

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА РЭМ НА СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ

Основные эффекты

Зарядка диэлектриков

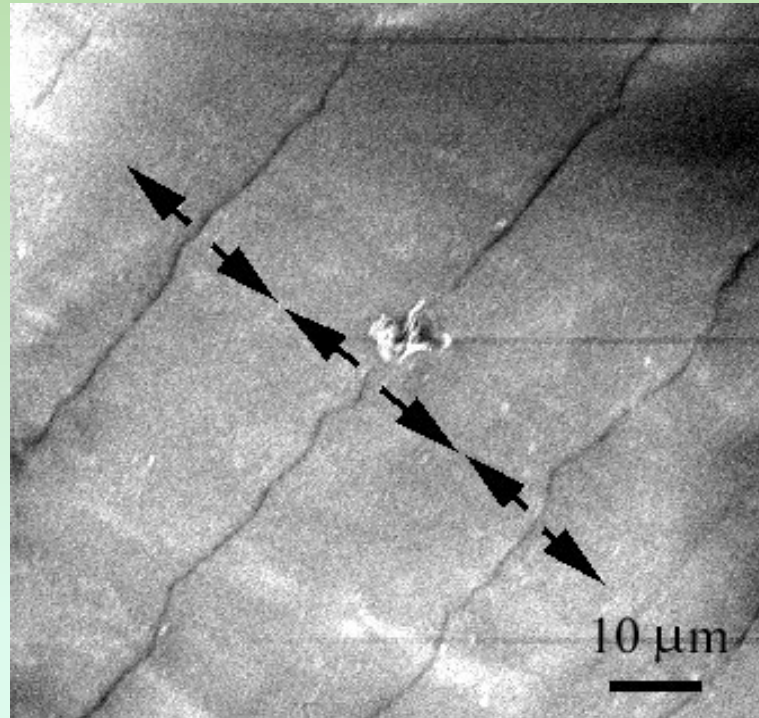
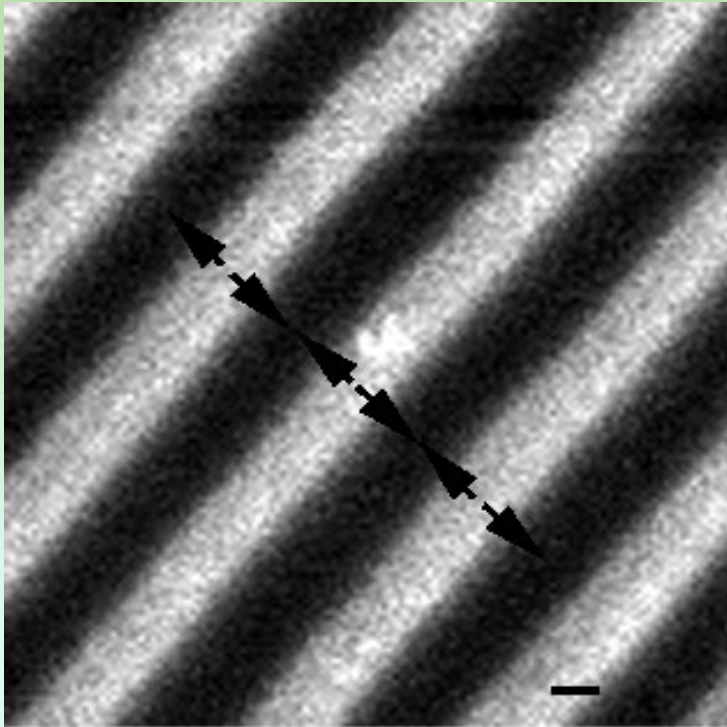
Нагрев

**Реакции на поверхности и в камере,
стимулированные облучением**

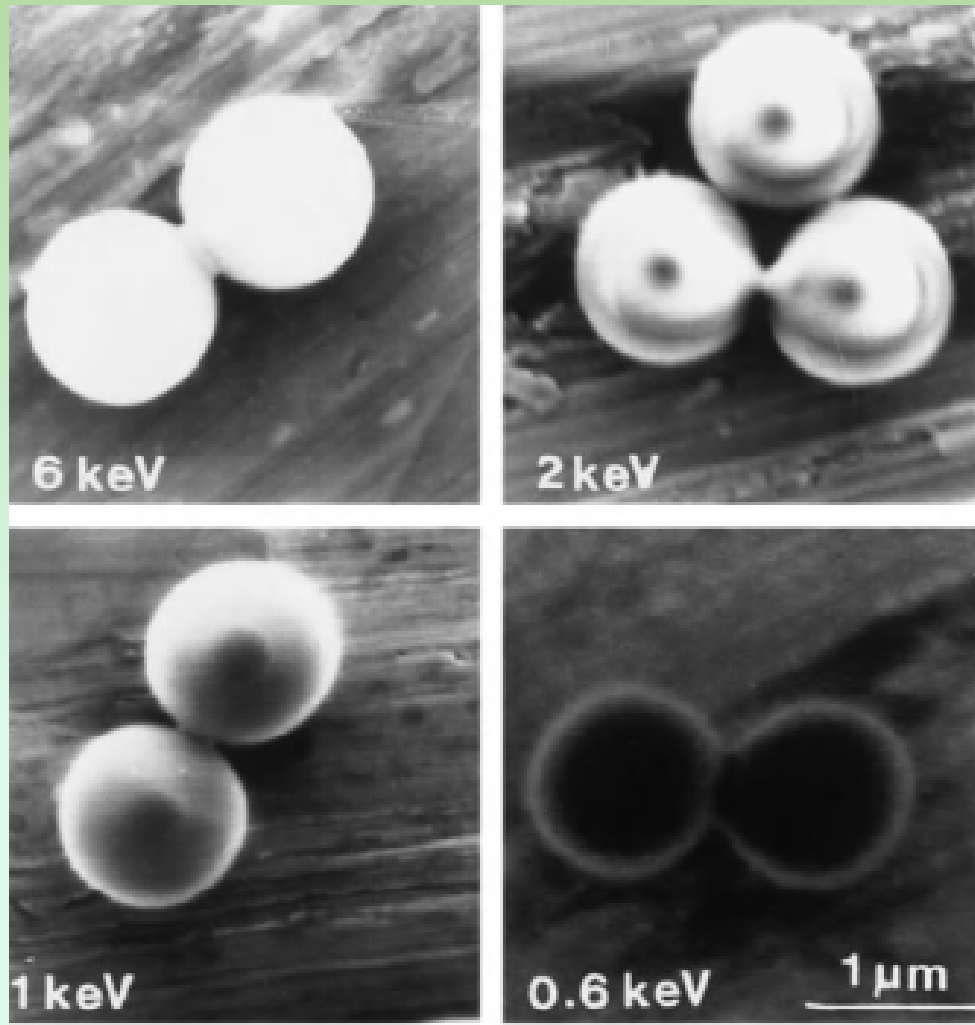
**Реакции в объеме образца, стимулированные
облучением**

**Рекомбинационно-стимулированное движение
дефектов**

Влияние зарядки на изображение доменов в LiNbO_3

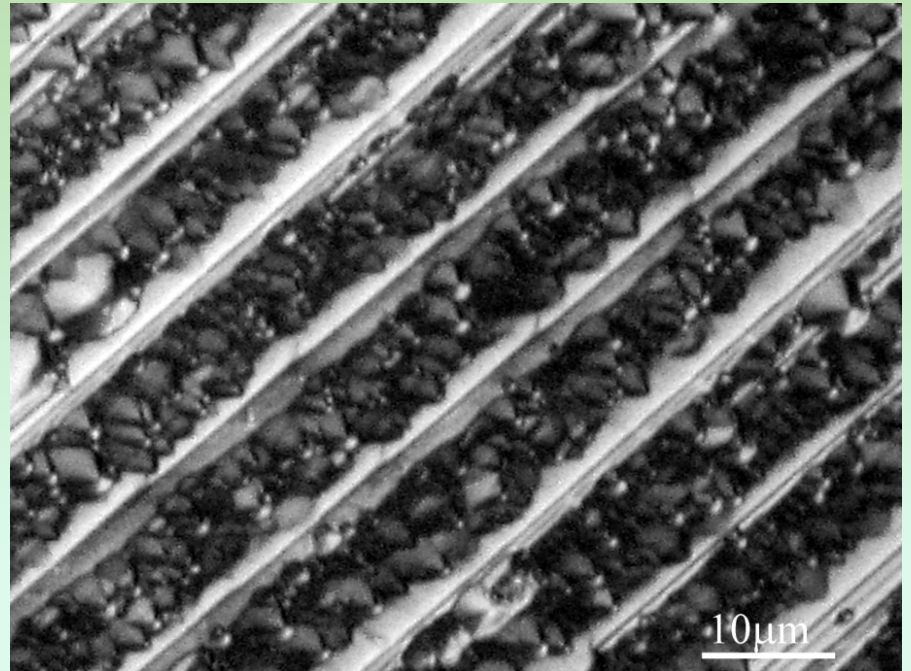
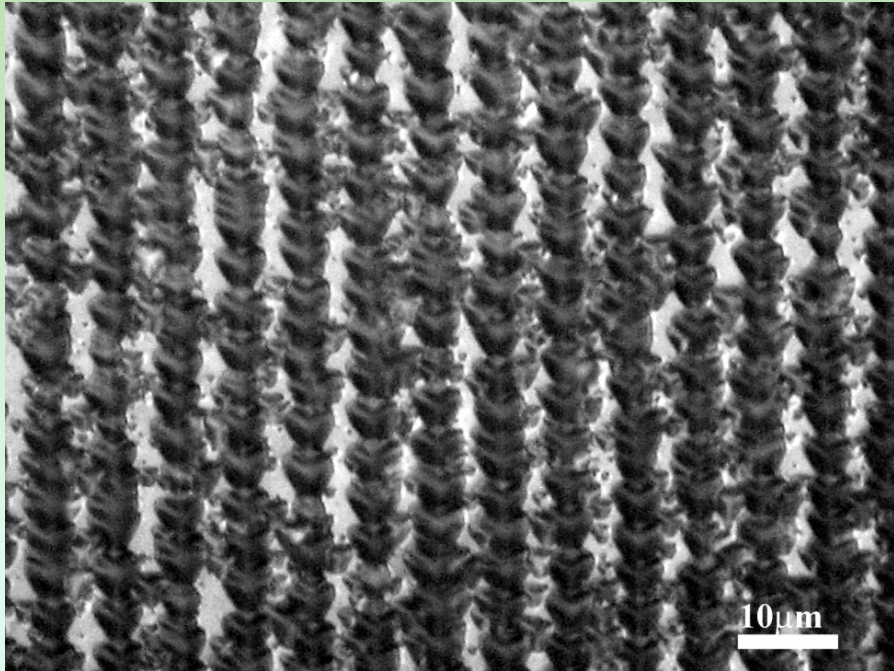


Влияние зарядки на изображение



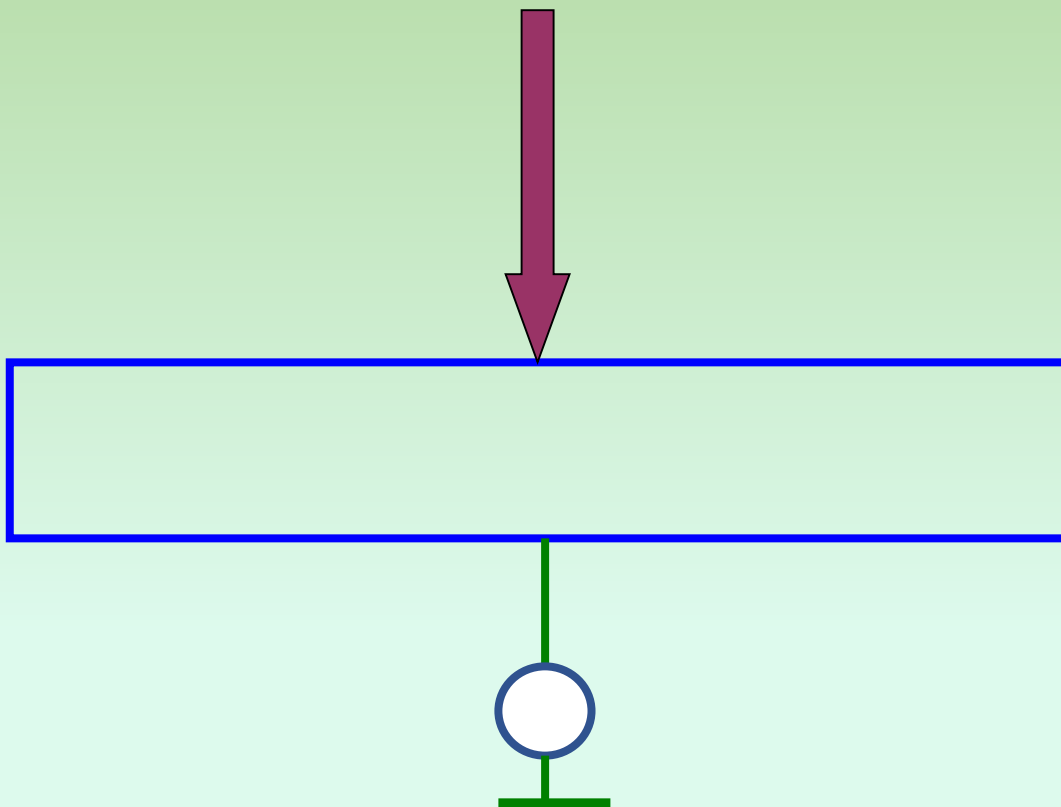
Сферы из полистирола

Рисование доменных структур в LiNbO_3

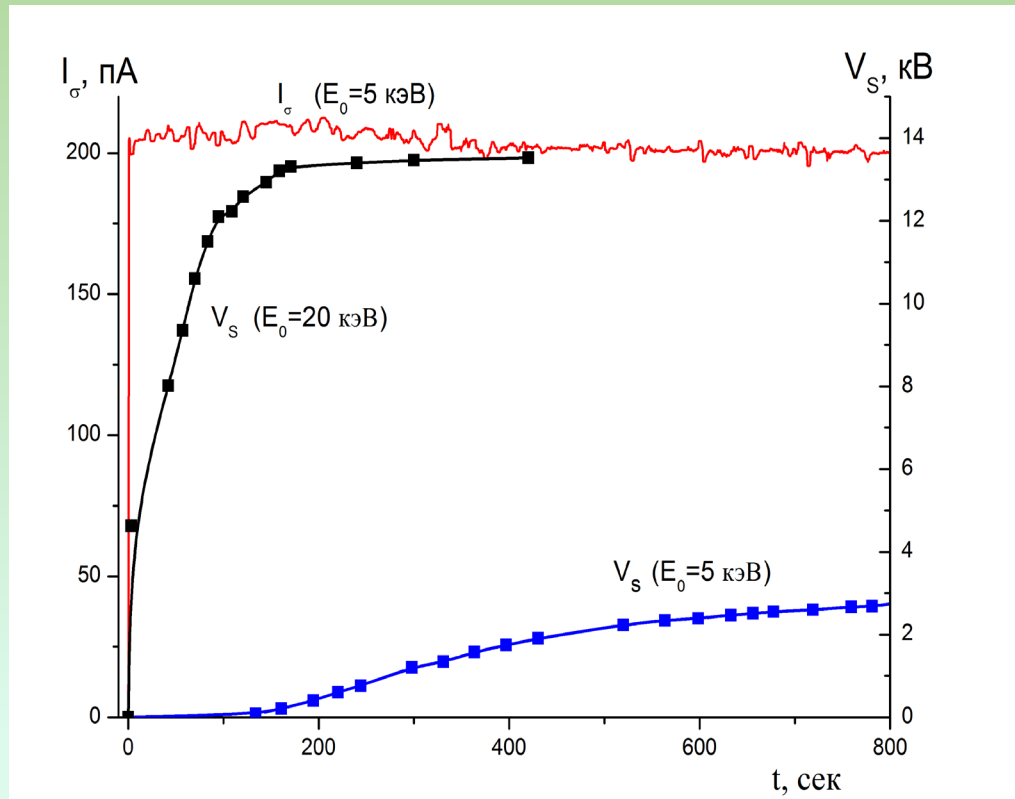


Зарядка

$$I_b = I_\sigma + U_s/R$$

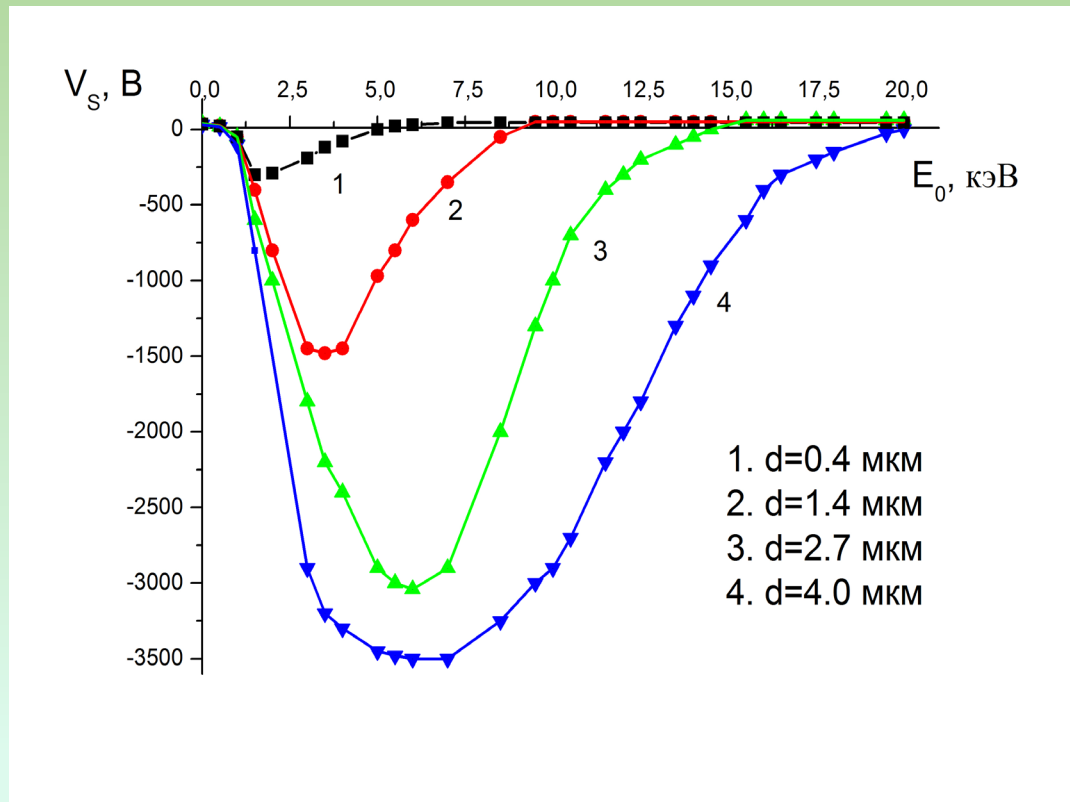


Кинетика зарядки



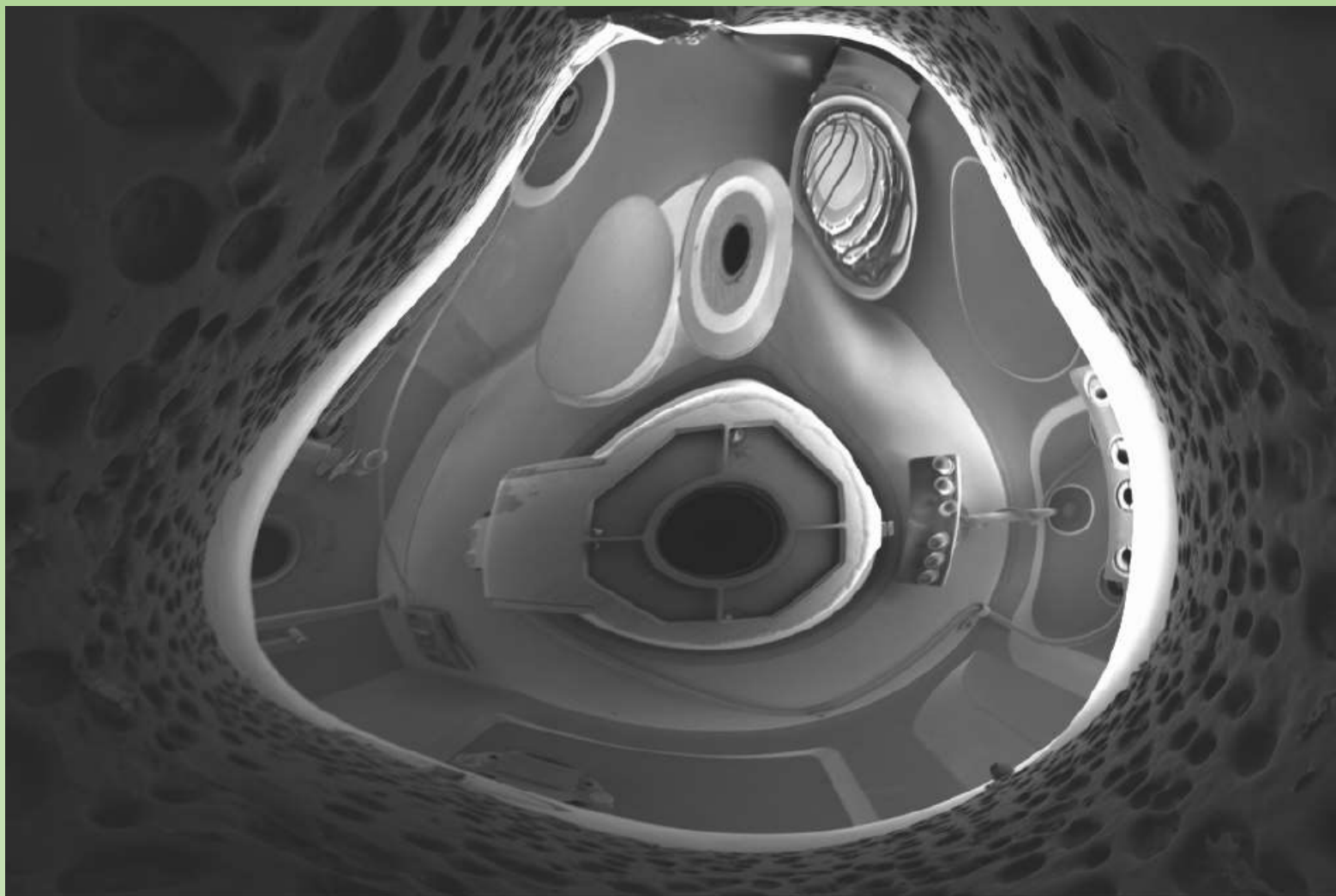
Временные характеристики зарядки пластинок слюды $d = 50$ мкм, током $I_0 = 1$ нА и площадью $a^2 = 100 \times 100$ мкм² при энергиях $E_0 = 5$ и 20 кэВ. I_σ – полный ток эмиссии электронов, V_s – отрицательный поверхностный потенциал

Потенциал поверхности

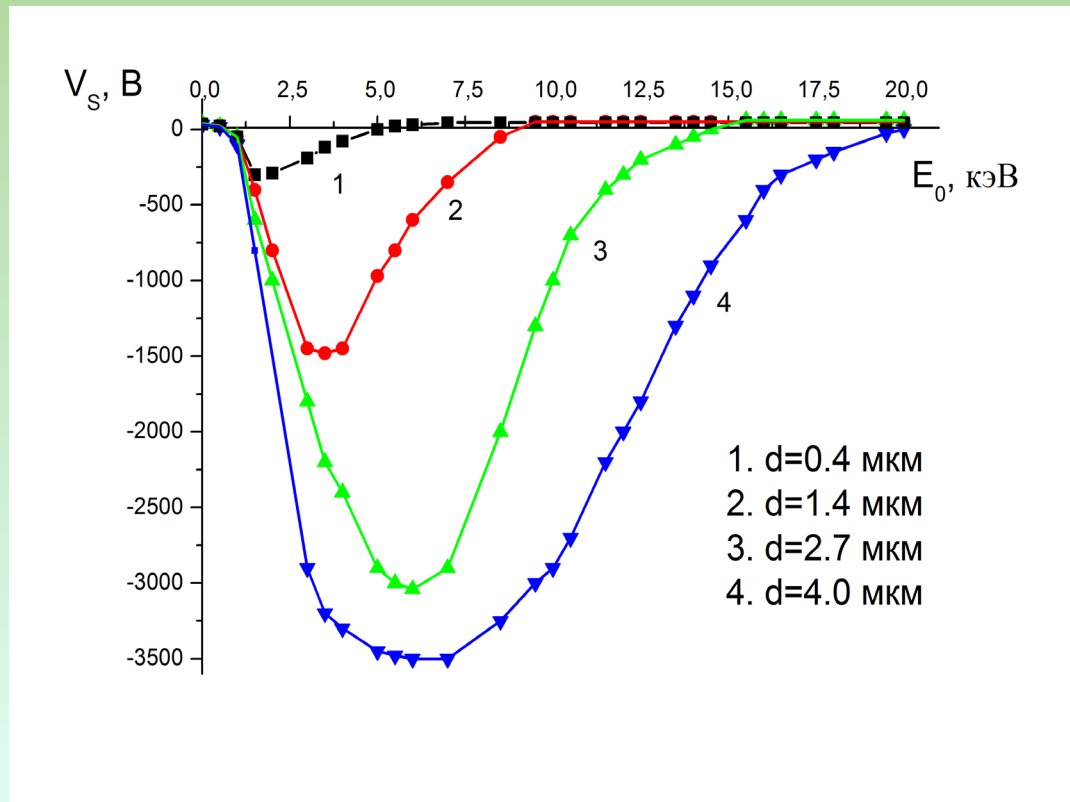


Зависимость поверхностного потенциала V_s от энергии облучающих электронов E_0 для ПММА плёнок различной толщины d на Si-подложке

