

МЕТОД НАВЕДЕННОГО ТОКА (ЕВИС)

Основные области применения

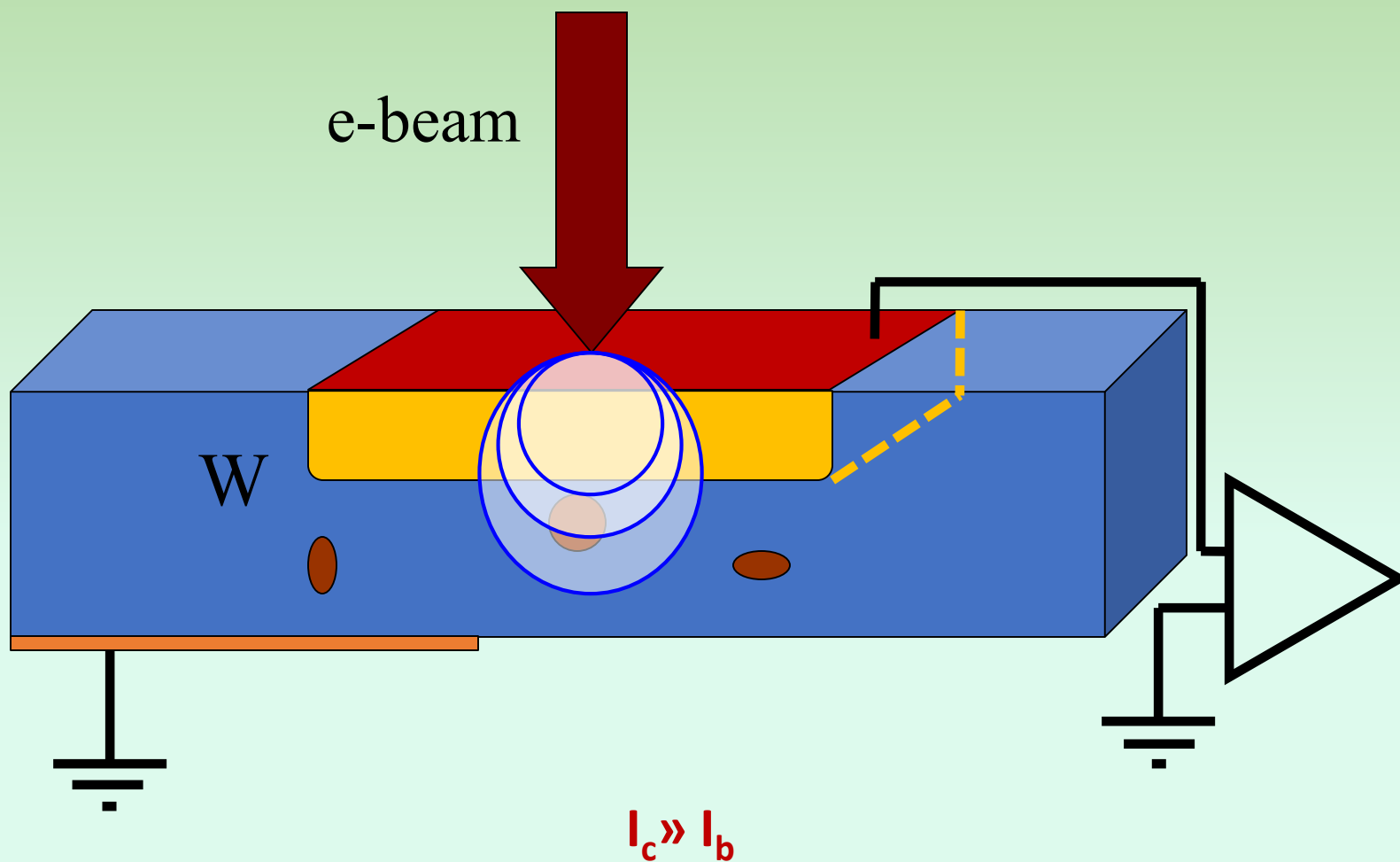
Измерение диффузионной длины

Выявление протяженных дефектов

Диагностика приборов

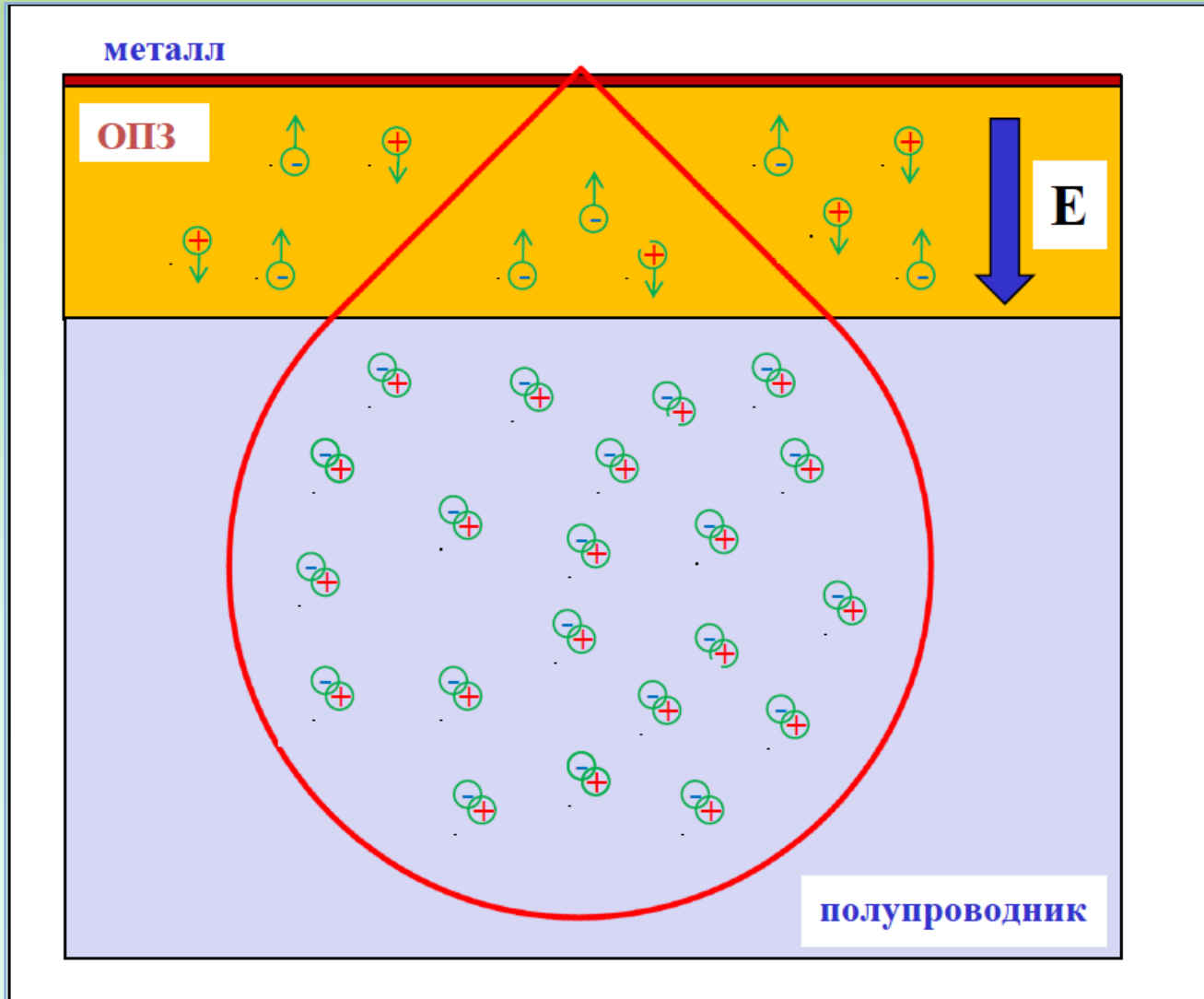
Измерение локальных оптических свойств

Внутреннее усиление тока



Измерение диффузионной длины

Формирование сигнала в методе НТ



$$\sim \exp(-z/L)$$

$$L = (Dt)^{0.5}$$

Области формирования электрических свойств

**Средние длины пробега электрона
между столкновениями $\sim 1-10$ нм**

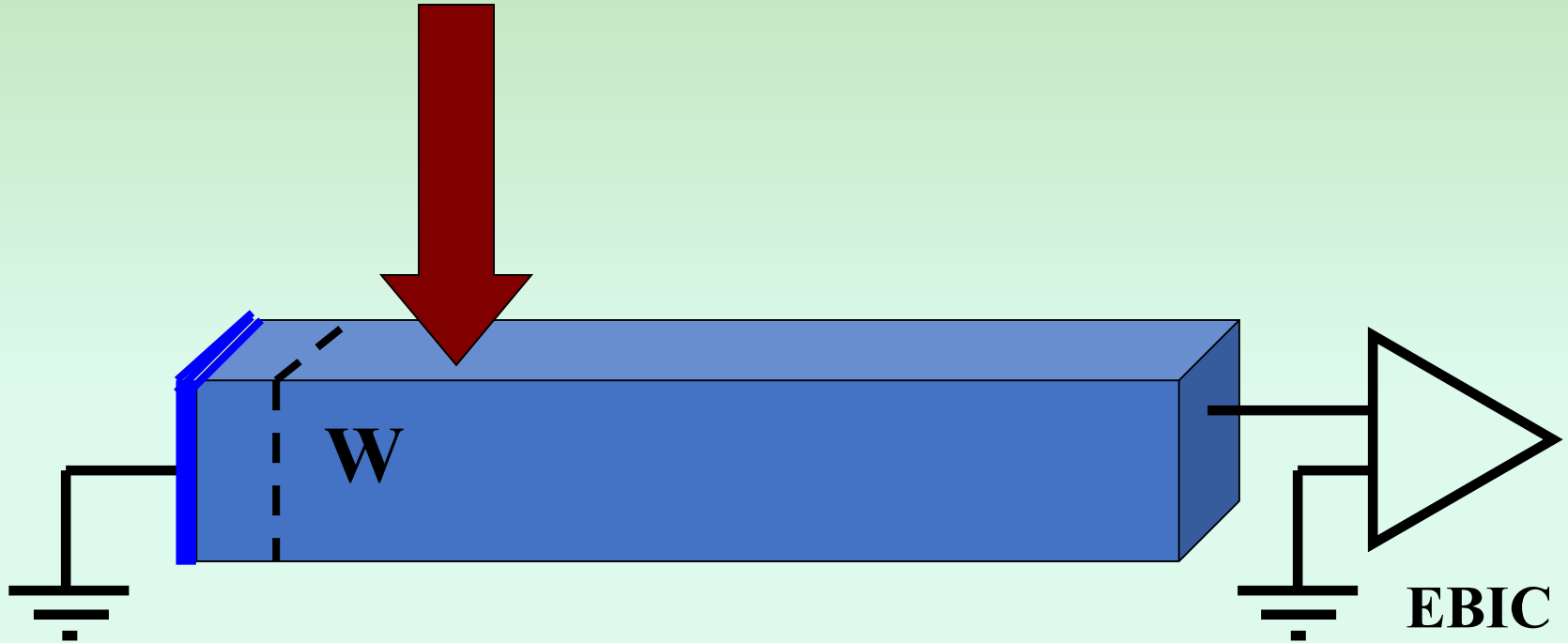


**D , μ , ρ имеют физический смысл в областях с
размером несколько десятков нм**

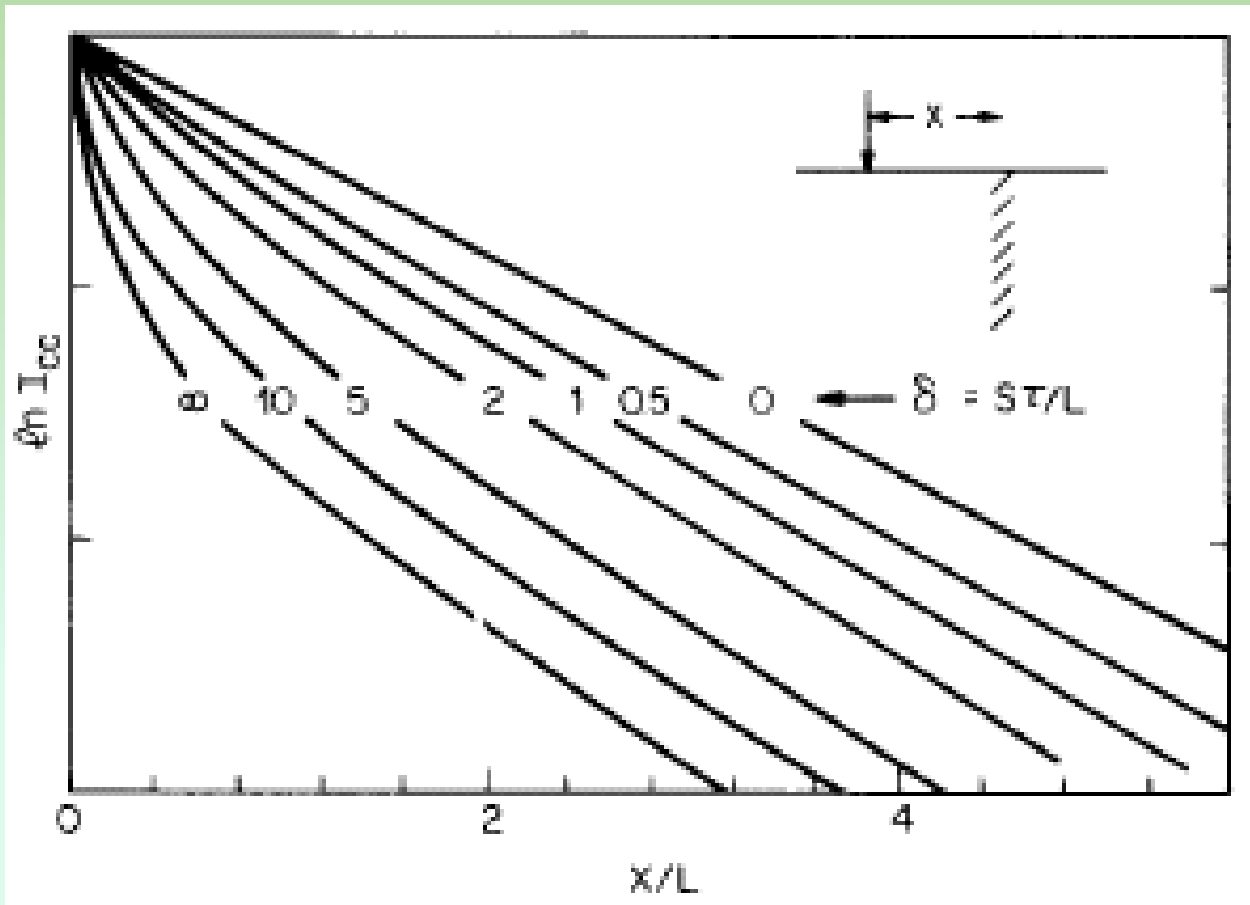
Измерение наведенного тока

$$\sim \exp(-z/L)$$

Эл. пучок



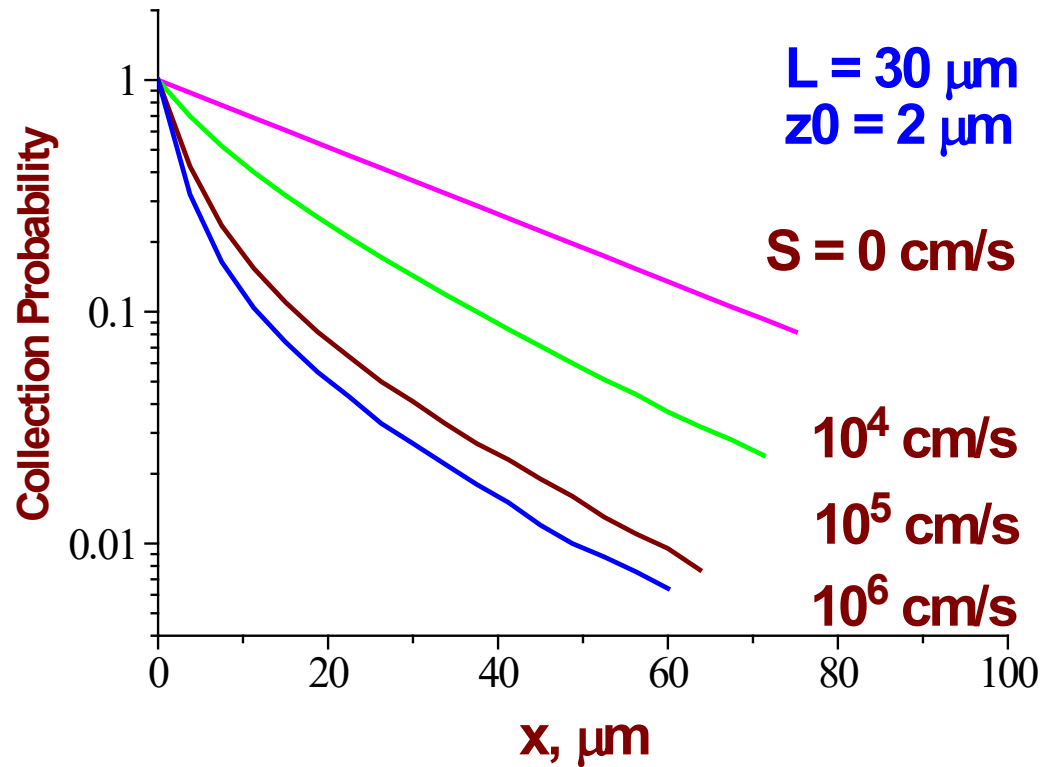
Измерение диффузионной длины



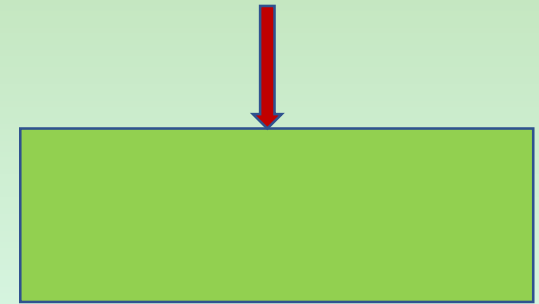
$$S\tau/L = S(\tau/L)^{1/2}$$

Зависимость спада вероятности собирания от S

Измерение диффузионной длины

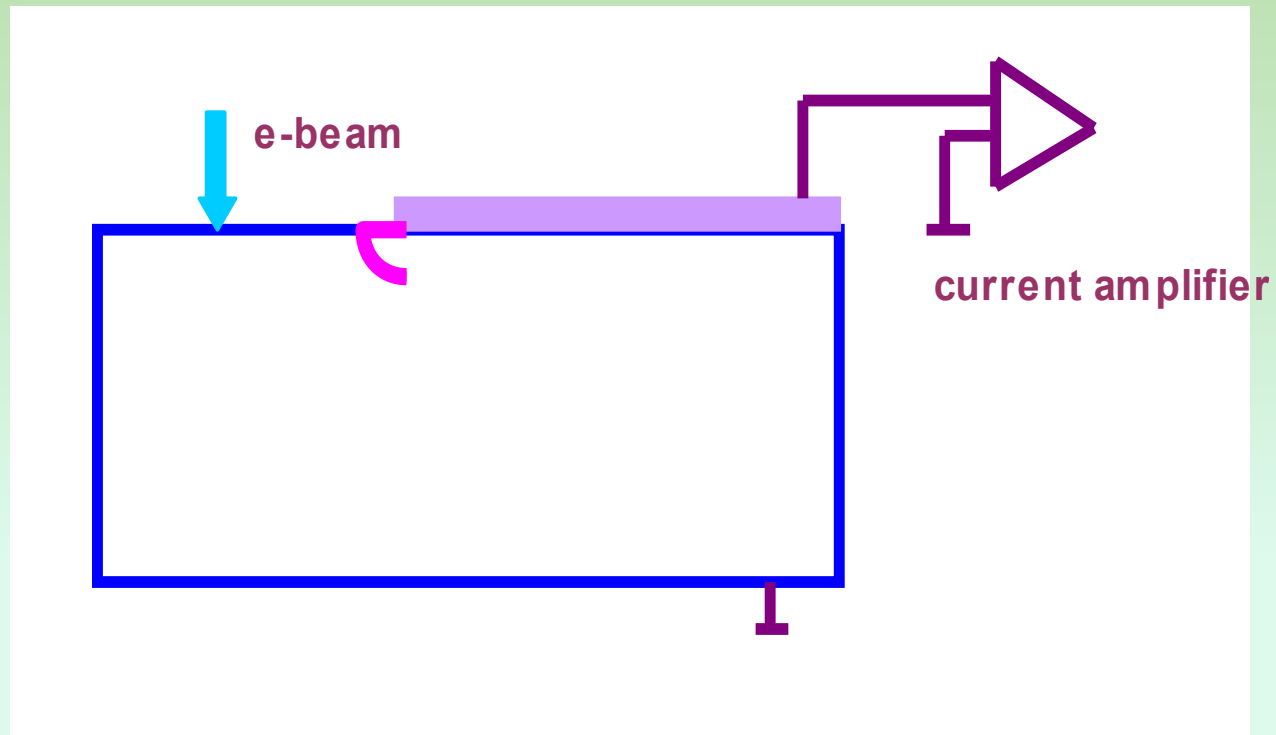


St/L



Зависимость спада вероятности собирания от S

Измерение наведенного тока



Геометрия с планарным коллектором

Измерение L , геометрия с планарным коллектором

Для точечного источника при $L \gg W$, $x \gg W$, $z \gg W$

$$\frac{I(x)}{G} = \frac{(1+s)^{1/2}}{\pi} \int_1^\infty \frac{(1+\alpha)^{1/2}}{\alpha} \exp[F(\alpha, s) - \alpha x / L] \times \\ \frac{s \sin[z(\alpha^2 - 1)^{1/2} / L] + (\alpha^2 - 1)^{1/2} \cos[z(\alpha^2 - 1)^{1/2} / L]}{s^2 + \alpha^2 - 1} d\alpha$$

$$F(\alpha, s) = \frac{\alpha}{\pi} \int_0^{\pi/2} \frac{\ln(1 + s \sin \beta)}{1 + (\alpha^2 - 1) \sin^2 \beta} d\beta$$

$$s = \frac{SL}{D}$$

J. Boersma, J. J. E. Indenkleef, H. K. Kuiken, J. Eng. Math. **18**, 315, 1984.

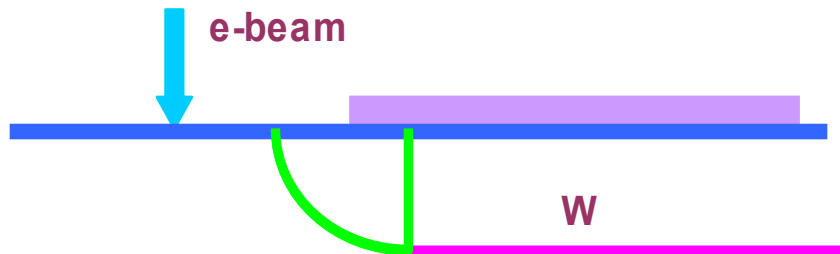
При $x \gg L$ и $x \gg R$ спад тока может быть аппроксимирован как

$$I_c(x) \sim \exp(-x/L)/x^n,$$

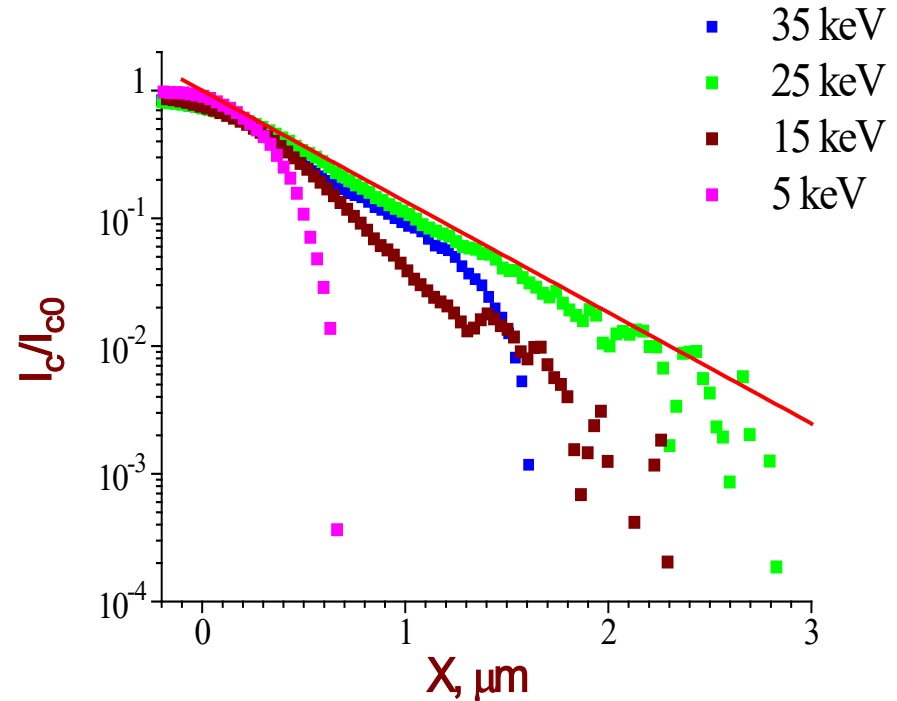
где $n = 3/2$ при $S \rightarrow \infty$ (D. E. Ioannou, S. M. Davidson, J. Phys. D, **12**, 1339, 1979 и $n = 1/2$ при $S = 0$ (C. Donolato, Solid-State Electron., **28**, 1143, 1985).

