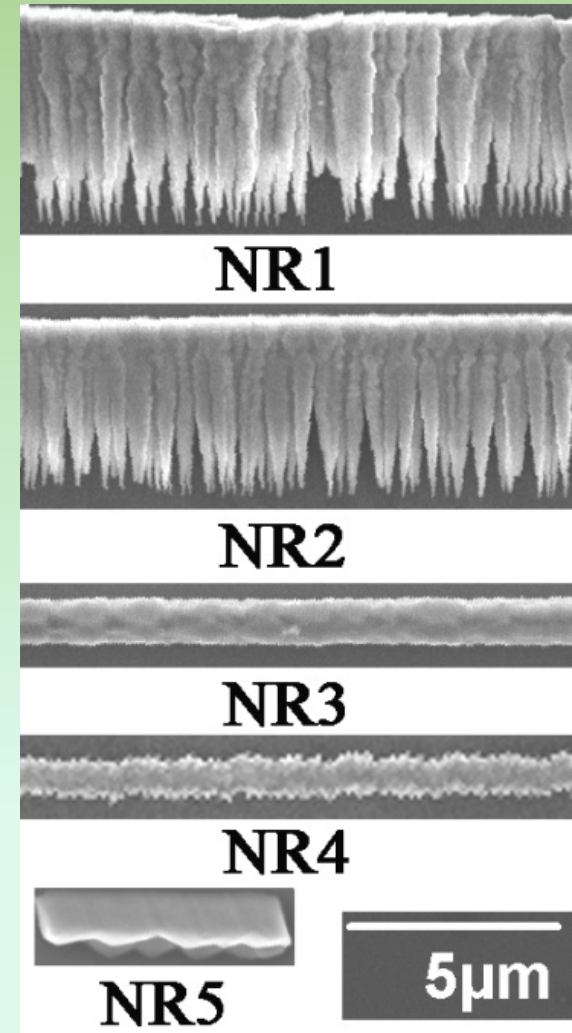
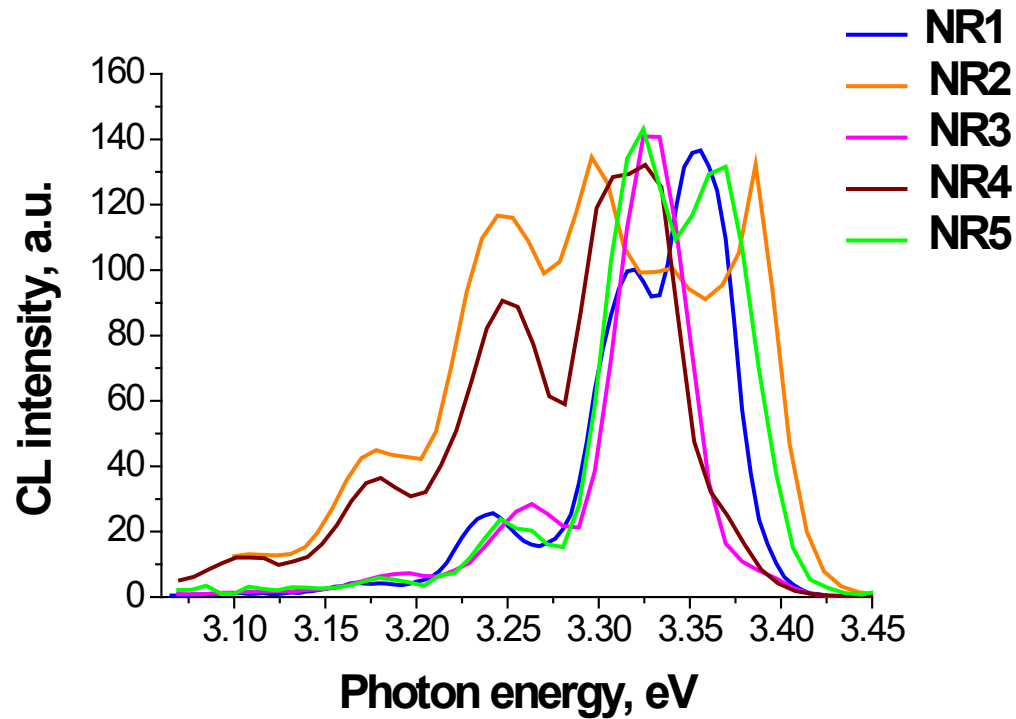


Измерение локальных спектров люминесценции

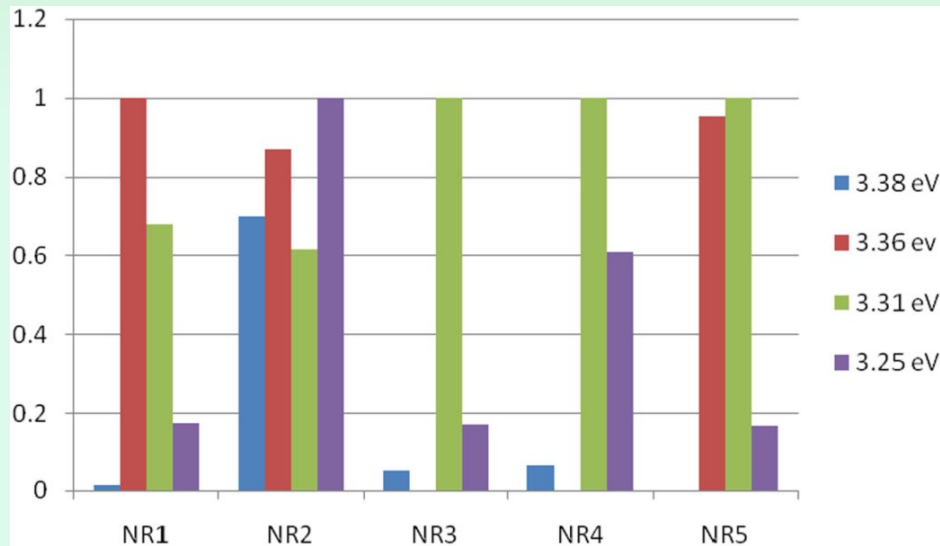
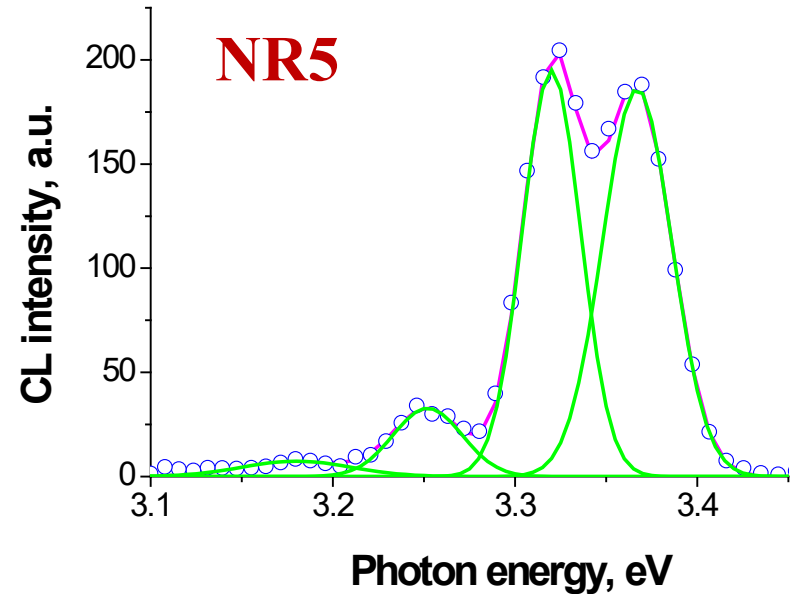
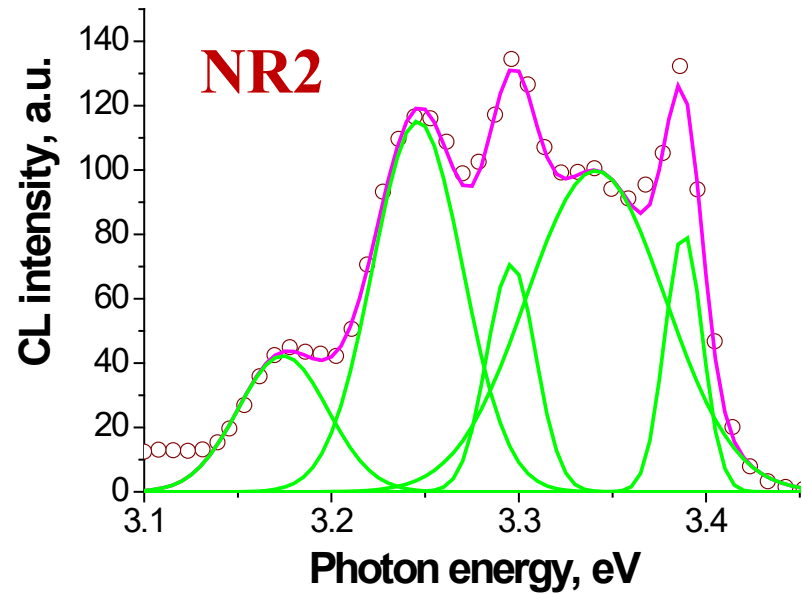
Спектры КЛ наностержней ZnO



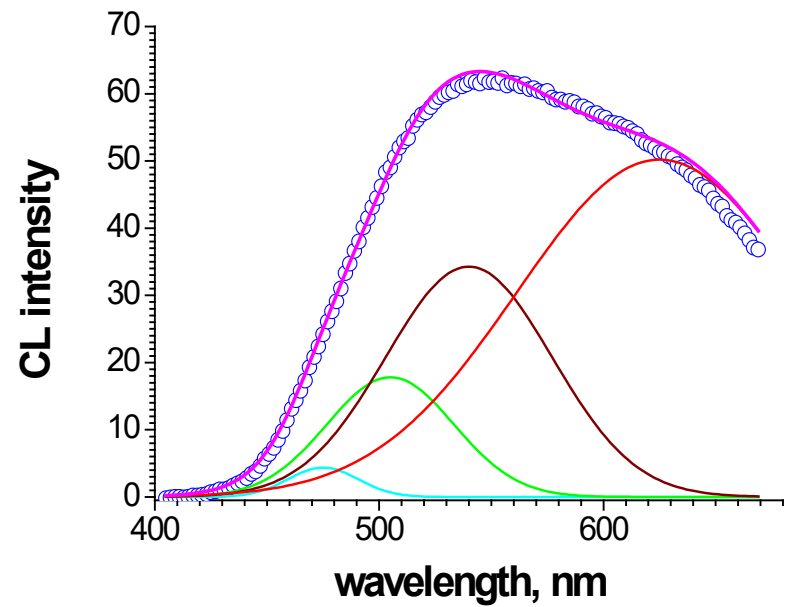
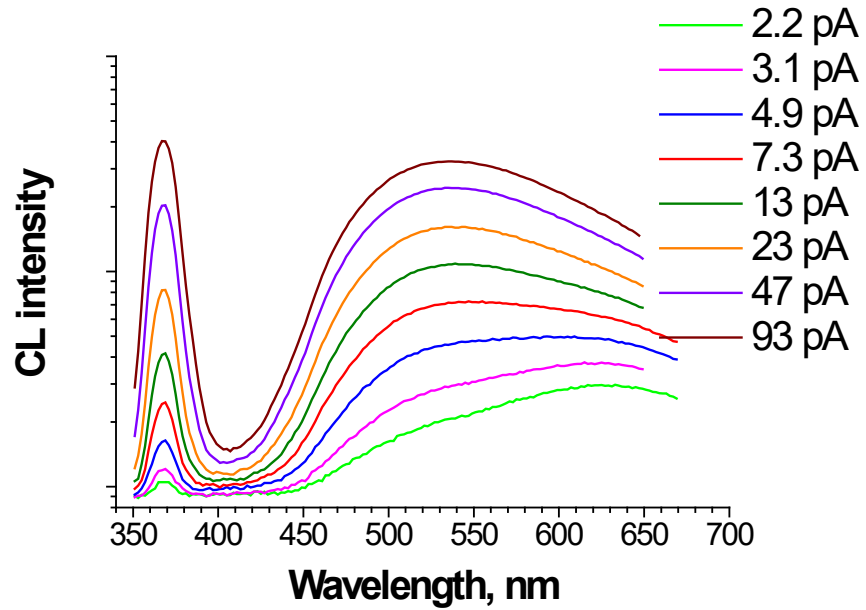
Спектры КЛ наностержней ZnO



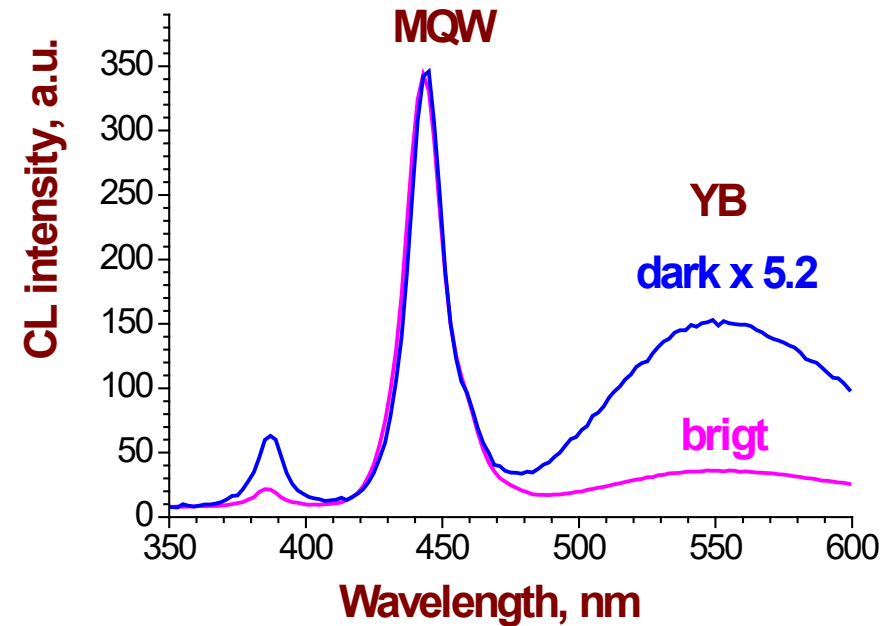
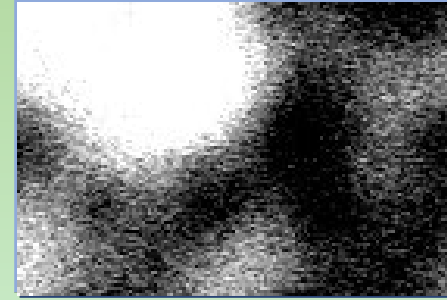
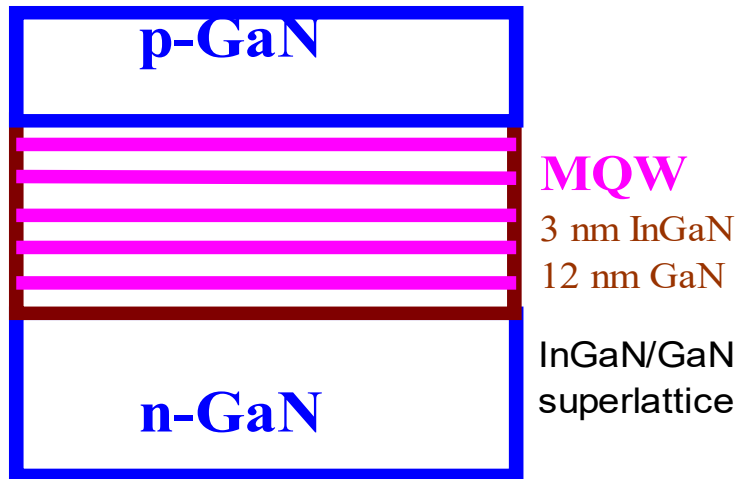
Спектры КЛ наностержней ZnO



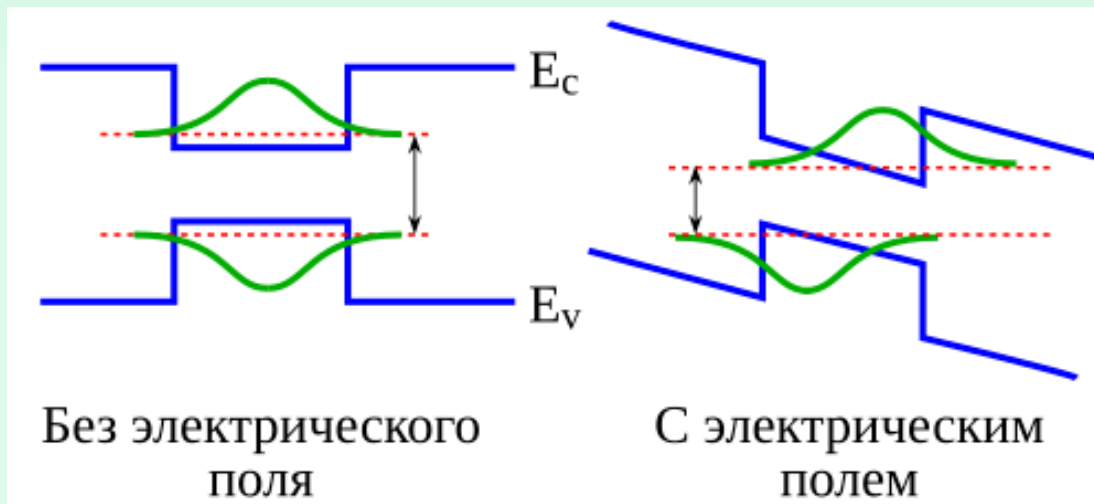
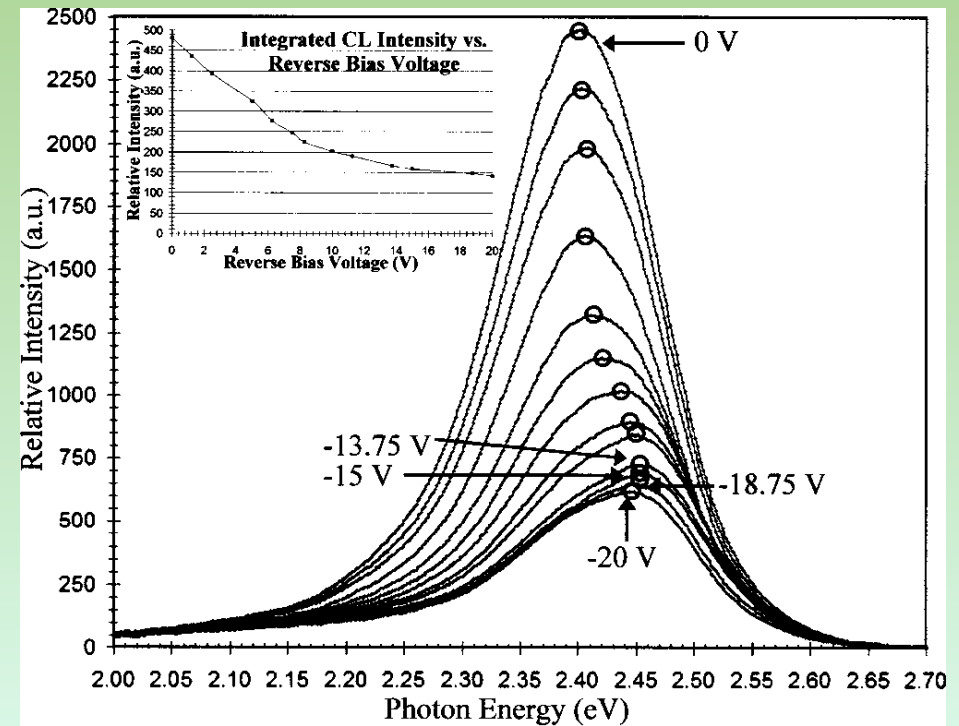
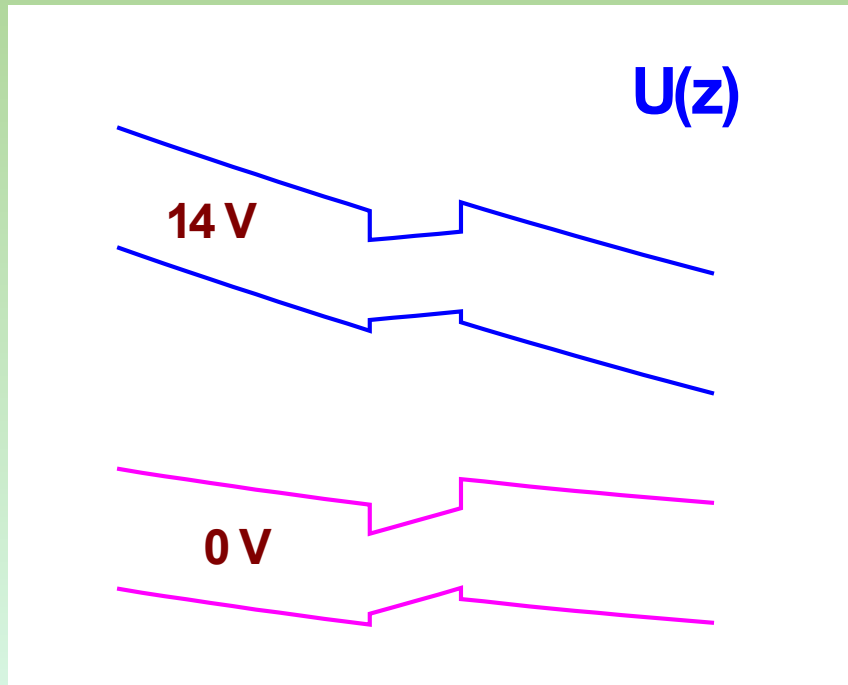
Спектры КЛ HVPE GaN



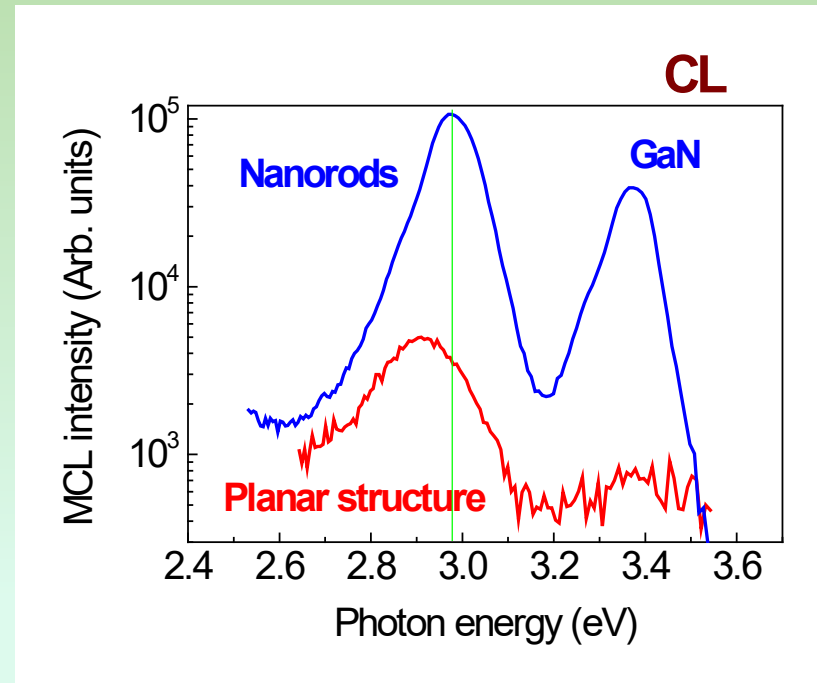
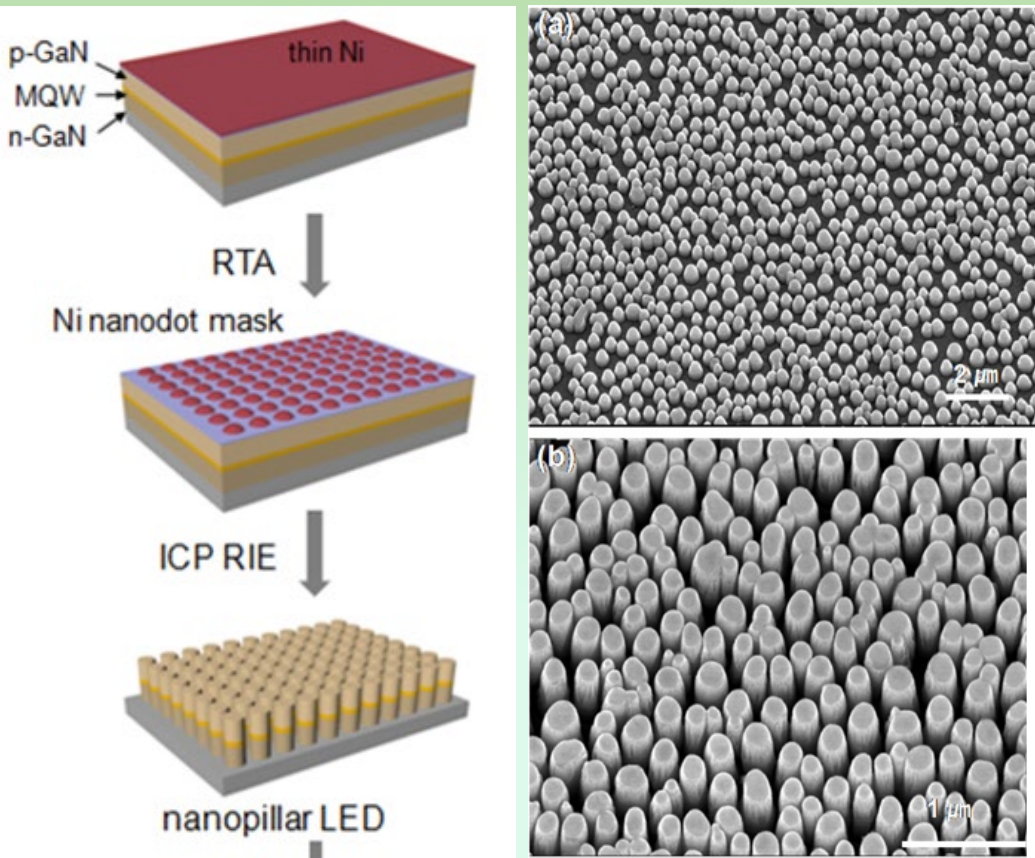
Спектры КЛ MQW InGaN/GaN