Эффект зеркала



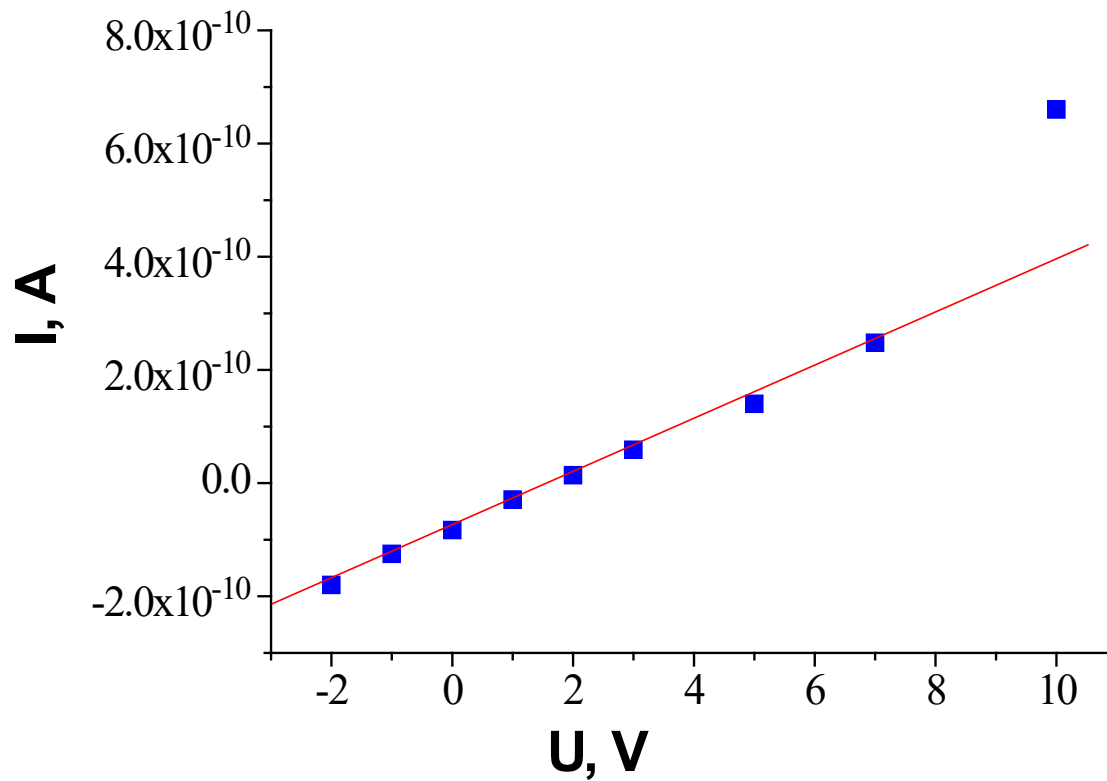
Потенциал поверхности



Зависимость поверхностного потенциала V_s от энергии облучающих электронов E_0 для ПММА плёнок различной толщины d на Si-подложке

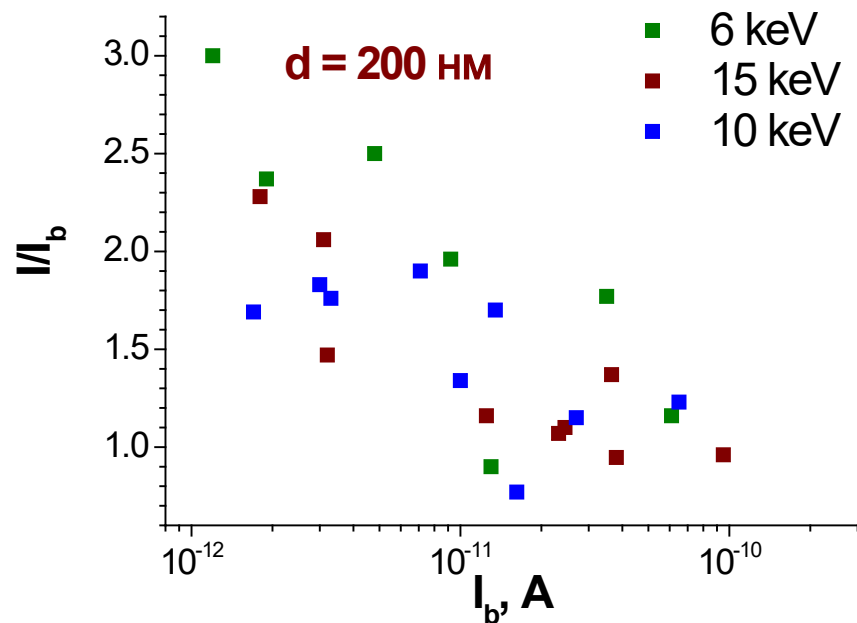
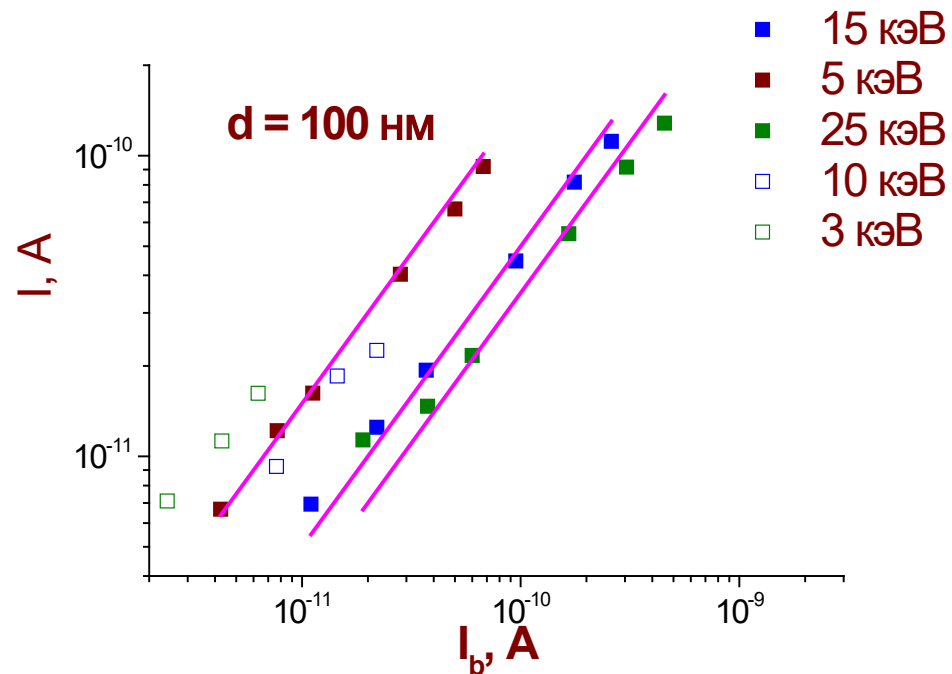
Проводимость под пучком

Зависимость от U

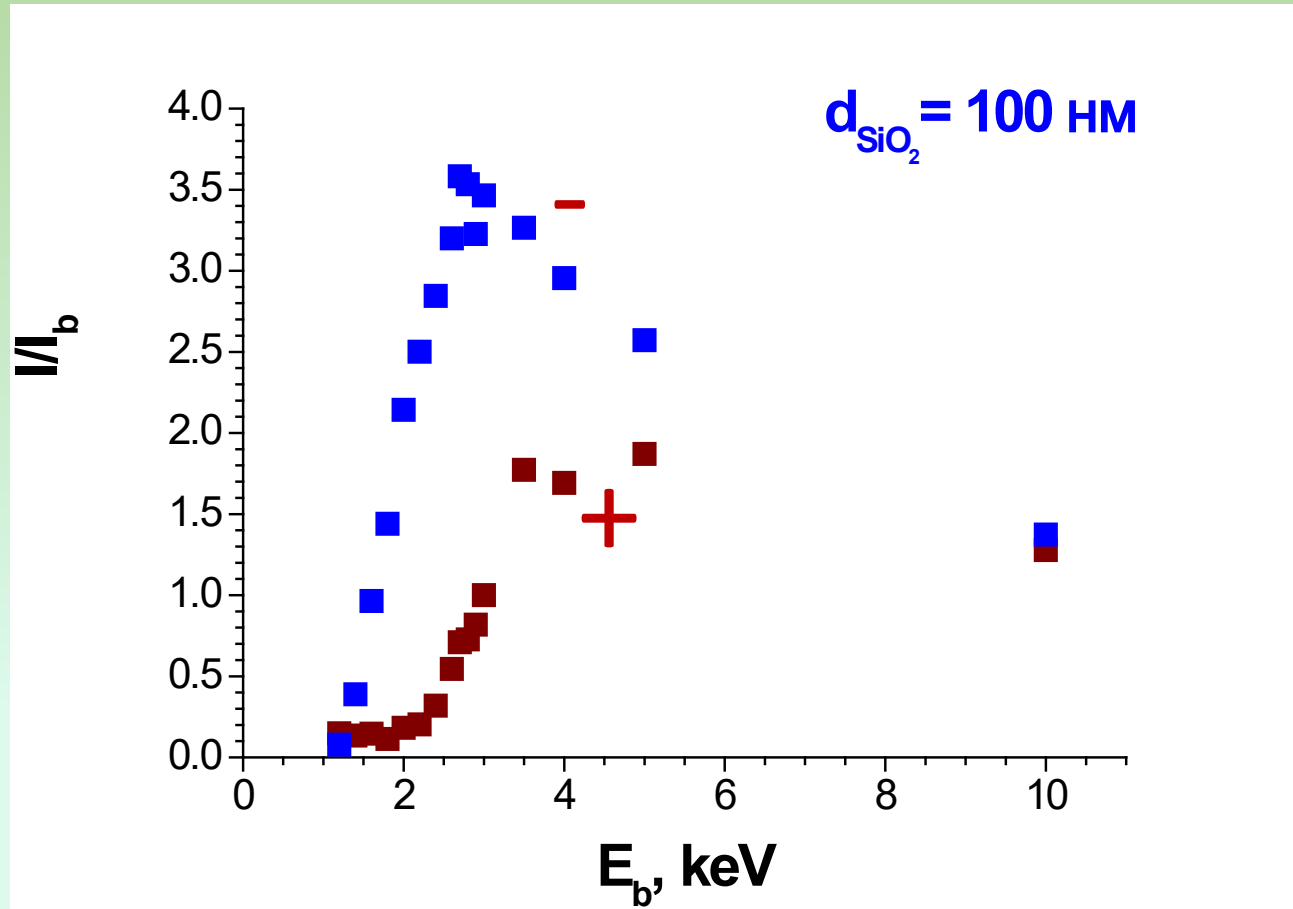


Проводимость под пучком

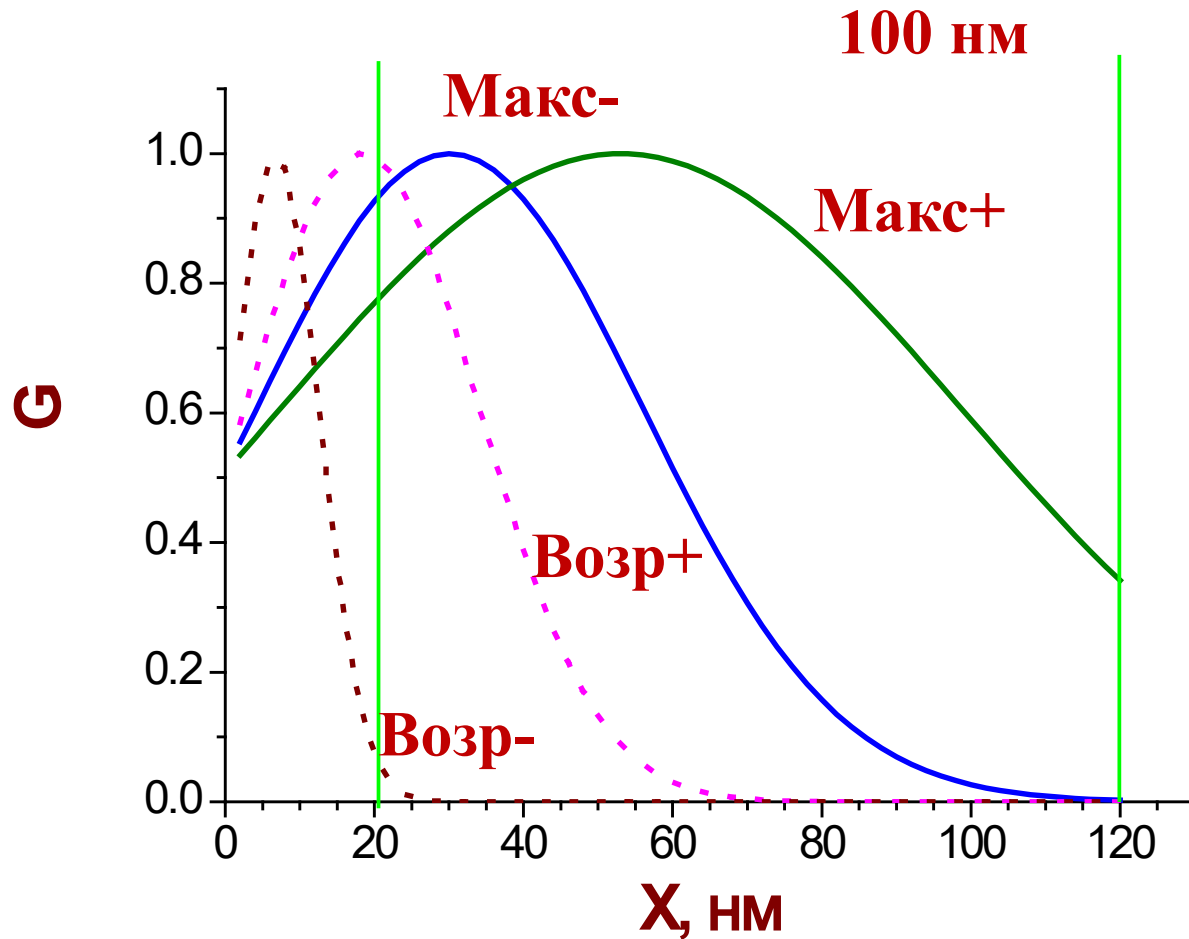
Зависимость от I_b



Зависимость от E_b



Зависимость от E_b



$$L_n = 5-7 \text{ нм}$$

$$L_p < L_n/10$$

Нагрев образца

Для пучка в точке

$$\Delta T = 1.5 \times E_b \times I_b / (\pi \times k \times R)$$

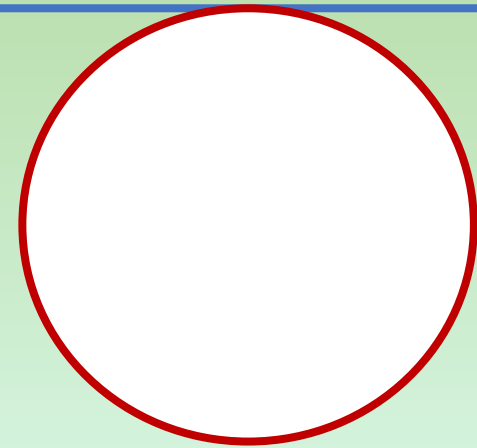
Измерения параметра решетки

Плавление

Спектр CL

MEMS

Microbolometer

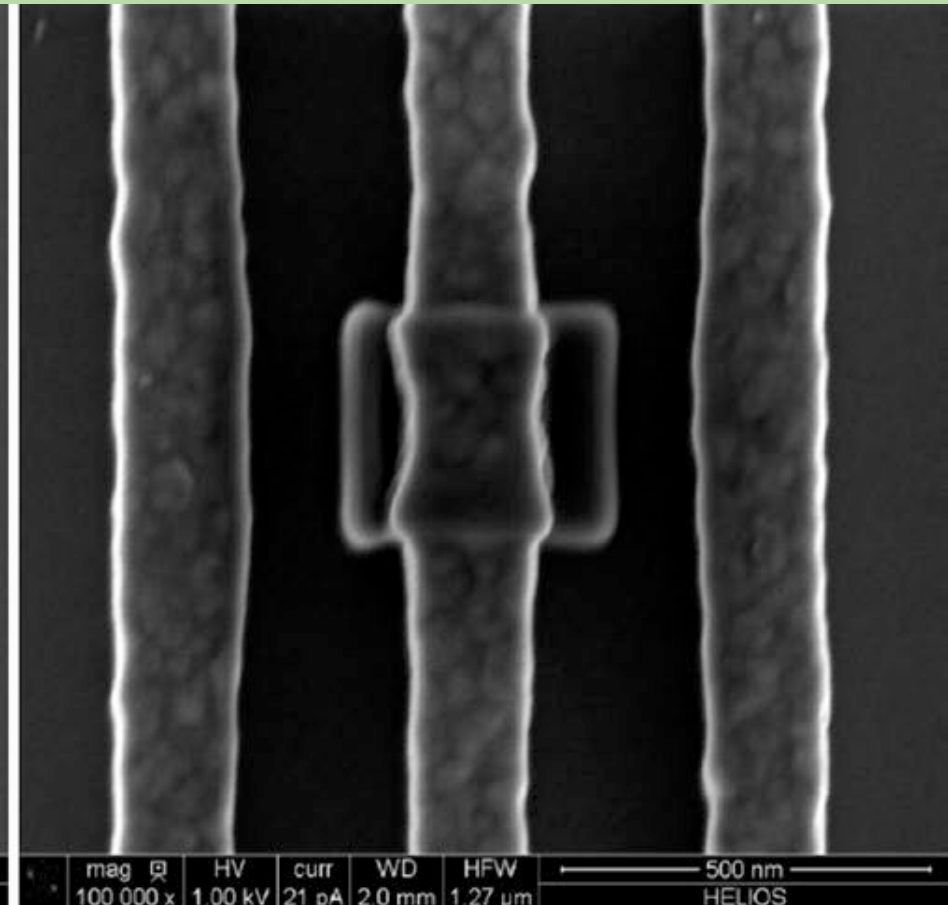
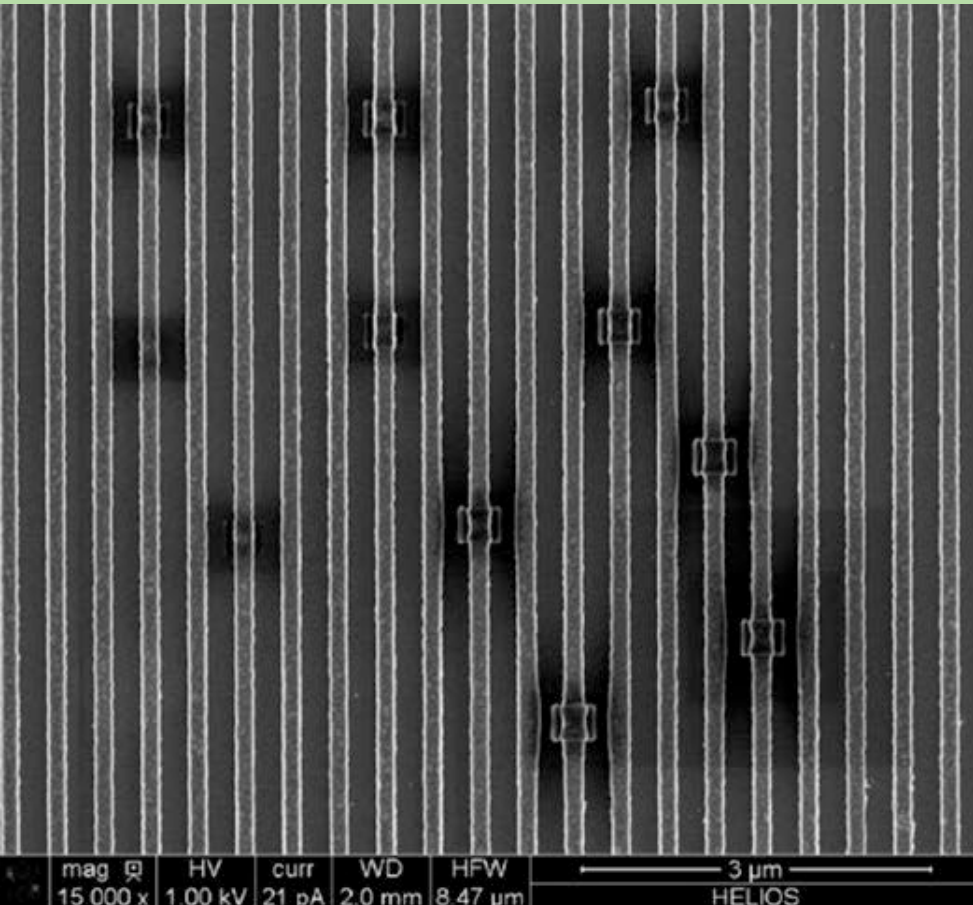


Образование углеводородной пленки

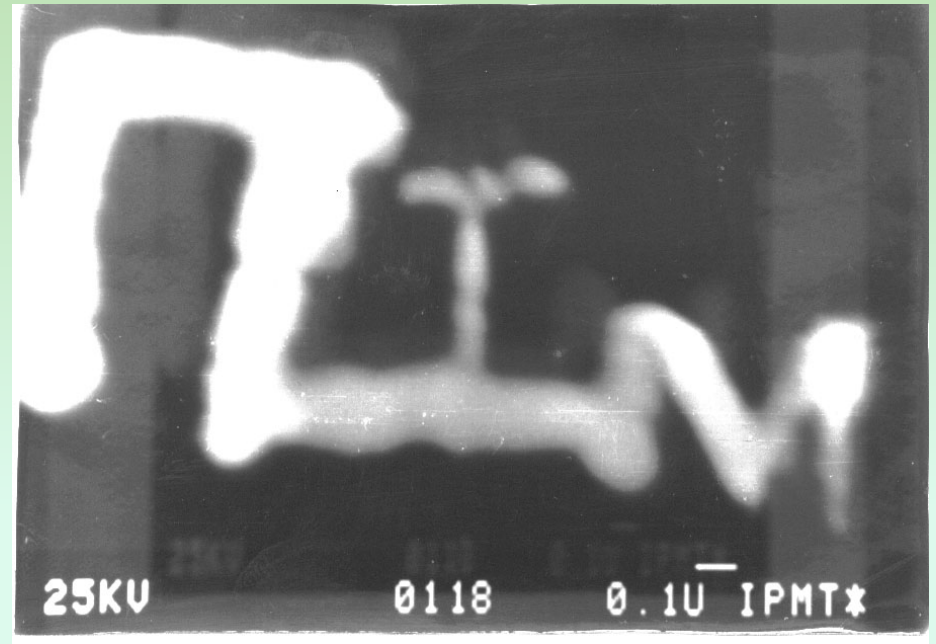
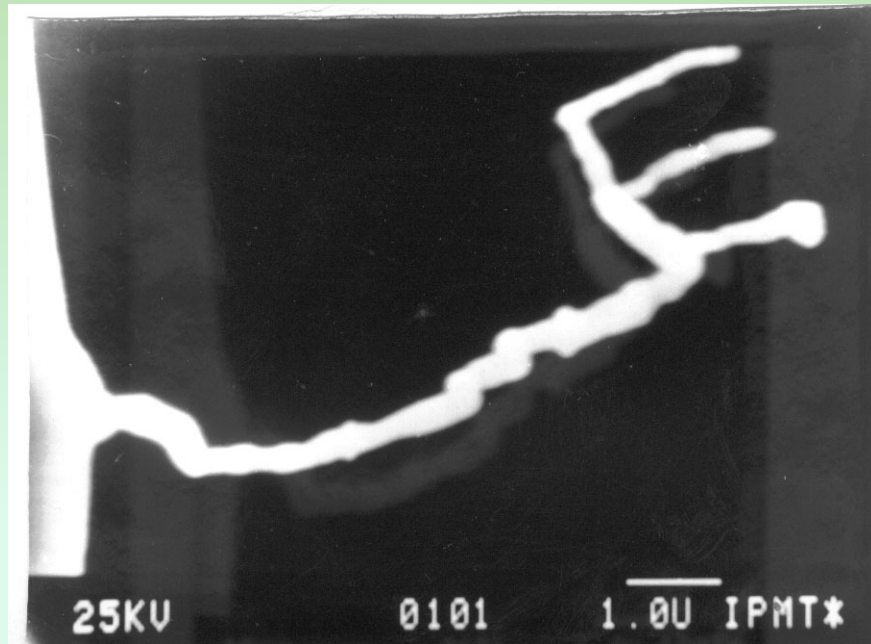