Измерение диффузионной длины

Проблемы для планарной геометрии

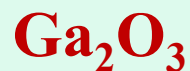
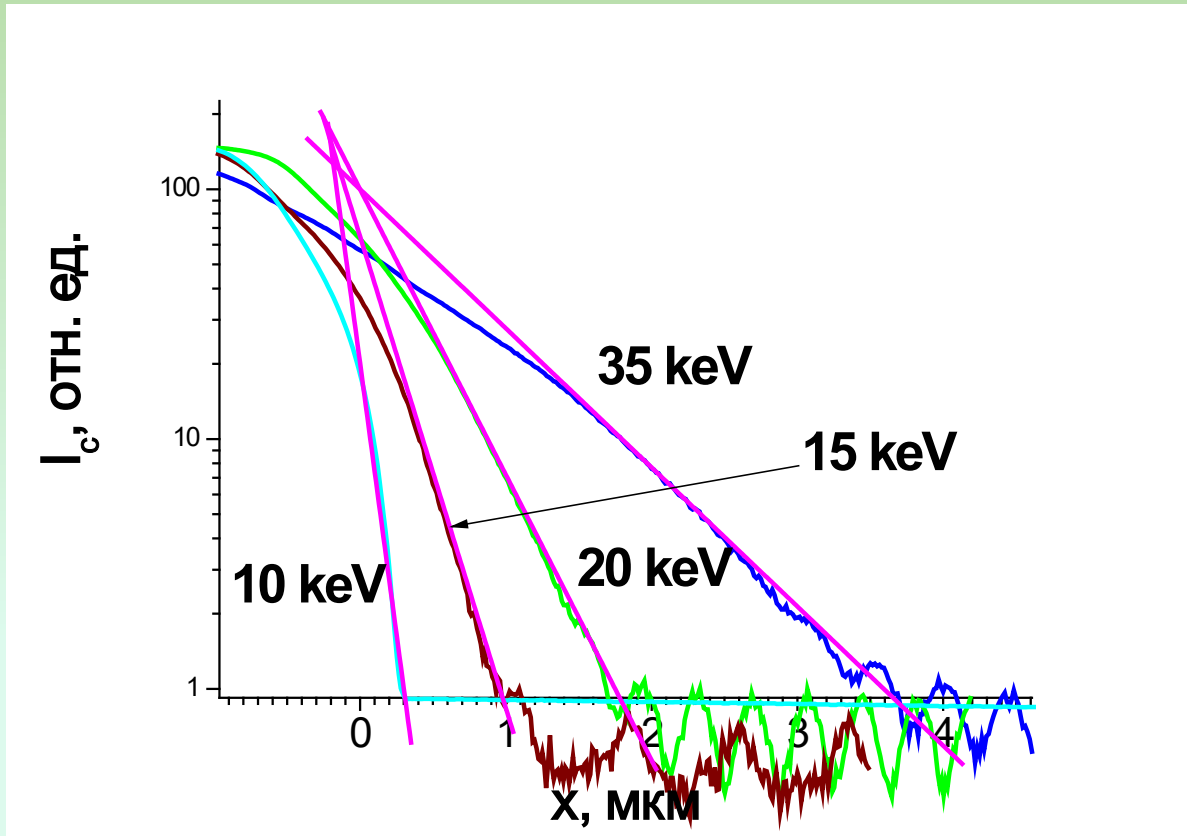


Необходимо выполнение условий $x \gg L$,
 $L \gg W$, $x \gg W$ и $x \gg R$
Проверка – L не зависит от E_b

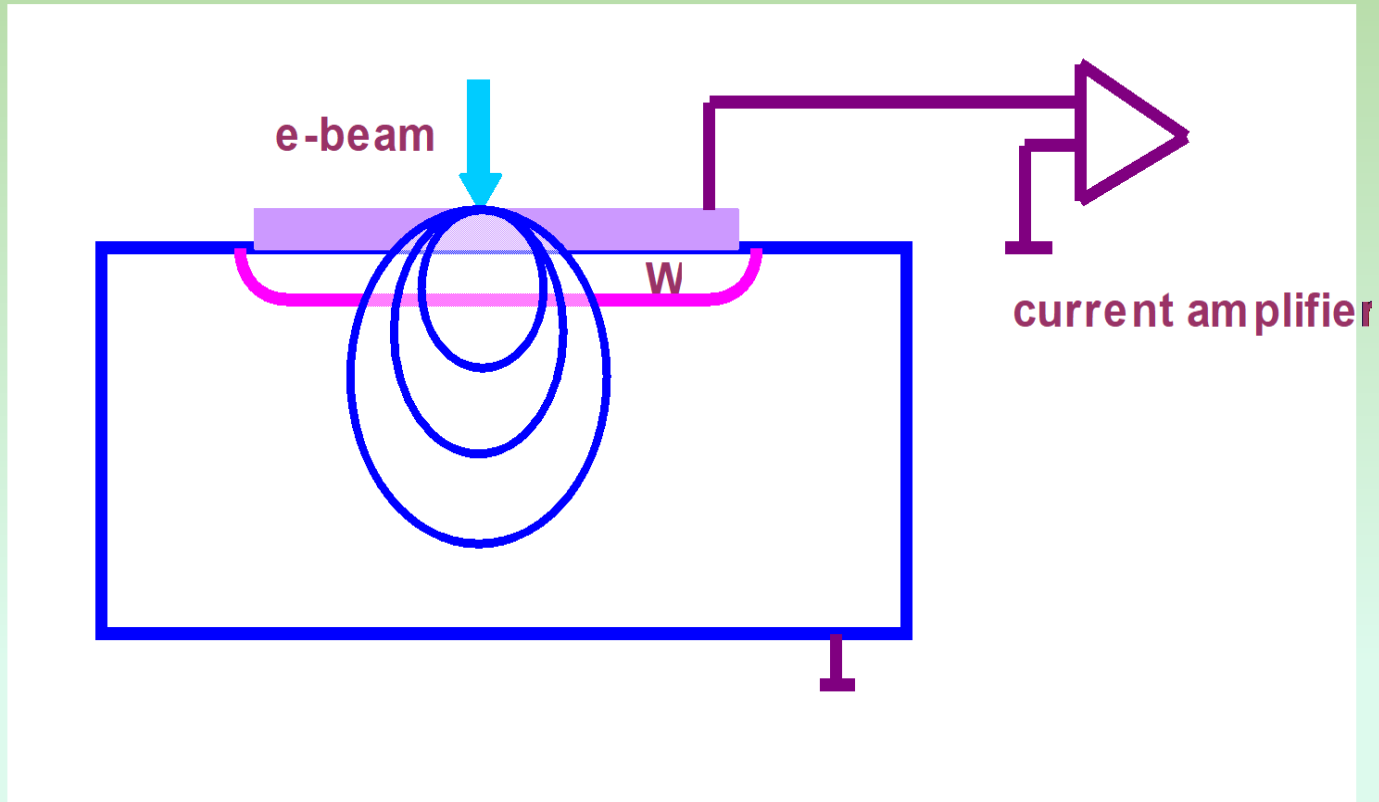


The EBIC decay measured in GaN with $L \sim 0.1$
 μm . Red line $\sim 0.5 \mu\text{m}$.

Измерение диффузионной длины Проблемы для планарной геометрии

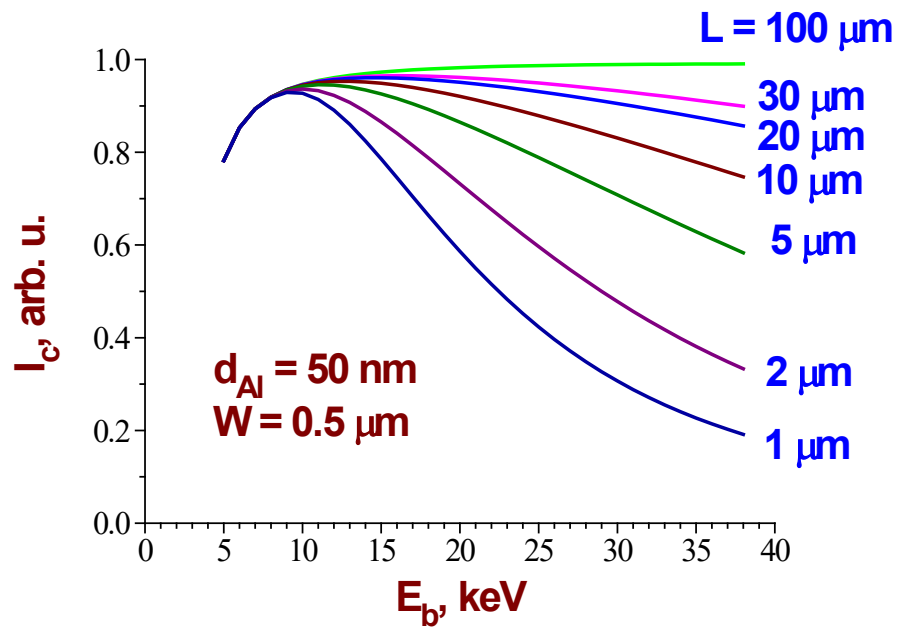


Измерение наведенного тока

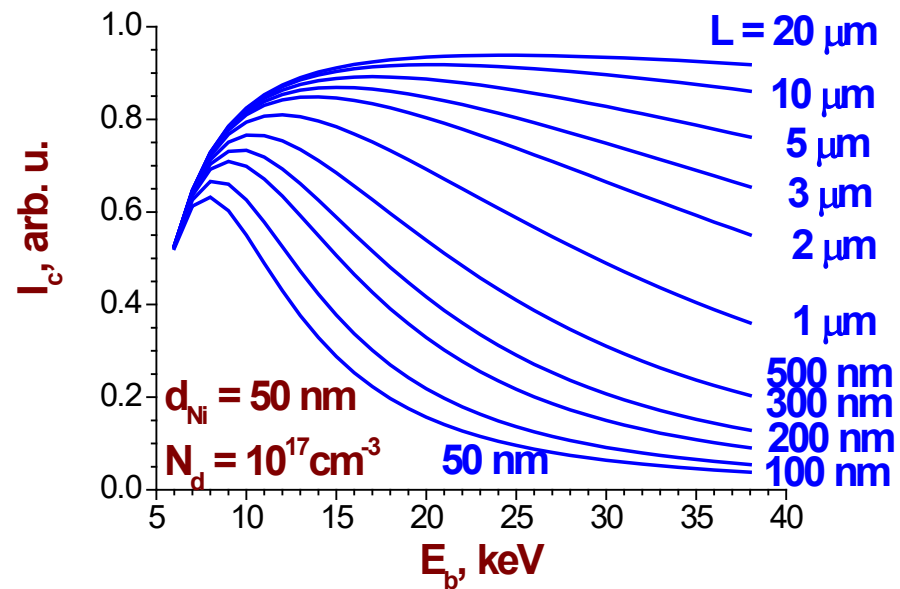


Геометрия с нормальным коллектором

Измерение диффузионной длины



Si



GaN

Зависимость вероятности собирания от E_b

Моделирование сигнала НТ

Почему неосновные носители?

$$\begin{aligned}\frac{\partial \mathbf{n}}{\partial t} &= \frac{1}{e} \nabla \mathbf{j}_e + \mathbf{G} - \frac{\mathbf{n}}{\tau} \\ \frac{\partial \mathbf{p}}{\partial t} &= -\frac{1}{e} \nabla \mathbf{j}_p + \mathbf{G} - \frac{\mathbf{p}}{\tau} \\ \mathbf{j}_e &= e\mu_e \mathbf{E} \mathbf{n} + e\mathbf{D}_e \nabla \mathbf{n} \\ \mathbf{j}_h &= e\mu_h \mathbf{E} \mathbf{p} - e\mathbf{D}_h \nabla \mathbf{p} \\ \nabla \mathbf{E} &= \frac{4\pi e}{\varepsilon} (\mathbf{p} - \mathbf{n} - \mathbf{N}_a + \mathbf{N}_d)\end{aligned}$$

предположение амбиполярности

$$\Delta \mathbf{p}(\mathbf{r}) = \Delta \mathbf{n}(\mathbf{r})$$

$$\frac{\partial \Delta \mathbf{p}}{\partial t} = \mathbf{D}_a \nabla [\nabla (\Delta \mathbf{p})] + \mu_a \mathbf{E} \nabla (\Delta \mathbf{p}) + \mathbf{G} - \frac{\Delta \mathbf{p}}{\tau}$$

$$\mu_a = \frac{n - p}{n / \mu_h + p / \mu_e}$$

$$\mathbf{D}_a = \frac{n + p}{n / \mathbf{D}_h + p / \mathbf{D}_e}$$

$$n = n_0 + \Delta n$$

$$p = \Delta p$$

$$\mathbf{I} = \mathbf{I}_e + \mathbf{I}_h$$

$$\Delta n \ll n !$$

Расчет сигнала НТ

$$D\Delta p(r) - p(r) / \tau = -g(r)$$

$$I_c = -eD \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} dp(x,y,z)/dz \Big|_{z=W} dx dy$$

$$I_c = e \int_0^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} g(r)\psi(r)dr$$

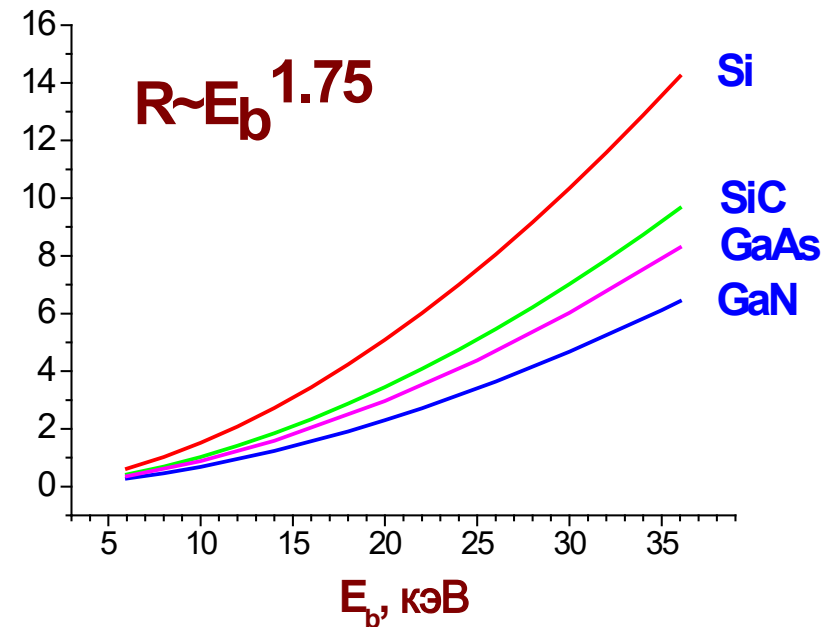
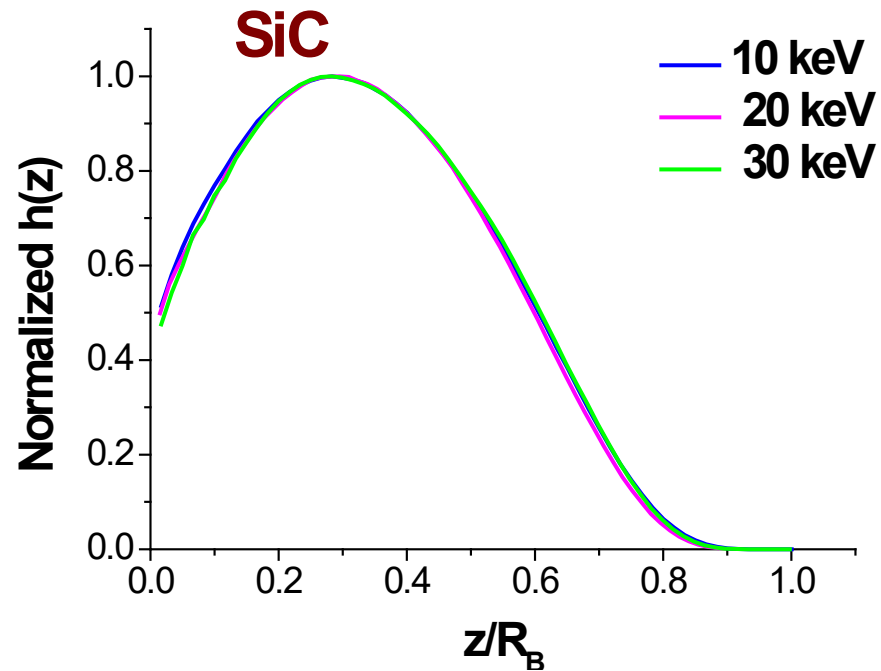
где $\psi(r)$ – вероятность собирания, которая может быть получена из уравнения

$$\Delta\psi(r) - \psi(r) / L^2 = 0$$

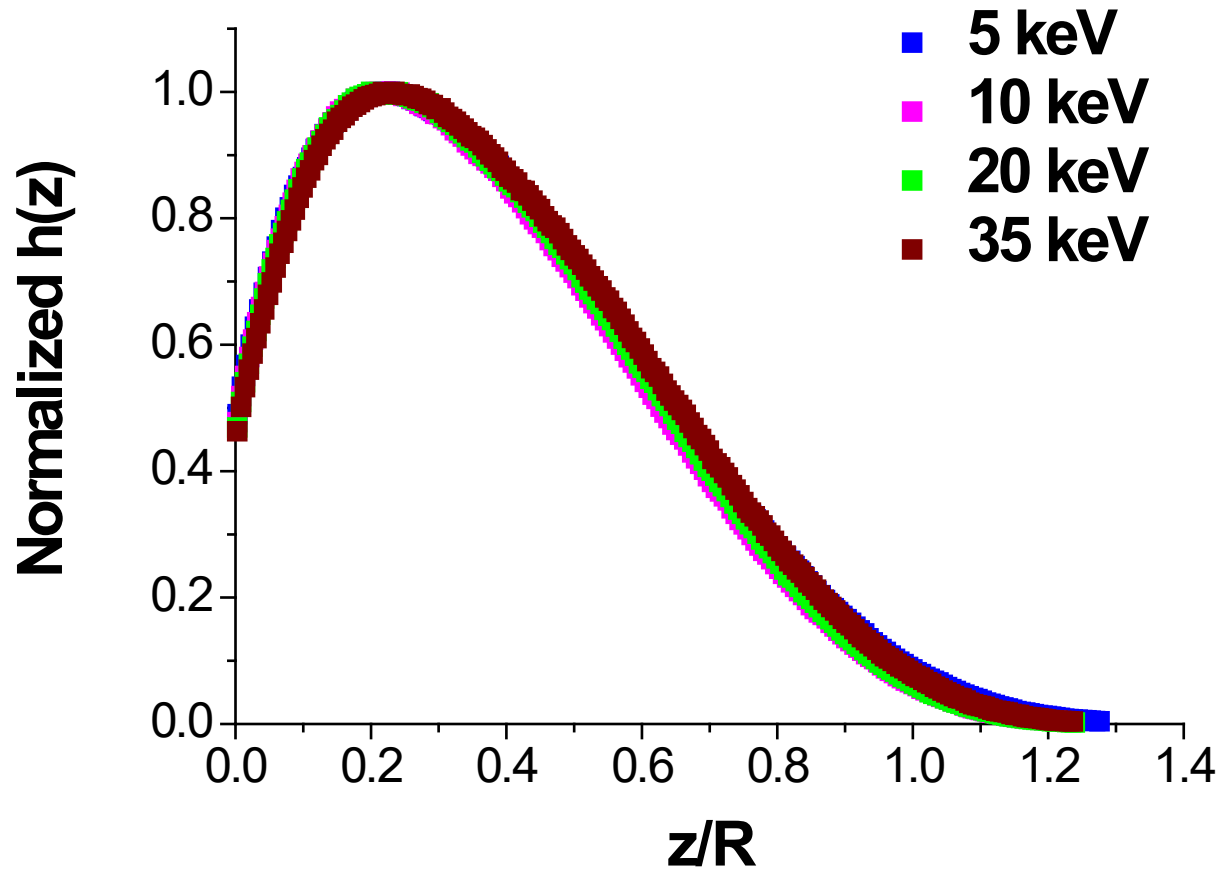
с граничными условиями $\psi(r,W) = 1$ и $\psi \rightarrow 0$ при $z \rightarrow \infty$.

$L = (D\tau)^{.5}$ – диффузионная длина

Зависимость поглощенной энергии от глубины

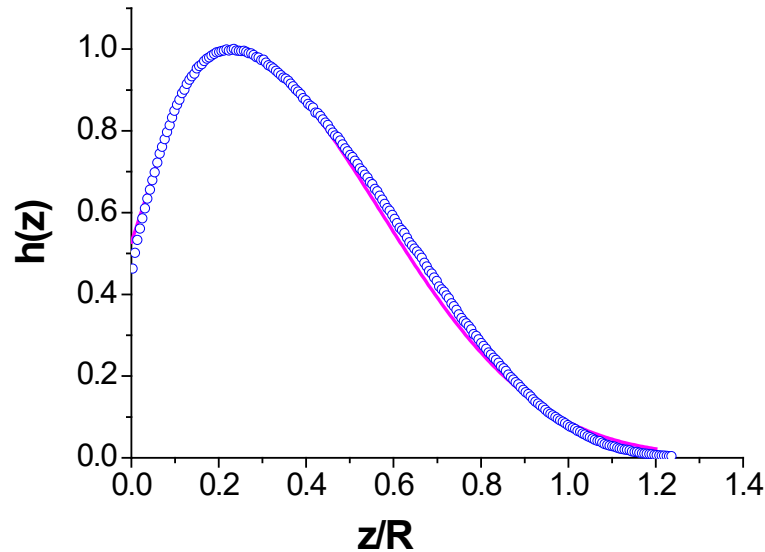


Измерение наведенного тока



Ga_2O_3

Измерение диффузионной длины



Ga_2O_3

$$h(z) = \frac{2.175}{R} \exp\left[-A\left(\frac{z}{R} - 0.16\right)^2\right]$$

$$A = \begin{cases} 24.5, & z < 0.16 \cdot R \\ 7.3, & z \geq 0.16 \cdot R \end{cases}$$

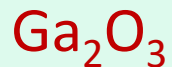
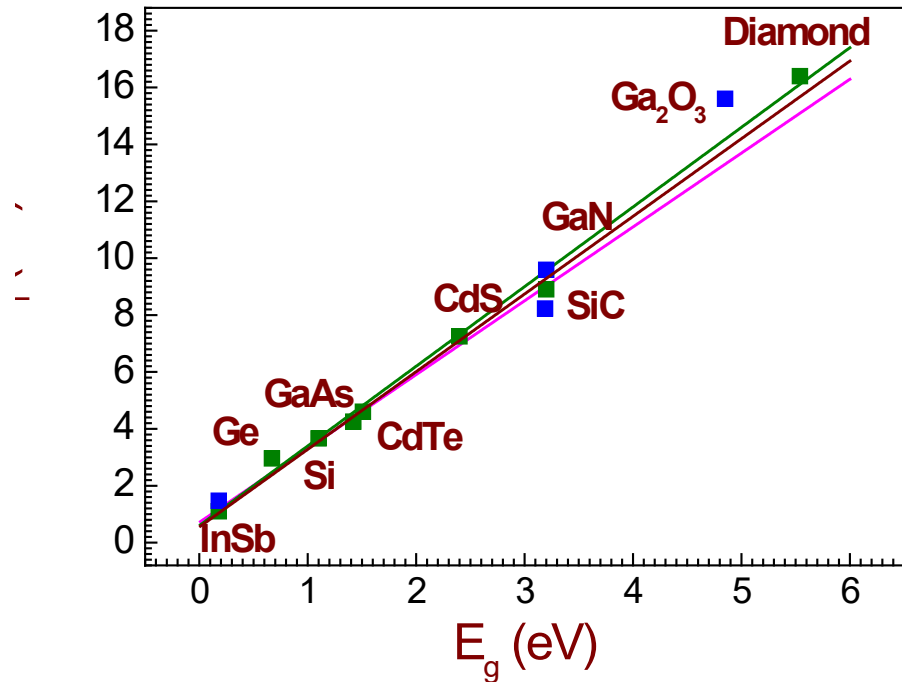
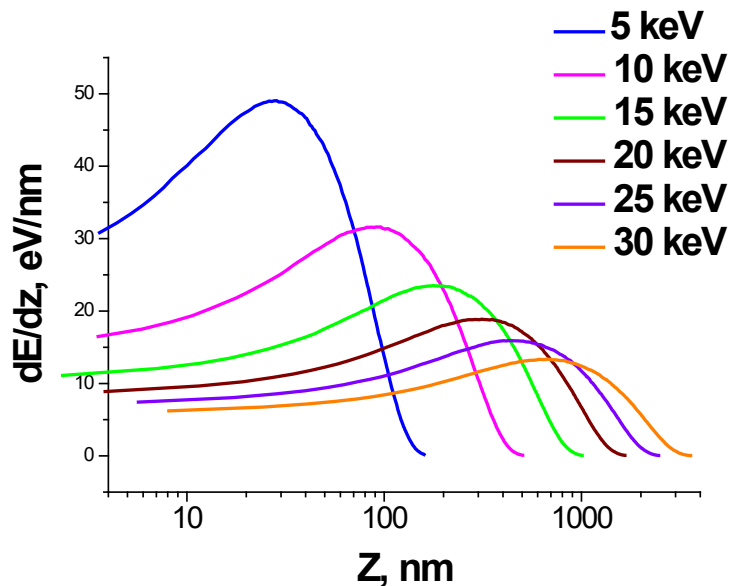
$$R(\text{nm}) = 10 \cdot E_b(\text{keV})^{1.75}$$

$$g(z) = h(z) E_b I_b (1 - \chi) / E_i$$

Моделирование НТ

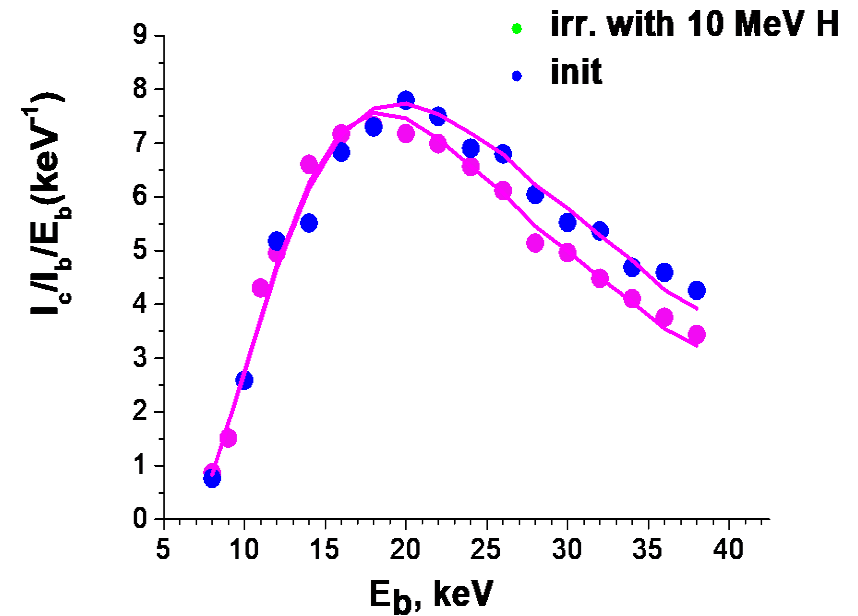
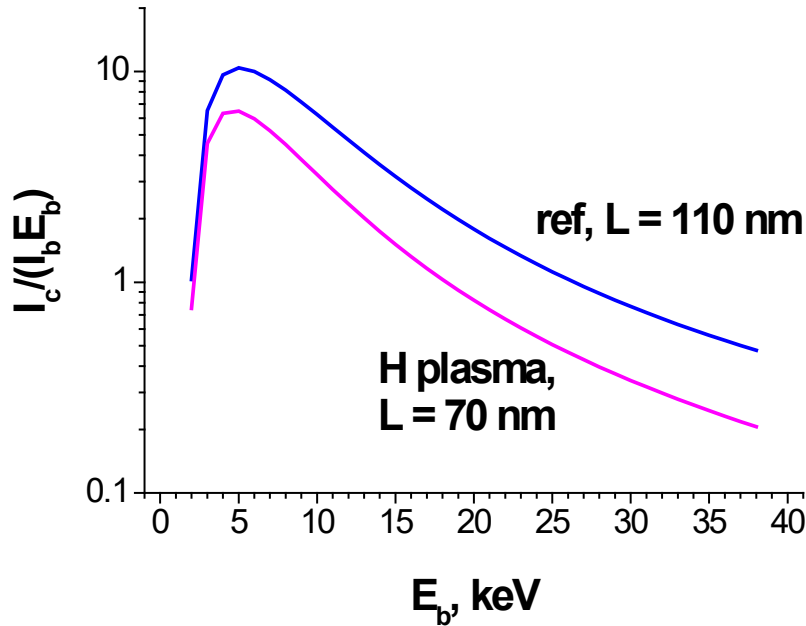
$$N_{e-h} = \frac{E_b I_b (1 - \chi)}{e E_i}$$

$$h(z) = dE/dz/E_i$$



$$E_i = 2.8 E_g + 0.6 \text{ eV}$$

$\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$: Зависимость $I_c(E_b)$



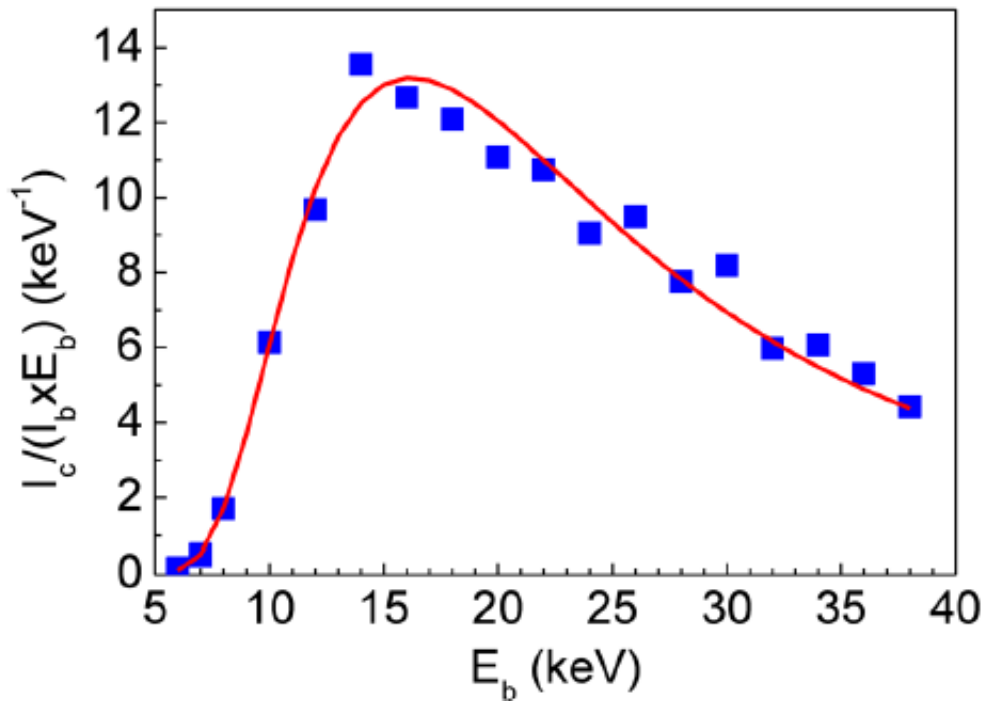
**После обработки в плазме H L
уменьшается от 110 до 70 нм**