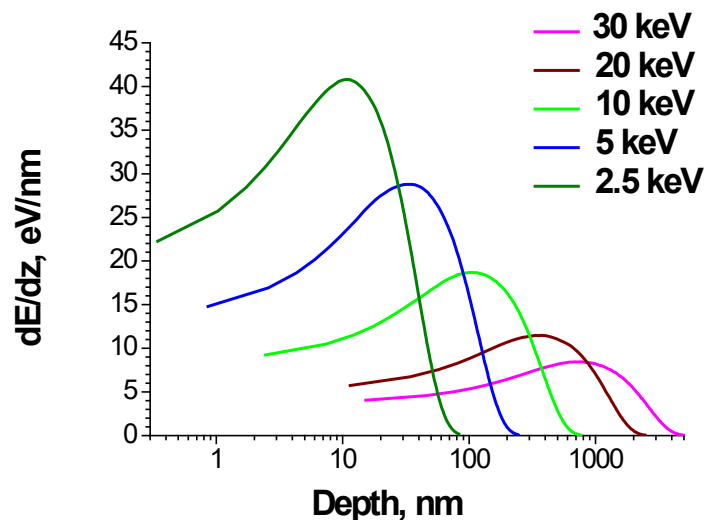
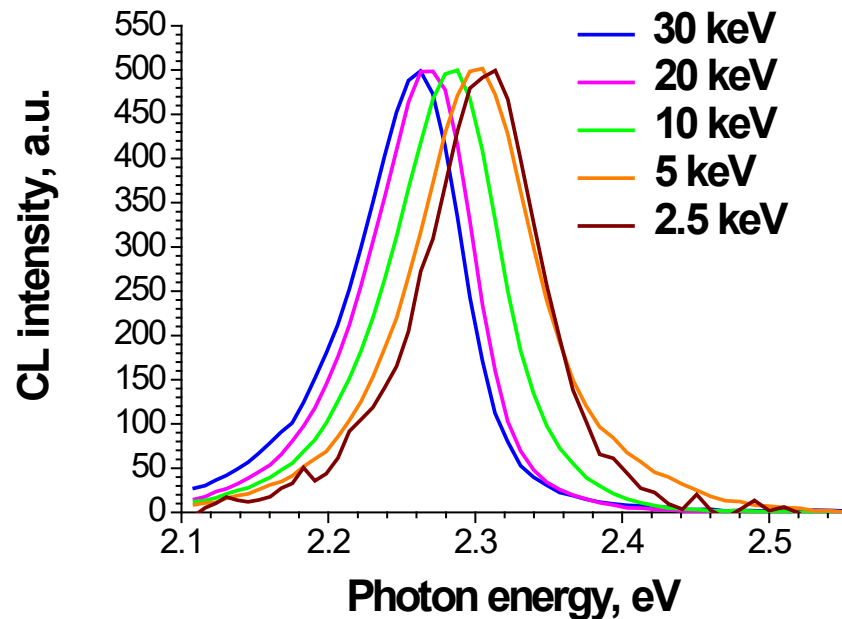
Квантово-размерный эффект Штарка



КЛ: плазменное травление InGaN/GaN MQW

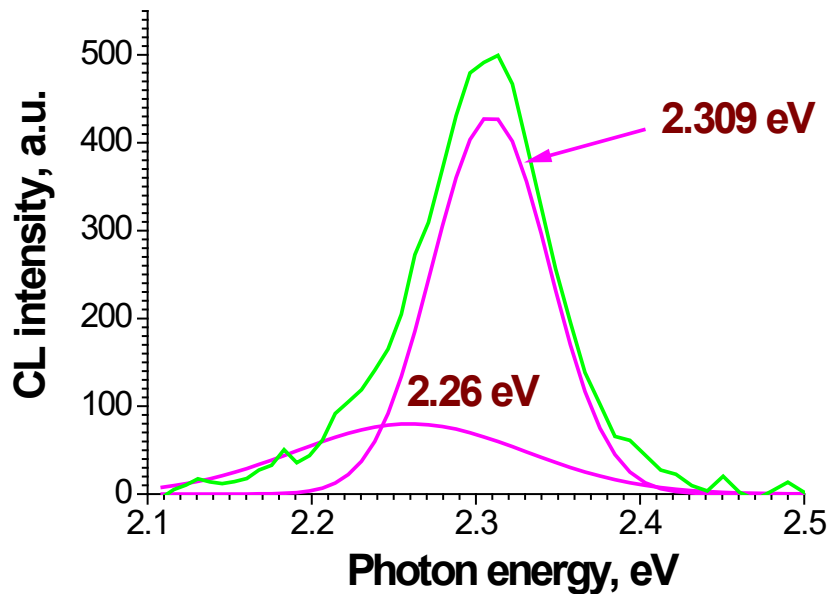
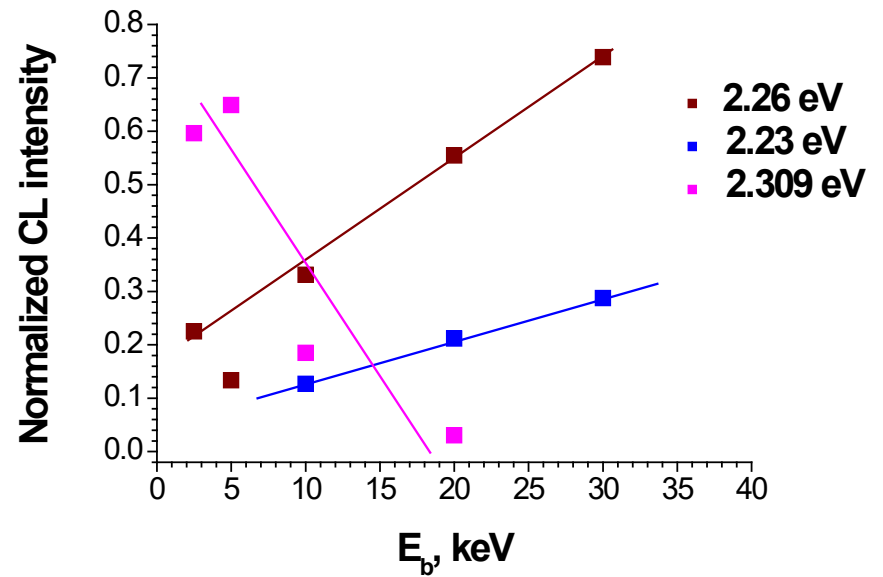


Спектры КЛ $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$

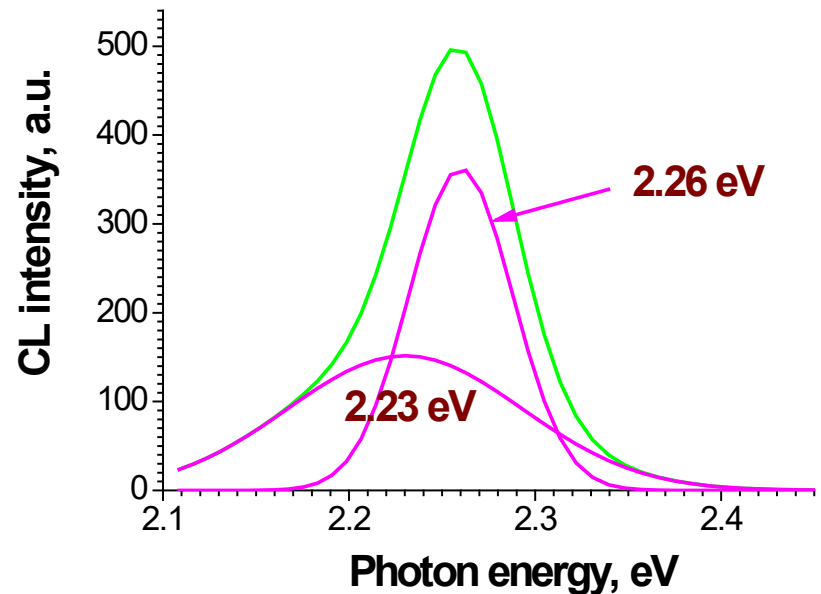


Разложение спектров на гауссианы показывает, что происходит не сдвиг полосы излучения, а образование новых полос, что может быть связано с изменением состава приповерхностного слоя

Разложение спектров КЛ на гауссианы

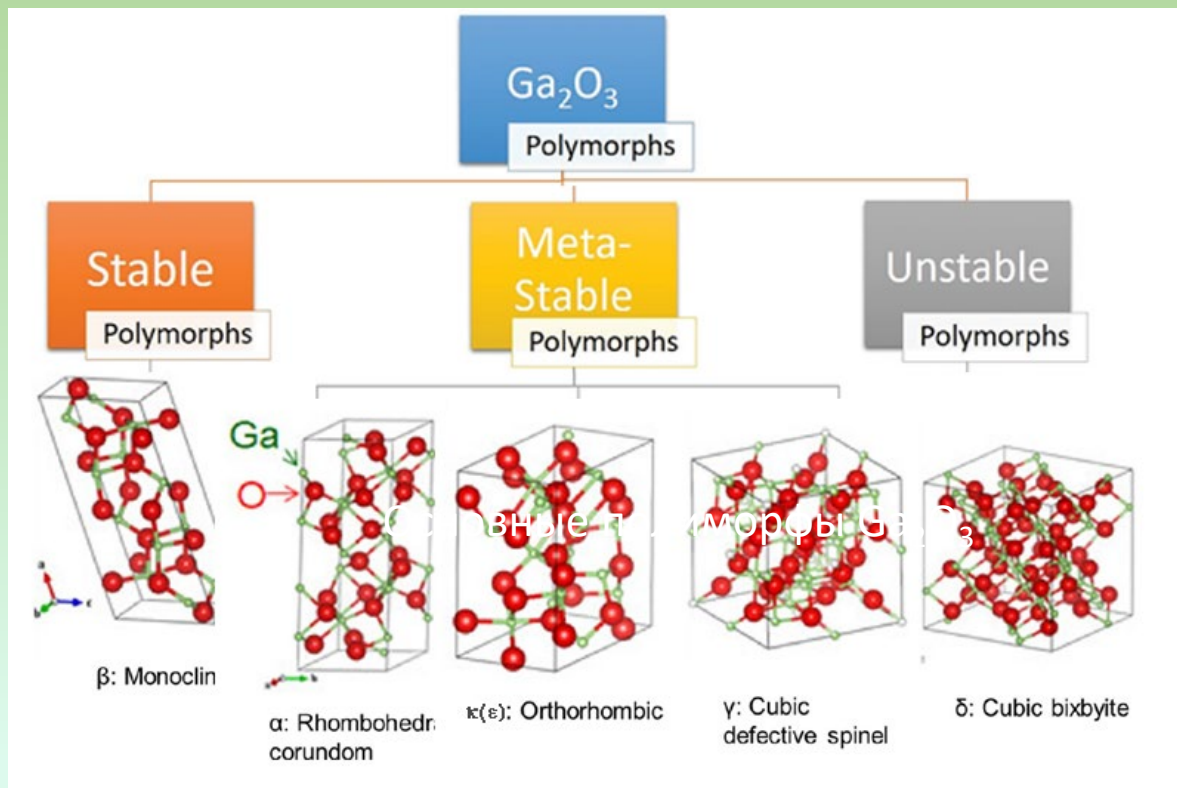


$E_b = 2.5$ кэВ



$E_b = 30$ кэВ

Основные полиморфы Ga_2O_3



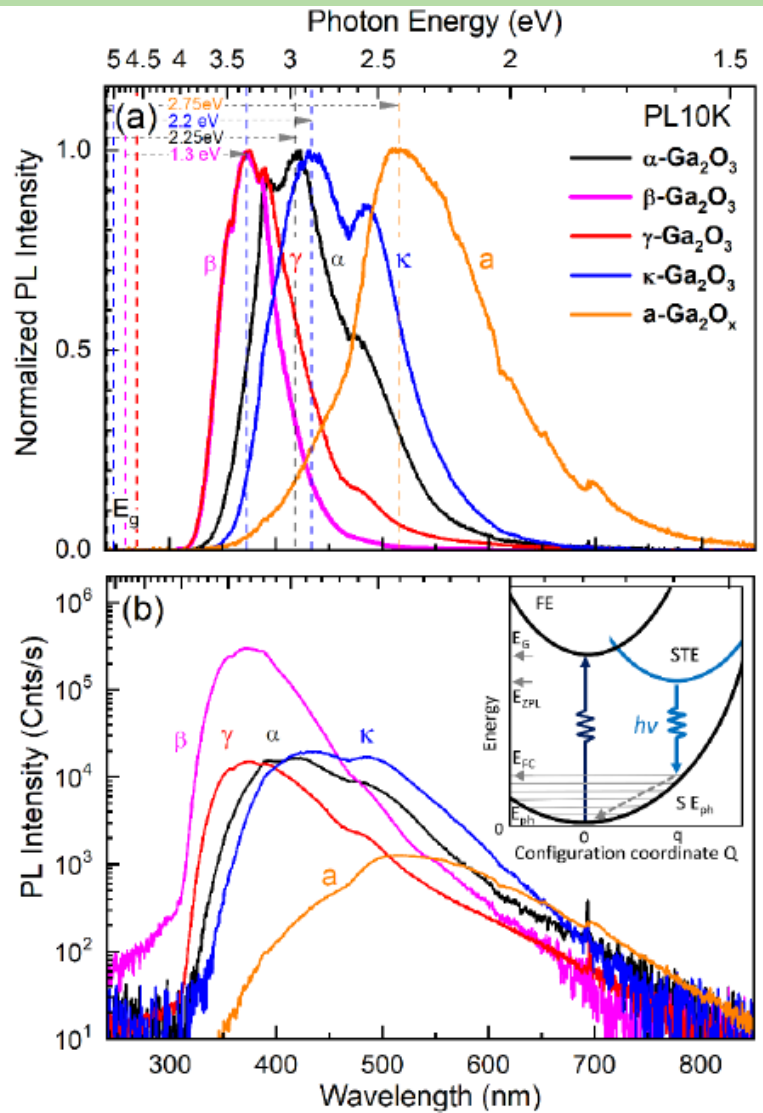
β - Ga_2O_3 - стабильный моноклинный полиморф, рост монокристаллов из расплава, все виды гомоэпитаксии, $E_g=4.6-4.9$ eV, $E_{cr}=8$ MeV/cm (theory)

α - Ga_2O_3 - метастабильный ромбоэдрический полиморф, устойчив до $\sim 600^\circ\text{C}$, изоморфный с α - Al_2O_3 (сапфир), $E_g=5.2$ eV, р-типа в $(\text{Ir}_{0.6}\text{Ga}_{0.4})_2\text{O}_3$

κ - Ga_2O_3 - метастабильный орторомбический полиморф, устойчив до $\sim 800^\circ\text{C}$, $E_g=4.6$ eV большая величина спонтанной поляризации, тенденция расти в форме вращательных нанодоменов

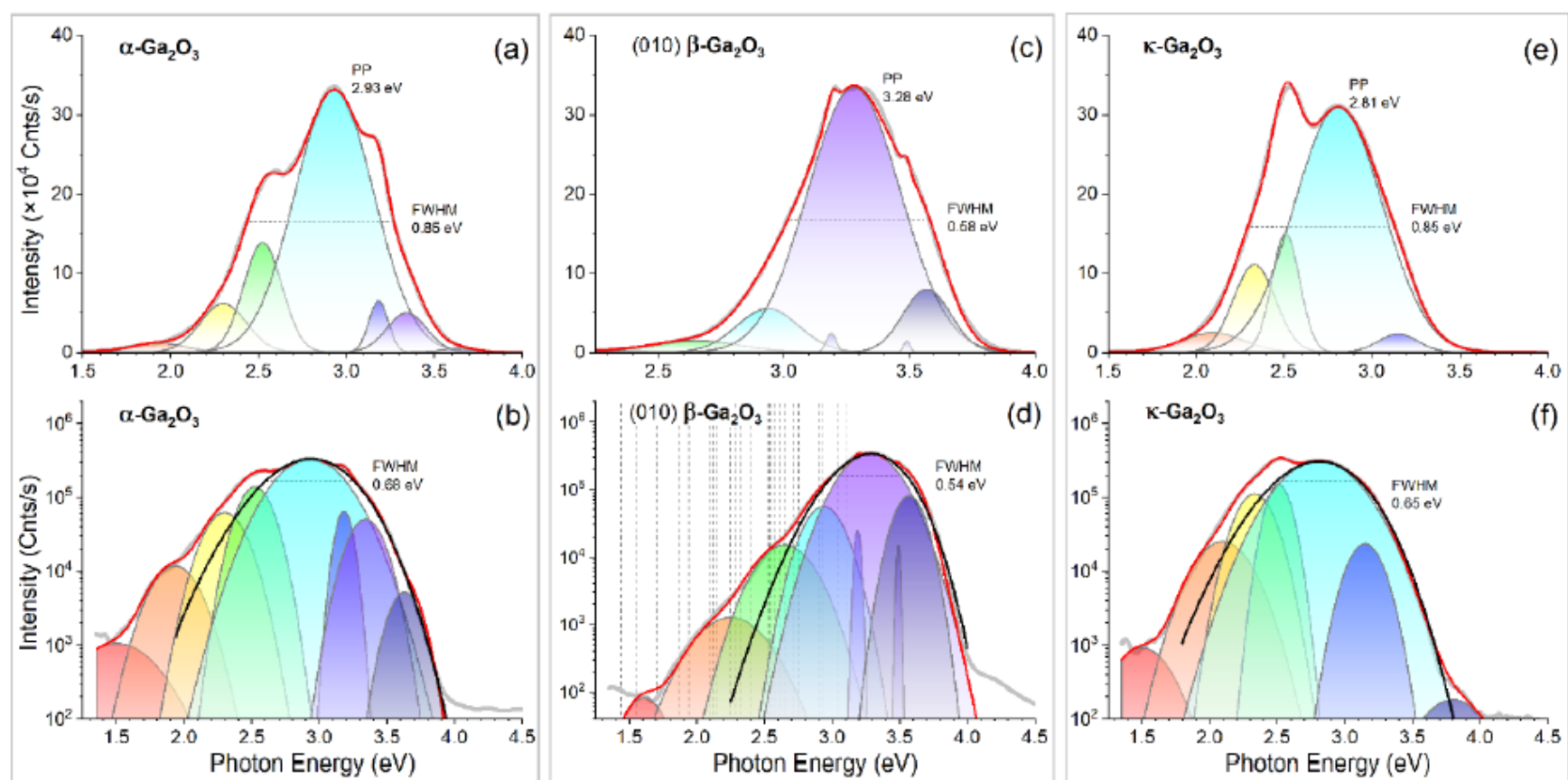
γ - Ga_2O_3 , метастабильный кубический полиморф, устойчив до 450°C , $E_g=4.5 - 5$ eV, рост неравновесными эпитаксиальными методами, как промежуточная фаза при облучении большими дозами высокоэнергетических частиц вместо аморфизованного слоя, в этом состоянии очень радиационно-стойкий

PL Ga_2O_3 политипов



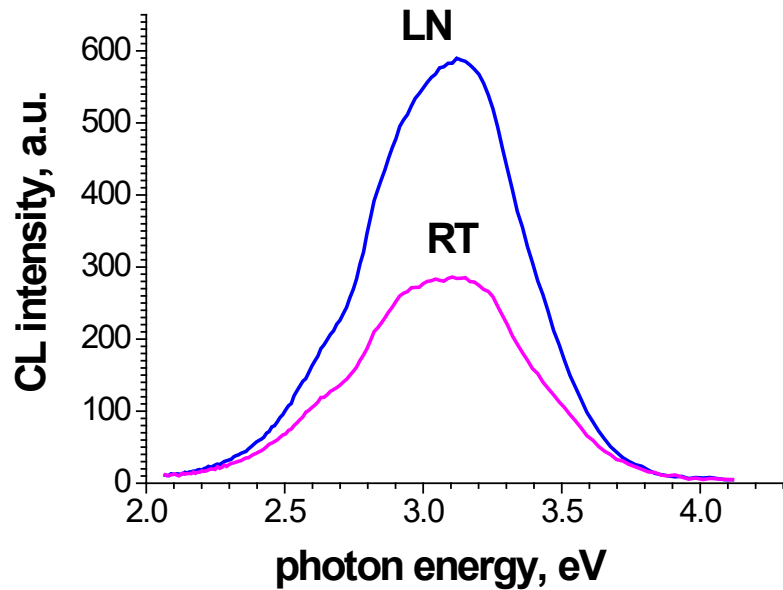
10 K

PL Ga₂O₃ полиморфов

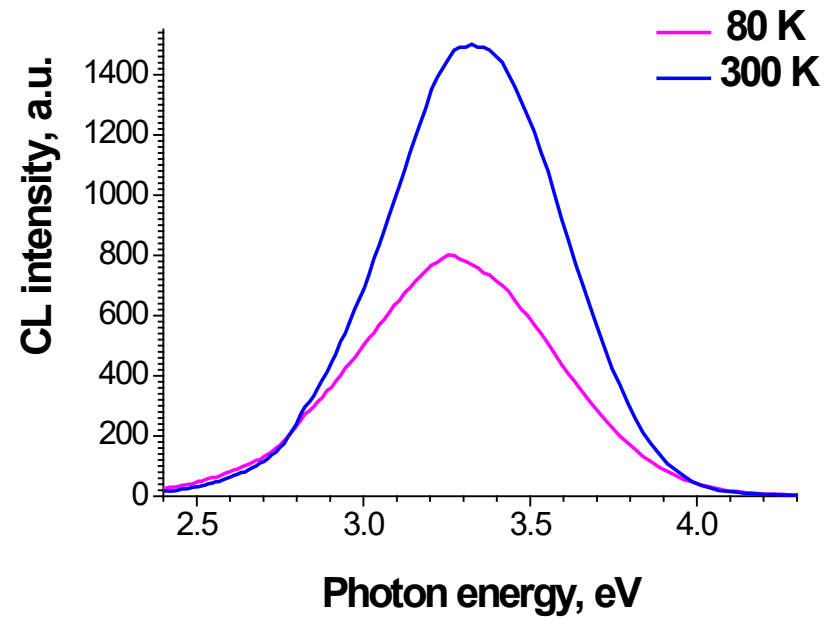


Gaussian component		α -Ga ₂ O ₃			β -Ga ₂ O ₃			κ-Ga ₂ O ₃		
/ Band assignment		PP (eV)	<i>W</i> _{FWHM} (eV)	<i>I</i> (norm)	PP (eV)	<i>W</i> _{FWHM} (eV)	<i>I</i> (norm)	PP (eV)	<i>W</i> _{FWHM} (eV)	<i>I</i> (norm)
1	RL	1.5	0.5875	0.00349	1.61	0.29375	1.6129E-4	1.5	0.41125	0.00206
2	RL	1.93	0.3525	0.02362	2.25	0.50525	0.00435	2.1	0.41125	0.05672
3	GL	2.3	0.31725	0.11014	2.65	0.41125	0.04225	2.33	0.282	0.17211
4	BL	2.52	0.2585	0.20409	2.94	0.29375	0.11157	2.51	0.188	0.15469
5	BL	2.93	0.52875	1	3.19	0.047	0.00792	2.81	0.5875	1
6	BL	3.18	0.12925	0.04778	3.28	0.43475	1	3.15	0.27025	0.03431
7	UVL	3.34	0.27025	0.07686	3.49	0.02938	0.00296	3.65	0.235	0
8	UVL	3.63	0.235	0.00696	3.57	0.22325	0.12265	3.8	0.47	4.64E-4

КЛ Ga_2O_3



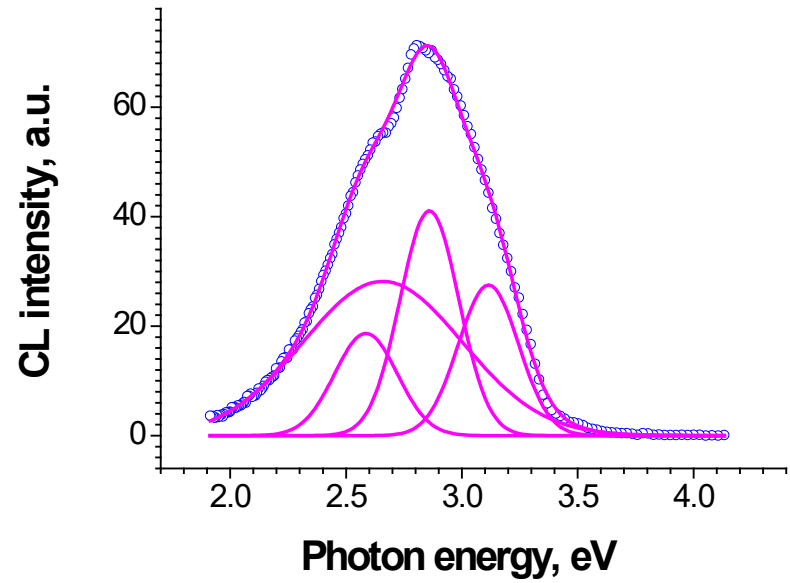
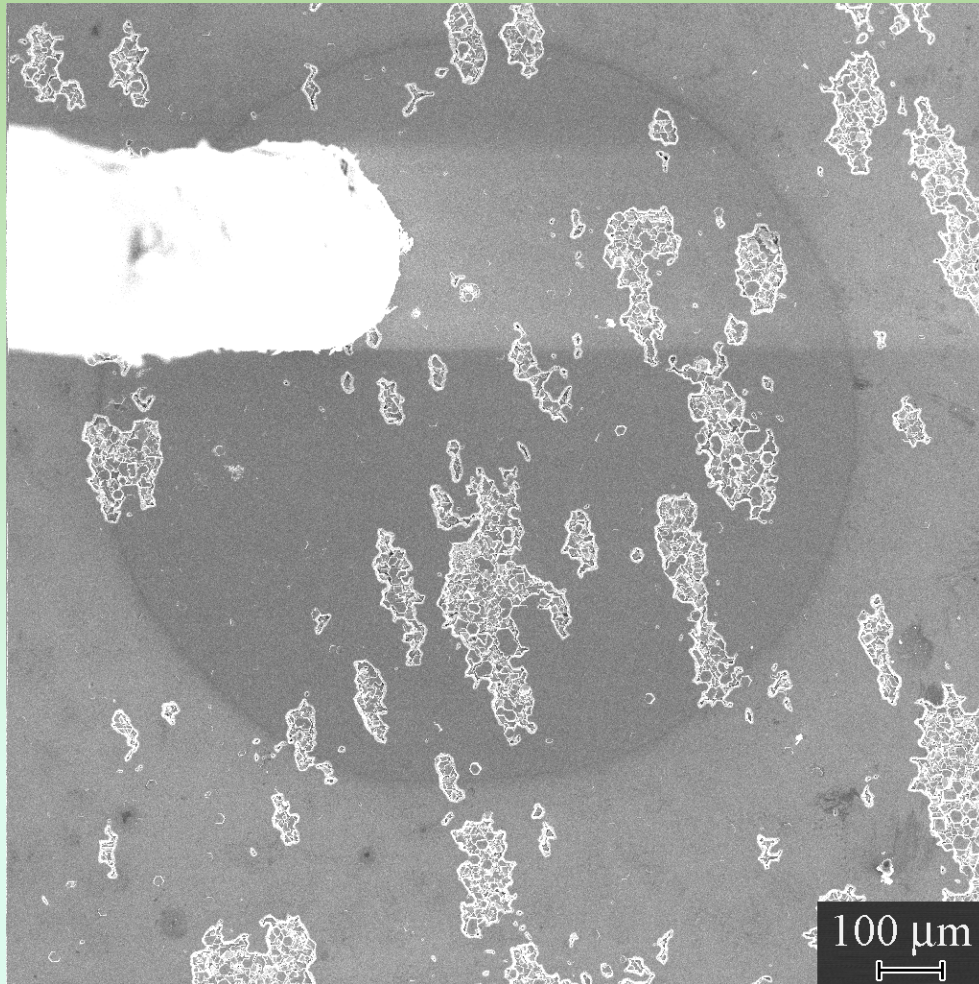
$\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$