Заращение щелей

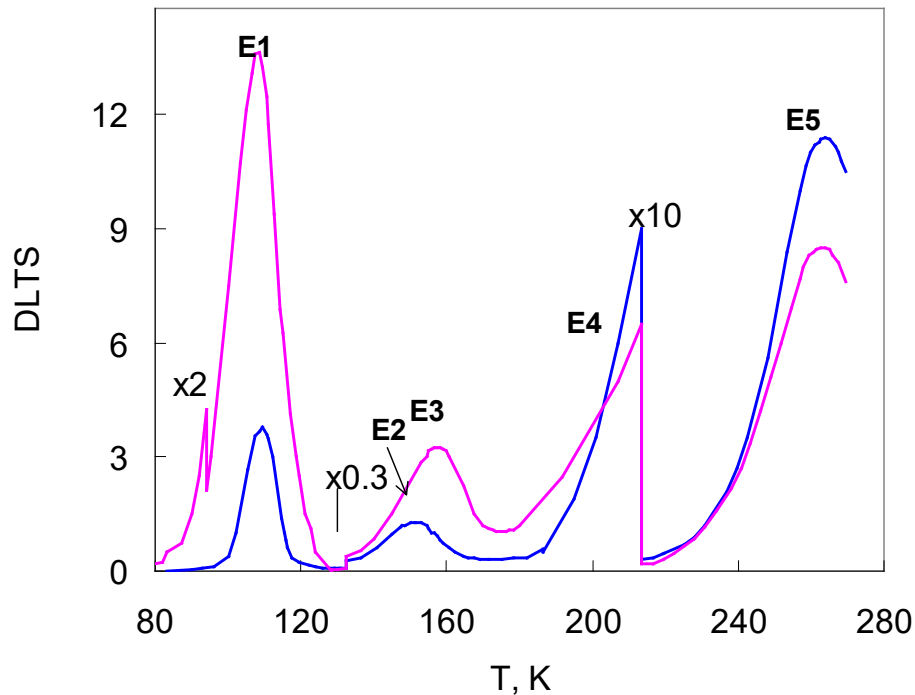
Образование углеводородной пленки



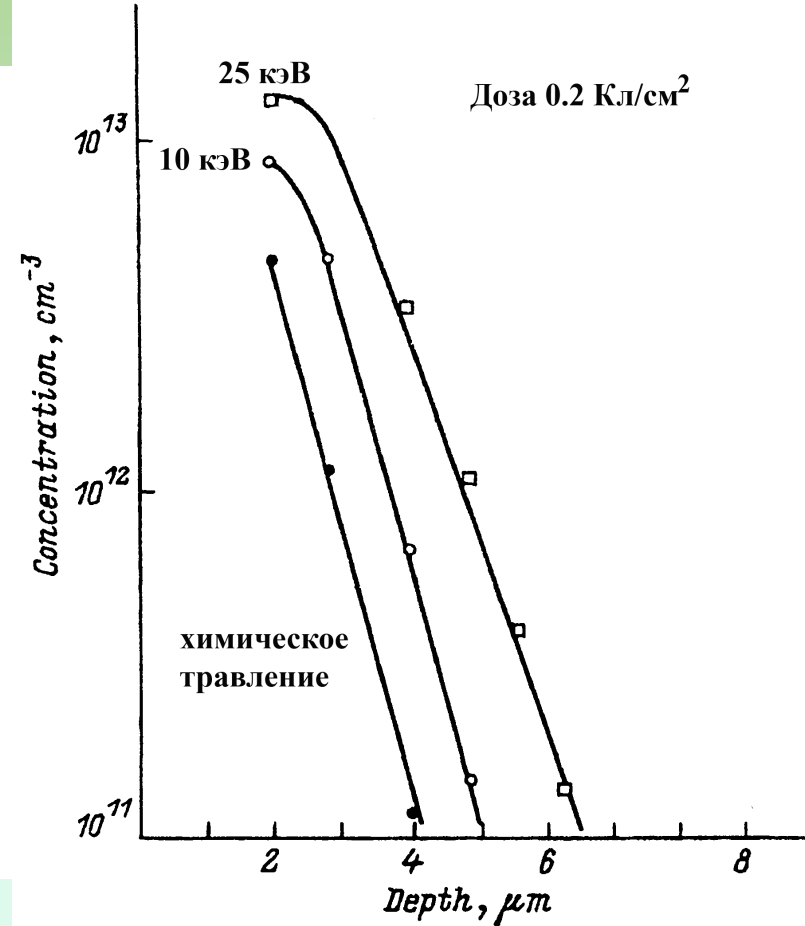
Рост углеводородных фигур



Стимулированная облучением диффузия Н

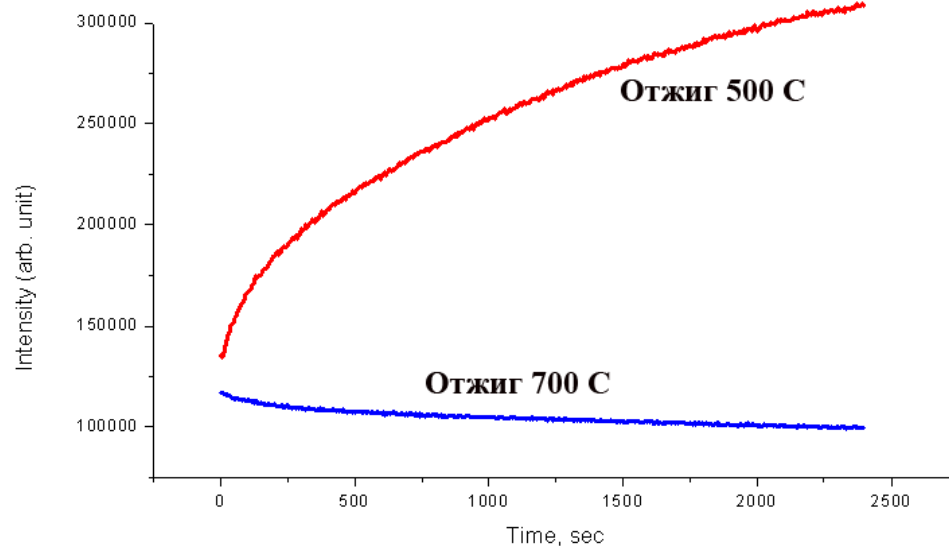
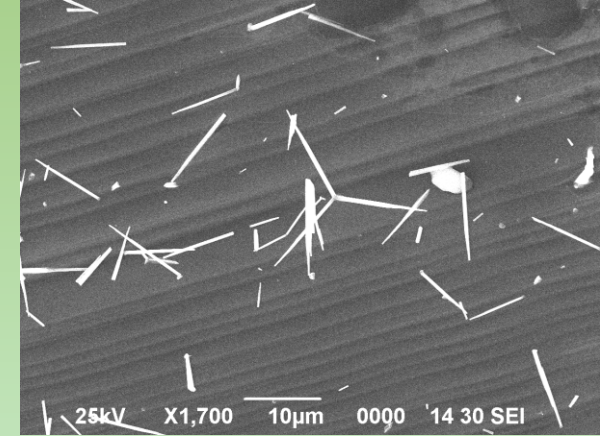


Диссоциация водород-содержащих молекул на поверхности и диффузия атомарного водорода

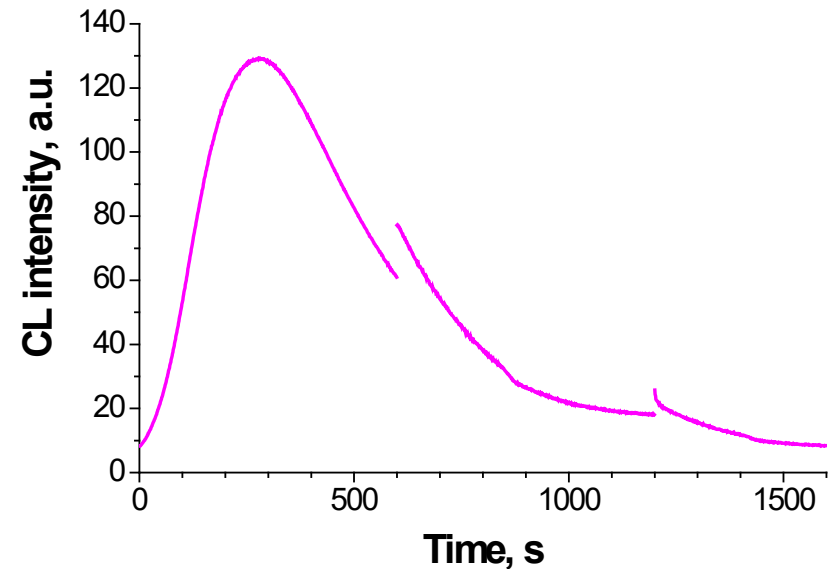


Распределение центров Au-H по глубине в Si, легированном Au, после облучения в РЭМ

Влияние LEEVI на оптические свойства ZnO



КЛ пленок ZnO

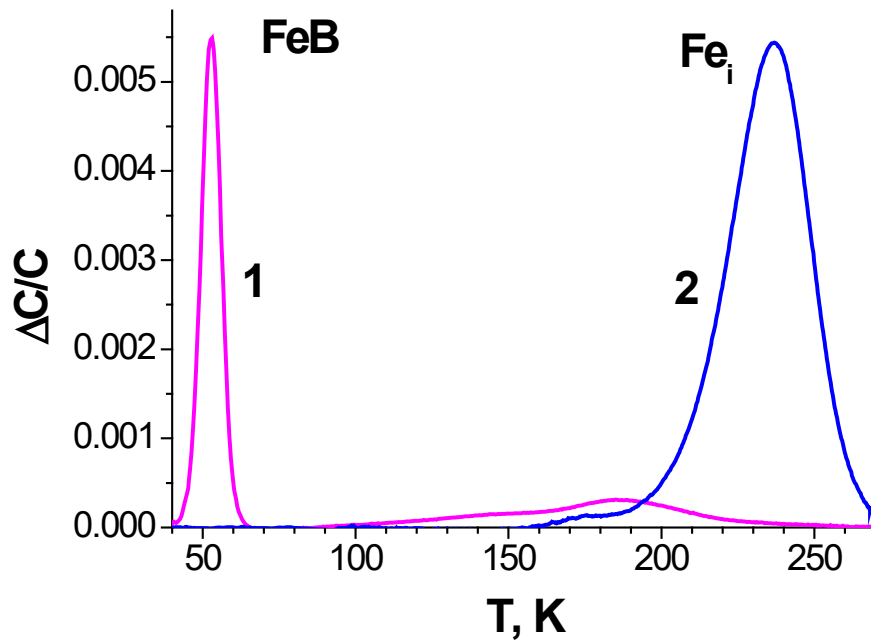


КЛ индивидуальных
наностолбиков ZnO

А.Н. Грузинцев и др., Поверхность, № 8, 70, 2011.

A.N. Gruzintsev et al, Phys. Stat. Sol. (c), 8, 1403, 2011.

Диссоциация комплексов



**Диссоциация пар FeB в Si при
инжекции**

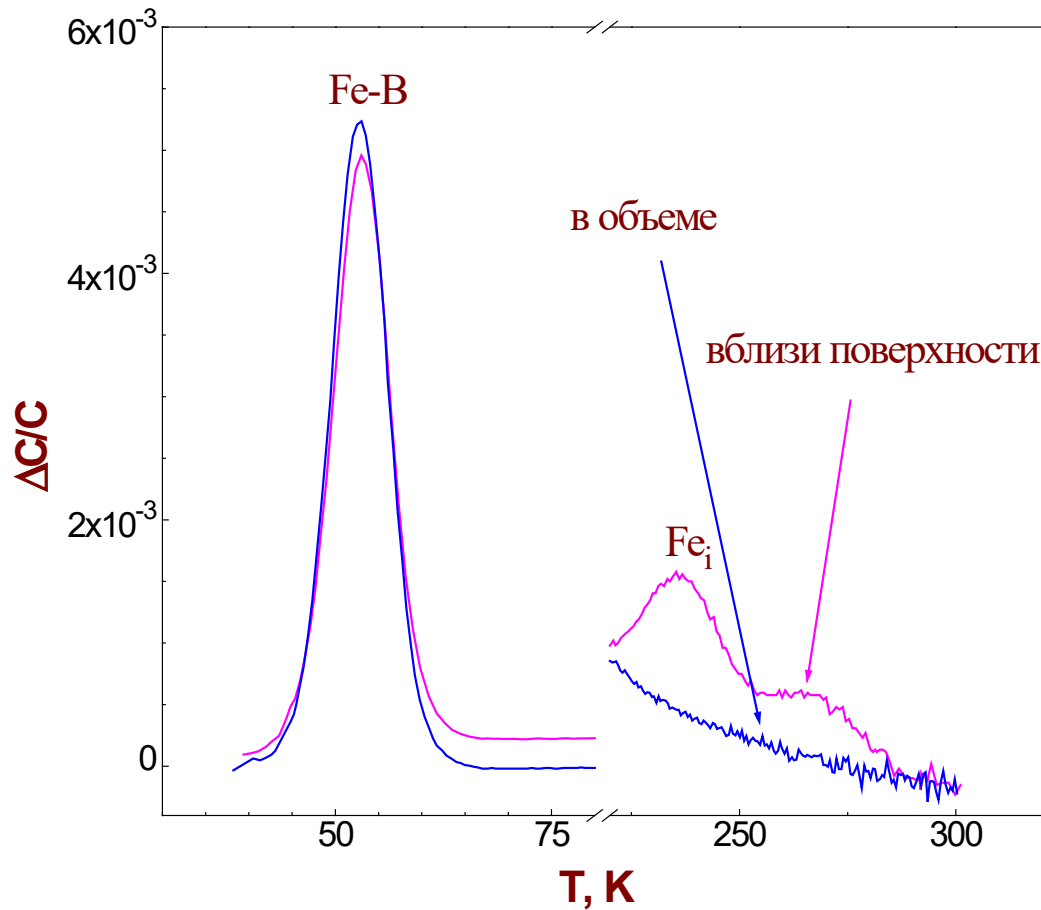
**Диссоциация пар Mg-H в
GaN, стимулированная
облучением электронным
пучком**

**Формирование первых
светодиодов на основе GaN**

Н. Amano, M. Kito, K. Hiramatsu, I. Akasaki. Jpn J. Appl. Phys., **28**, L2112, 1989.

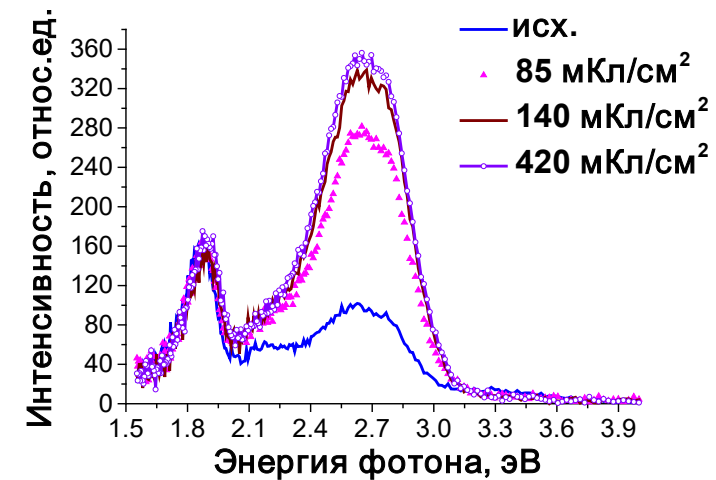
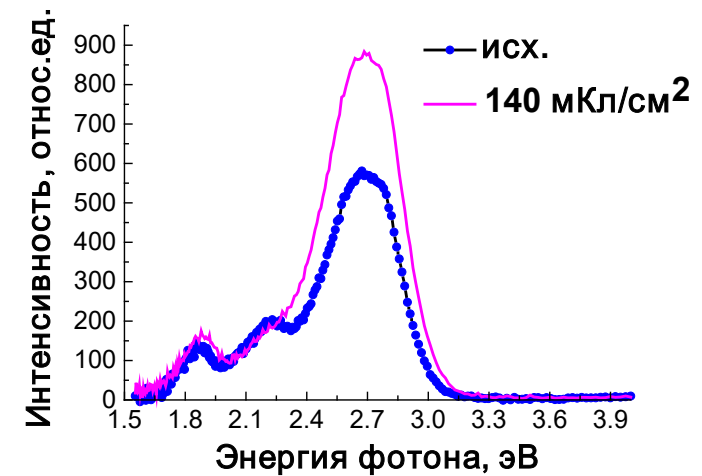
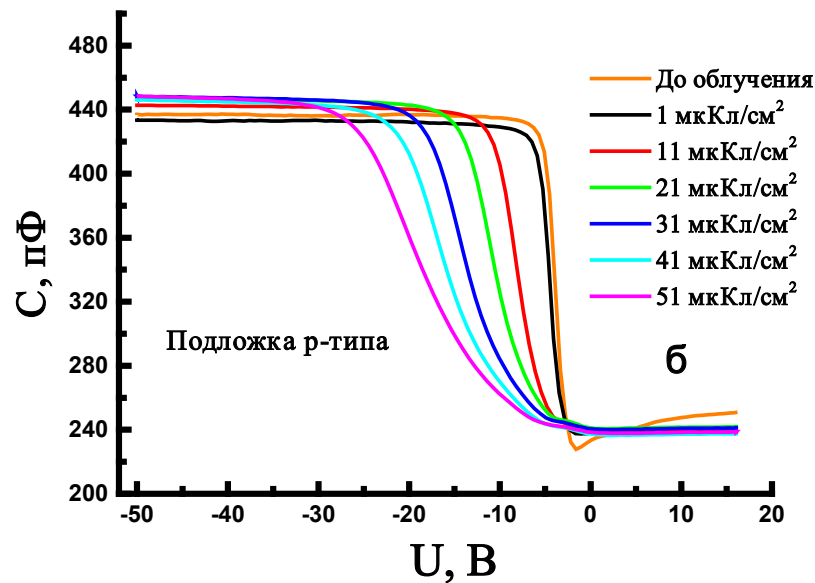
S.J. Pearton, J.W. Lee, C. Yuan. Appl. Phys. Lett., **68**, 2690, 1996.

Влияние водорода на состояние Fe в Si



O.V. Feklisova et al, Mater. Sci. Engineer. B, 71, 268, 2000.

Влияние LEEVI на SiO_2



Полоса при 2.7 эВ - двухкоординированный атом Si, имеющий только два соседних атома кислорода. Образован путем разрыва двух кремниево-кислородных связей в пределах одного кремниево-кислородного тетраэдра.

Гибридные органо-неорганические перовскиты

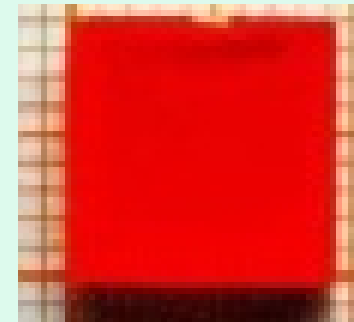
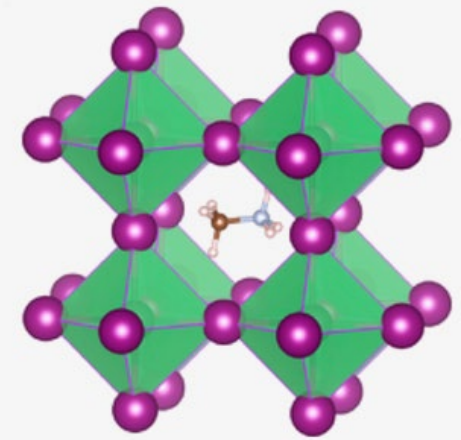


Катион металла (Pb, Cu, Bi)

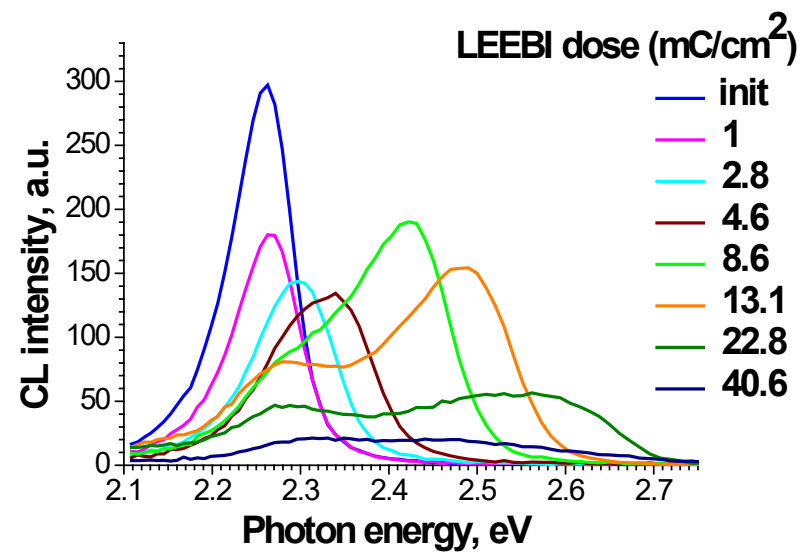
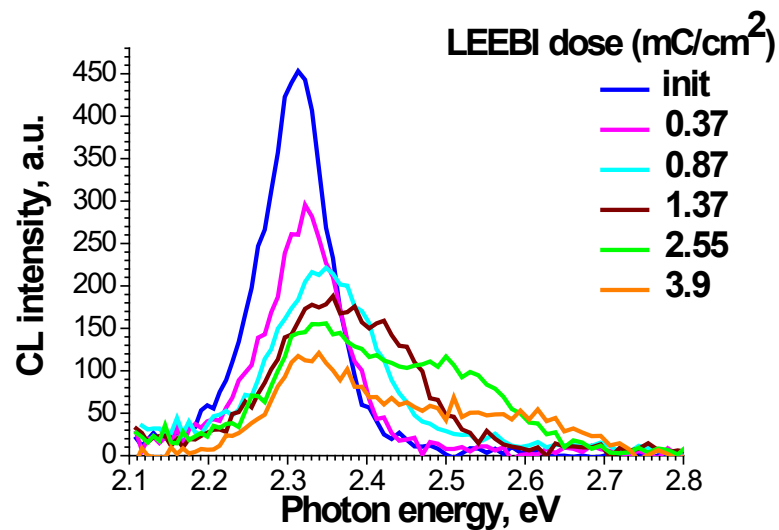
Галоген (I, Br, Cl)

Methylammonium CH_3NH_3 (MA)

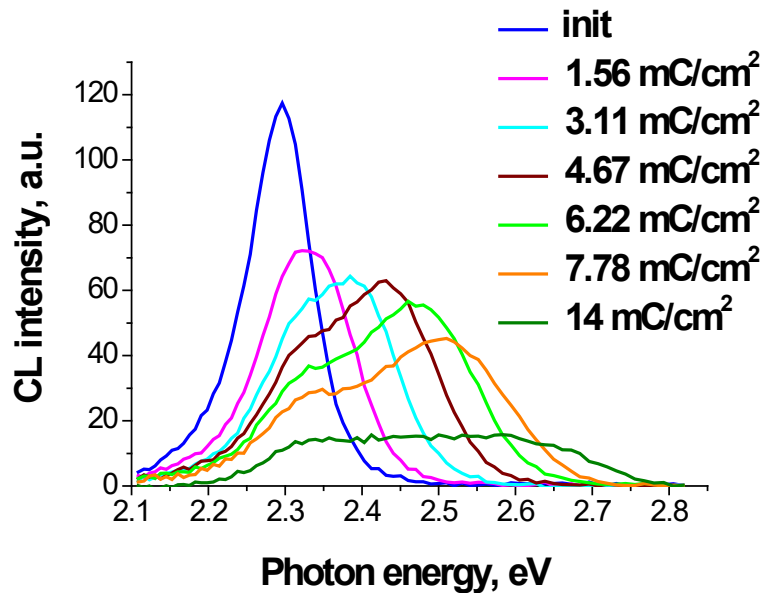
$MAPbBr_3$



Влияние LEEBI на КЛ



$E_b = 2.5$ кЭВ



$E_b = 10$ кЭВ

$E_b = 30$ кЭВ

**Протекают
одинаковые
процессы, но с
разной скоростью?**

Влияние облучения на спектры КЛ

Гашение полосы излучения

межзонного перехода

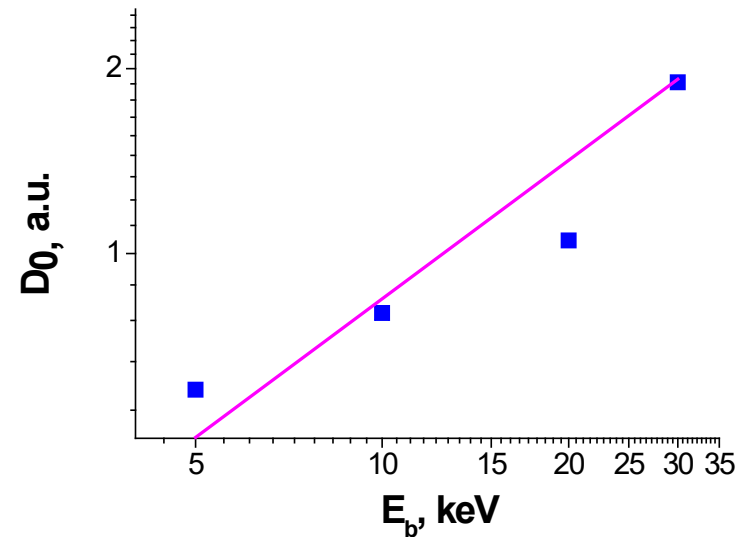
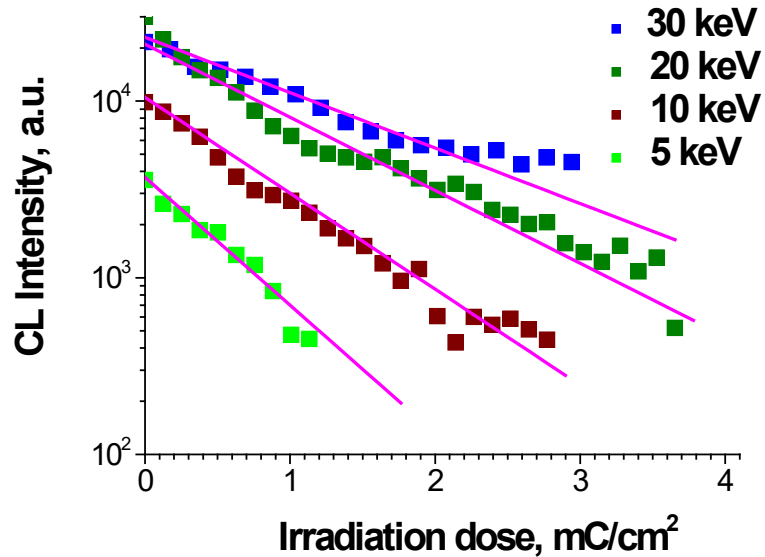
Энергия новых полос излучения

больше ширины запрещенной зоны



Модификация исходного кристалла с
образованием новых фаз

Спад интенсивности полосы 2.26 эВ



Скорость спада $C \sim \exp(-D_{\text{irr}}/D_0)$

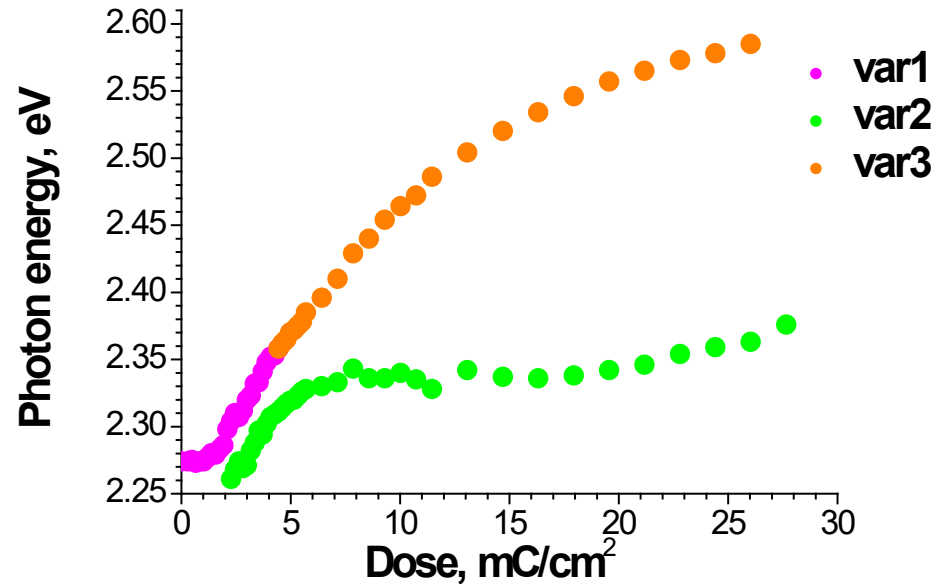
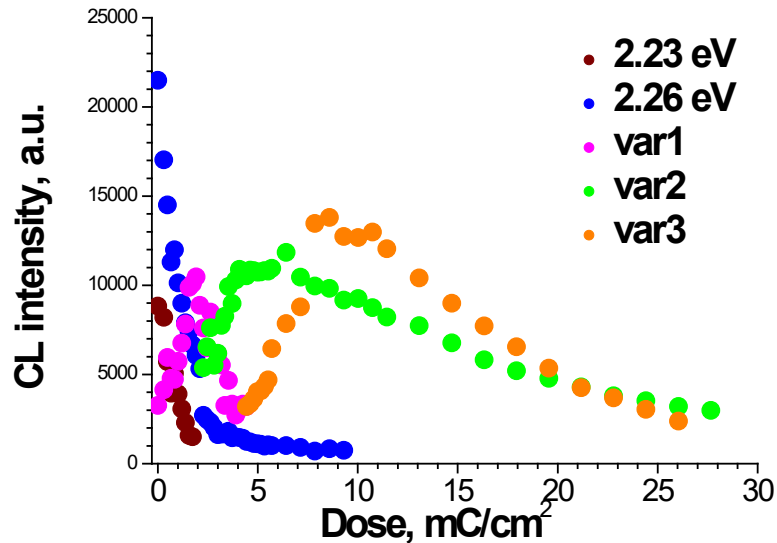
$D_0 \sim E_b^{0.7}$

Средняя концентрация неравновесных носителей

$\Delta p = G/(\pi D R) \sim E_b^{-0.75}$

$D_0 \sim 1/\Delta p$ роль неравновесных носителей?