**После облучения L
уменьшается от 350 до 190 нм**

S. J. Polyakov et al, Appl. Phys. Lett.
115, 032101, 2019.

S. J. Polyakov et al, Appl. Phys.
Lett. 112, 032107, 2018.

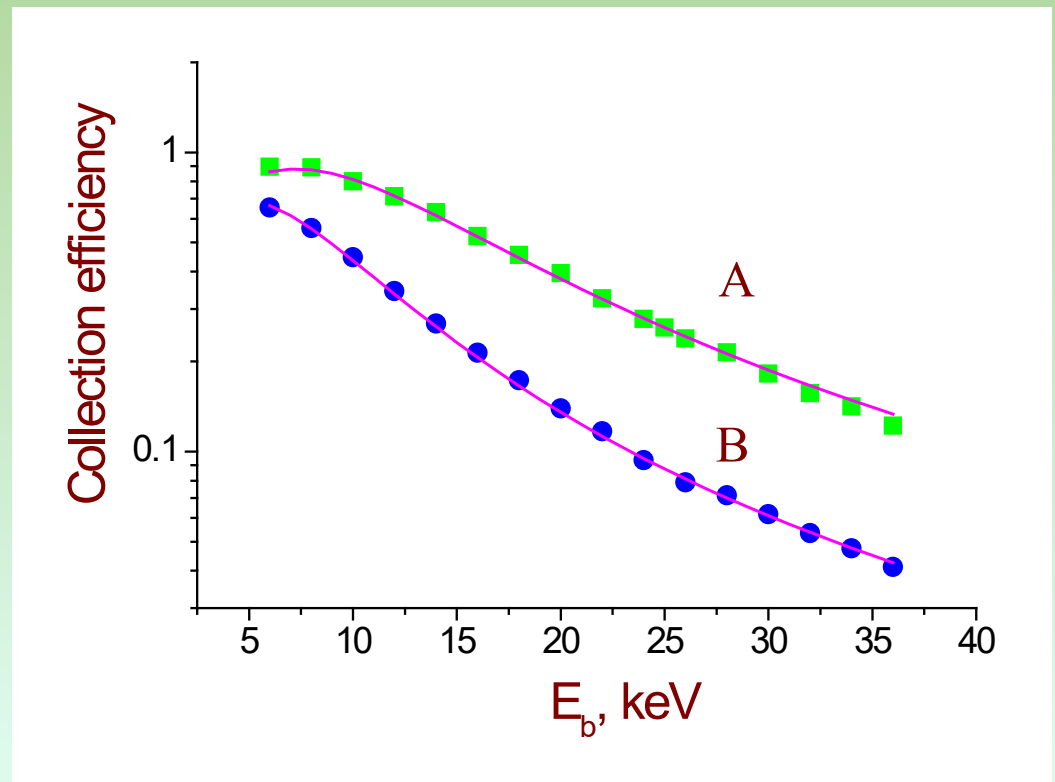
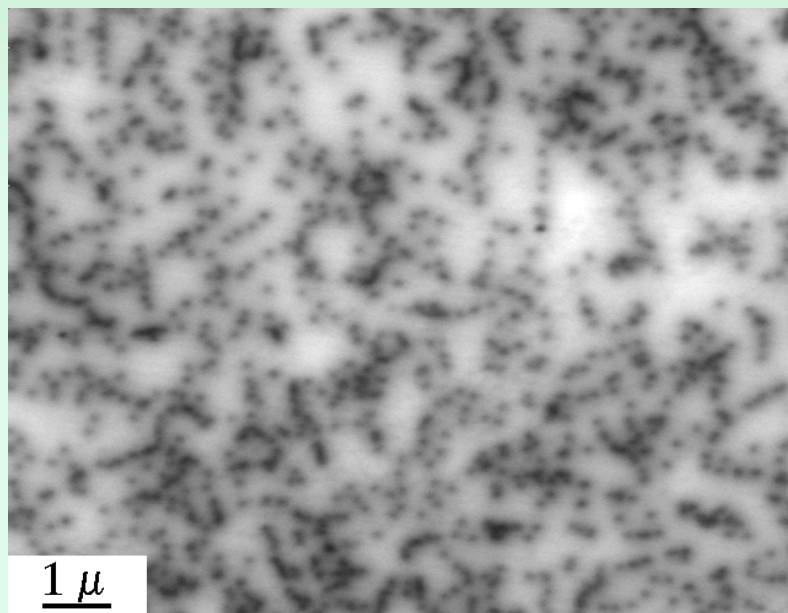
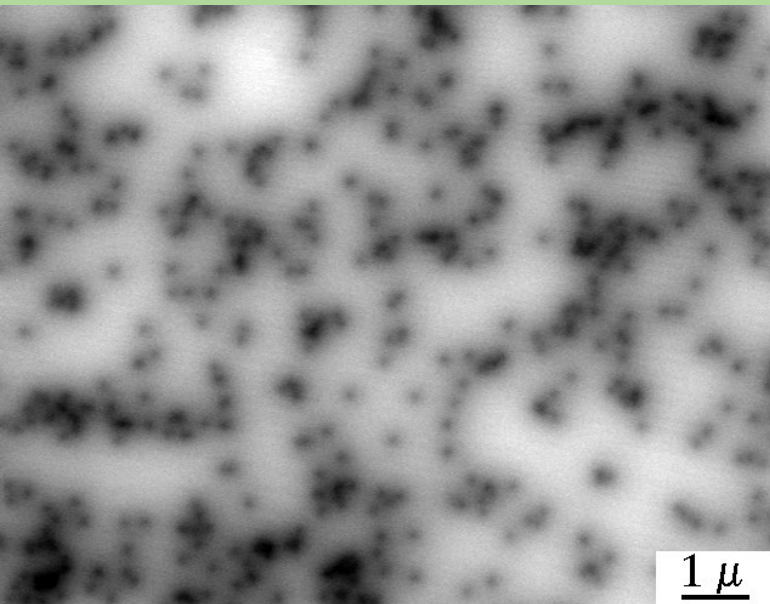
Измерение диффузионной длины



$d_{p-n} = 310 \text{ nm}$
 $L_{\text{Ga}_2\text{O}_3} = 370 \text{ nm}$
 $L_{\text{NiO}} = 30 \text{ nm}$

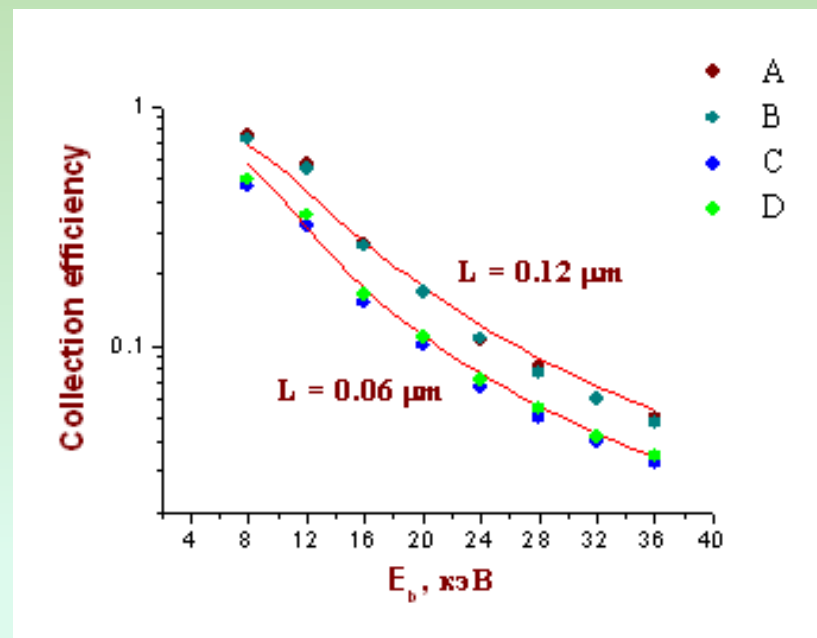
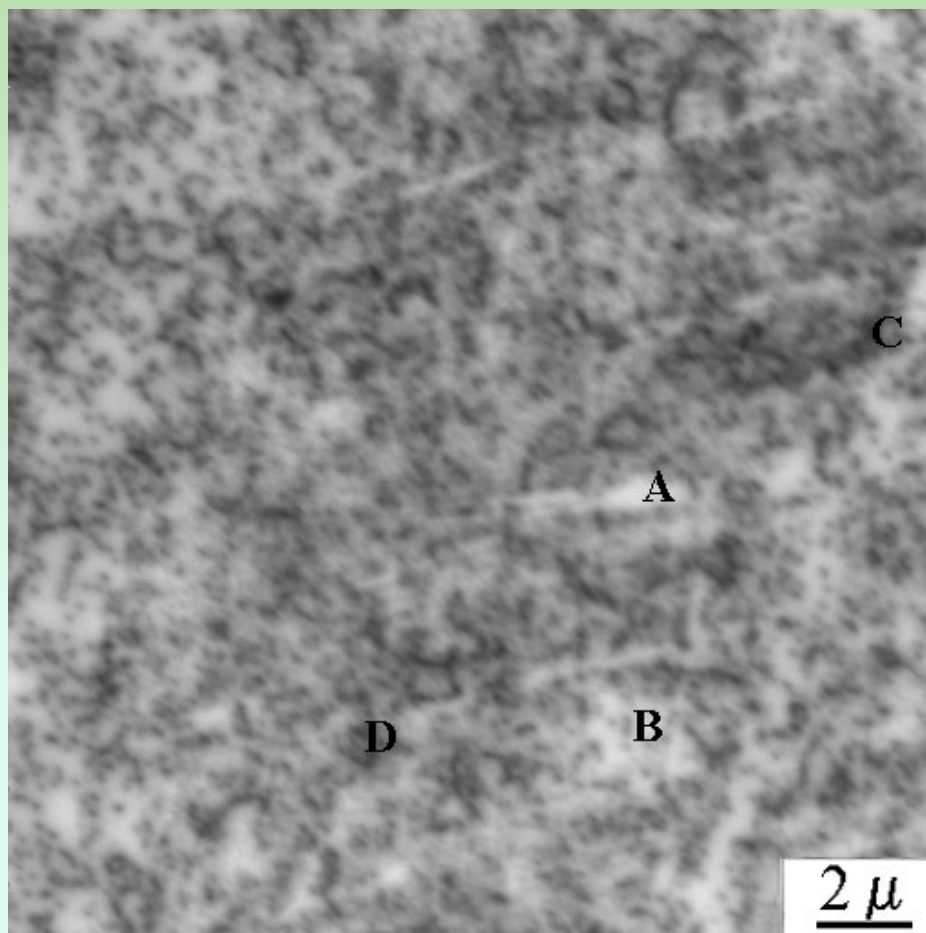
$\text{NiO}/\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$

Измерения L_{eff}

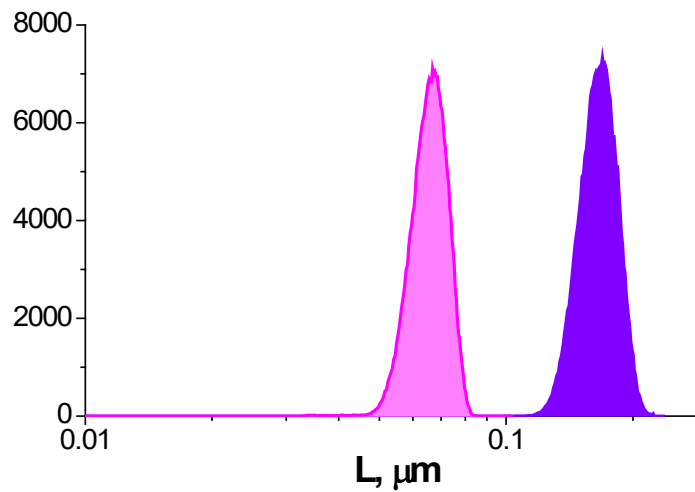
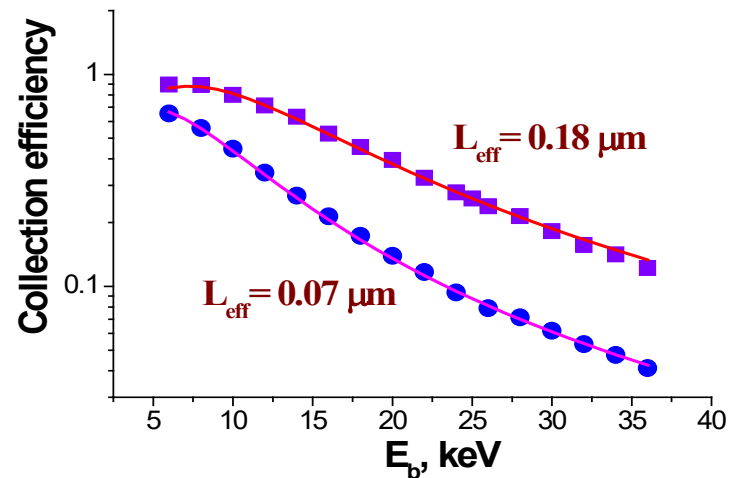
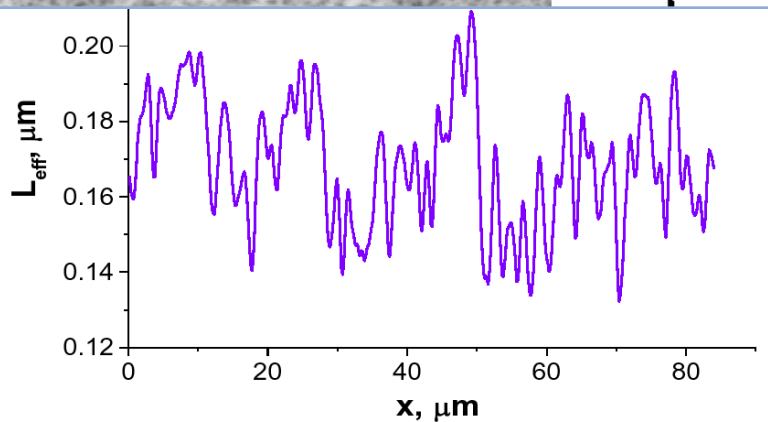
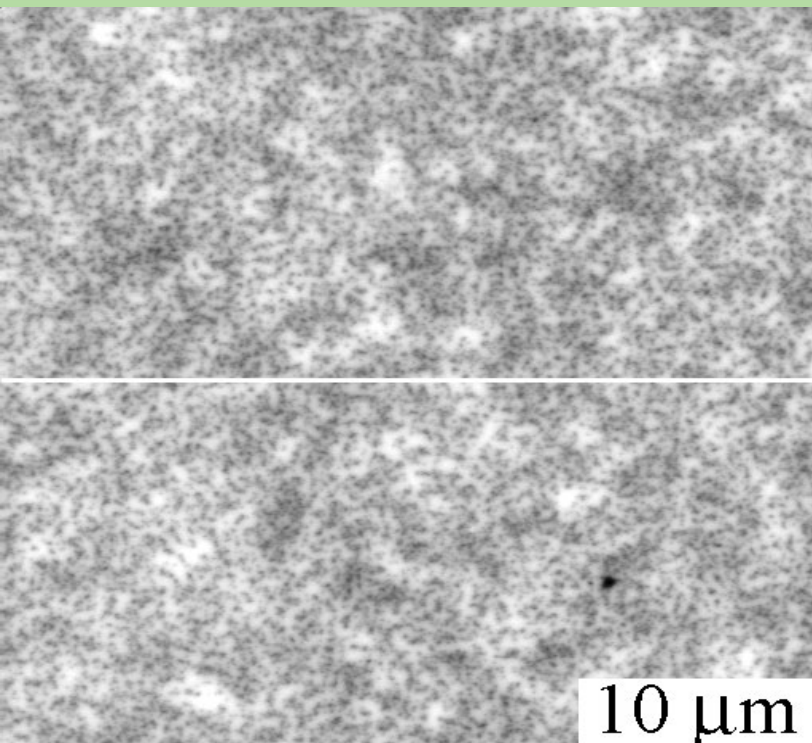


$L = 0.13$ and $0.3\ \mu\text{m}$

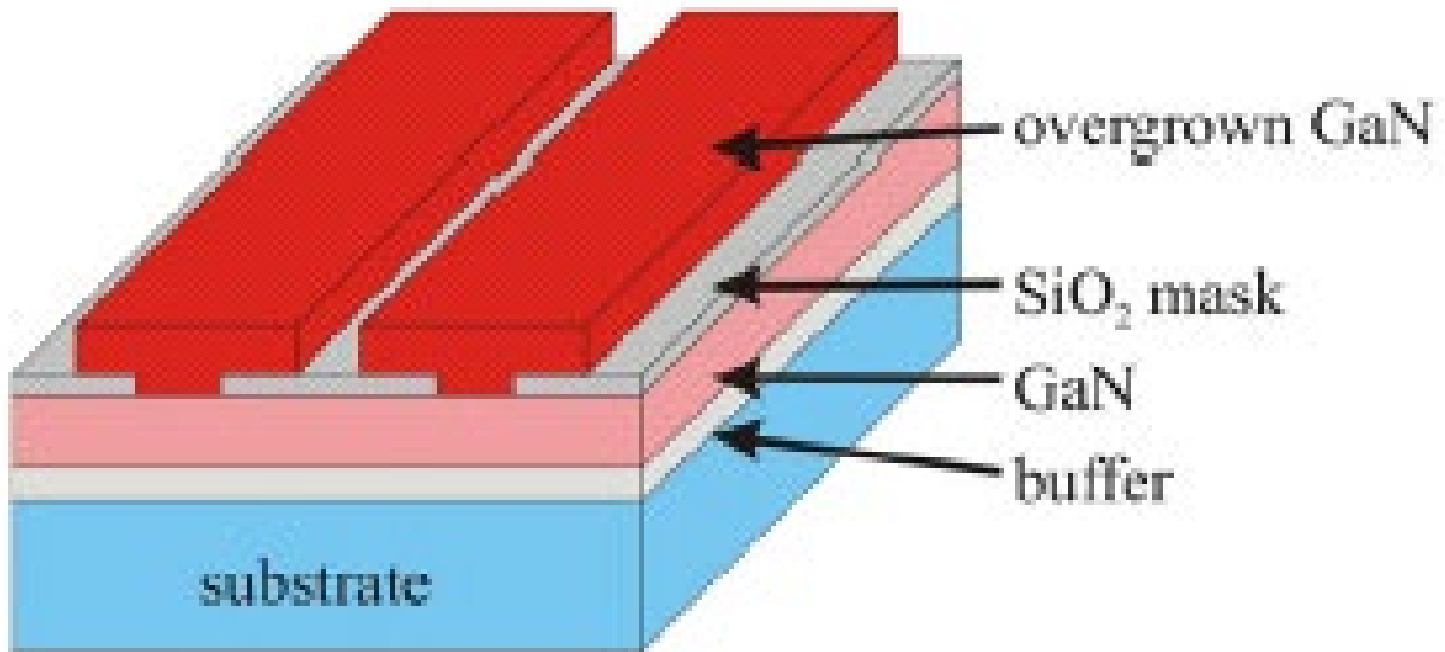
Локальные измерения L_{eff}



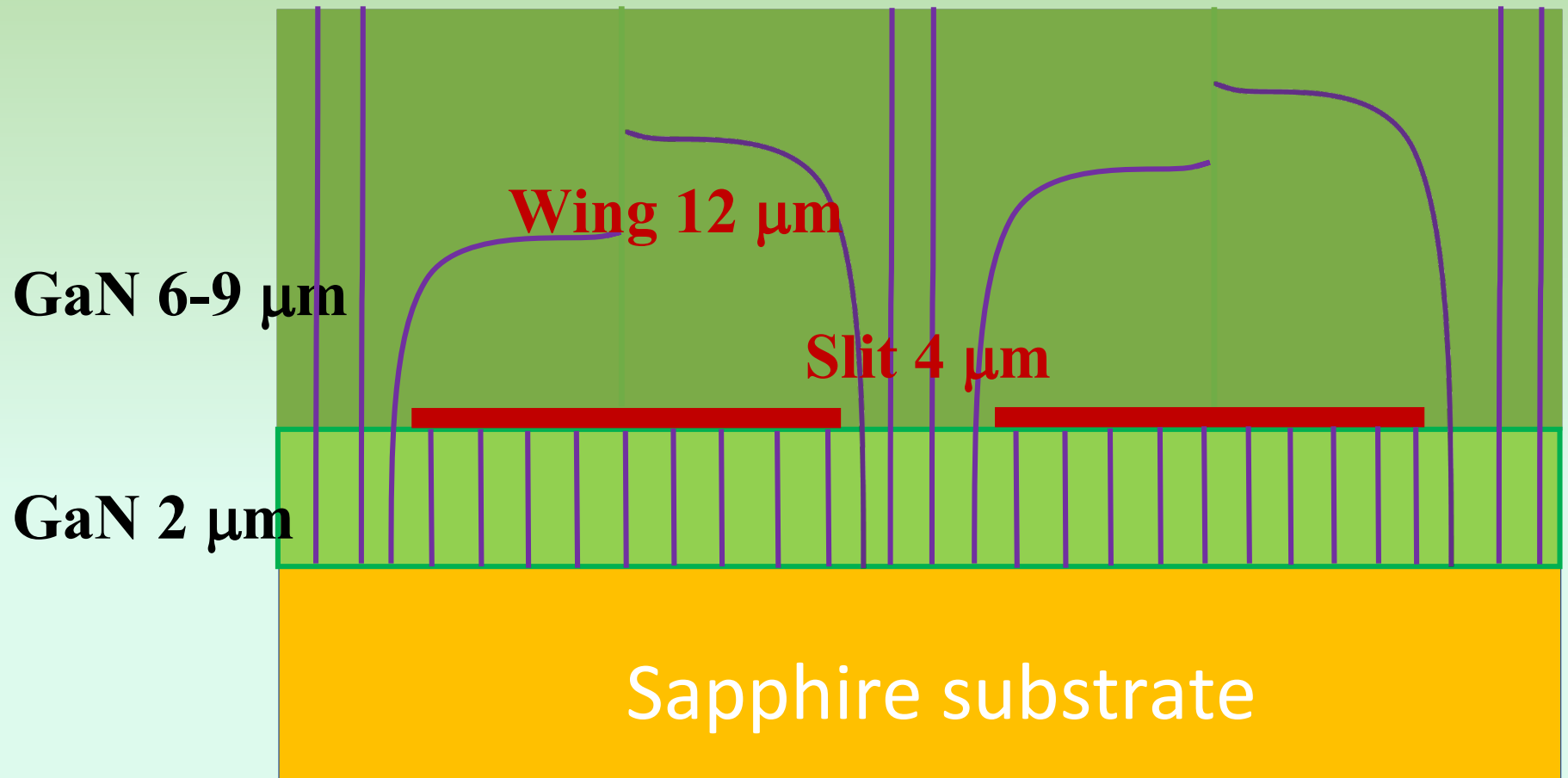
Локальные измерения L_{eff}



Пленки GaN, выращенные методом латерального зарощивания

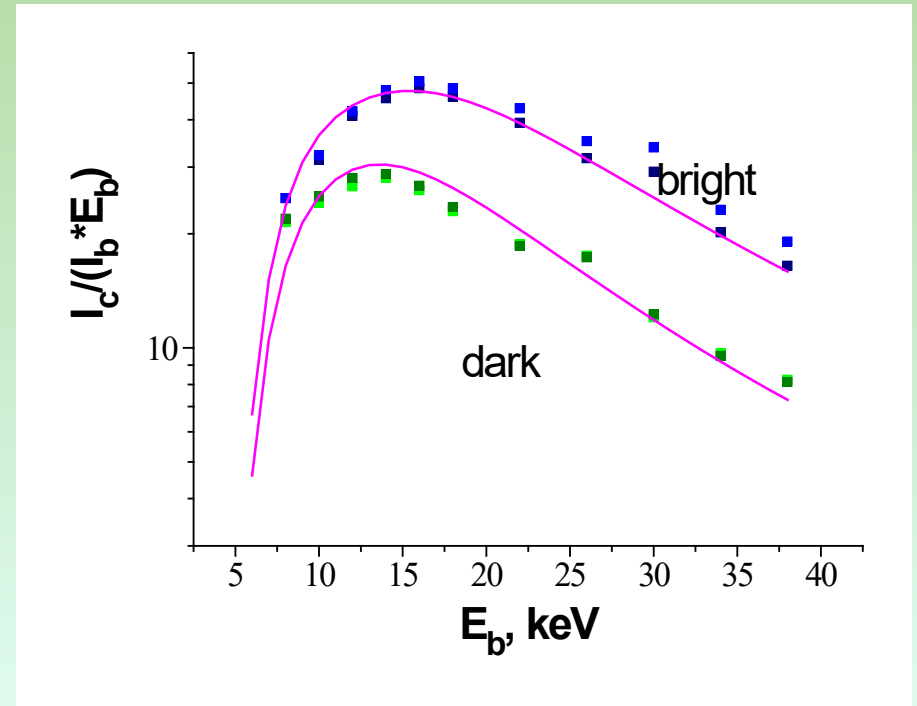
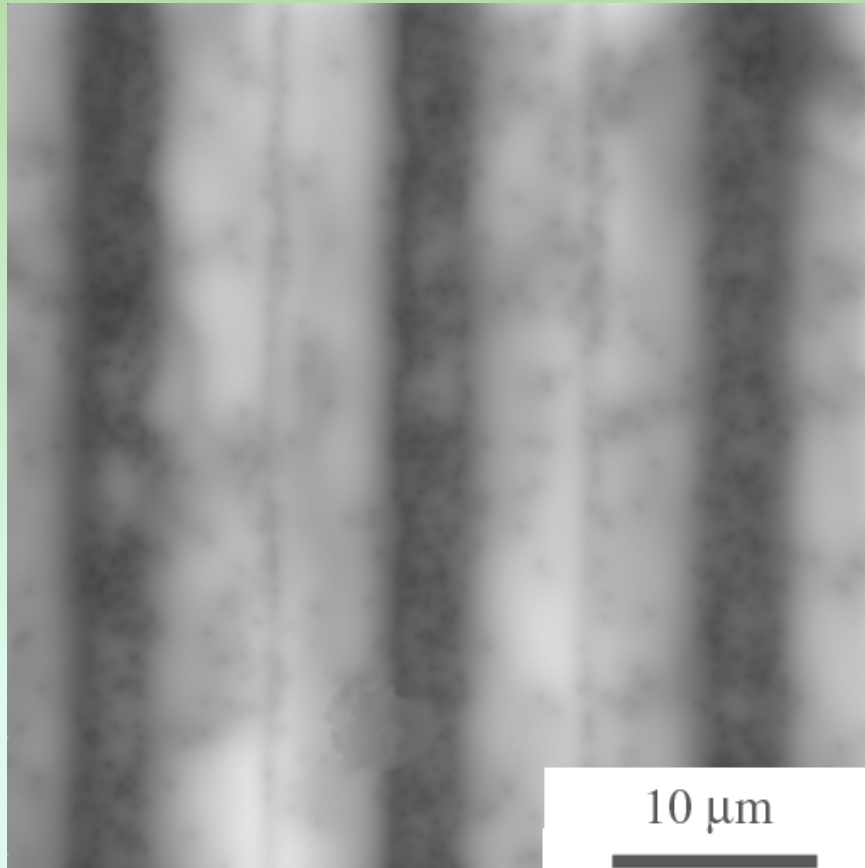


