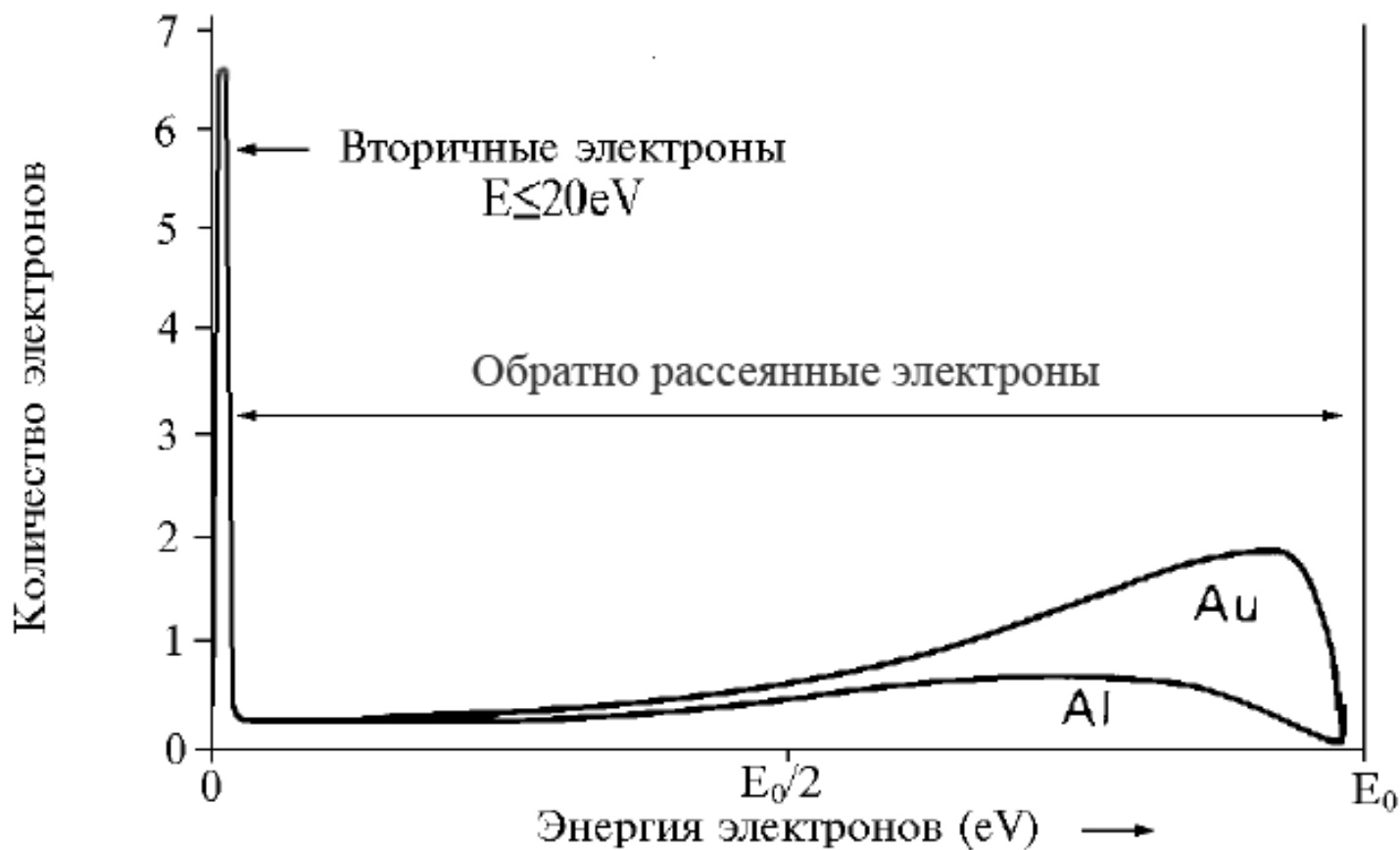


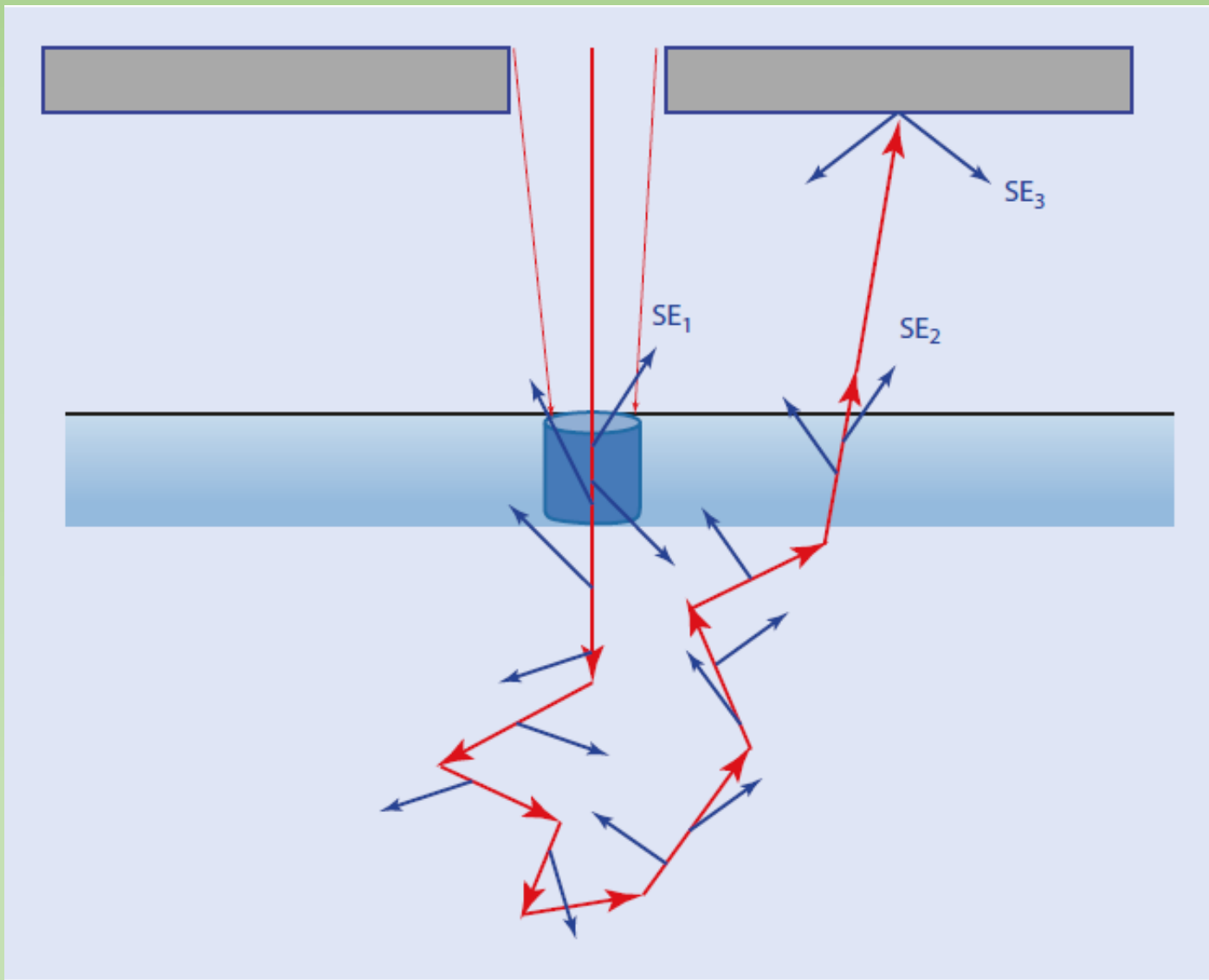
РЕЖИМЫ ВТОРИЧНЫХ И ОБРАТНО ОТРАЖЕННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ

Спектр эмитированных электронов

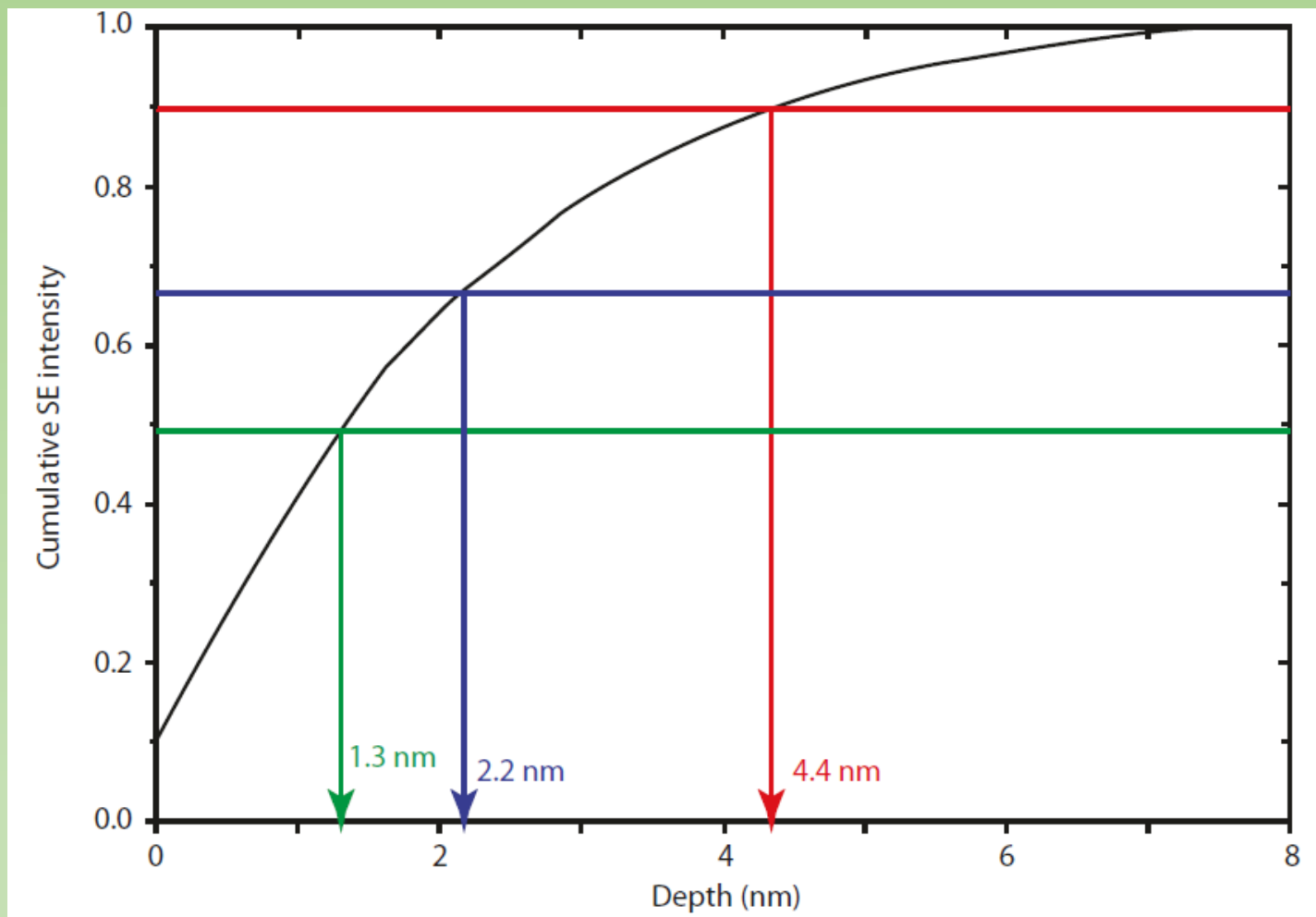


Режим вторичных электронов

Режим вторичных электронов

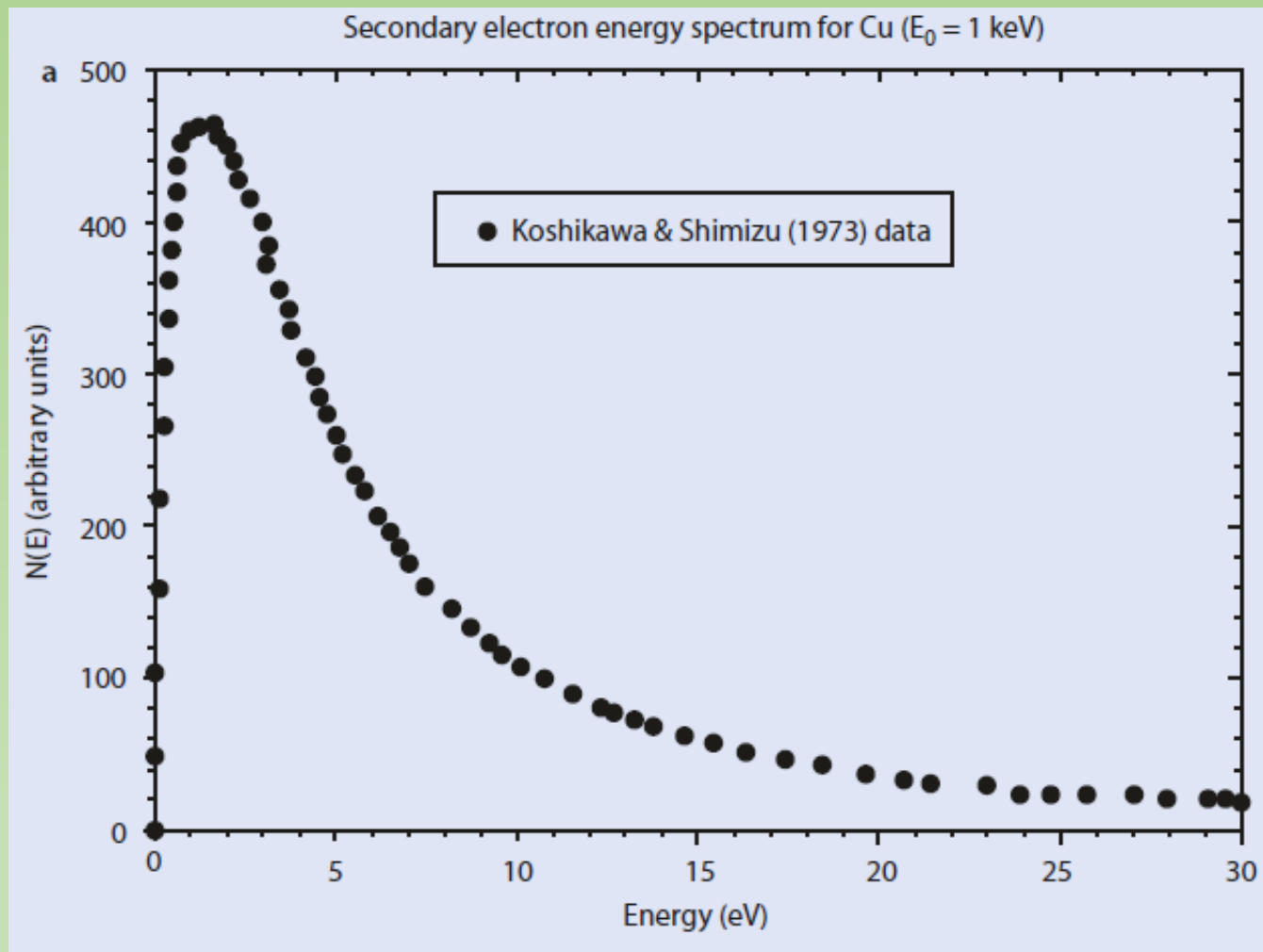


Глубина эмиссии вторичных электронов, рассчитанная для Cu

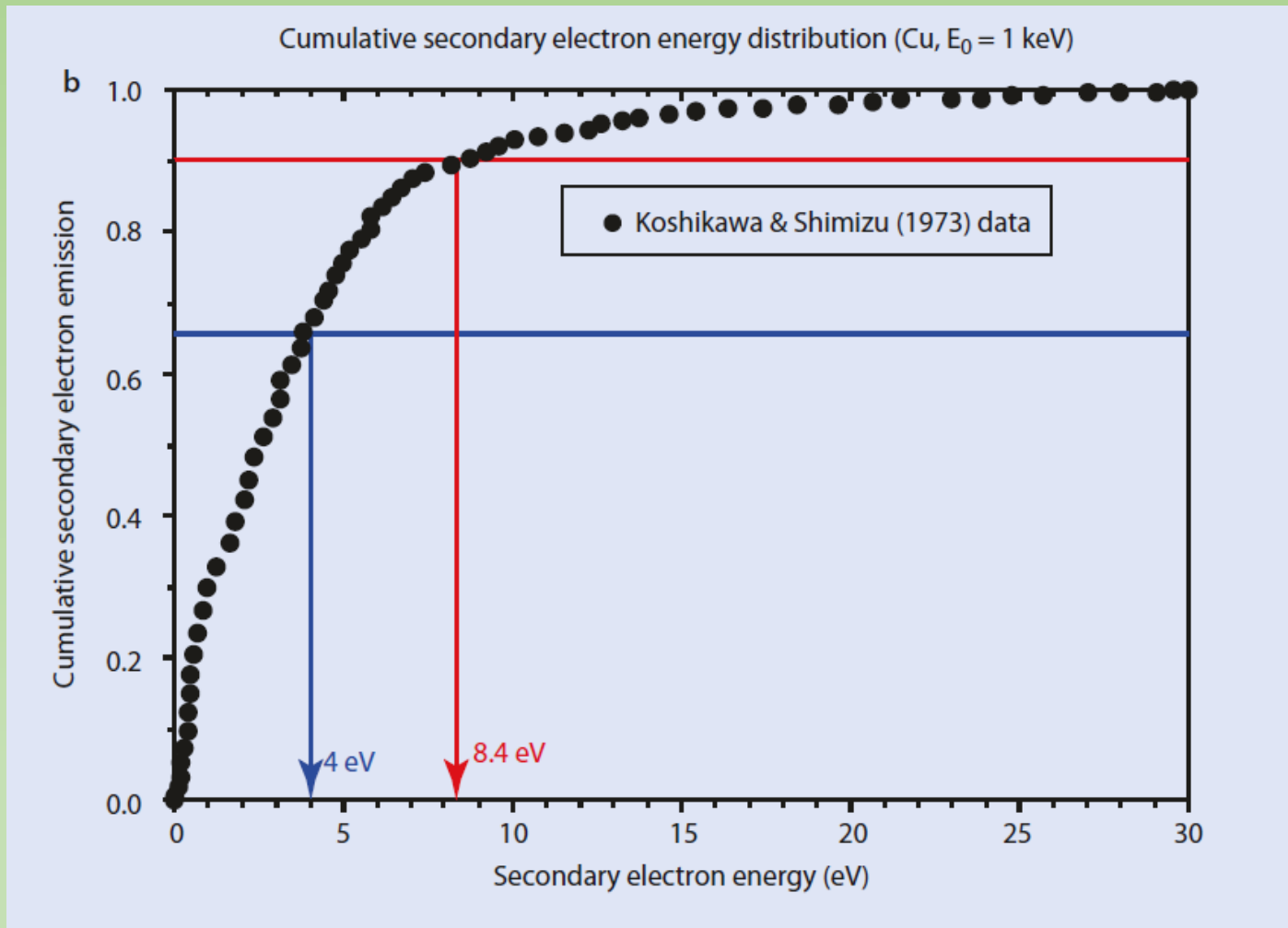


$\sim \exp(-z/\lambda)$, $\lambda \sim 1$ nm для металлов и 10 nm для диэлектриков