Трансформация спектров при облучении с $E_b = 30$ кэВ



Видно, что исходные полосы излучения с энергиями 2.26 и 2.23 эВ затухают при облучении и появляются 3 новые полосы, поведение которых можно описать в предположении, что их энергия монотонно повышается с дозой облучения.

Радиолиз

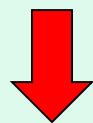
Стимулированный неравновесными
носителями разрыв связей и испарение
продуктов распада

MAPbBr₃ (single crystal)

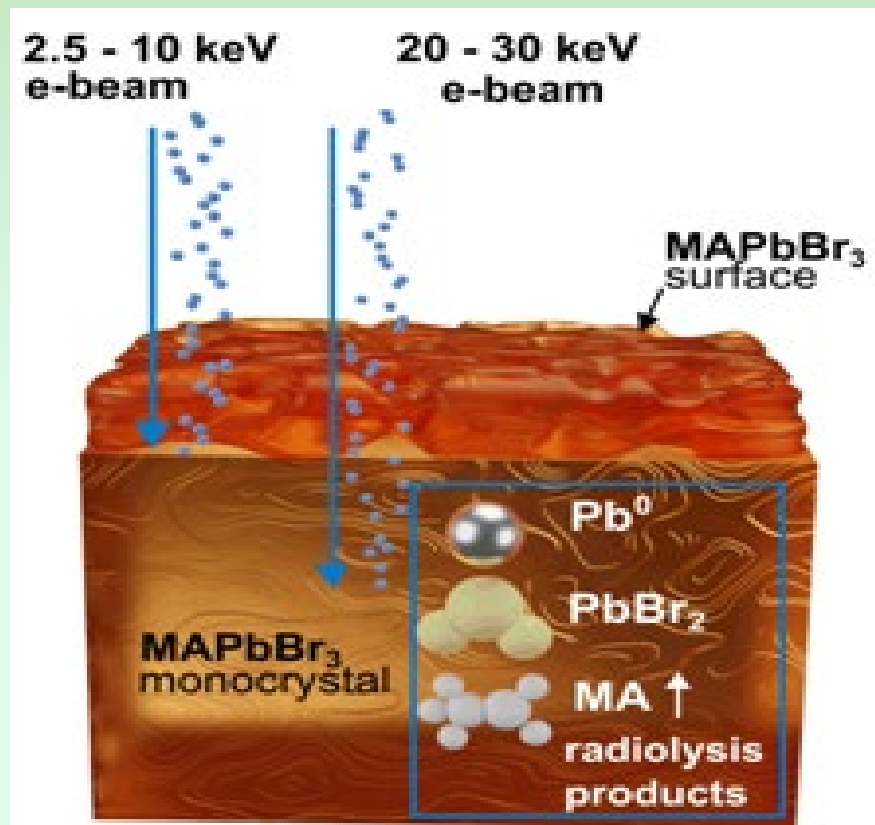


MABr + Br₂ + Pb

MAPbI₃



CH₃NH₂ + H₂ + PbI₂



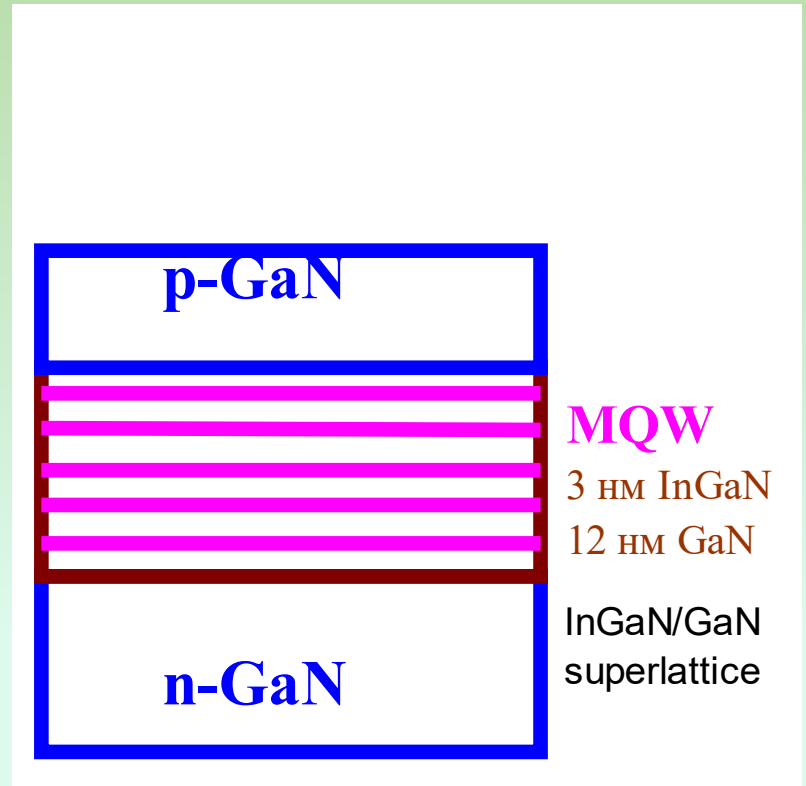
Образцы LED

слой n⁺-GaN толщиной 3 мкм, выращенный методом MOCVD на (0001) сапфире ($N_d \sim 3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$)

1-5 периодов InGaN/GaN MQW

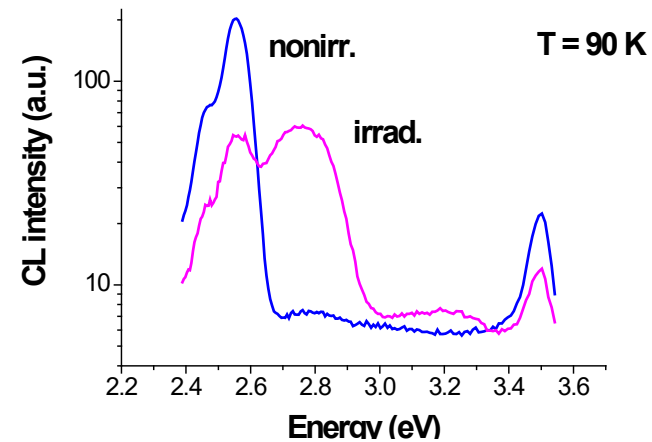
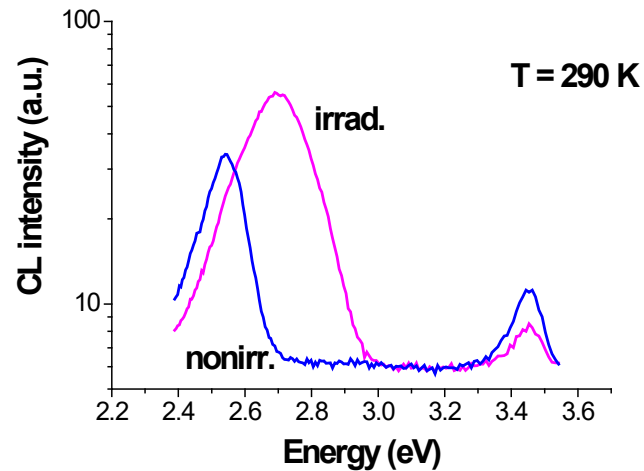
(3 нм InGaN и 12 нм GaN)

0.1 мкм p-GaN ($N_a \sim 10^{20} \text{ см}^{-3}$)

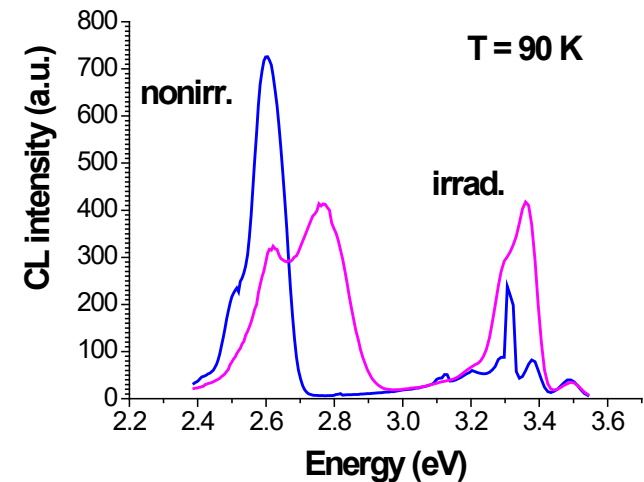
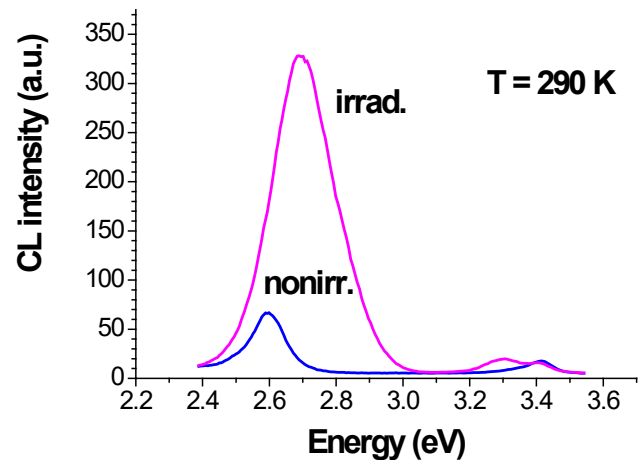


Влияние облучения в РЭМ на спектр КЛ структур с 5 КЯ

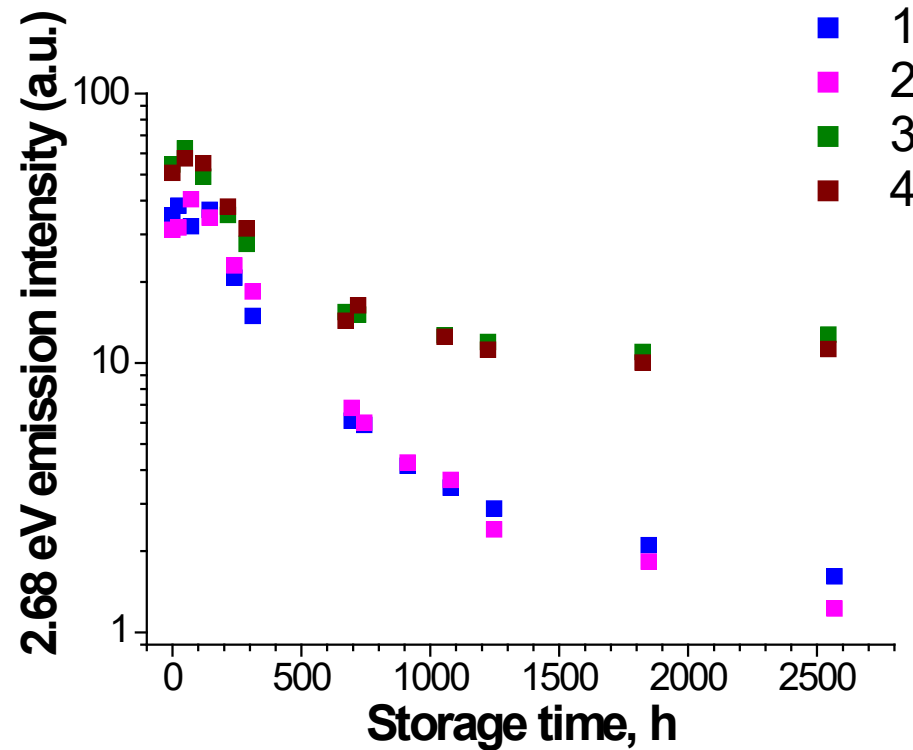
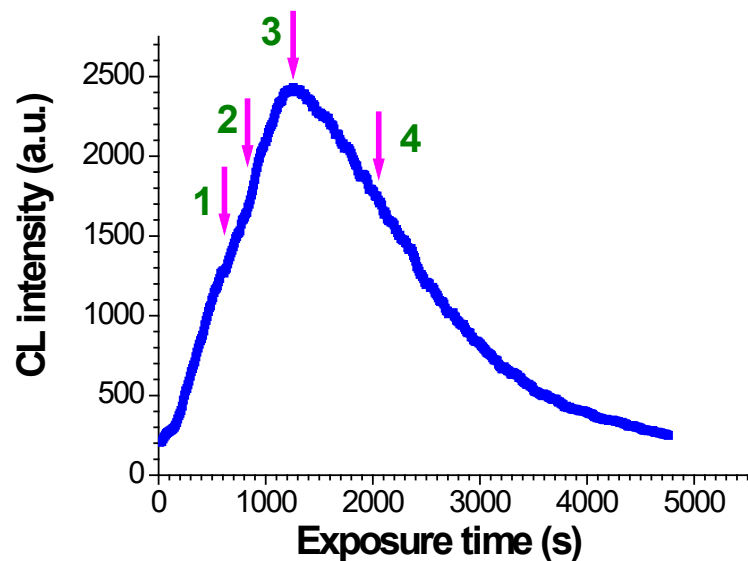
A



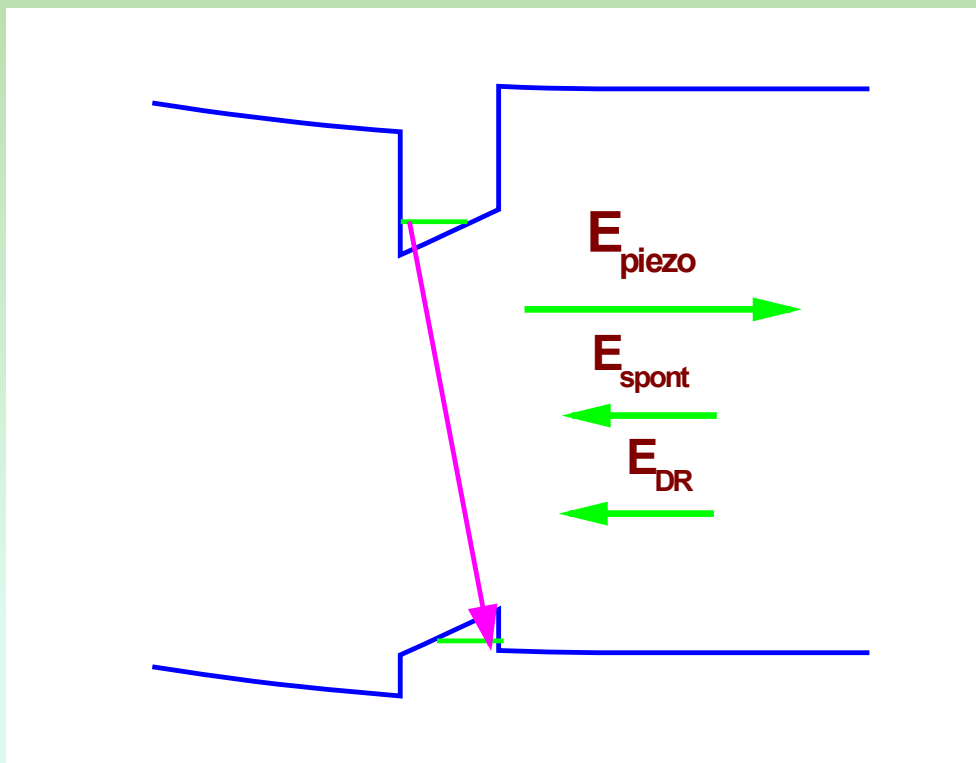
B



Восстановление после LEEBI

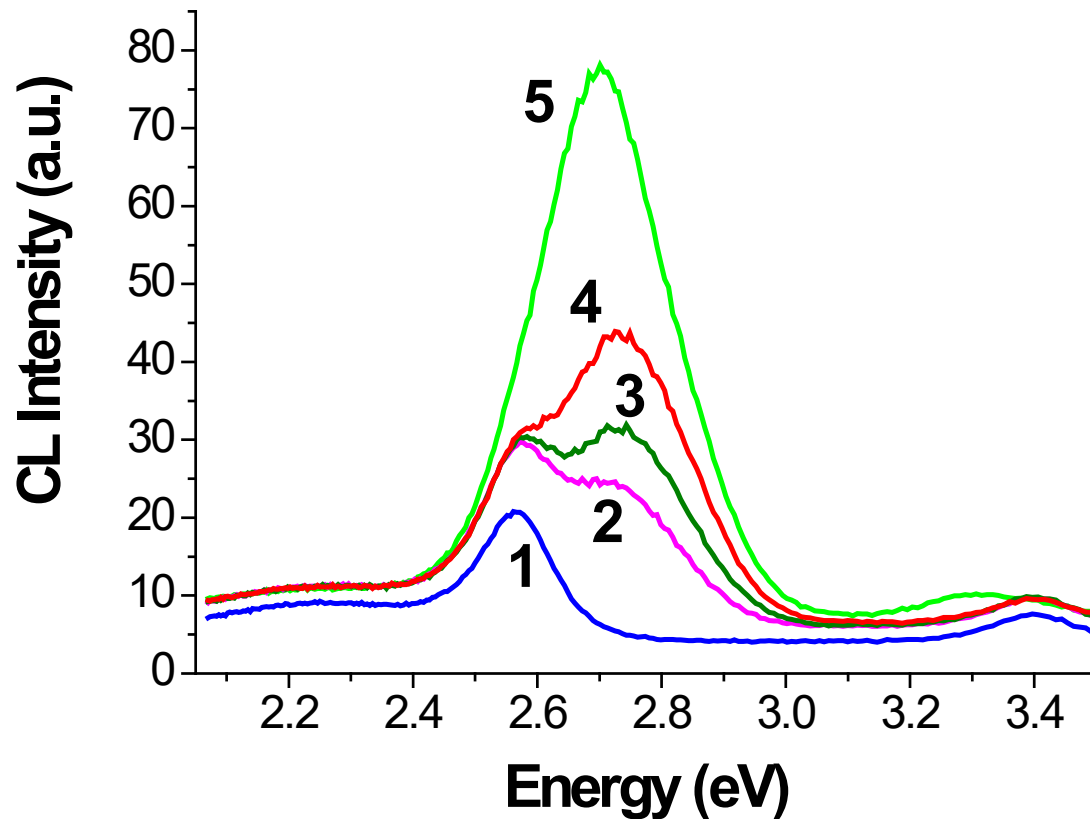


Обычные объяснения



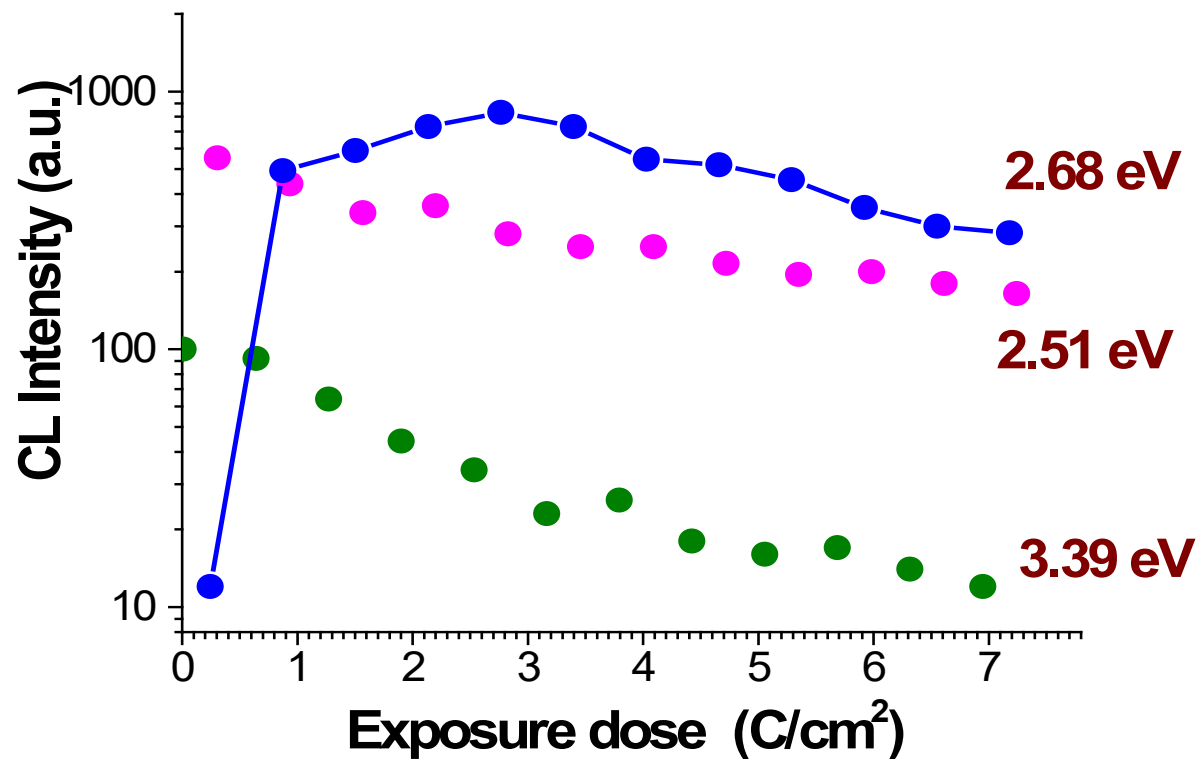
Напряжение сжатия в КЯ  пьезополе

Влияние облучения в РЭМ на спектр КЛ структур с 5 КЯ



Доза 0(1), 0.57 (2) 0.8 (3), 1 (4) и 2.7 Кл/см²

Влияние облучения в РЭМ на спектр КЛ структур с 5 КЯ

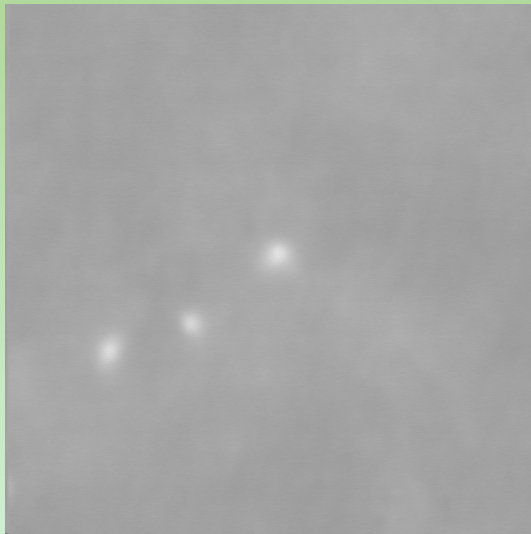


The intensity of initial QW emission line does not practically change under irradiation

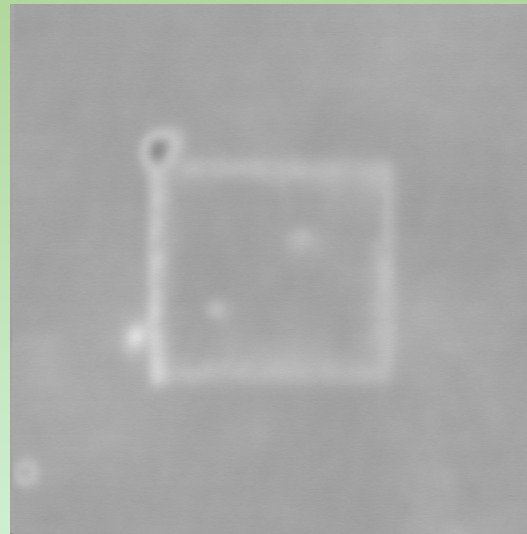


Changes observed occur in small local regions

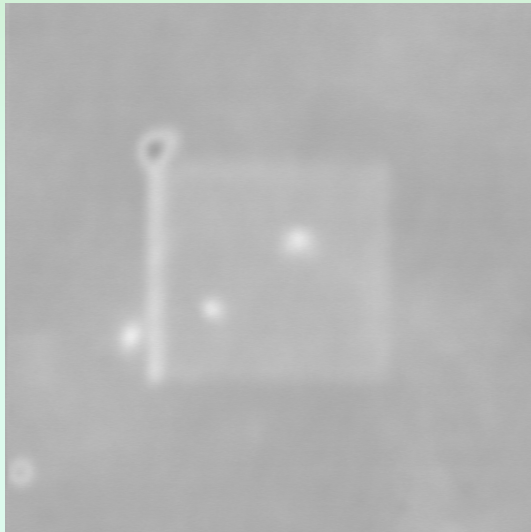
Влияние LEEBI на EBIC



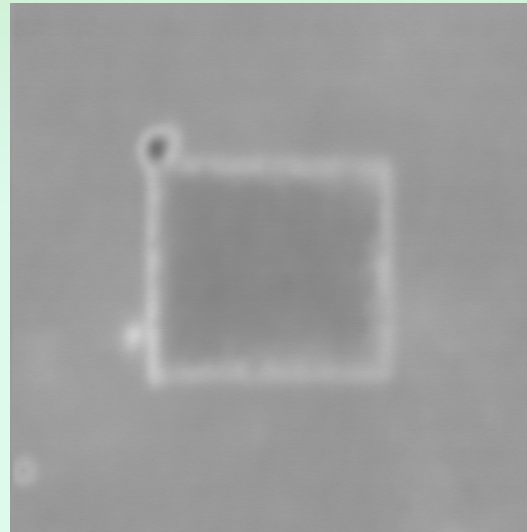
**Before
LEEBI**



2100 s



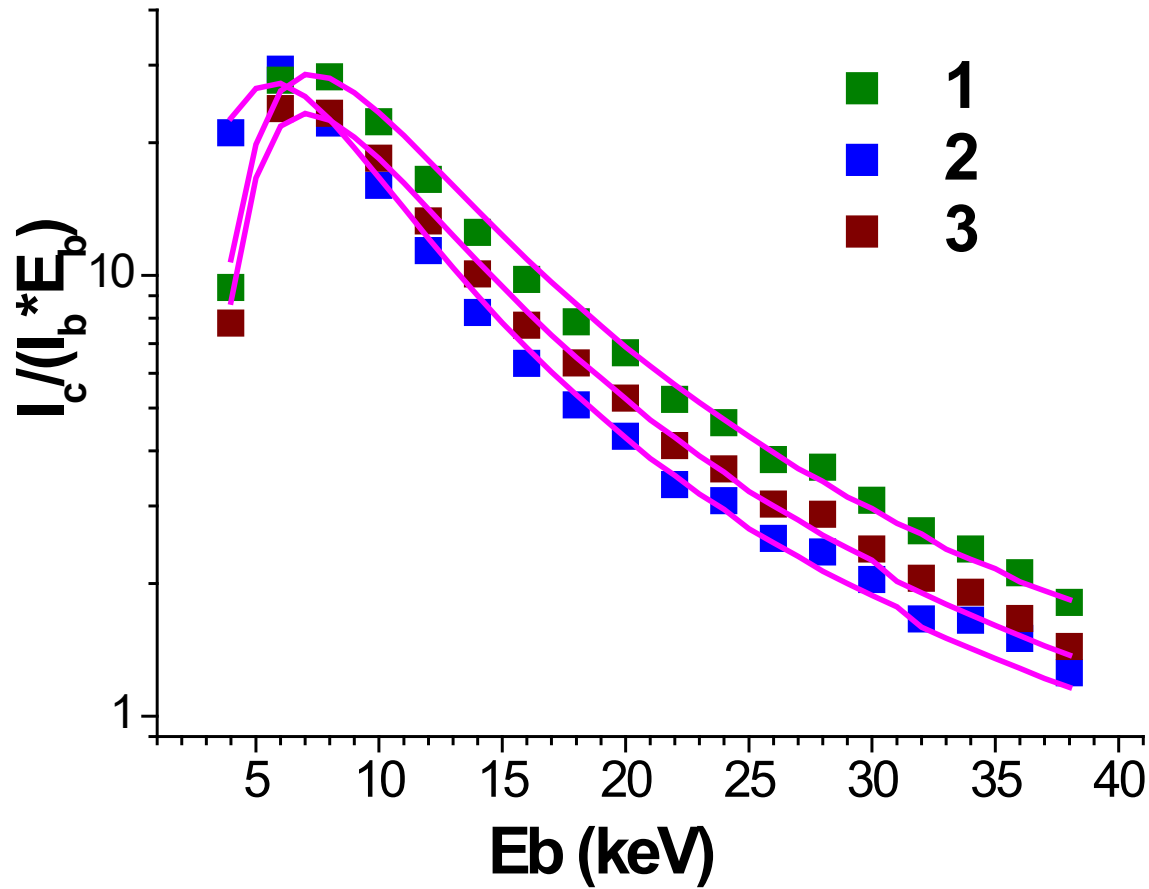
900 s



3300 s

$I_b \sim 10^{-10} \text{ A}$
 $S \sim 19 \mu\text{m}^2$

Влияние LEEBI на EBIC



Dose 0 (1), 1.2 (2) и 15 C/cm² (3)

