

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ УСКОРЕННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ С ТВЕРДЫМ ТЕЛОМ

История развития РЭМ

Первый РЭМ – М. Knoll (1935) –
разрешение порядка 100 мкм

Первый РЭМ с линзой – пучок $\sim 50\text{-}100$ нм

Manfred Von Ardenne -1938 (образец на
просвет)

РЭМ на отражение - Zworykin, Hiller,
Snyder, 1942

Отец современного РЭМ - Charles Oatley
9 студентов 1948-1960

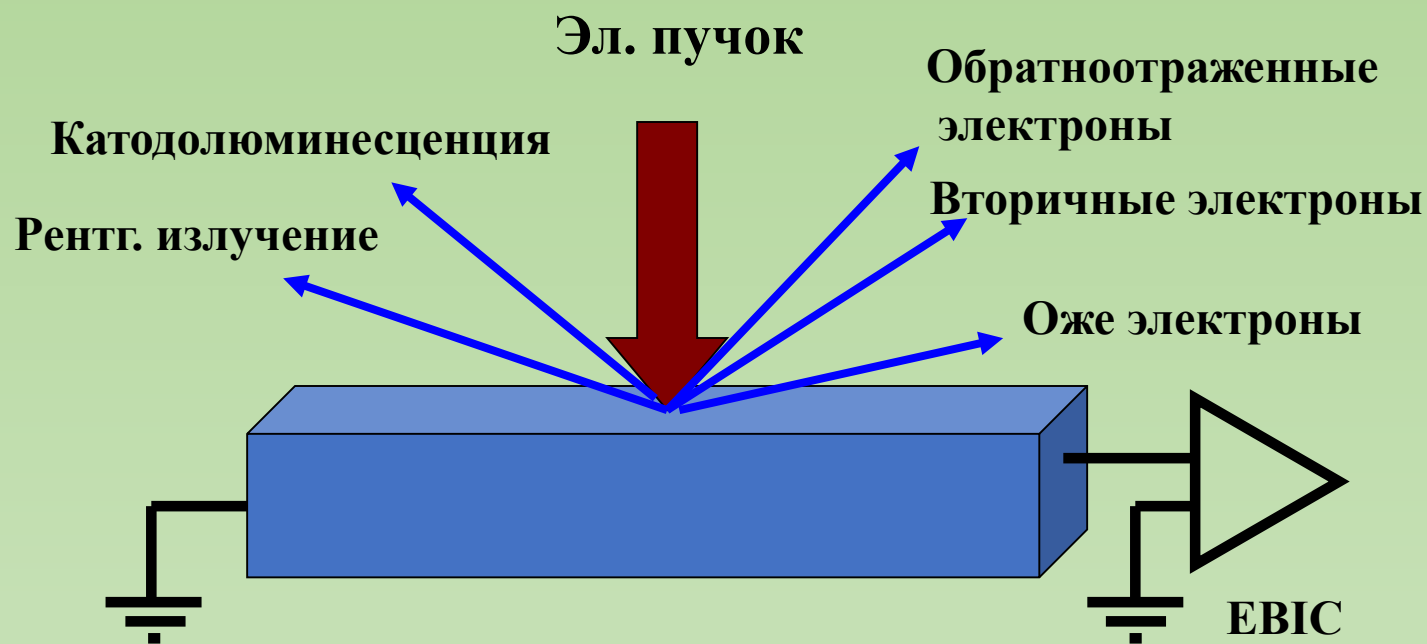
(D. McMullan, K.C.A. Smith, O.C. Wells, T.E.
Everhart, R.F.M. Thornley и др.)