Пленки GaN, выращенные методом латерального заращивания



Измерение диффузионной длины

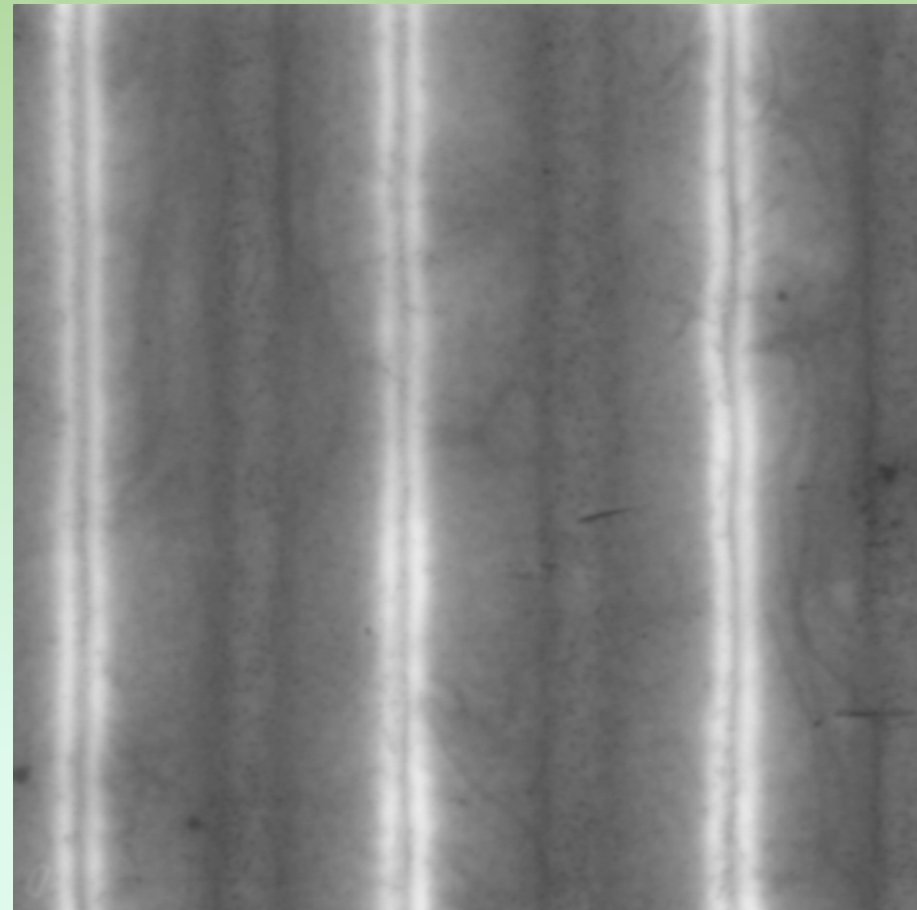
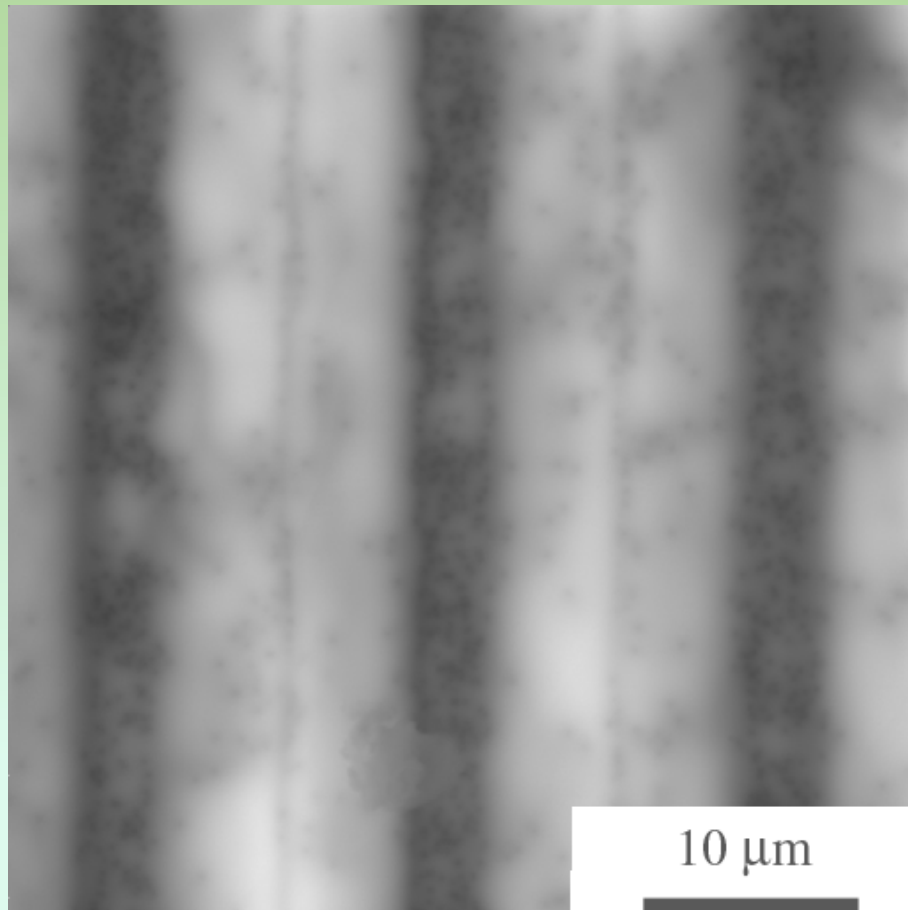
Геометрия с нормальным коллектором



dark
 $N_d = 3 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$
 $L = 0.17 \text{ } \mu\text{m}$

bright
 $N_d = 1 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$
 $L = 0.3 \text{ } \mu\text{m}$

Влияние облучения нейтронами



Изображения исходной (слева) и облученной быстрыми нейтронами ($2 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$) (справа) структур в режиме НТ при 34 кэВ.

Усиление НТ

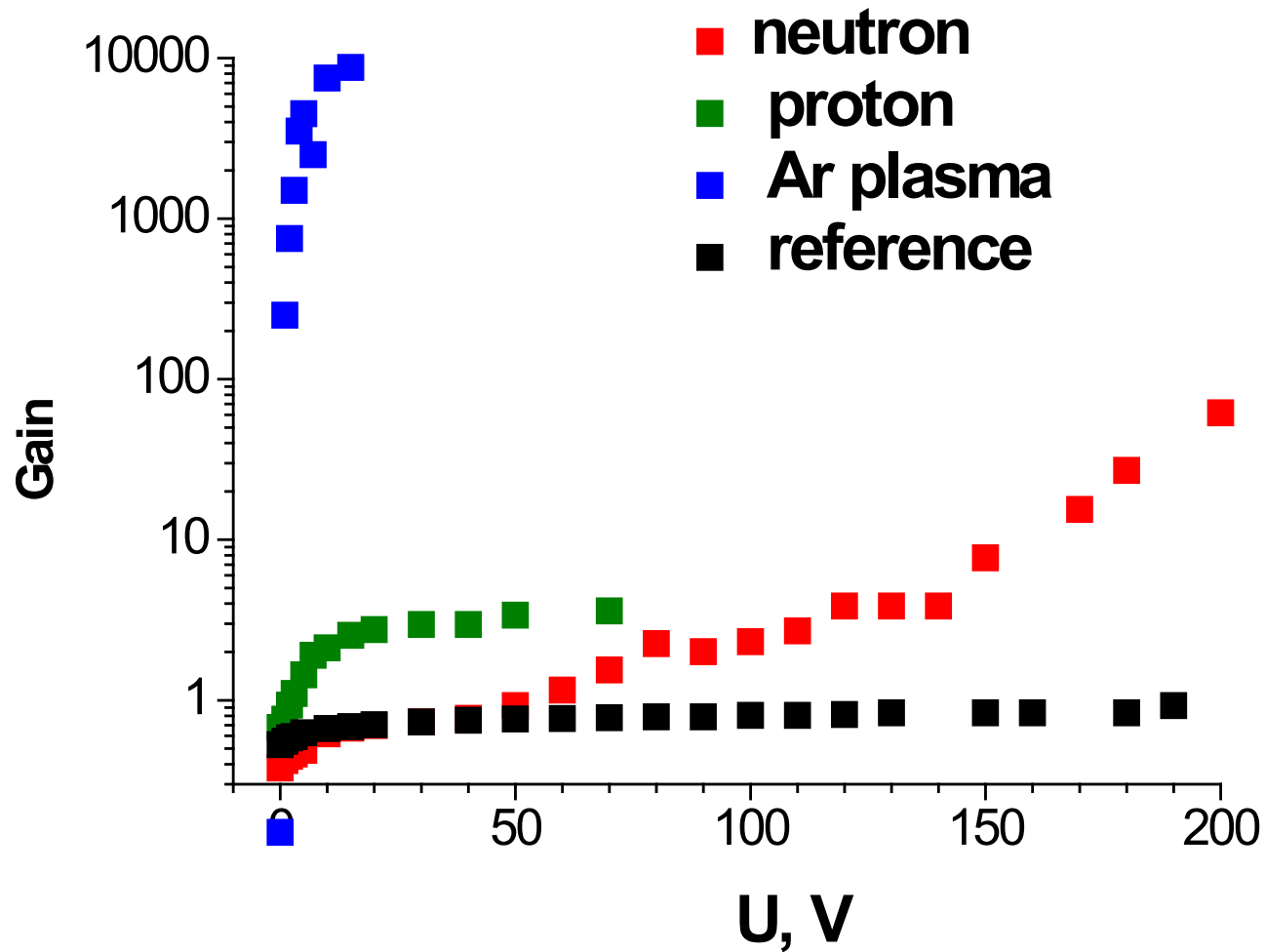
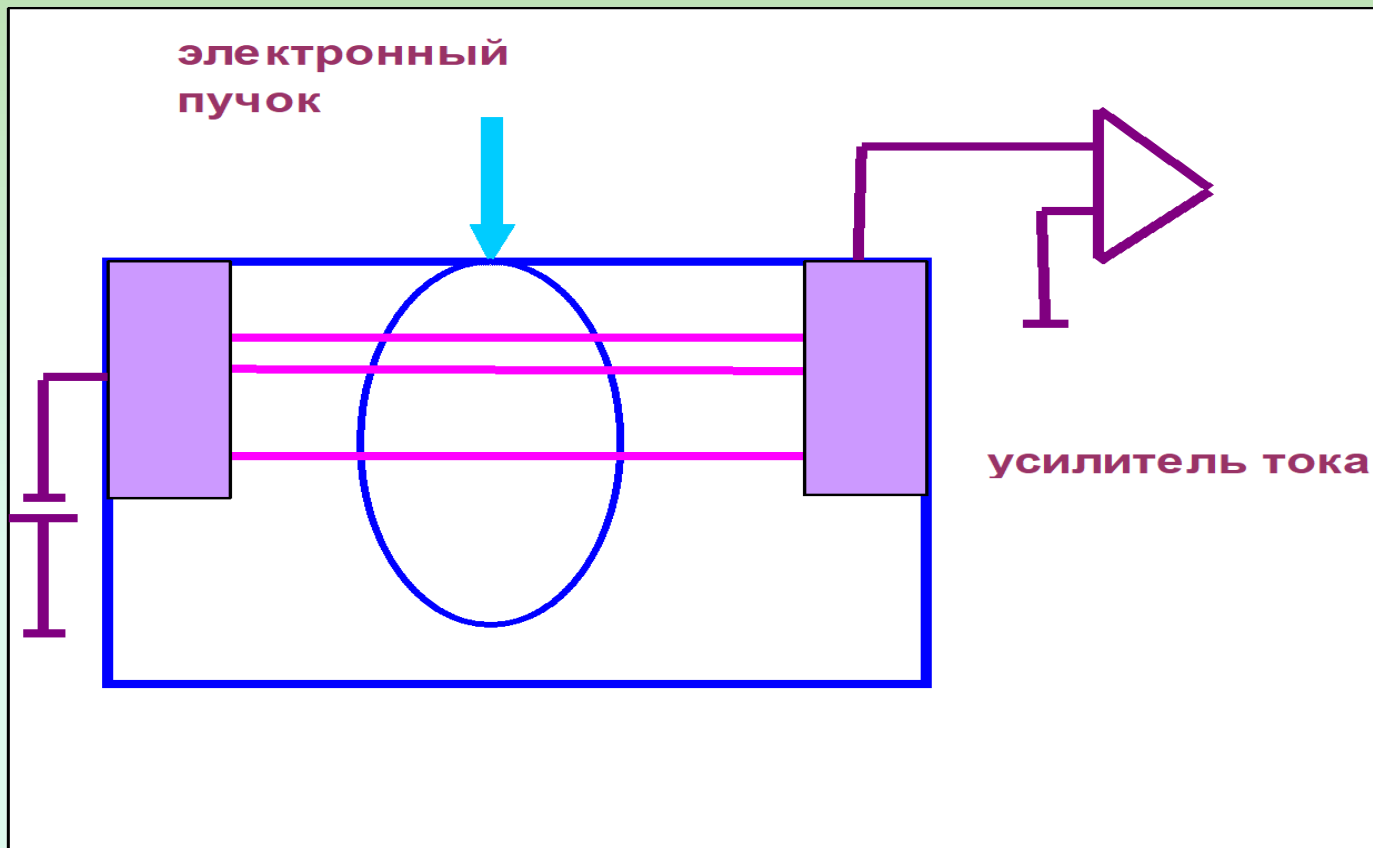


Схема исследований фоторезистора в режиме НТ



Диффузионно-дрейфовое уравнение

$$\frac{\partial n}{\partial t} = G - U + \frac{1}{q} \nabla \cdot J_n,$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = G - U - \frac{1}{q} \nabla \cdot J_p,$$

$$J_n = q\mu_n nE + qD_n \nabla n,$$

$$J_p = q\mu_p pE - qD_p \nabla p,$$

$$\nabla \cdot E = \frac{\rho}{\epsilon} = \frac{q}{\epsilon} (p - n - N_a^- + N_d^+)$$

$$\Delta n = \Delta p$$

$$\Delta n / n \ll 1, |\Delta E| / E_0 \ll 1$$

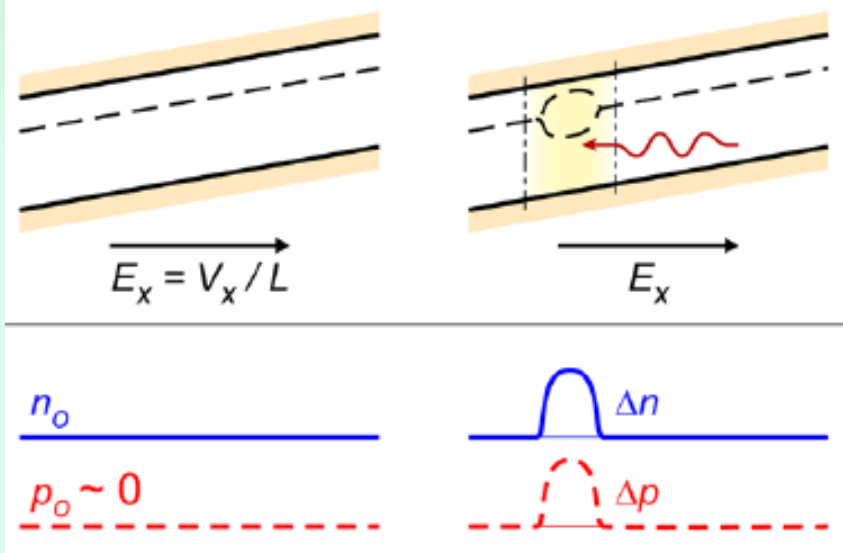
$$\frac{\partial \Delta p}{\partial t} = D_a \nabla [\nabla(\Delta p)] + \mu_a E \nabla(\Delta p) + G - \frac{\Delta p}{\tau}$$

$$\mu_a = \frac{n - p}{n / \mu_h + p / \mu_e} \quad D_a = \frac{n + p}{n / D_h + p / D_e}$$

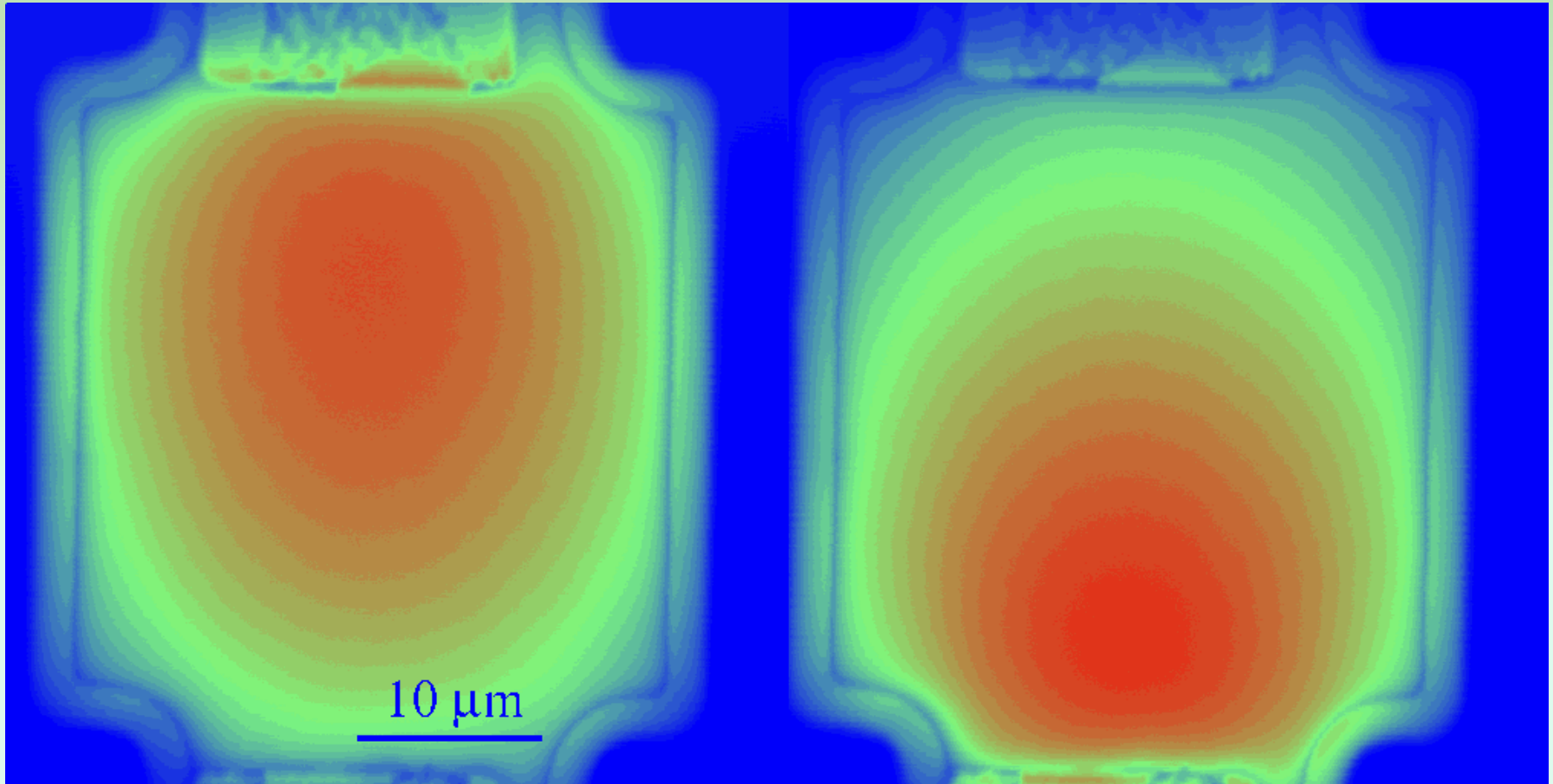
$$n = n_0 + \Delta n$$

$$p = \Delta p$$

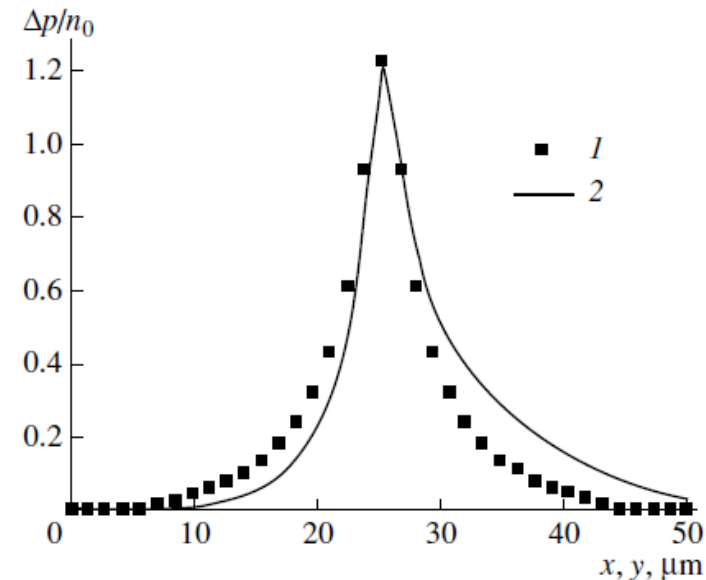
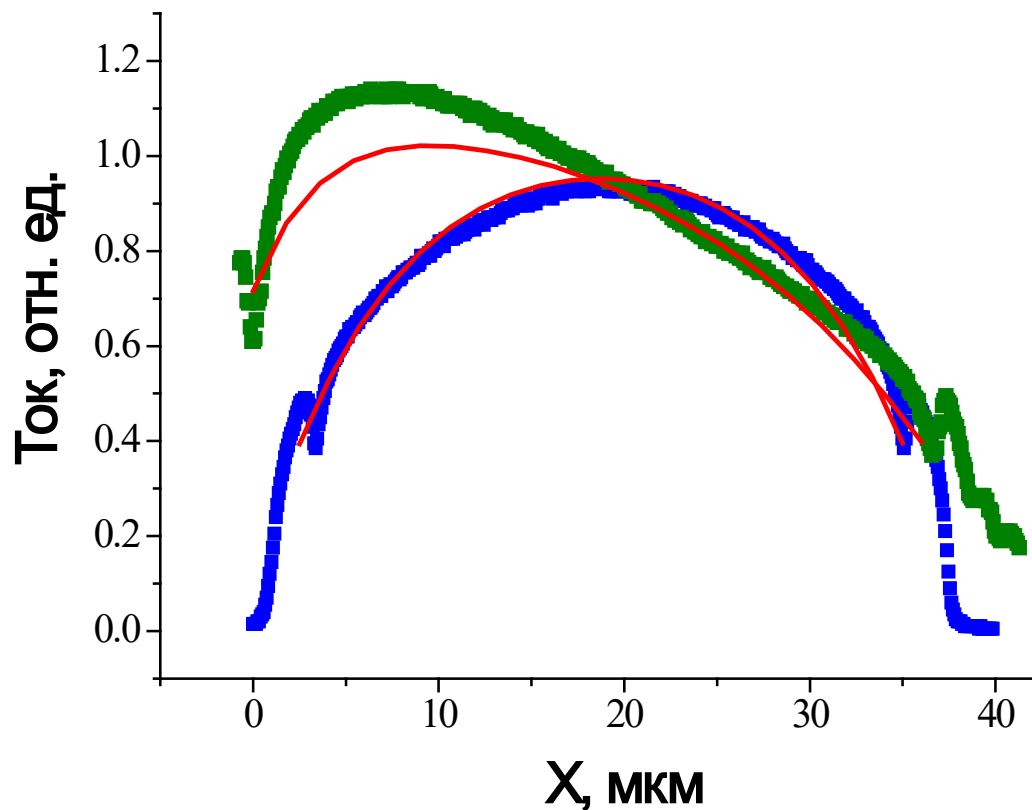
Если $\Delta p \ll n$, $\mu_a = \mu_h$, $D_a = D_h$



Распределение чувствительности в фоторезисторе из HgCdTe



Моделирование распределения чувствительности ФЧЭ



1 – поперек
2- вдоль

$U = 50$ мВ

$L = 8$ мкм

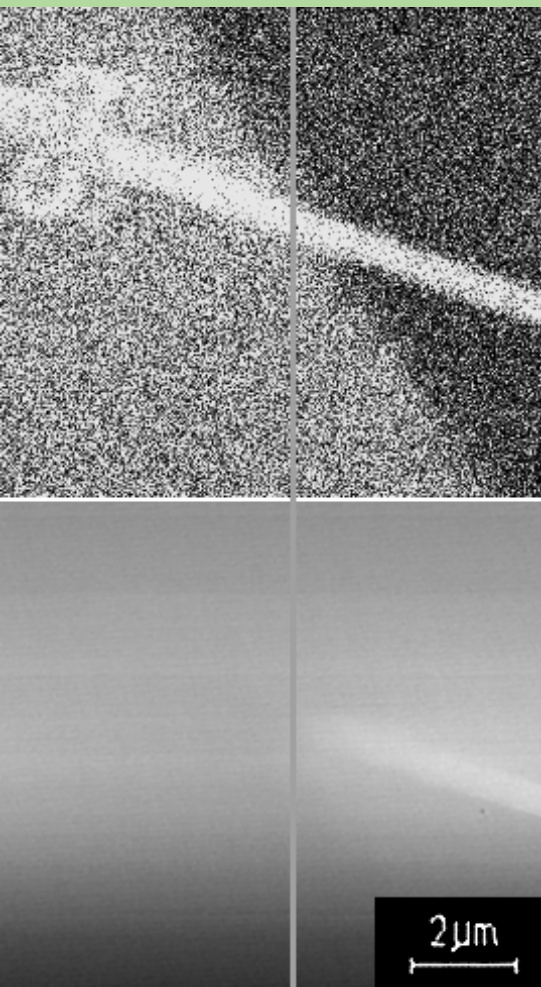
$S_{\text{бок}} = 8.5 \cdot 10^3$ см/с

$n^+/n = 35$

$m_h = 500$ см²В⁻¹с⁻¹

Размер 36×32.5 мкм²

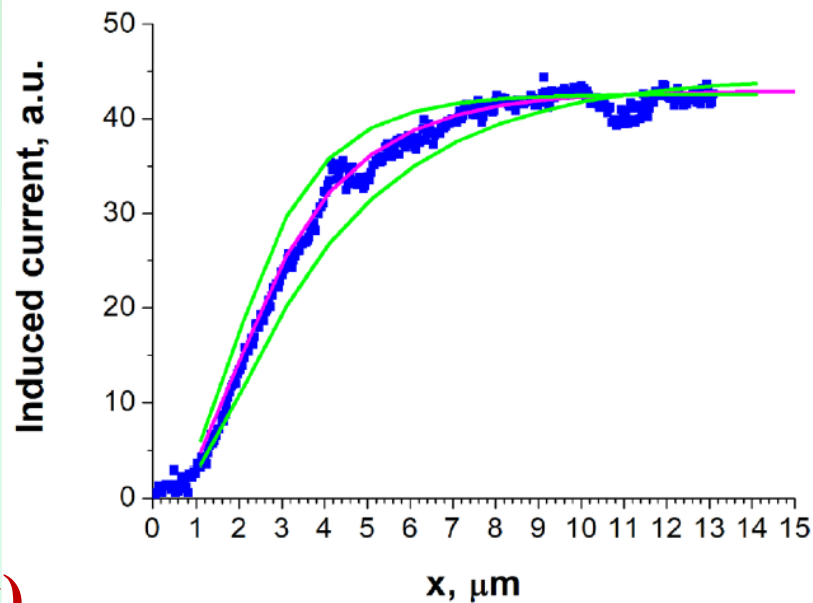
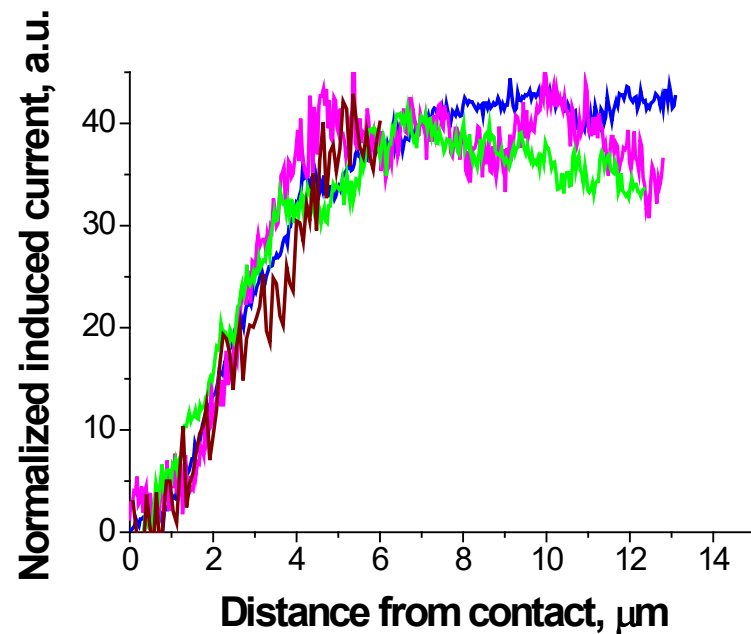
Наностолбики ZnO



$E_b = 15 \text{ keV}$,
 $I_b = 0.1 \text{ nA}$
 $U = 50 \text{ mV}$

$L = 2 \text{ мкм}$

1.5 и 3 мкм (зеленые линии)



Модулированный ЕВІС

Модуляция интенсивности

Измерение амплитуды и сдвига фазы



Разделение D и τ

$$\omega\tau > 0.1$$

Modulated EBIC

$$\mathbf{G}(\mathbf{t}) = \mathbf{G}_0 \exp(\mathbf{i}\omega\mathbf{t})$$

$$\mathbf{L}^* = \mathbf{L} / (1 + \mathbf{i}\omega\tau)^{1/2}$$

$$\frac{d\phi}{dx} = \frac{L\omega}{2D} = \frac{\pi f \sqrt{\tau}}{\sqrt{D}}, \quad (\omega\tau \ll 1),$$

$$\frac{d\phi}{dx} = \left(\frac{\omega}{2D} \right)^{1/2} = \left(\frac{\pi f}{D} \right)^{1/2}, \quad (\omega\tau \gg 1).$$

Измерение спада амплитуды и сдвига фазы



Возможность определения D и τ .