Влияние LEEVI на EBIC

НА ПЕРВОЙ СТАДИИ ОБЛУЧЕНИЯ

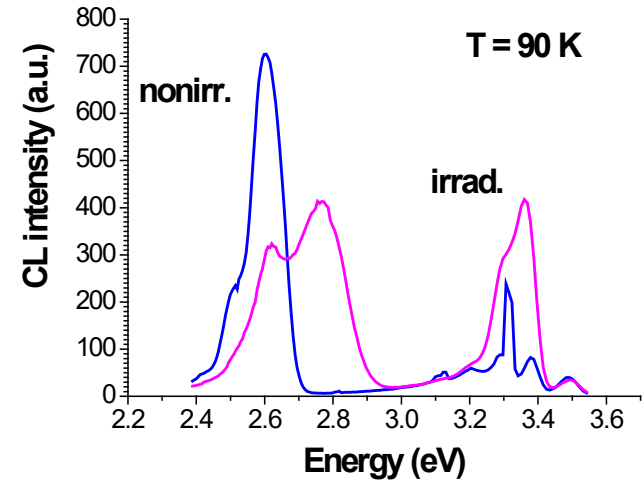
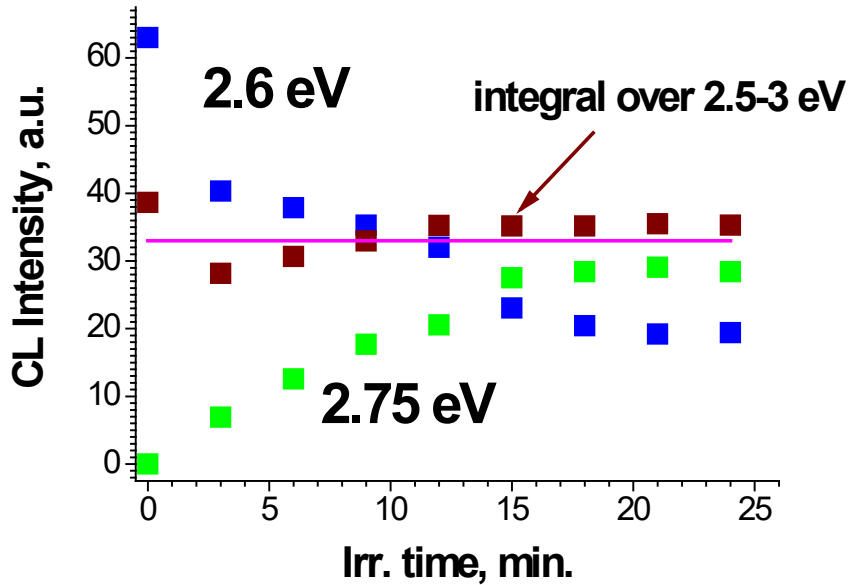
- ❖ эффективная диффузионная длина в p-GaN возрастает с 20 до 70-80 нм
- ❖ доля носителей заряда, захваченных в КЯ, возрастает с 45 до 50-58%
- ❖ эффективная концентрация доноров в активной области возрастает с $5 \cdot 10^{18}$ до $2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$

После облучения с большой дозой

- ❖ эффективная диффузионная длина в p-GaN уменьшается 20 до 17 нм
- ❖ доля носителей заряда, захваченных в КЯ, порядка 50%
- ❖ эффективная концентрация доноров в активной области $2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$

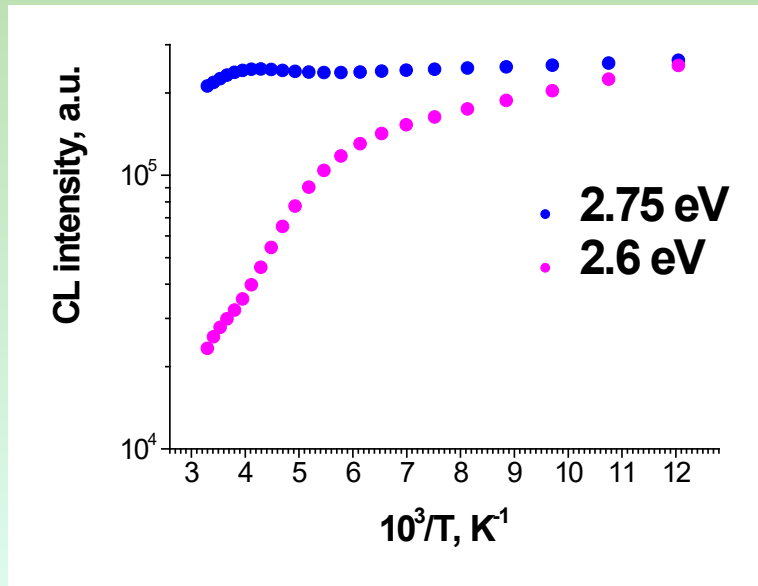
Влияние облучения в РЭМ на спектр КЛ структур с 5 КЯ

CL 80 K



At liquid nitrogen T new emitting region compete with other MQW regions while at room T they compete with nonradiative recombination centers.

Температурная зависимость



Энергия локализации ~
100 мэВ

Сдвиг к большим
энергиям



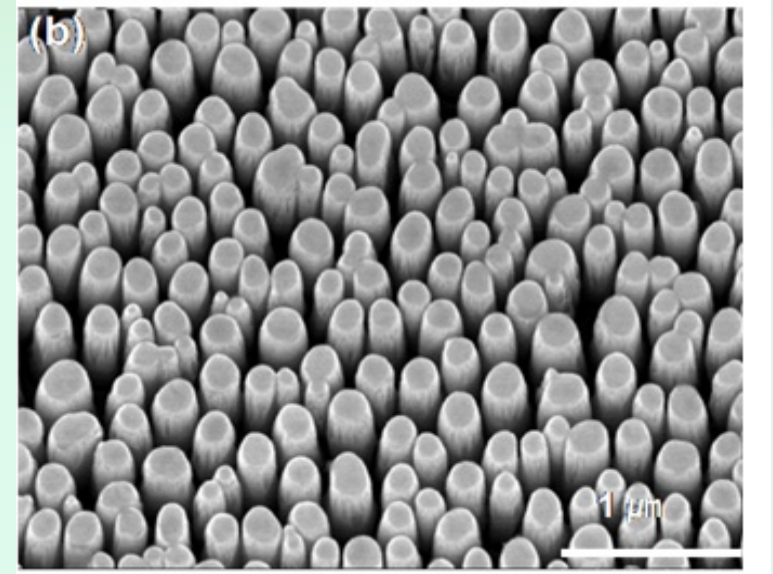
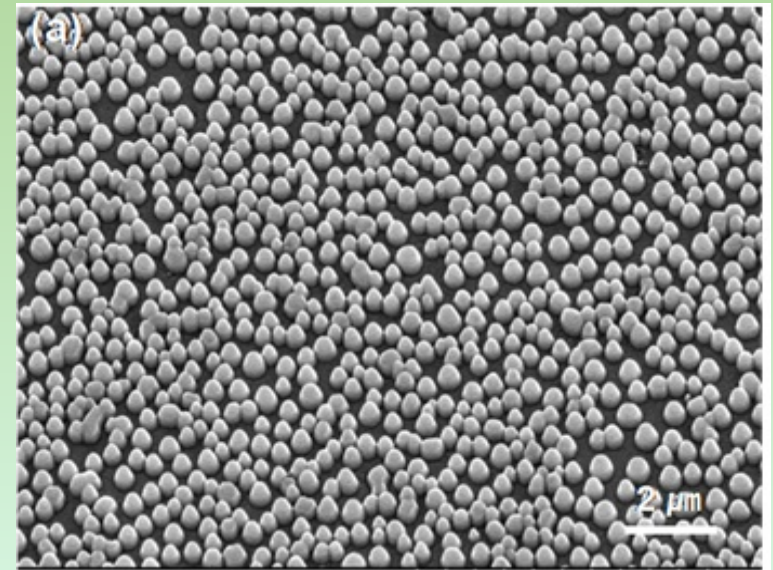
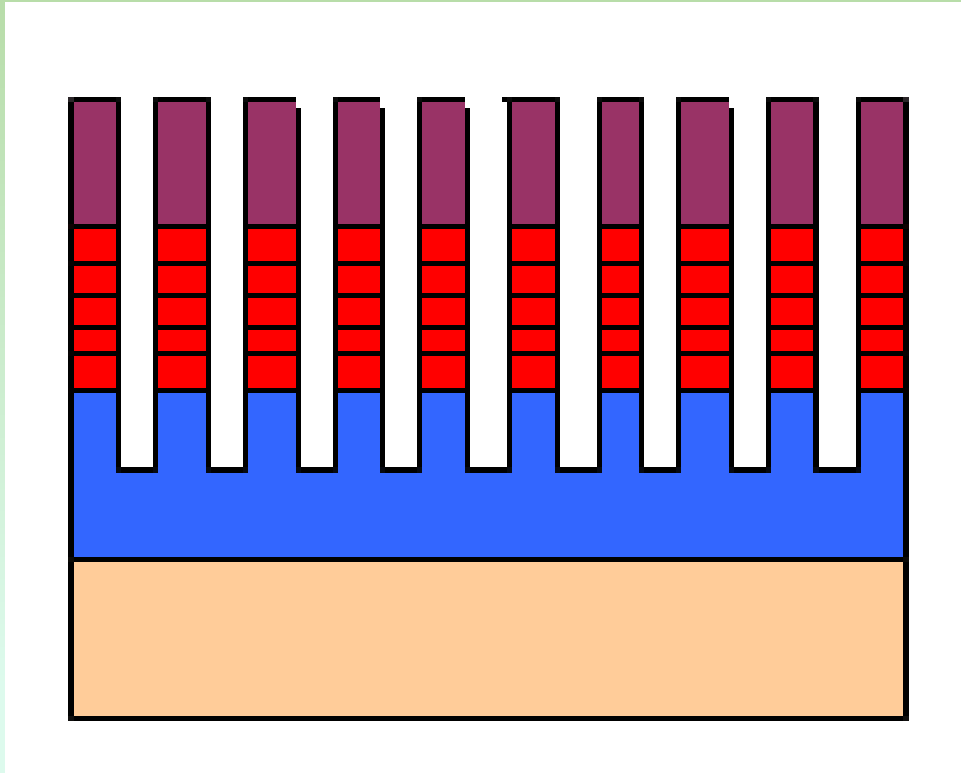
Меньше I_n или
ширина ямы



Слабее
локализация

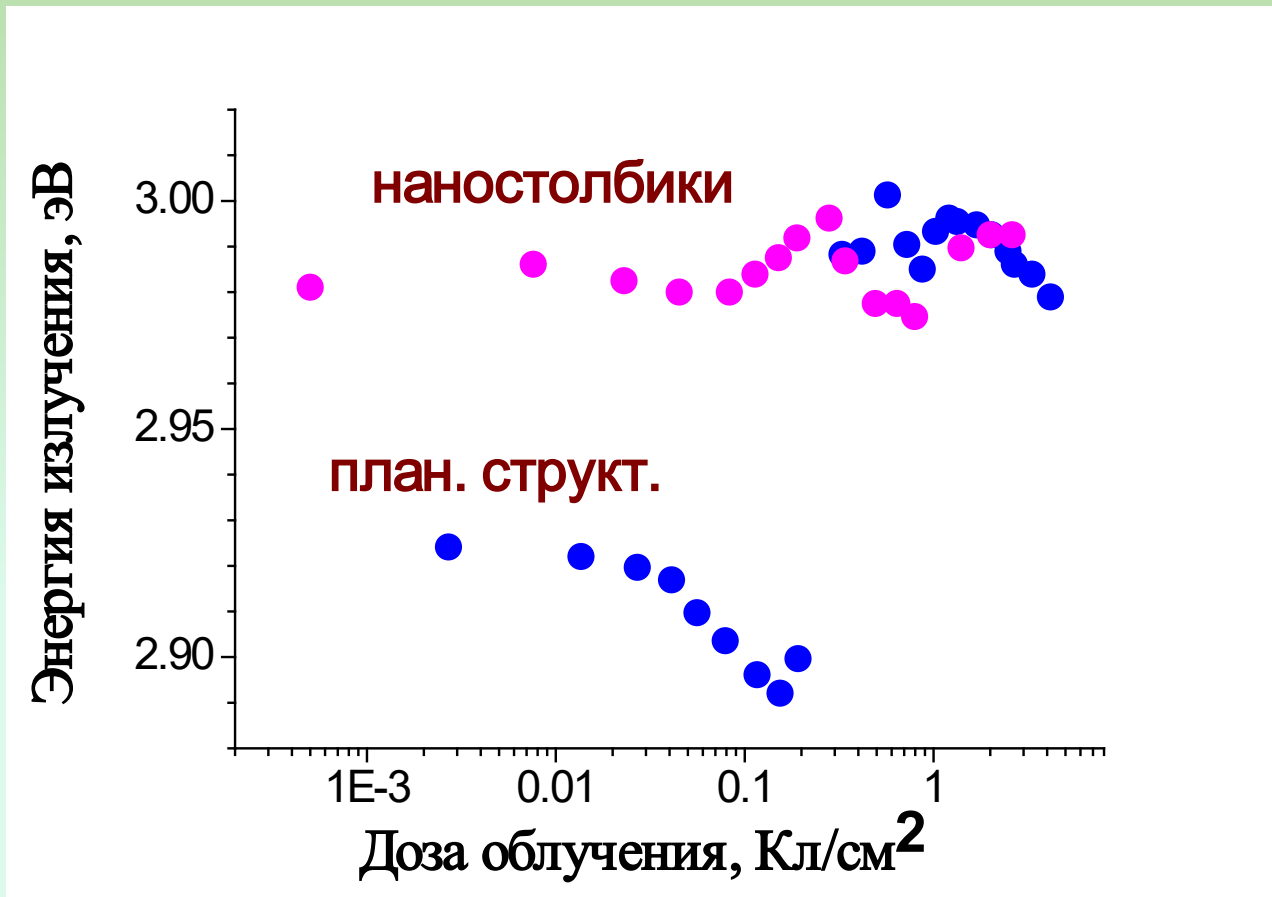
Но локализация сильнее

Облучение наностолбиков

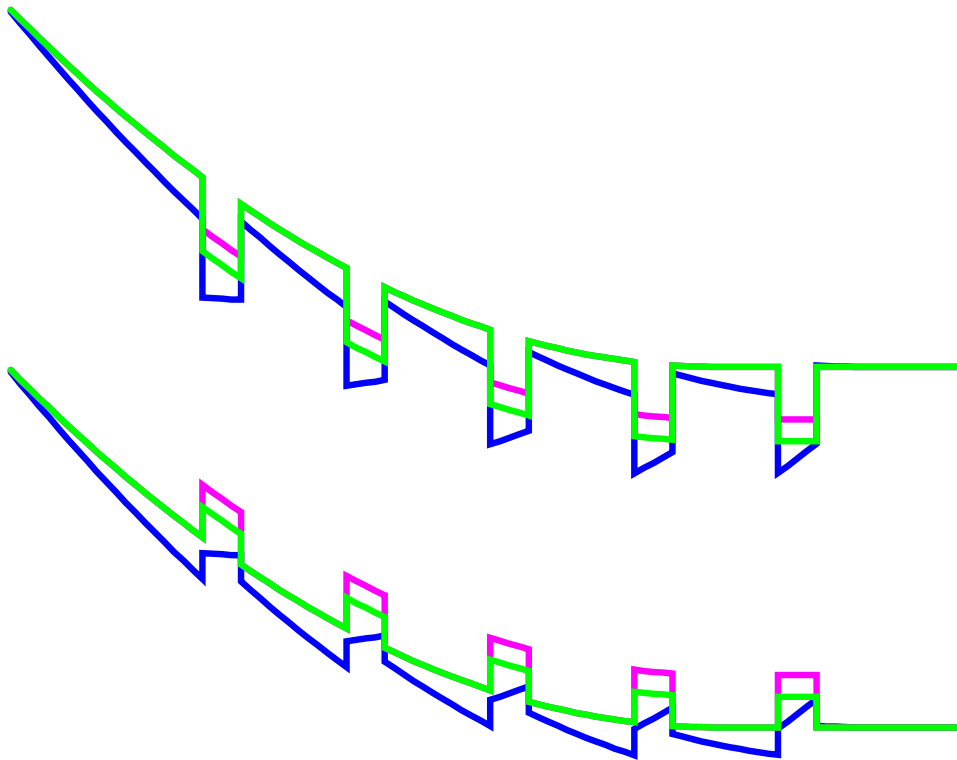


Диаметр $\sim 200\ \text{нм}$, плотность $\sim 10^9\ \text{см}^{-2}$

Сравнение спектров КЛ планарной структуры и наностолбиков



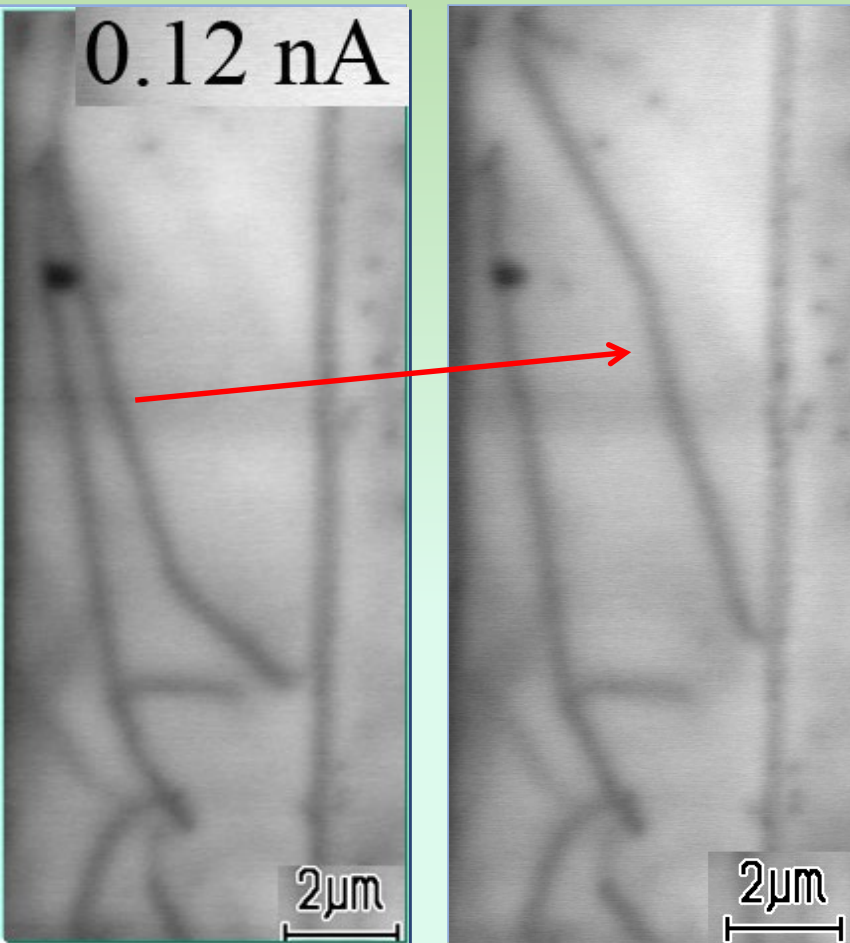
Влияние релаксации напряжений на зонную структуру



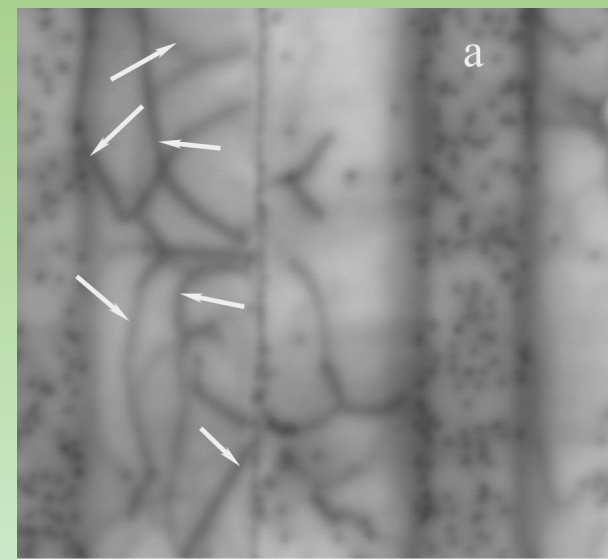
**Увеличивается
глубина ям для
дырок.**

**Понижается поле в
барьерах**

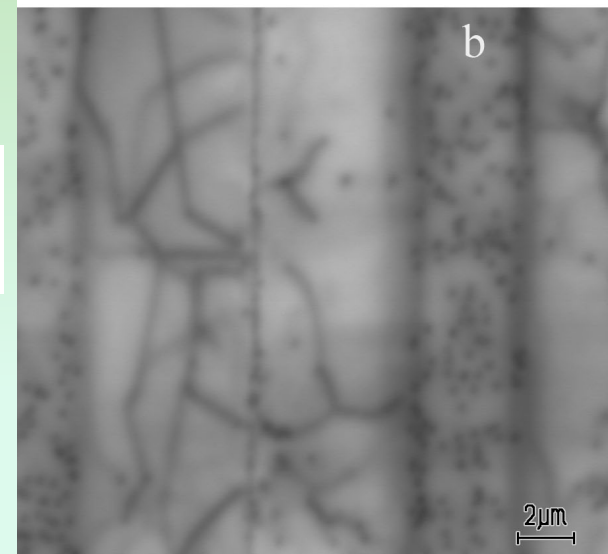
REDG ростовых дислокаций в GaN



before
LEEBI

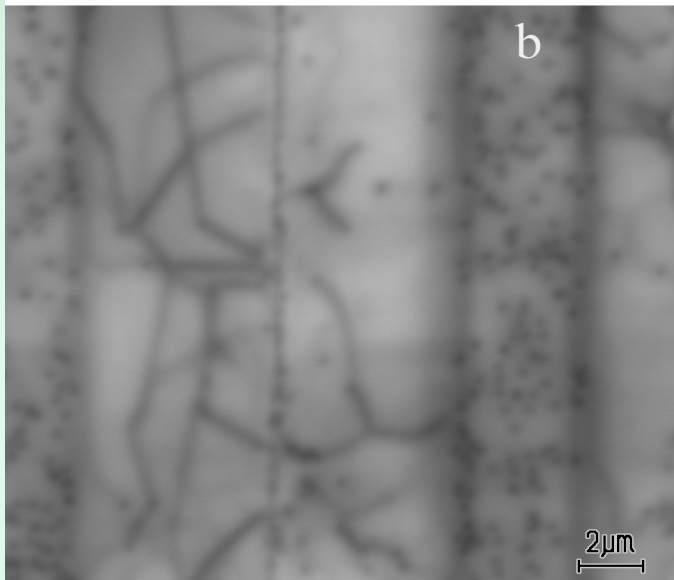
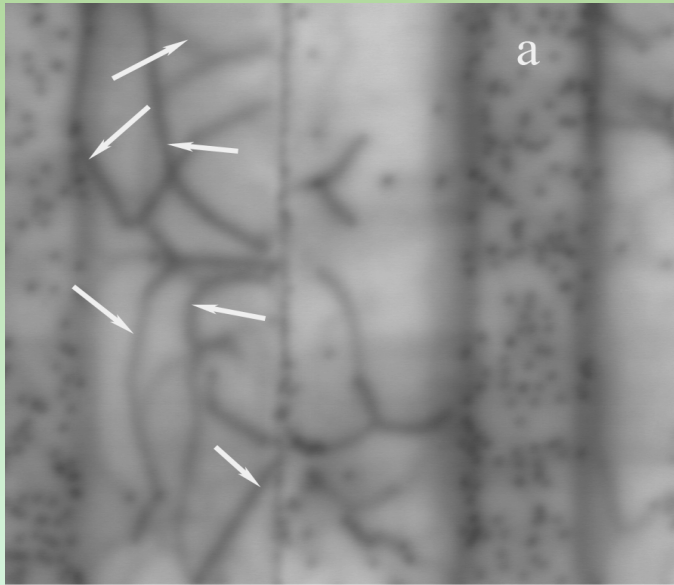