1951 Castaing R, e-beam для микроанализа

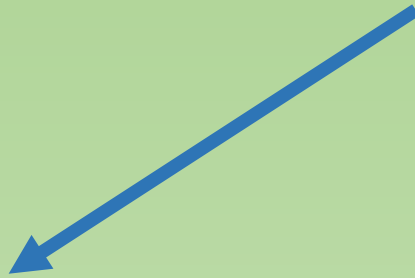
1960 - Microscan

1961 – Cambridge Instrument – I прототип

Взаимодействие электронного пучка с твердым телом

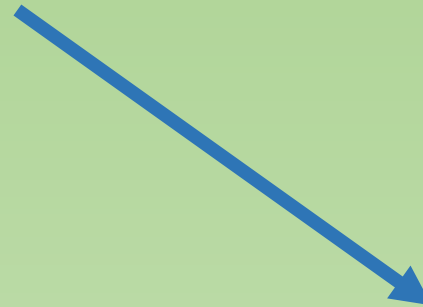


Процессы взаимодействия электронов с твердым телом



Упругие

Воздействуют на траектории электронов пучка без существенных потерь энергии



Неупругие

Процессы, при которых происходит передача энергии твердому телу

Неупругие процессы взаимодействия

При лобовом столкновении атому передается энергия

$$\Delta E = \frac{2mM}{(m + M)^2} E$$

Поэтому в большинстве случаев энергии электронов в РЭМ слишком малы для радиационного повреждения и определяющий вклад в потери энергии дают неупругие ионизационные процессы взаимодействия с электронами атомных оболочек, включающие ионизацию атомов.

Неупругие процессы взаимодействия включают

Инжекцию слабосвязанных электронов внешней оболочки (энергия связи в несколько эВ) ; инъекцию сильно связанных электронов внутренней оболочки (энергия связи от сотен до тысяч эВ); замедление электронов пучка в электрическом поле атомов с генерацией рентгеновского континуума в диапазоне энергий от нескольких эВ до энергии падающего пучка (тормозное излучение); генерацию плазмонов и фононов. При этом траектории электронов пучка изменяются незначительно.

**Потери энергии из-за неупругого рассеяния
устанавливают предельную глубину проникновения
электронов пучка в образце, прежде чем они потеряют
всю свою энергию и будут поглощены образцом.**

Неупругие процессы взаимодействия

Неупругие процессы дискретны и независимы, однако Bethe удалось описать их коллективное действие в приближении непрерывных потерь энергии как

$$\begin{aligned} dE/dx &= (-2\pi e^4 N_0 Z \rho / A E_m) \log(1.166 E_m / J) \\ &= -7.85 \times 10^4 (Z \rho / A E_m) \log(1.166 E_m / J) \quad (\text{keV/cm}) \end{aligned}$$

J - потенциал ионизации

$$J(\text{keV}) = (9.76 Z + 58.5 Z^{-0.19}) \times 10^{-3}$$

Z – атомный номер

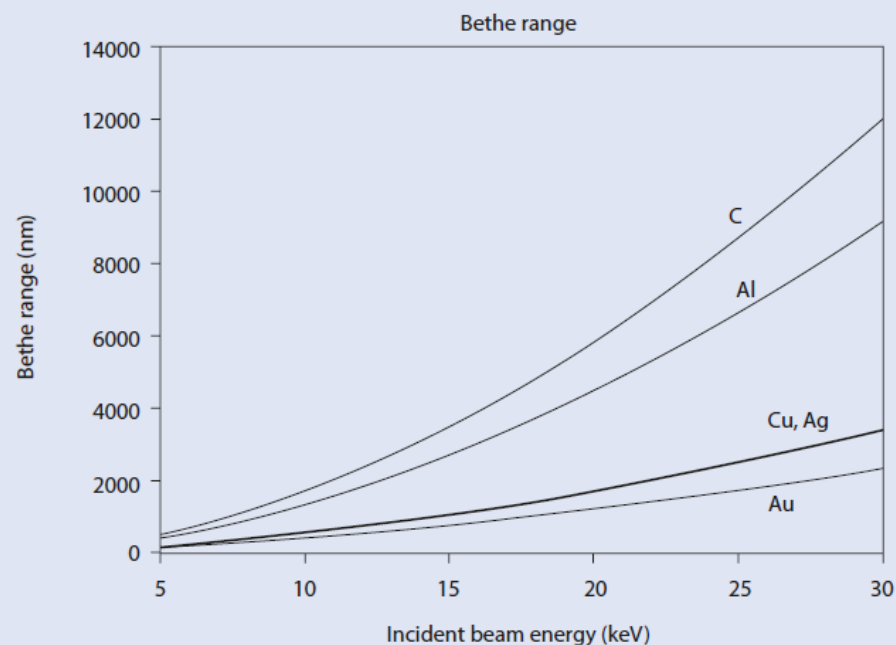
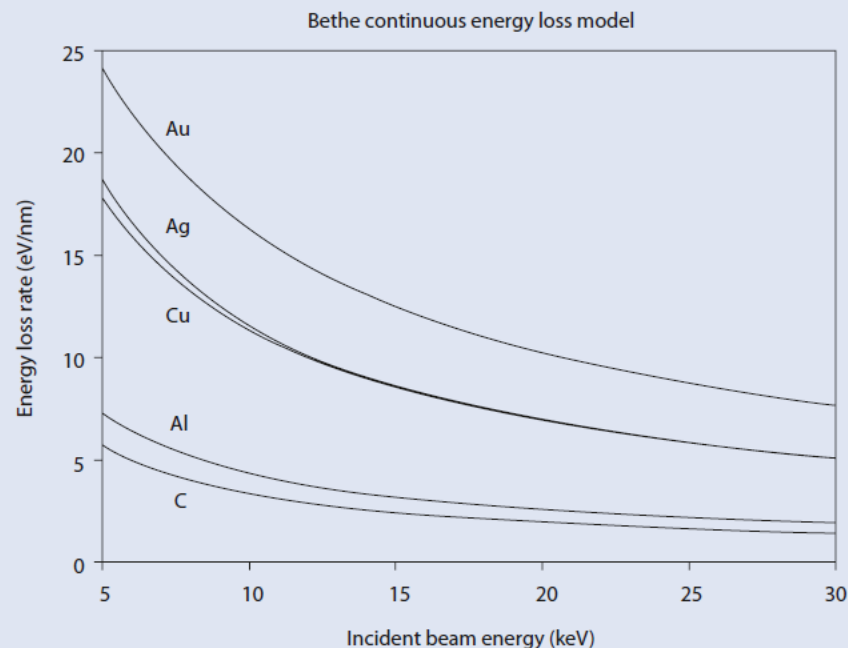
A – атомный вес