$\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$

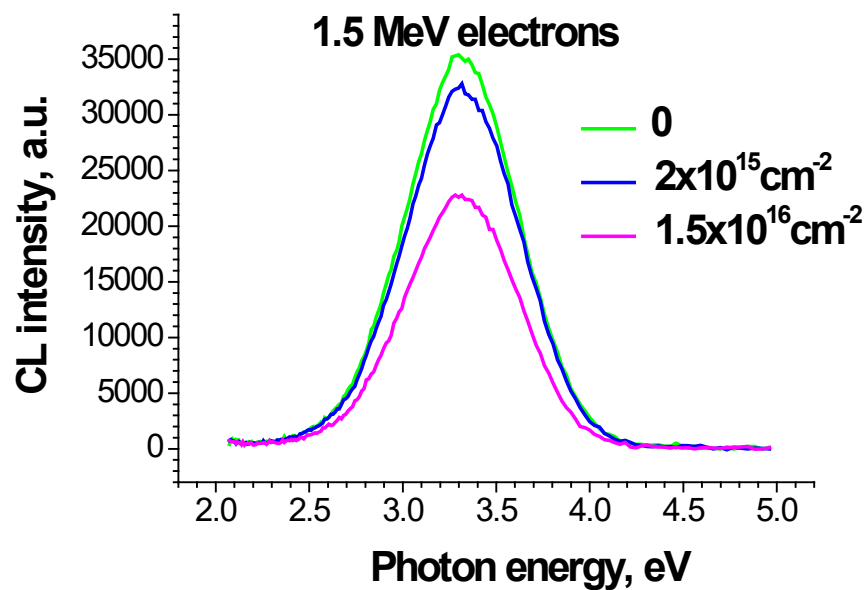
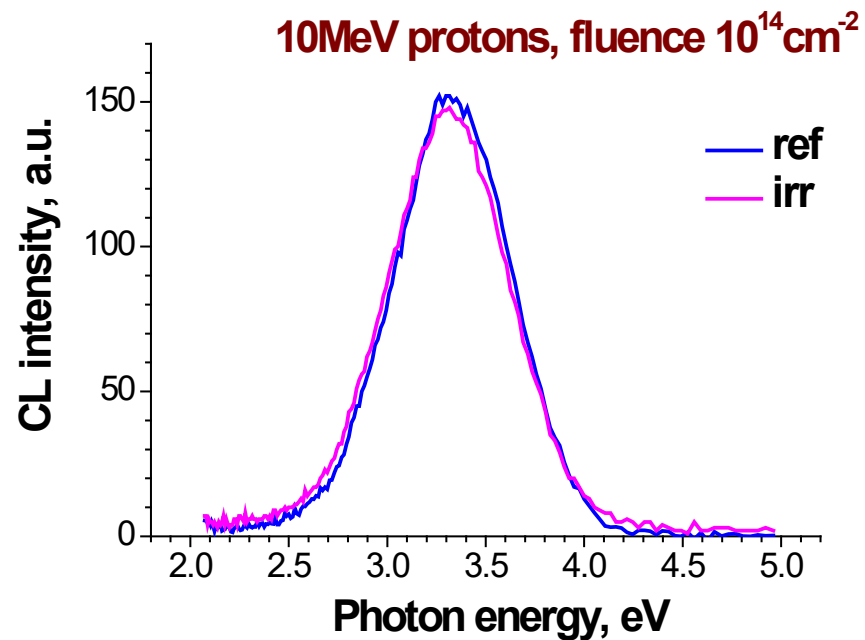
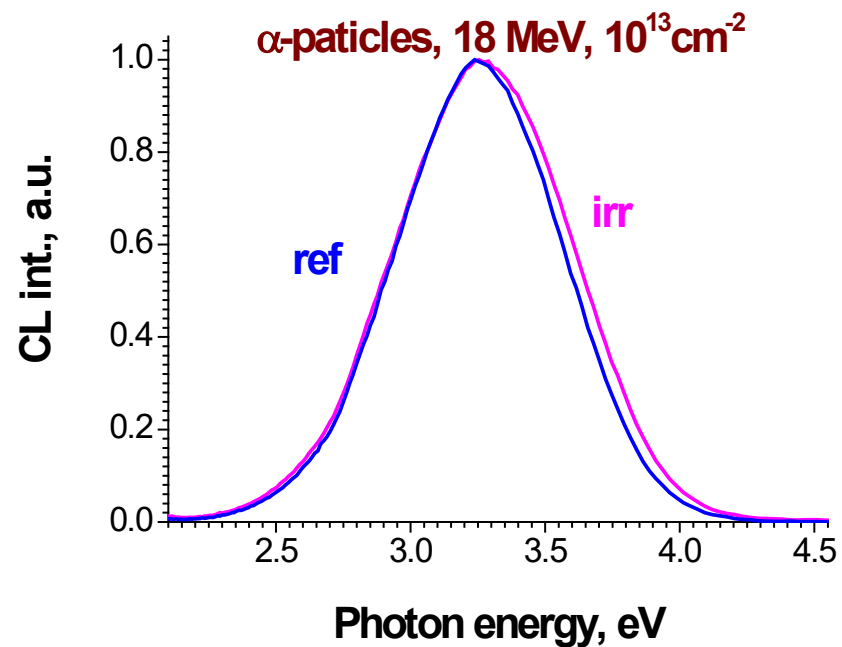
УФ полоса слабо зависит от примесей и обработок – автолокализованные дырки?
Голубая полоса – донорно-акцепторные пары (вакансии кислорода?)

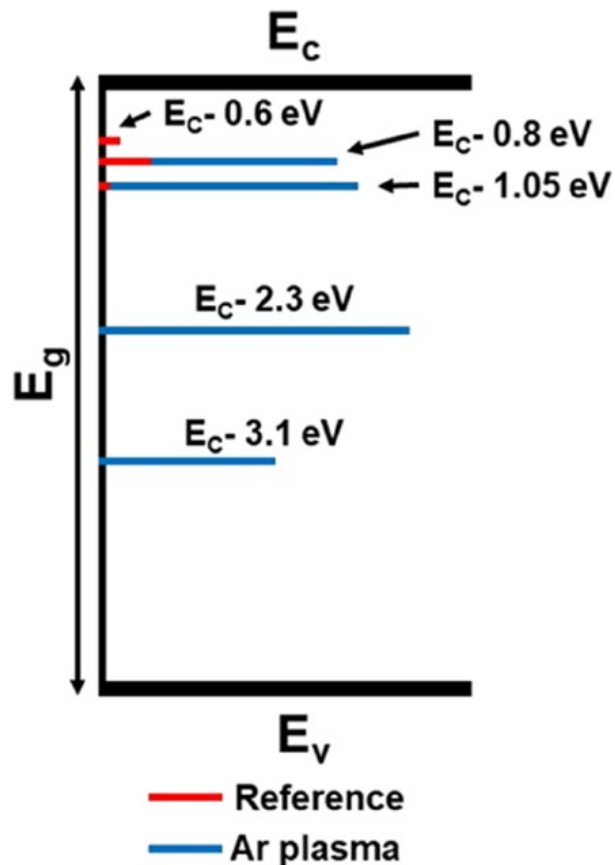
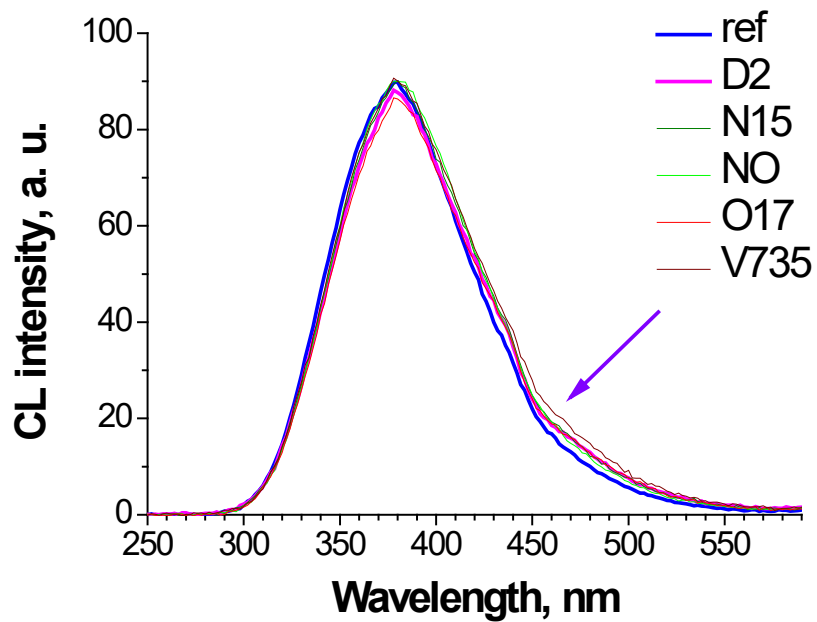
κ -Ga₂O₃



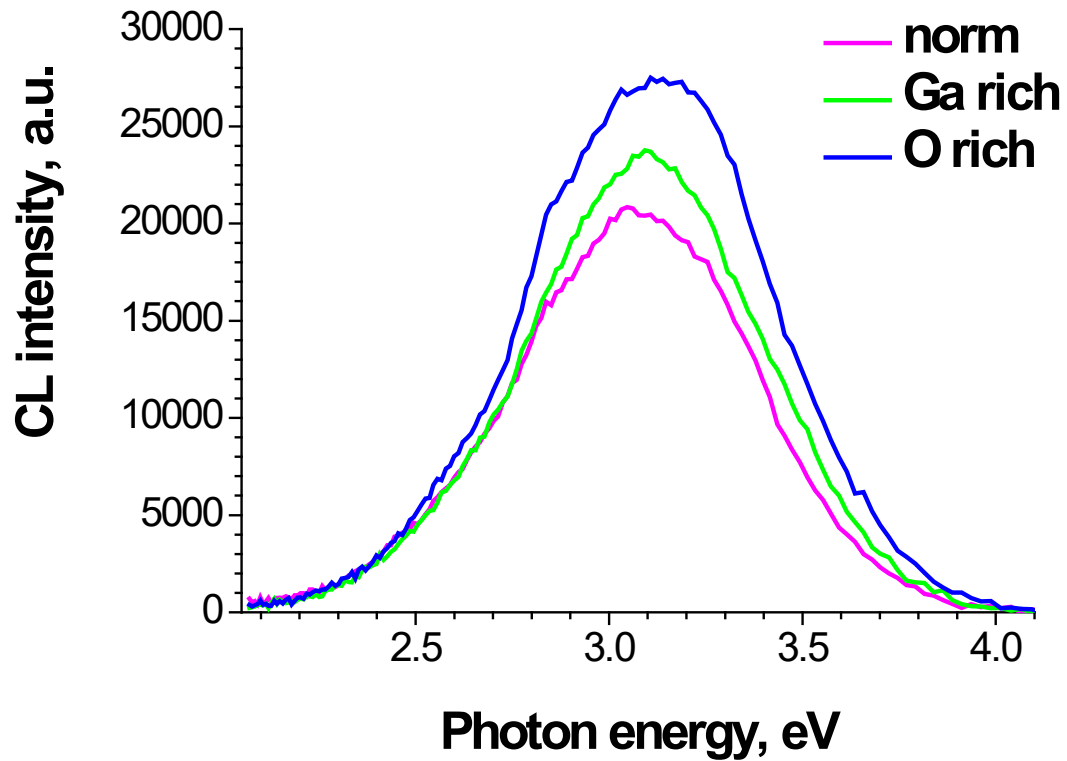
Орторомбический, сегнетоэлектрик

$\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$

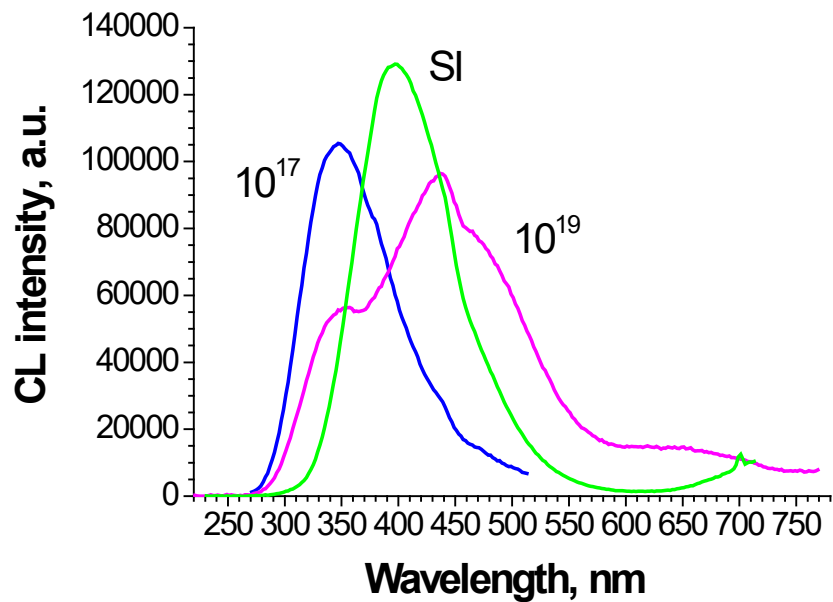




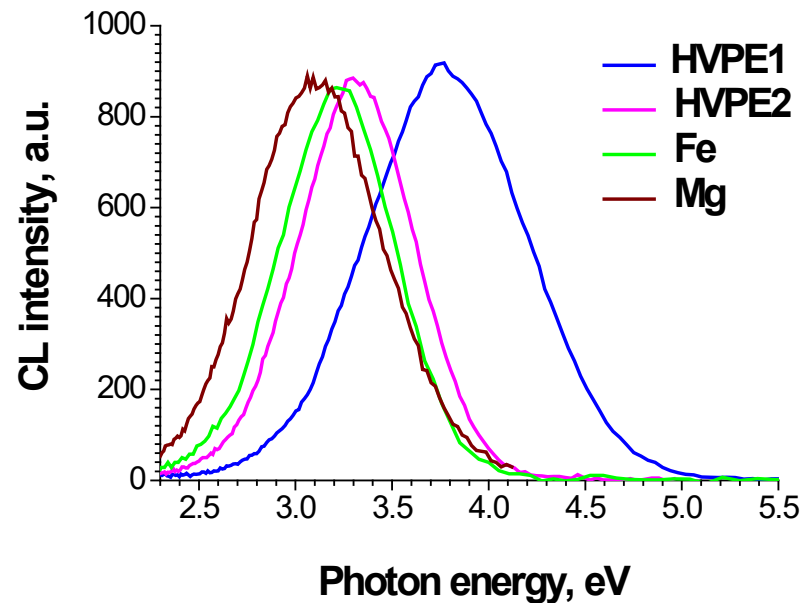
Энергетические уровни до и после обработки в плазме Ar



КЛ Ga_2O_3



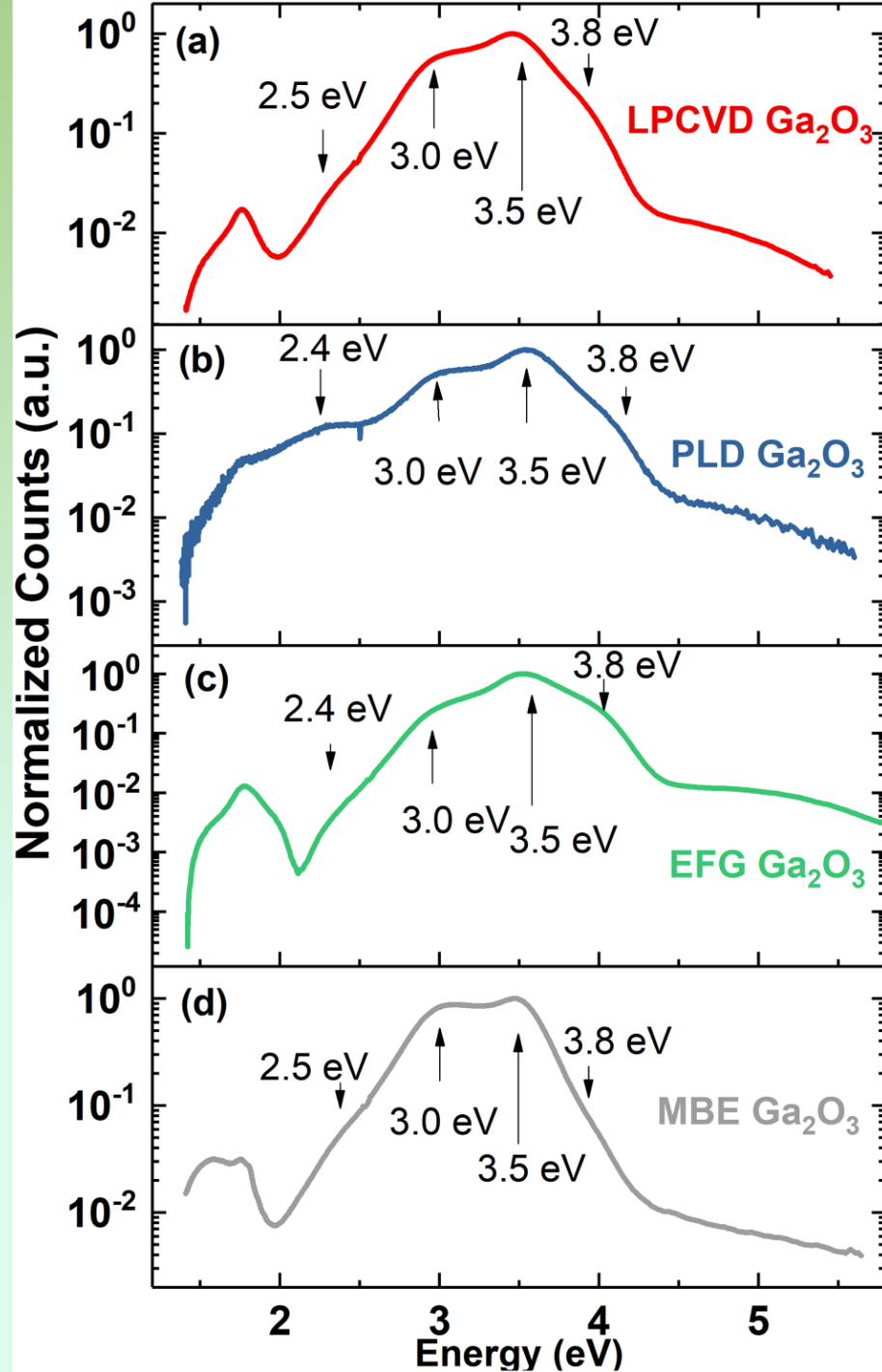
$\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$



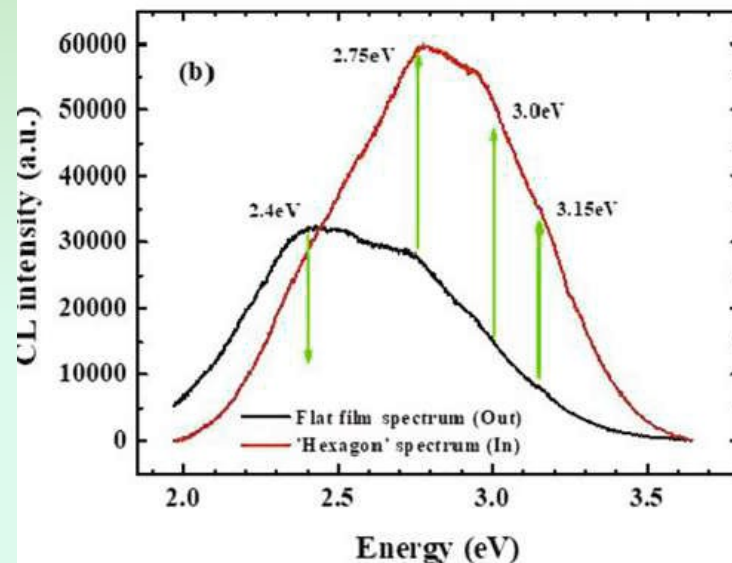
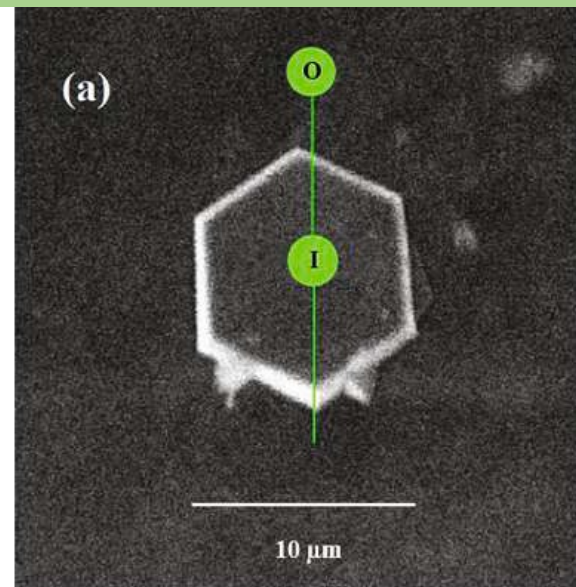
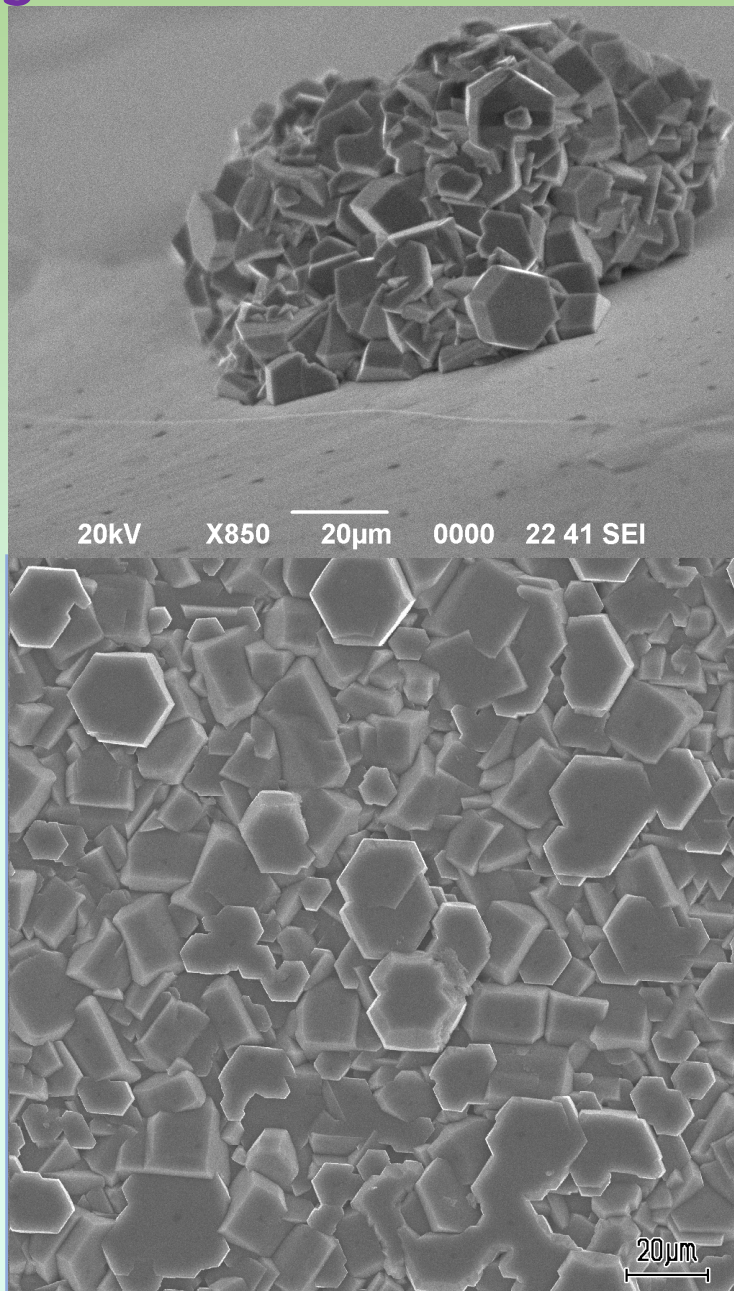
$\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$