LEEBI, 35 keV,
0.02 C/cm²

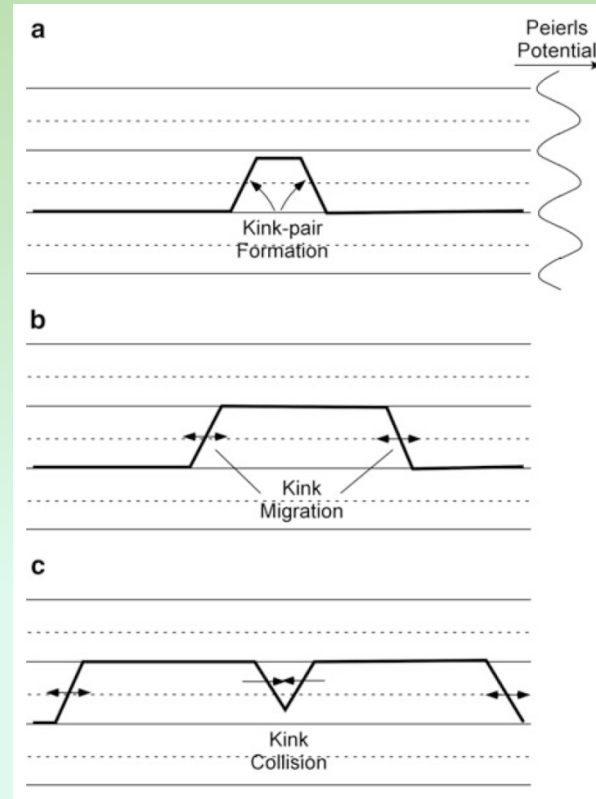


**Смещается только малая доля
дислокаций и смещение не
превышает нескольких мкм**

REDG ростовых дислокаций в GaN

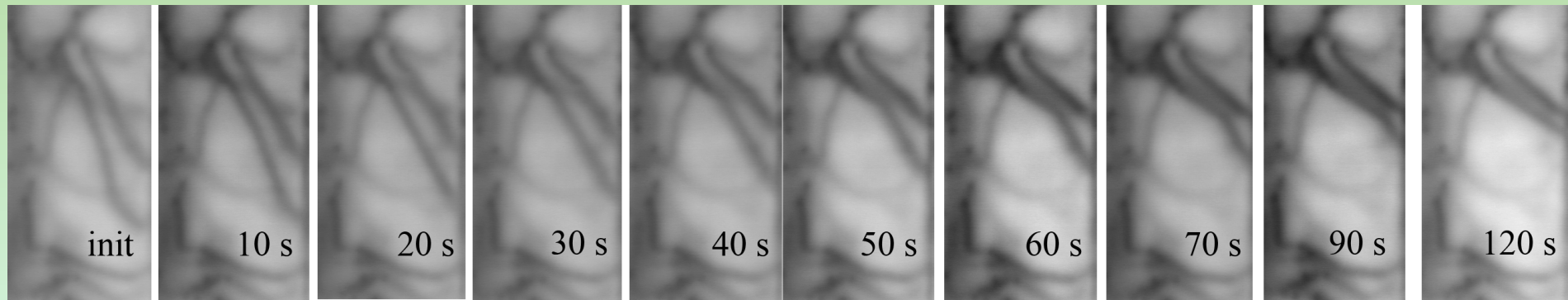


$E_b = 35$ кэВ, ток пучка 1 нА и
доза облучения of $2 \cdot 10^{-2}$ Кл/см²



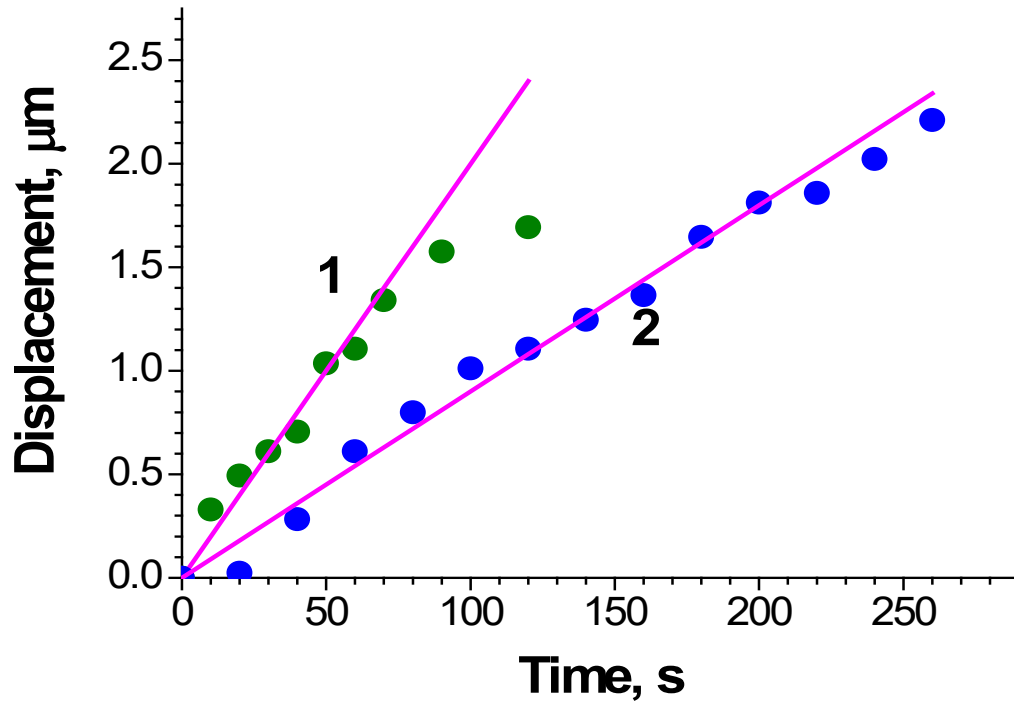
Смещается только малая доля
дислокаций и смещение не
превышает нескольких мкм

REDG ростовых дислокаций в GaN



Ток пучка 1 нА (доза $\sim 1.7 \cdot 10^{-4}$ Кл/см²/с). Ширина изображения 6 мкм.

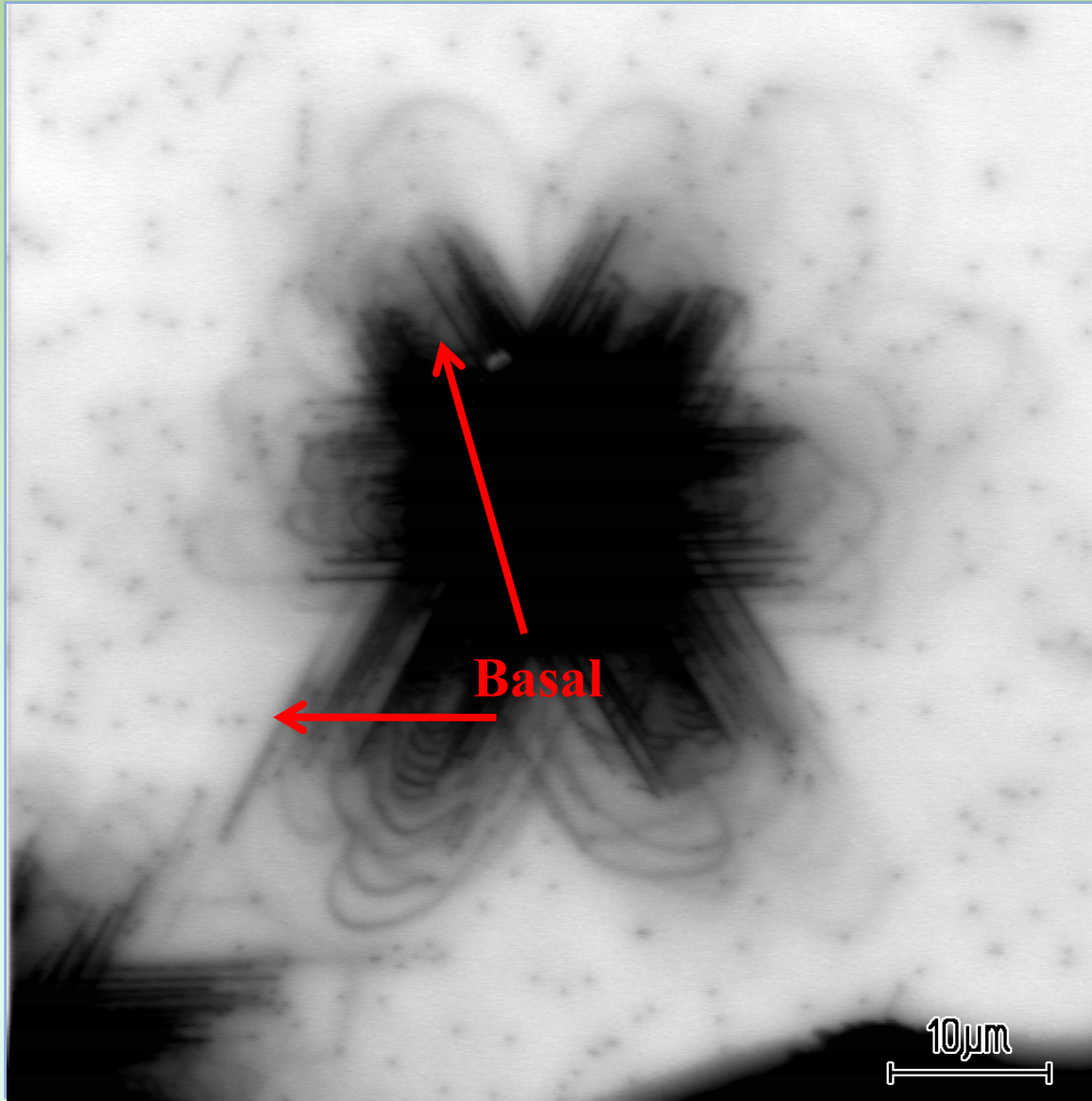
REDG ростовых дислокаций в GaN



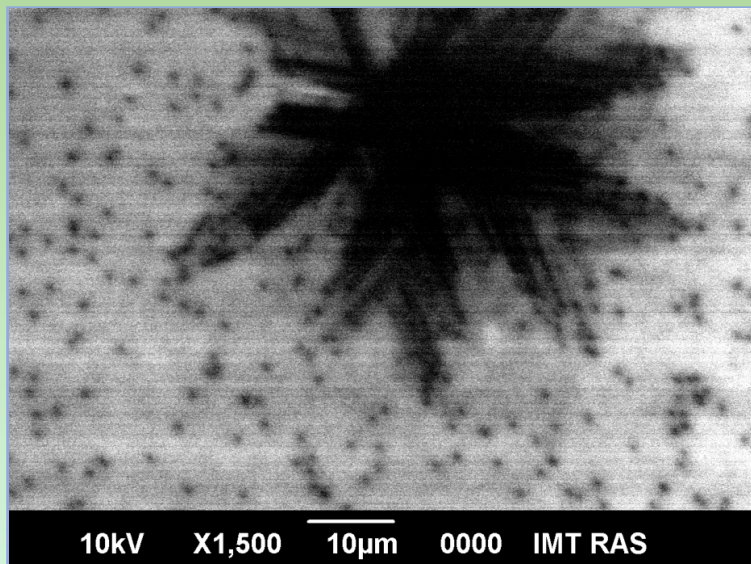
$E_b = 35$ кэВ и ток пучка
1 нА (1) и 0.12 нА (2)

Скорость дислокаций 20 нм/с
($I_b = 1$ нА) и 9 нм/с ($I_b = 0.12$ нА)

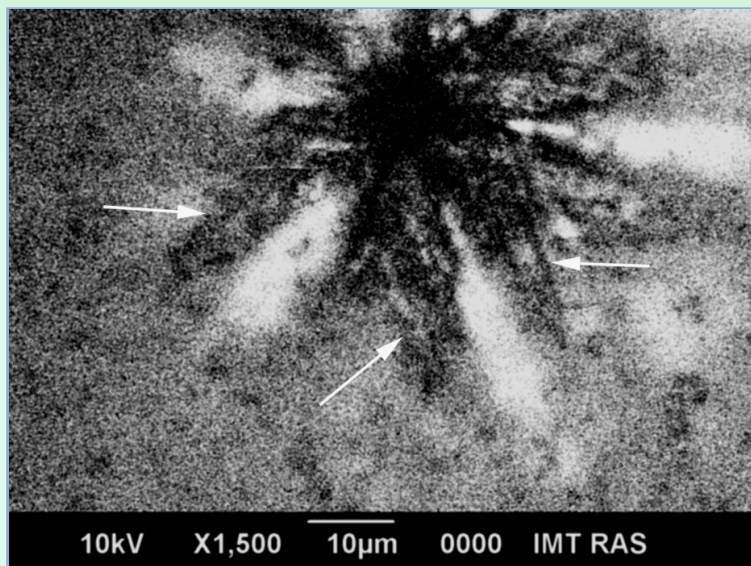
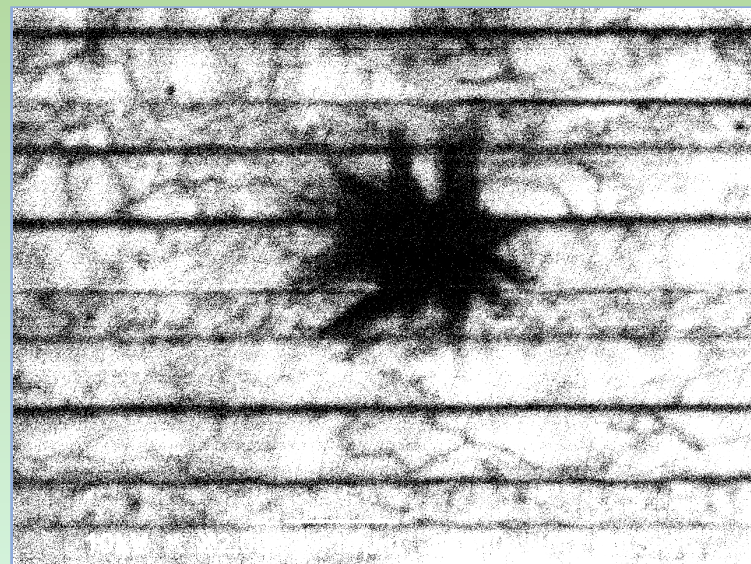
Введенные дислокации в GaN. EBIC



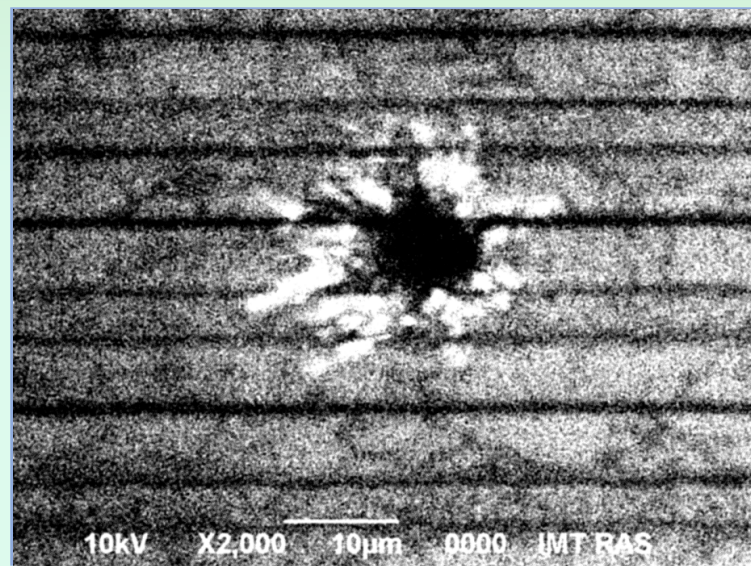
Катодолюминесценция



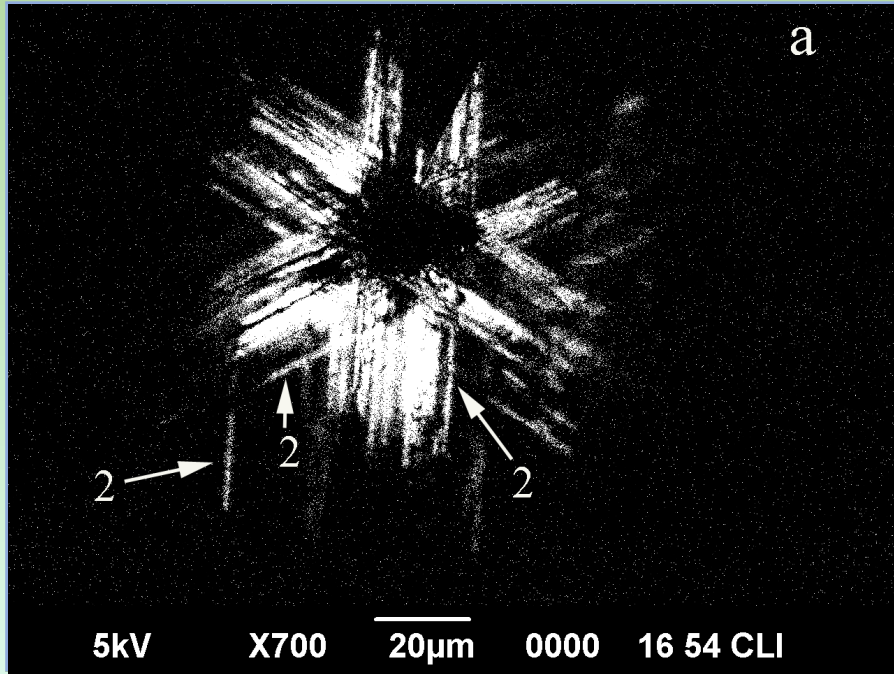
**3.4 eV
NBE**



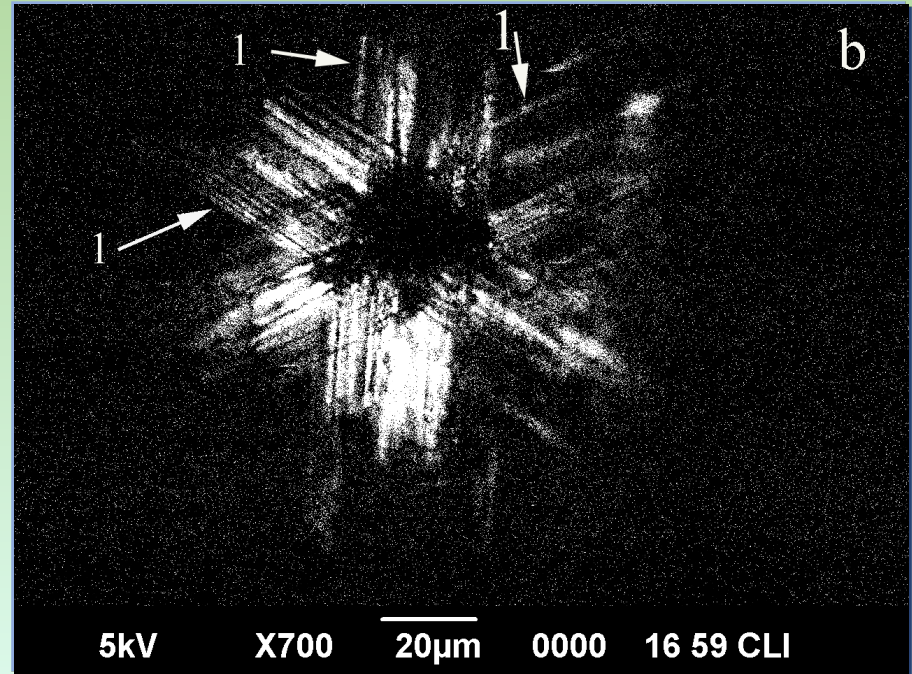
**3.1 eV
DRL**



REDG B GaN



After deformation

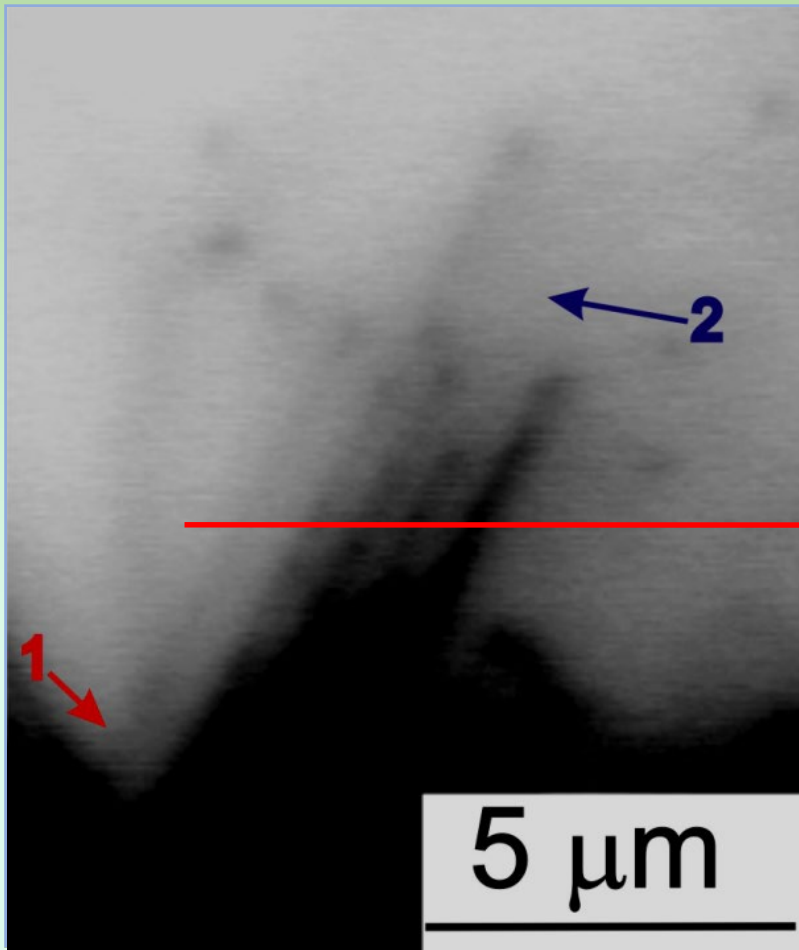


LEEBI for 30 min with $I_b = 60$ nA

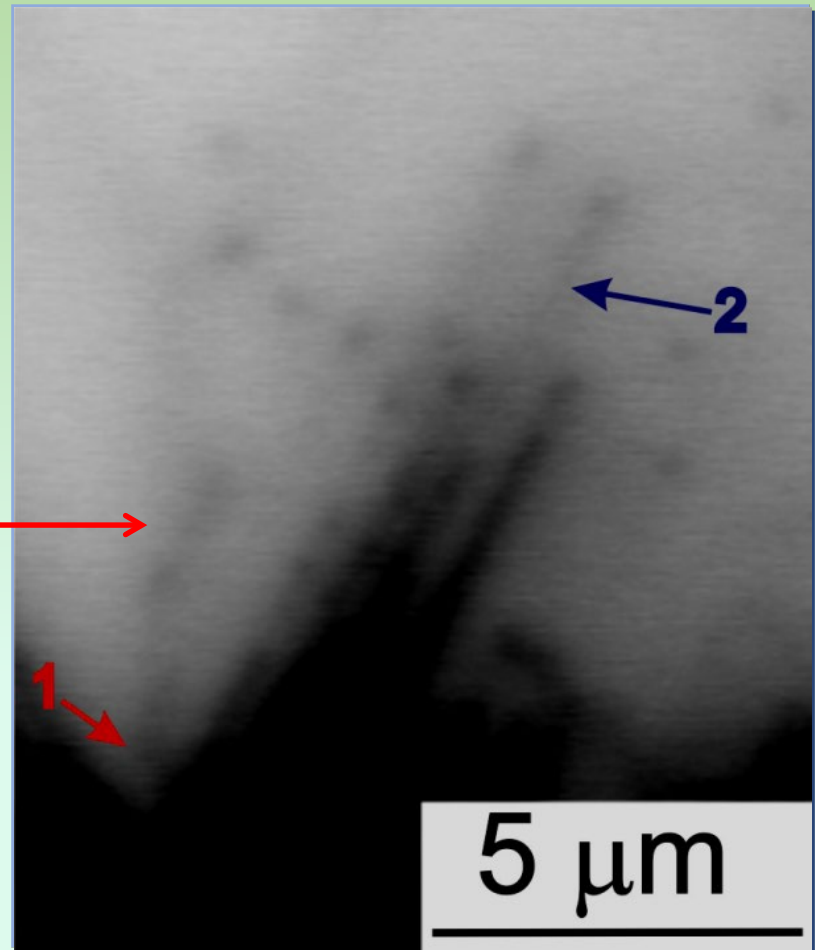
New dislocations appear – 1
Some disappear - 2

REDG в GaN

EBIC, 35 keV



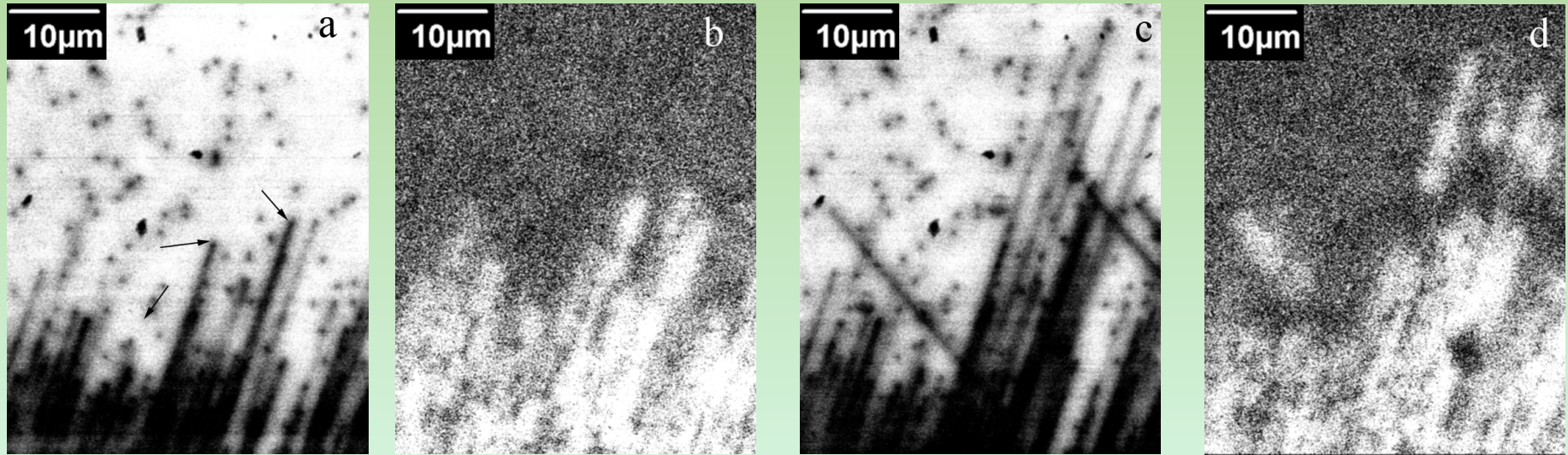
Before LEEBI



After LEEBI

Влияние LEEVI на свежевведенные дислокации

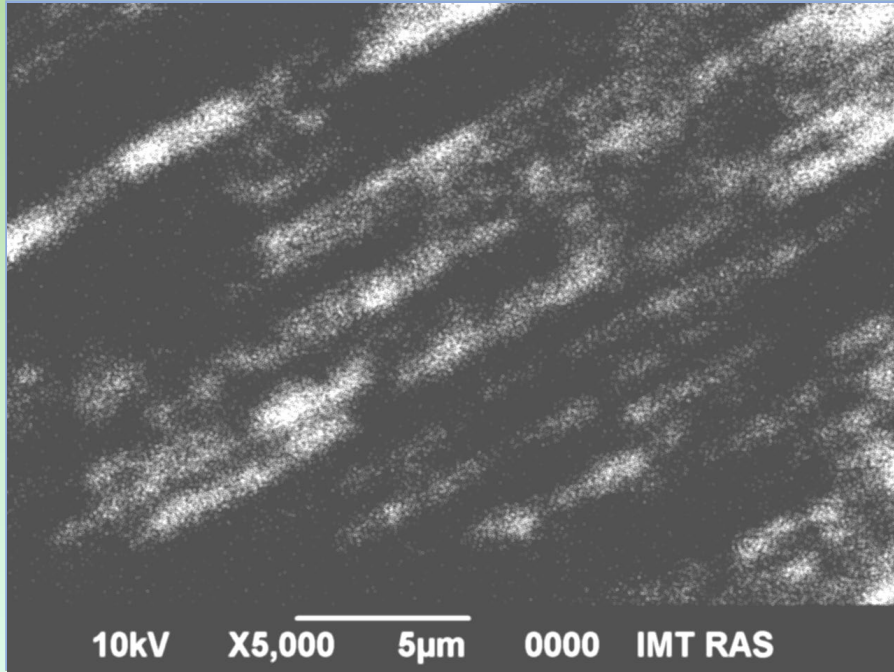
Облучение при T_r



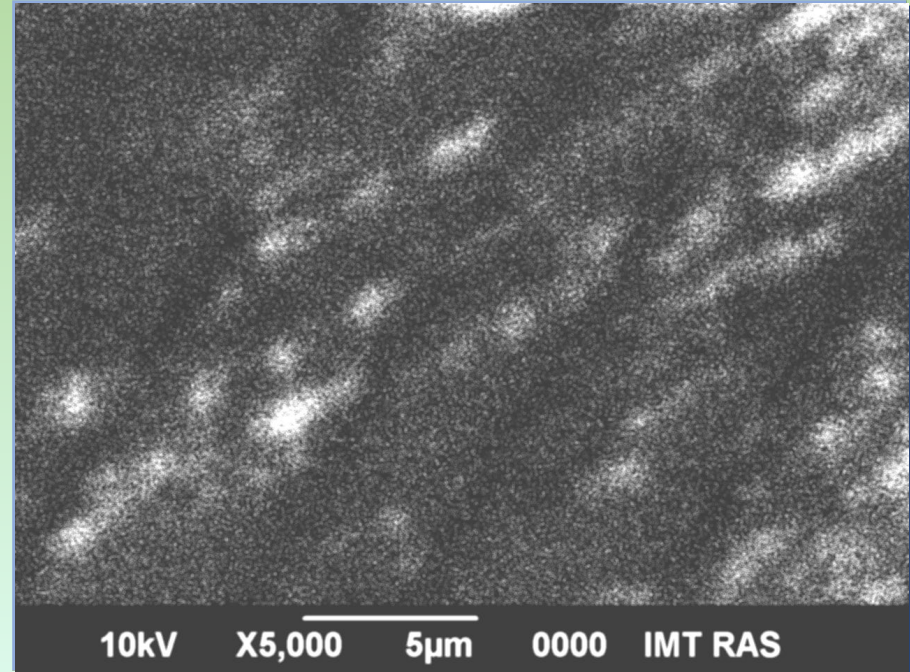
Исходные панхроматическое (а) и монохроматическое (энергия фотонов 3.1 эВ, б) КЛ-изображения свежевведенных дислокаций и после облучения электронным пучком (с и d соответственно). Стрелками указаны места облучения пучком. Видно, что дислокации могут смещаться на 10-15 мкм от места облучения пучком.