$$dE/ds \sim (Z/A) \times (\rho/E)$$

$$E dE \sim \rho ds$$

$$E^2/\rho \sim s$$

Неупругие процессы взаимодействия



Потери энергии уменьшаются с ее повышением
Пройденный до остановки путь сверхлинейно
зависит от энергии

Неупругие процессы взаимодействия

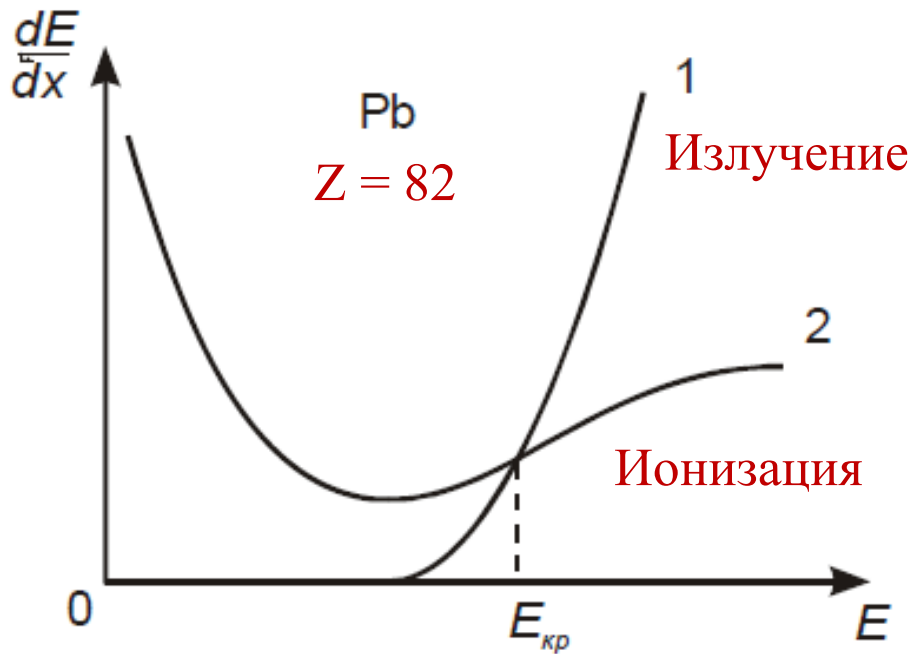
Плазмон — это коллективная продольная волна плотности заряда валентных или проводящих электронов. Плазмонные потери и меж- и внутризонные переходы соответствуют потерям энергии в диапазоне 0-50 эВ и углам рассеяния меньше 10 мрад.