В полосы люминесценции могут вносить вклад разные дефекты

КЛ β -Ga₂O₃

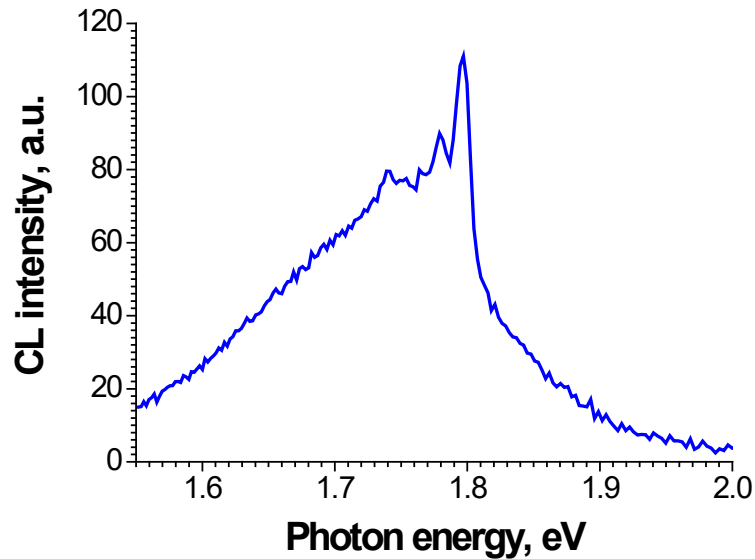


$\kappa\text{-Ga}_2\text{O}_3$

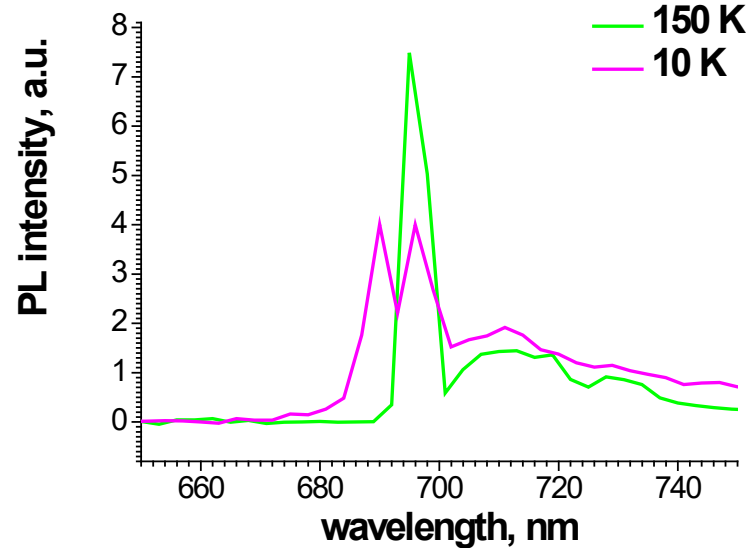


Спектры измерены в точках 0 и 1 вдоль зеленой линии

$\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3\text{:Fe}$

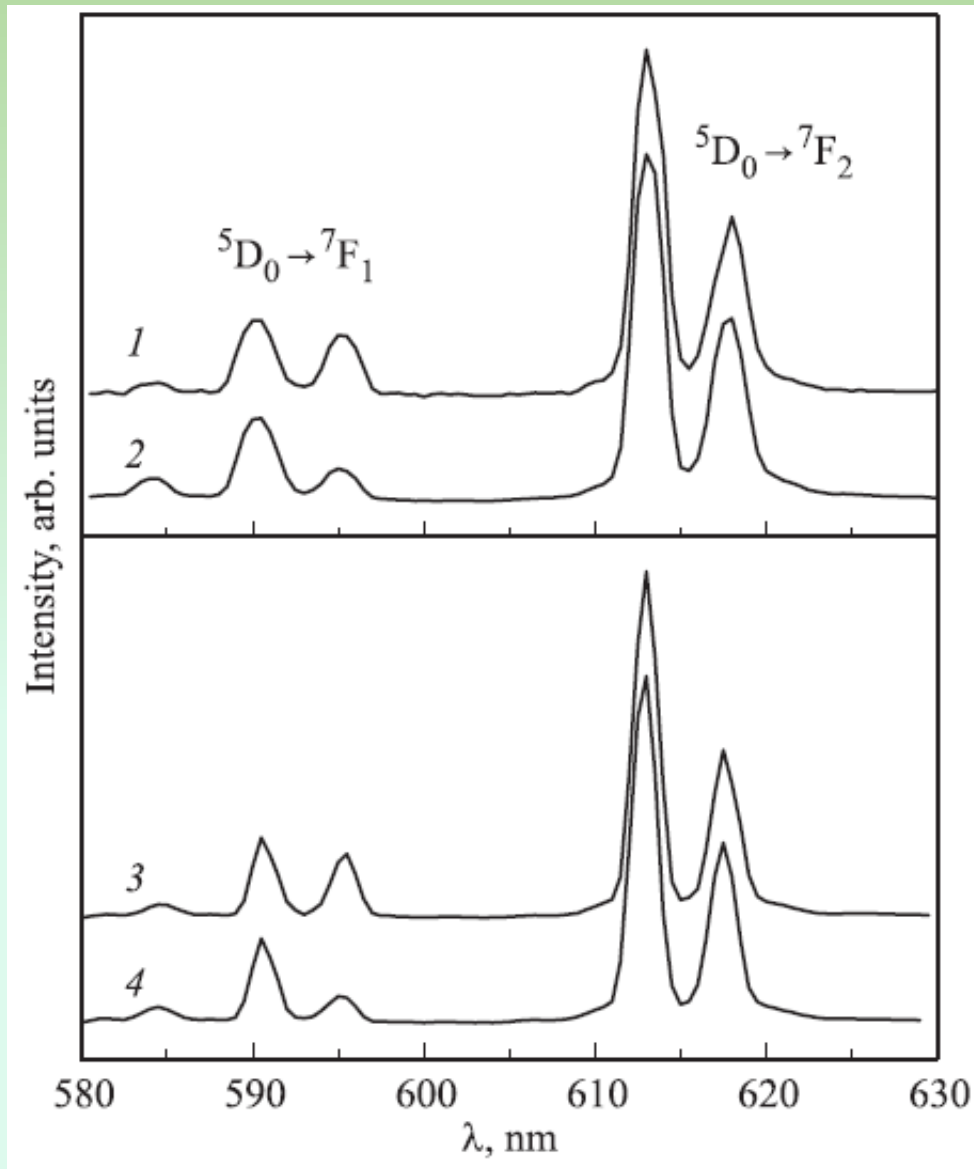


КЛ: внутрицентровый переход Fe в $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$

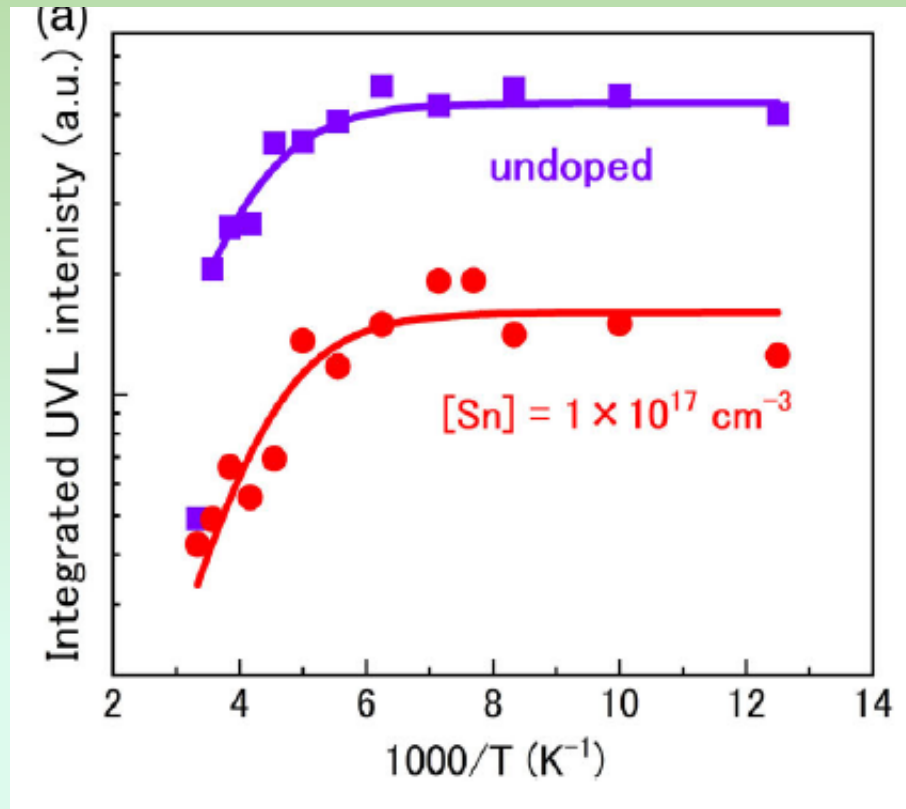


ФЛ

Внутрицентровый переход в европии в микрокристаллах $\text{EuAl}_3(\text{VO}_3)_4$



Температурная зависимость КЛ β -Ga₂O₃



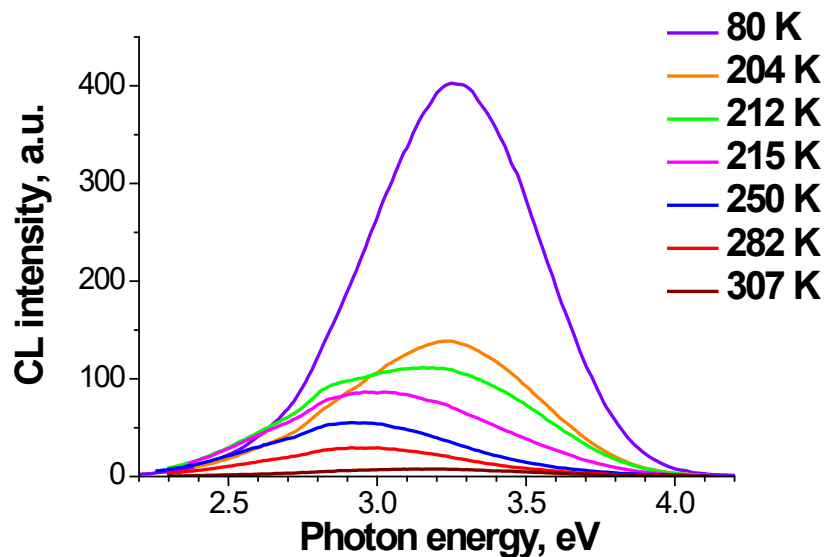
3.7 эВ

Из зависимости

110 ± 40 мэВ

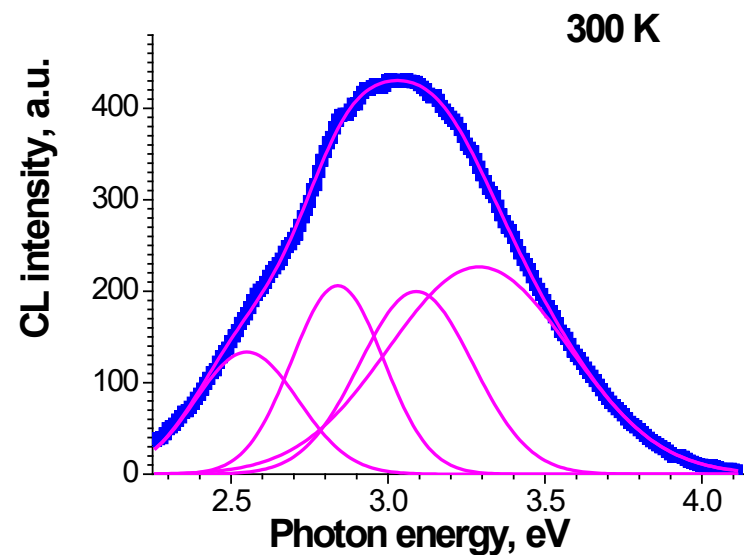
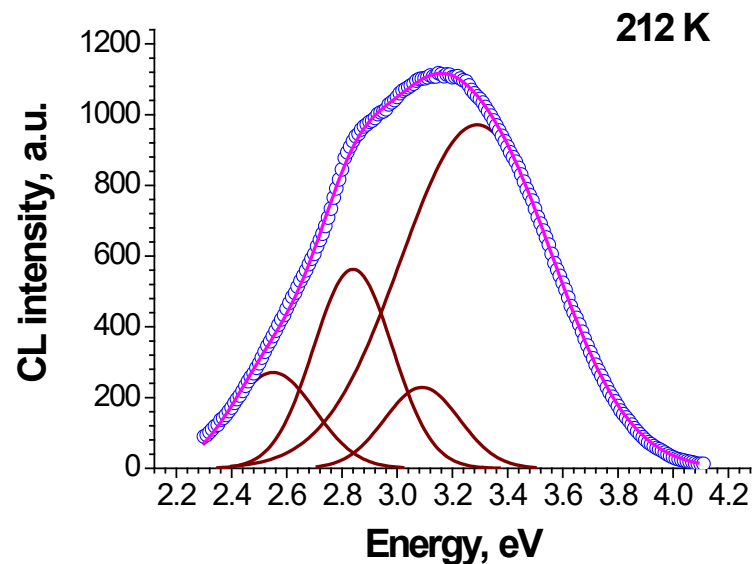
$$I(T) = \frac{I(0)}{1 + C \exp(-\frac{E}{kT})}$$

$\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3\text{:Mg}$

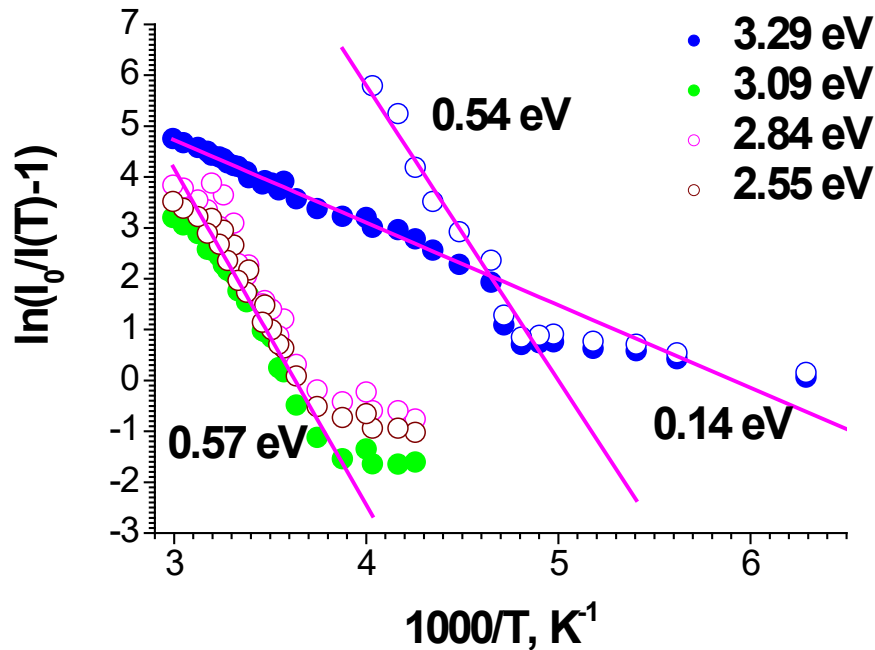


Температурная зависимость спектров КЛ

Разложение на 4 гауссовых пика с энергиями 2.55, 2.84 eV, 3.09 and 3.29 eV



$\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3\text{:Mg}$

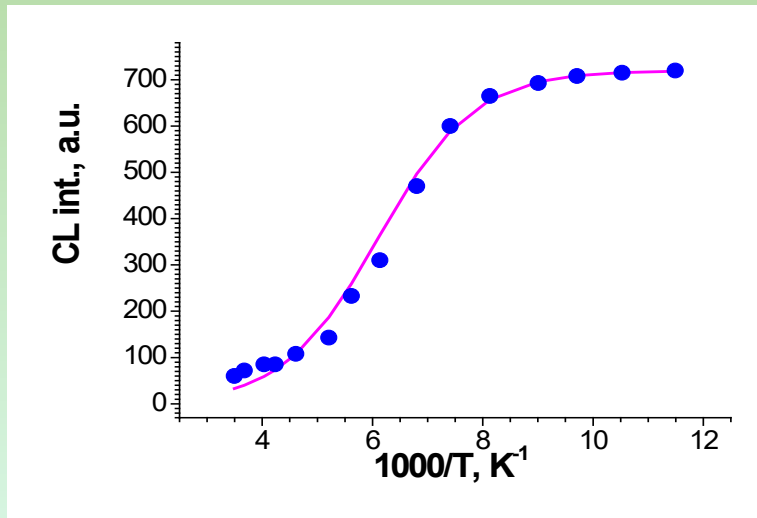


$$I(T) = \frac{I_0}{1 + A \exp(-\Delta E / kT)}$$

$$\ln\left[\frac{I_0}{I(T)} - 1\right] = \ln A - \Delta E / kT$$

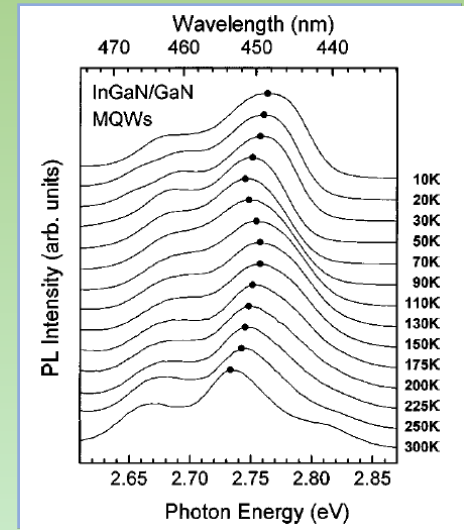
Если эти полосы связаны с донорно-акцепторными парами, то доноры имеют энергии 0.54 и 0.57 эВ от дна зоны проводимости, а акцепторы ~ 1 эВ от потолка валентной зоны.

Температурная зависимость КЛ МКЯ InGaN/GaN

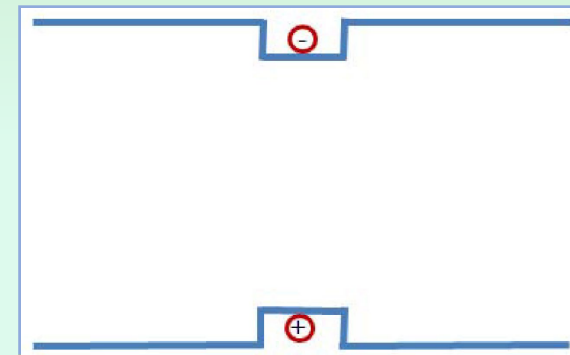


$$[1 + A \cdot \exp(-\Delta E/k_B T)]^{-1} \quad \Delta E \sim 100 \text{ mV}$$

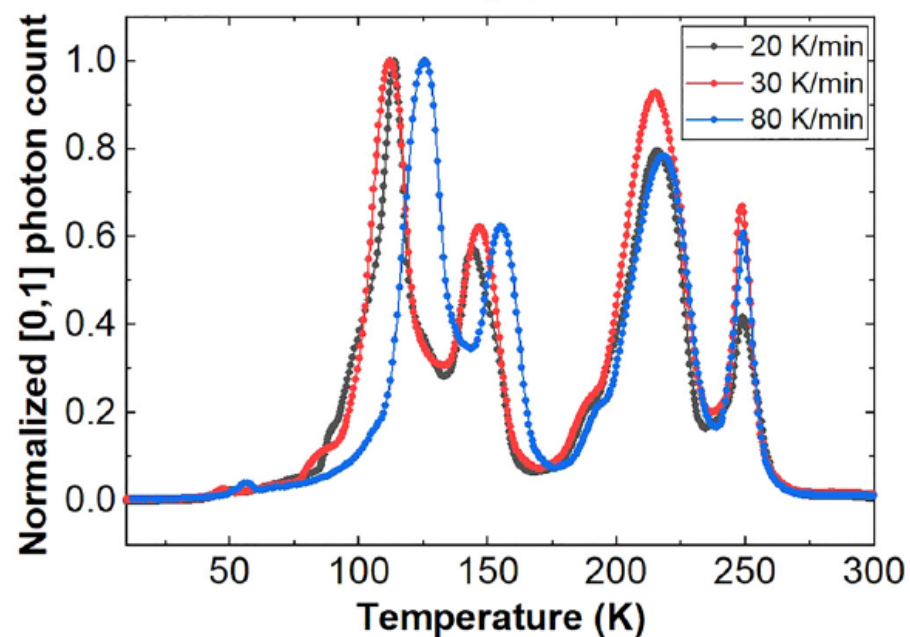
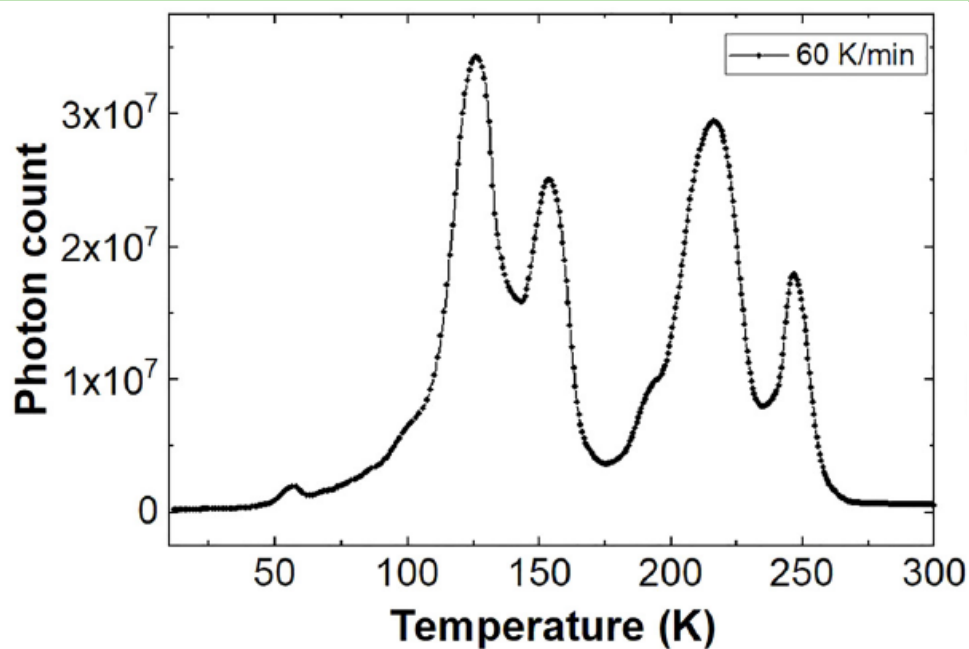
**Можно оценить энергию
локализации**