Fuyuki T., Matsunami H., J. Appl. Phys. **52**, 3428, 1981.

Модулированный EBIC

Модуляция положения пучка

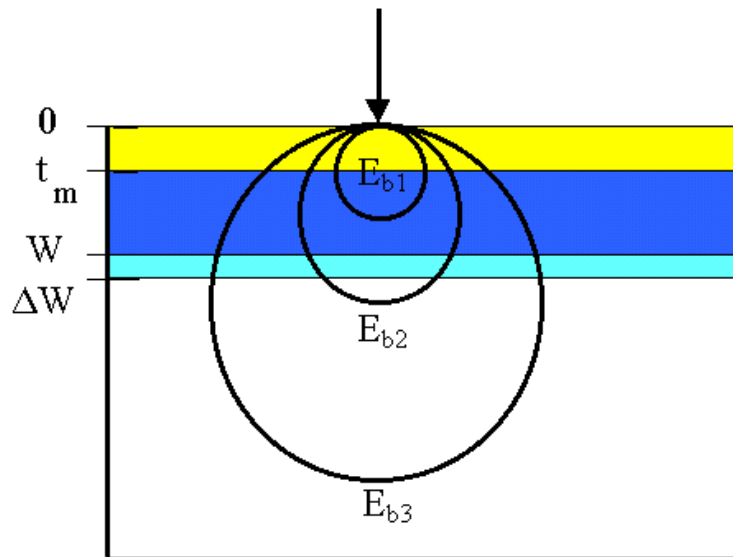
Измерение dI_c/dx



$$dI_c/dx/I_c = -1/L_{eff}$$

**Меньше чувствительность
к форме области генерации**

Модулированный ЕВІС



$$I_c(W) = e \int_W^d g(z) \psi(z, W, L(z)) dz + e \int_0^W g(z) dz$$

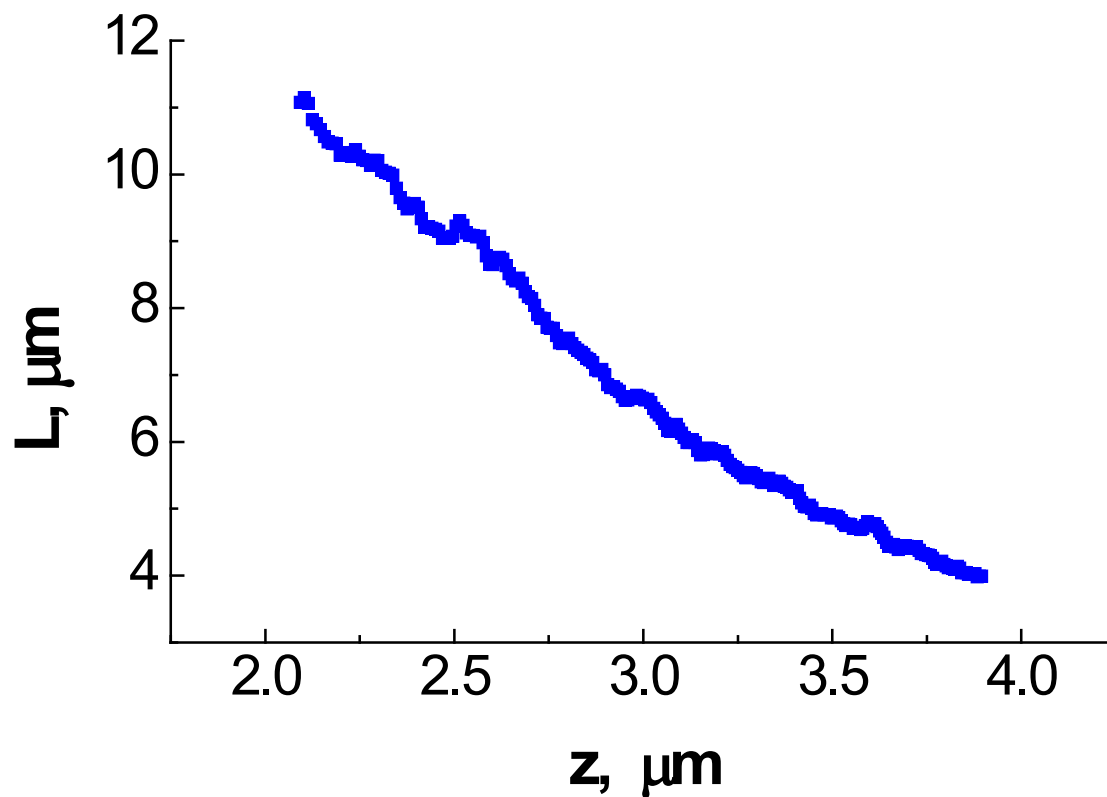
$$\psi''(z, W) - \psi(z, W)/L^2 = 0$$

with the boundary conditions $\psi(W) = 1$. If

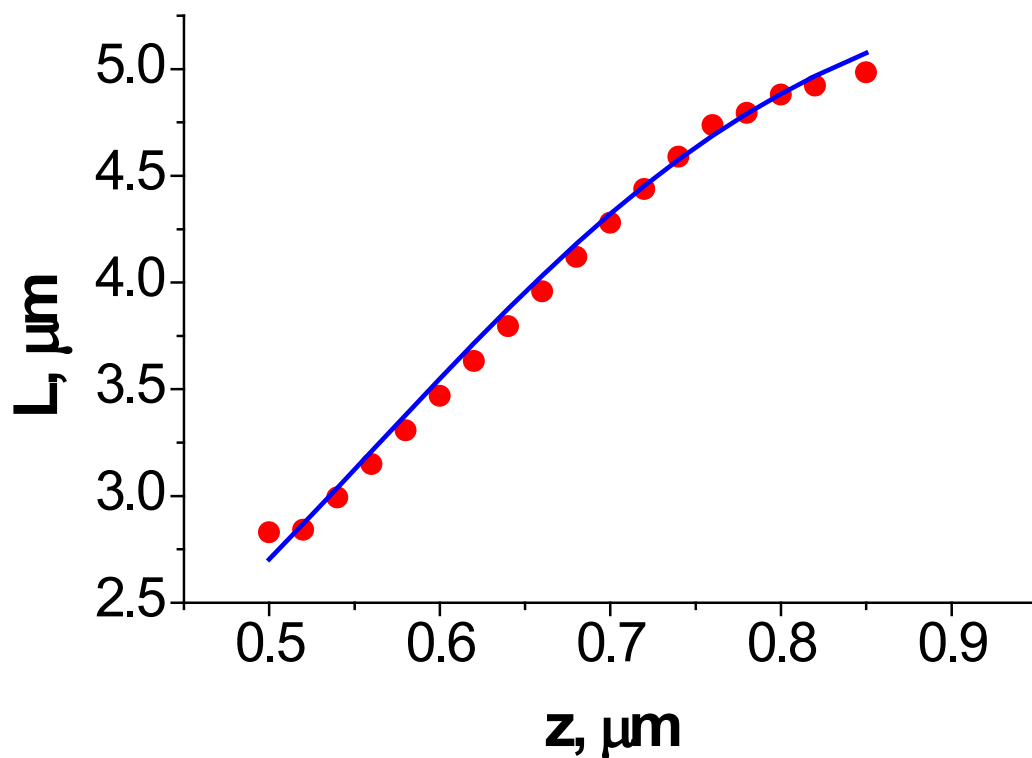
$$Q(W) = \frac{\frac{\partial \psi(W, 0)}{\partial W}}{\psi(W, 0)} = - \frac{\partial I_c(W)}{\partial U} \left(\frac{\partial W}{\partial U} \right)^{-1} [I_c(W) - e \int_0^W g(z) dz]^{-1}$$

$$L^2(W) = \frac{1}{Q^2(W) + \frac{\partial Q(W)}{\partial W}}$$

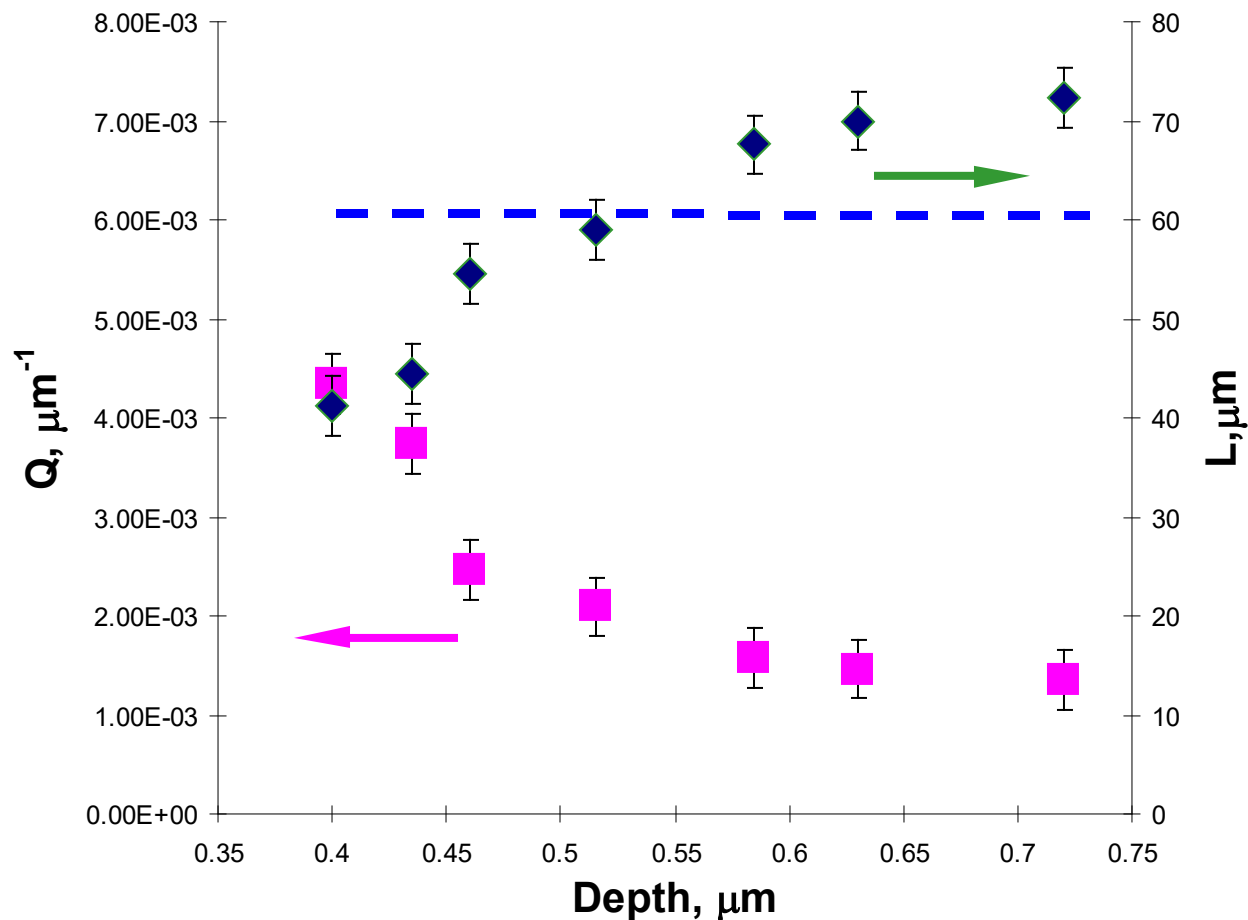
Зависимость $L(z)$ в Si:Au после РИТ, восстановленная методом модулированного НТ



Зависимость $L(z)$ в GaAs после травления в Ar, восстановленная методом модулированного НТ

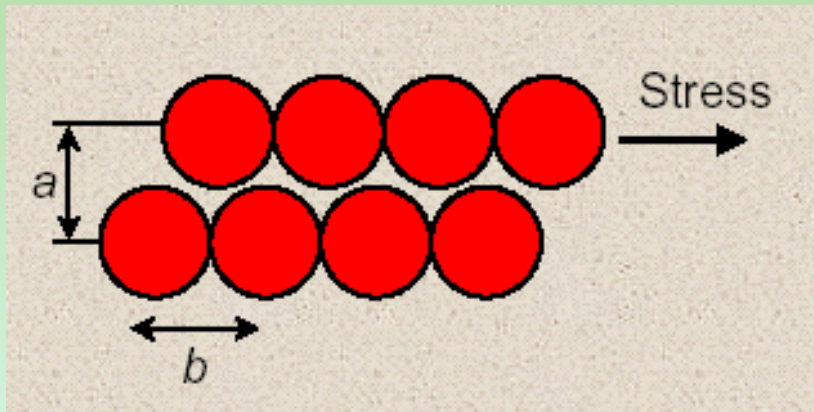


$L(z)$ в слое SiGe ($t \sim 1.8 \mu\text{m}$), восстановленная методом модулированного НТ



Выявление и исследование протяженных дефектов

Дислокационная гипотеза (30-е годы)



$$\tau = \frac{Gb}{2\pi a} \sin \frac{2\pi x}{b}$$

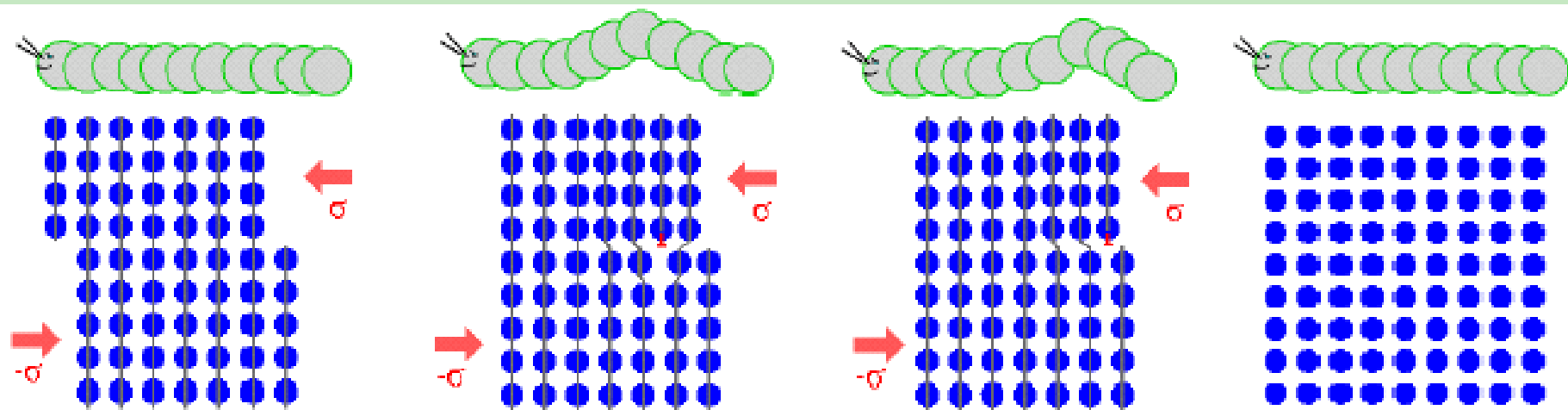
$$\tau_{\max} = \frac{G b}{2\pi a}$$

$$\tau_{\max} \sim G$$

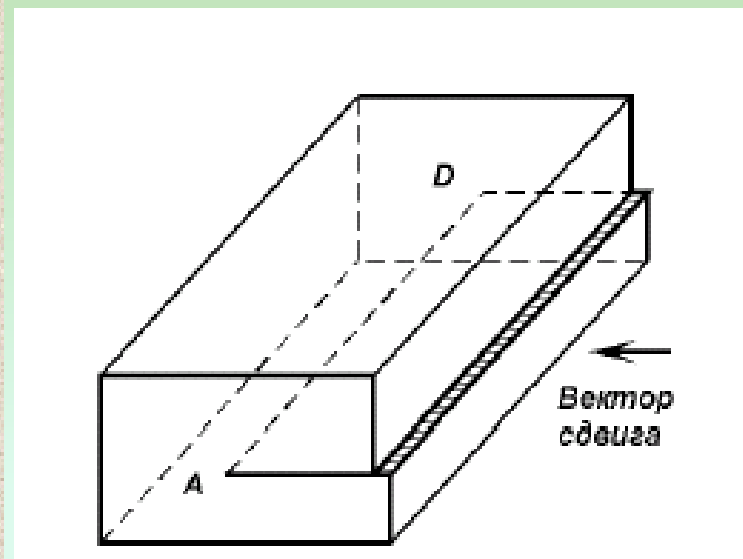
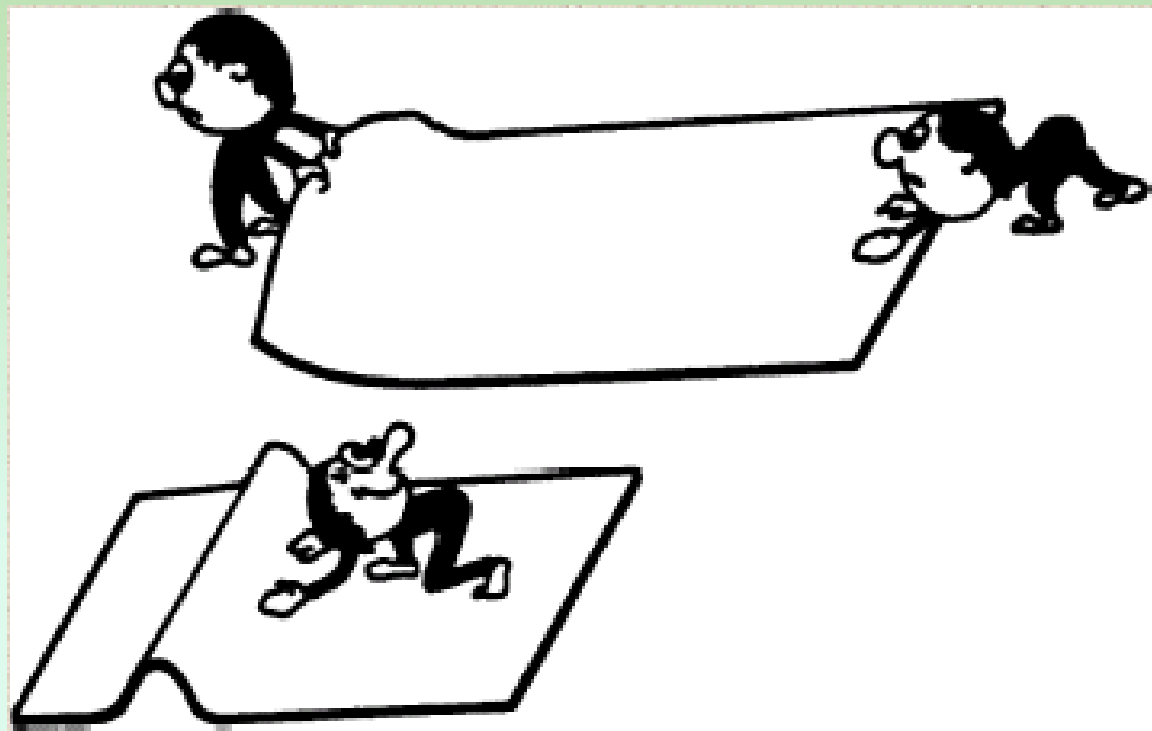
Модуль Юнга для кремния $\sim 10^4 \text{ кГ/мм}^2$

Реально при температурах выше 500°C Si деформируется при нескольких кГ/мм^2

Дислокации



Дислокации



Дислокации

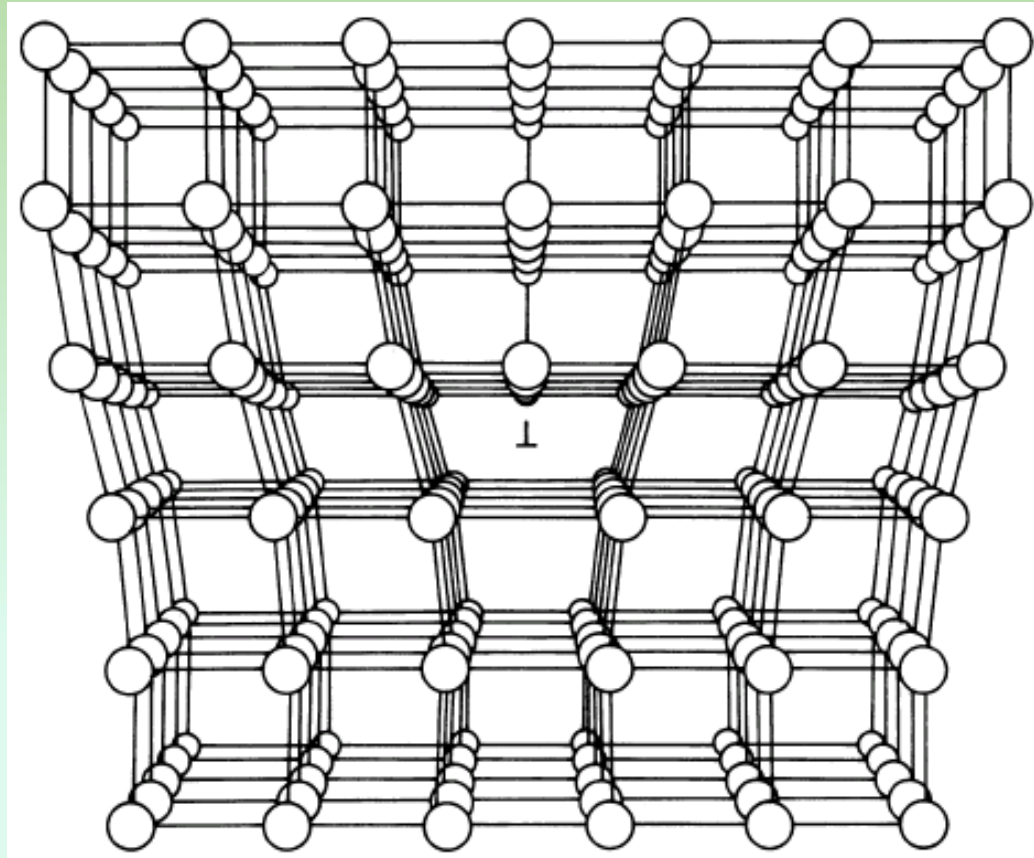


Схема краевой дислокации в простой кубической решетке

Дислокации

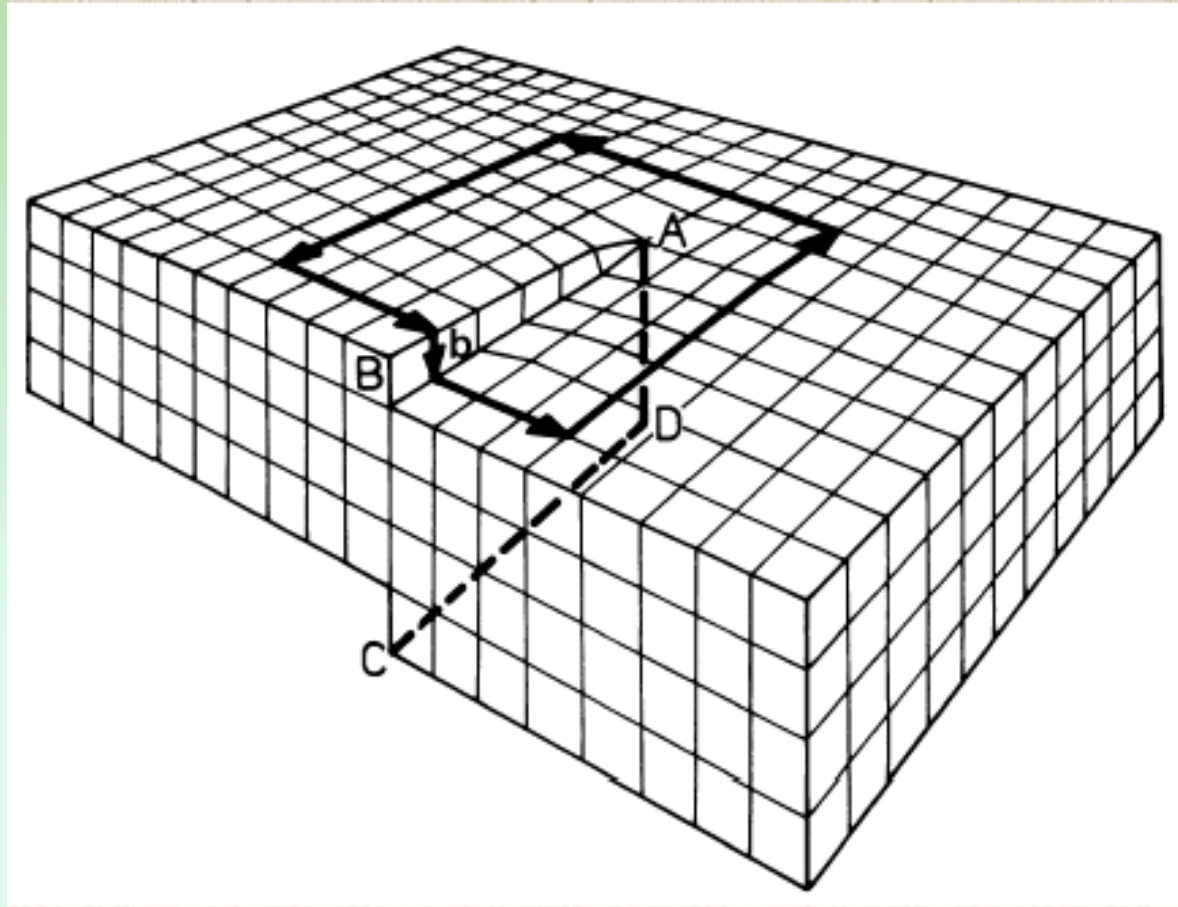
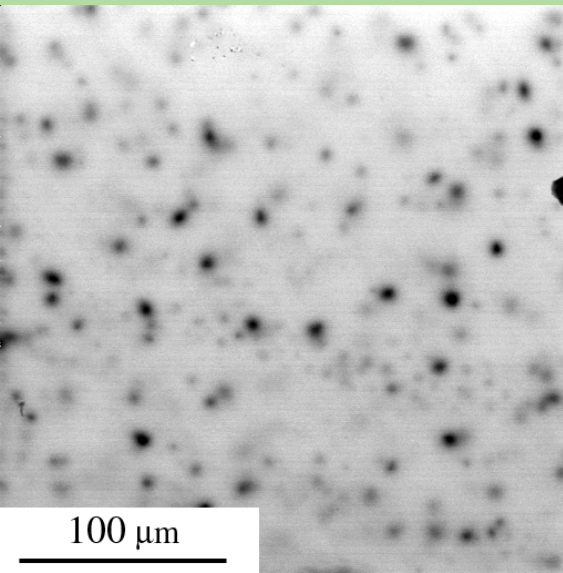
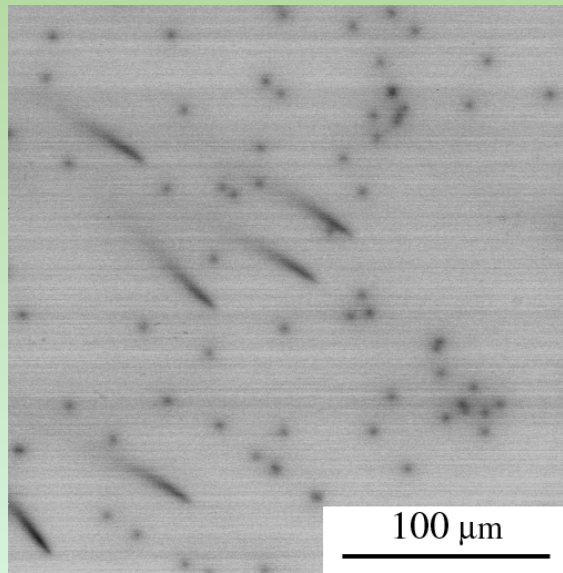