Спектр вторичных электронов

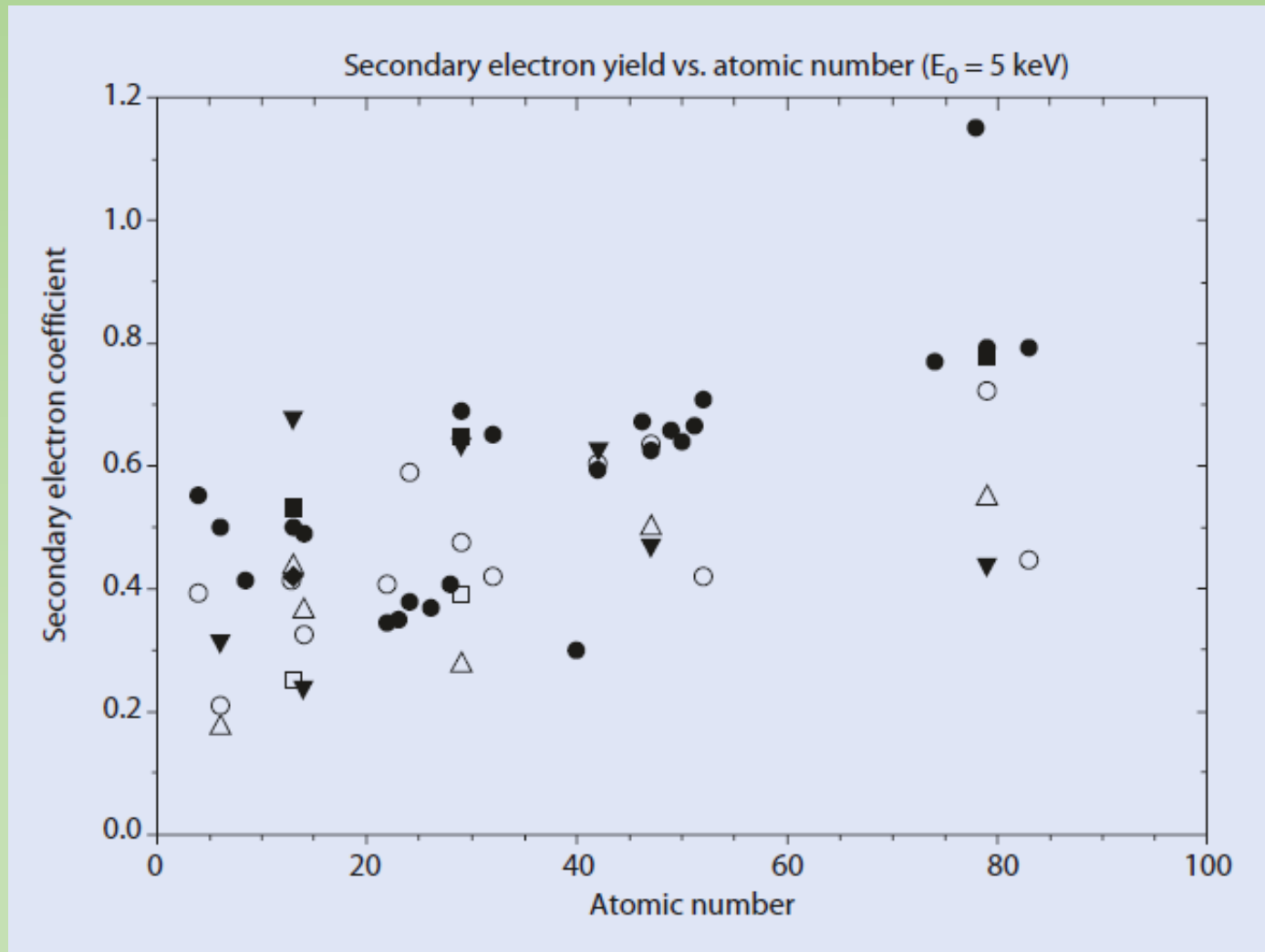


Спектр вторичных электронов

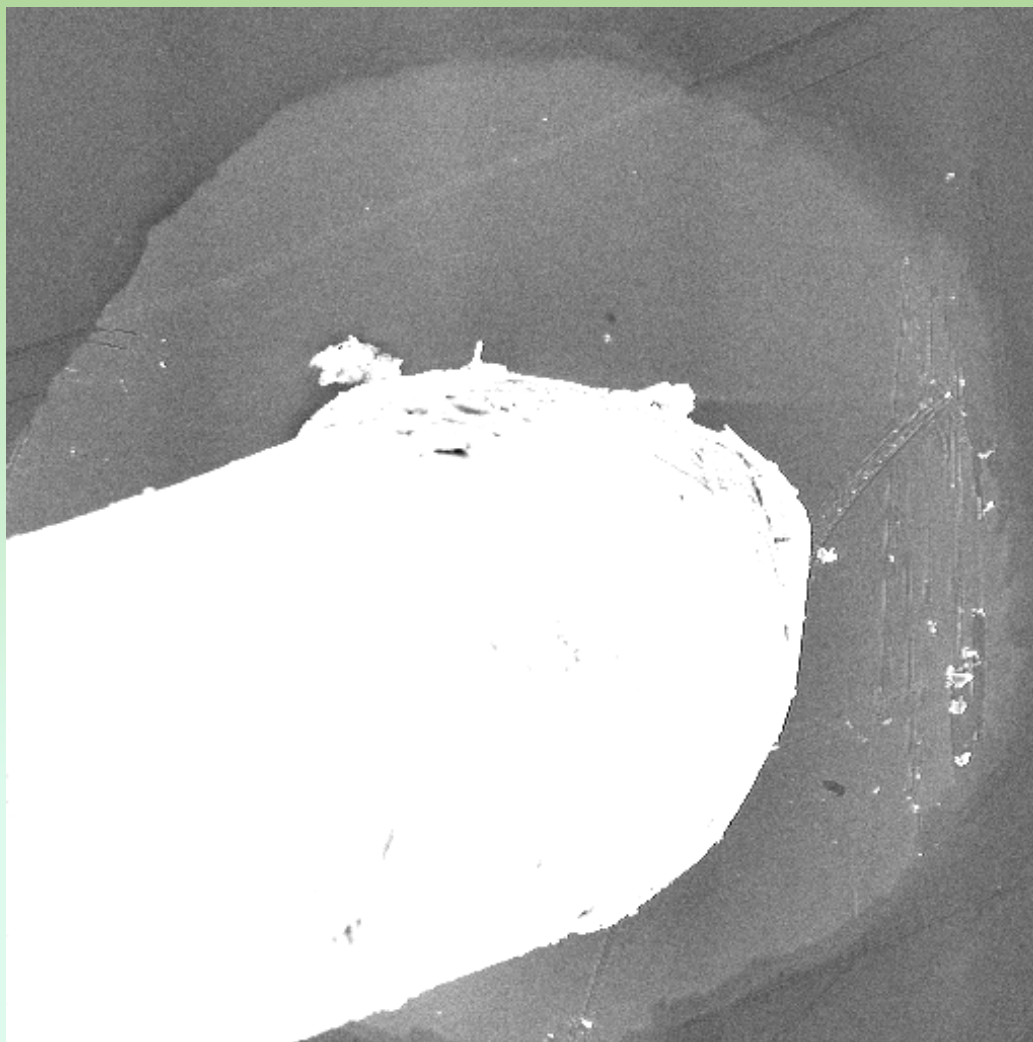


90% электронов имеют энергию меньше 8.4 эВ

Коэффициент эмиссии вторичных электронов

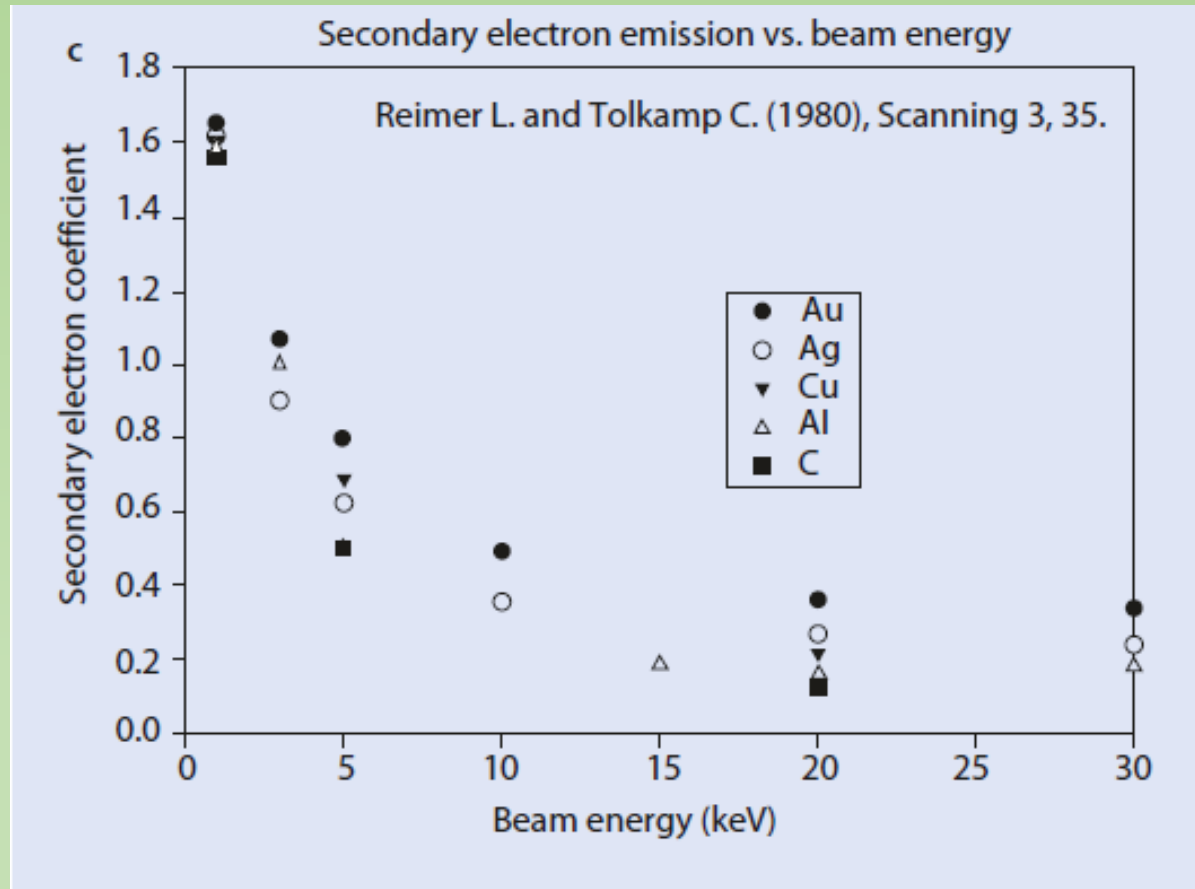


Режим вторичных электронов

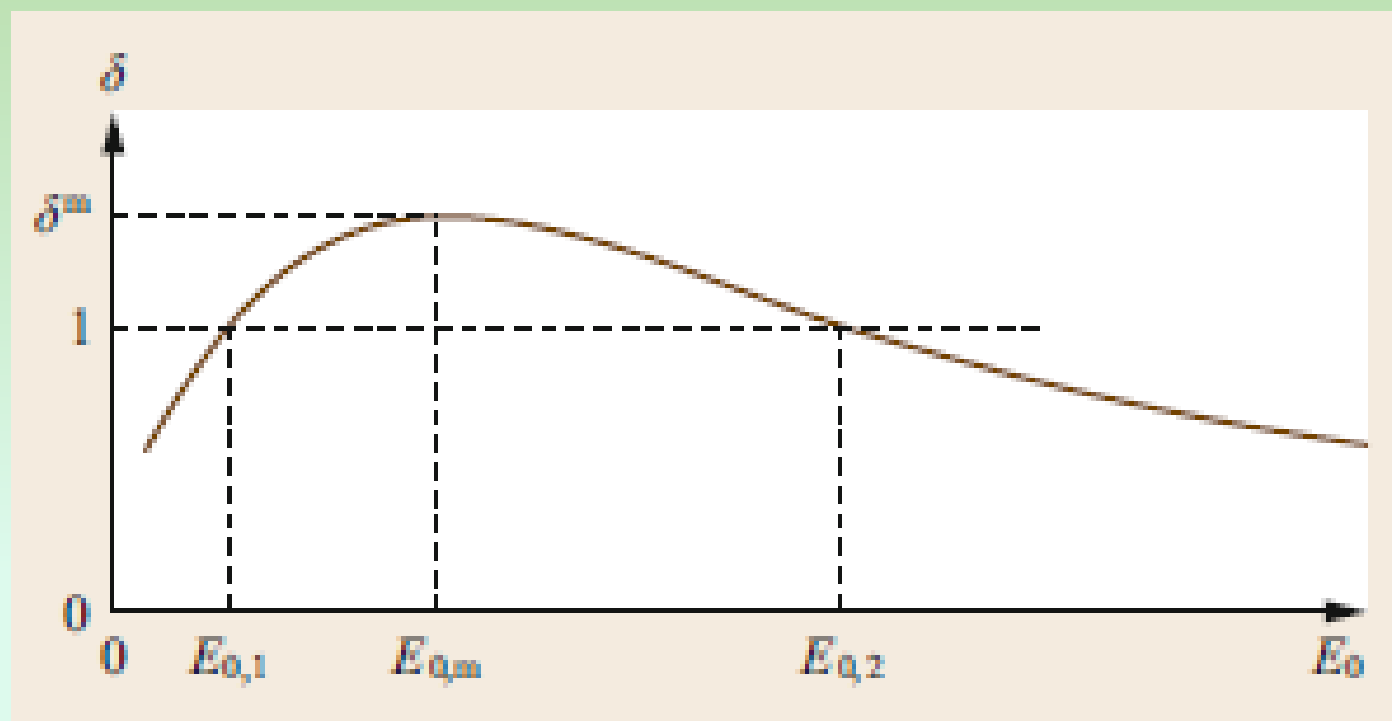


Аи барьер Шоттки на GaAs

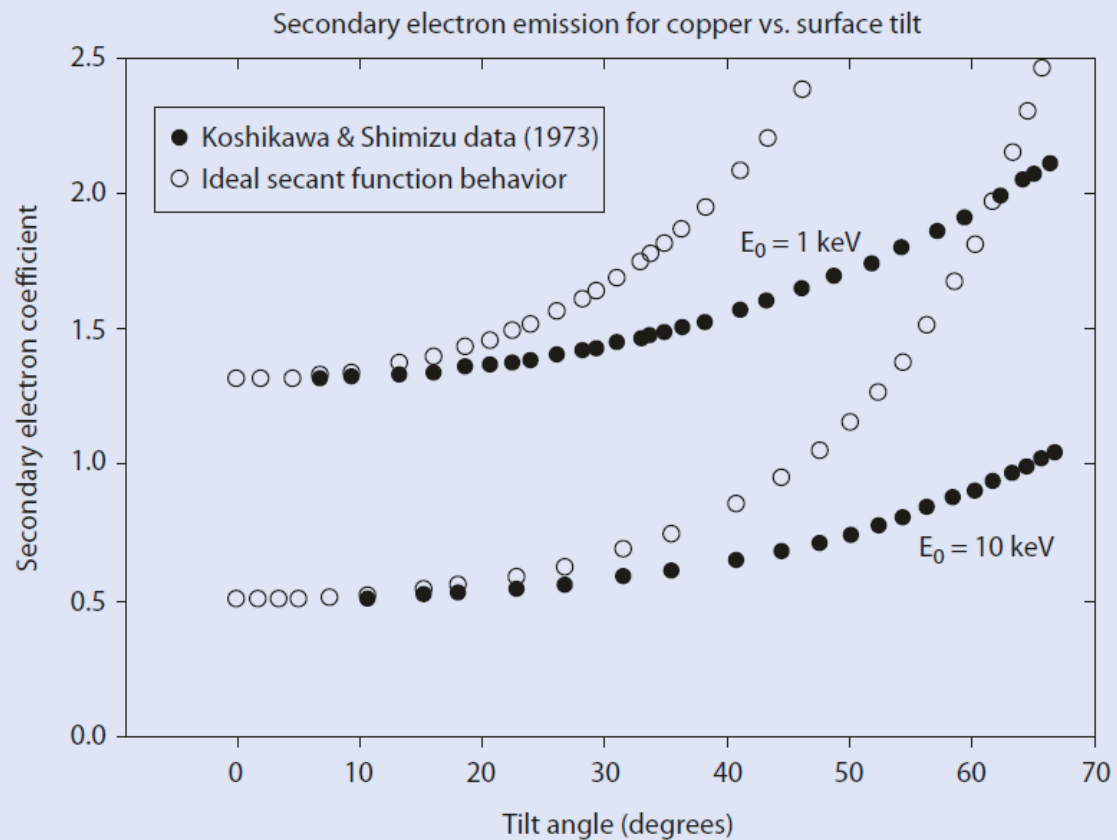
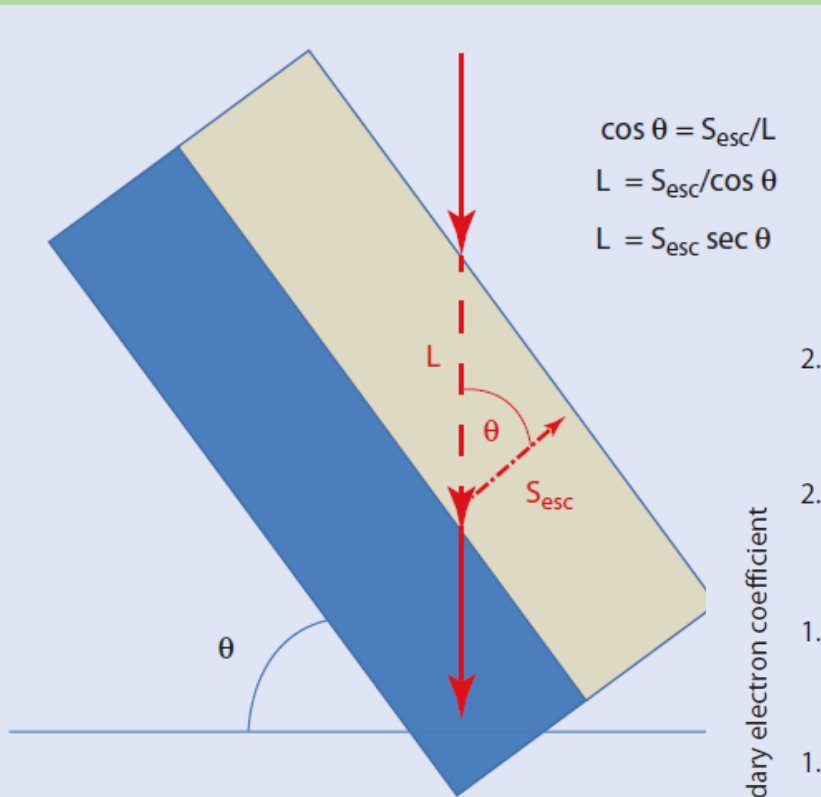
Коэффициент эмиссии вторичных электронов



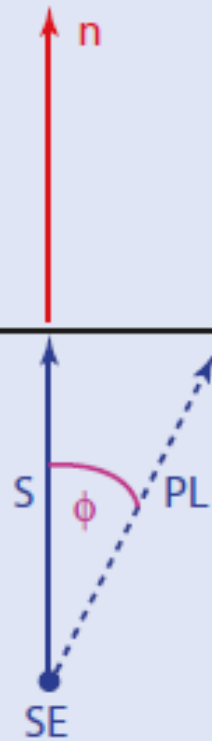
Зависимость от энергии пучка



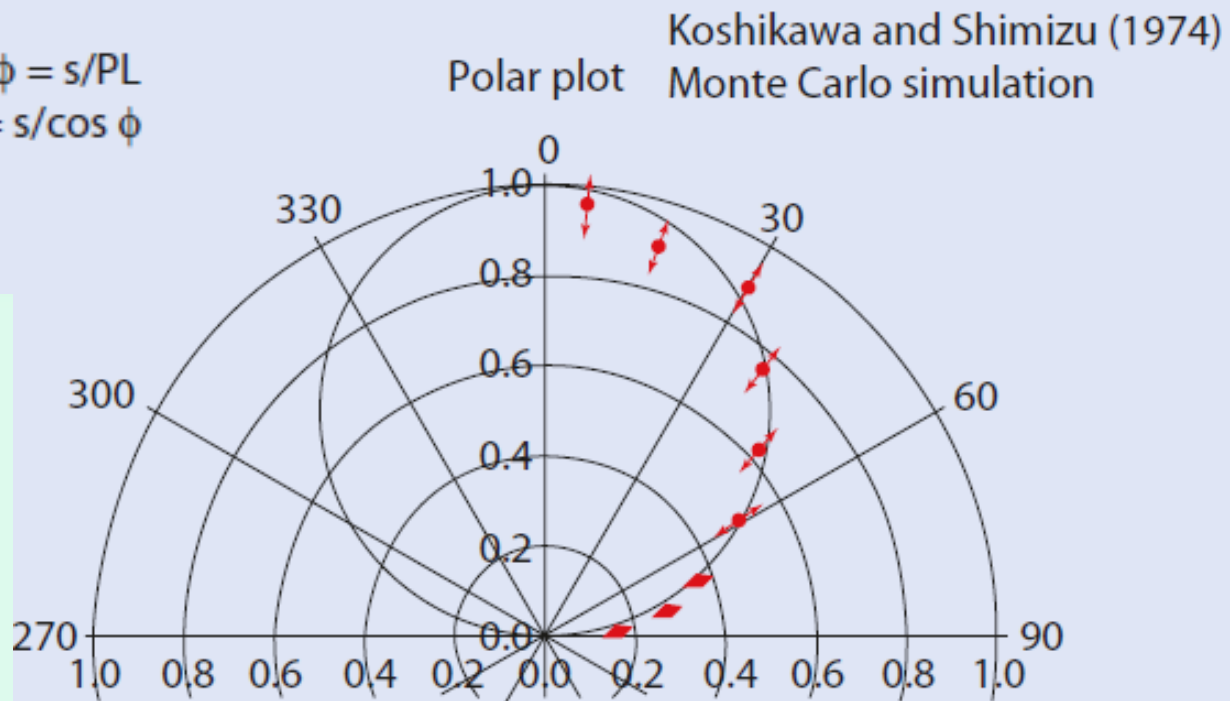
Зависимость от наклона



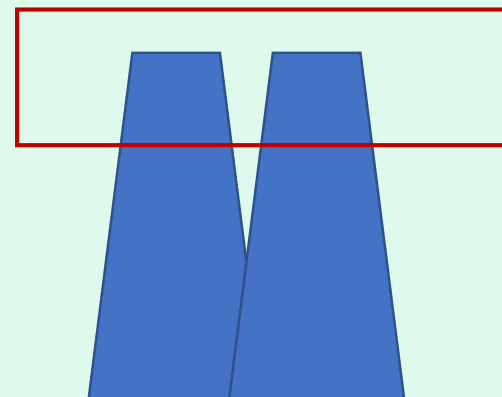
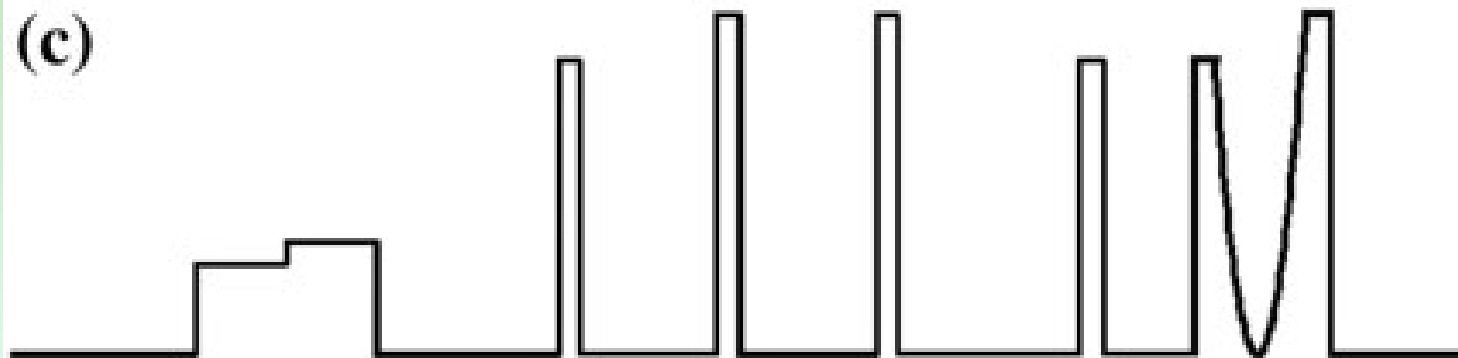
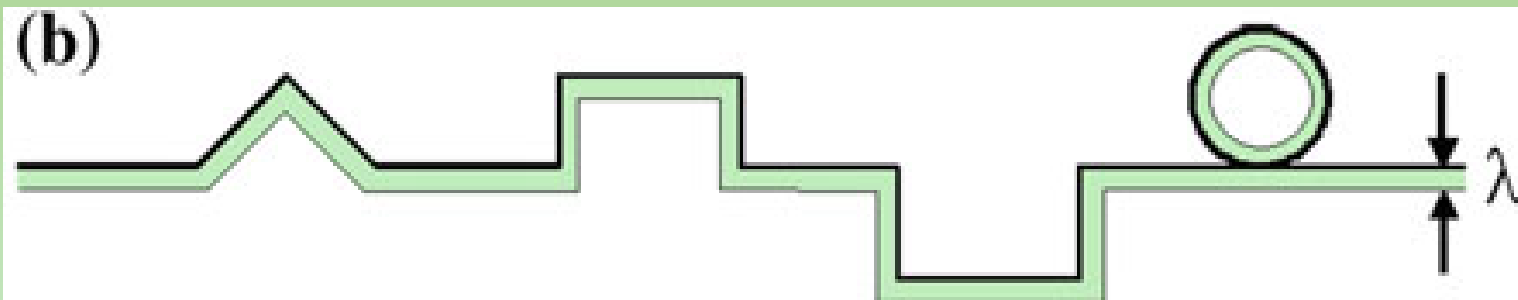
Зависимость от угла вылета



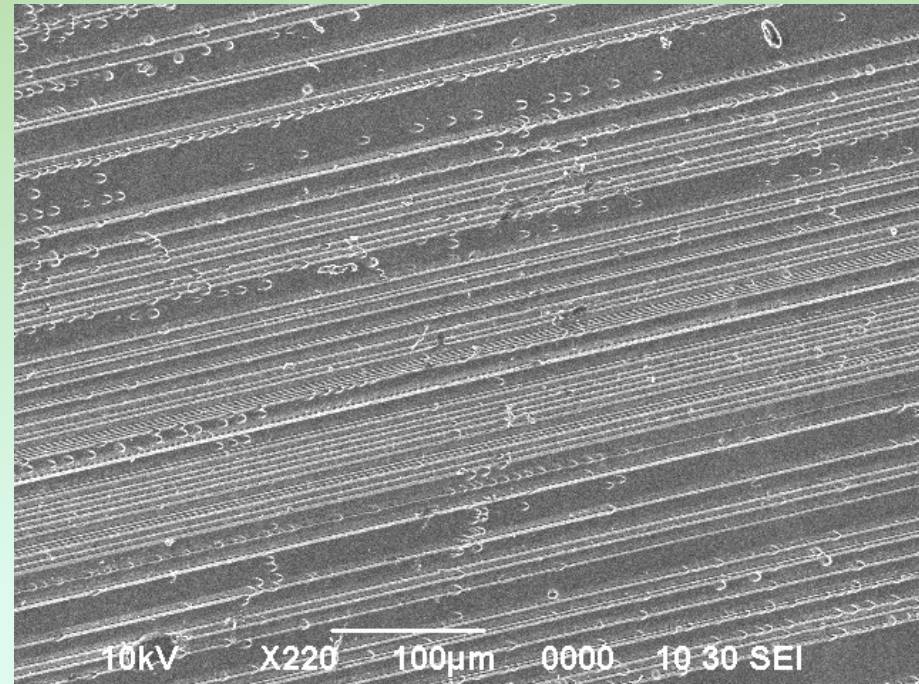
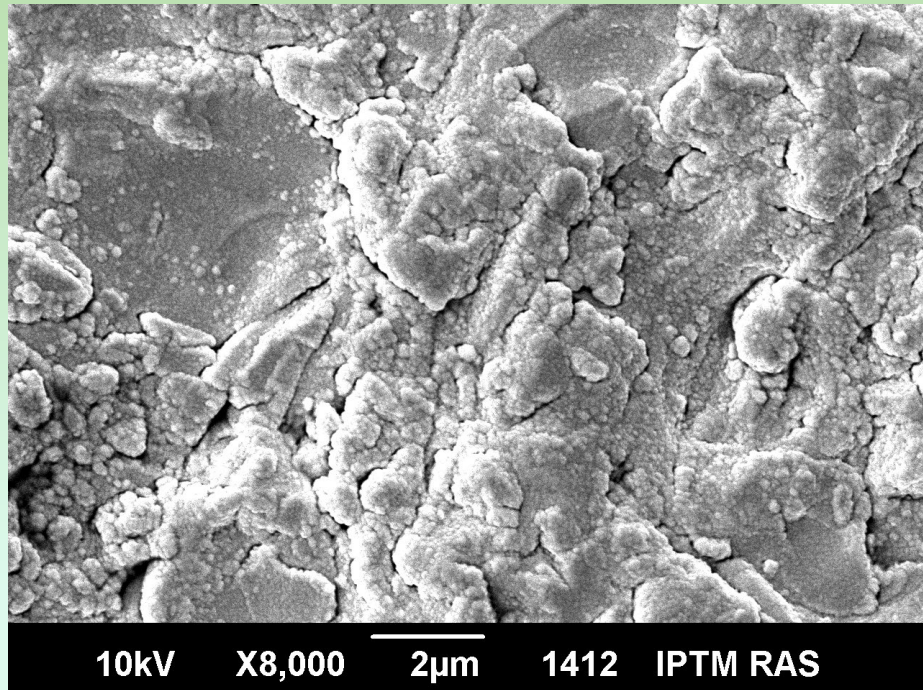
$$\cos \phi = s/PL$$
$$PL = s/\cos \phi$$