Чем больше зарядовое число Z , тем сильнее кулоновское взаимодействие и больше потери электрона на тормозное излучение. Отношение потерь энергии за счет тормозного излучения к потерям за счет ионизации

$$\frac{E_{\text{торм.}}}{E_{\text{иониз.}}} = \frac{E_0 \cdot Z}{800} \quad E \text{ в МэВ}$$

Тормозное излучение имеет непрерывный спектр

Неупругие процессы взаимодействия

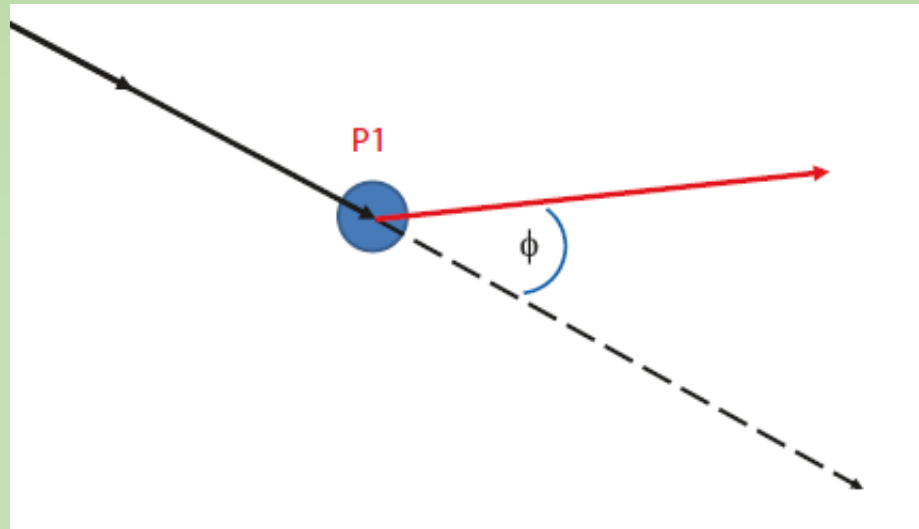


$$E_{кр} = 600/Z \text{ (МэВ)}$$

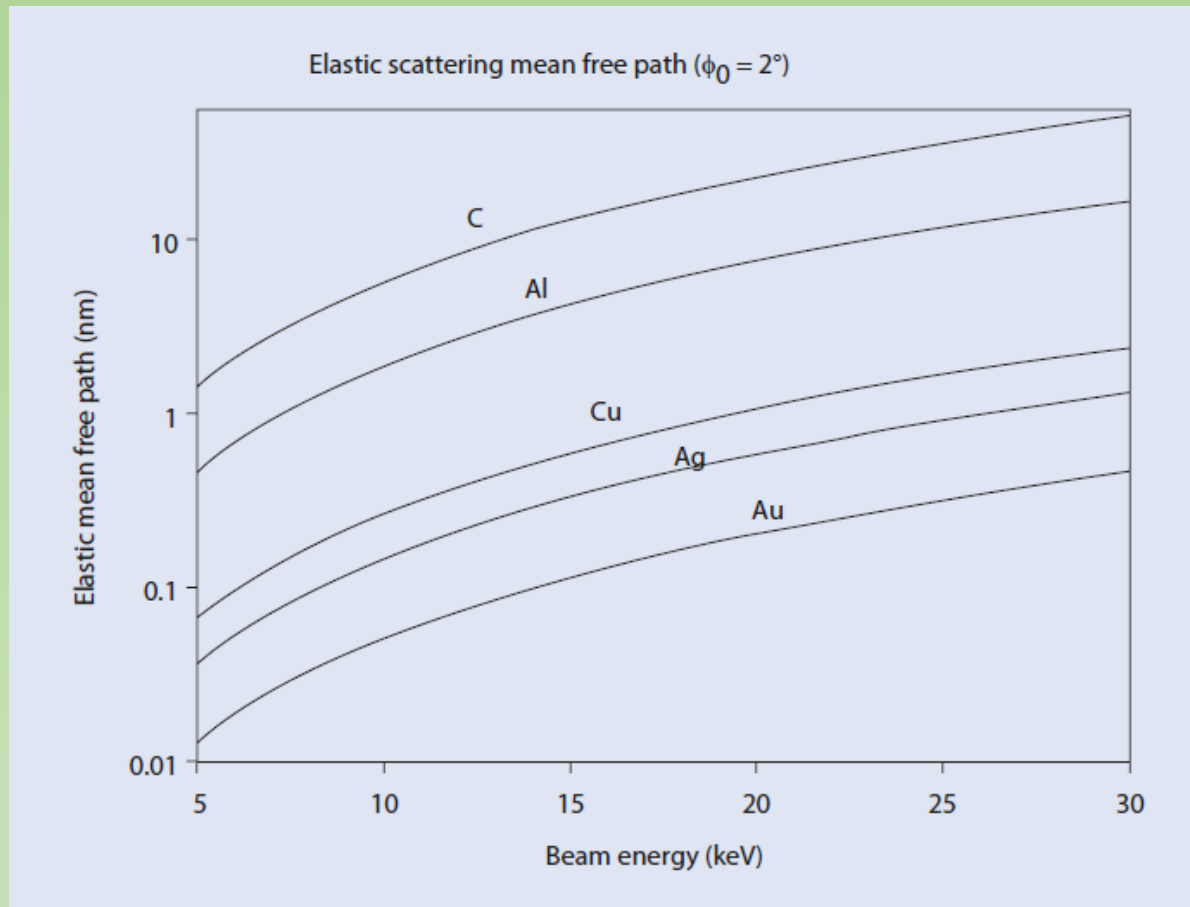
В потерях на излучение энергия теряется в результате меньшего числа взаимодействий, но более крупными порциями, чем в потерях на ионизацию. Поэтому флуктуации в потерях на излучение превышают флуктуации ионизационных потерь.