Схема винтовой дислокации

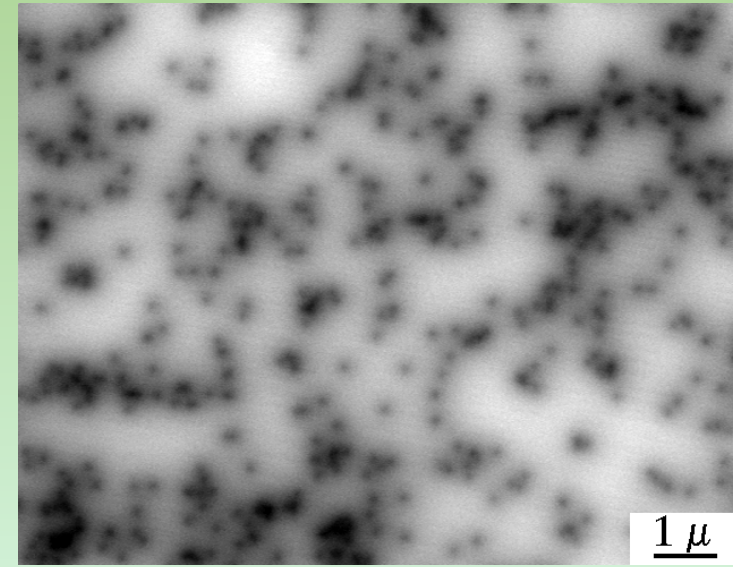
Выявление и исследование свойств протяженных дефектов



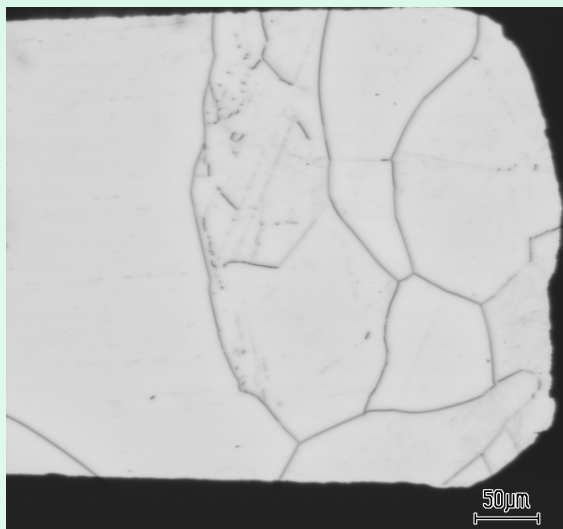
О преципитаты в Si



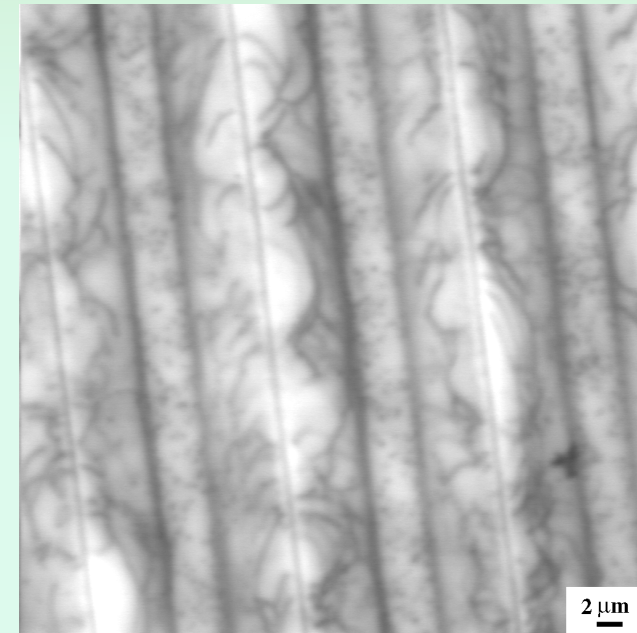
Дислокации в SiC



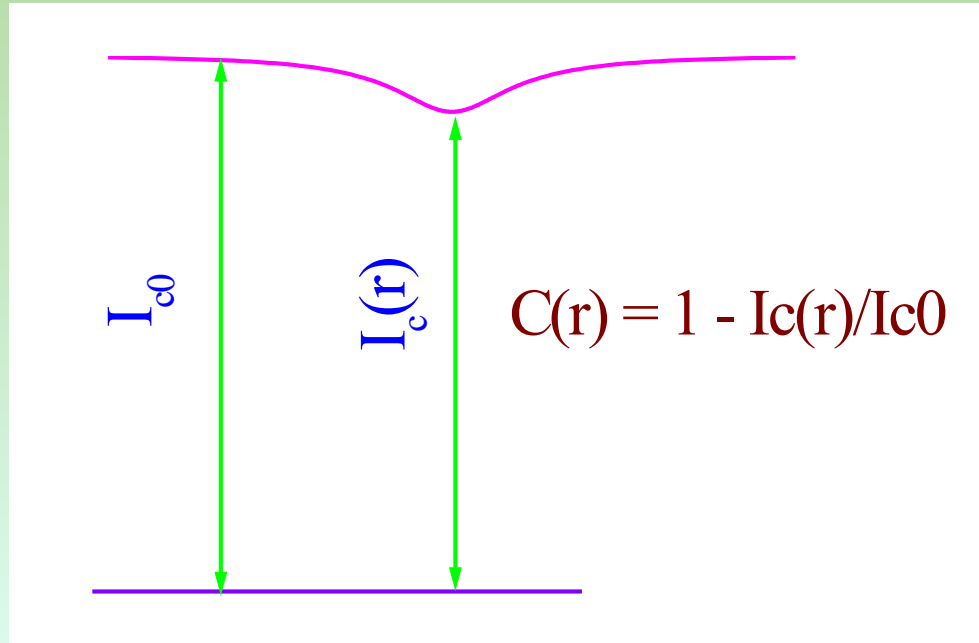
Дислокации в GaN



Границы зерен в Si



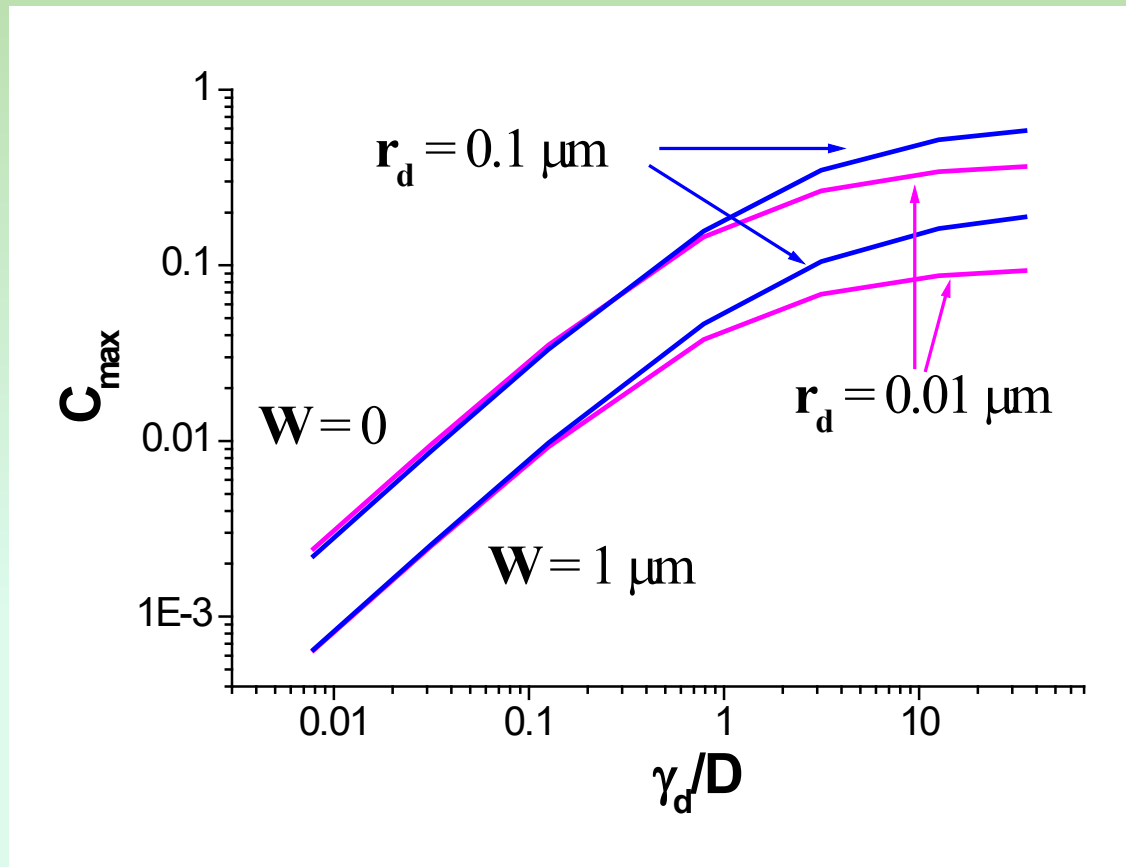
EBIC контраст дислокации



$$\gamma_d = \pi r_d^2 (1/\tau_d - 1/\tau_b) \approx \pi r_d^2 / \tau_d = N_{\text{tot}} \sigma v_{\text{th}}$$

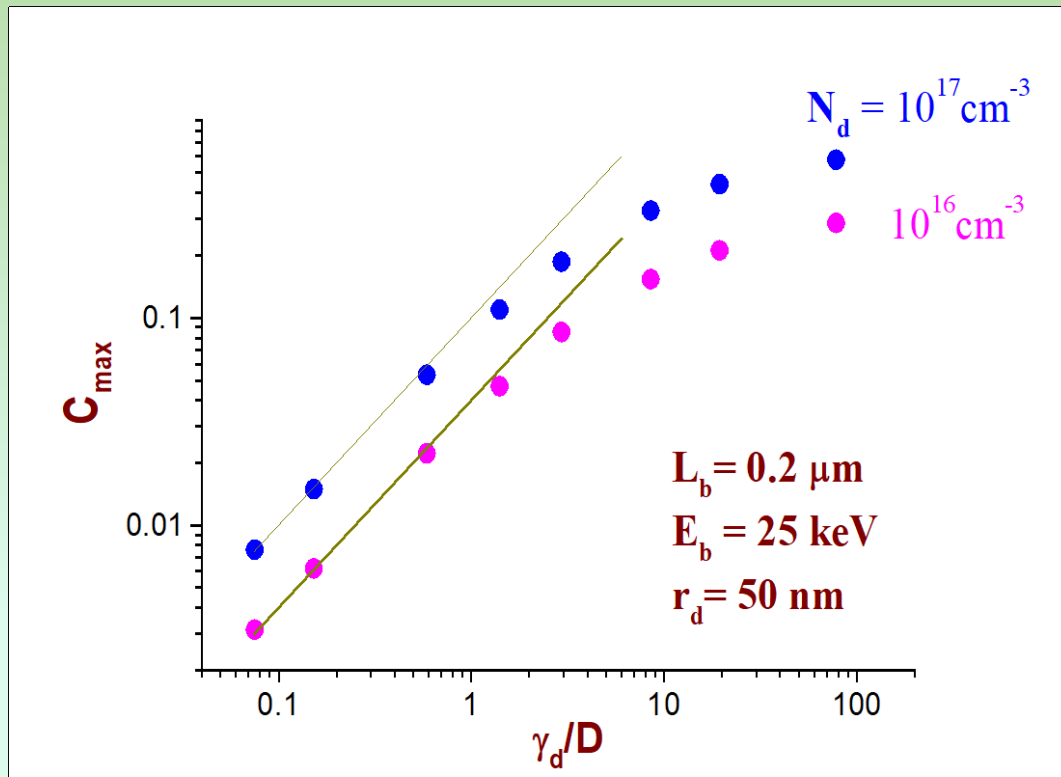
$$C_{\text{max}} = \frac{\gamma_d}{1 + \frac{\gamma_d}{2\pi D} \{\ln[2(z_0 - W)/r_d] + 1/2\}} \frac{\exp[-(z_0 - W)/L_b] \int_{-\infty}^{\infty} p_0(0, y, z) dy}{I_{c0}}$$

Зависимость $C_{\max}$ от γ_d/D для дислокации, перпендикулярной поверхности Si



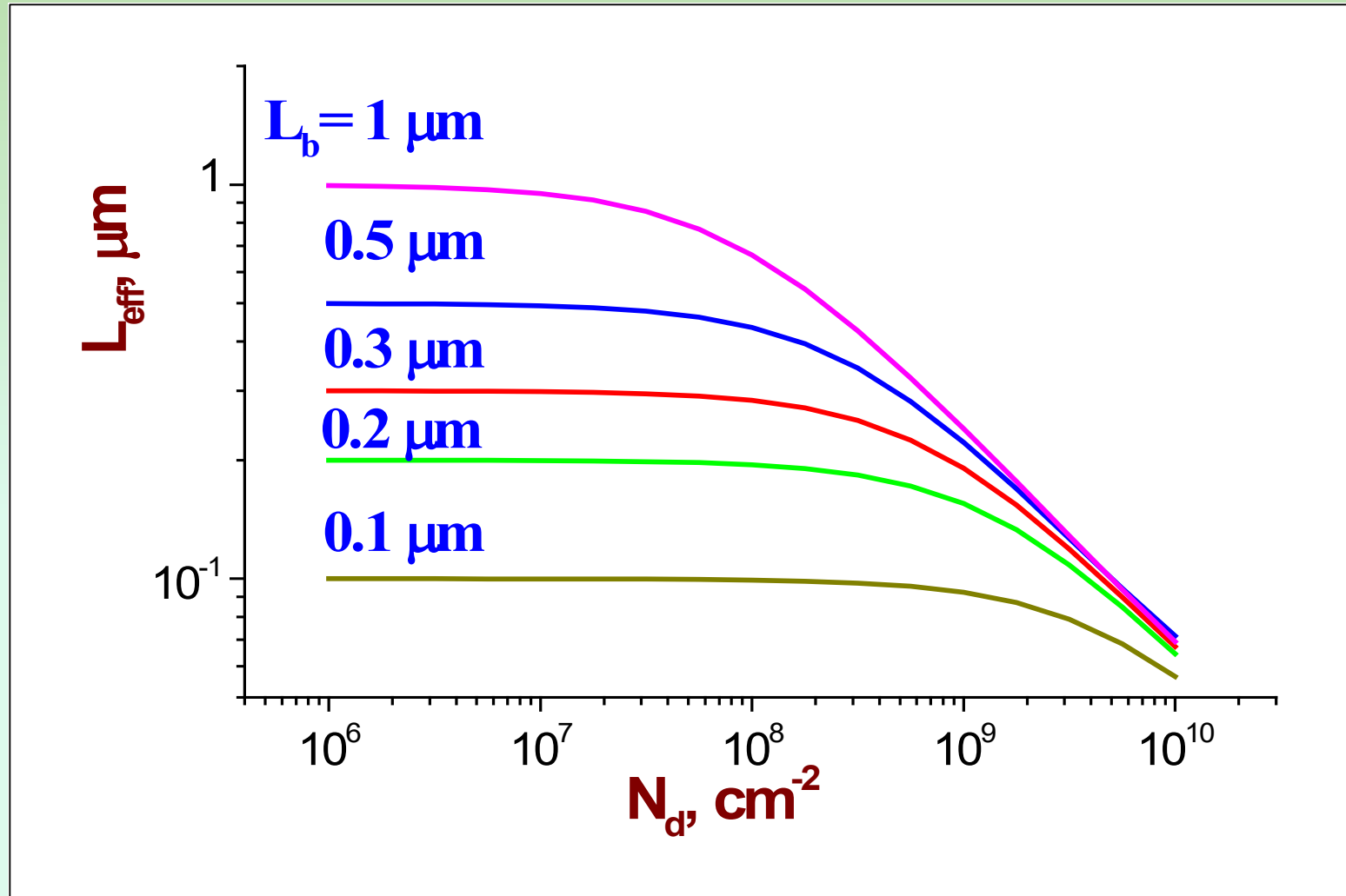
$L_b = 50 \mu\text{m}, R = 5 \mu\text{m}.$

Дислокация, перпендикулярная поверхности



$$\gamma_d = \pi r_d^2 (1/\tau_d - 1/\tau_b) \approx \pi r_d^2 / \tau_d = N_{\text{tot}} \sigma v_{\text{th}}$$

Зависимость L_{eff} от плотности дислокаций N_D , рассчитанная для нескольких L_b

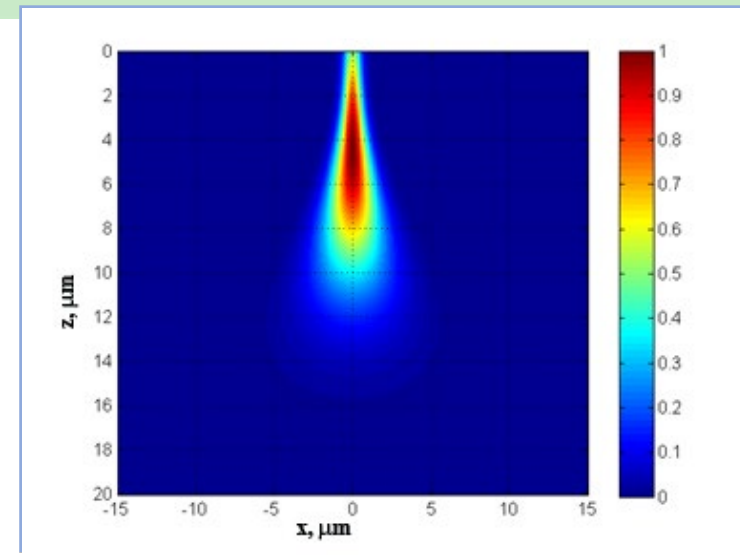
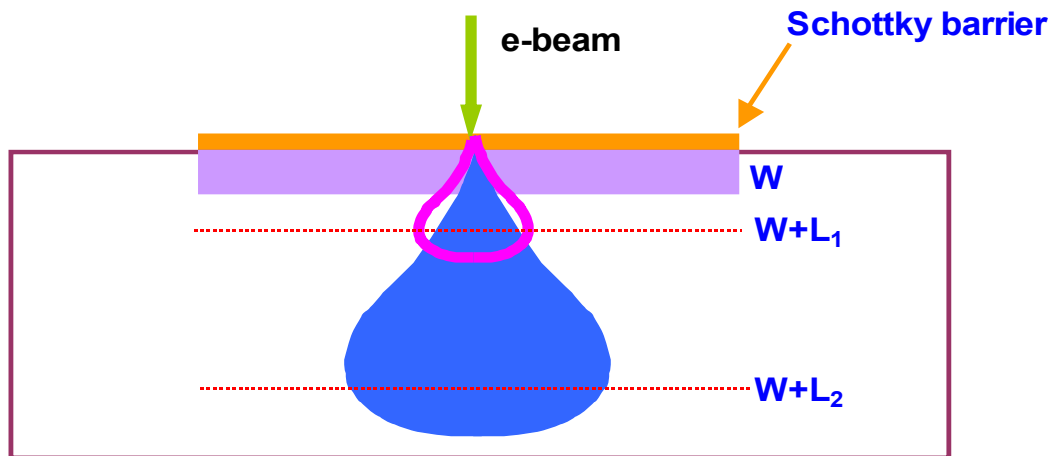


Пространственное разрешение в полупроводниках с малой L

$$\delta = (d^2 + R^2 + L^2)^{1/2}$$

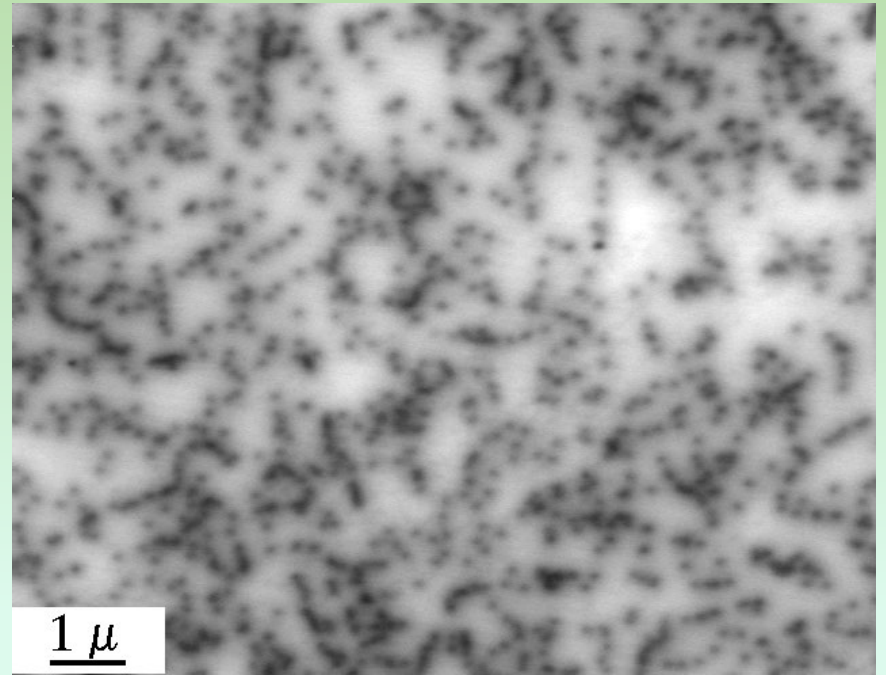
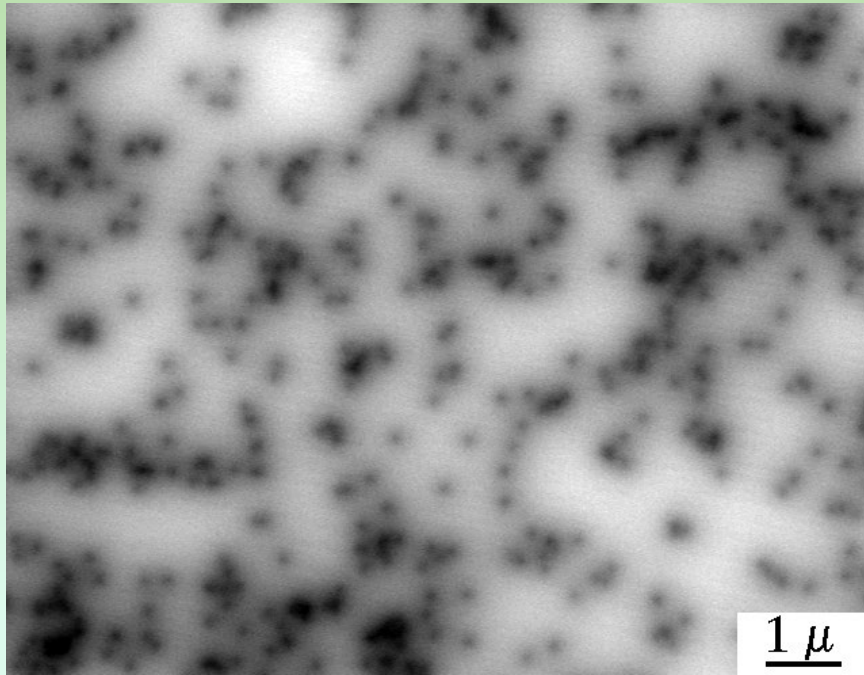
$$\Delta p \sim \exp(-r/L)/r$$

(Donolato, phys. stat. sol. (a) **141**, K131, 1994)