Интерпретация изображения

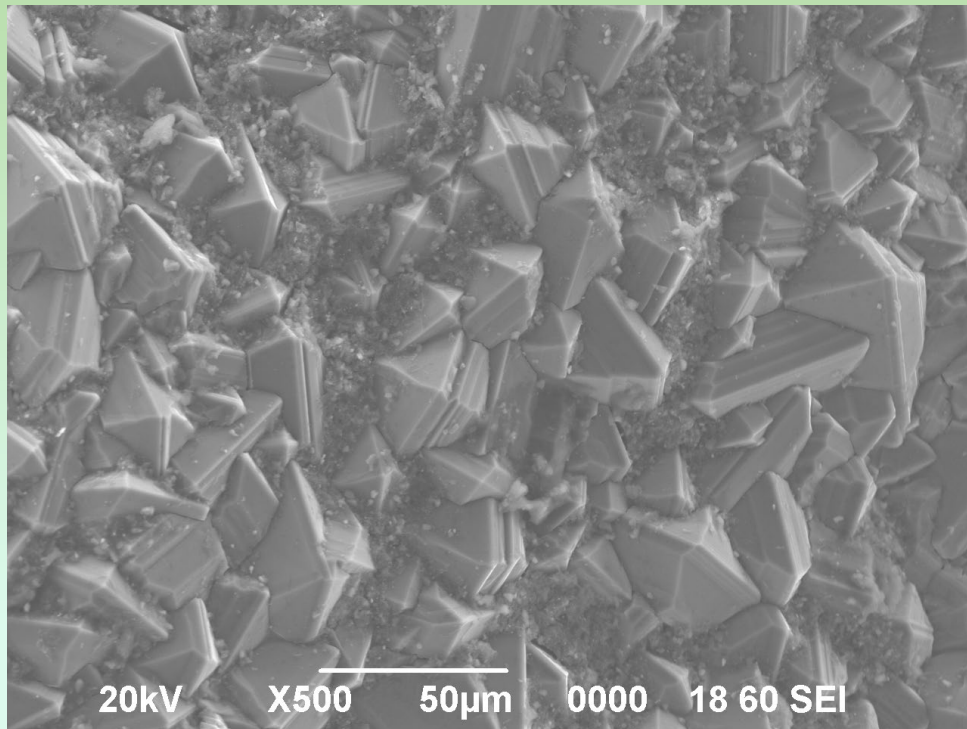


Режим вторичных электронов

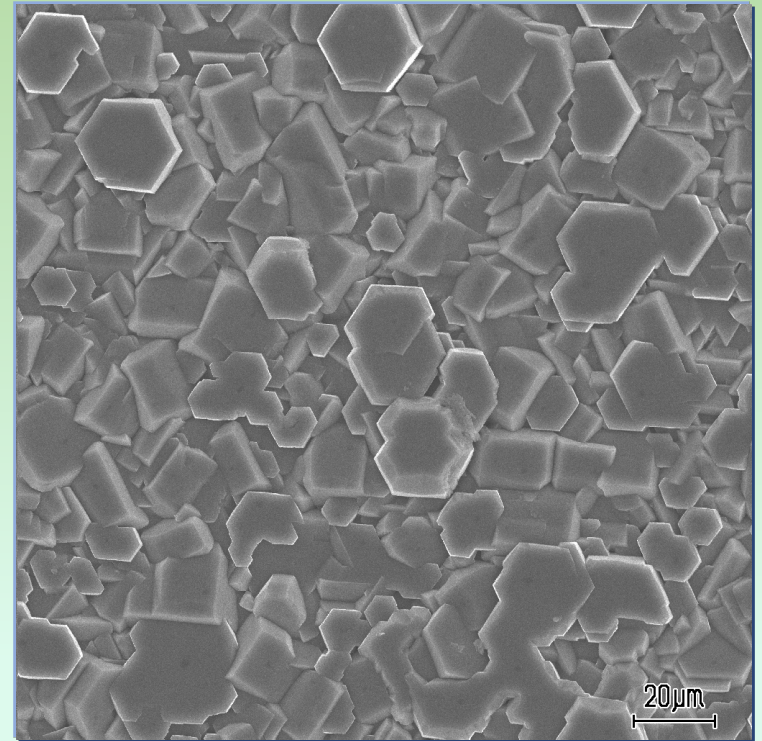


Поверхность поликремния

Режим вторичных электронов

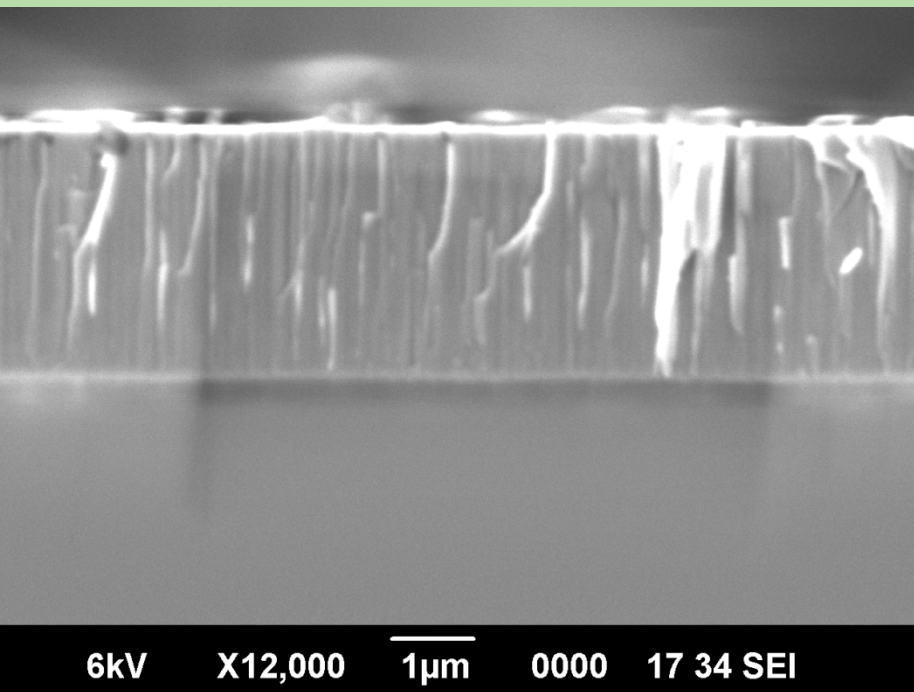


Микrokристаллический SiC

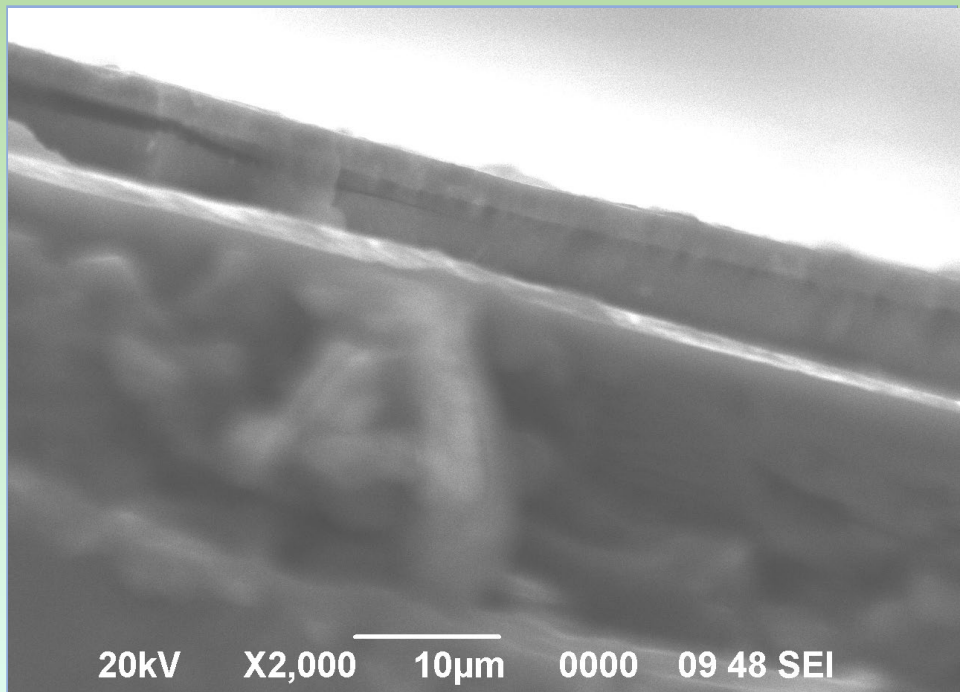


α -Ga₂O₃
Орторомбический

Режим вторичных электронов

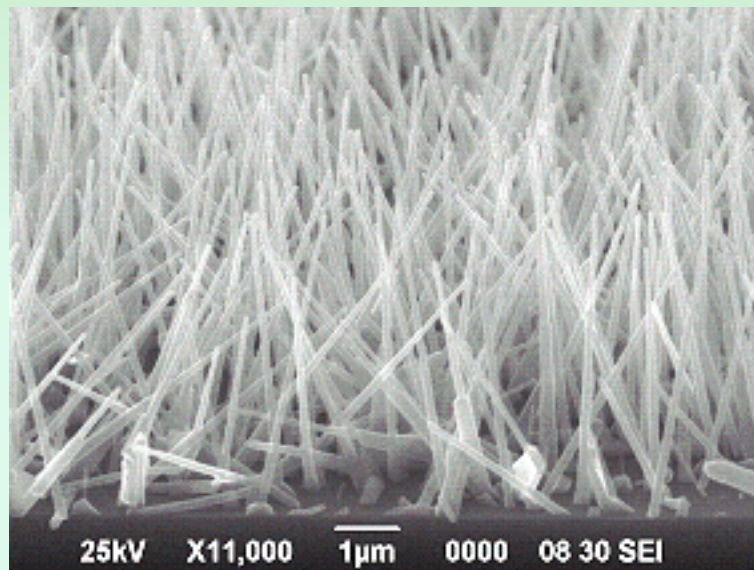
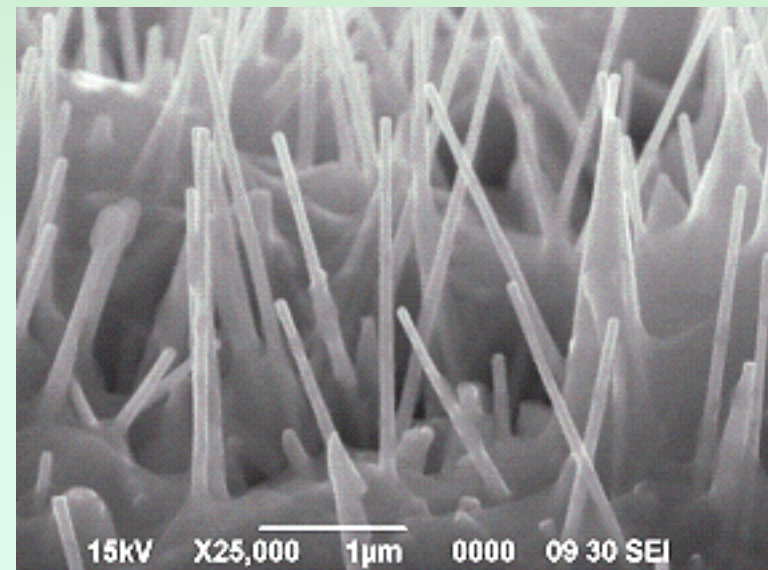
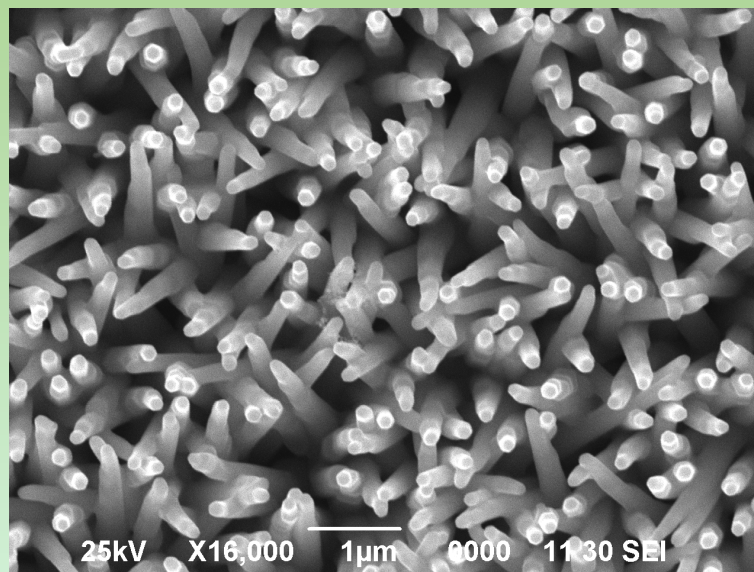
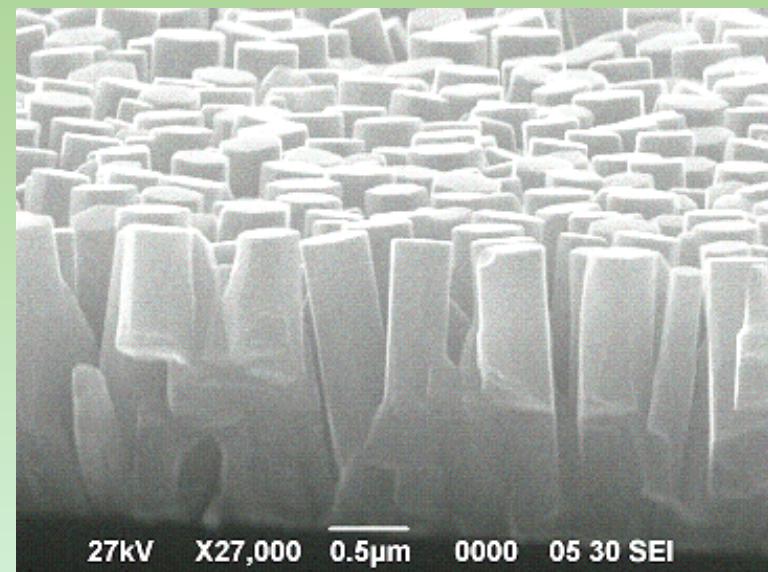


Поперечный скол пленки AlGaIn



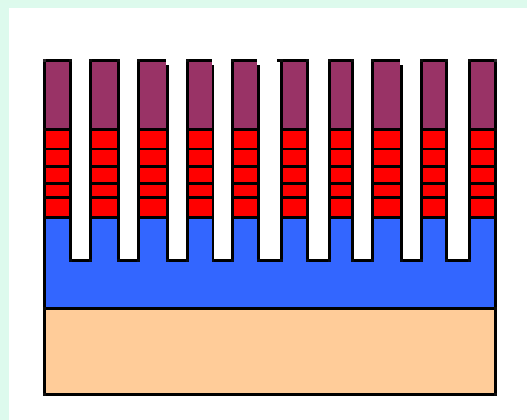
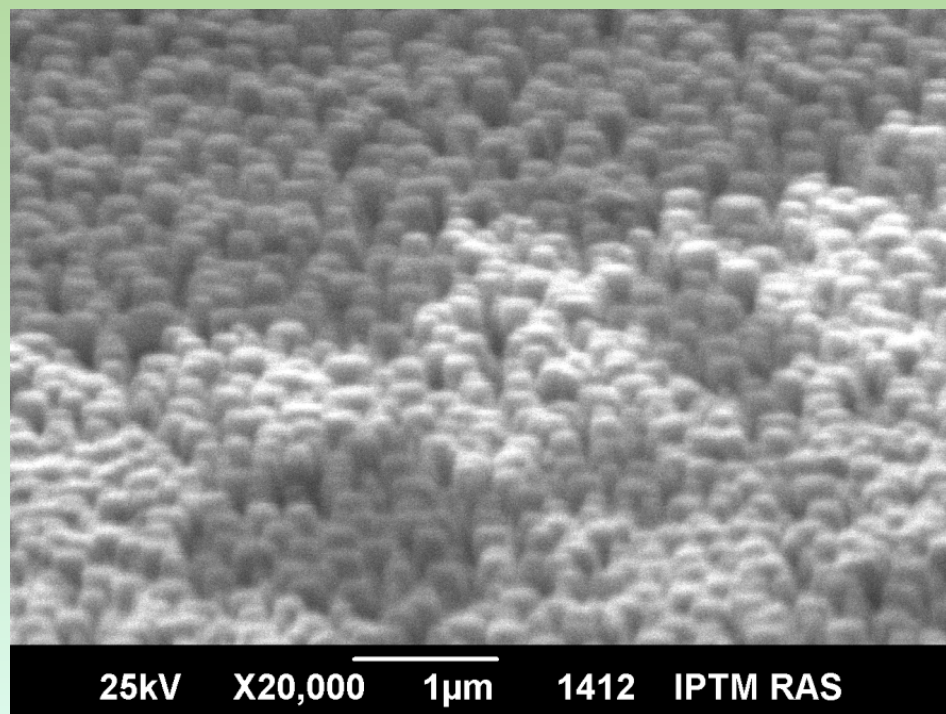
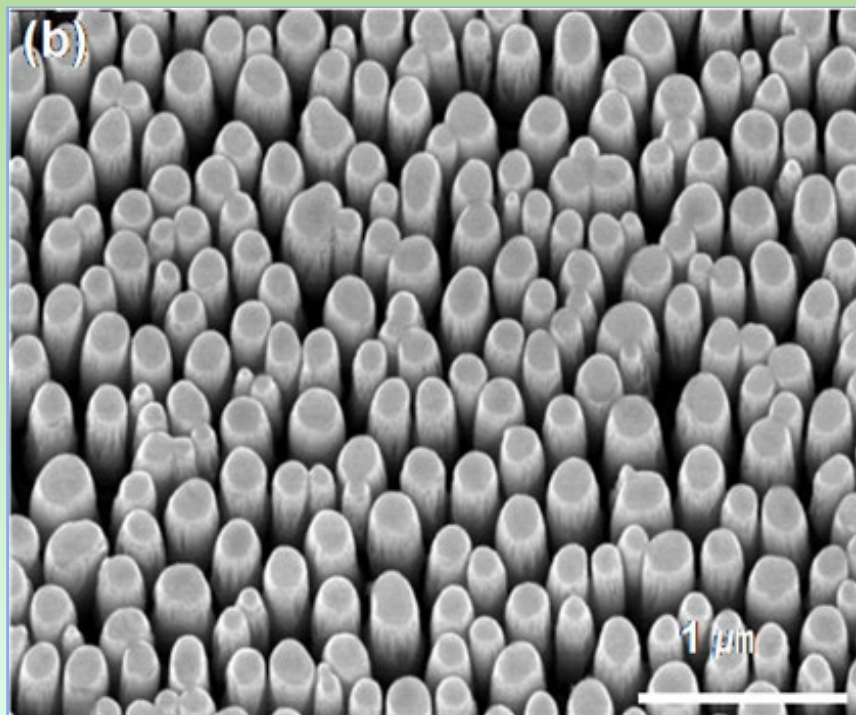
Поперечный скол пленки κ-Ga₂O₃

Режим вторичных электронов



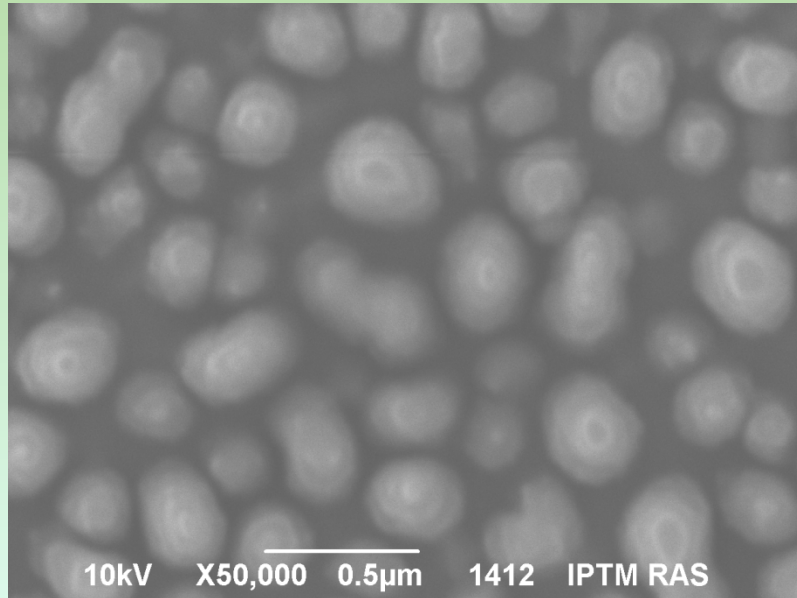
Наностолбики ZnO

Режим вторичных электронов

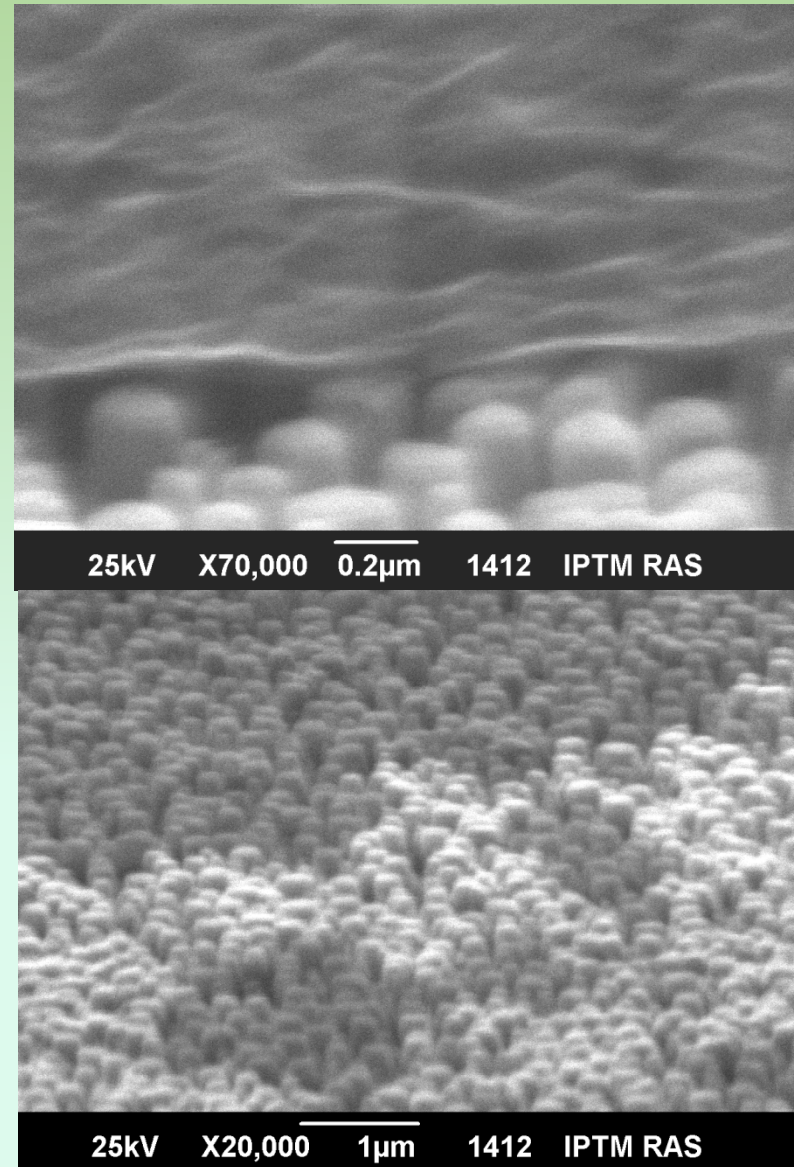


Наностолбики с InGaN/GaN MQW

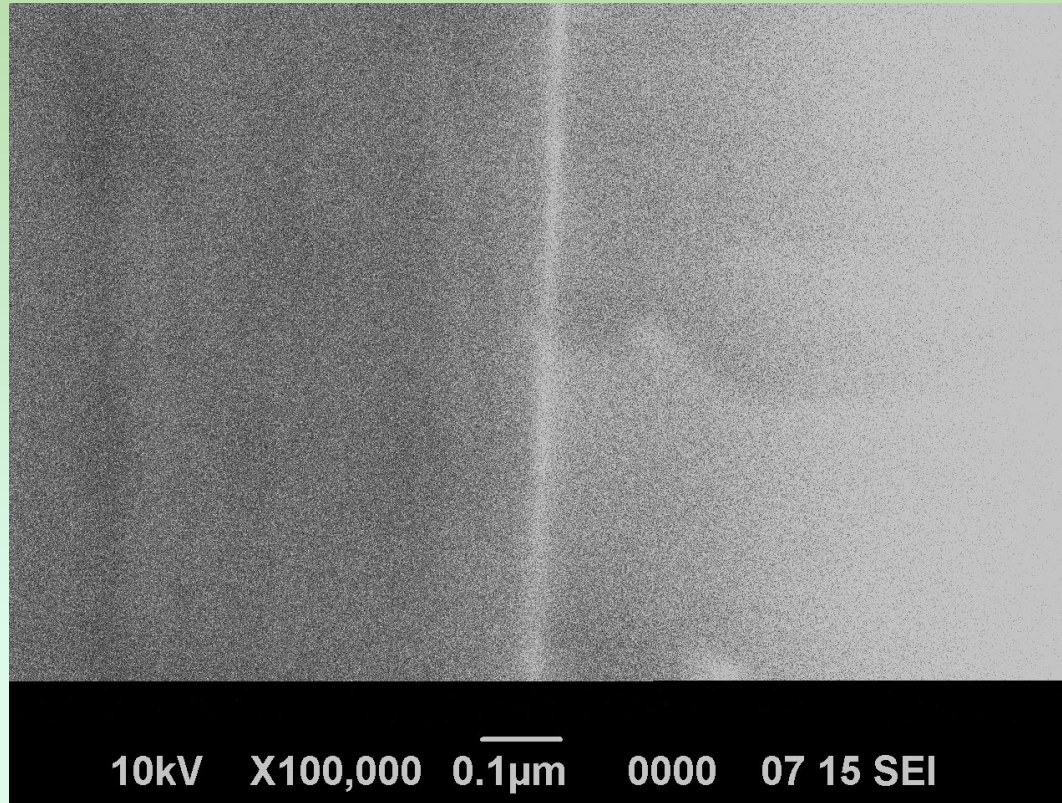
Режим вторичных электронов



Наностолбики светодиодных структур на основе GaN



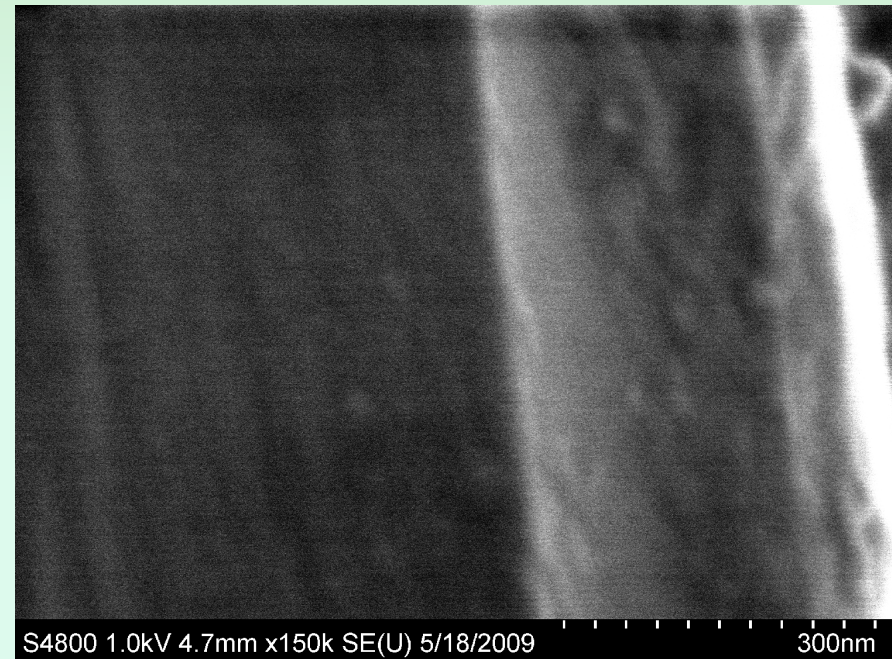
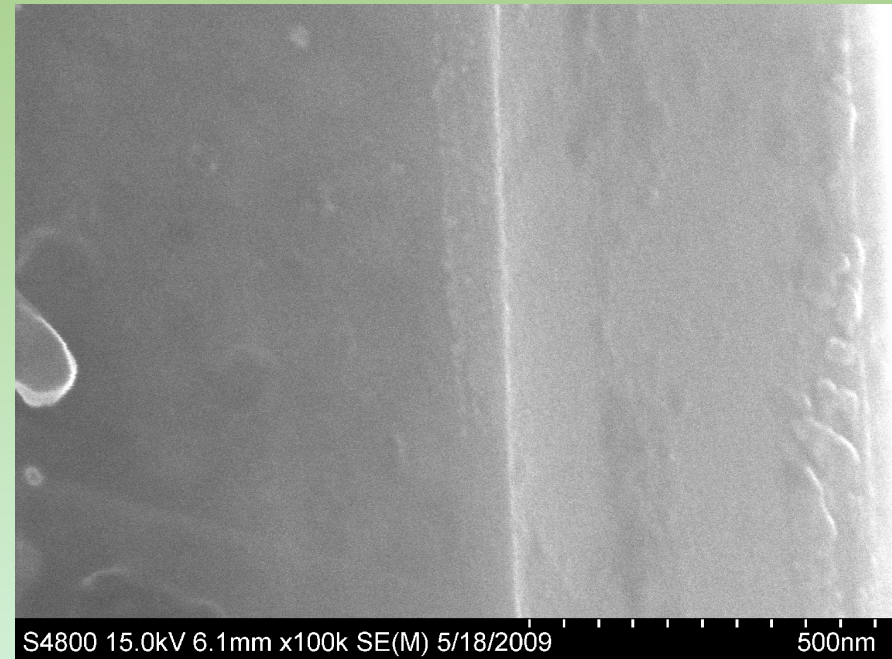
Режим вторичных электронов



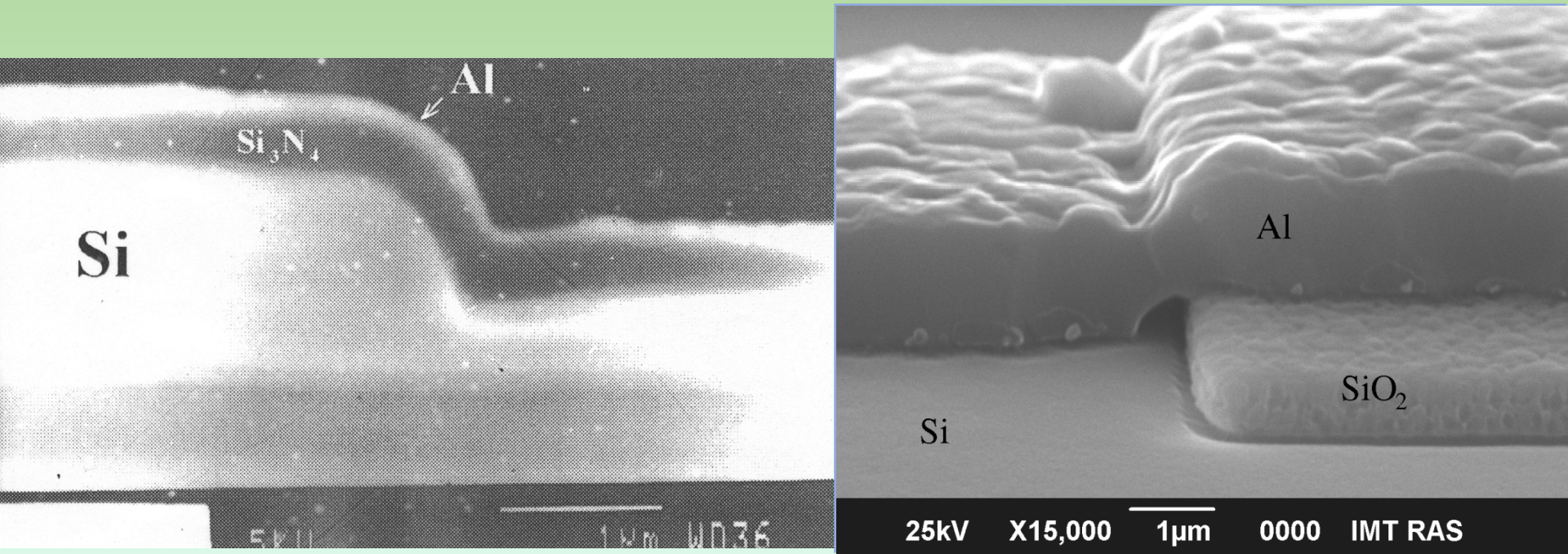
Поперечный срез слоя W толщиной 5 нм в Si