Упругие процессы взаимодействия

Упругое рассеяние – отклонение электрона электрическим полем атома (положительный ядерный заряд частично экранируется отрицательным зарядом орбитальных электронов атома), в результате чего электрон отклоняется от своего предыдущего пути на новую траекторию.



Упругое рассеяние



E [keV]		1	5	10	20	30	50	
C Z=6 $\rho = 2 \text{ g/cm}^3$ $\nu \simeq 3$	σ_{el}	0.65	0.11	0.055	0.027	0.018	0.012	$\times 10^{-16} \text{ cm}^2$
	Λ_{el}	1.5	9	18	37	55	83	nm
	Λ_{t}	0.4	2.3	4.5	9	14	20	nm
	R	0.033	0.49	1.55	4.9	9.7	22.6	μm
Al Z=13 $\rho = 2.7 \text{ g/cm}^3$ $\nu \simeq 1.5$	σ_{el}	1.26	0.31	0.16	0.08	0.053	0.034	$\times 10^{-16} \text{ cm}^2$
	Λ_{el}	1.3	5	10	21	31	49	nm
	Λ_{t}	0.5	2	4	8	12	20	nm
	R	0.025	0.36	1.14	3.6	7.1	16.7	μm
Cu Z=29 $\rho = 8.9 \text{ g/cm}^3$ $\nu \simeq 0.6$	σ_{el}	1.84	0.64	0.37	0.21	0.15	0.11	$\times 10^{-16} \text{ cm}^2$
	Λ_{el}	0.64	1.8	3.2	5.6	7.8	10.7	nm
	Λ_{t}	0.4	1.1	2.0	3.5	4.9	6.70	nm
	R	0.007	0.11	0.35	1.10	2.26	5.1	μm
Ag Z=47 $\rho = 10.5 \text{ g/cm}^3$ $\nu \simeq 0.4$	σ_{el}	3.09	1.15	0.71	0.43	0.32	0.22	$\times 10^{-16} \text{ cm}^2$
	Λ_{el}	0.5	1.5	2.4	4.0	5.3	7.7	nm
	Λ_{t}	0.4	1.0	1.7	2.8	3.8	5.5	nm
	R	0.006	0.09	0.29	0.93	1.8	4.3	μm
Au Z=79 $\rho = 19.3 \text{ g/cm}^3$ $\nu \simeq 0.2$	σ_{el}	3.93	1.60	1.05	0.67	0.52	0.37	$\times 10^{-16} \text{ cm}^2$
	Λ_{el}	0.43	1.0	1.6	2.5	3.3	4.6	nm
	Λ_{t}	0.36	0.9	1.3	2.1	2.7	3.8	nm
	R	0.003	0.05	0.17	0.51	1.0	2.3	μm