Облучение в фиксированной точке.

LEEBI в GaN



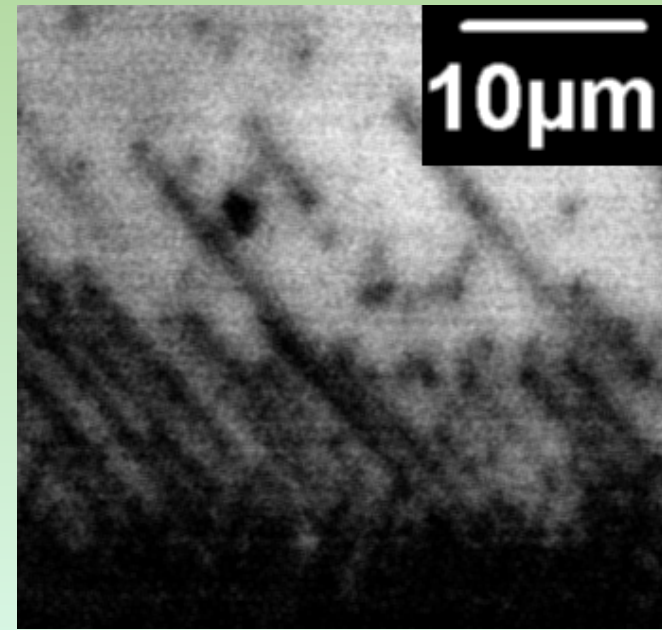
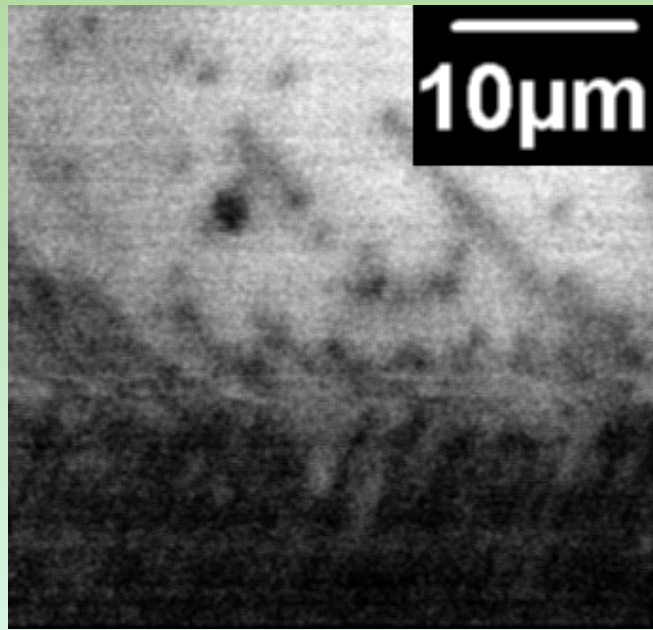
before



after LEEBI

Влияние LEEVI на свежевведенные дислокации

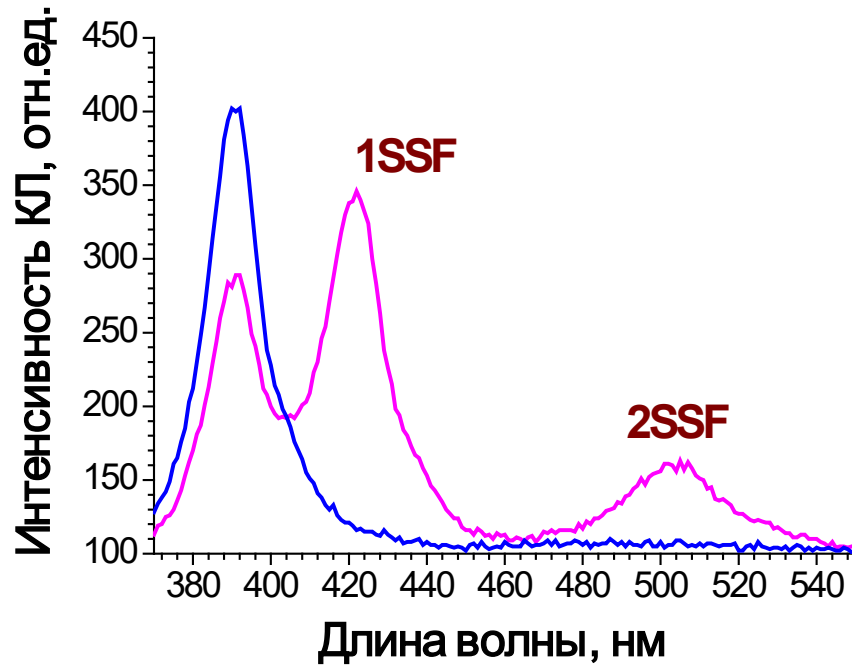
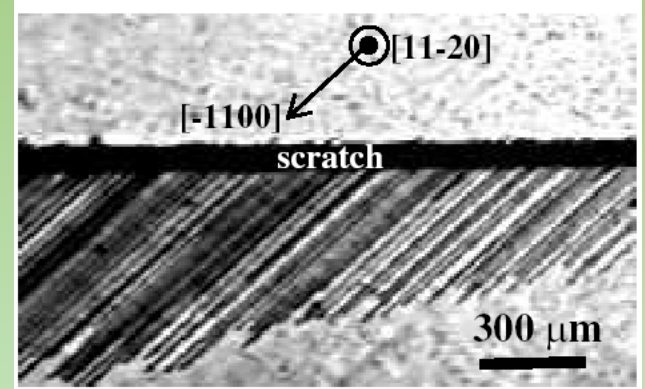
Облучение при T_{LN}



Панхроматические КЛ-изображения свежевведенных дислокаций в T_{LN} до облучения (слева) и после облучения электронным пучком (справа). Видно, что одна дислокация сместилась на расстояние около 10 мкм.

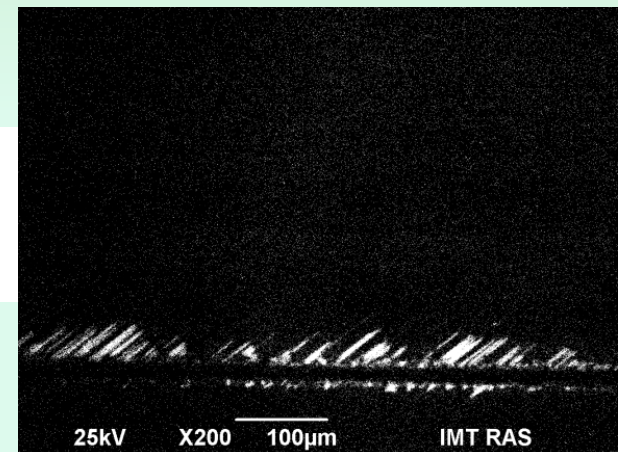
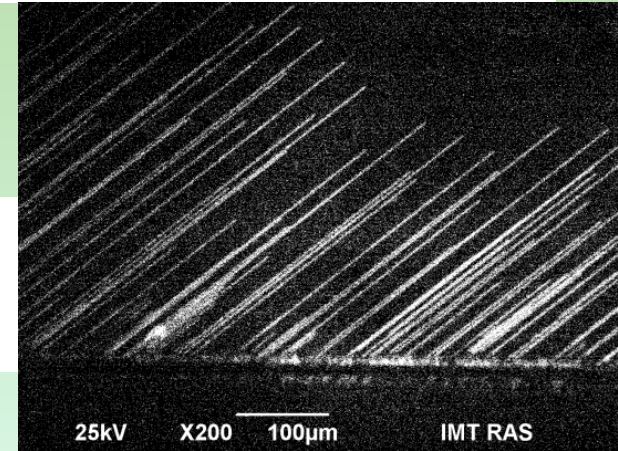
Энергия активации рекомбинационно-ускоренного скольжения дислокаций была оценена как менее 0.2 эВ.

КЛ дефектов упаковки в 4H-SiC

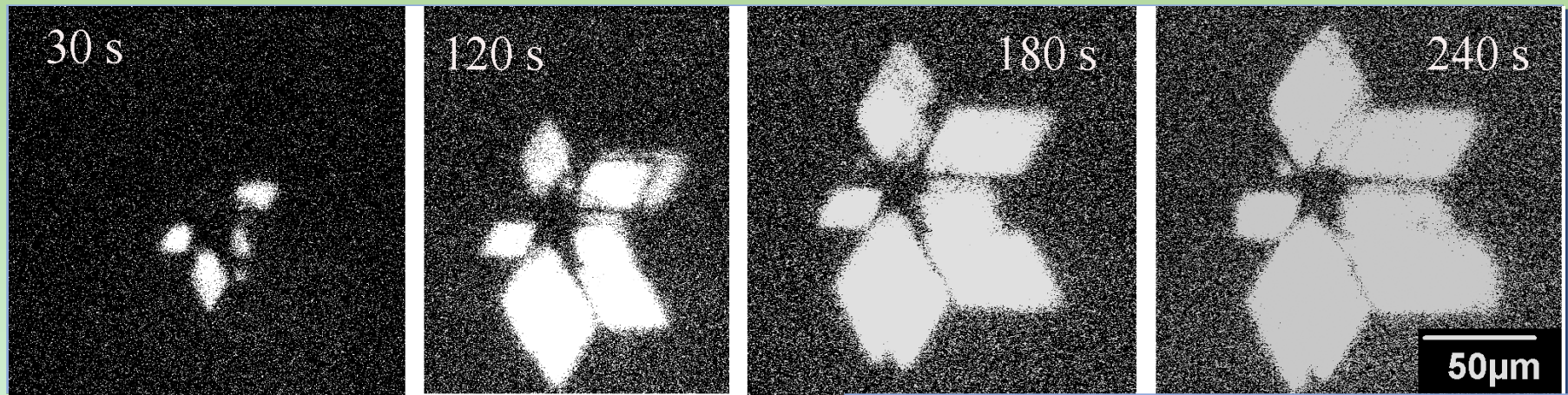


505 нм
2SSF

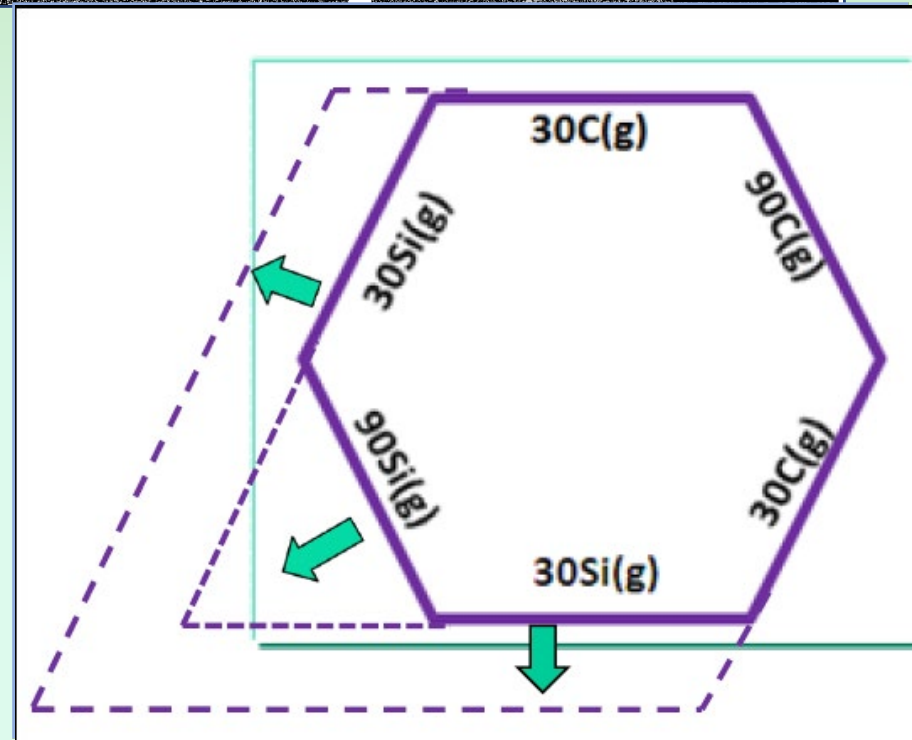
424 нм
1SSF



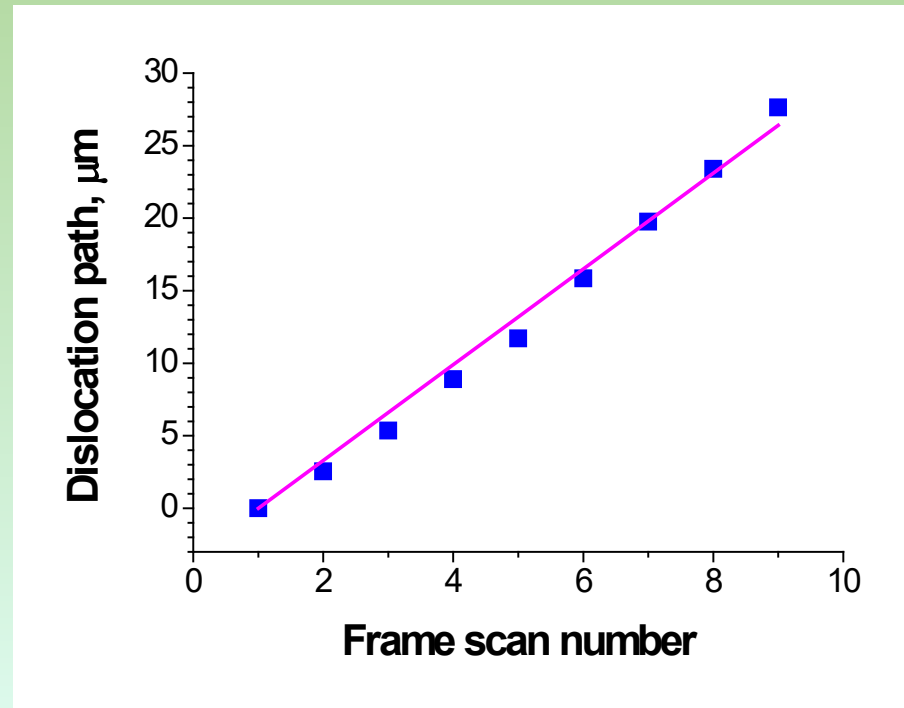
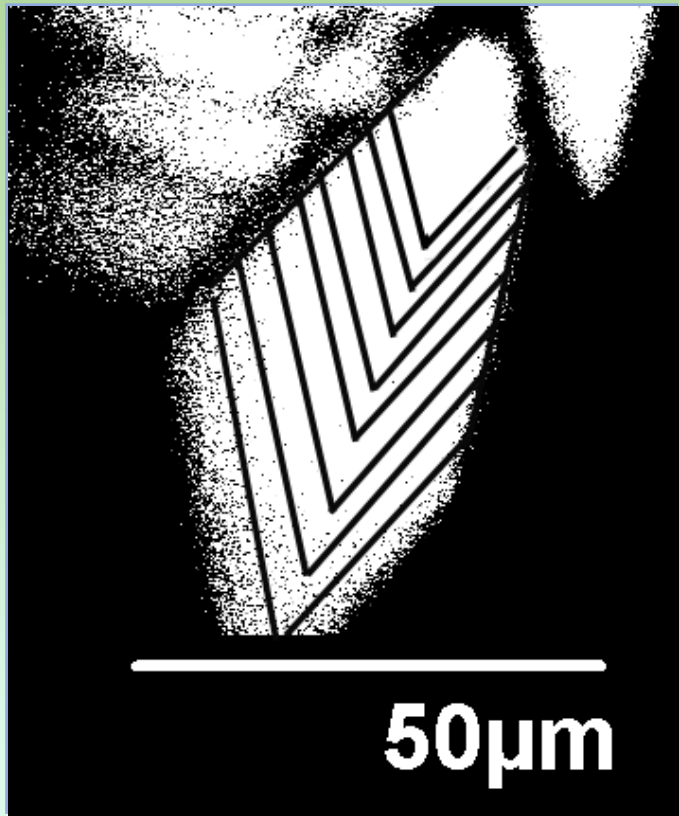
Расширение дефектов упаковки в 4H-SiC



**КЛ изображения при 424 нм
1SSFs, расширяющихся при
LEEBI**

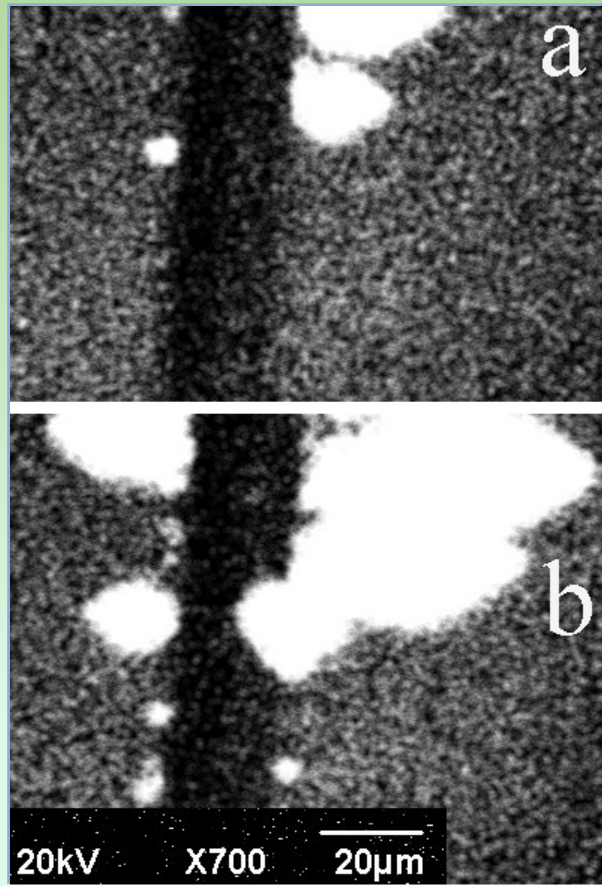


Рост 1ДУ при облучении

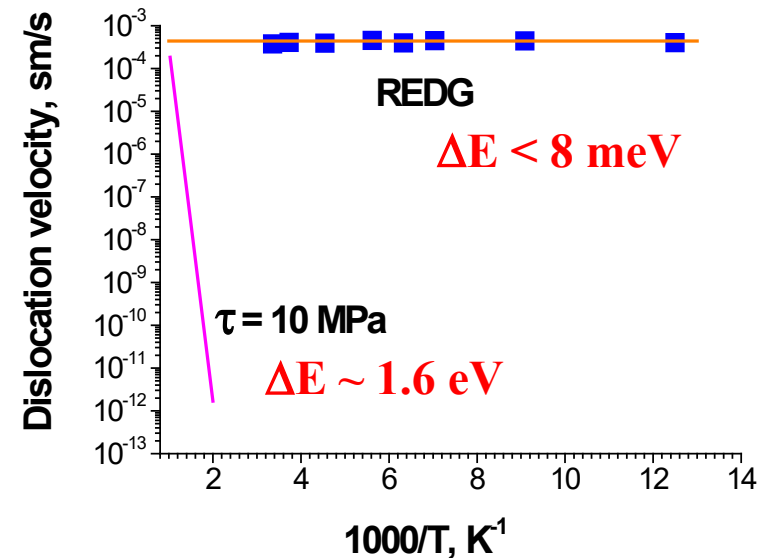
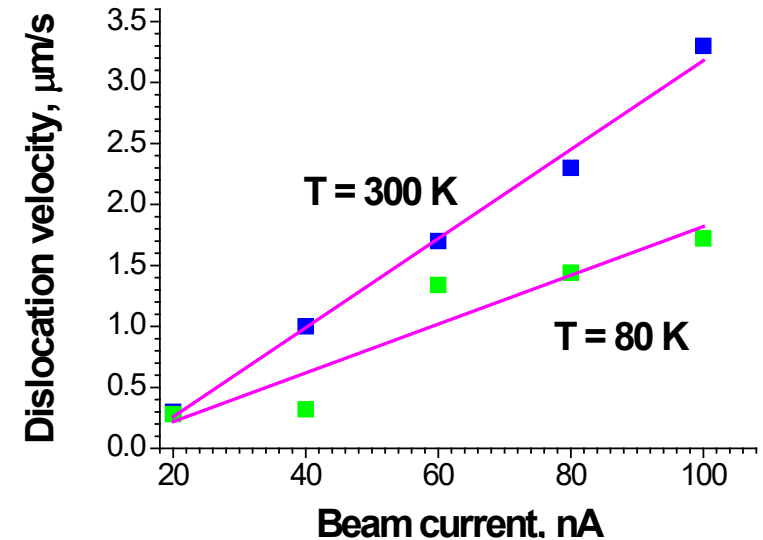


КЛ изображение 1ДУ после 9 последующих сканирований кадра, $I_b = 16$ нА. Размеры 1ДУ после каждого сканирования обозначены темными линиями. Доза облучения - 2.6×10^{-3} Кл/см² за 1 кадр.