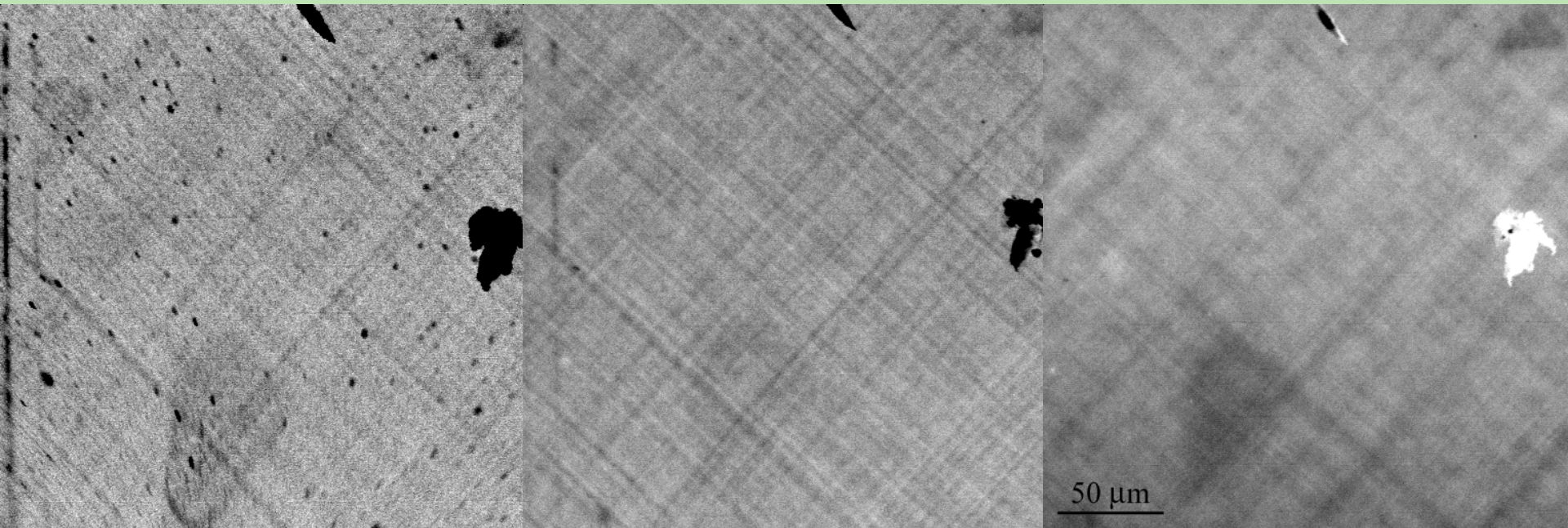


$$\text{Ширина} \sim (z^3/R)^{1/2}$$

Дислокации в GaN



Зависимость контраста дислокаций в структуре SiGe/напряженный Si от E_b



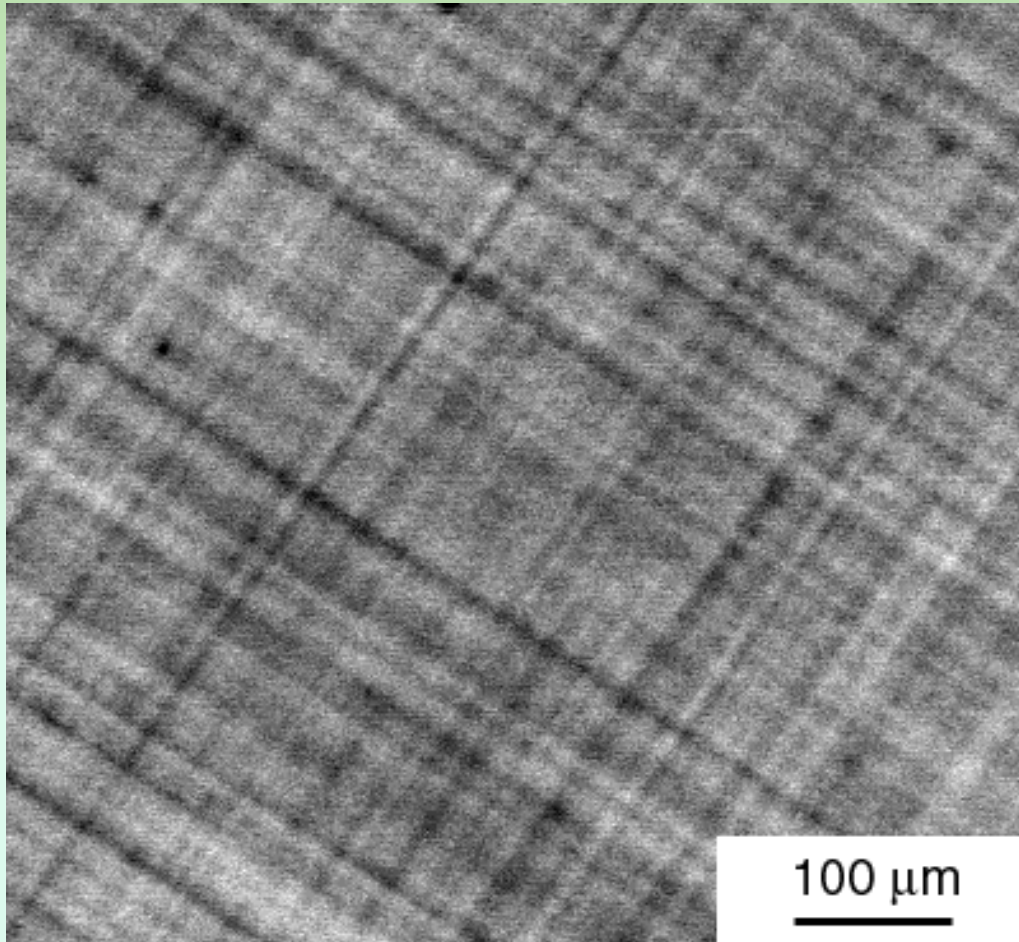
10 keV

20 keV

30 keV

$$C_{\max} = \frac{\gamma_d}{1 + \frac{\gamma_d}{2\pi D} \{ \ln[2(z_0 - W)/r_d] + 1/2 \}} \frac{\exp[-(z_0 - W)/L_b] \int_{-\infty}^{\infty} p_0(0, y, z_0) dy}{I_{c0}}$$

Контраст дислокаций в структуре SiGe/напряженный Si, $T = 80$ К, $E_b = 25$ кэВ

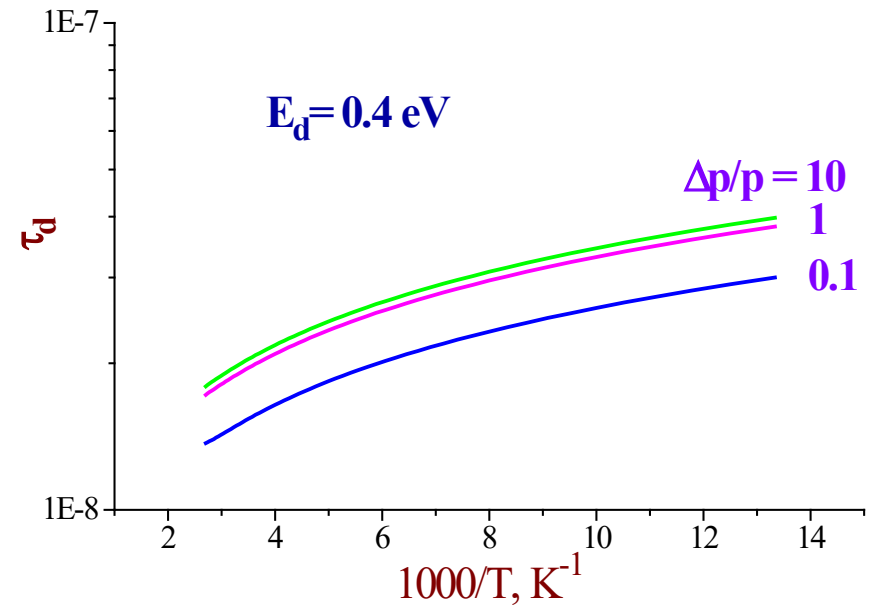
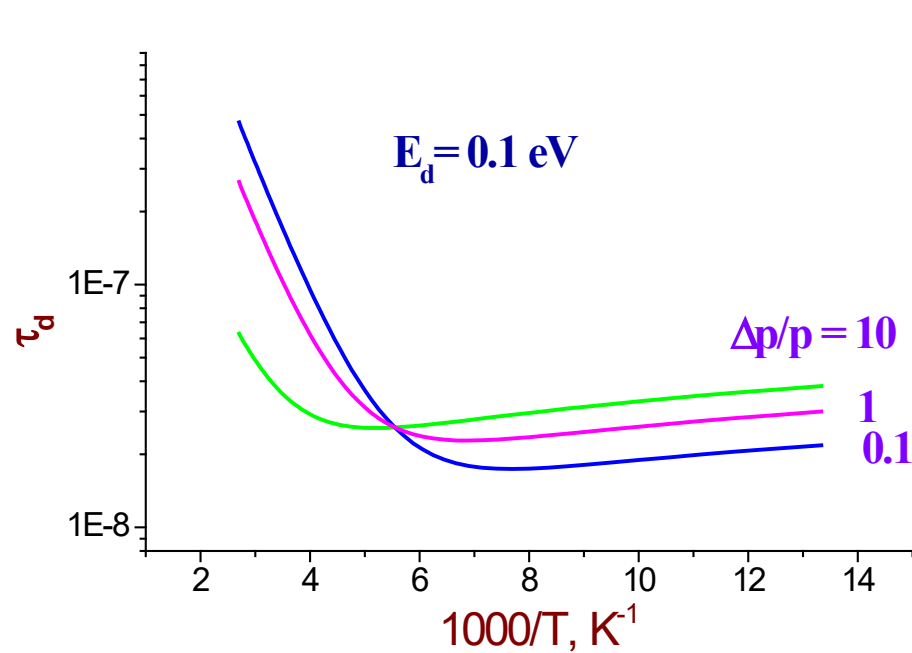


$$C = (I_c - I_T) / I_{cp}$$

При повышении T от 80 до 300 К контраст понижается в 3-4 раза.

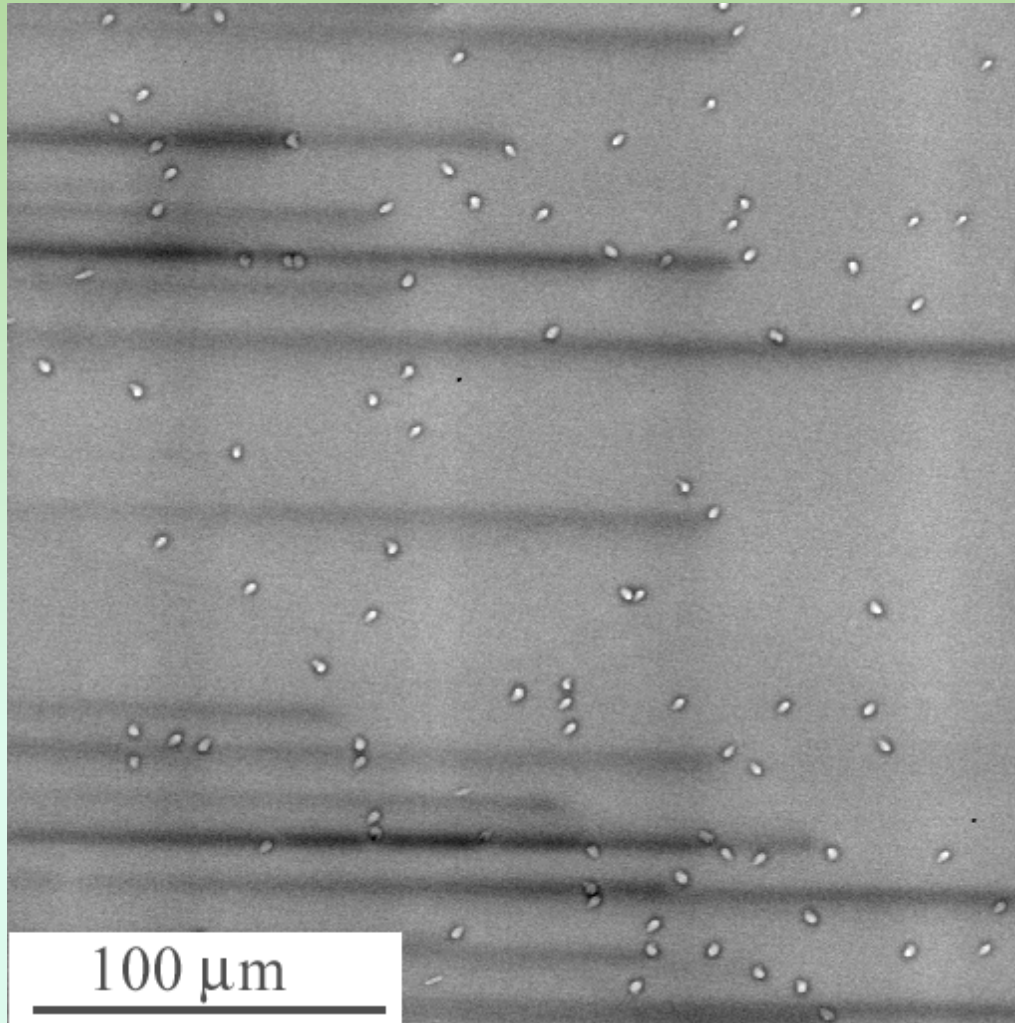
После отжига при 800°C контраст уменьшается примерно в 2 раза.

Температурная зависимость контраста



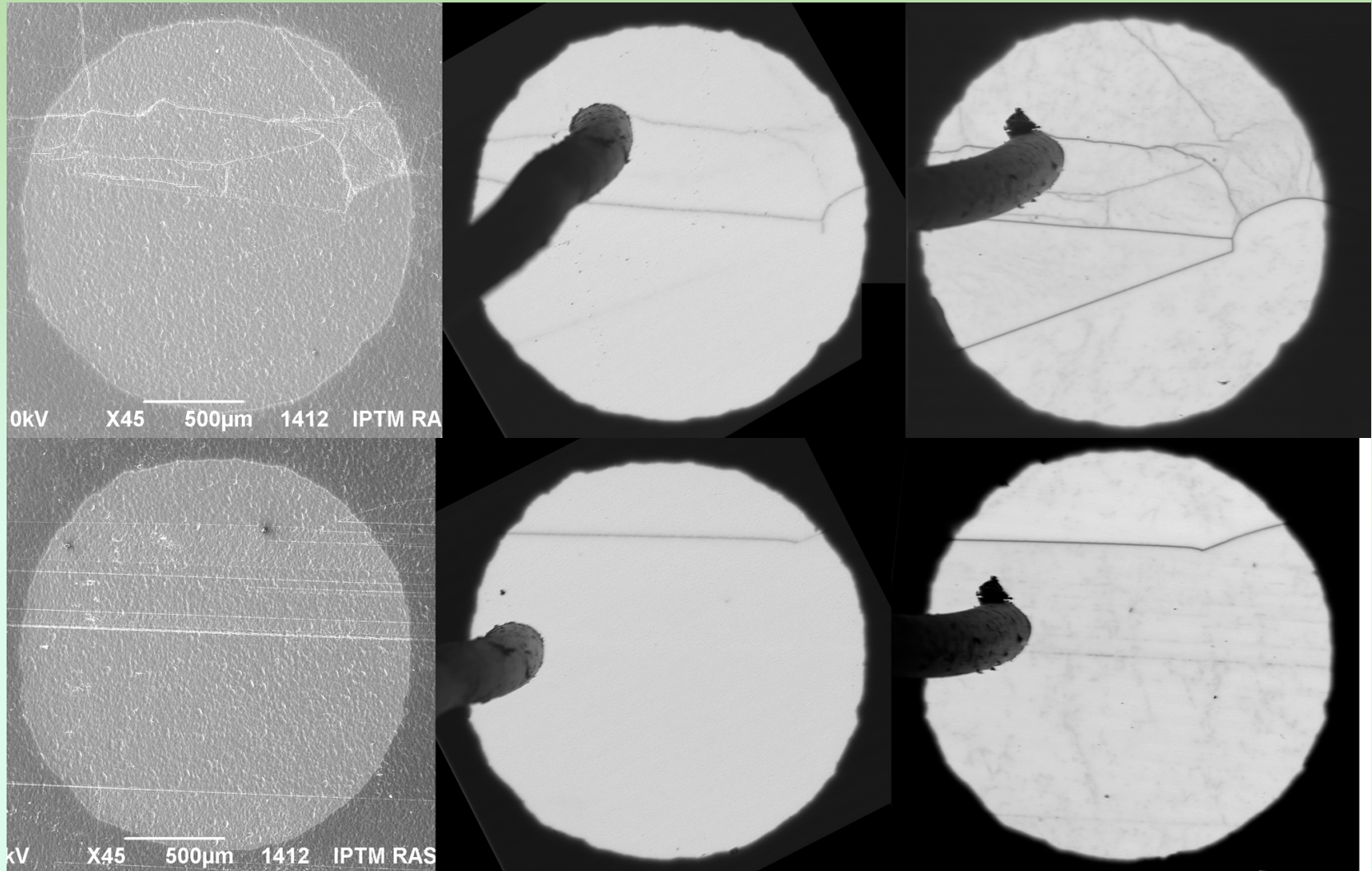
$$C \sim \gamma_d \sim 1/\tau$$

Топографический контраст в методе НТ

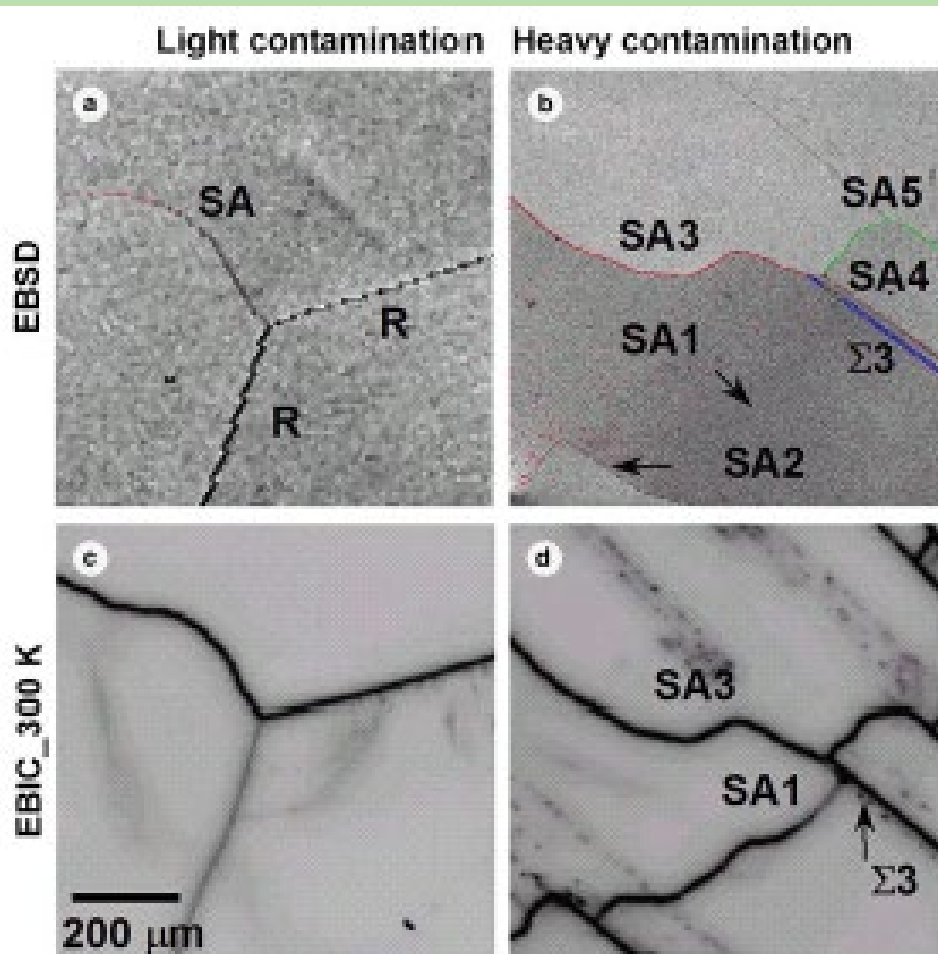


Неровности поверхности дают контраст из-за изменения поглощенной энергии

Электрическая активность границ зерен в мультикристаллическом Si (влияние диффузии Cu при 790°C)

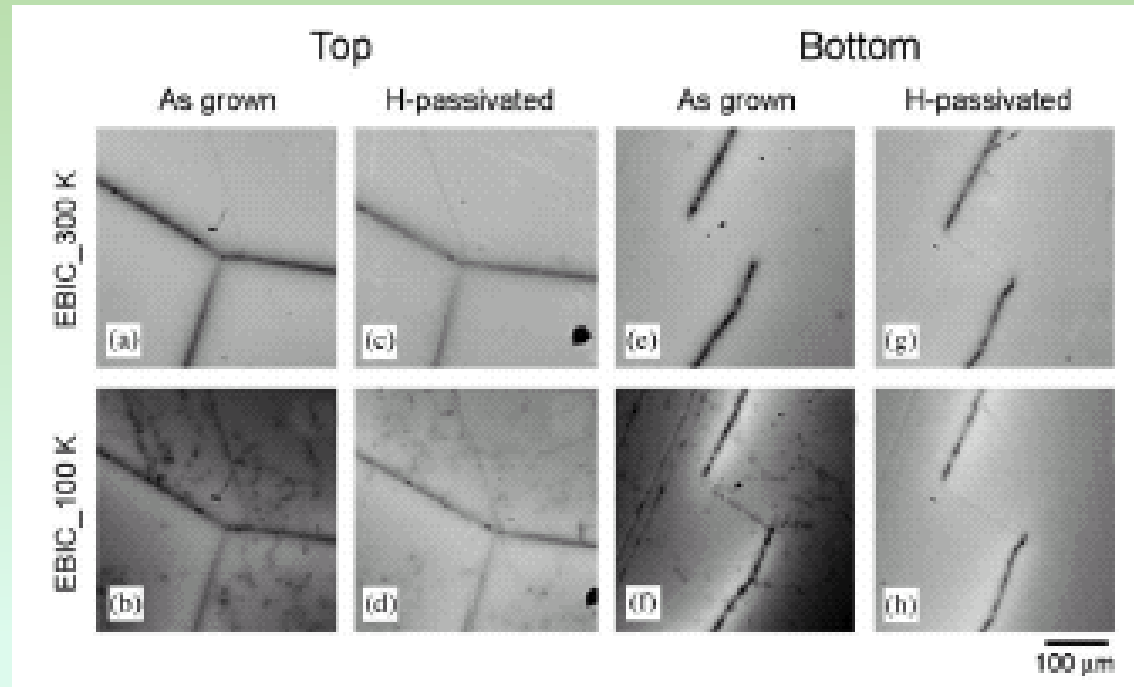
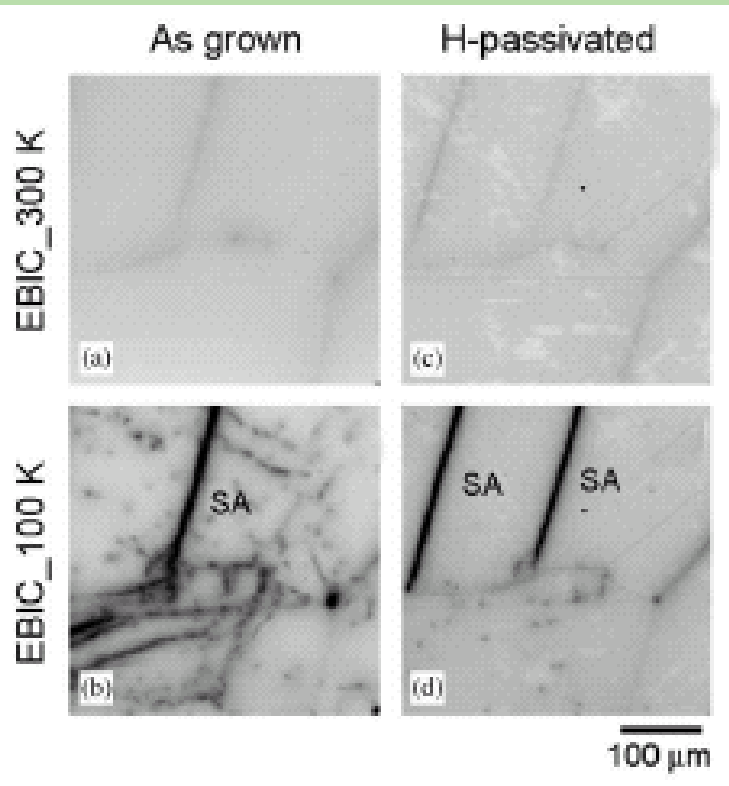


Электрическая активность границ зерен в мультикристаллическом Si (влияние загрязнения)



**Chen et al, Scripta Mater.,
52, 1211, 2005**

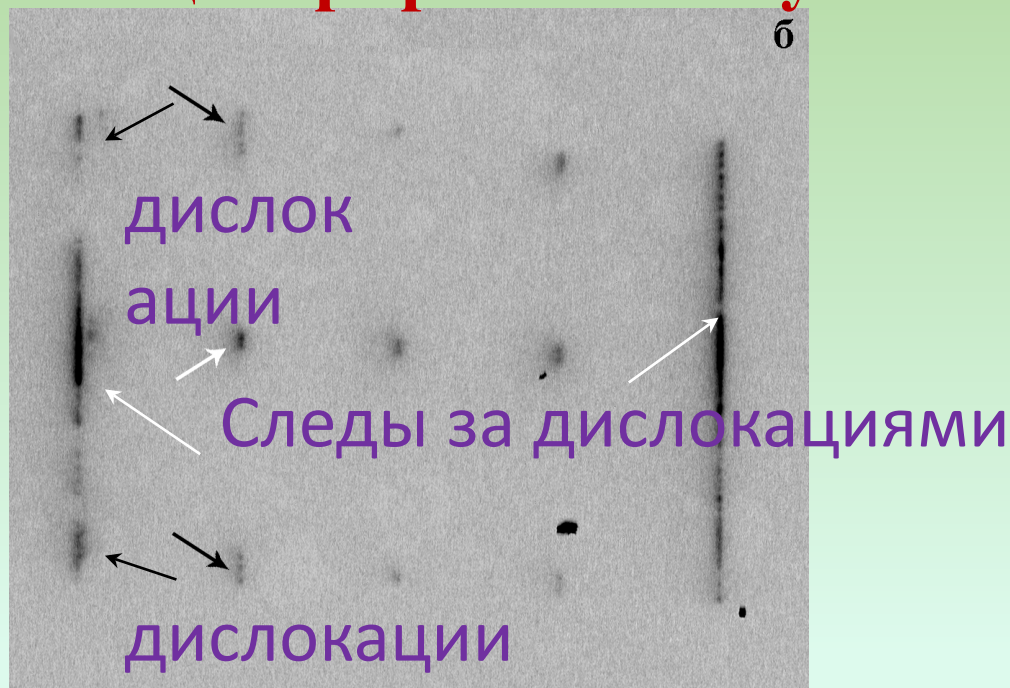
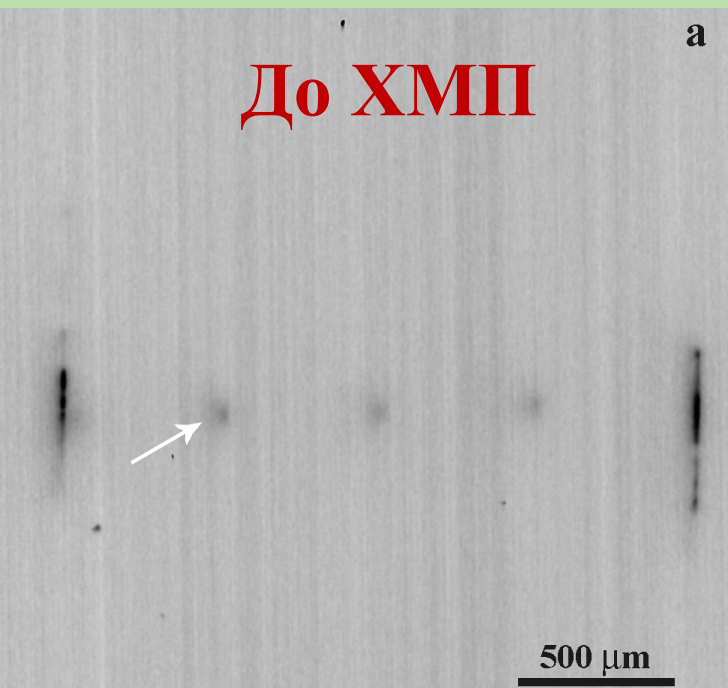
Электрическая активность границ зерен в мультикристаллическом Si (влияние H)