$$\nu = \sigma_{\text{inel}}/\sigma_{\text{el}}$$

30 кэВ

$$\nu = 2.92$$

$\nu, \Lambda_{\text{t}}, \Lambda_{\text{e}}, R$

уменьшаются

30 кэВ

$$\nu = 0.22$$

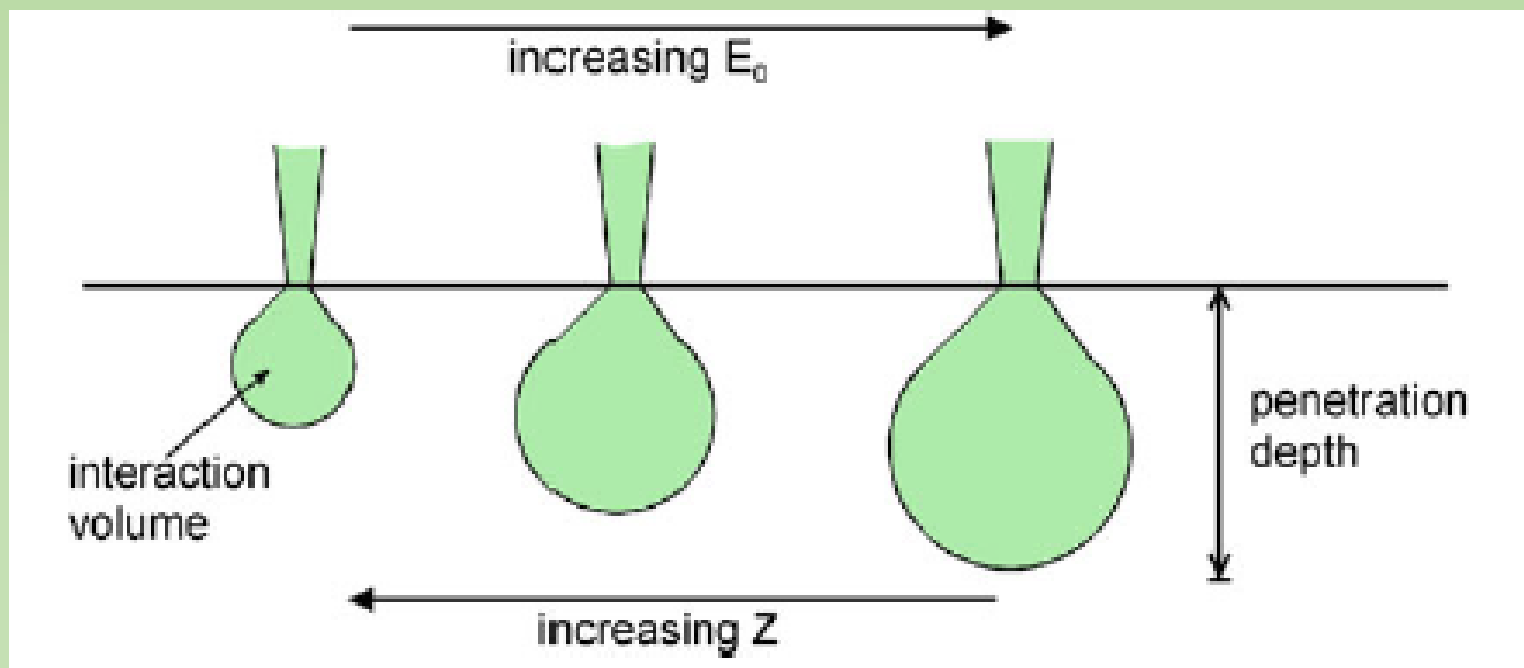
Z, ρ

Рассчитанные значения сечений упругого рассеяния σ_{el} , средней длины свободного пробега $\Lambda_{\text{el}} = 1/N\sigma_{\text{el}}$ (N – число атомов в cm^3), полной средней длины свободного пробега $\Lambda_{\text{t}} = \Lambda_{\text{e}}/(1 + \nu)$, $\nu = \sigma_{\text{inel}}/\sigma_{\text{el}}$ и R .