Режим вторичных электронов

Поперечный срез слоя W
толщиной 5 нм в Si

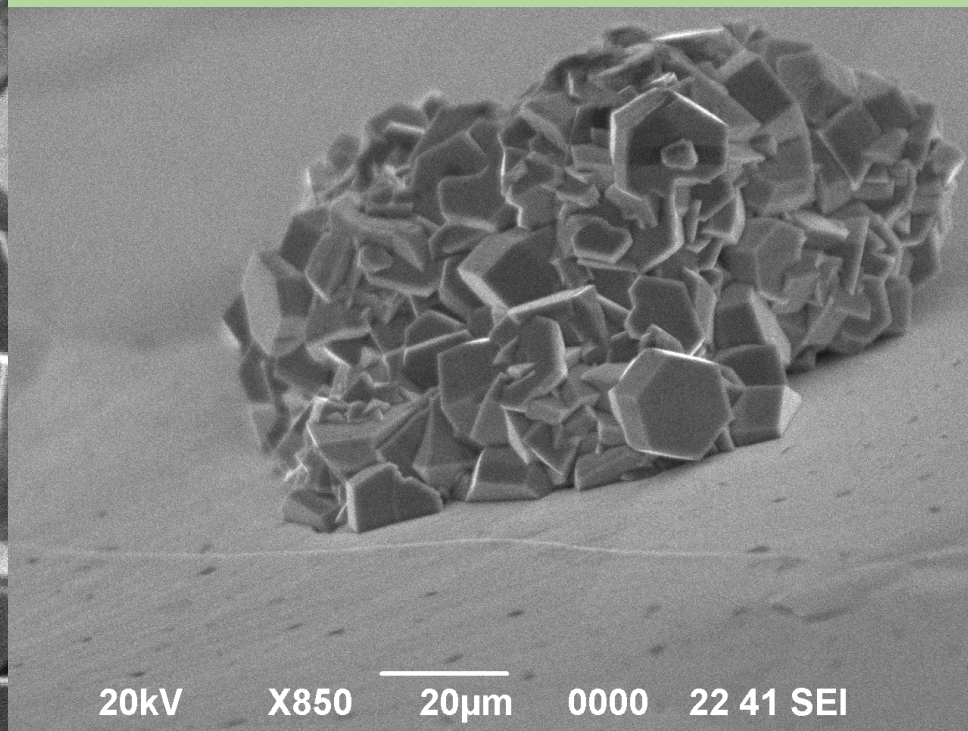
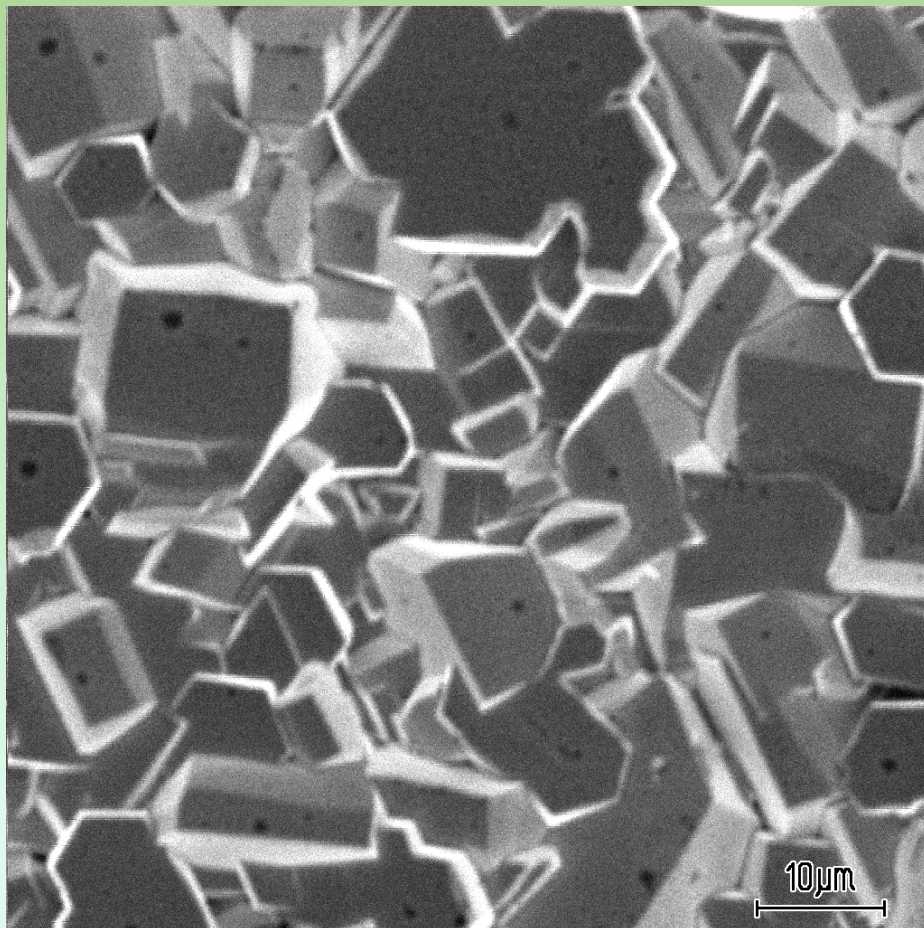


Режим вторичных электронов



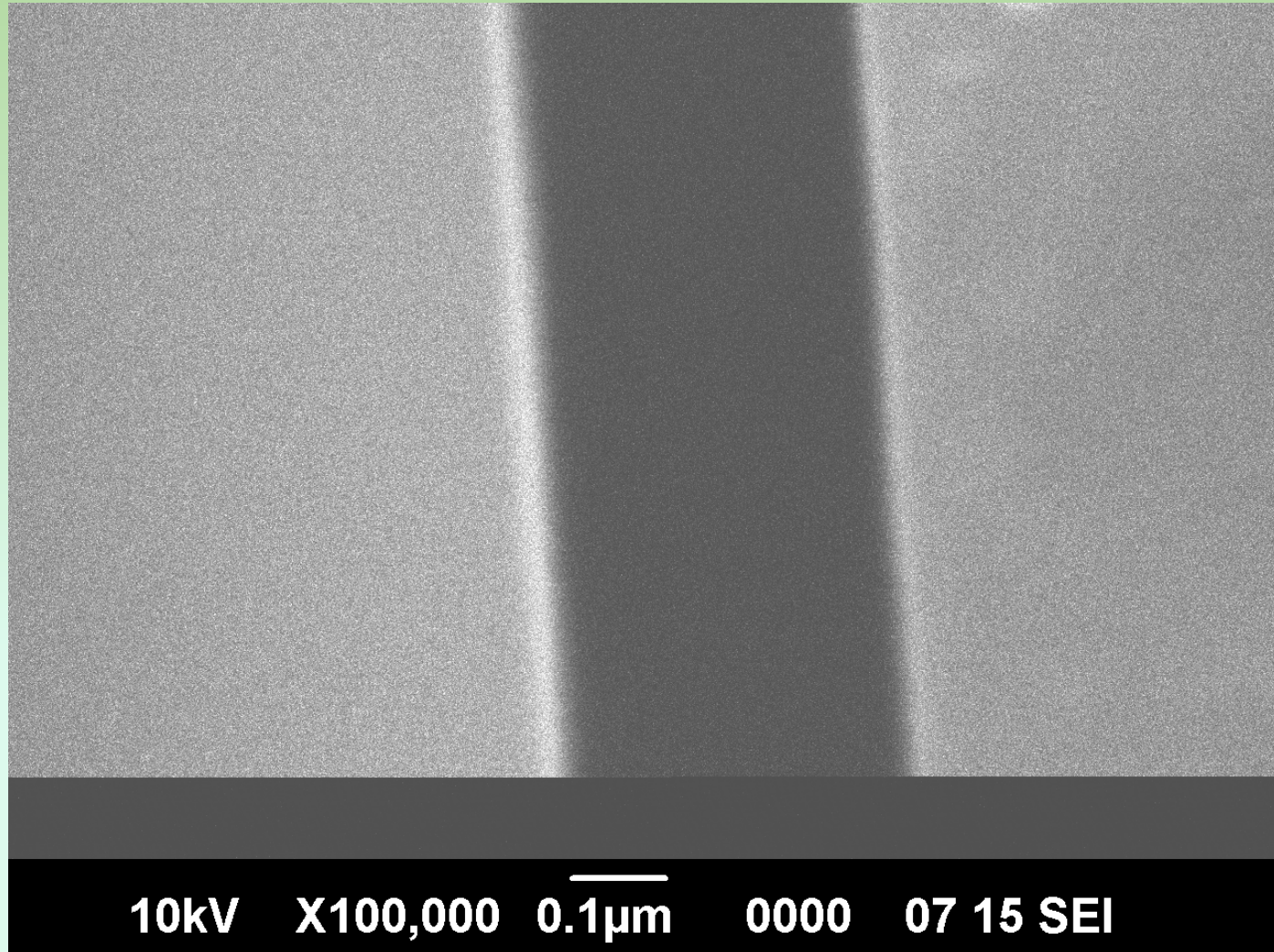
Эмиссия ВЭ зависит от локального элементного состава объекта и локальных электрических свойств

Режим вторичных электронов



к-Ga₂O₃ наклон 0 и 70°

Интерпретация изображения

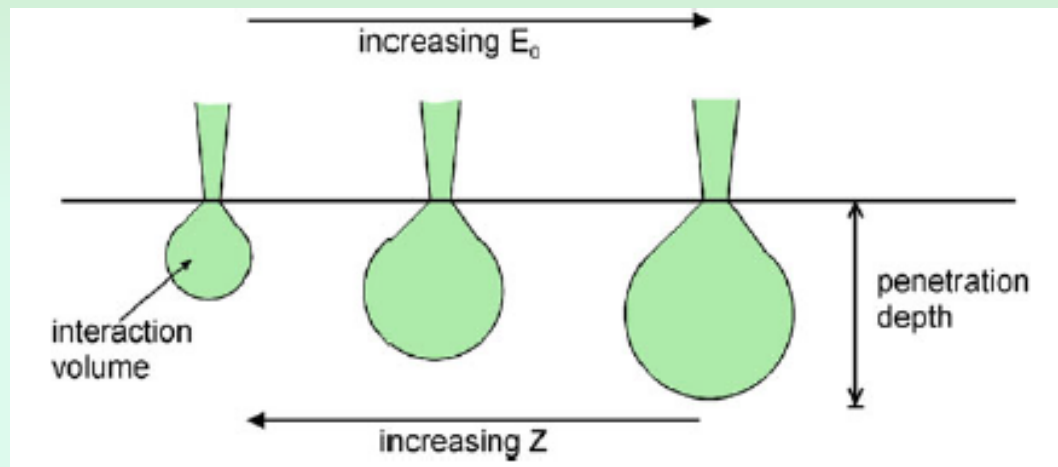


Щель в Si

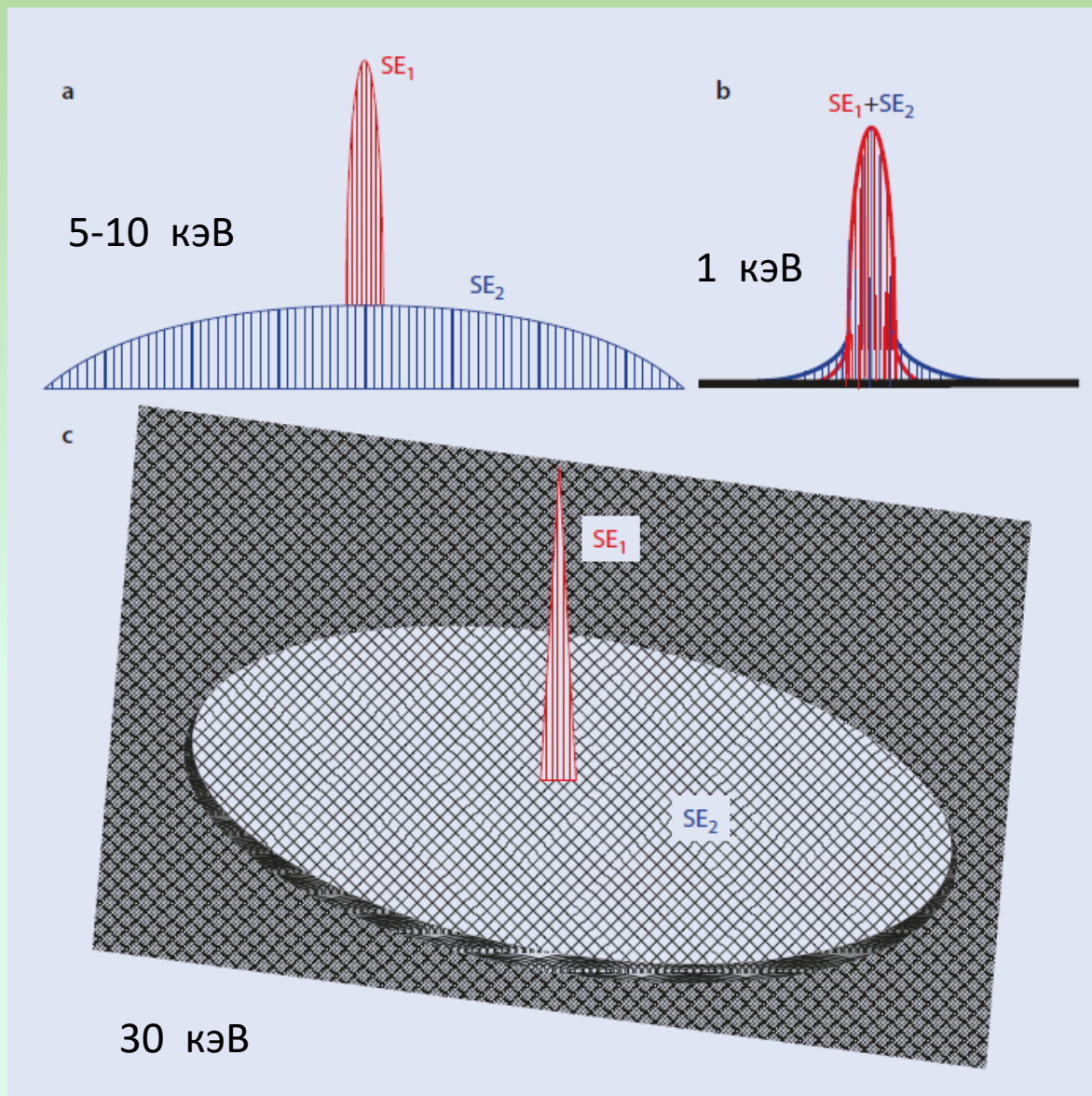
Процессы упругого и неупругого рассеяния приводят к уширению пучка

Уширение пучка $\sim z^{3/2}$

Размер области взаимодействия растет с увеличением энергии электронов и уменьшается с увеличением Z .



Пространственное разрешение

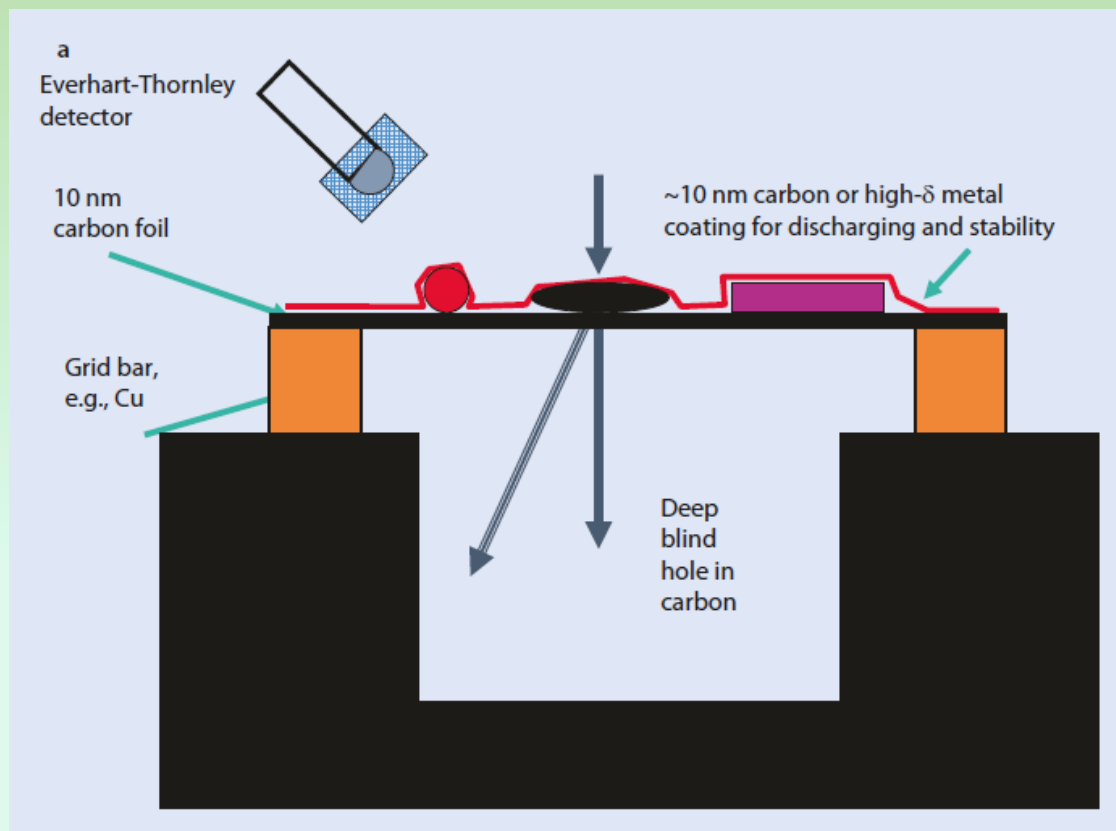


Оптимизация разрешения

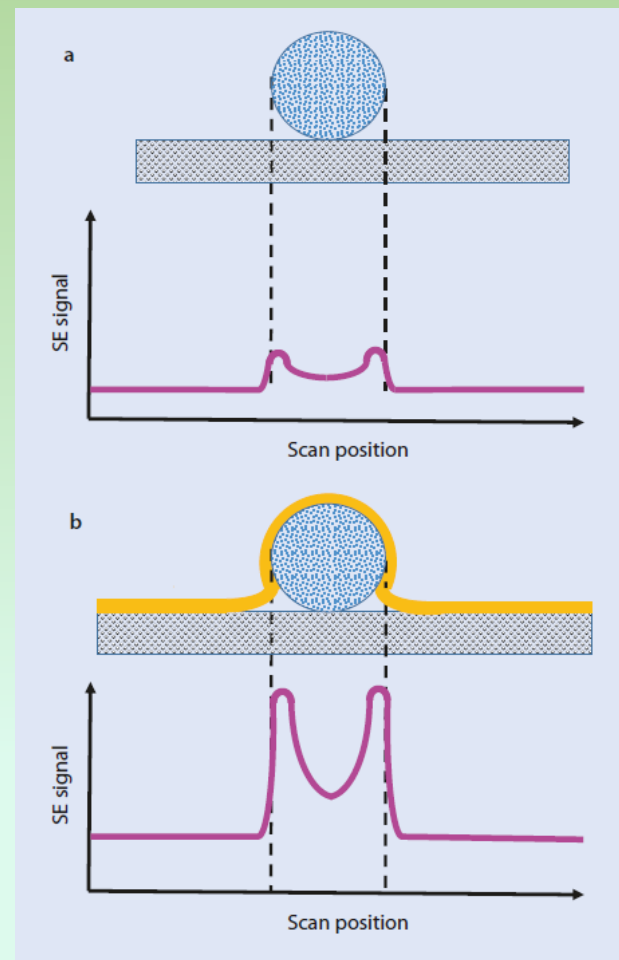
Стратегии

Уменьшать энергию

Уменьшать вклад SE2 и SE3

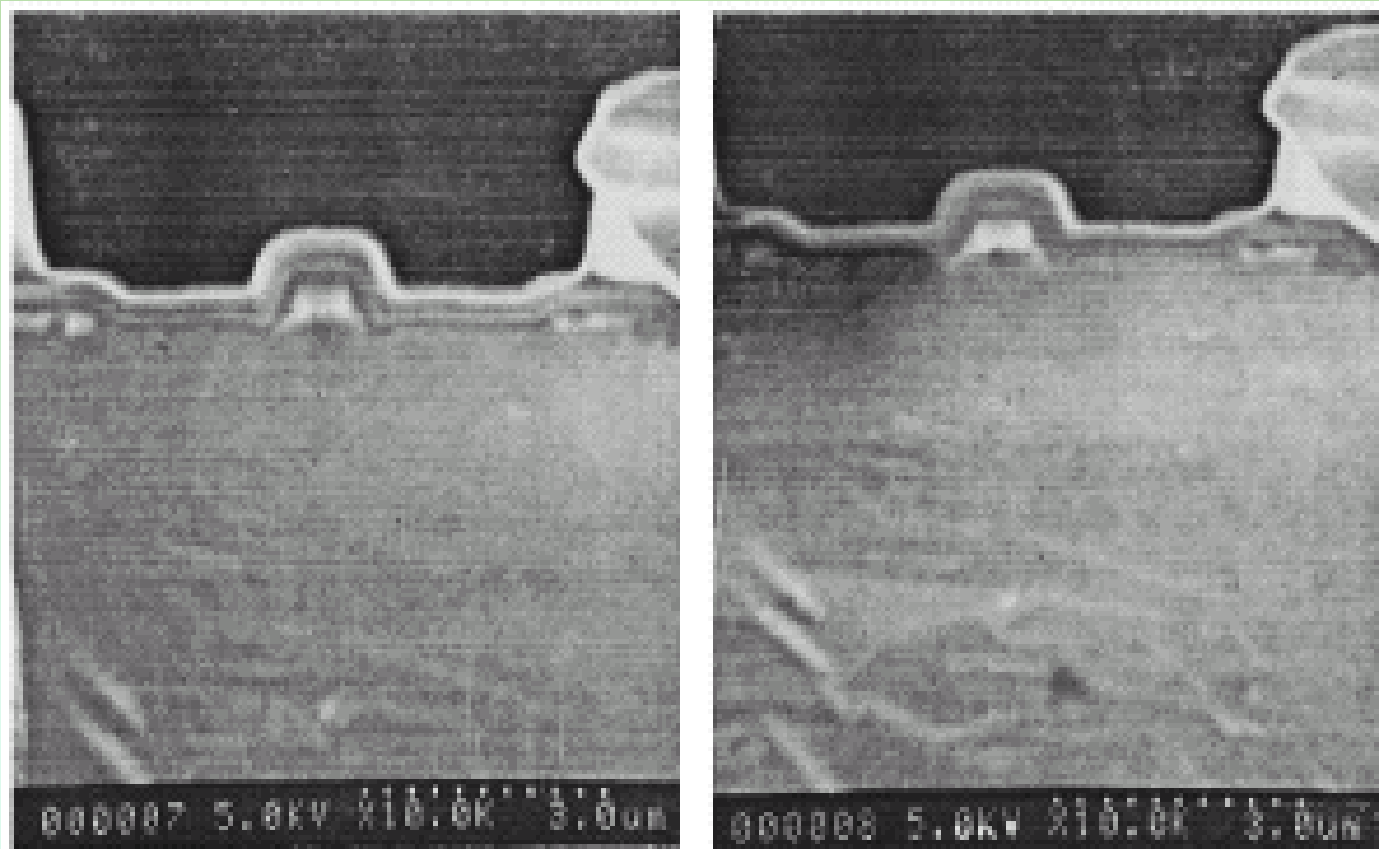


Уменьшить влияние подложки



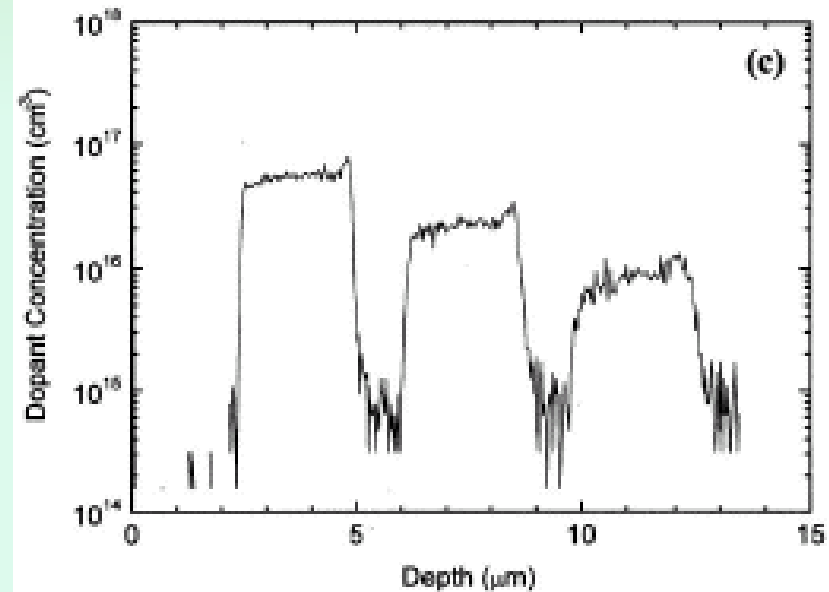
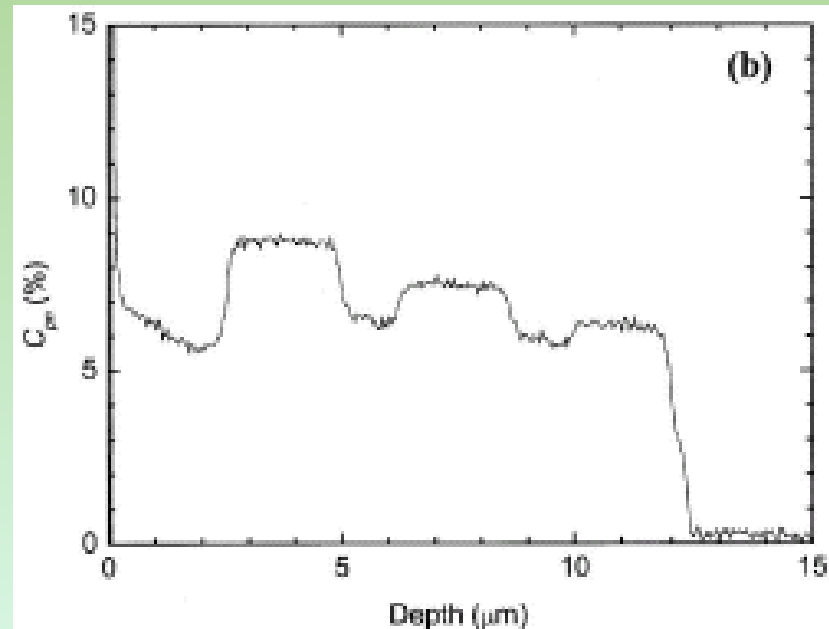
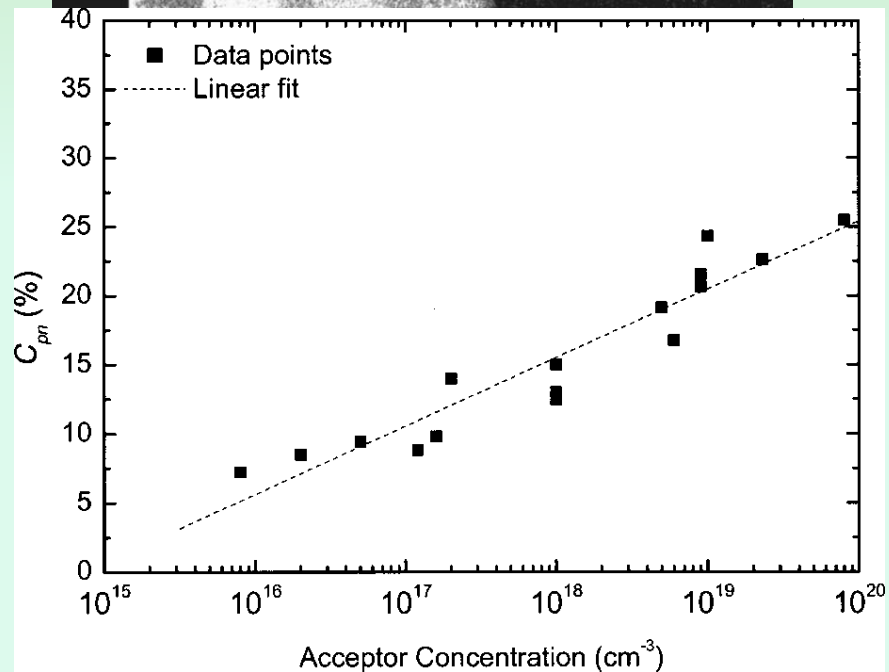
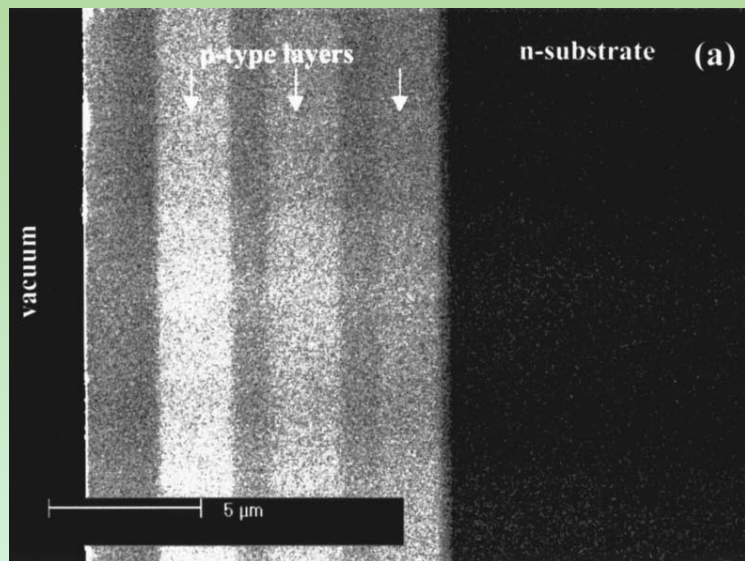
Напыление тонкой
металлической пленки с
большим коэффициентом
эмиссии

Режим вторичных электронов (потенциальный контраст)