Y.-H. Cho et al, Appl. Phys. Lett.,
73, 1370, 1998



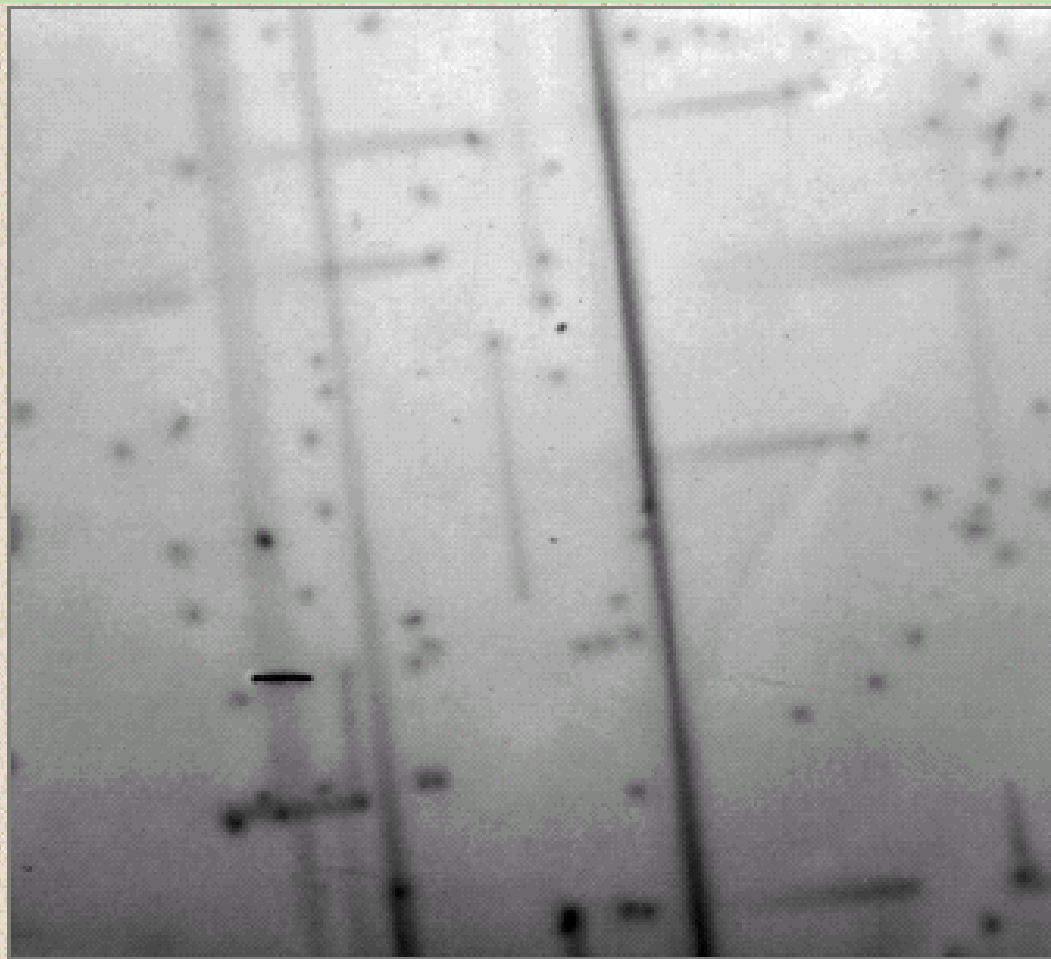
Термостимулированная КЛ



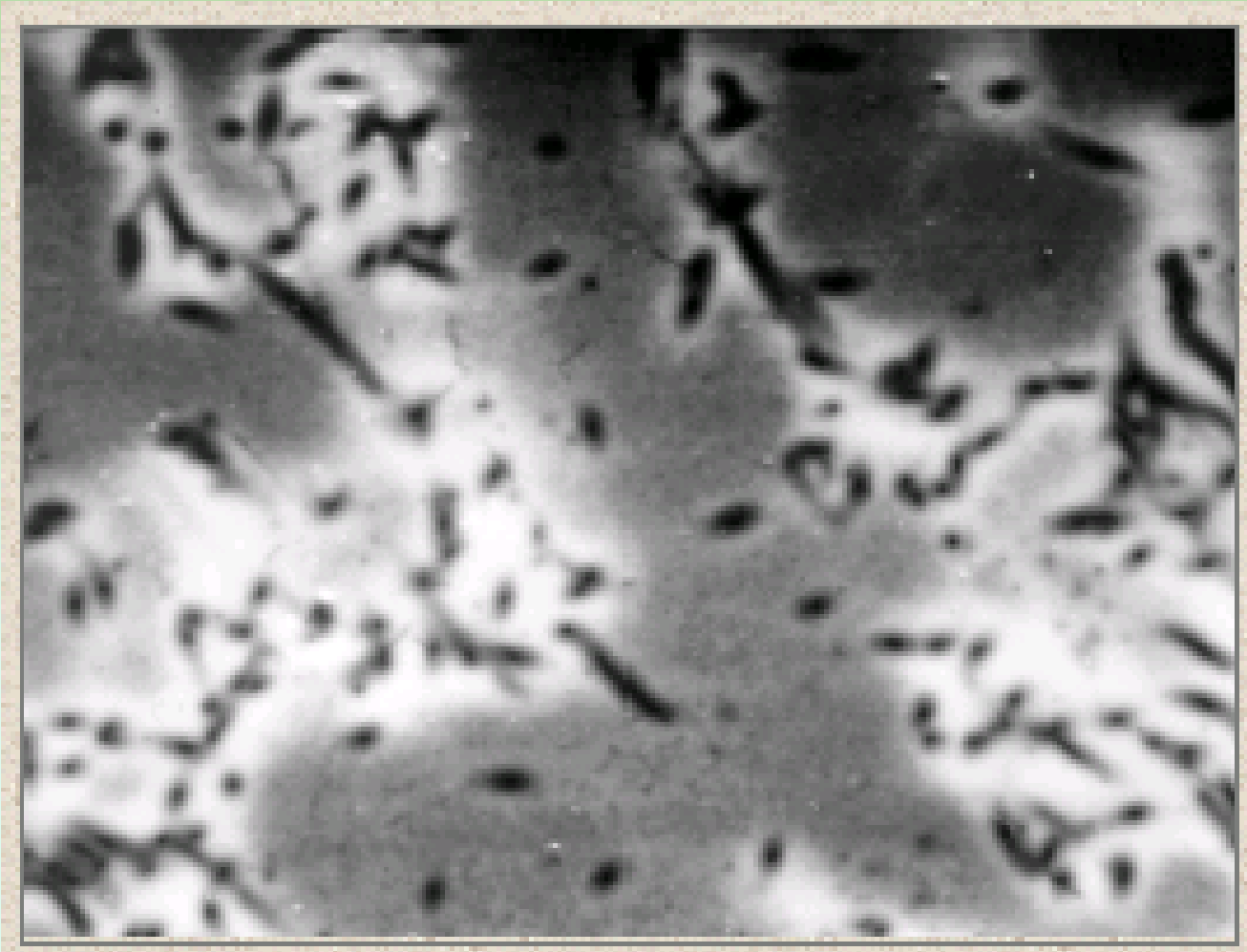
КЛ - активатор

Выявление и исследование протяженных дефектов

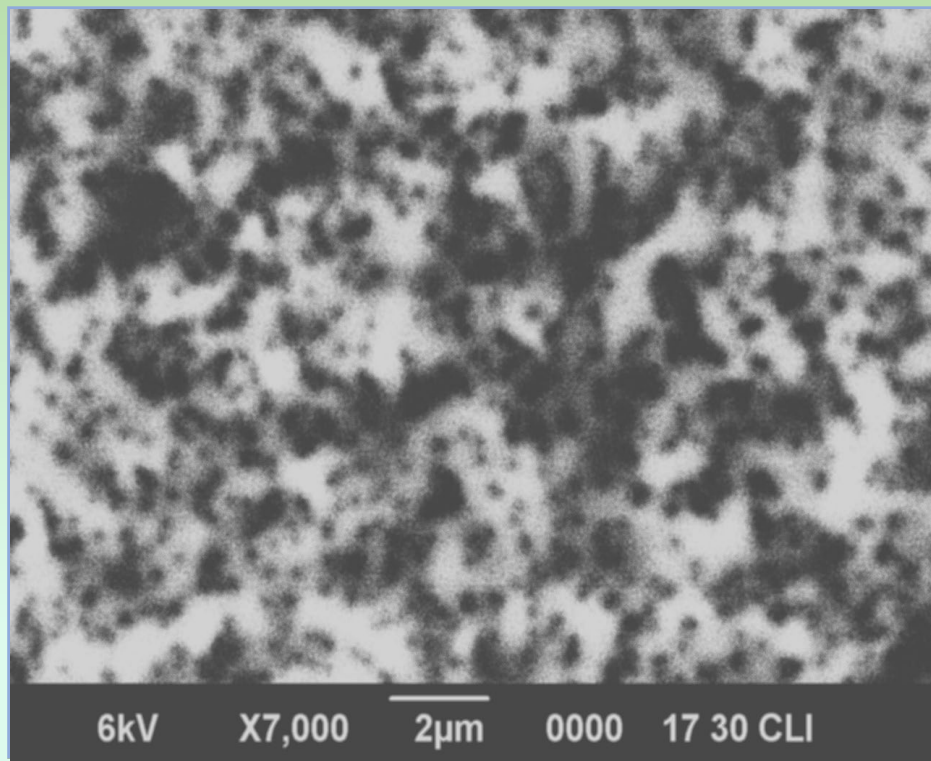
Дислокации в гетероструктуре GaAsP/GaAs в режиме КЛ



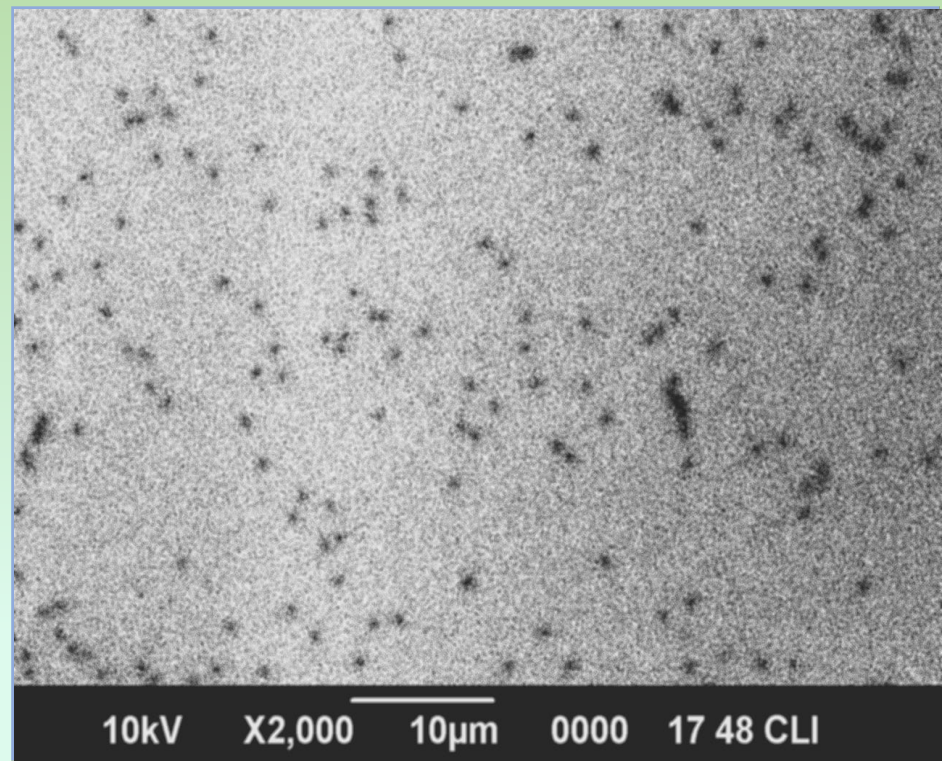
Ростовые дислокации в GaAs в режиме КЛ



Панхроматическое КЛ изображение дислокаций

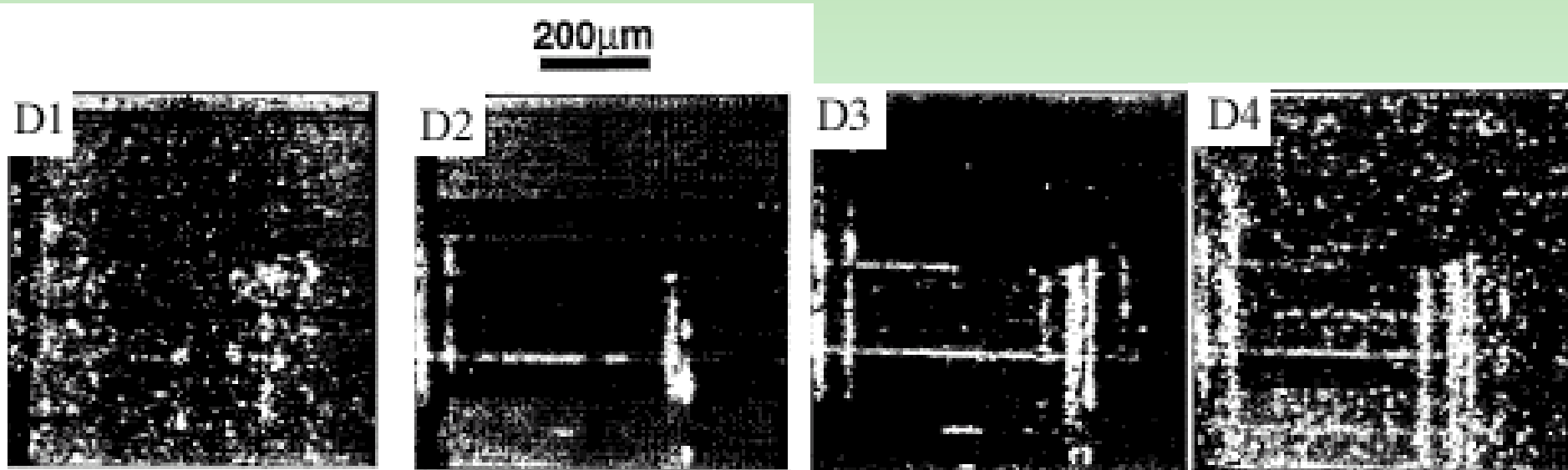


InGaN/GaN MQW



HVPE GaN

Дислокации несоответствия в SiGe/Si в режиме КЛ



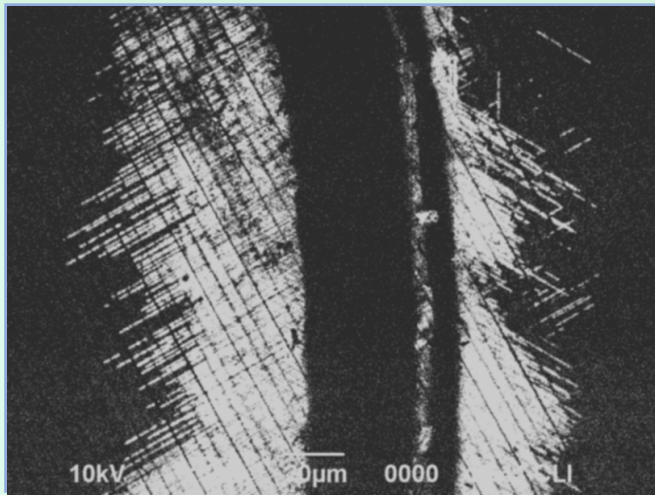
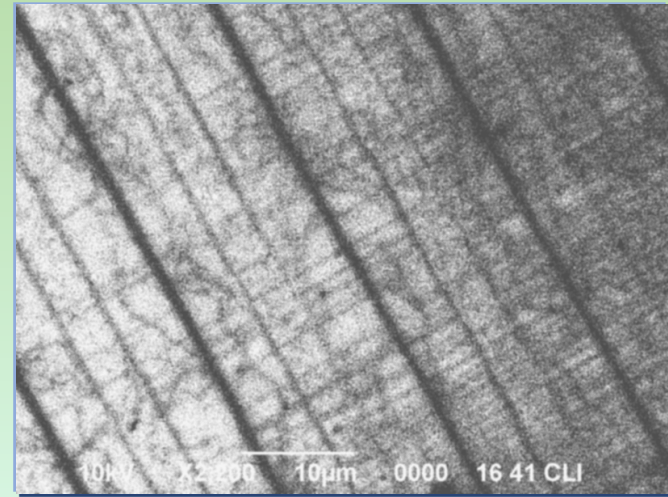
Mater. Sci. Engineer. **B42**, 141, 1996

Дислокации, введенные в ELOG GaN при комнатной температуре

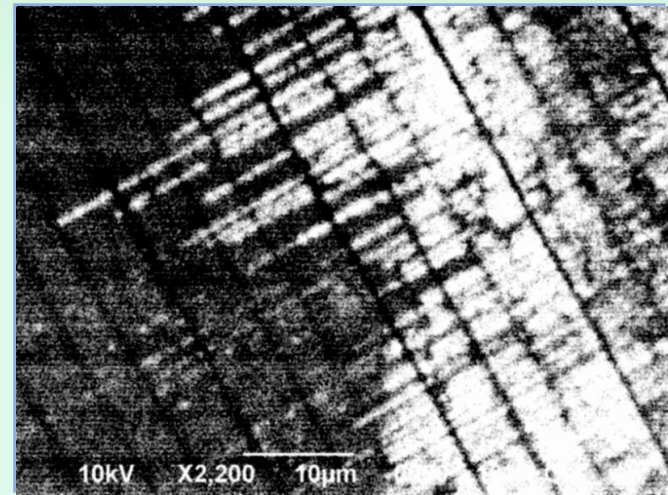


SE

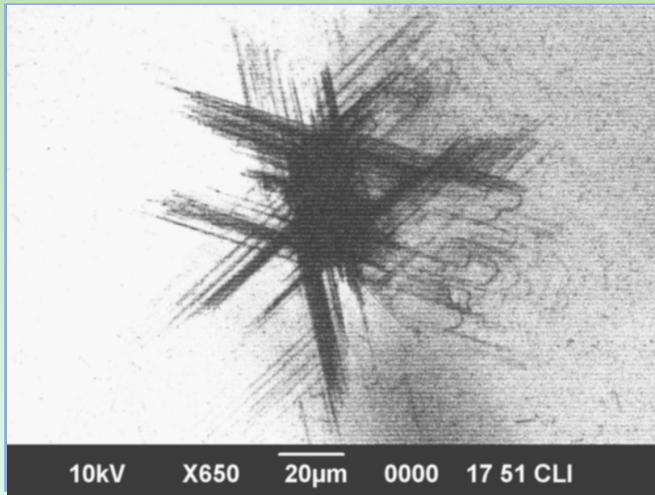
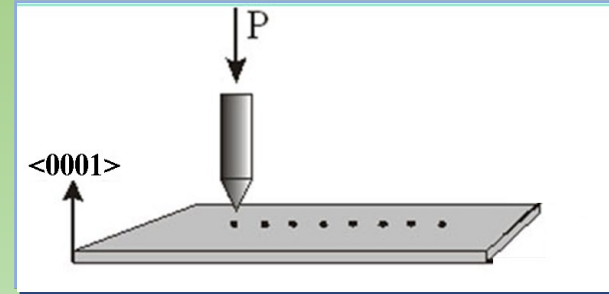
365 nm



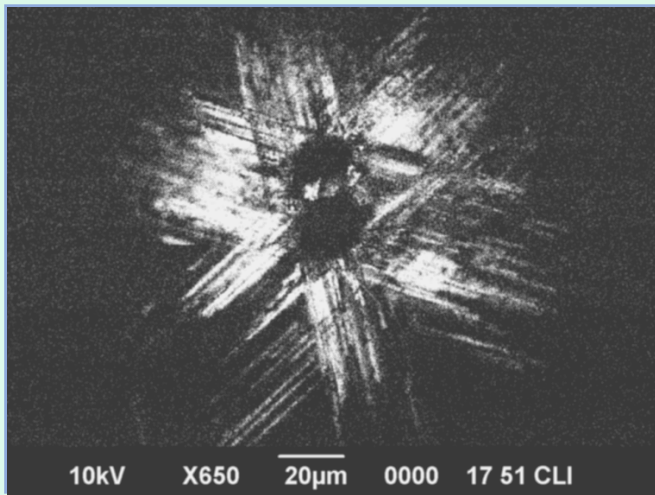
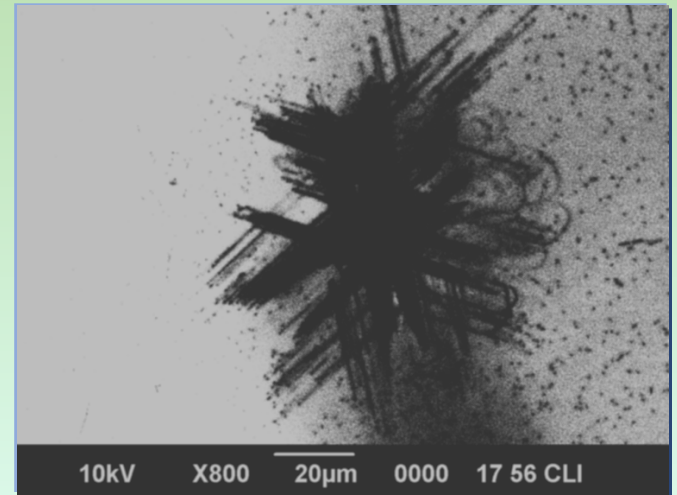
400 nm



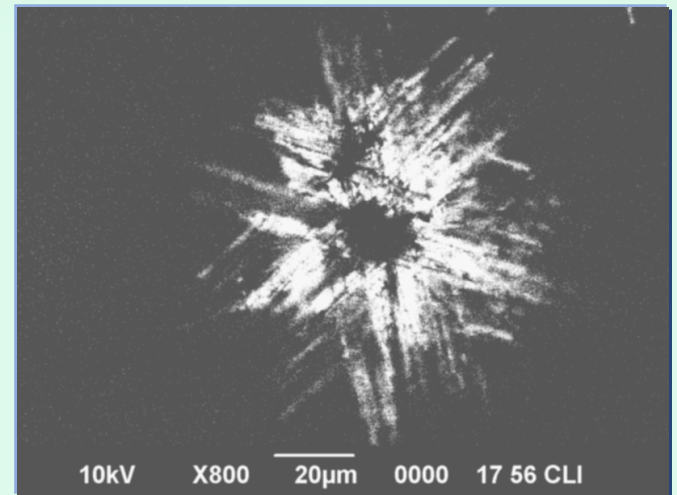
Дислокации, введенные в GaN при комнатной температуре



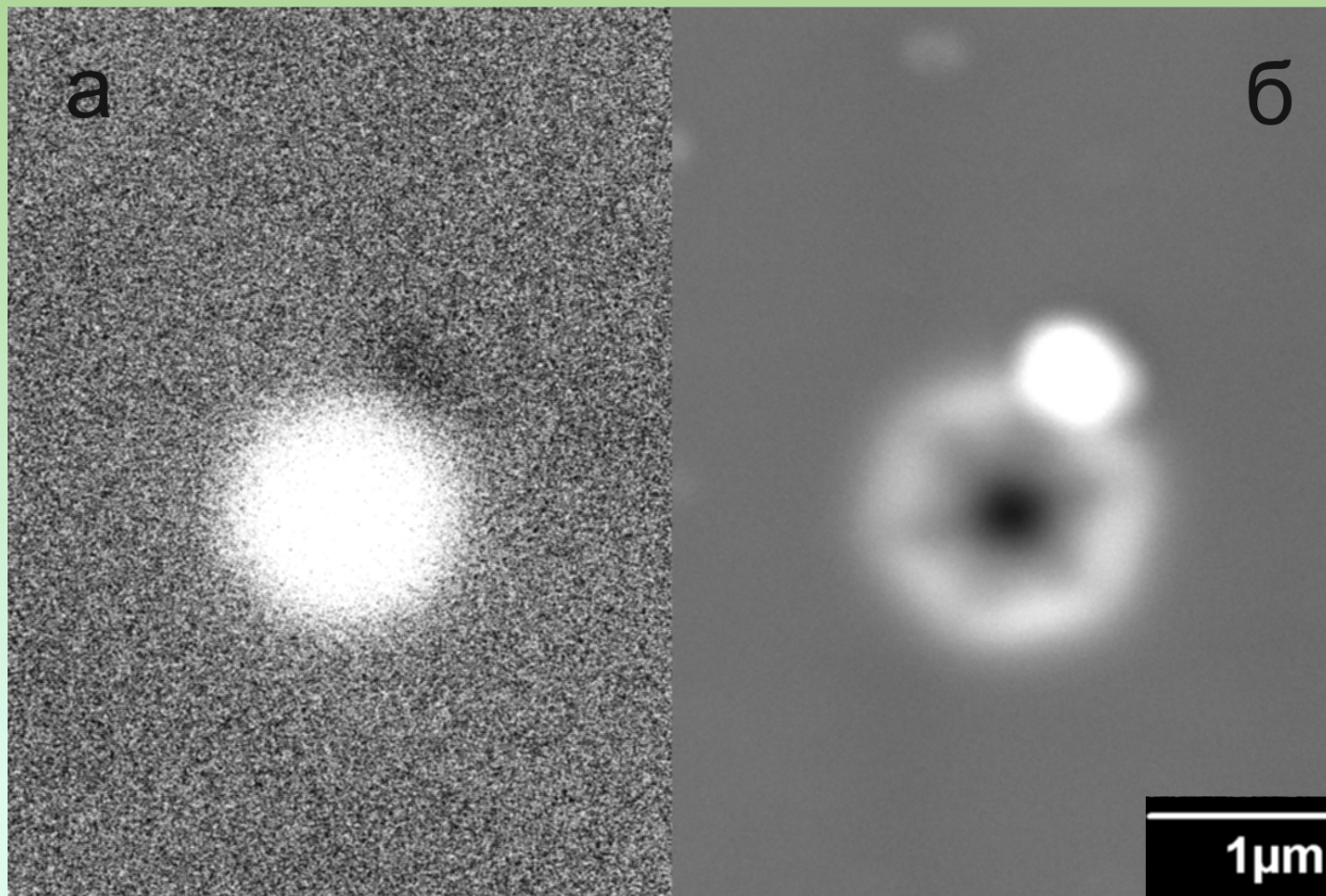
365 nm



403 nm

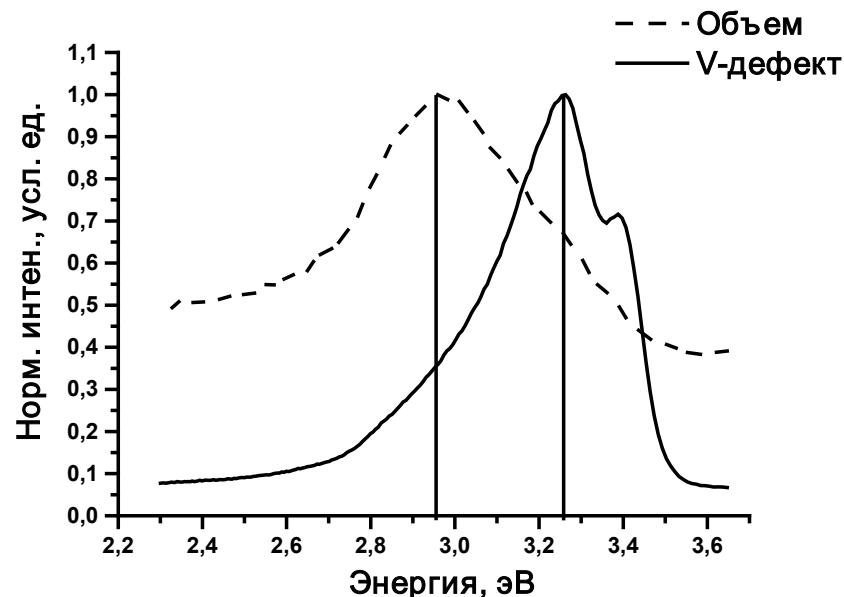
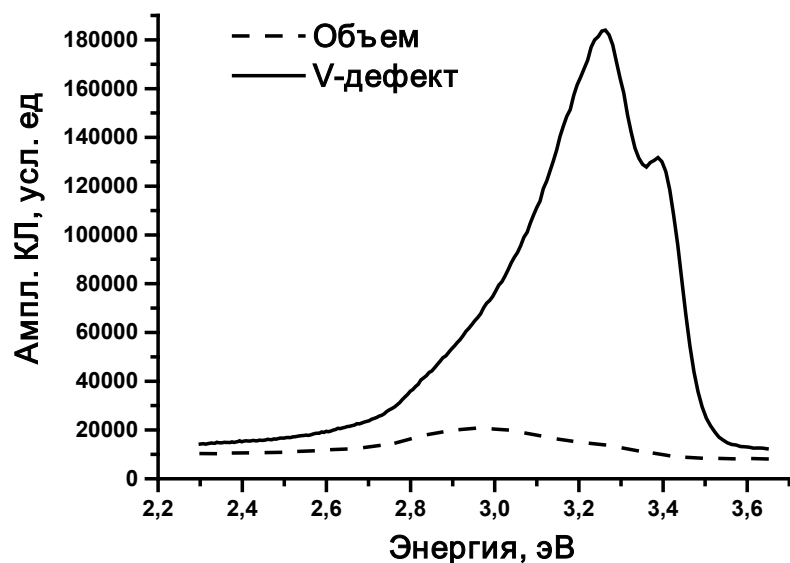


V-дефекты в GaN p-типа



Изображение одиночного V-дефекта большим увеличением в разных режимах: а – КЛ изображение при регистрации фотонов с энергией 3.24 эВ; б – изображение в режиме ВЭ.