**Chen et al, Phys. B, 364,162,
2005**

Влияние ХМП на дефекты в Si (EBIC)

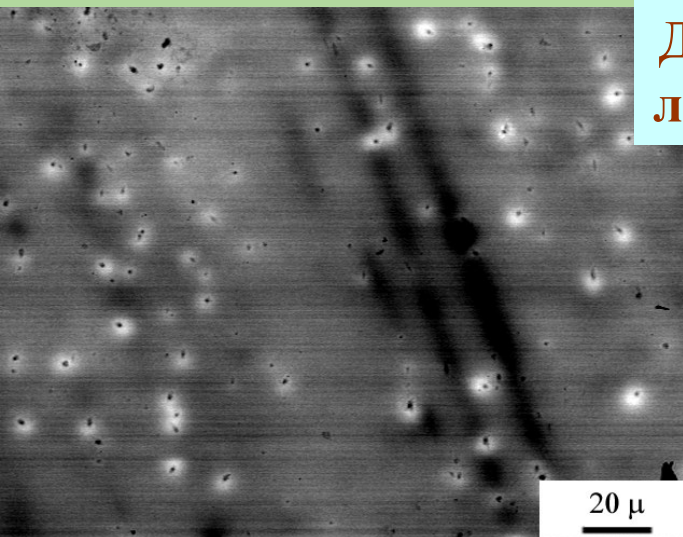
После ХМП в концентрированной суспензии



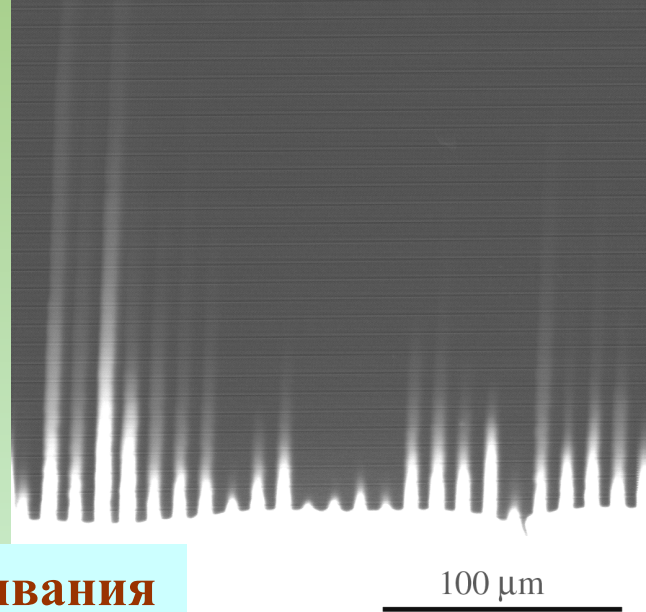
Введение Ni в процессе ХМП при комнатной T повышает рекомбинационную активность дефектов

Рекомбинационная активность дефектов позволяет оценить чистоту кристалла

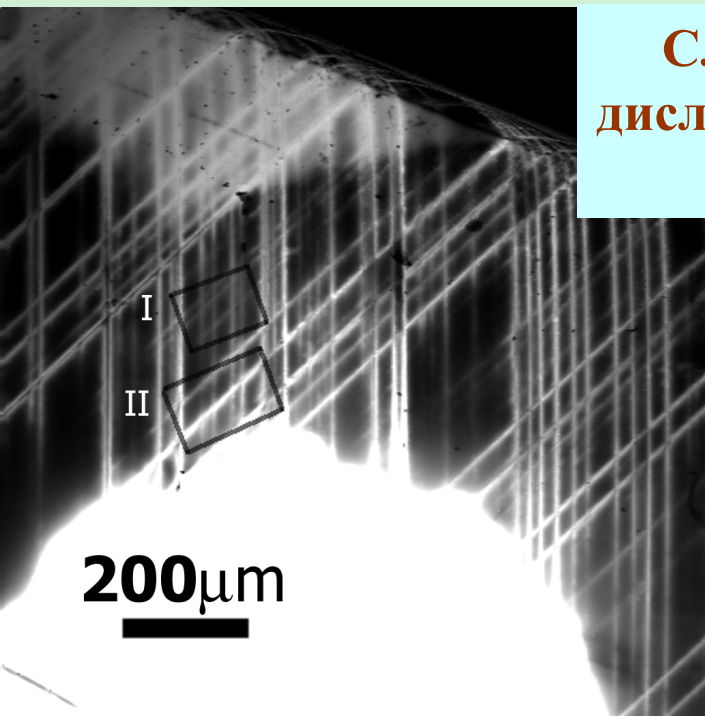
Светлый контраст



Дислокации в Si,
легированном Au

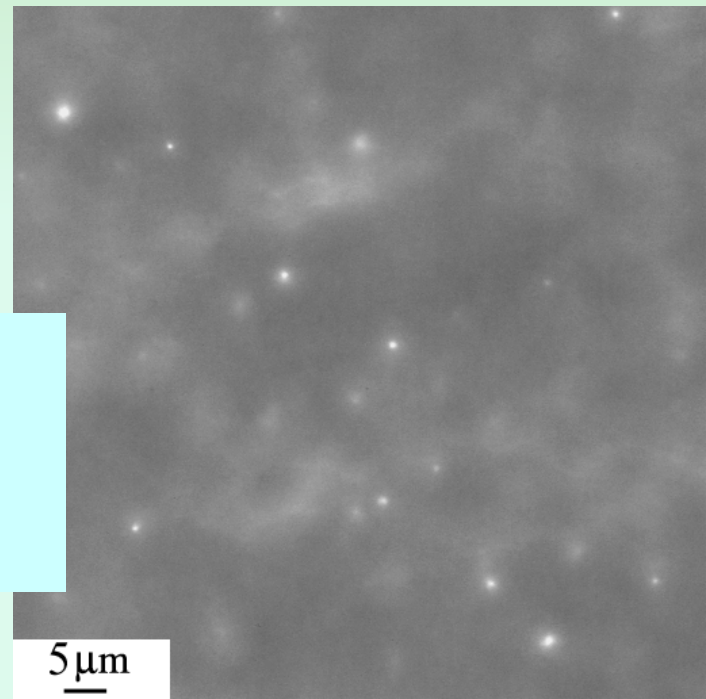


Границы сращивания
в ELOG GaN

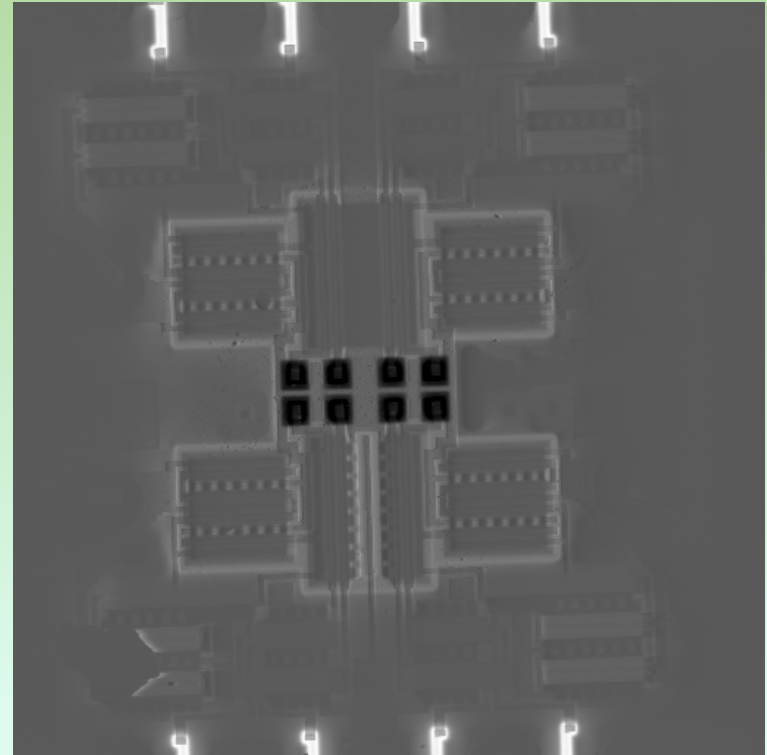
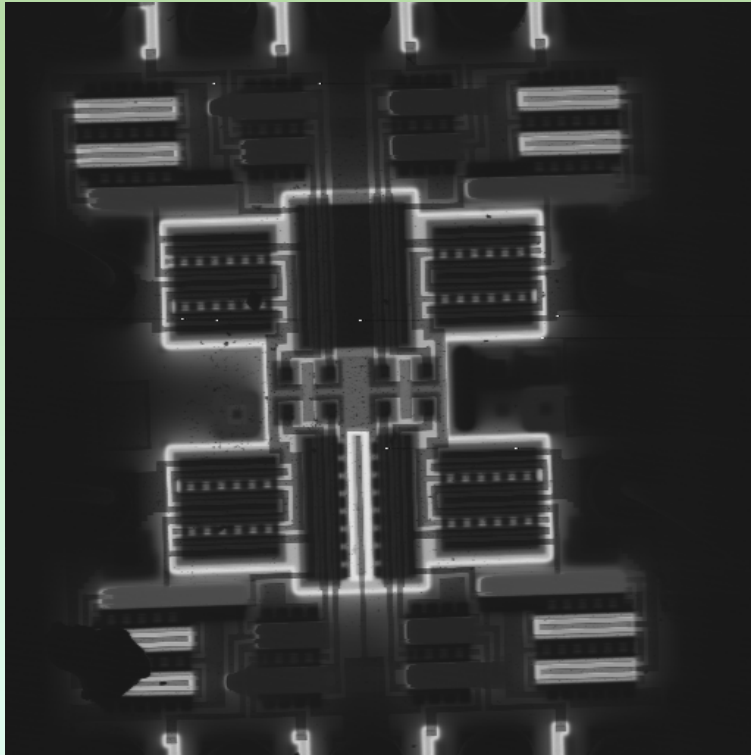


Следы за
дислокациями
в n-Si

V-дефекты в
структурах с
МКЯ
GaN/InGaN

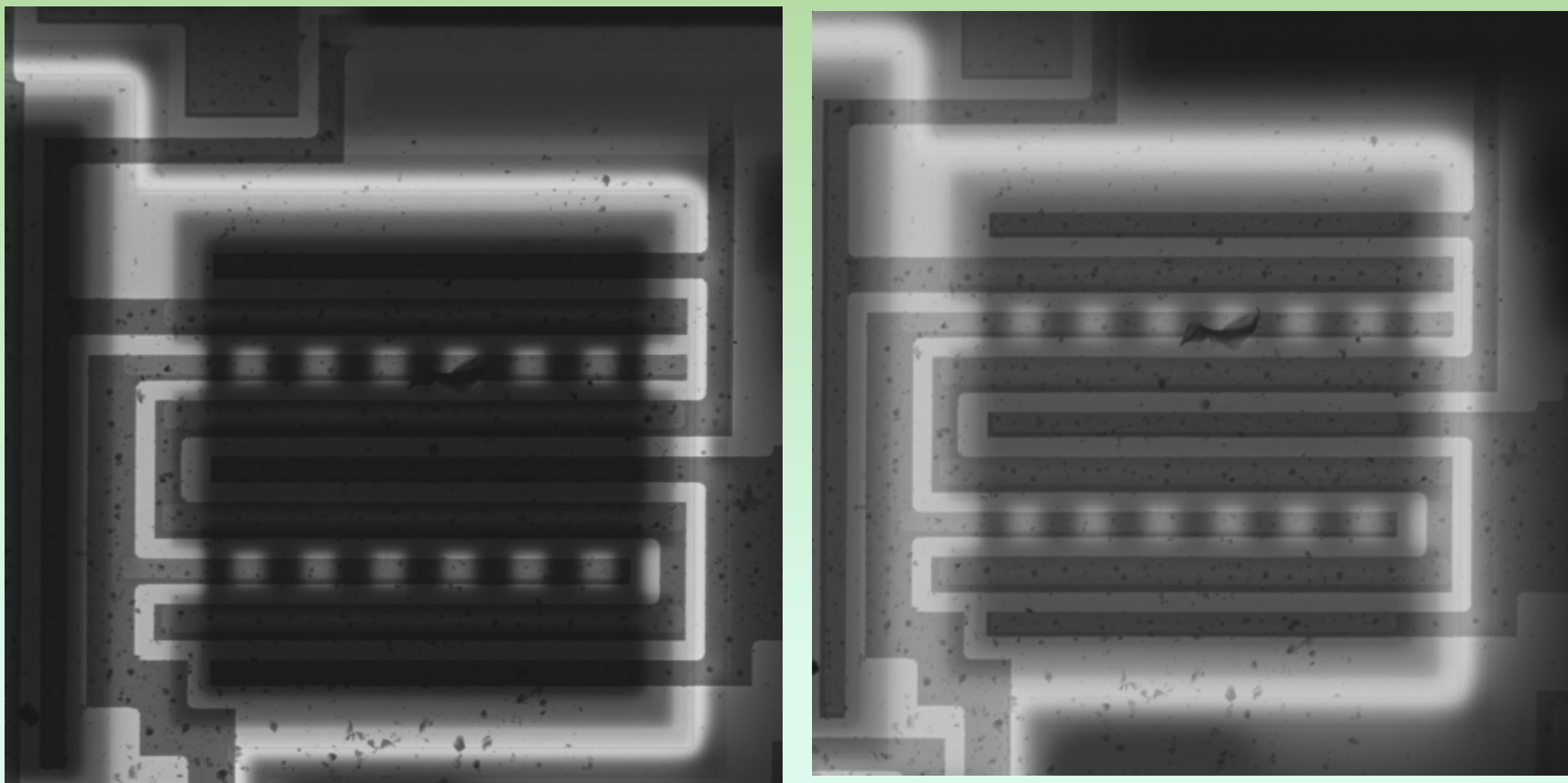


Диагностика полупроводниковых приборов и структур



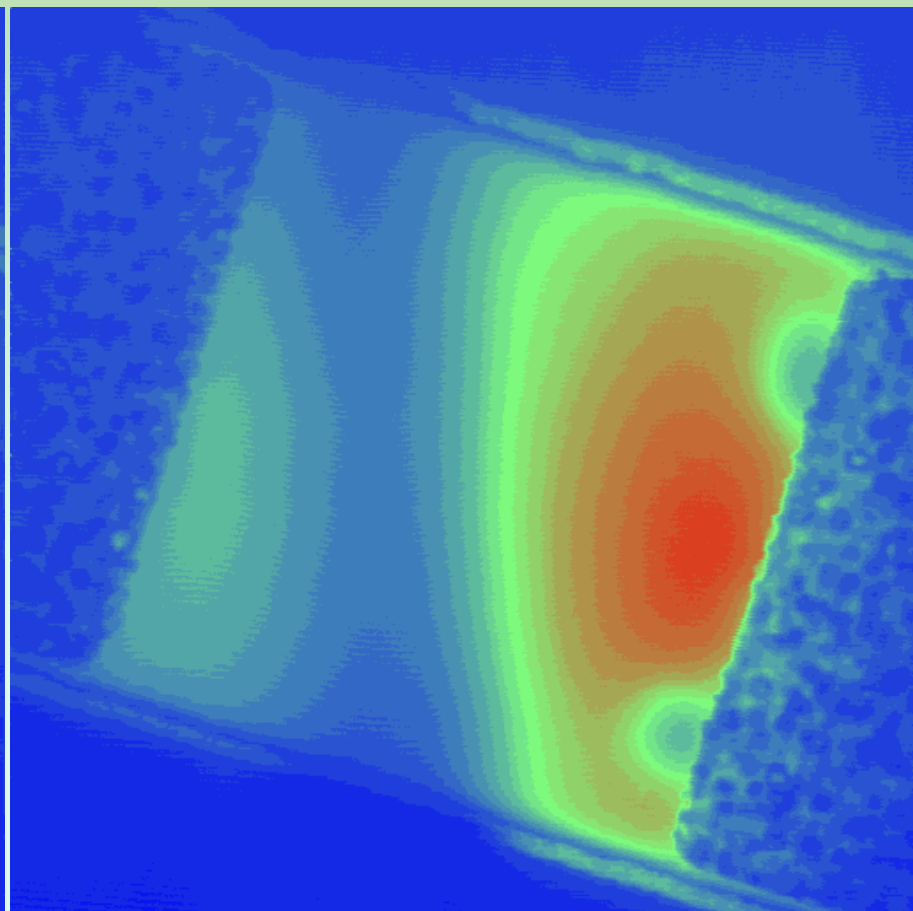
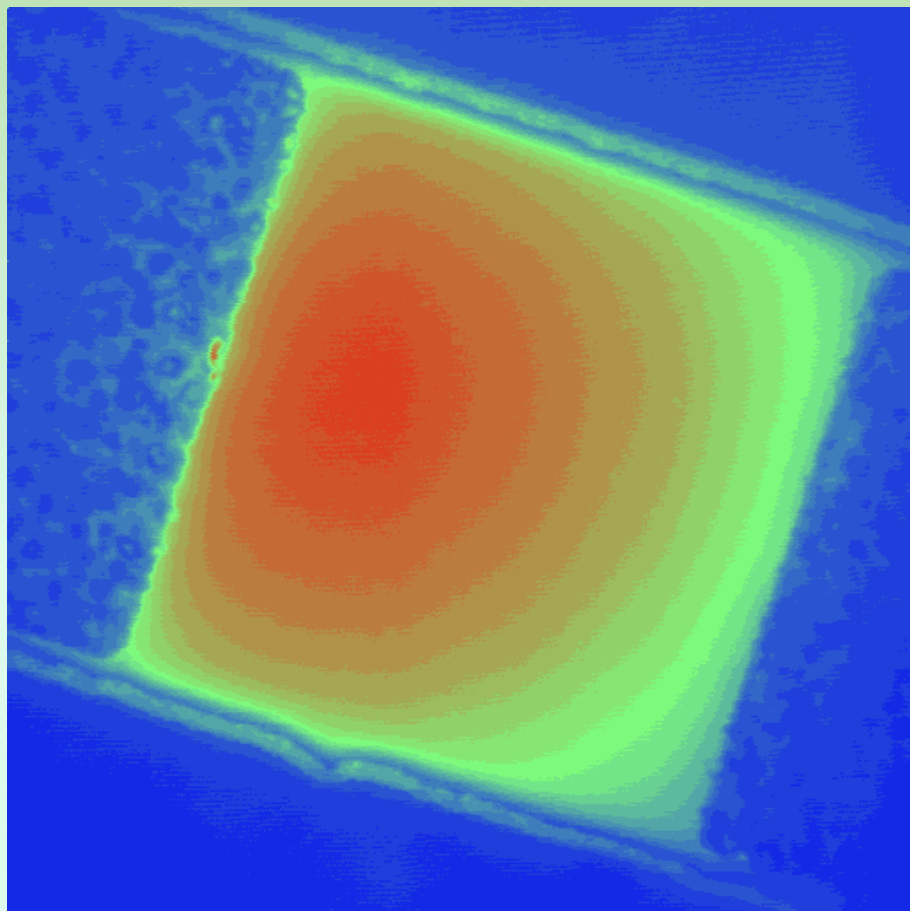
Изображения фрагмента микросхемы в режиме НТ при разных комбинациях напряжения, 25 кэВ.
Размер изображения 1200×1200 мкм².

Диагностика полупроводниковых приборов и структур

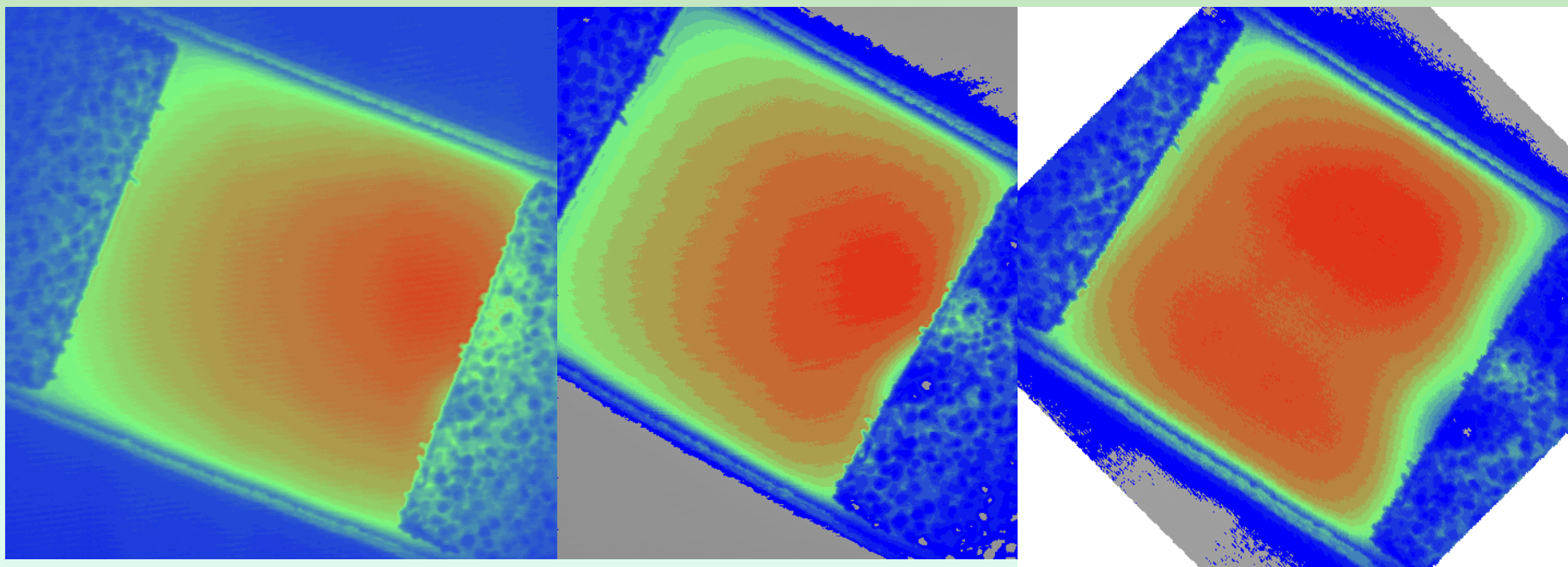


Изображения фрагмента микросхемы в режиме НТ при 25 (лев.) и 35 кэВ (прав.). Размер изображения 280×280 мкм².

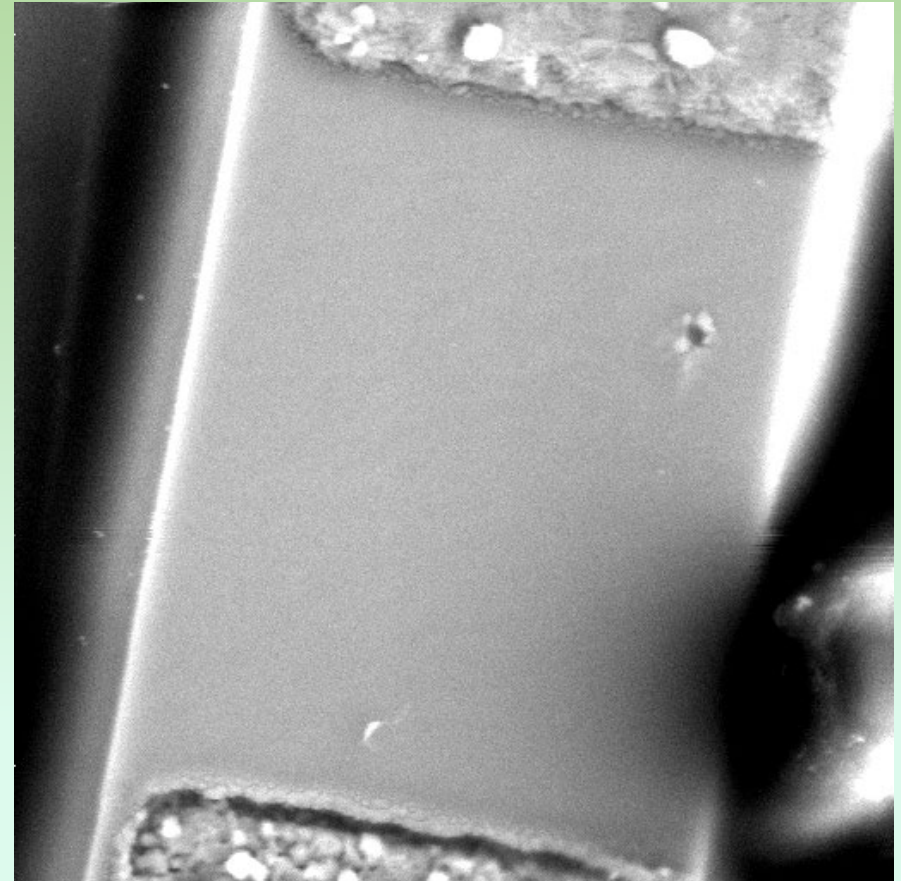
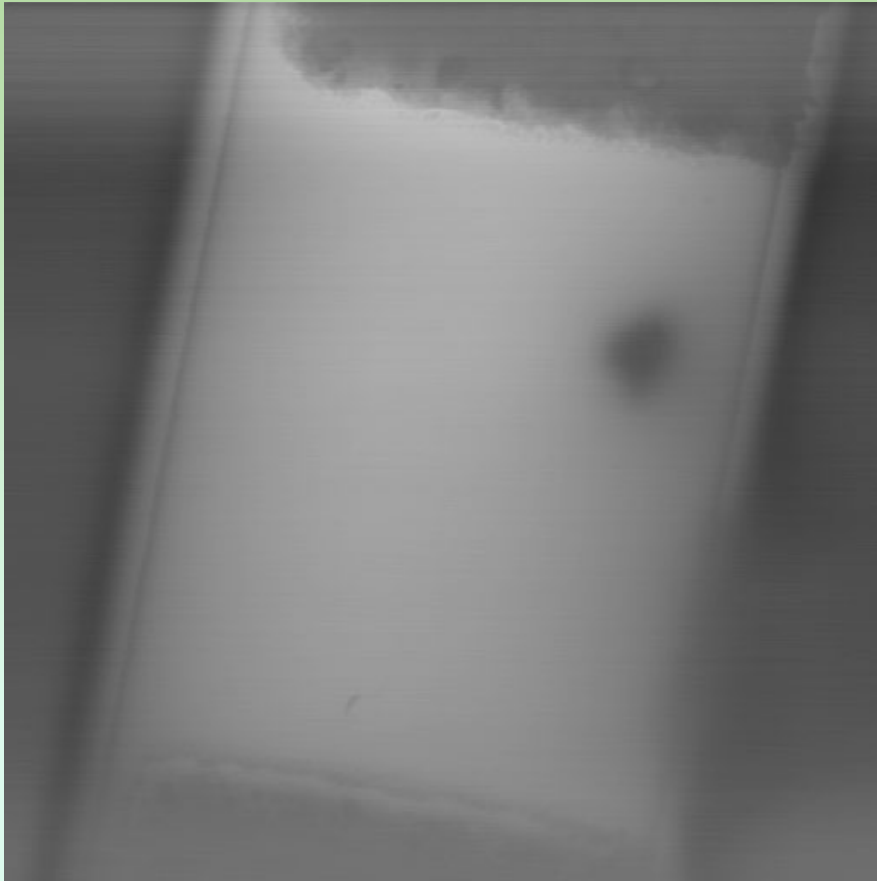
Анализ отказов $\text{Hg}_{0.8}\text{Cd}_{0.2}\text{Te}$ фоторезисторов



Деградация $\text{Hg}_{0.8}\text{Cd}_{0.2}\text{Te}$ фоторезистора при 60°C отжиге



Влияние дефектов поверхности на локальную чувствительность ФЧЭ



Изображение ФЧЭ в режимах НТ и вторичных электронов. Размер изображения 70x70 мкм².