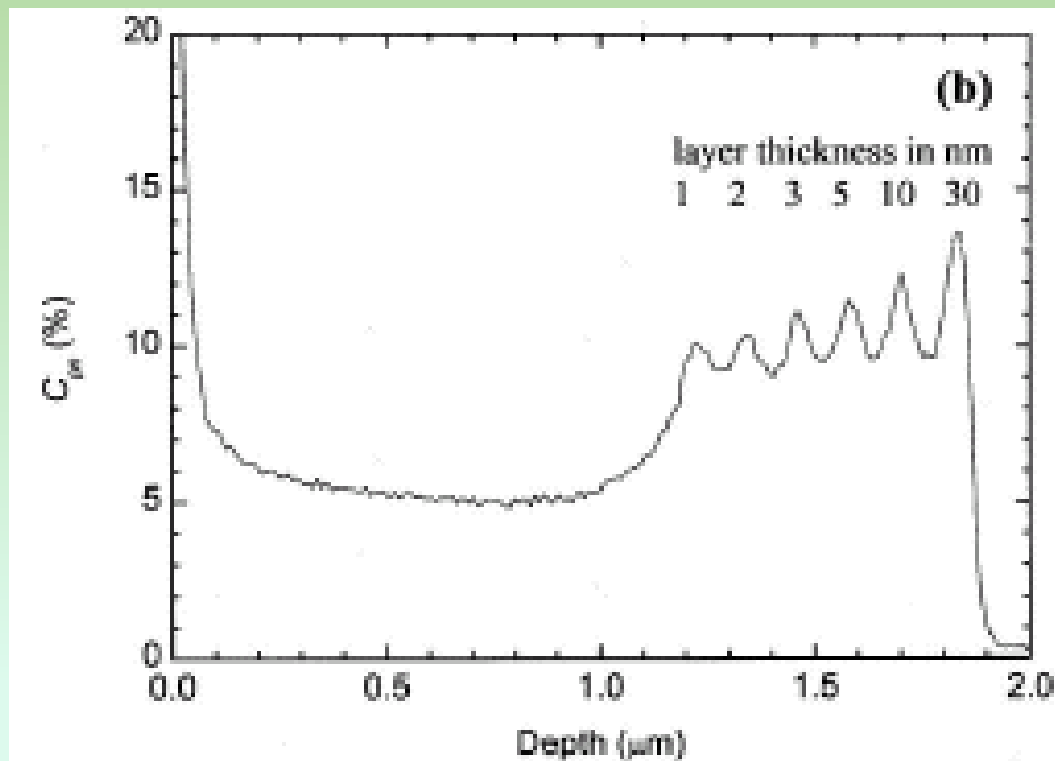
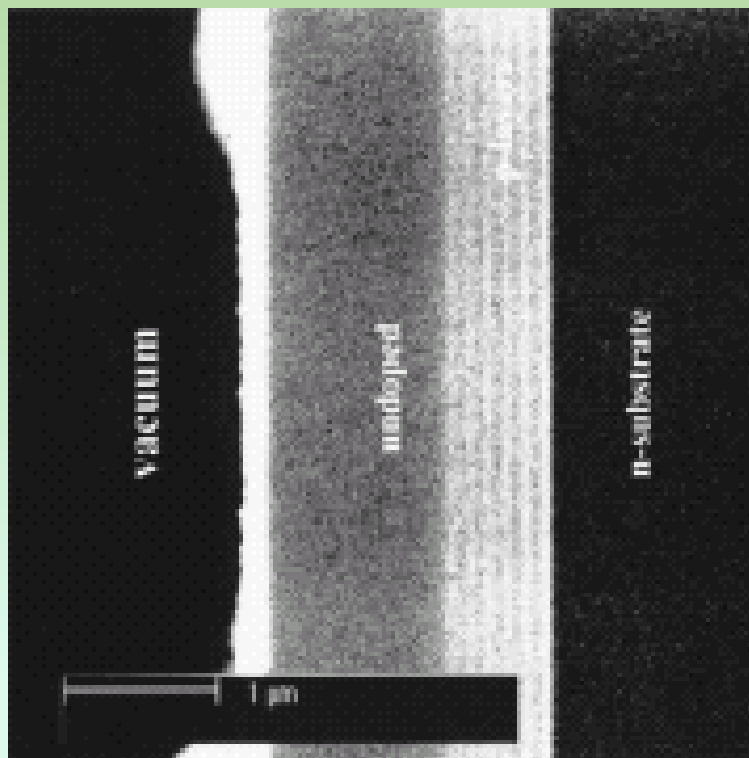


МДП транзистор, на правом рис. к истоку (слева) приложено 5 В

Режим вторичных электронов (контраст легирования, В в Si)

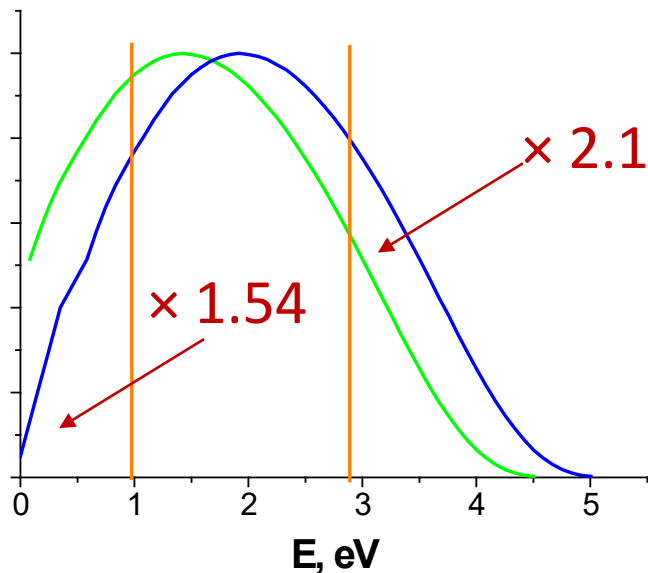


Режим вторичных электронов (контраст легирования)



Профили сигнала в Si, легированном В ($N_B=10^{19}\text{cm}^{-3}$)
(J. Appl. Phys., **91**, 9116, 2002)

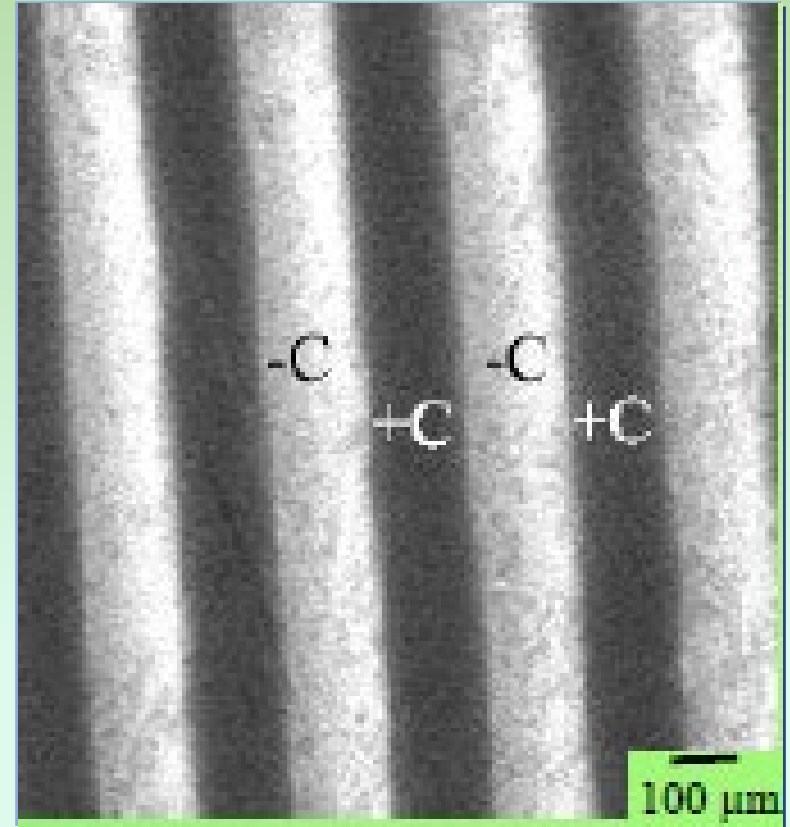
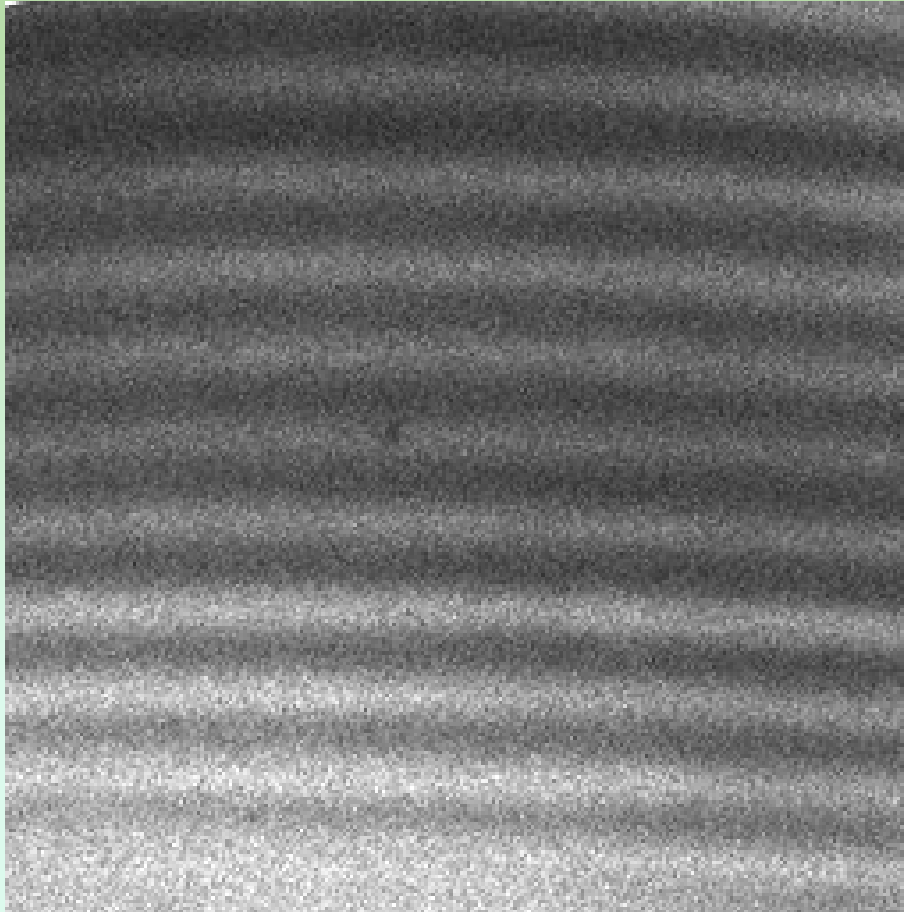
Режим вторичных электронов (потенциальный контраст)



**Различие интегрального
контраста $\sim 7\%$**

Схема, иллюстрирующая влияние фильтрации энергии

Режим вторичных электронов (потенциальный контраст)

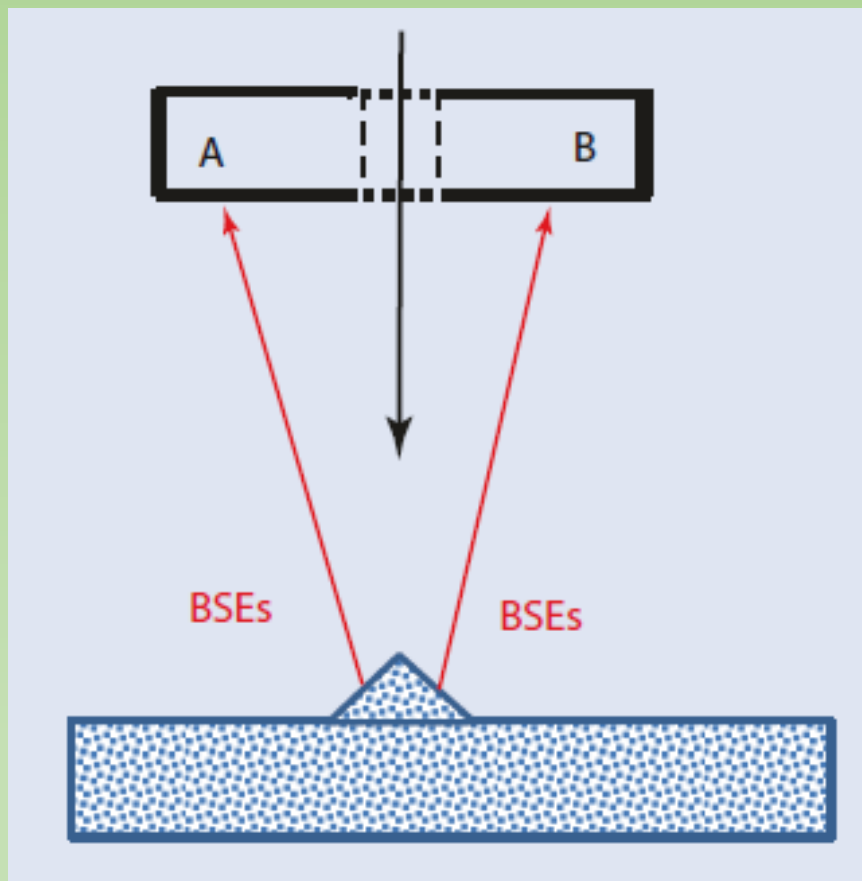


Доменная структура в сегнетоэлектриках

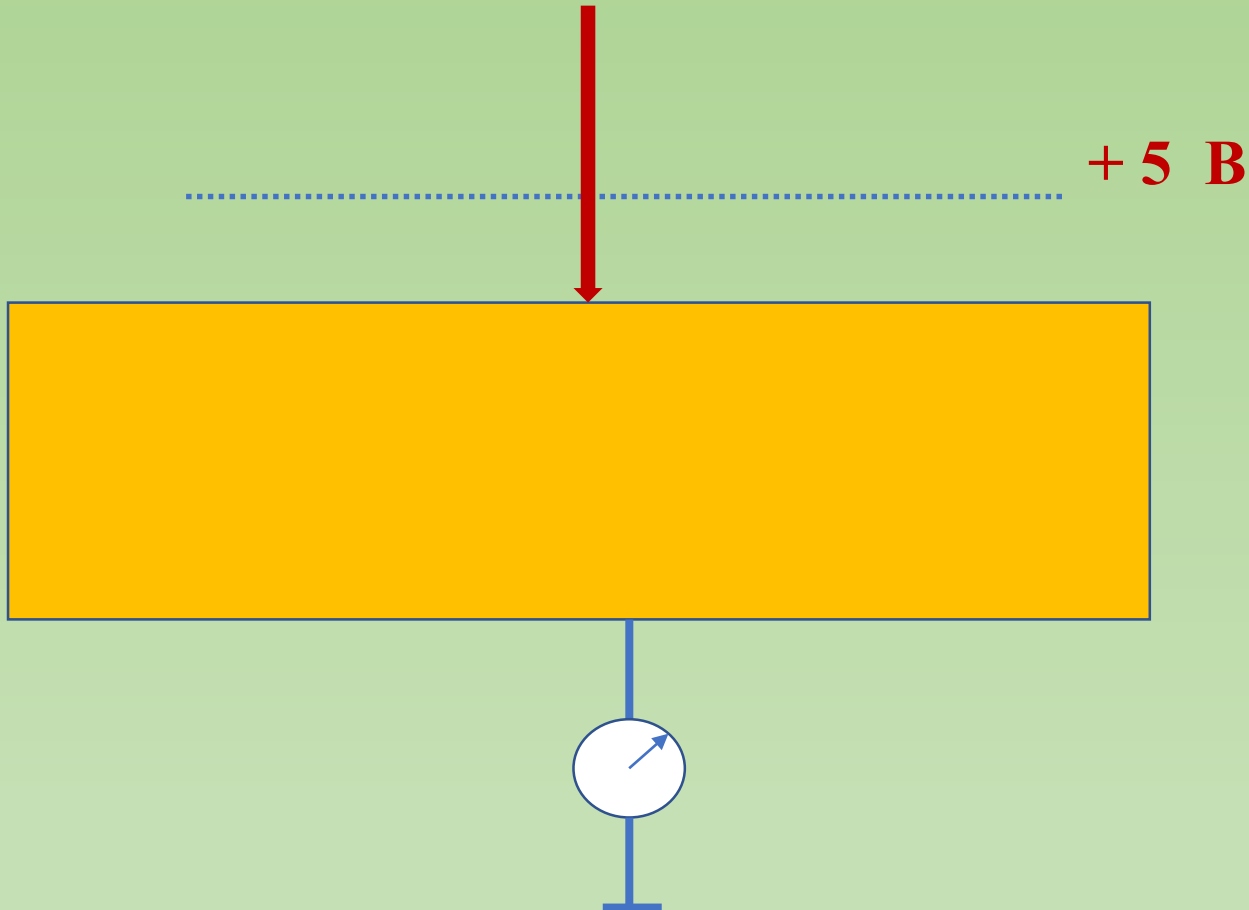
Режим обратно отраженных электронов

Состав и топография

Режим обратно отраженных электронов

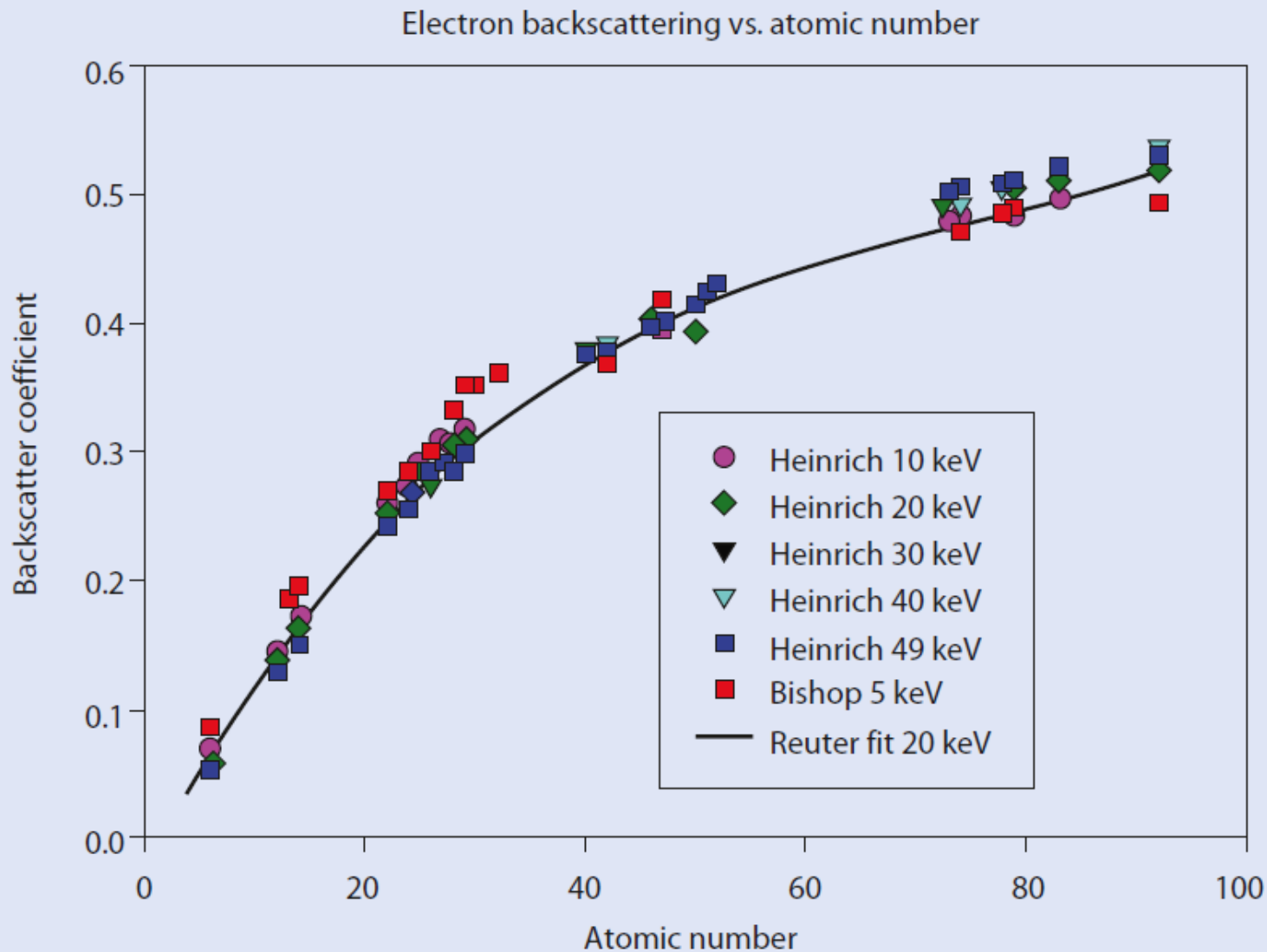


Измерения коэффициента обратного рассеяния

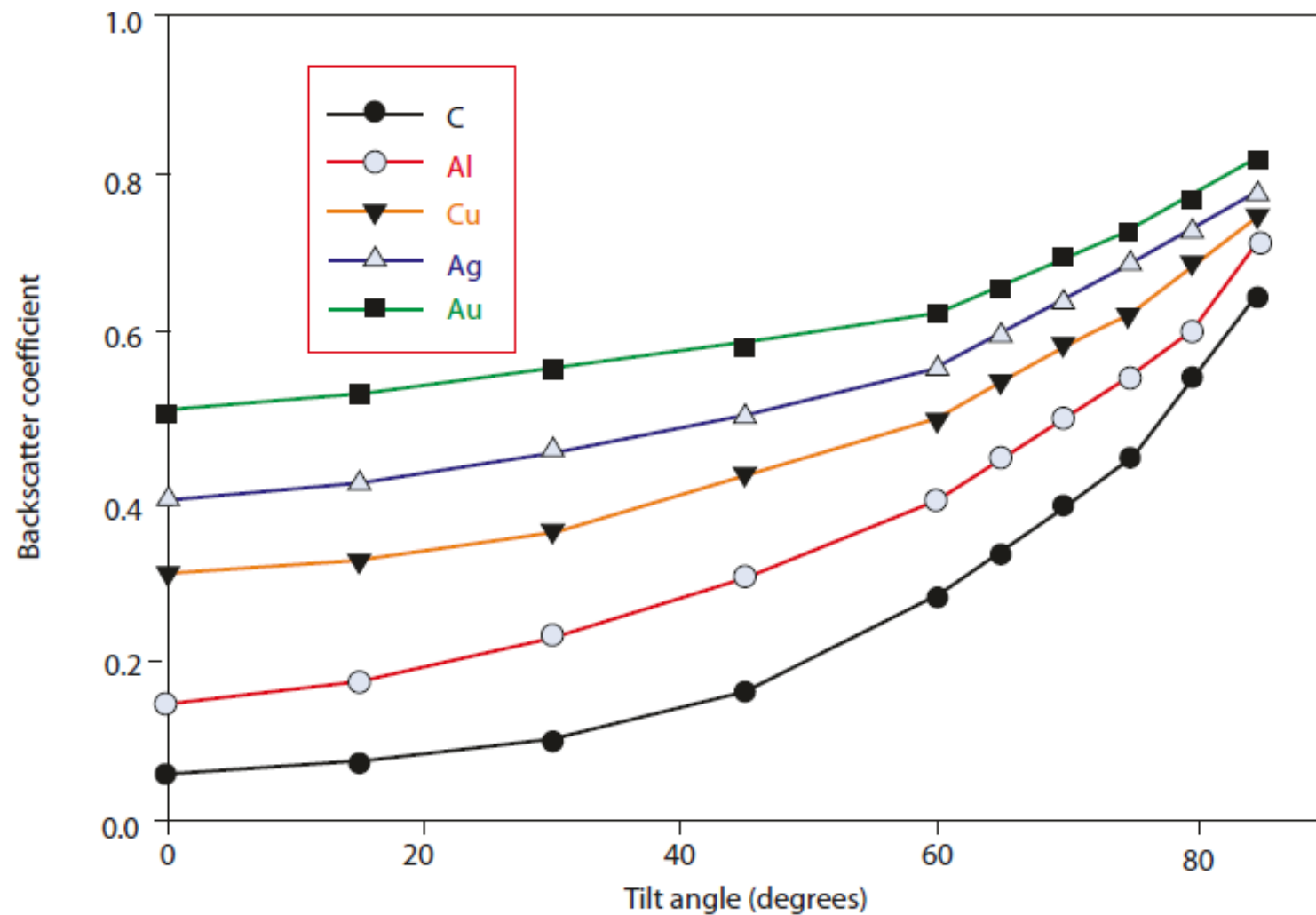


Зависимость от атомного номера

b



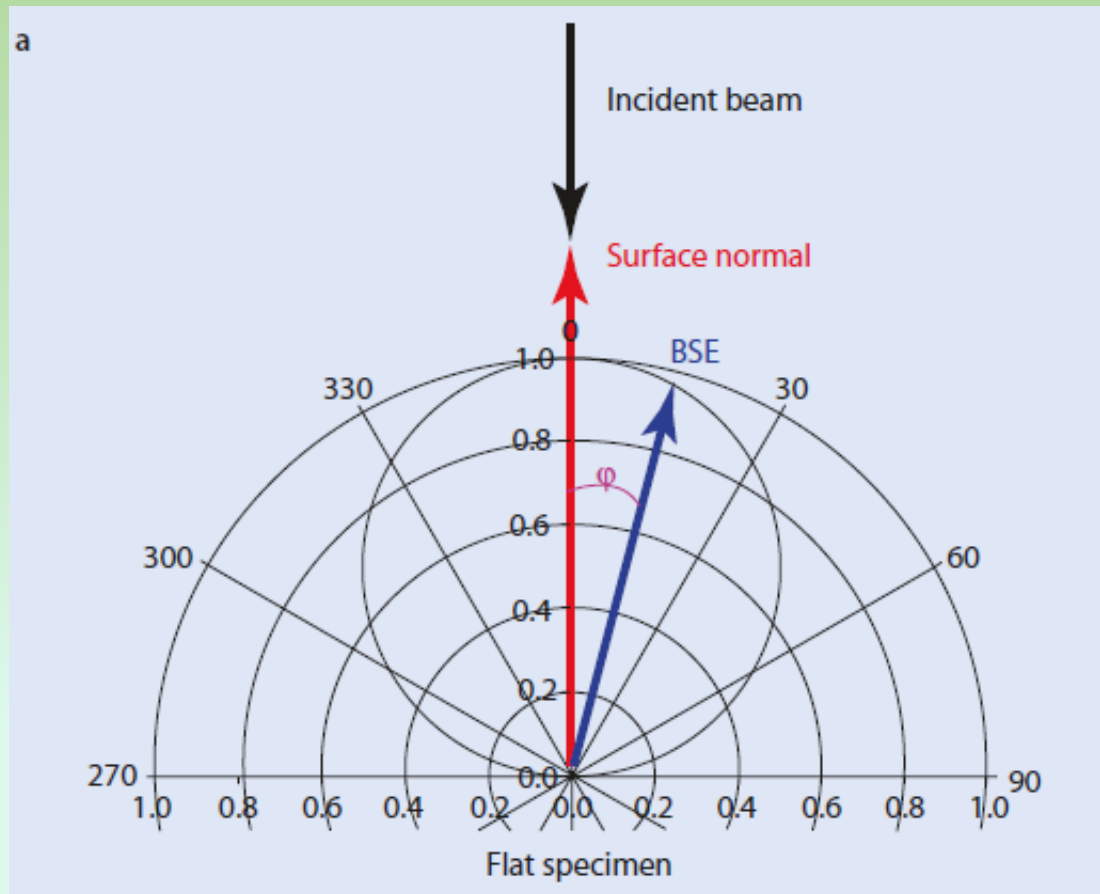
Зависимость от наклона образца



Монте Карло

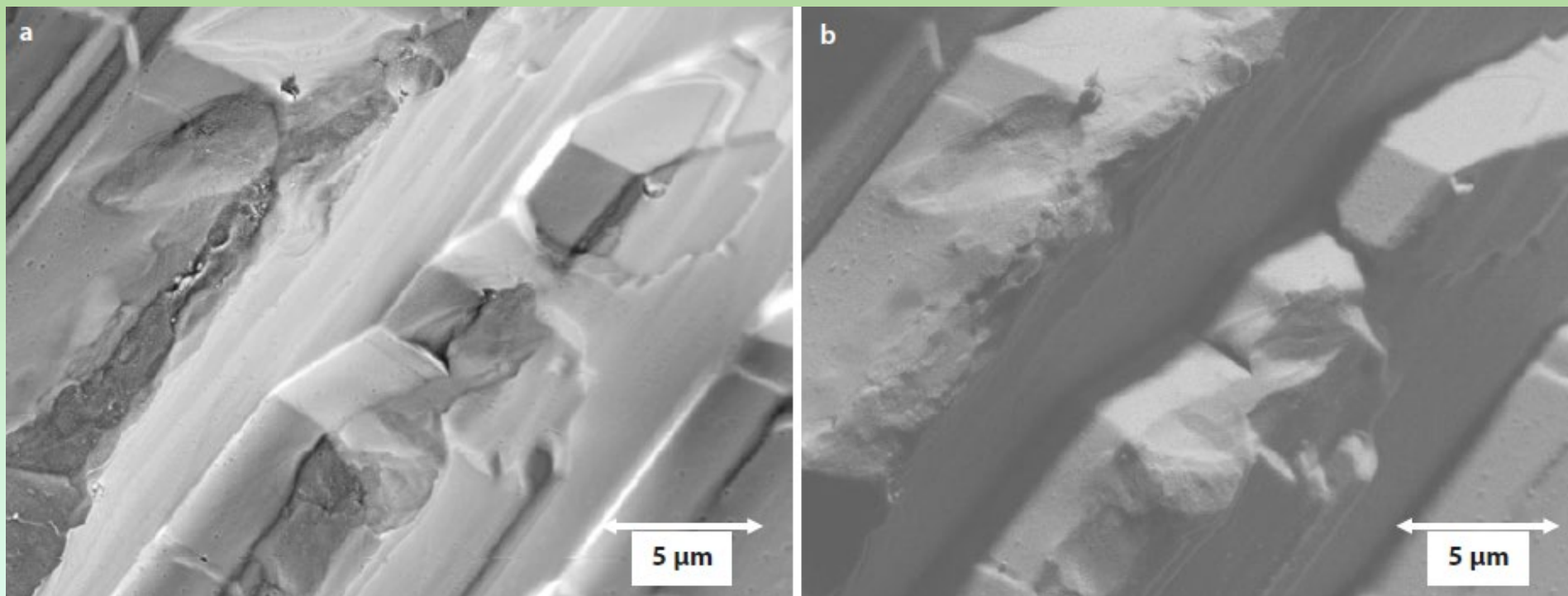
$$\eta(\theta) = (1 + \cos \theta)^{-9/\sqrt{Z}}$$