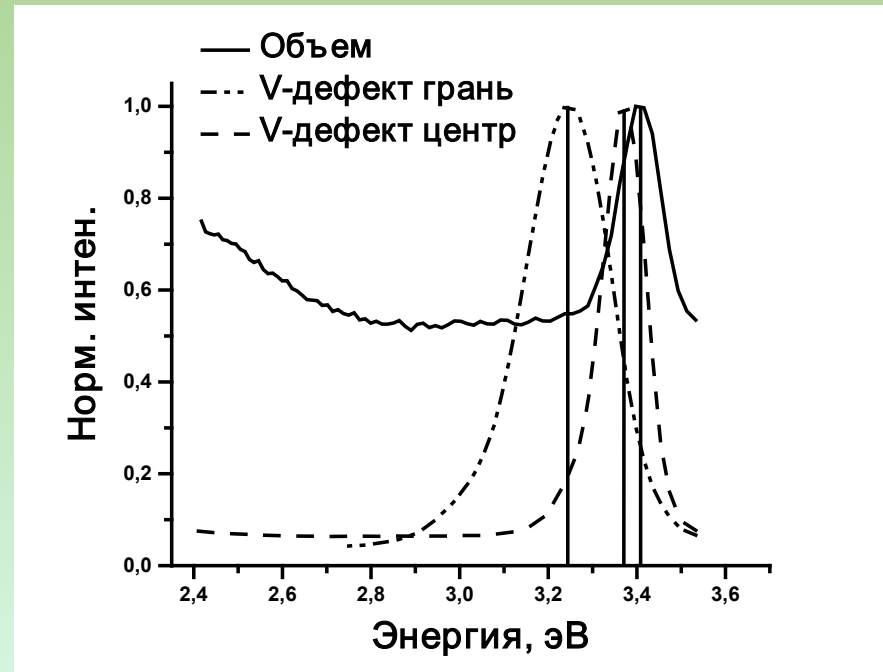
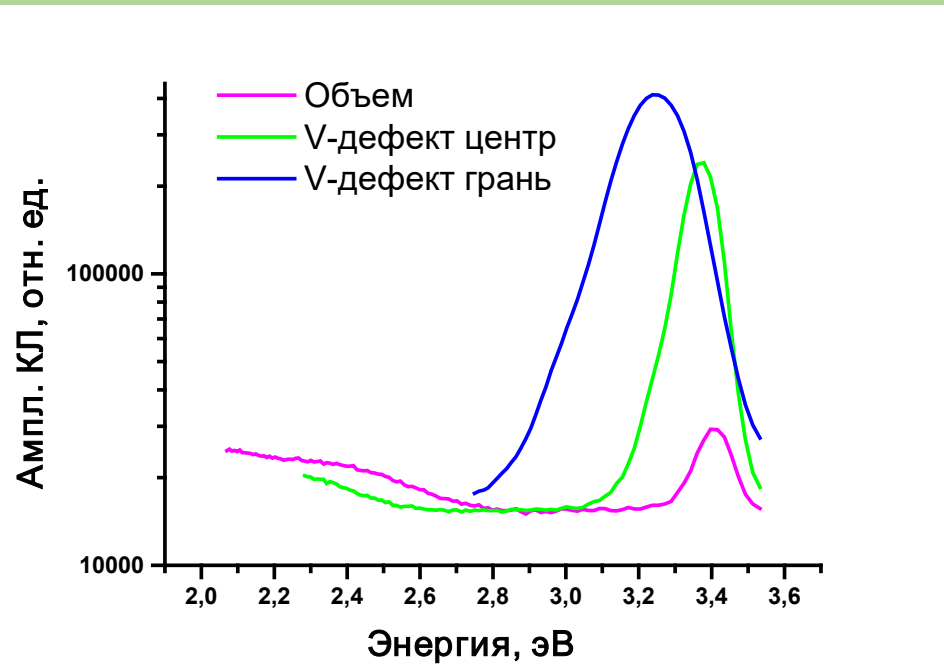
V-дефекты в GaN p-типа



Спектры КЛ для GaN p-типа, полученные вдали от V-дефекта и в его центре. Справа нормированные спектры КЛ. Спектры были получены при одном и тоже токе пучка и ускоряющем напряжении.

В области V-дефекта наблюдается подавление излучения в диапазоне энергий 2.7-3.1 эВ.

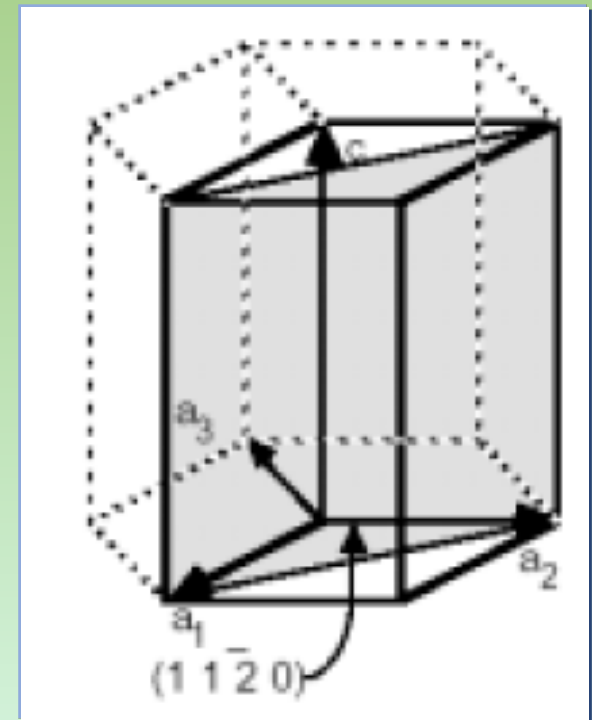
V-дефекты в GaN n-типа



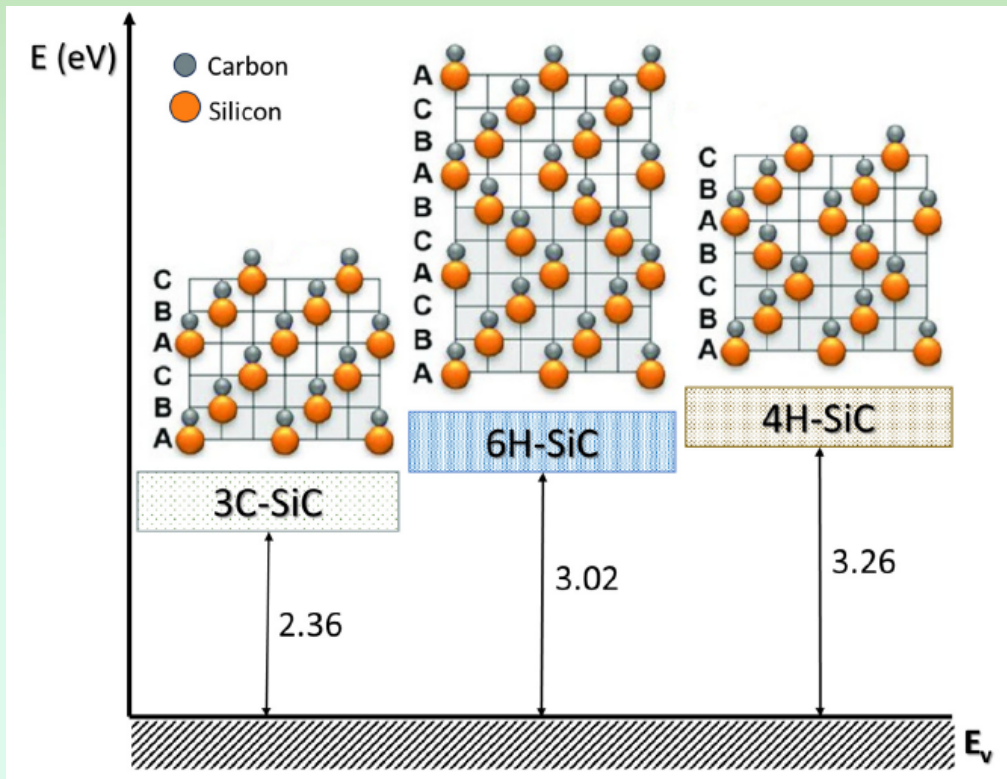
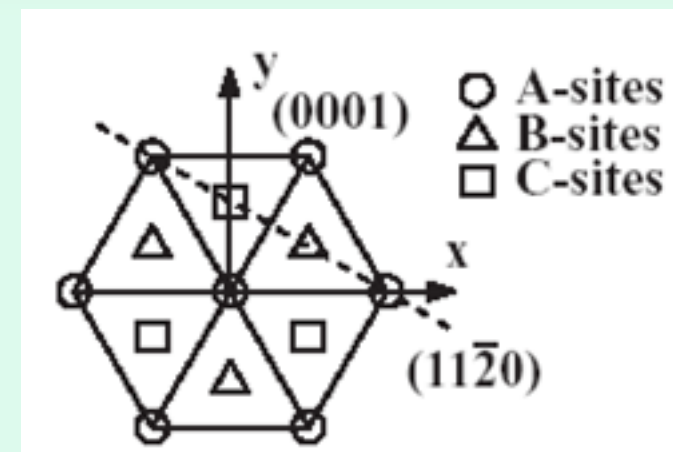
Спектры КЛ для GaN n-типа, полученные вдали от V-дефекта, на его грани и в его центре. Справа нормированные спектры КЛ.

Наблюдается смещение положения максимума интенсивности КЛ в красную область.

Дефекты упаковки в 4H-SiC

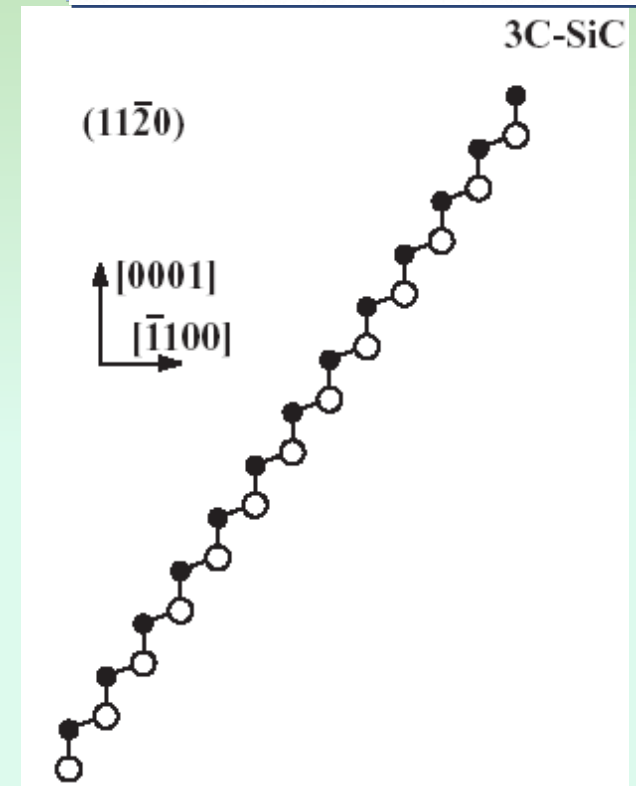
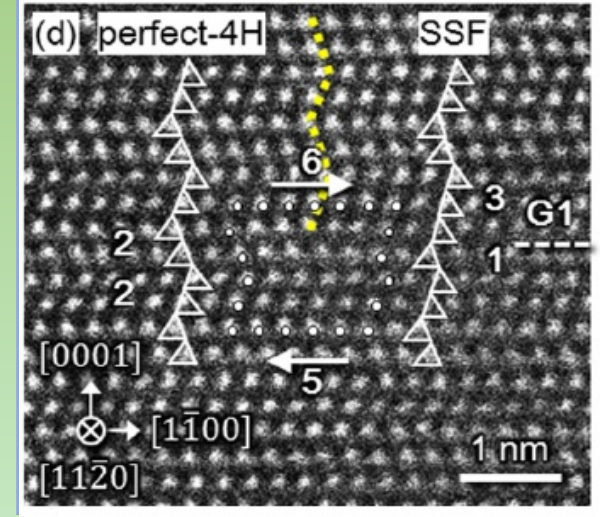
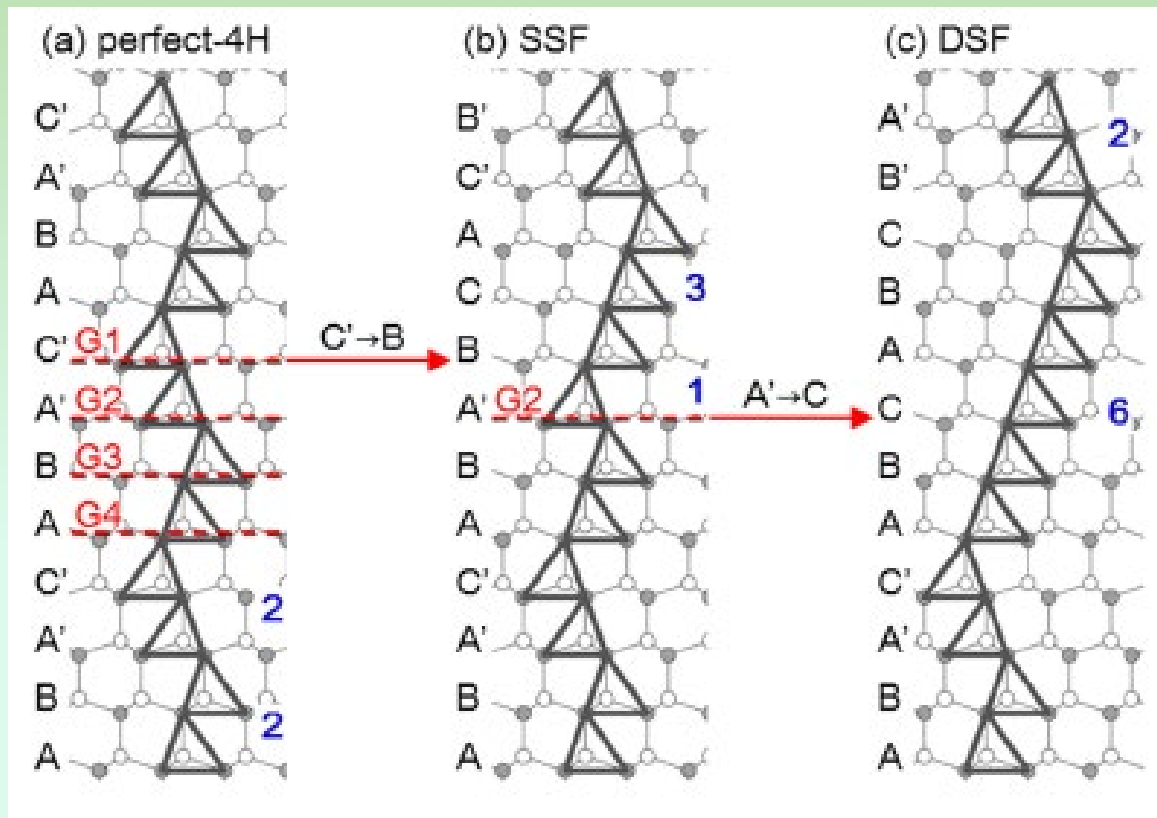


плоскость (11-20)

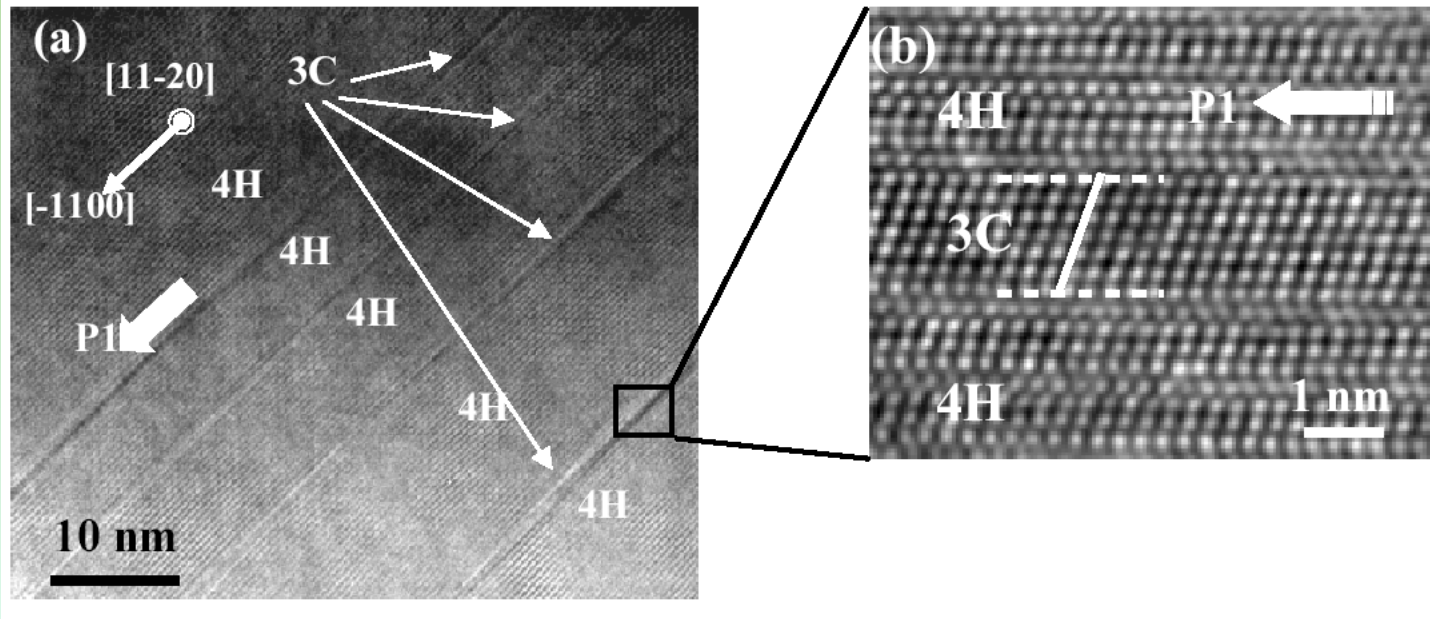


Дефекты упаковки в 4H-SiC

плоскость (11-20)

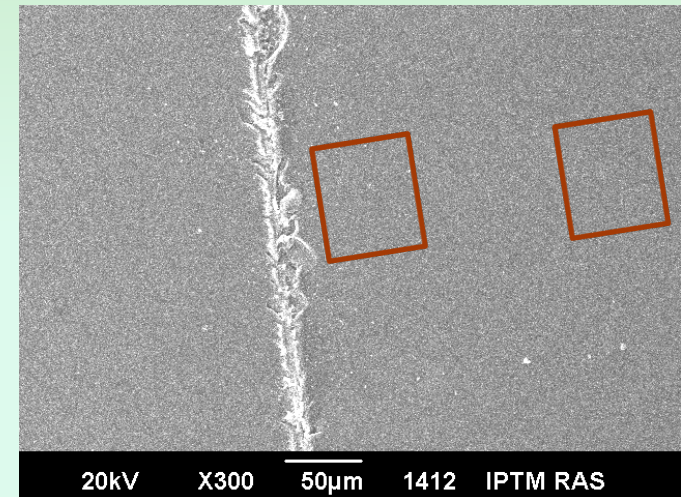
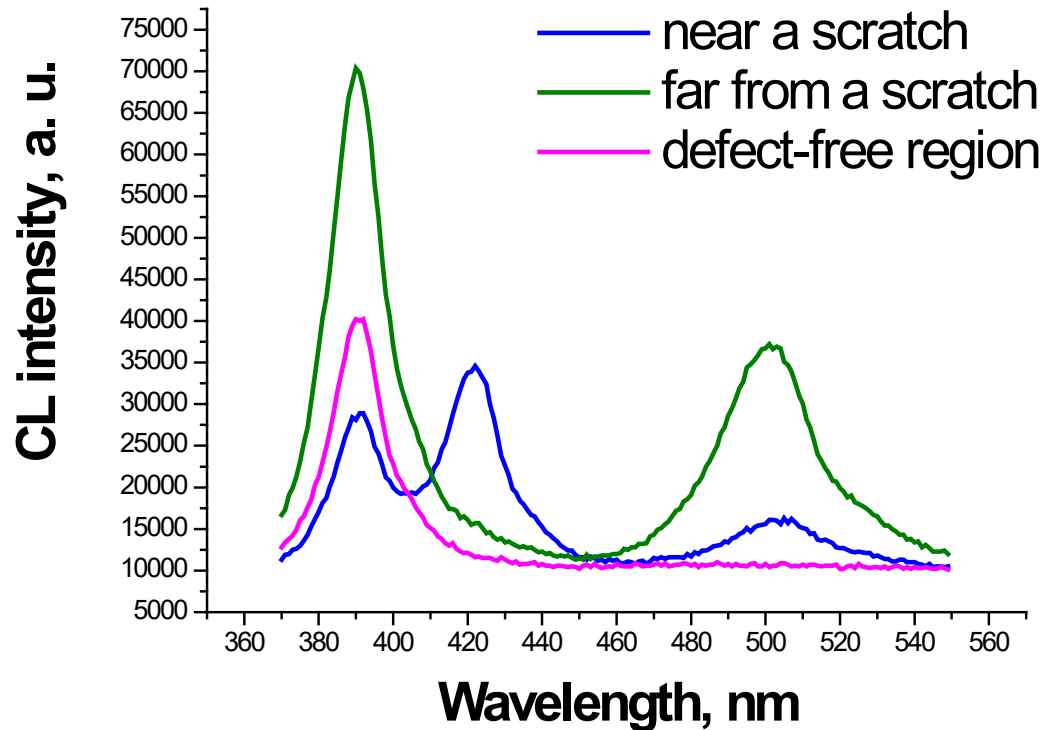
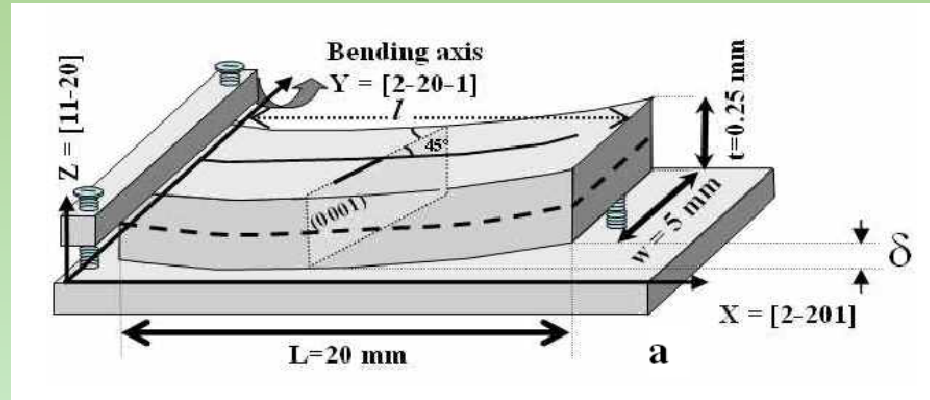