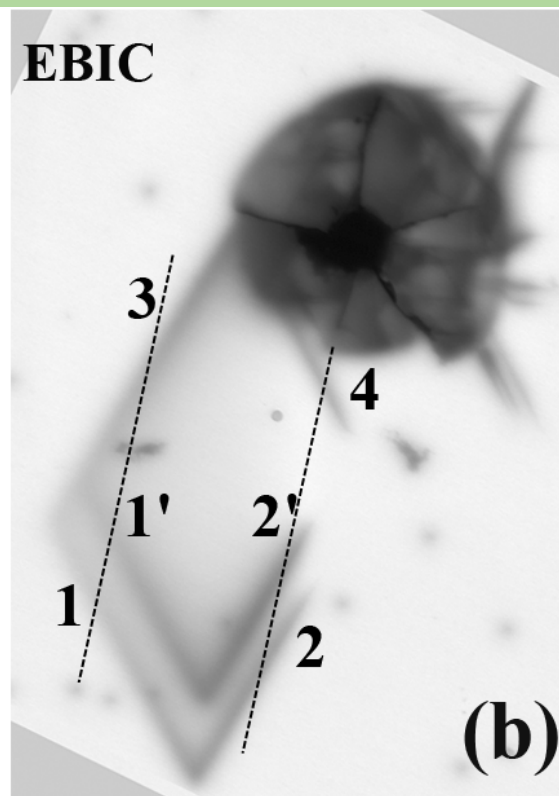
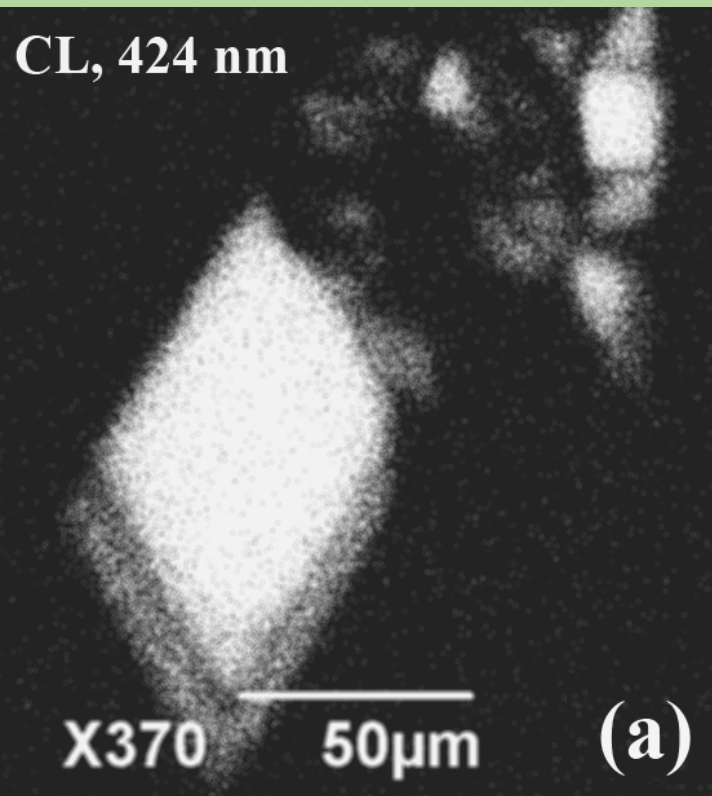
Рост 1ДУ при облучении при 80 К



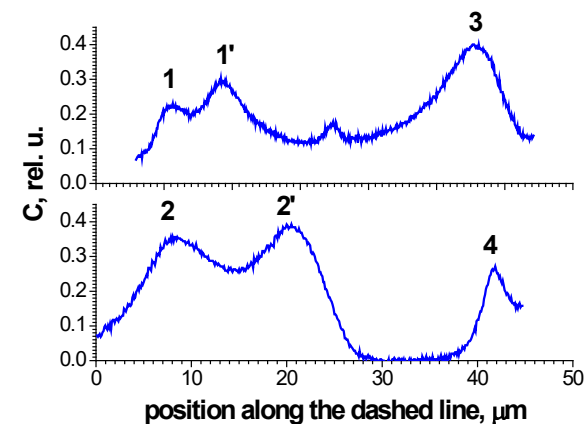
КД изображения при 425 нм
после 2 (a) и 15
сканирований (b). $I_b = 60$ нА.



Рост 1ДУ при облучении



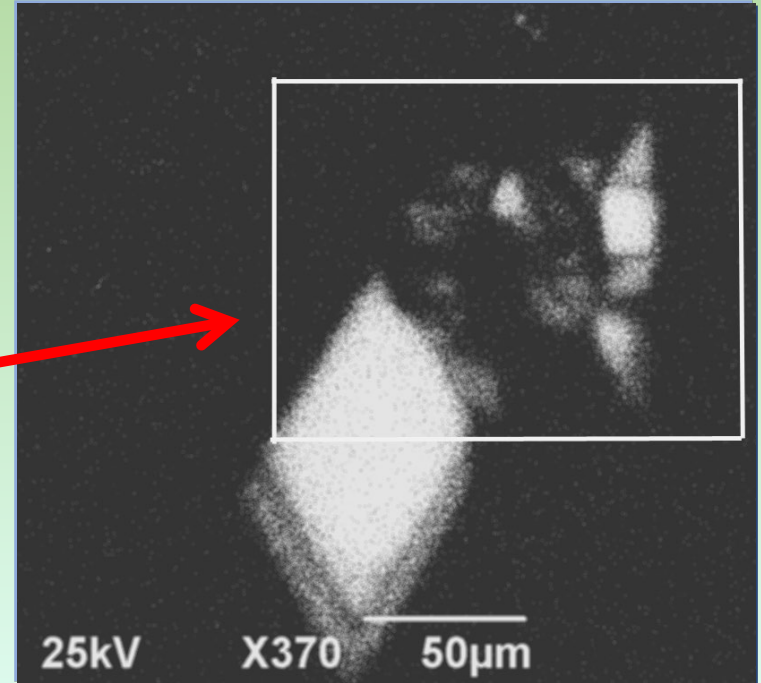
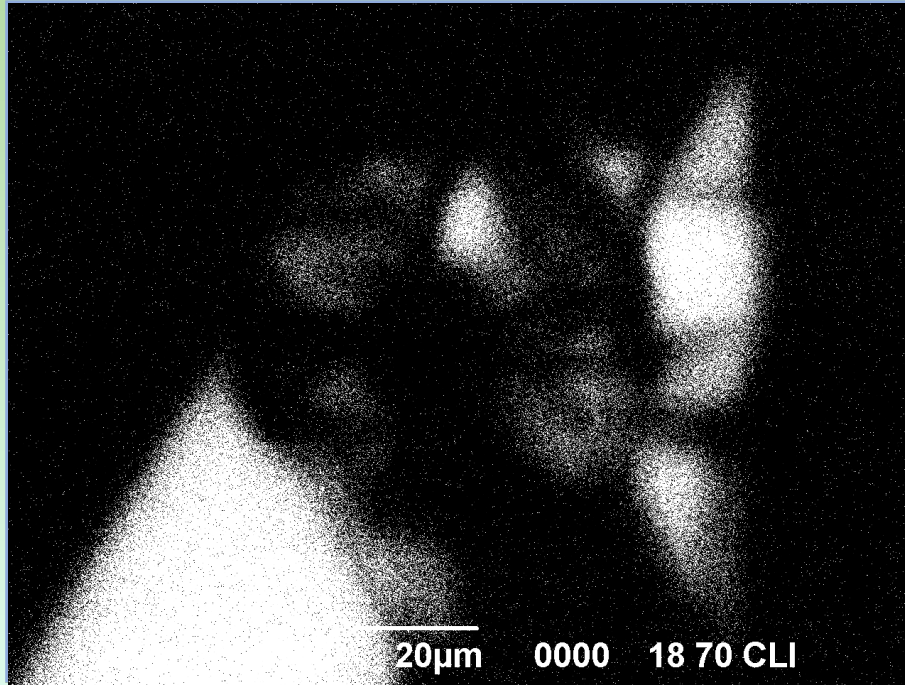
1SSF расширяются за счет скольжения дислокаций 1 и 2. Дислокации 3 и 4 неподвижны.



Чтобы объяснить, почему 30°C(g) неподвижны при облучении, можно было бы предположить, что они электрически неактивны.

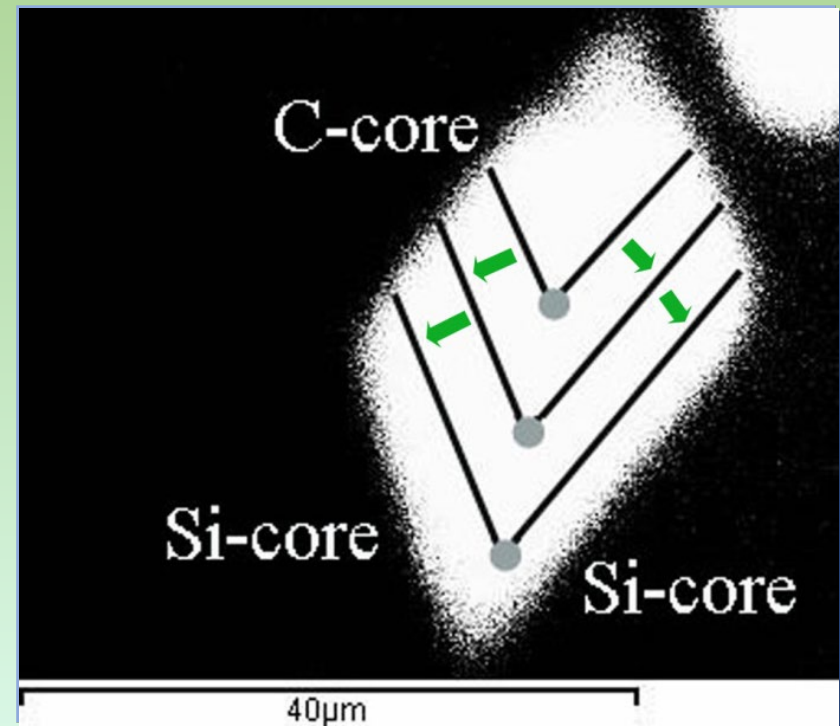
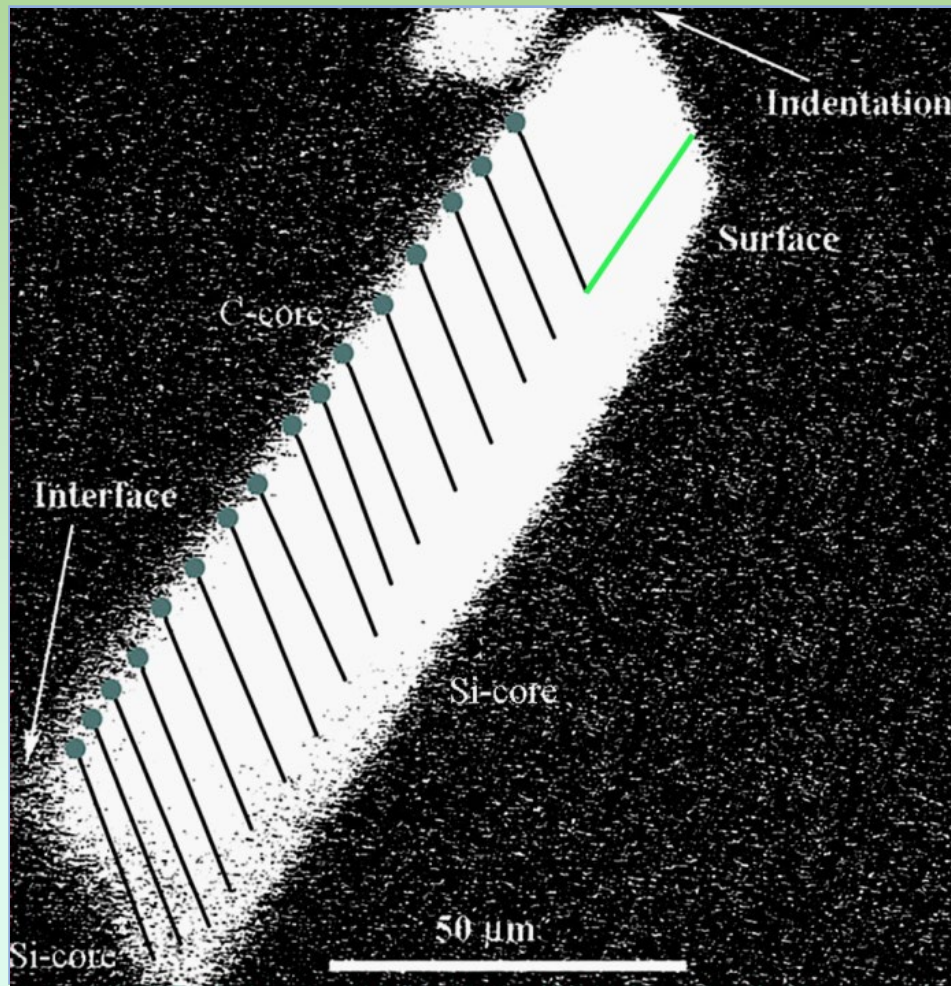
Однако EBIC контраст подвижных и неподвижных дислокаций примерно одинаков.

Рост 1ДУ при облучении



**Рост ДУ наблюдался и вне области
облучения на расстояния до 50 мкм, хотя
диффузионная длина $L = 2.6 \mu\text{m}$**

Рост 1ДУ при облучении



Дислокации прямые и их скорость не зависит от длины

Малая энергия активации для миграции перегибов?

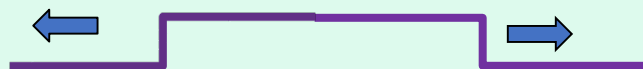
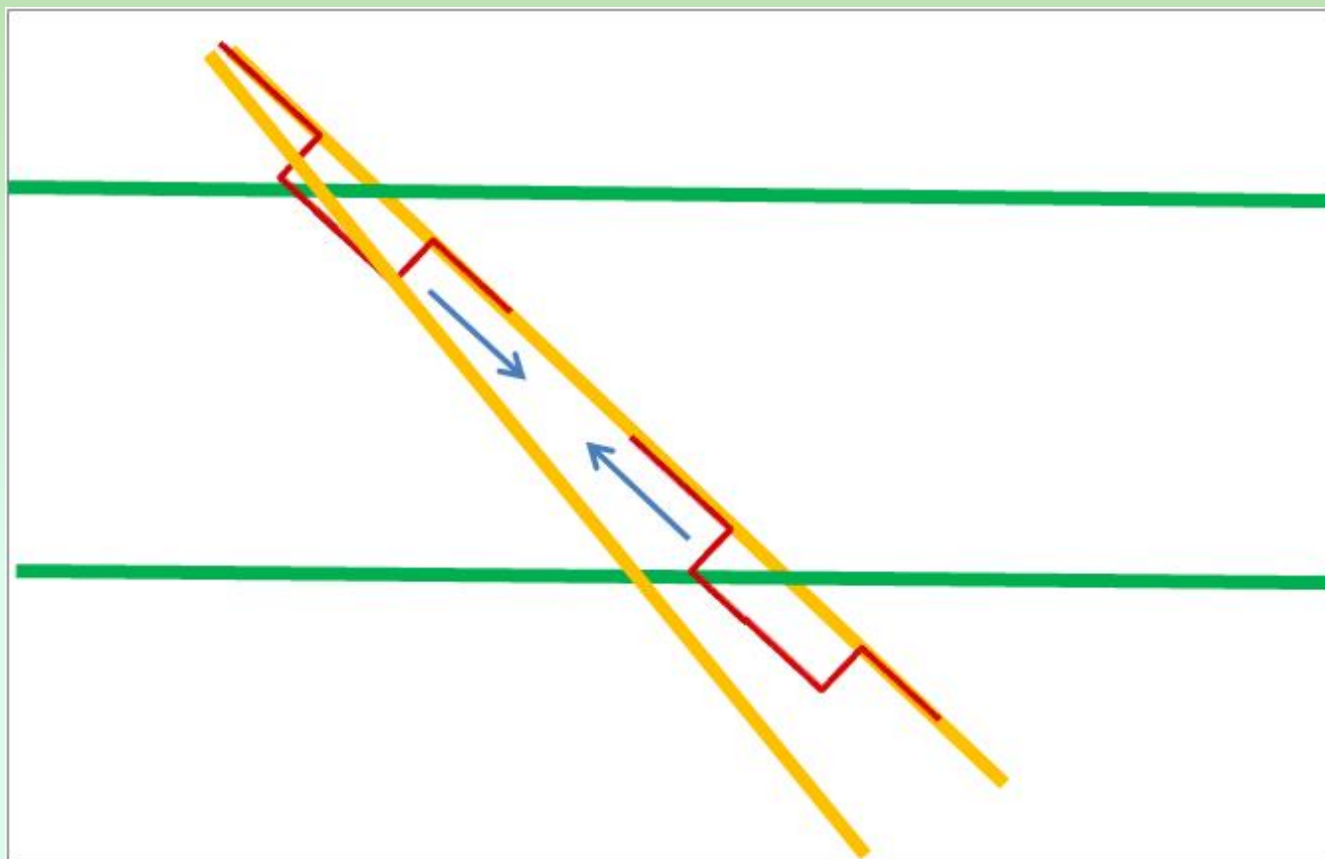
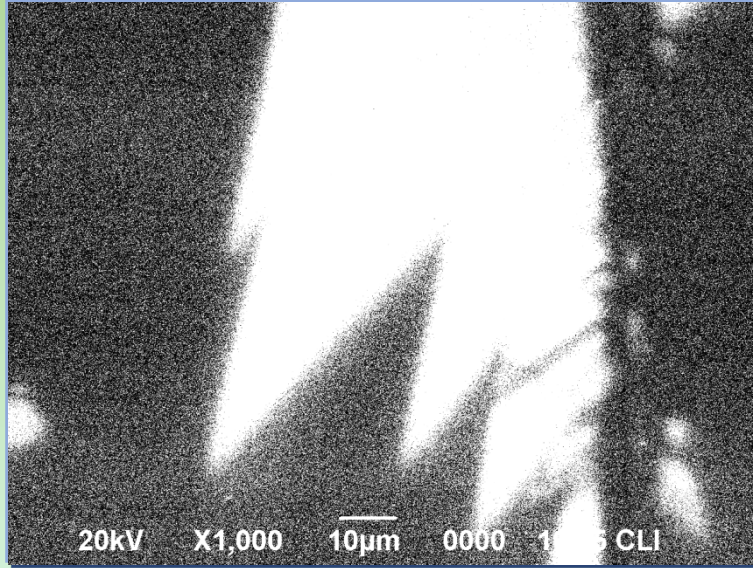


Схема возможного влияния паузы между облучениями

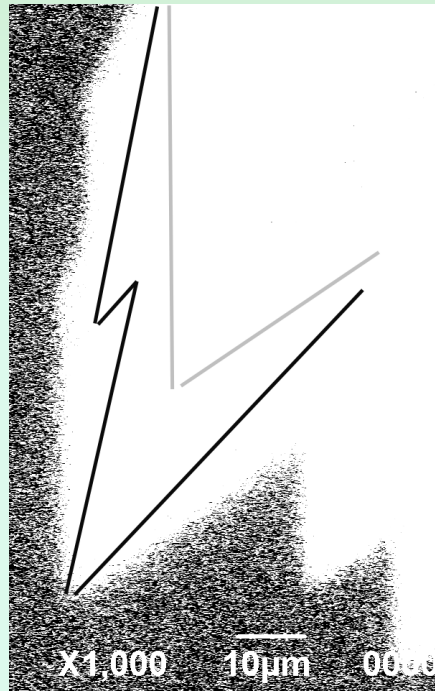
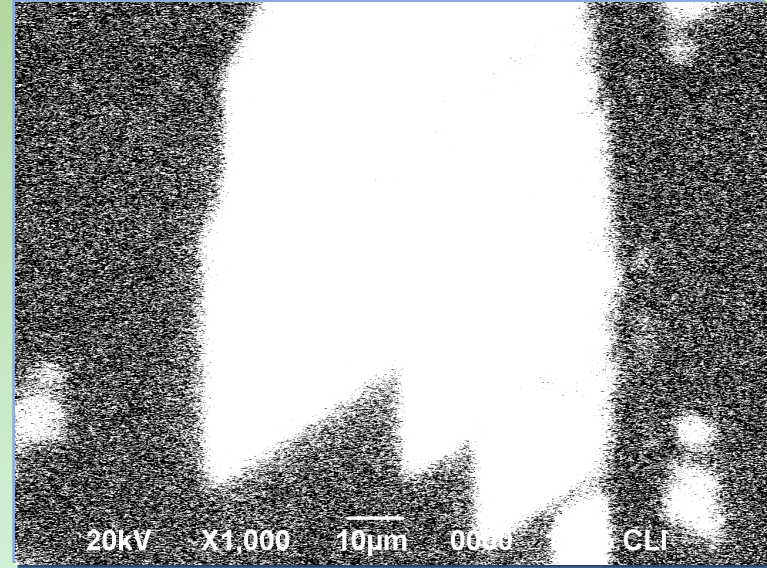


Влияние скорости развертки

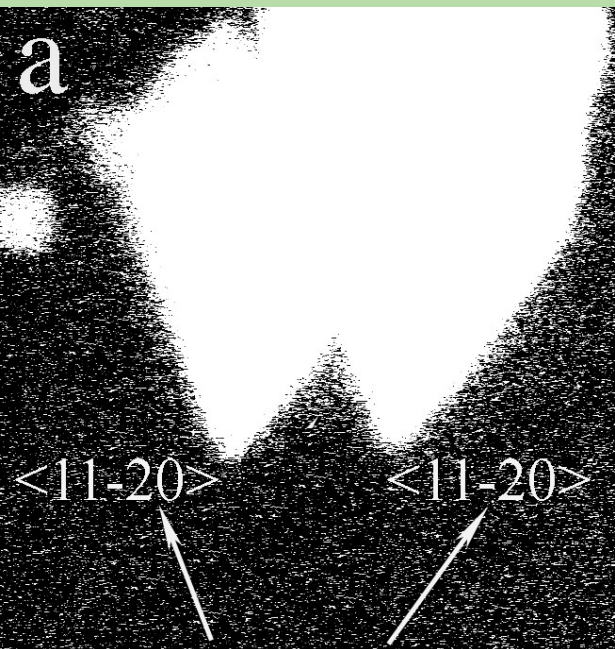
160 с
на кадр



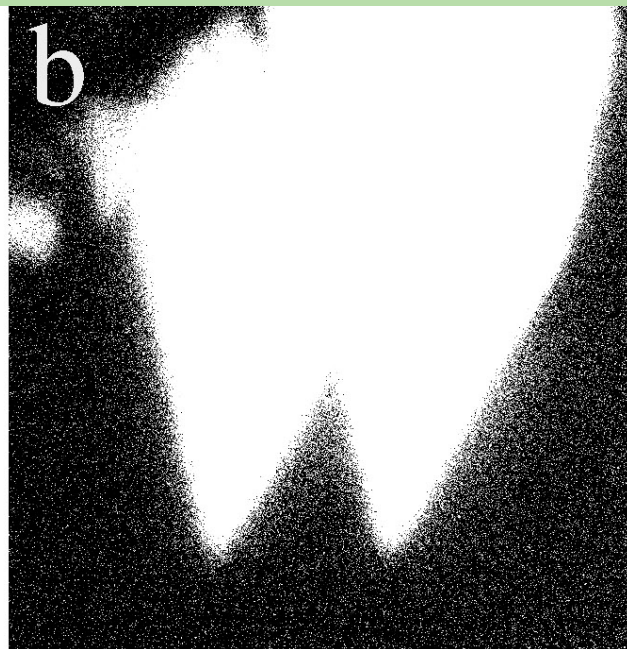
20 с
на
кадр



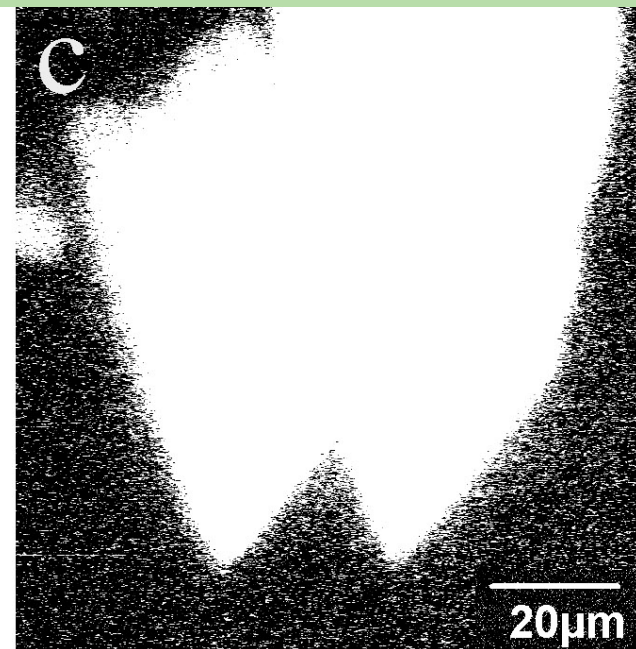
Влияние скорости развертки при 80 К



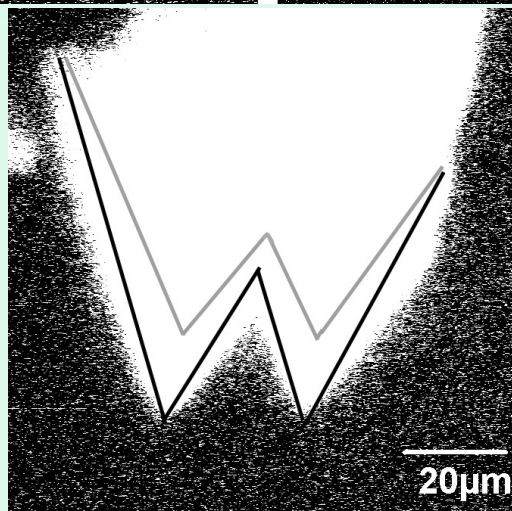
20 с
на
кадр



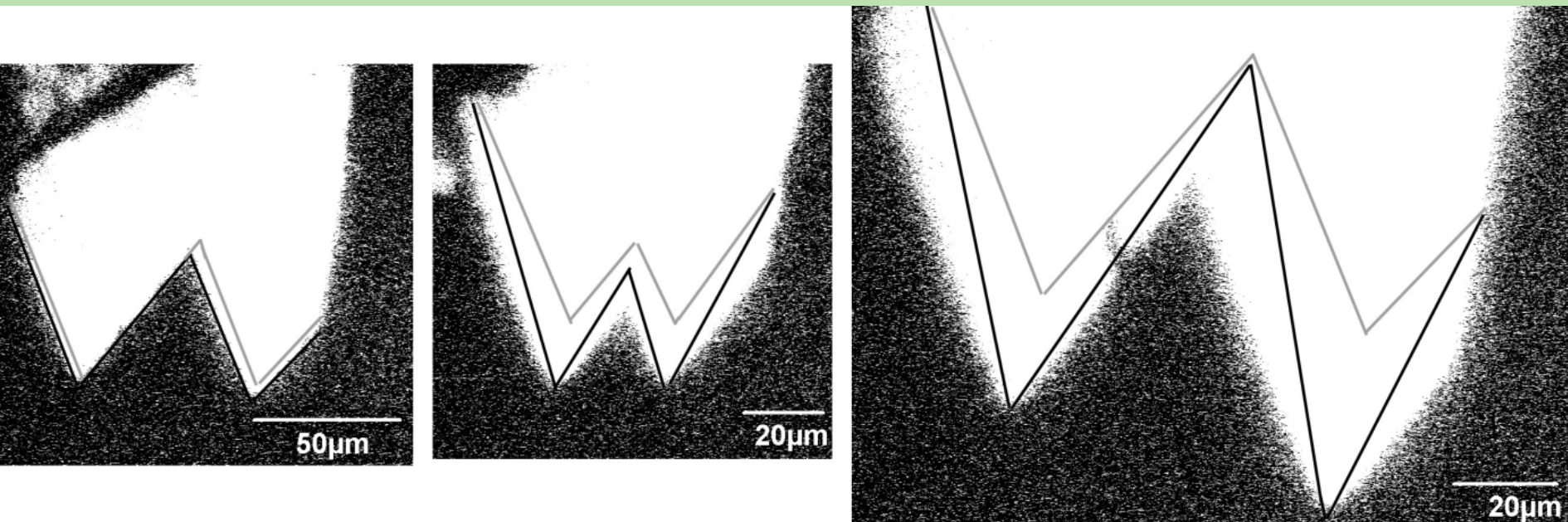
160 с
на кадр



20 с на
кадр после
b



Зависимость от увеличения при 80 К



x500

x700

x900

Последовательность изображений та же, что и на предыдущем слайде