Зависимость от угла вылета



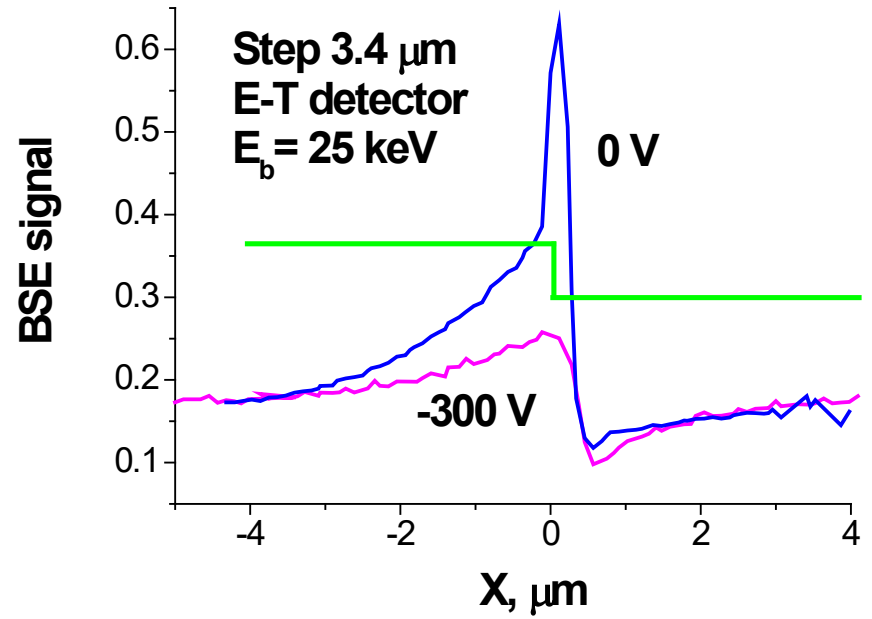
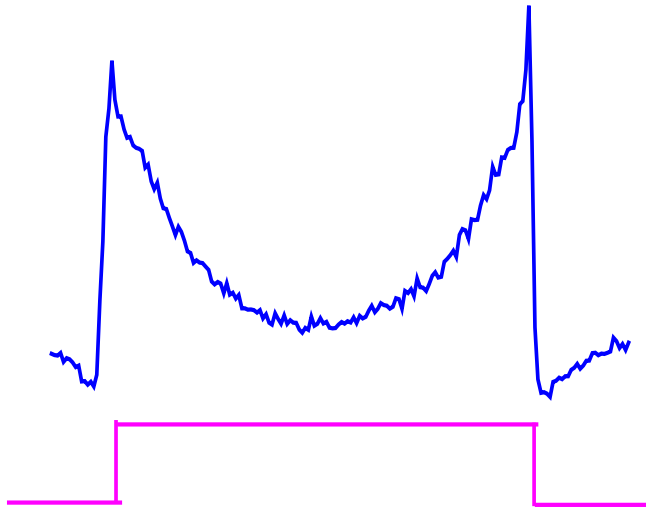
$$\eta(\varphi) \sim \cos(\varphi)$$

Топография



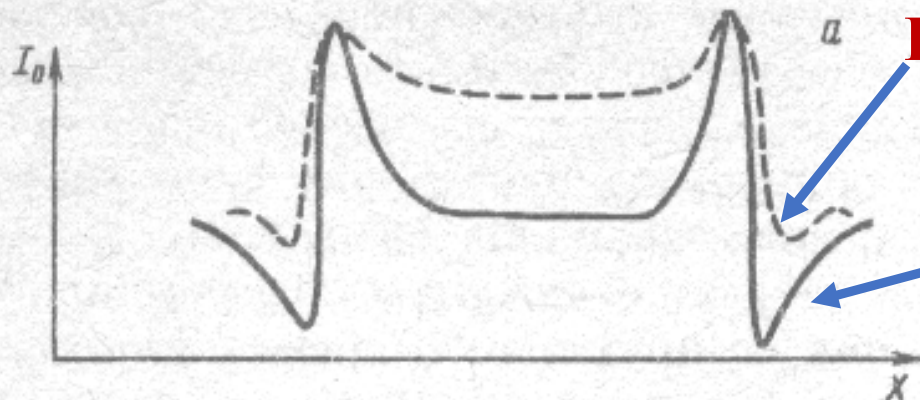
Поверхность серебра, снятая с большим (a) и малым углами сбора (b)

Режим обратно отраженных электронов



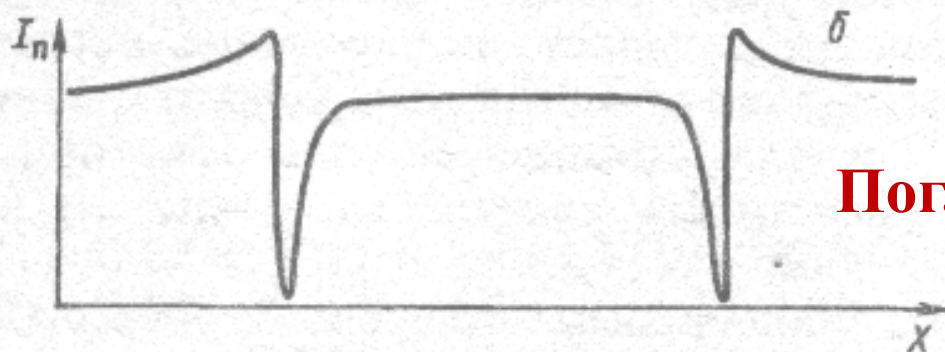
Профиль сигнала от
ступеньки на поверхности

Режим обратно отраженных электронов

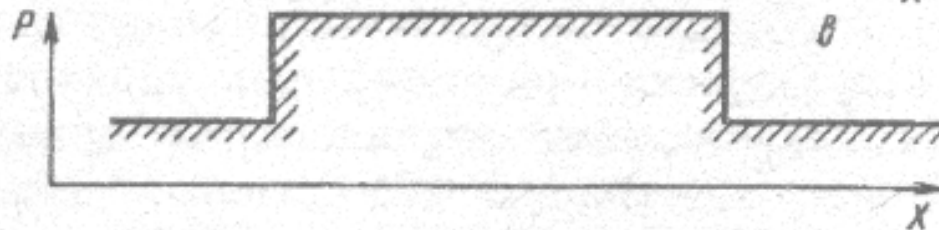


Полупроводниковый детектор

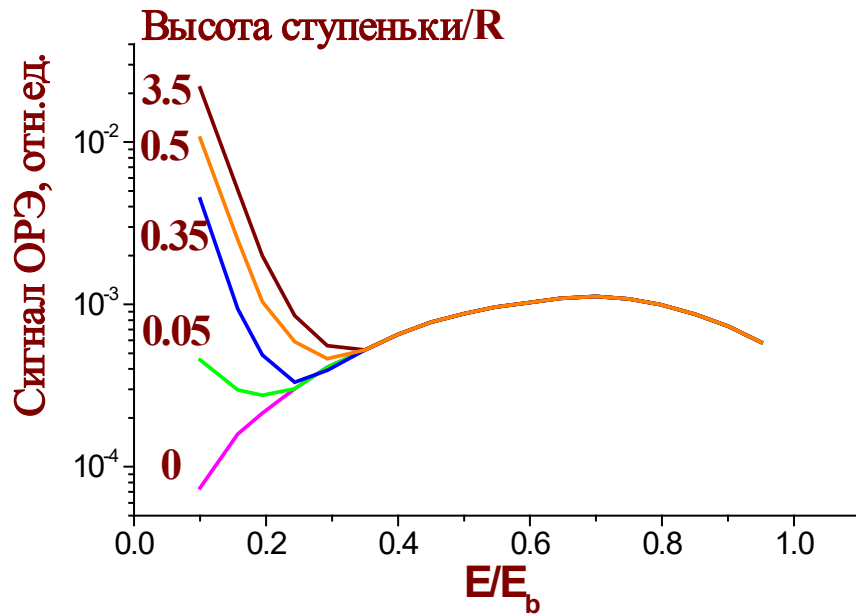
Сцинтилляционный детектор



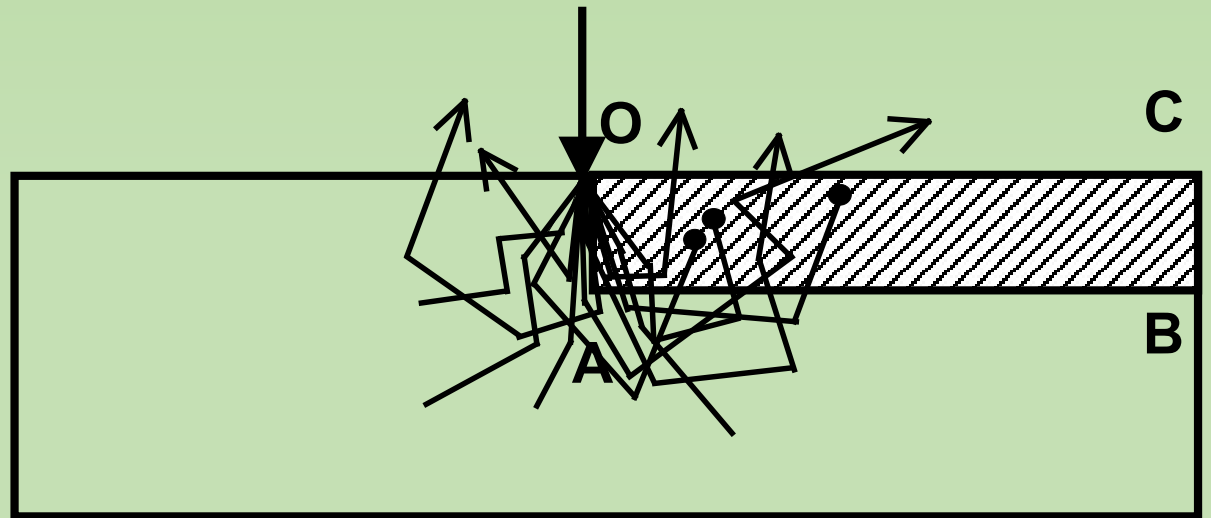
Поглощенный ток



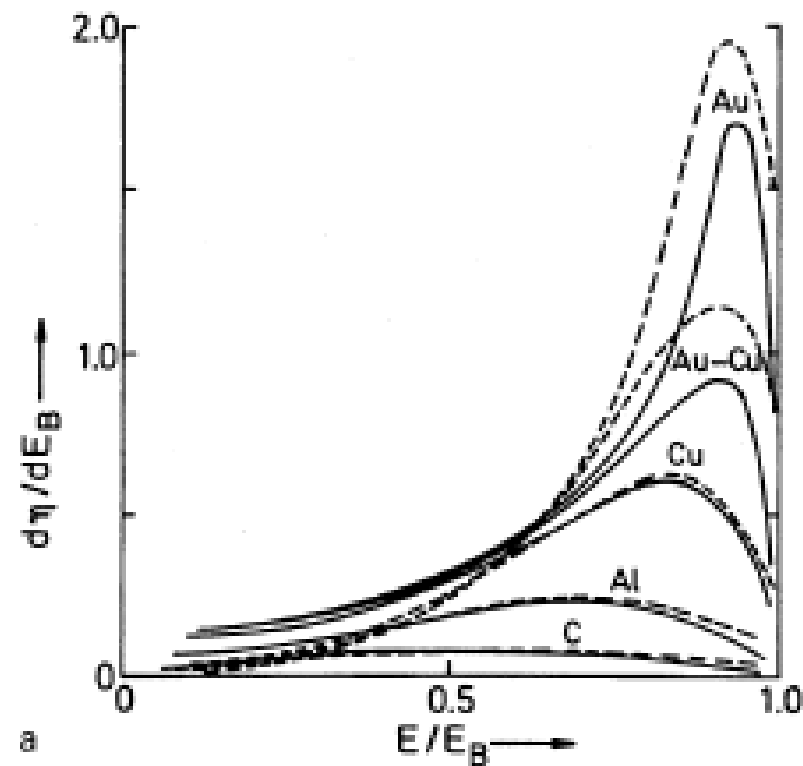
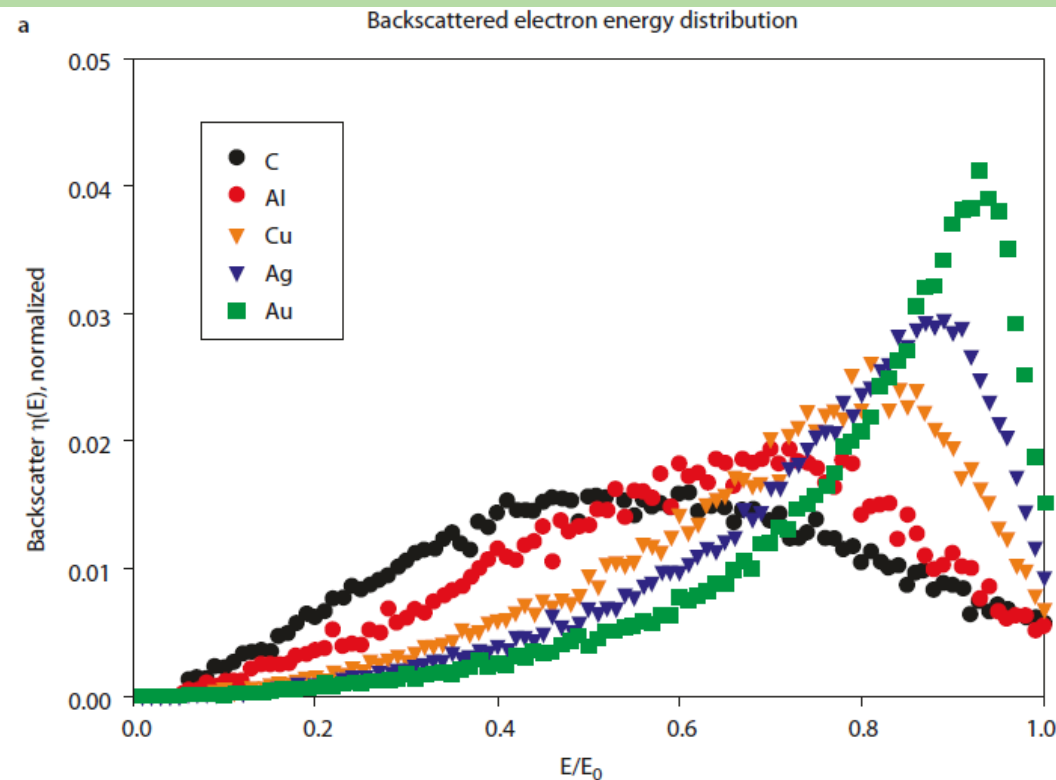
Режим обратно отраженных электронов



Моделирование спектра ОРЭ
на ступеньке

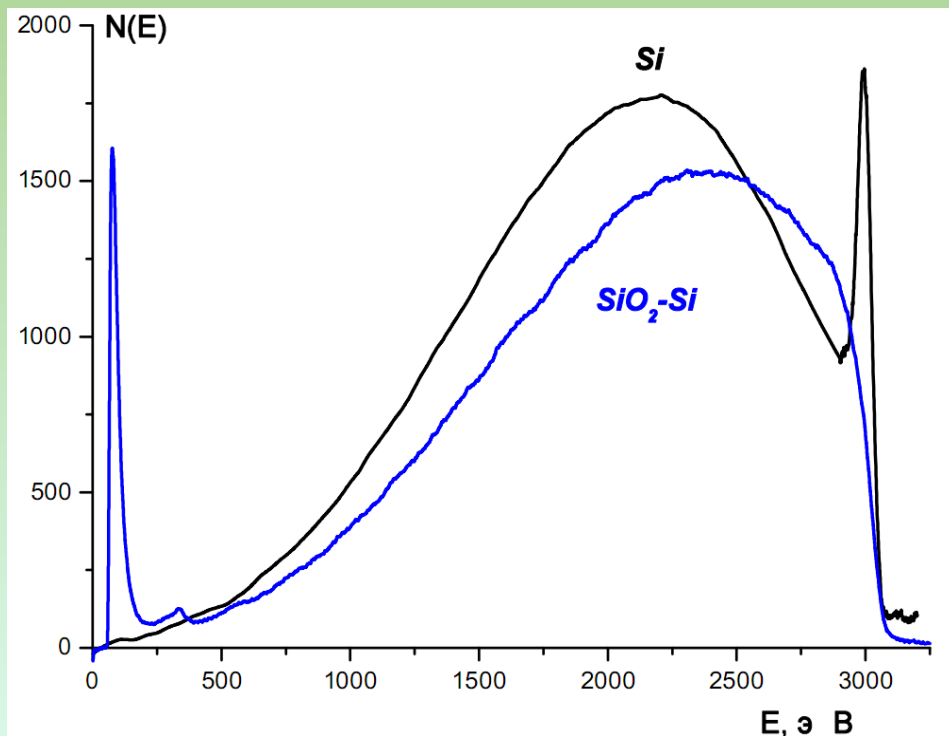


Режим обратно отраженных электронов



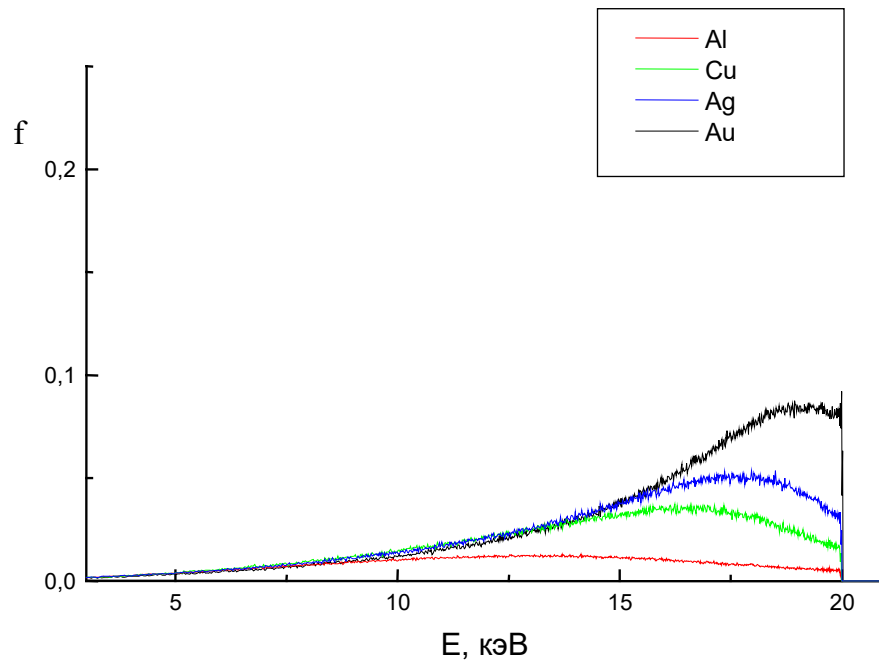
Измеренные при 20 кэВ и угле падения 0° и рассчитанные методом Монте Карло спектры обратно рассеянных электронов

Измерения спектра ОРЭ

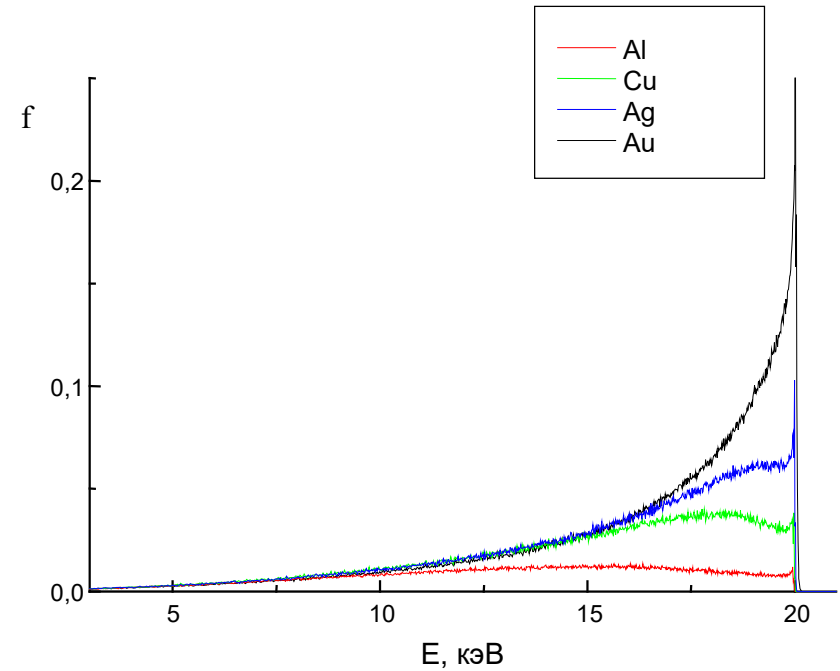


Гостев А.В., Кошев Н.А., Орликовский Н.А., Рау Э.И. «Аппаратная функция тороидального спектрометра РЭМ и ее влияние на спектры детектируемых электронов» XXIV Российская конференция по электронной микроскопии. Черноголовка. (2012) С. 177

Моделирование спектра ОРЭ

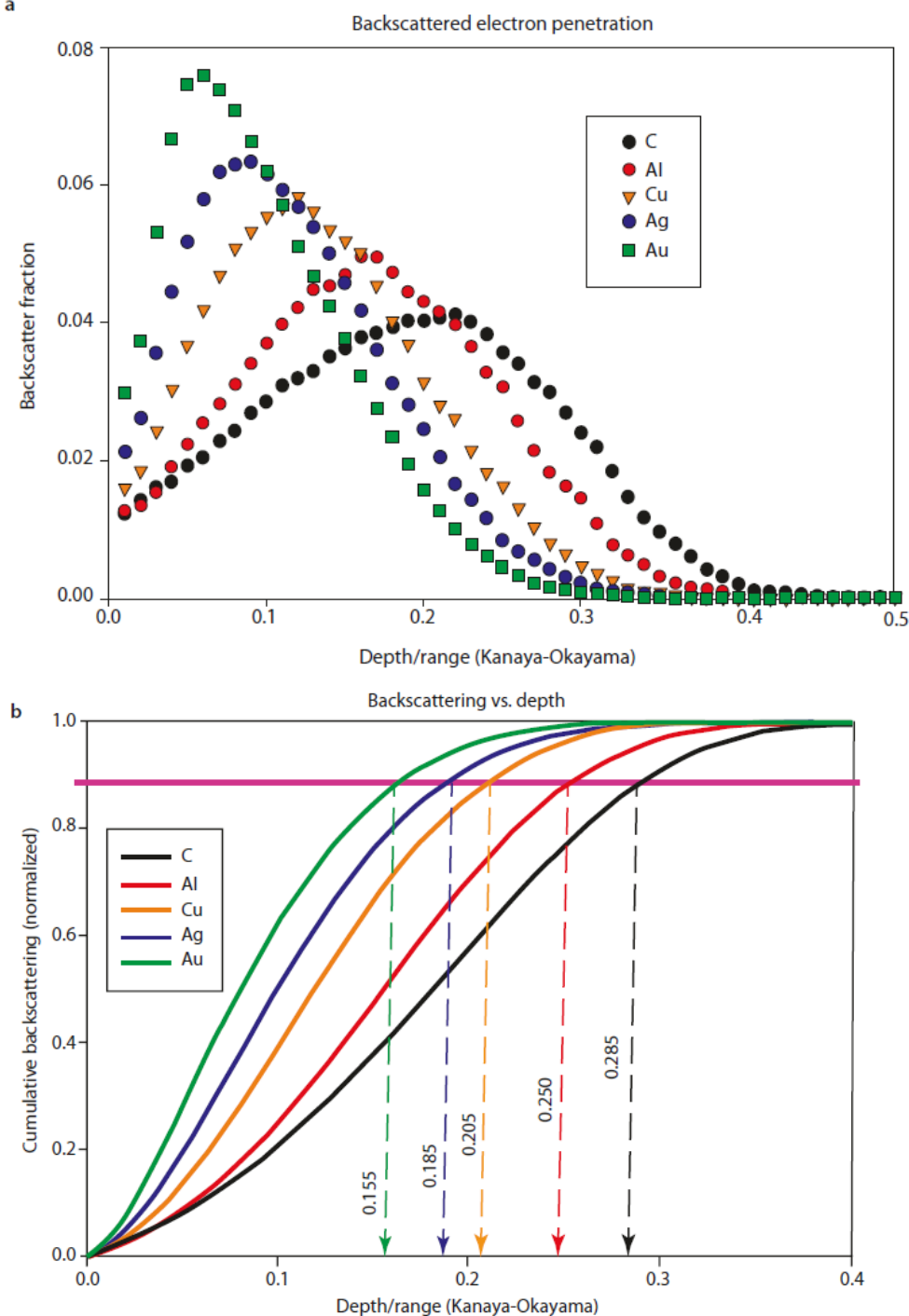


Модель непрерывных потерь



Модель случайных потерь

Глубина выхода обратно отраженных электронов



Режим обратно отраженных электронов

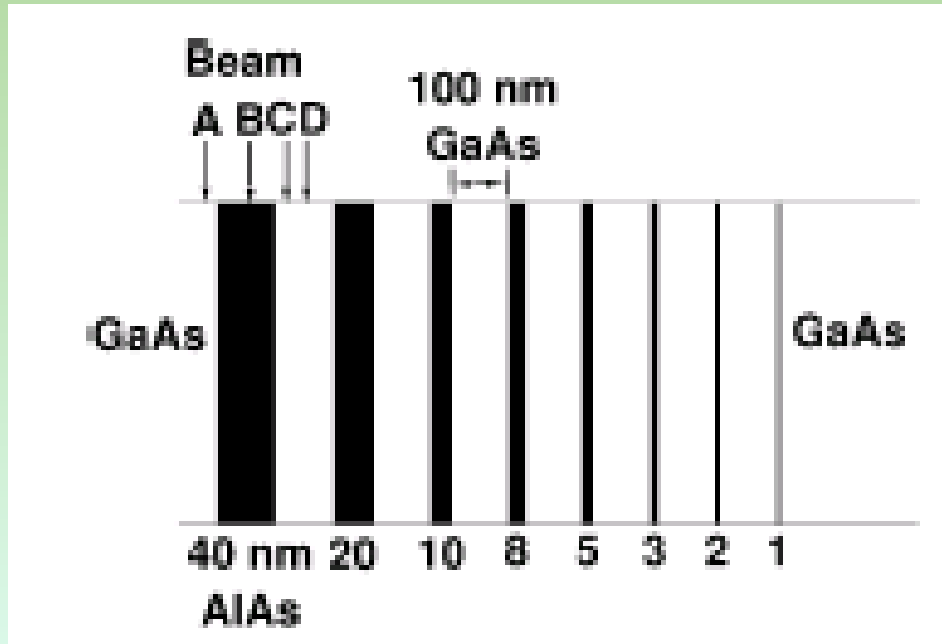
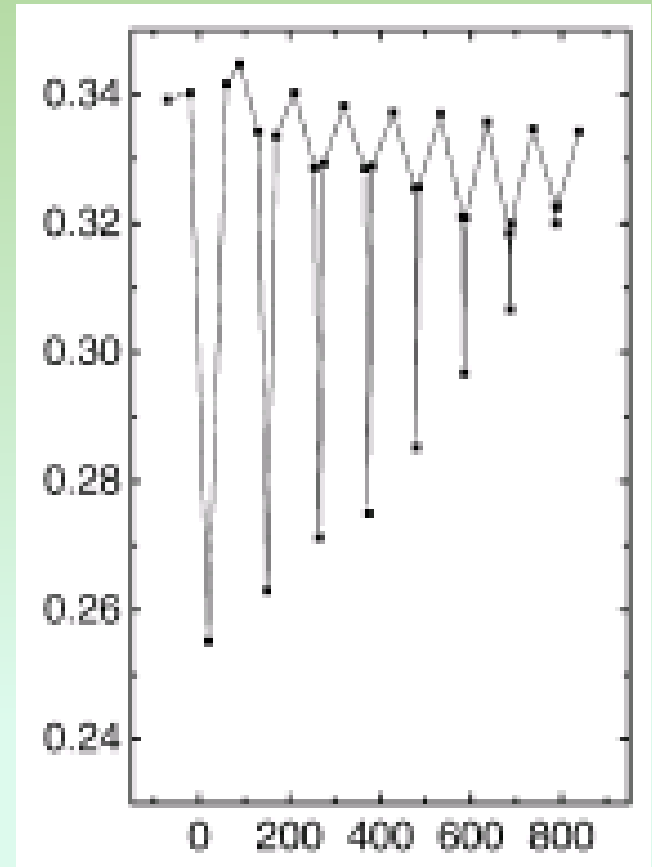