Дефекты упаковки в 4H-SiC

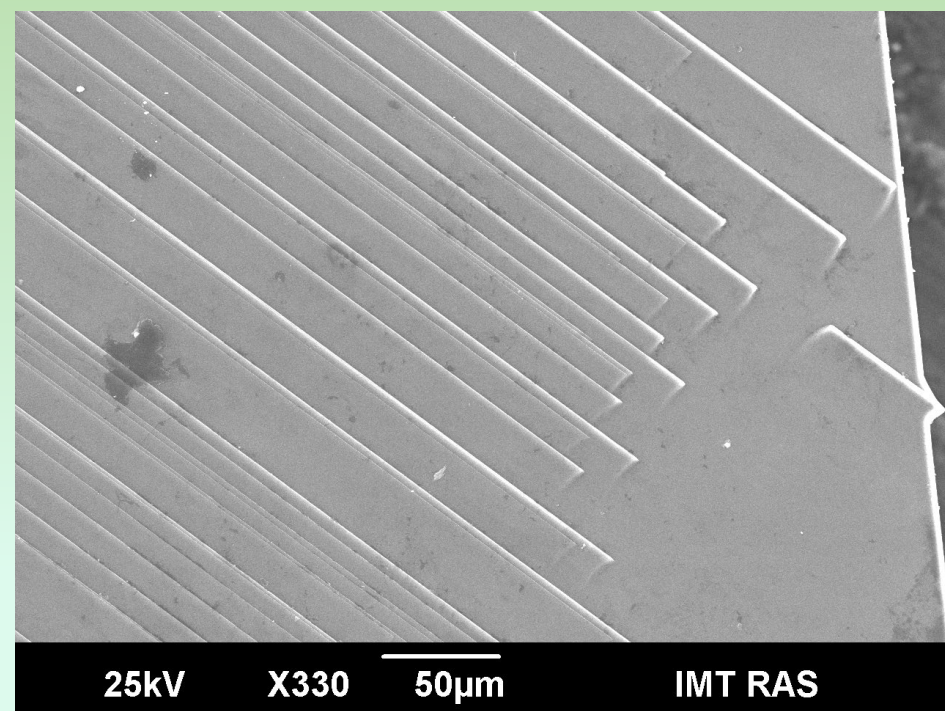


M. Lancin, G. Regula, J. Douin, H. Idrissi, L. Ottaviani, B. Pichaud, Mater. Sci. Forum , 527-529, 379, 2006

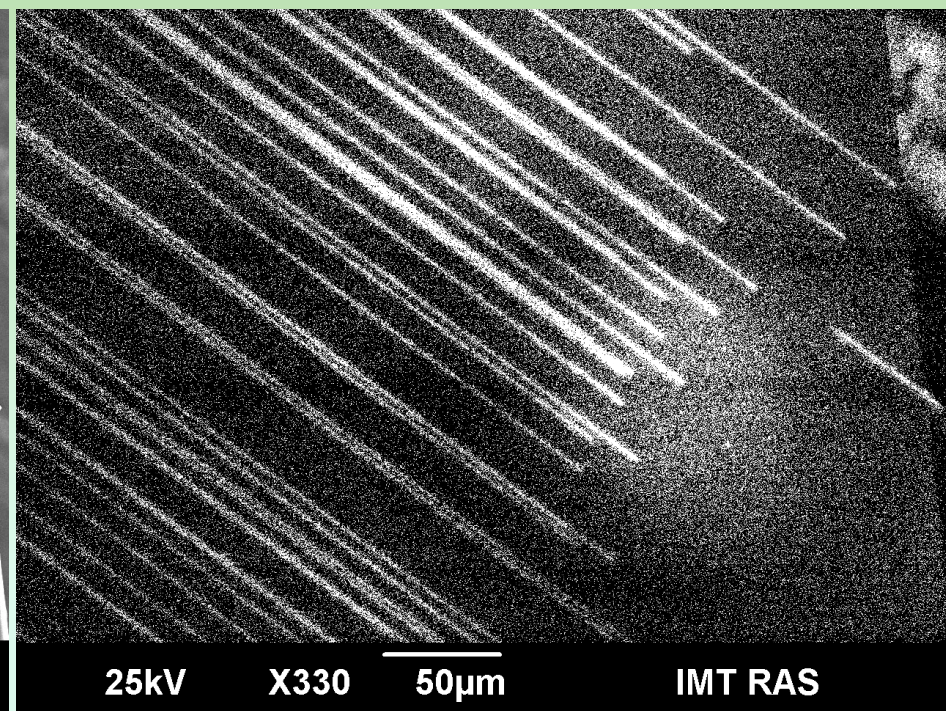
КЛ дефектов упаковки в SiC



КЛ дефектов упаковки в SiC

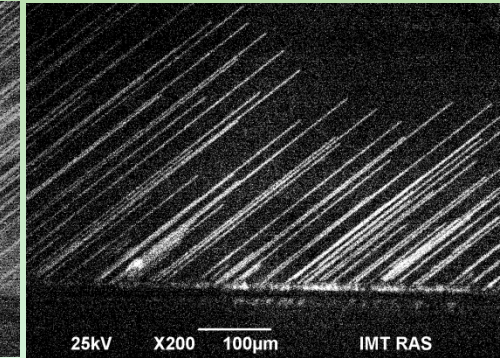
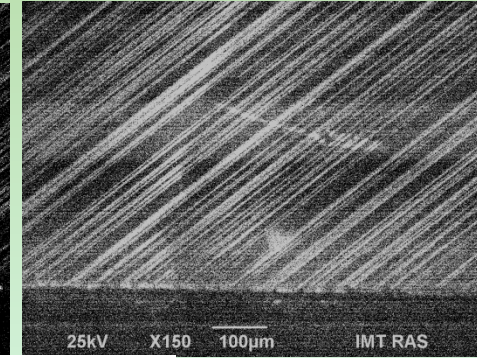
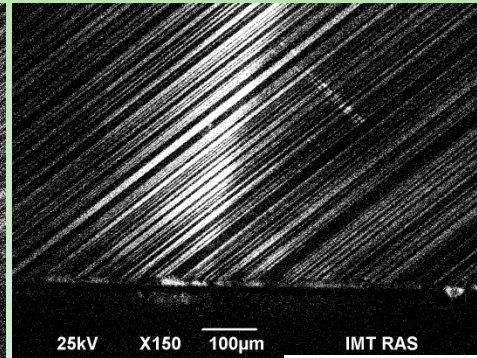
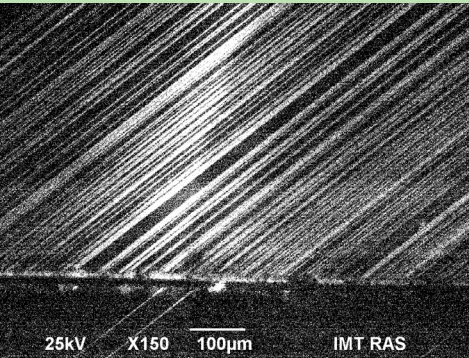


SE

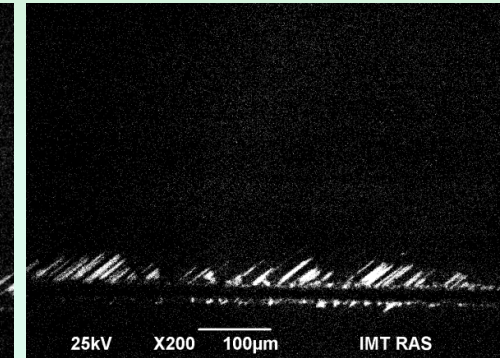
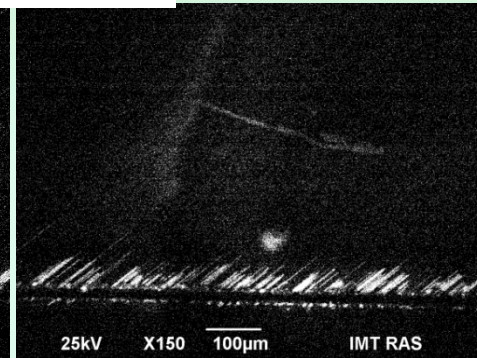
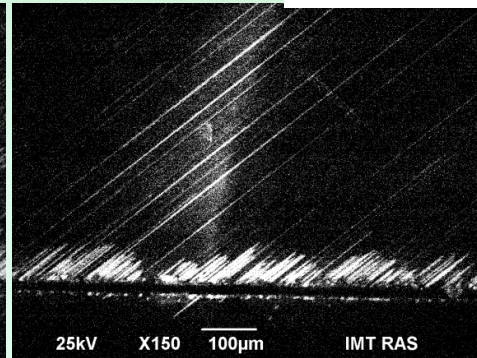
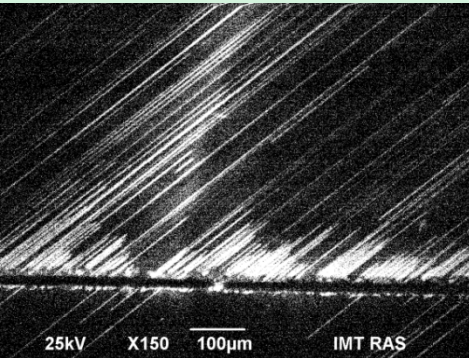


CL, 503 nm

КЛ дефектов упаковки в SiC



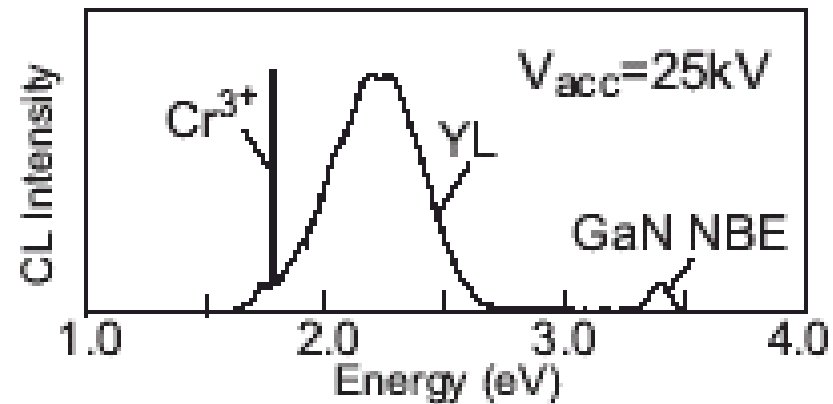
503 nm, 2SSF



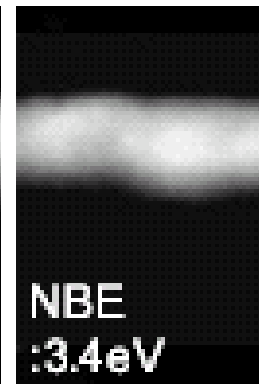
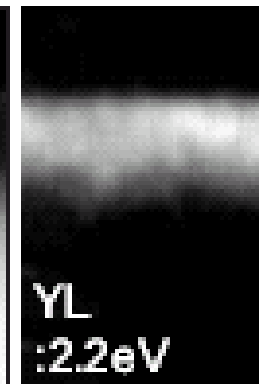
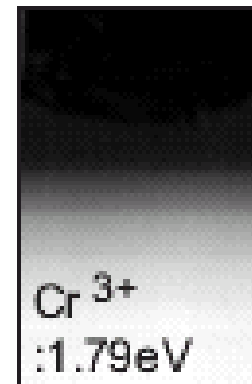
422 nm, 1SSF

Исследование пространственного распределения

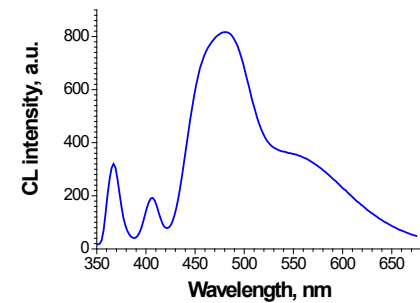
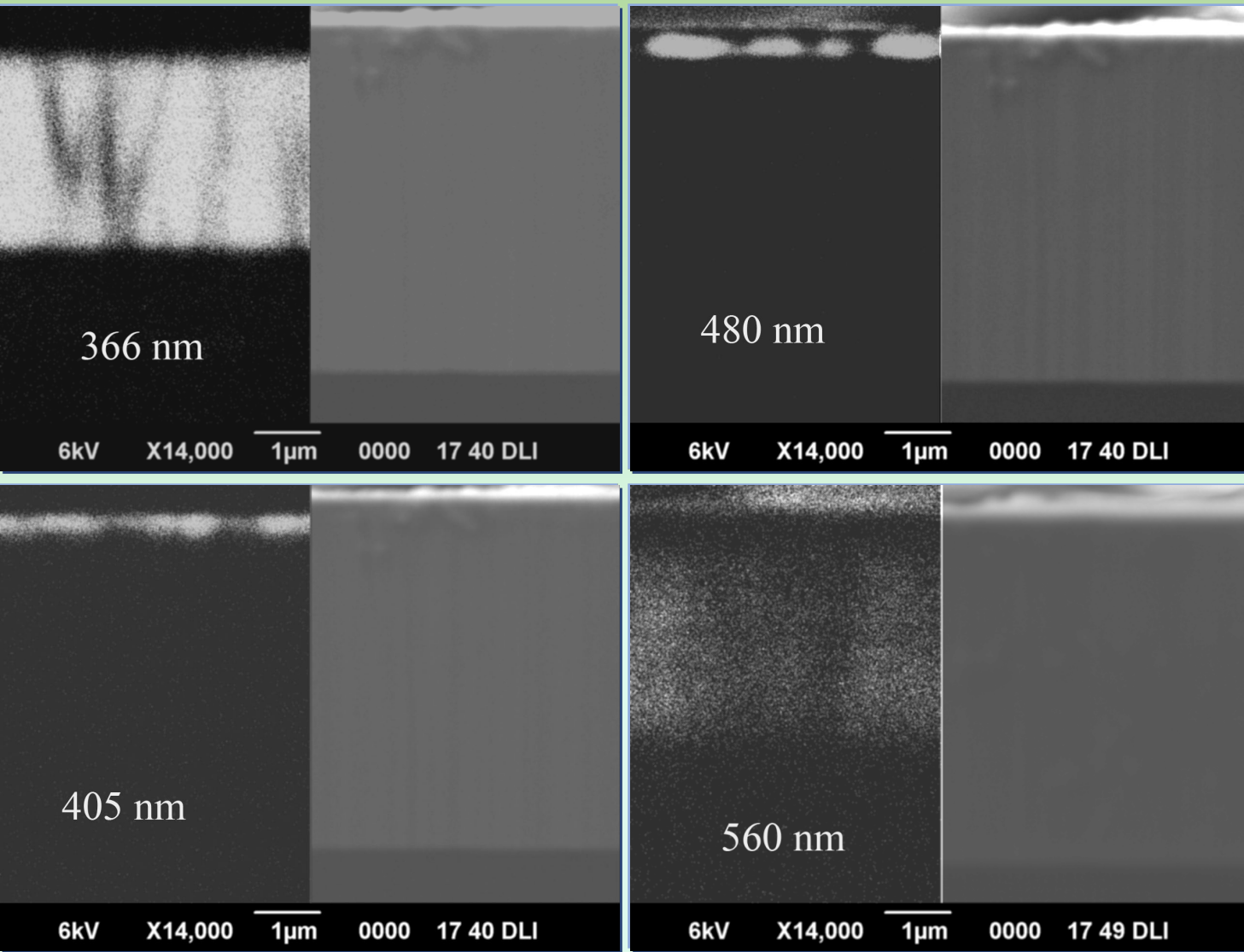
КЛ GaN на сапфире



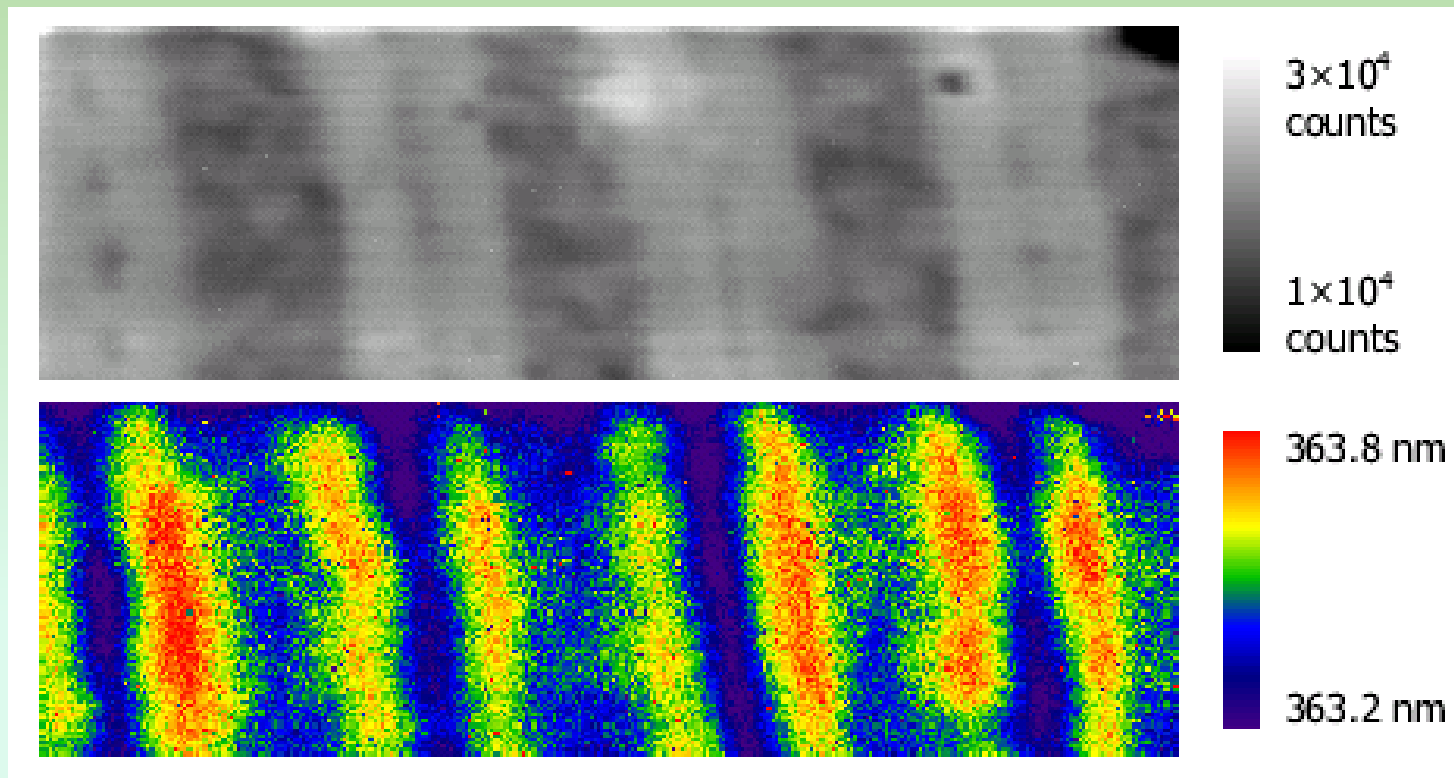
GaN
Sapphire substrate



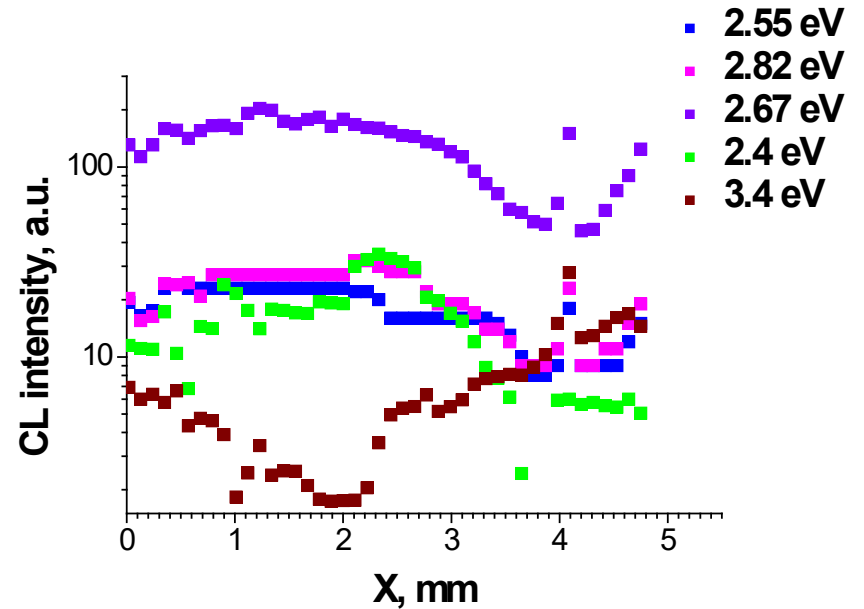
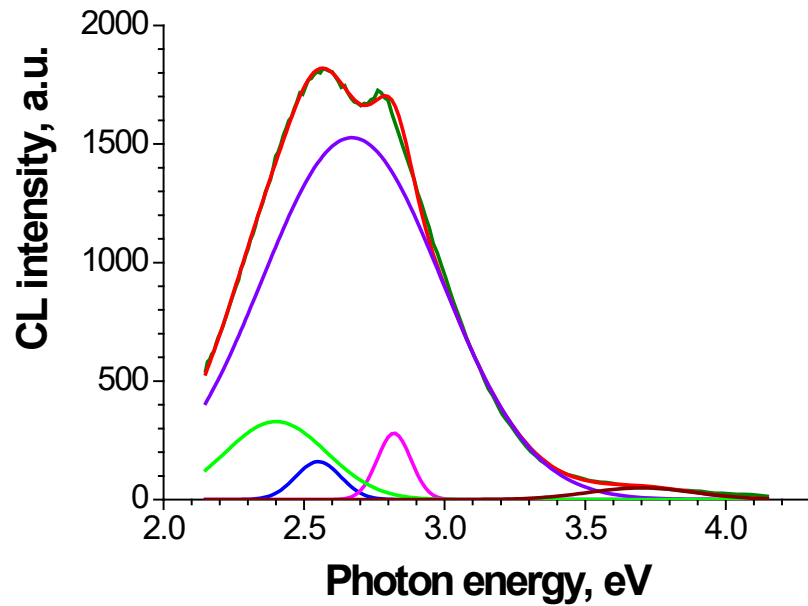
Поперечное сечение MQW GaInN/GaN



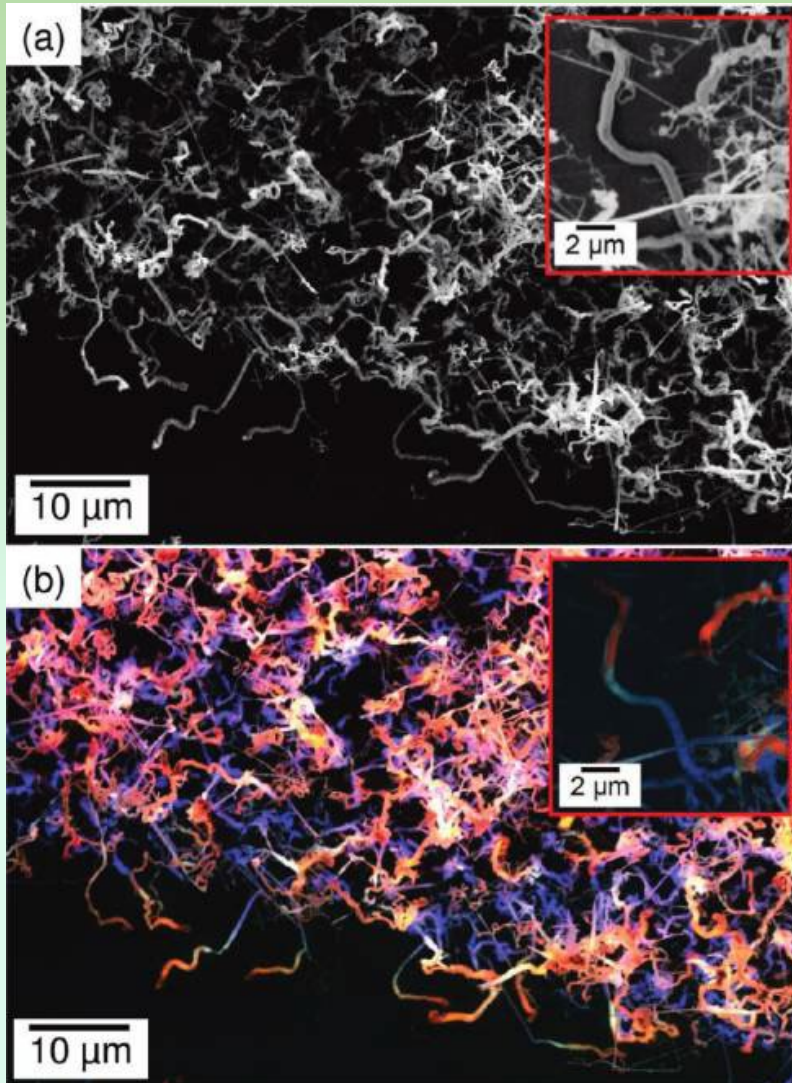
ELOG GaN в режиме КЛ



Распределение компонент КЛ в $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$

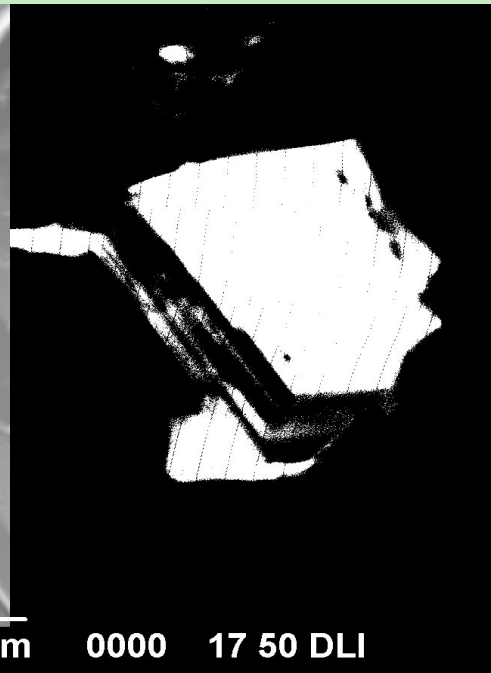
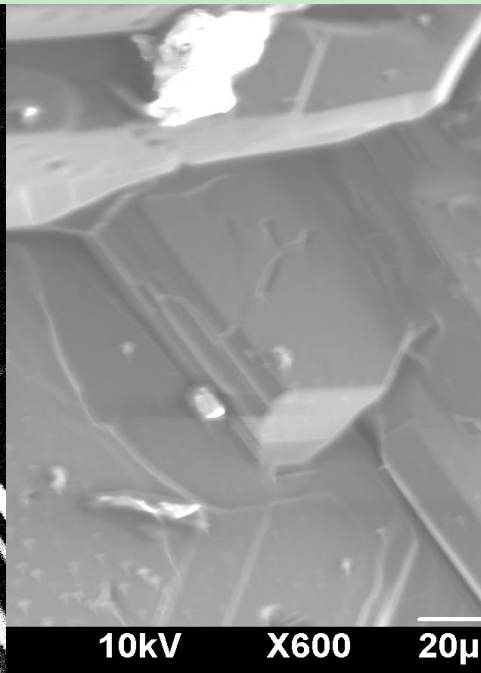
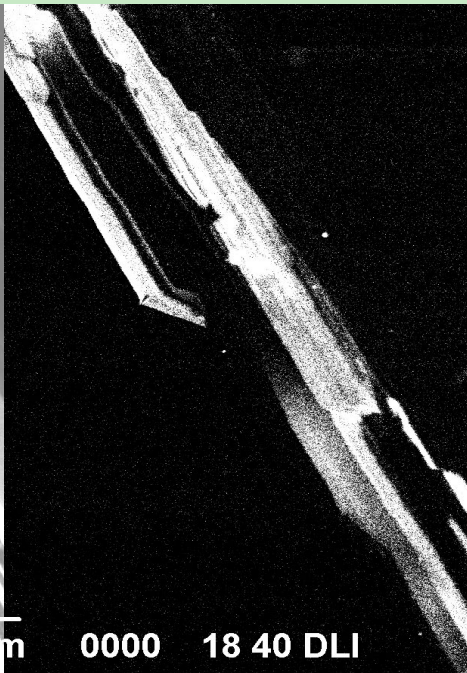
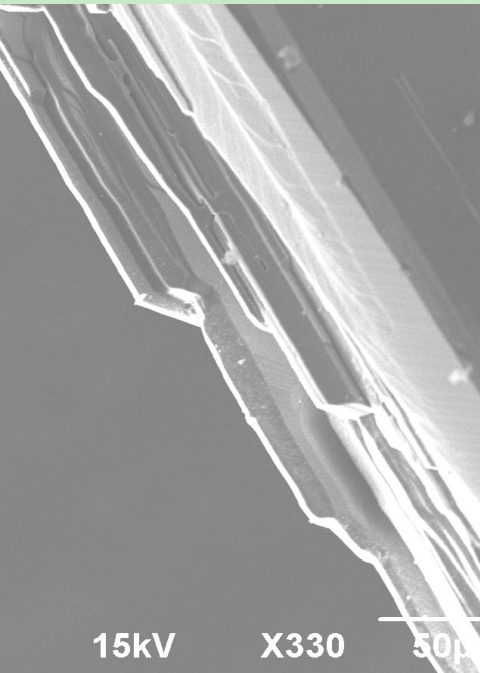
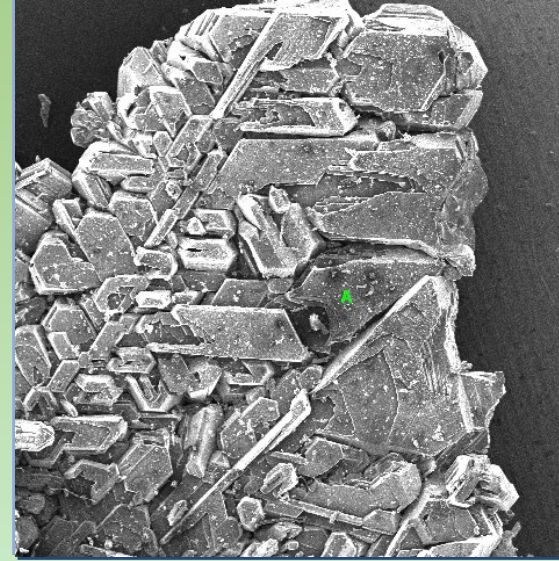