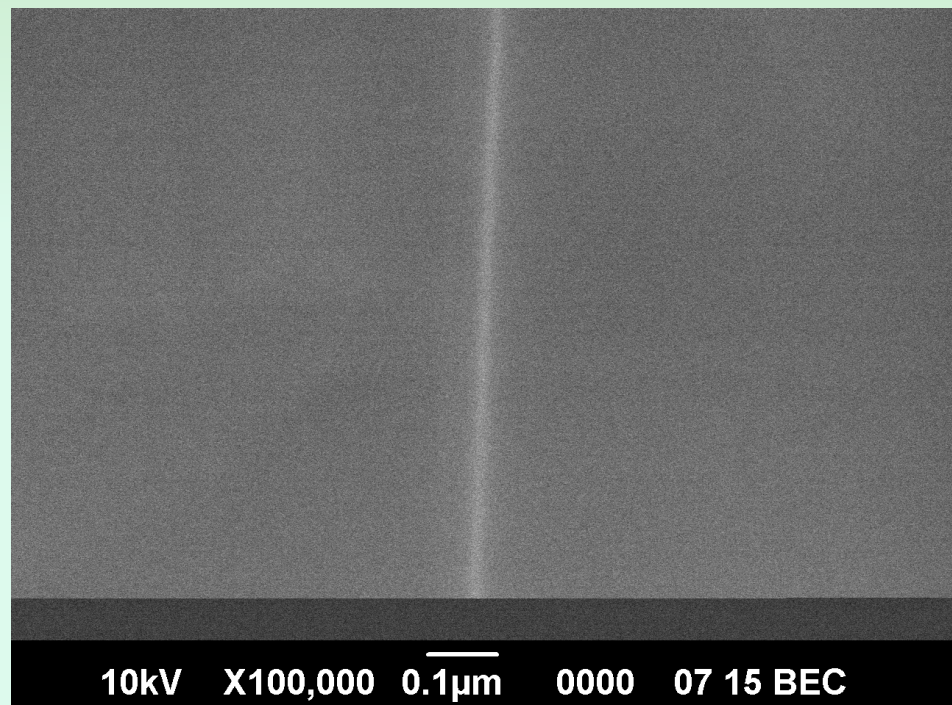
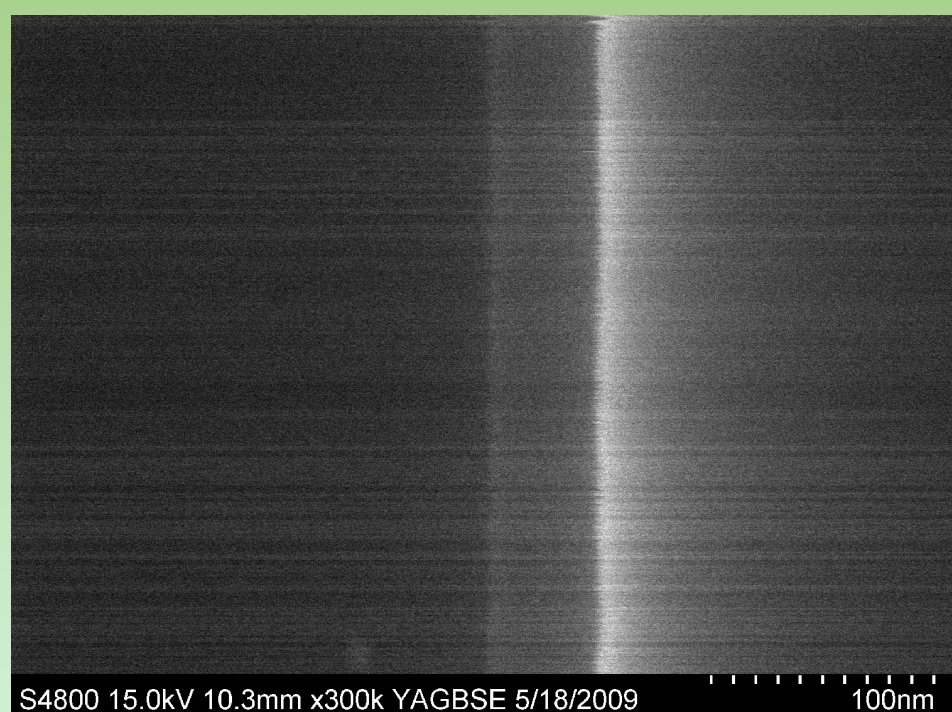
Схема образца
Слой AlAs в GaAs
(Ultramicroscopy **88**, 139, 2001)



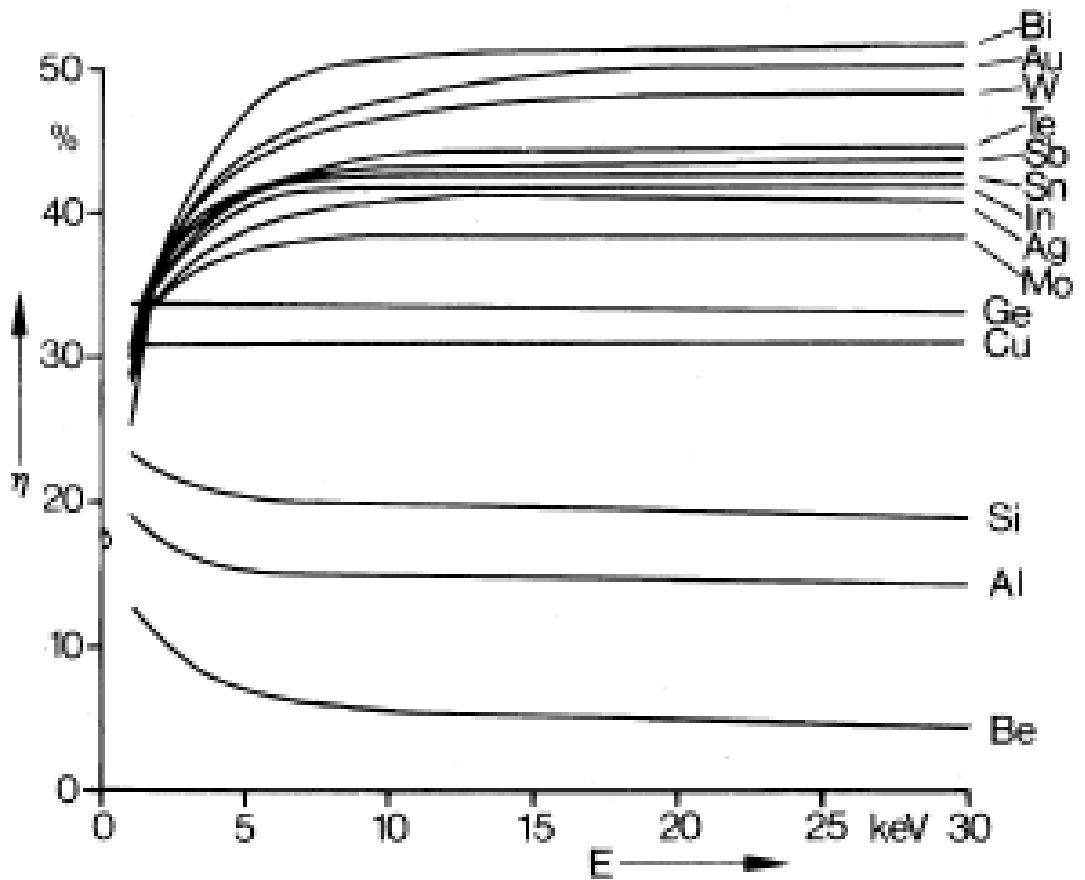
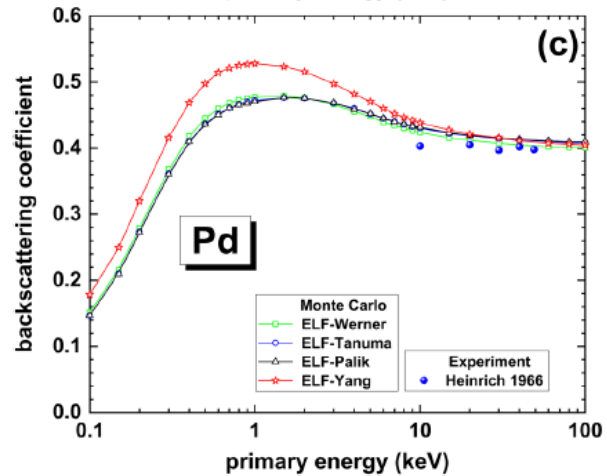
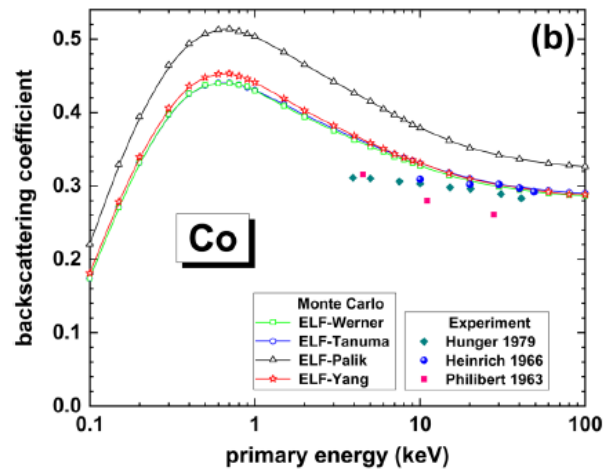
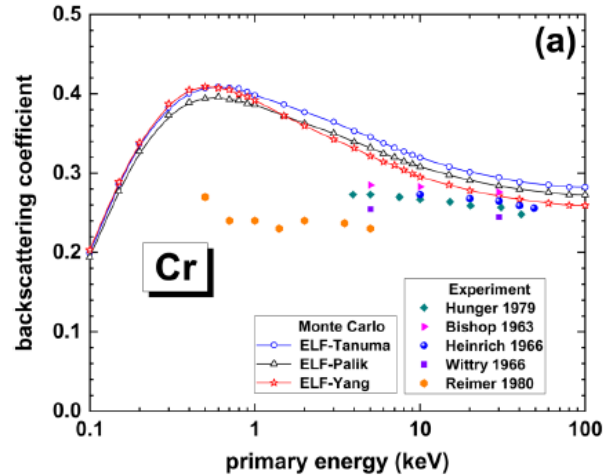
Профили BSE сигнала при 5 кэВ
(Ultramicroscopy **88**, 139, 2001)

Режим обратно отраженных электронов

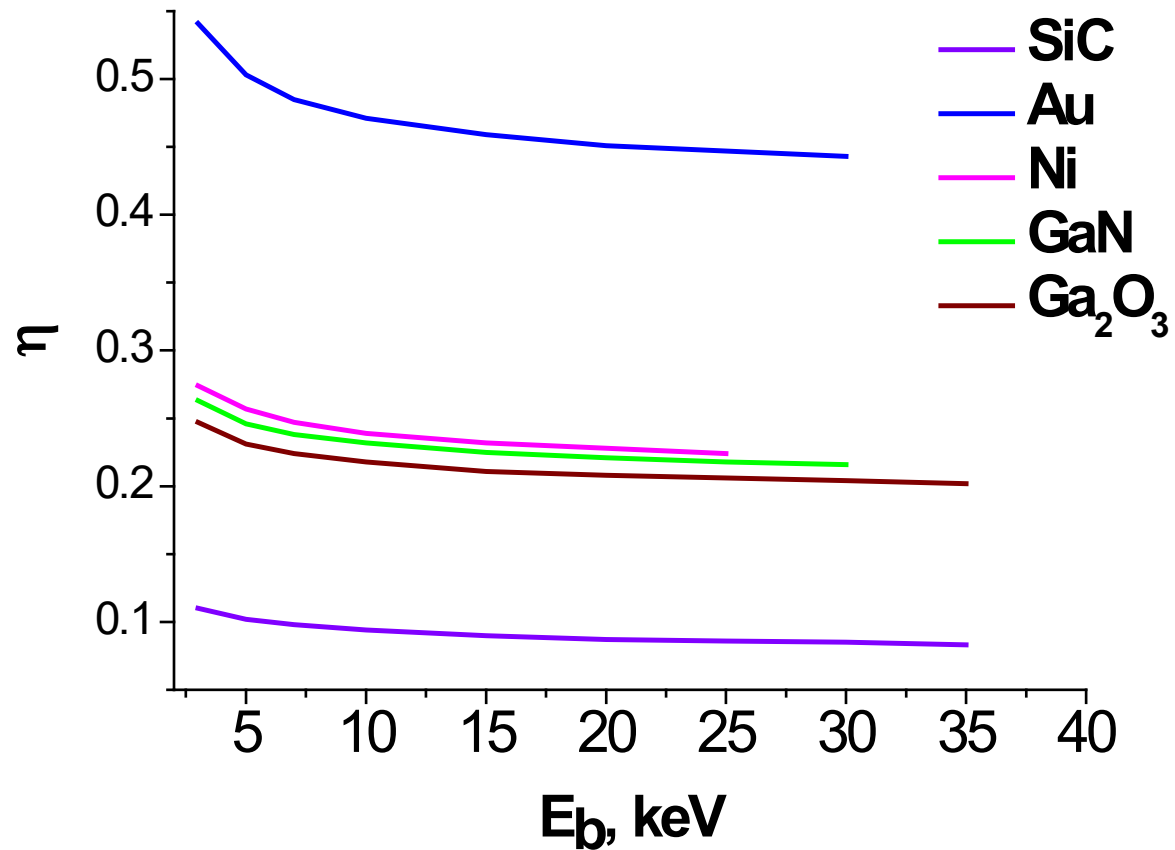
5 нм W в Si



Зависимость от E_b



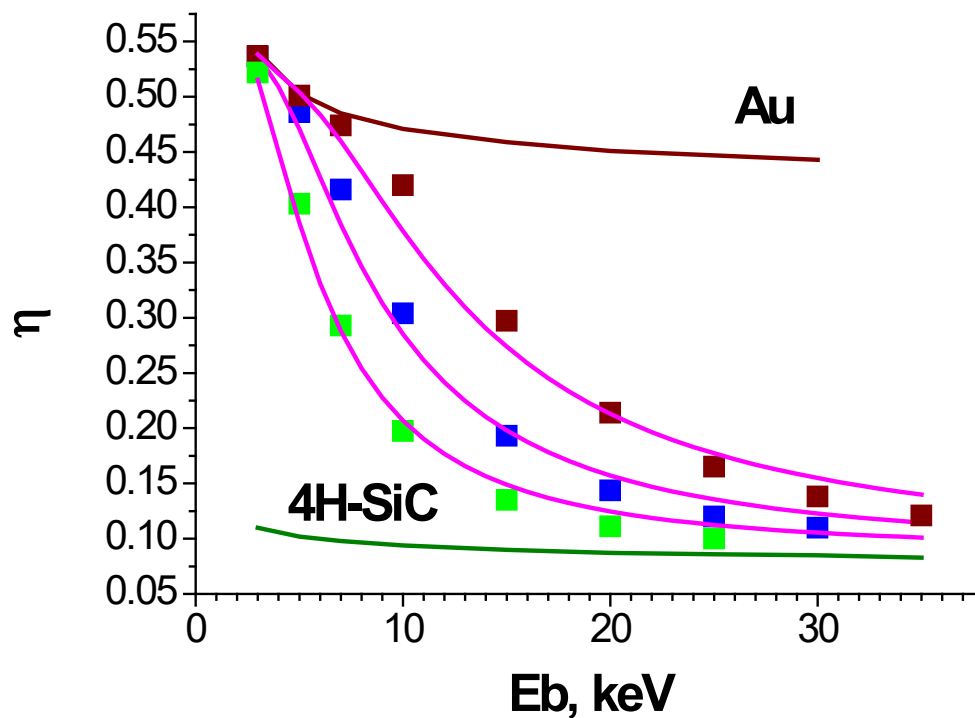
Зависимость от E_b



Доля энергии, уносимой обратно отраженными электронами

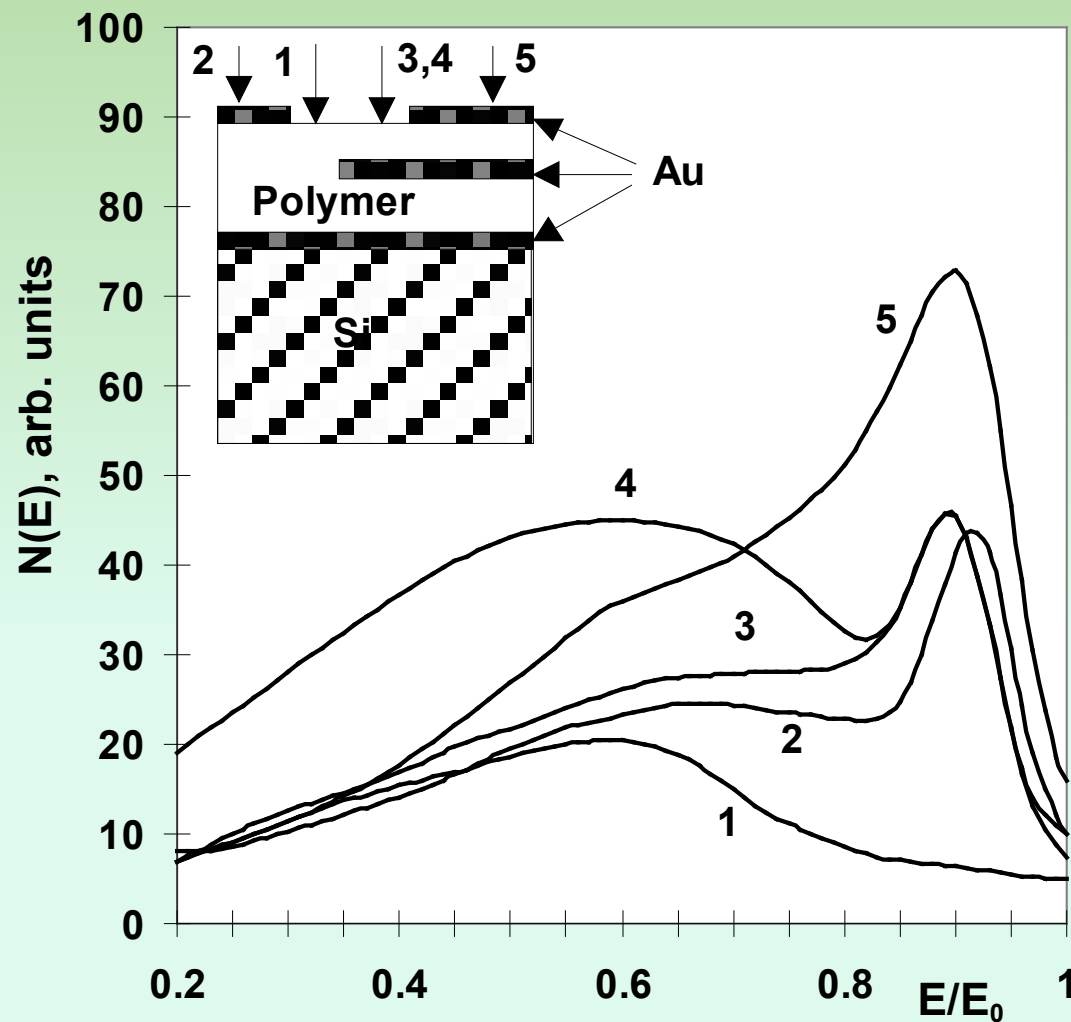
Зависимость η от E_b

Пленки Au толщиной 10, 20 и 40 нм на 4H-SiC



$$\eta_E = \eta_{Em} - (\eta_{Em} - \eta_{Esub}) \times \exp\left[-\frac{t_m}{a \times R_m}\right]$$

Режим обратно отраженных электронов



Сравнение режимов вторичных и обратно отраженных электронов

Сравнение режимов вторичных и обратно отраженных электронов

Во вторичных электронах частично проявляются свойства обратно отраженных.

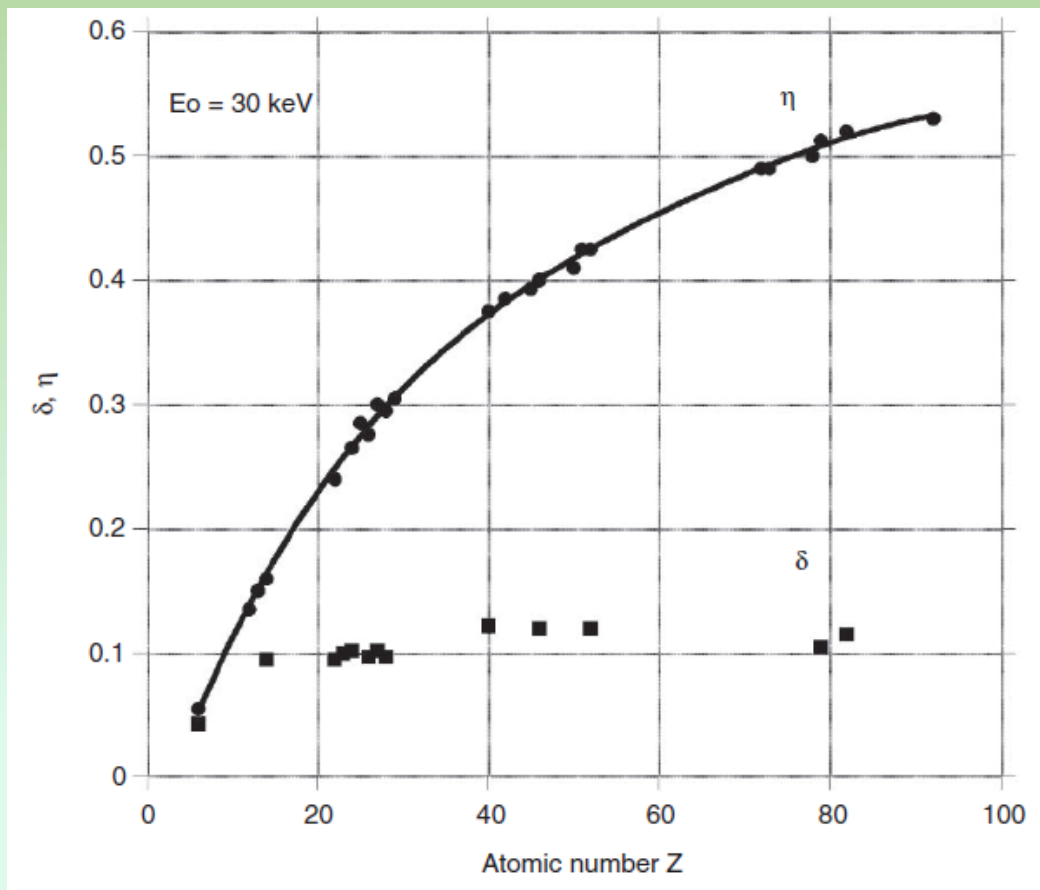
Потенциальный контраст и контраст легирования только во вторичных электронах.

Вторичные электроны более чувствительны к рельефу поверхности.

В обратно отраженных электронах легче разделить контрасты от плотности и топографии.

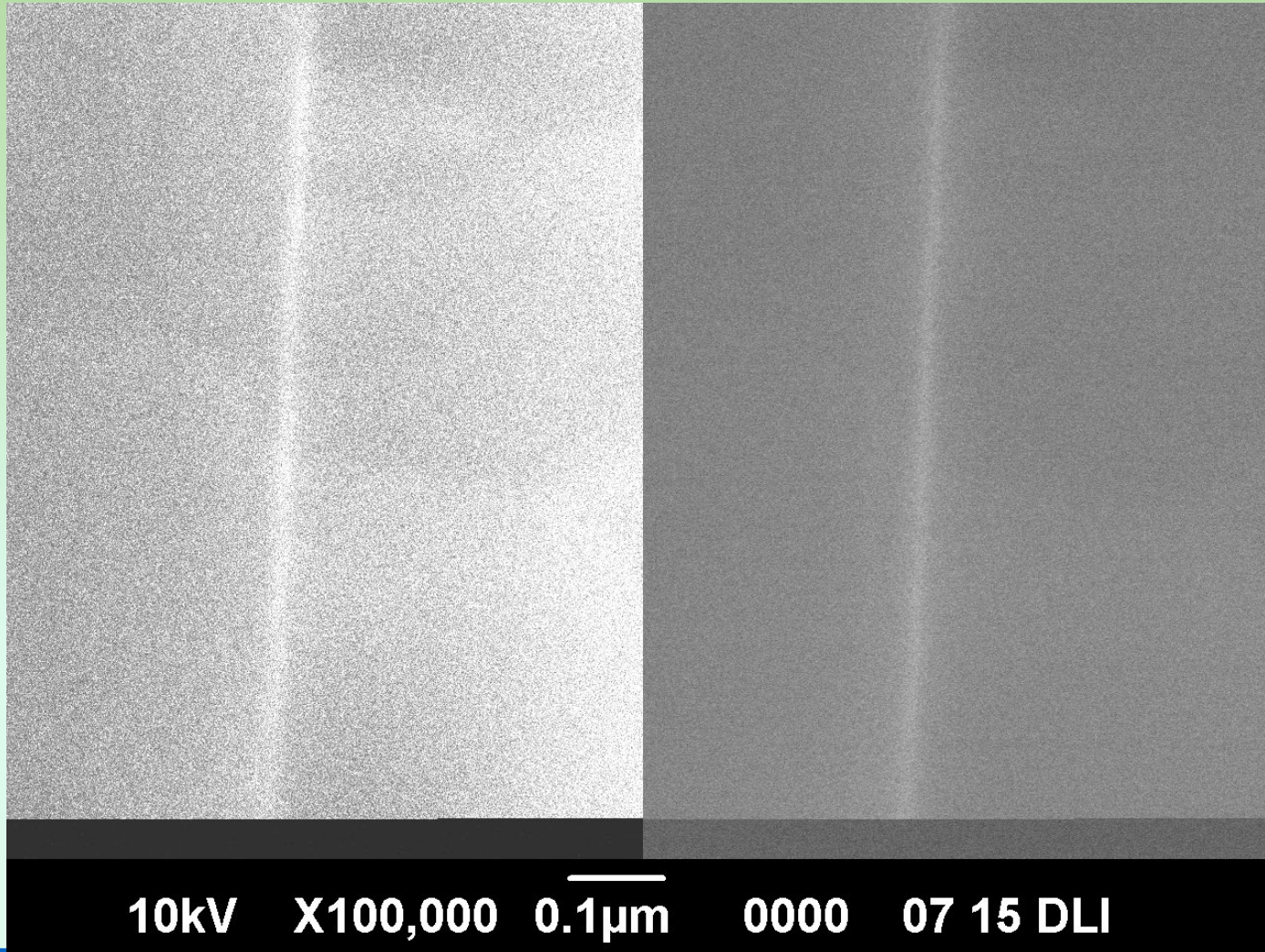
Обратно отраженные электроны более чувствительны к плотности материала.

Сравнение режимов вторичных и обратно отраженных электронов



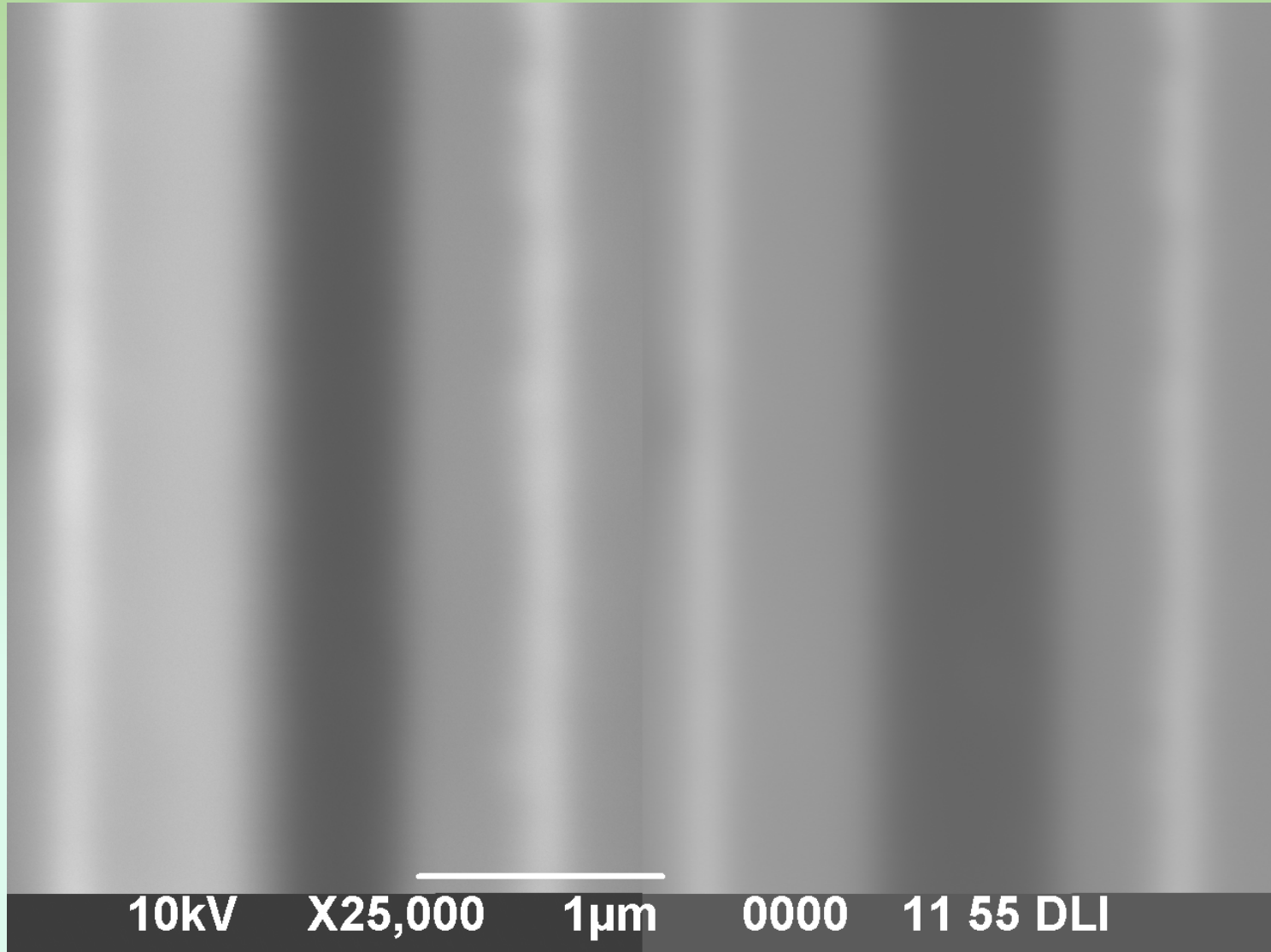
Зависимость коэффициентов эмиссии вторичных и
обратно отраженных электронов от атомного номера

Сравнение режимов ВЭ и ОРЭ



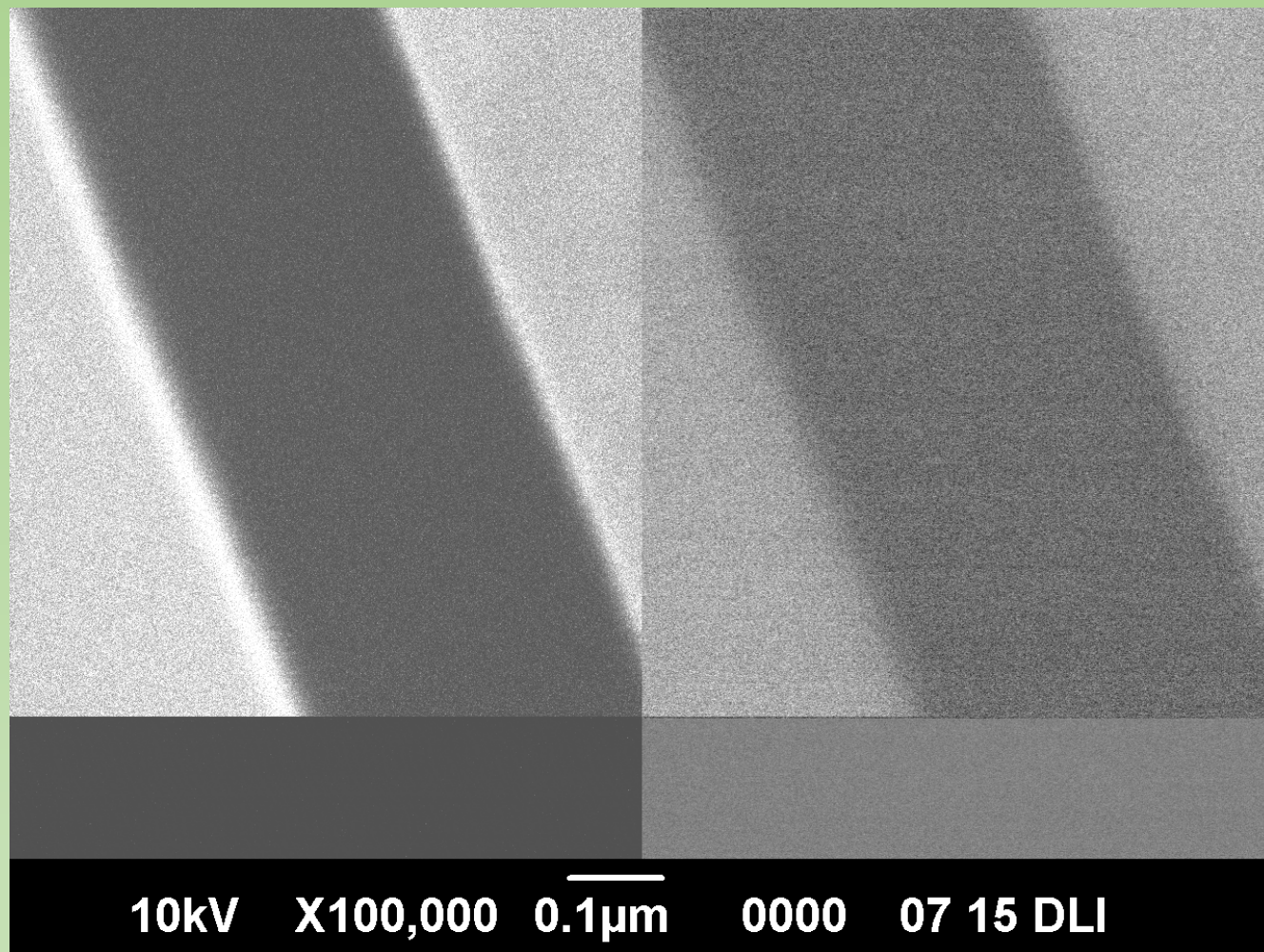
Слой W в Si
толщиной 5 нм

Сравнение режимов ВЭ и ОРЭ



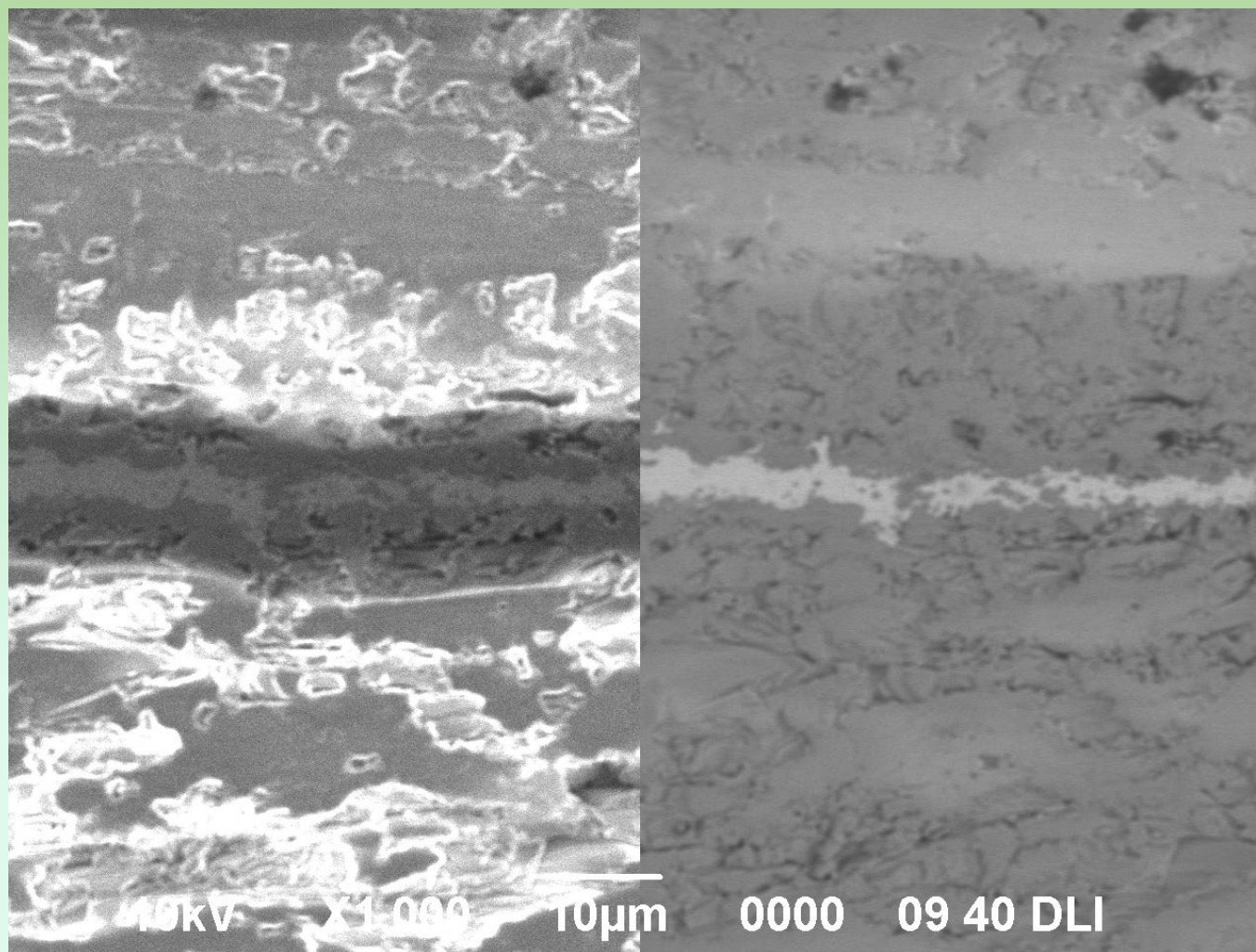
Слой W в Si толщиной 5 нм

Сравнение режимов ВЭ и ОРЭ



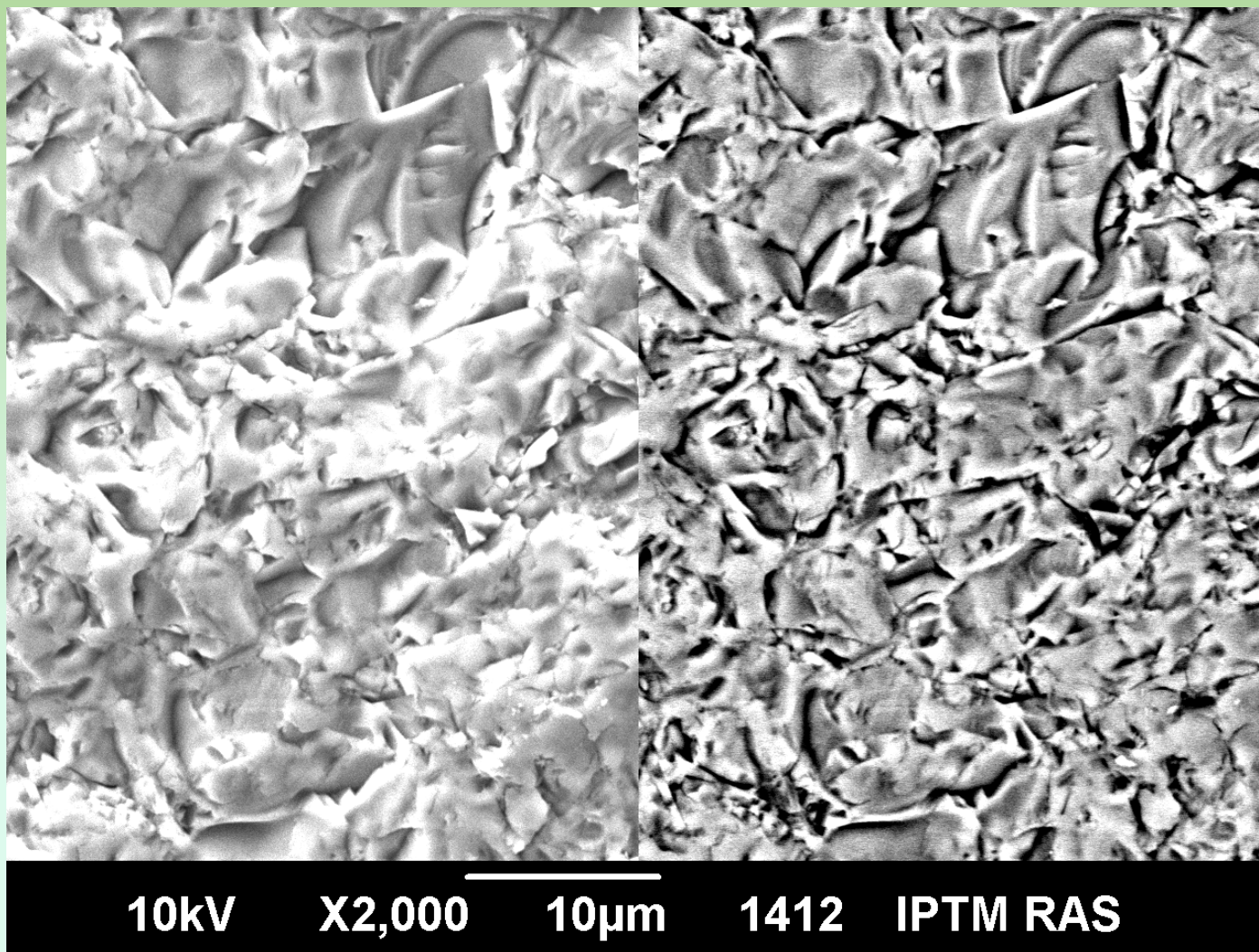
Изображения щели в Si

Сравнение режимов ВЭ и ОРЭ



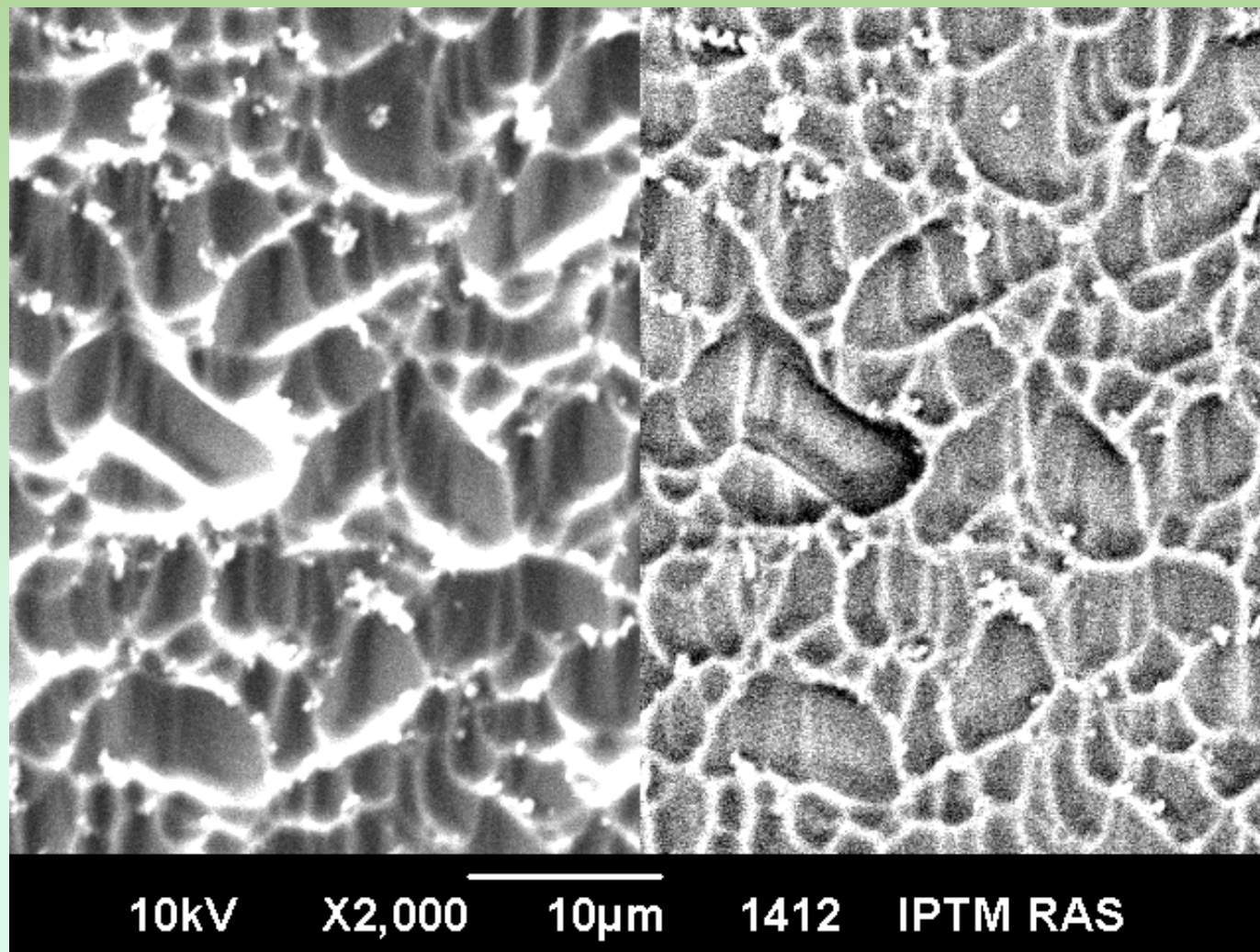
Слой золота в лангасите

Сравнение режимов ВЭ и ОРЭ



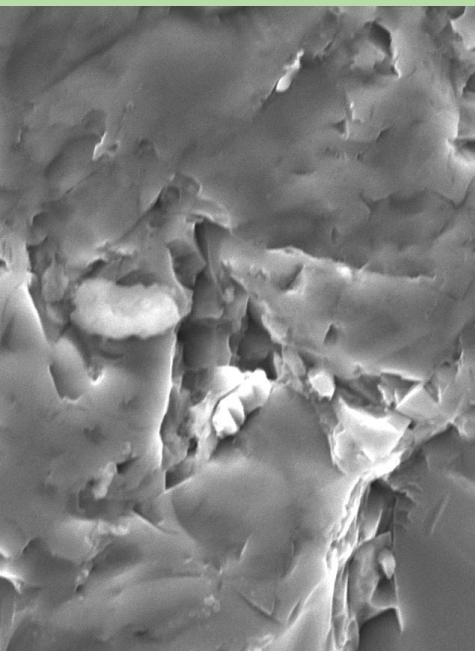
Профилированный Si

Сравнение режимов ВЭ и ОРЭ

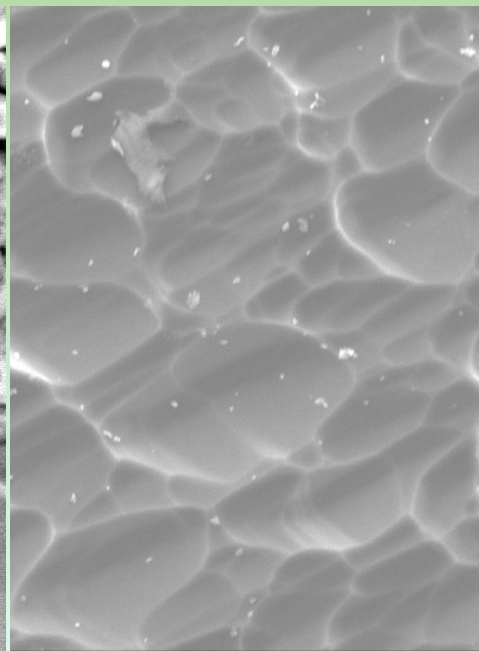
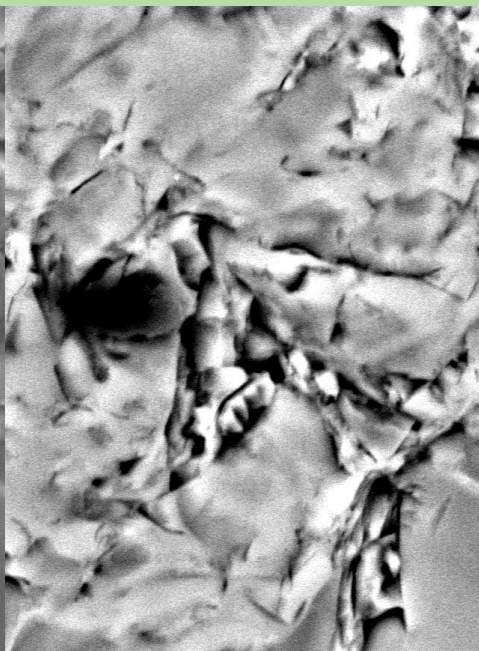


Профилированный Si

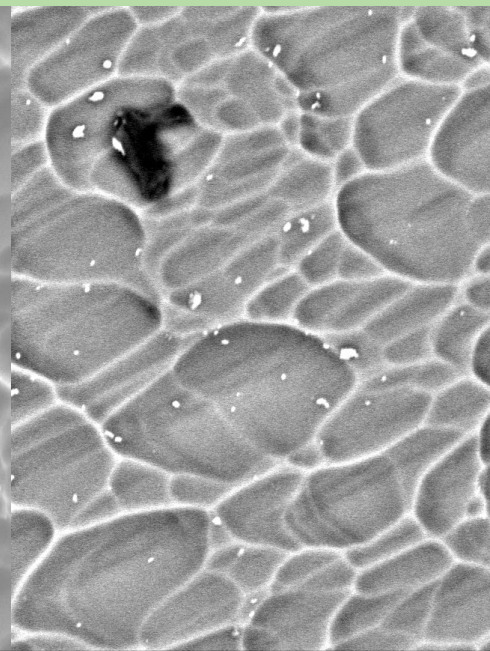
Сравнение режимов ВЭ и ОРЭ



10kV X4,300 5μm 1412 IPTM RAS

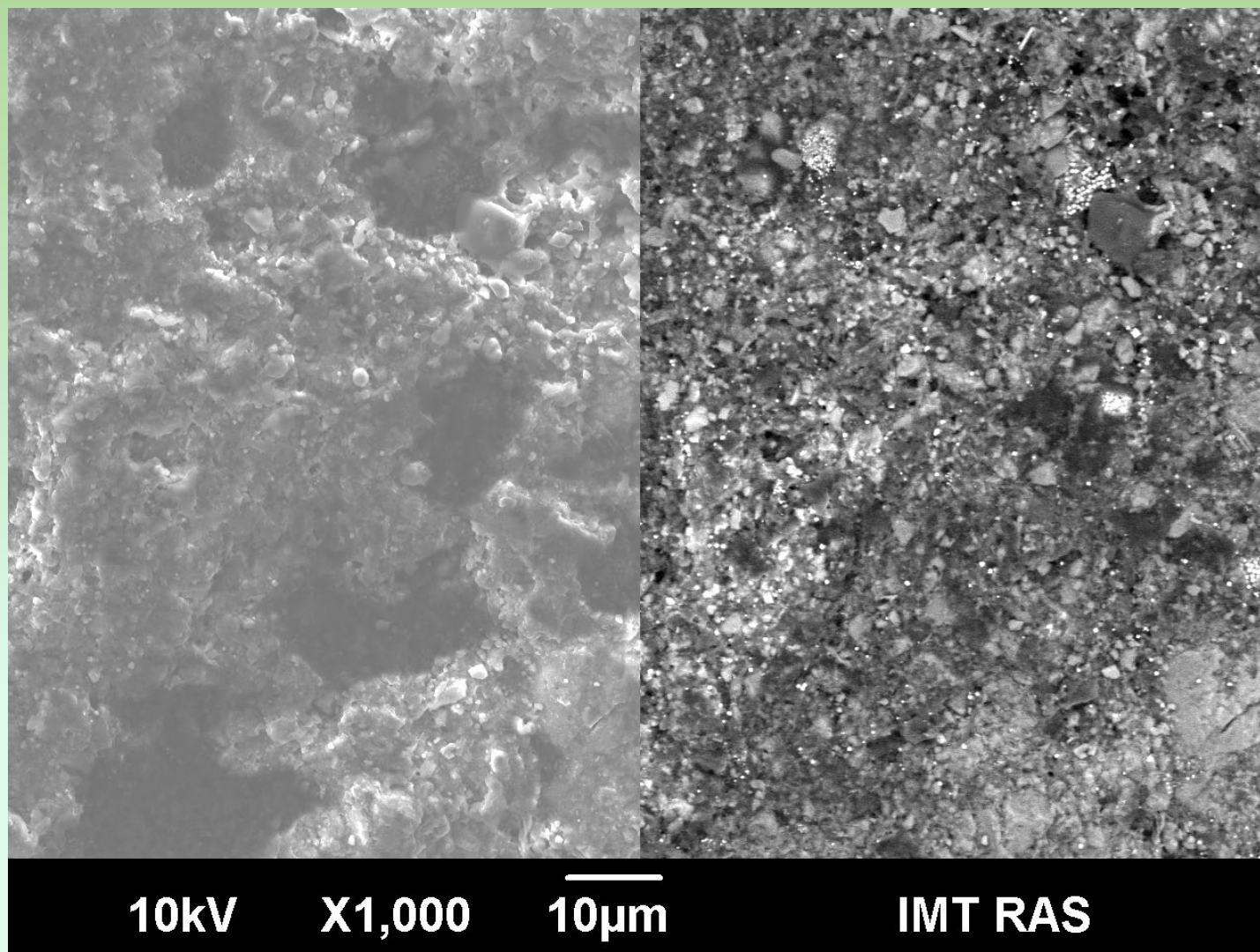


10kV X2,300 10μm 1412 IPTM RAS



Включение углерода в мультикристаллическом кремнии

Сравнение режимов ВЭ и ОРЭ



Сланец, ОРЭ (control) справа