КЛ изображения нанопроводов β -Ga₂O₃, легированных Sn, в «реальных» цветах

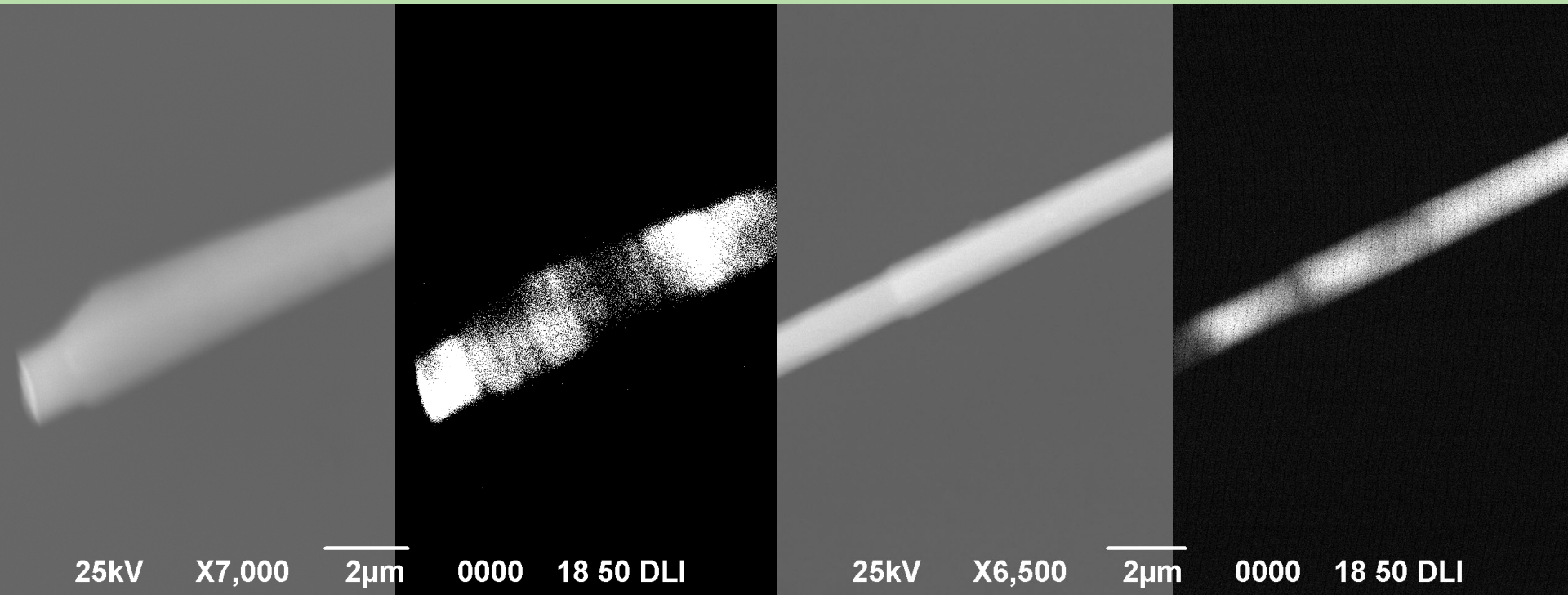


Цвет изменяется даже вдоль индивидуального провода

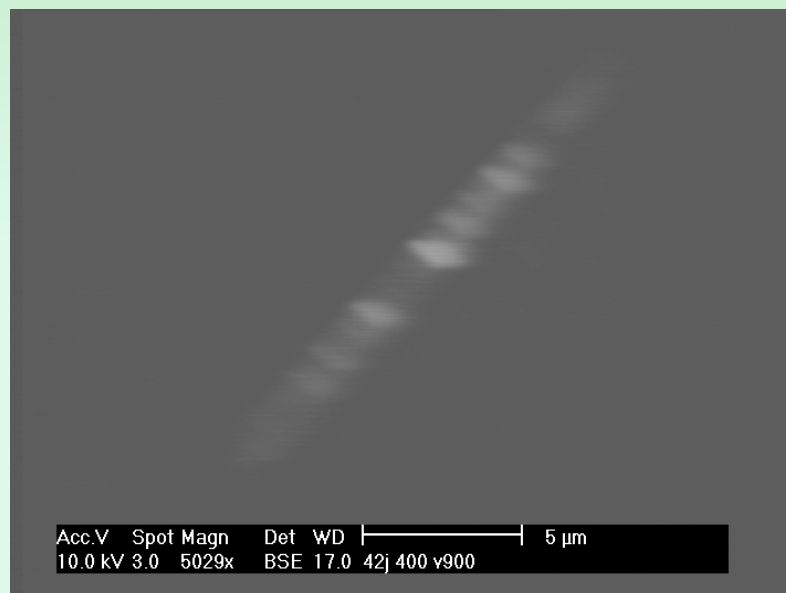
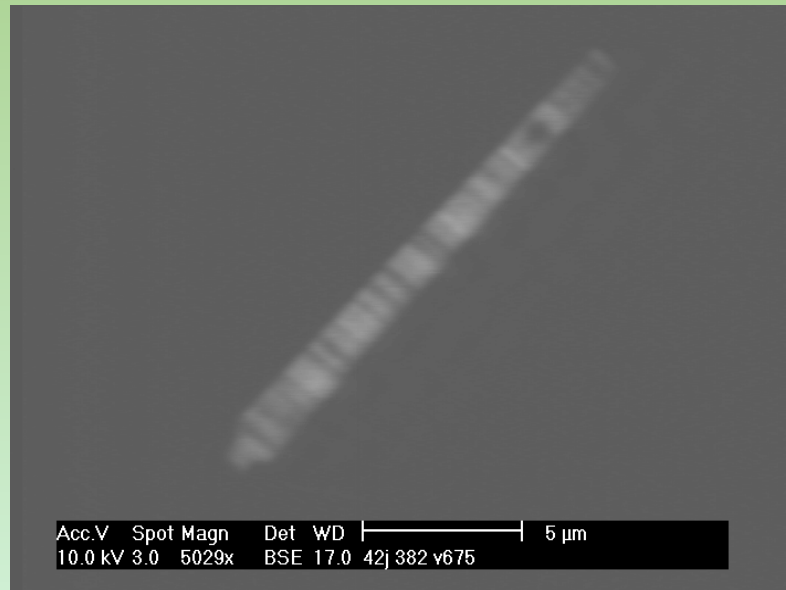
Интенсивная КЛ в 4H-SiC



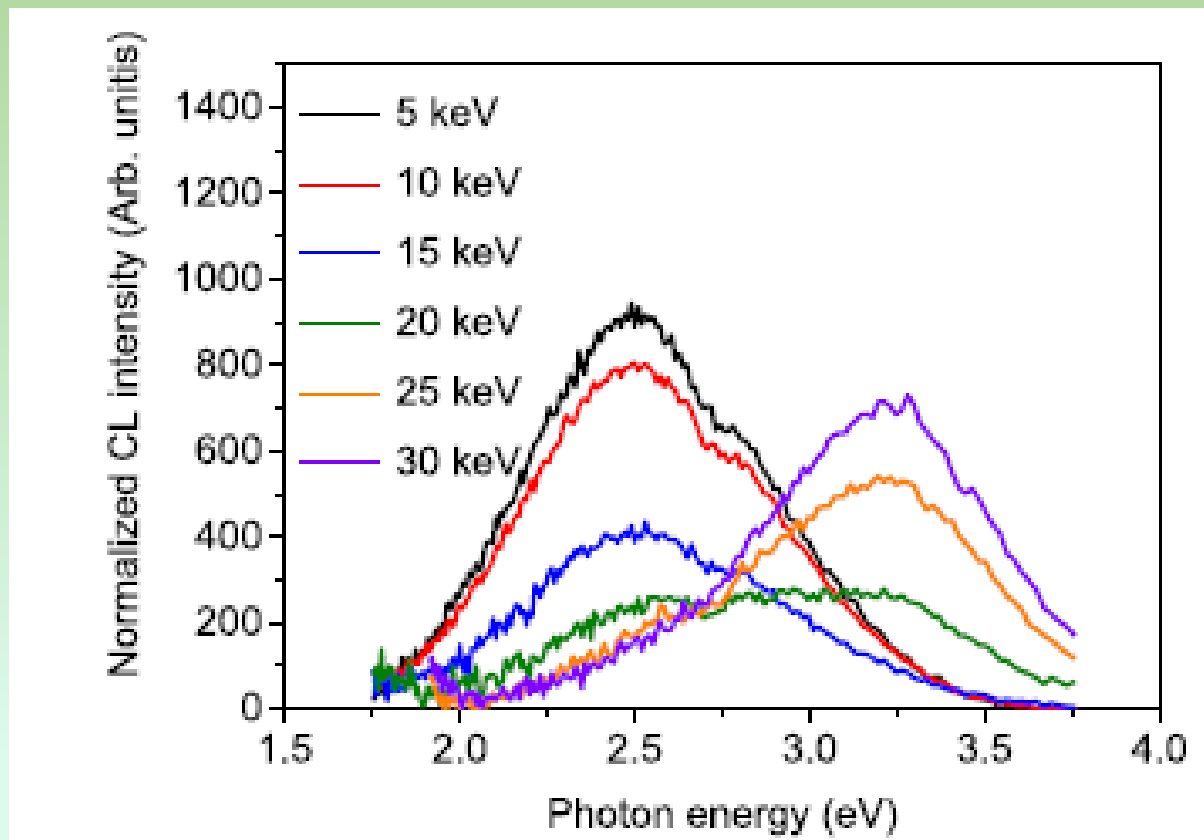
Исследование одиночных наностержней ZnO



КЛ при гелиевой температуре

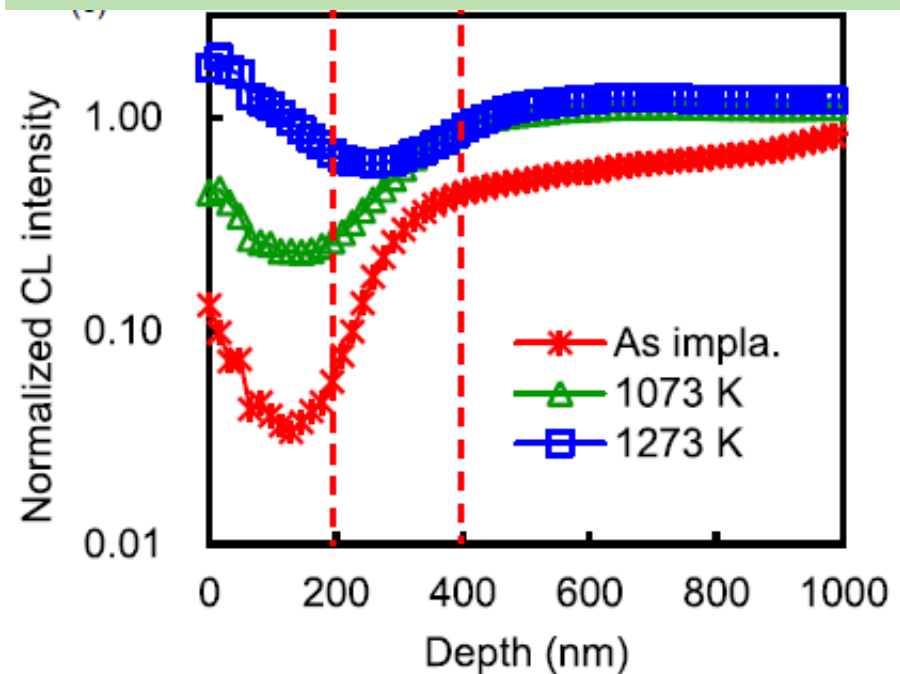
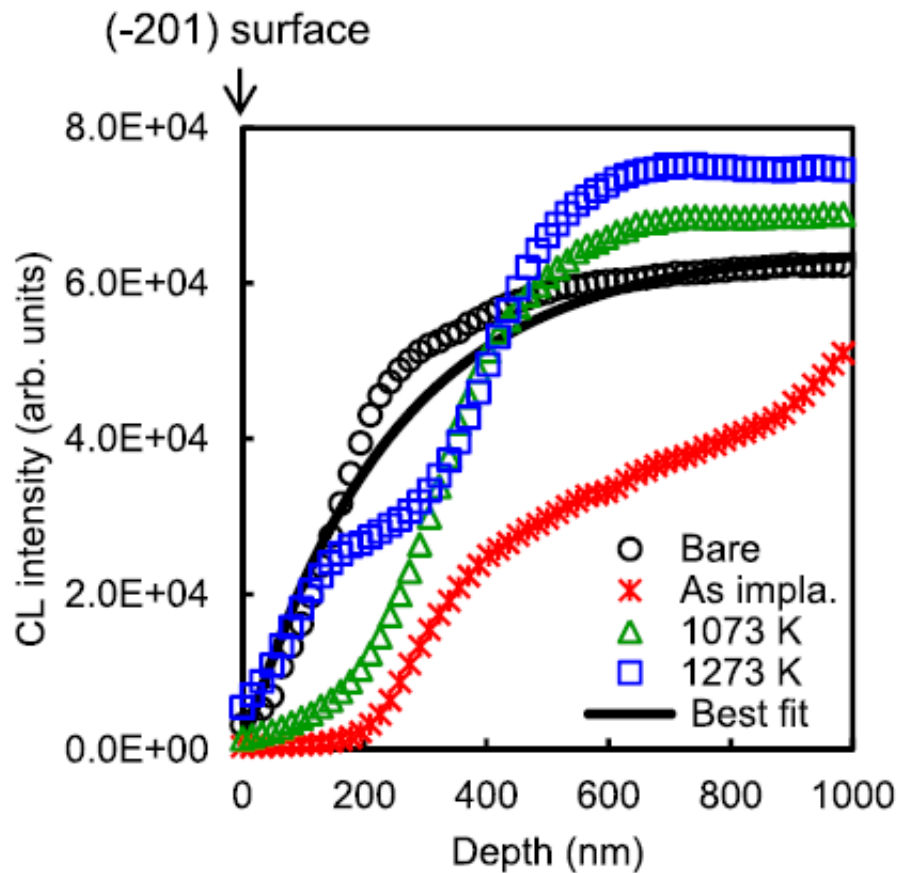


КЛ исследования γ -Ga₂O₃



После имплантации Ga в приповерхностном слое β -Ga₂O₃ формируется γ -Ga₂O₃

Имплантация Si в $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$

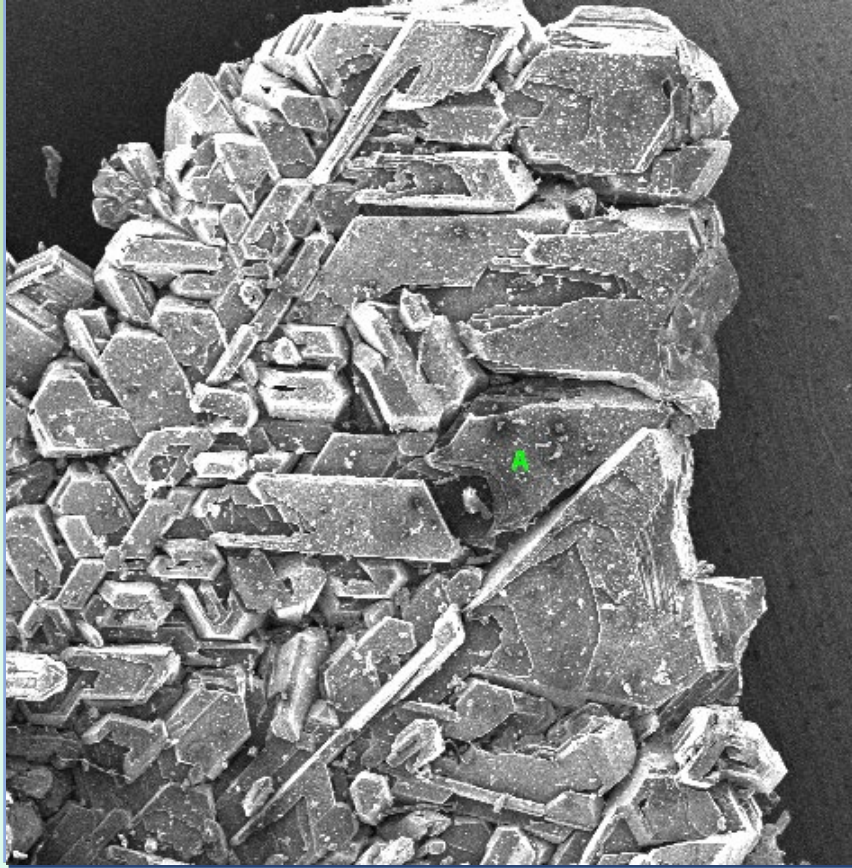


Нормализованный на
исходную зависимость

Имплантация Si (100 кэВ, 10^{15}см^{-2}) и отжиг

Сравнение НТ и КЛ

Исследование непланарных образцов



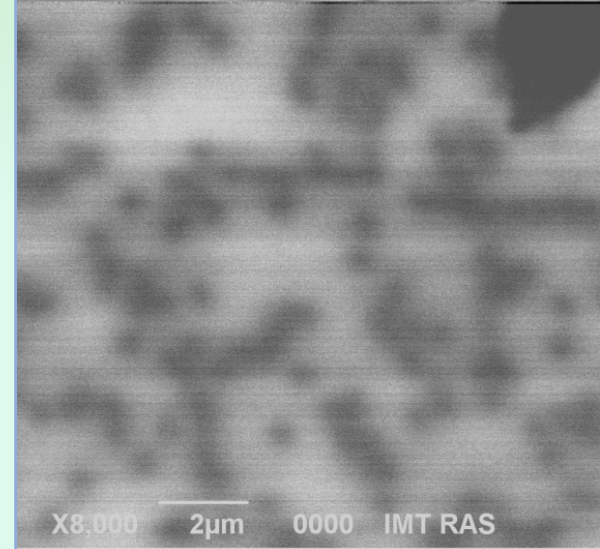
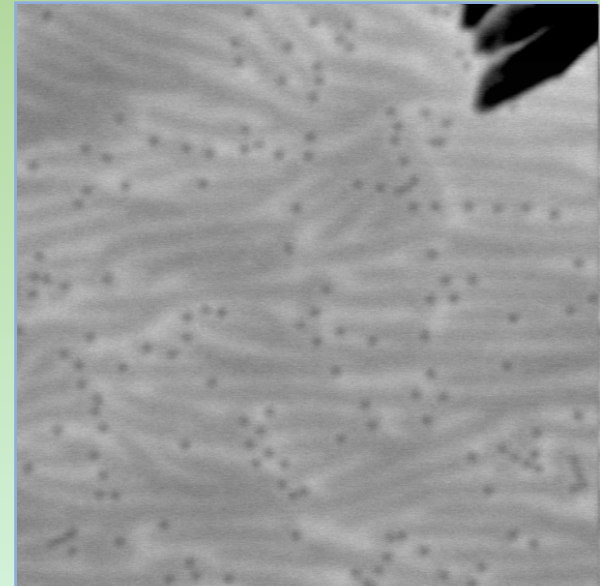
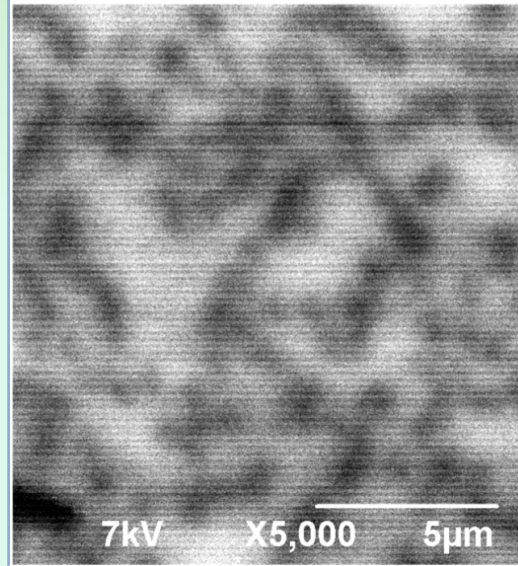
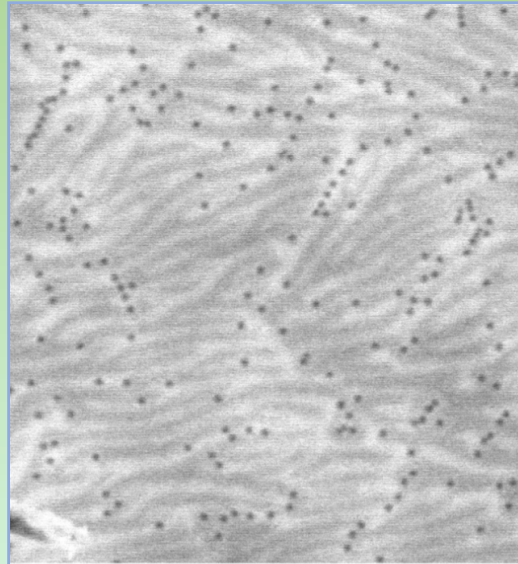
**Количественные
измерения**

КЛ и НТ изображения дислокаций в GaN

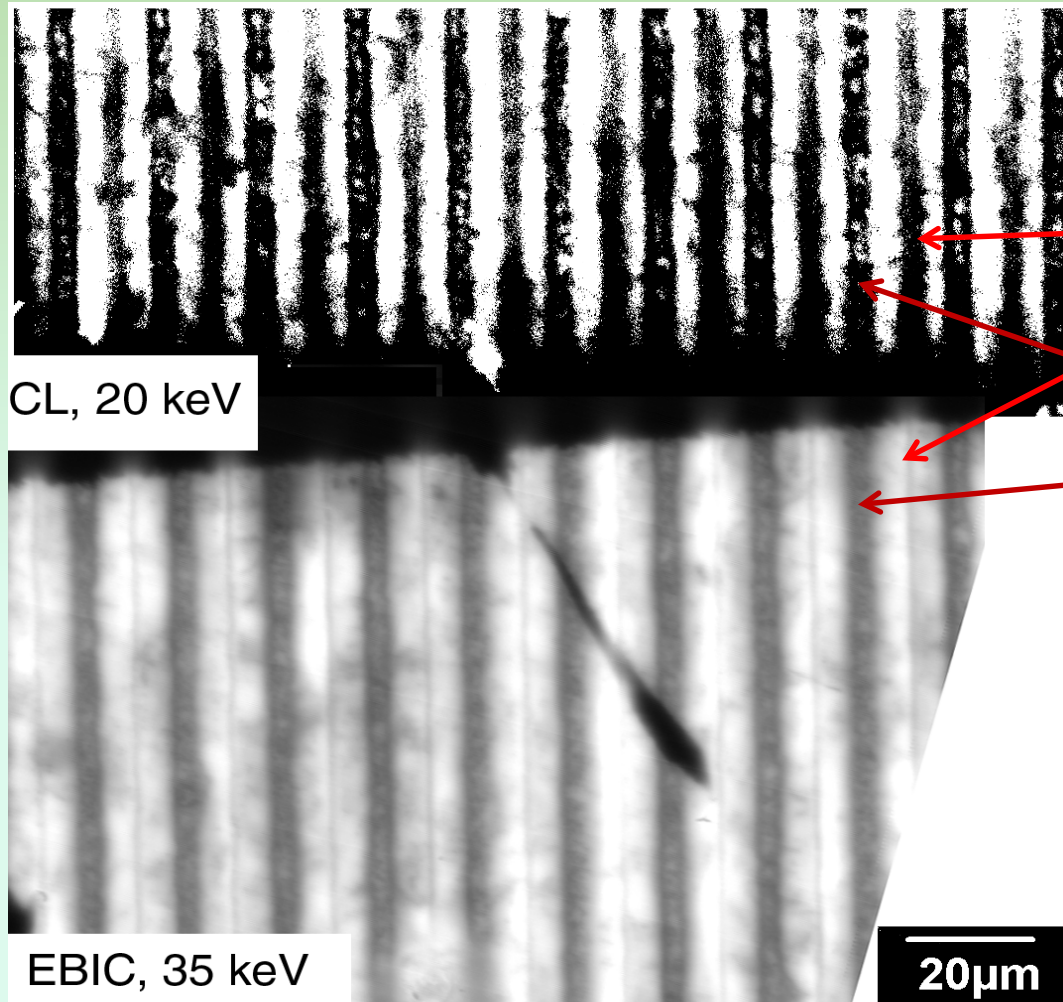
EBIC
35 keV

Оба метода выявляют дислокации, но в НТ разрешение намного лучше.

CL



EBIC and CL investigations of ELOG GaN



**Coalescence
boundary**

Slit

**Slit contrasts are similar
but those of coalescence
boundaries differ**

E.B. Yakimov et al. Superlattices
and Microstructures, 45, 308,
2009.