Процессы упругого и неупругого рассеяния приводят к уширению пучка

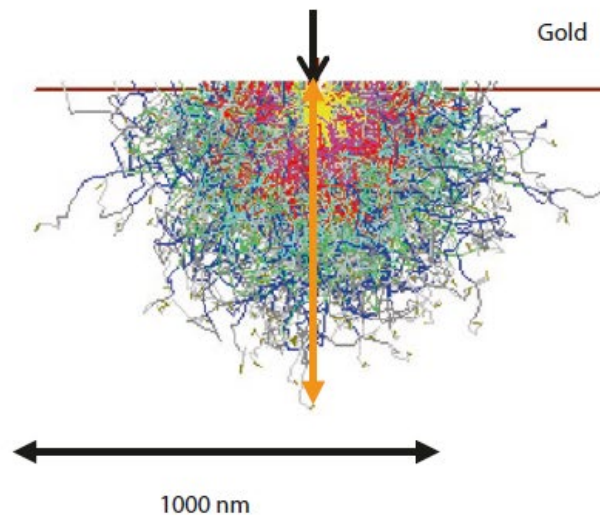
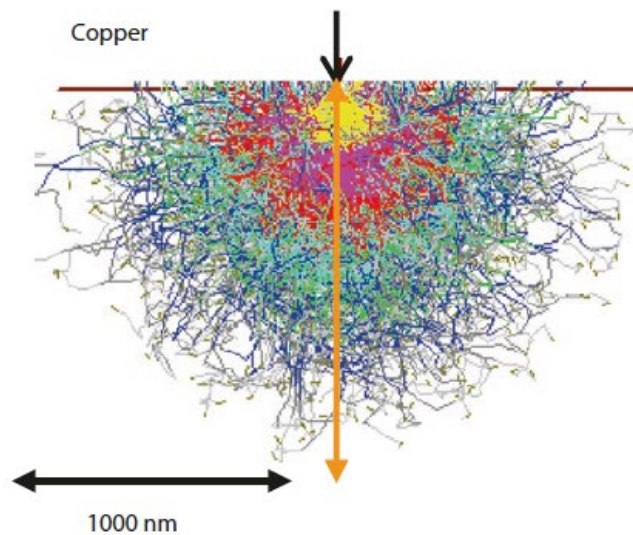
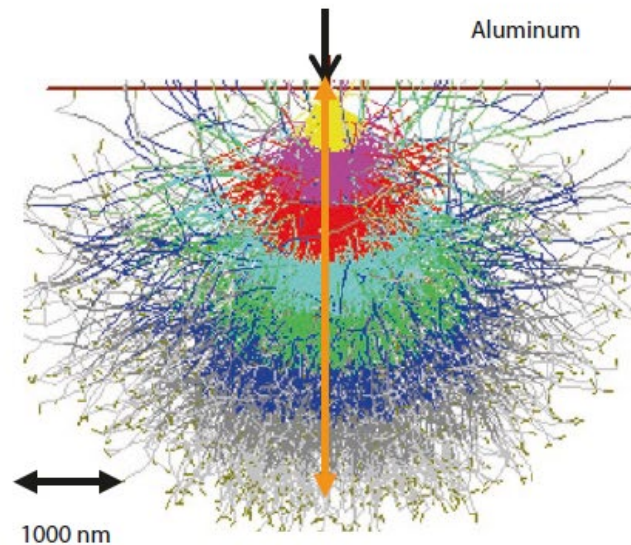
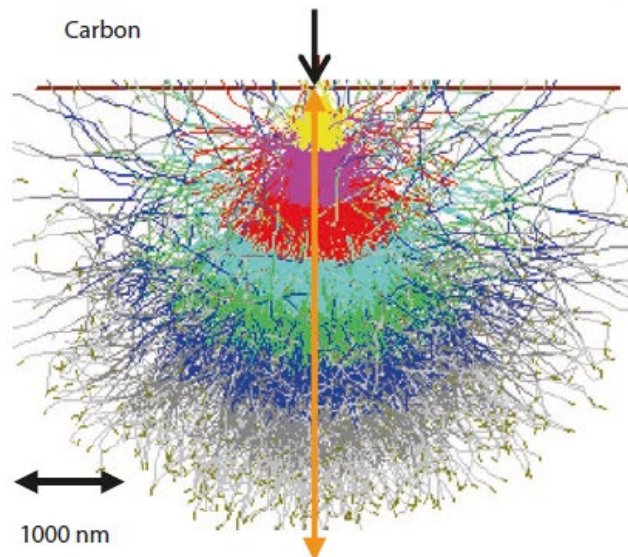
Уширение пучка $\sim z^{3/2}$

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

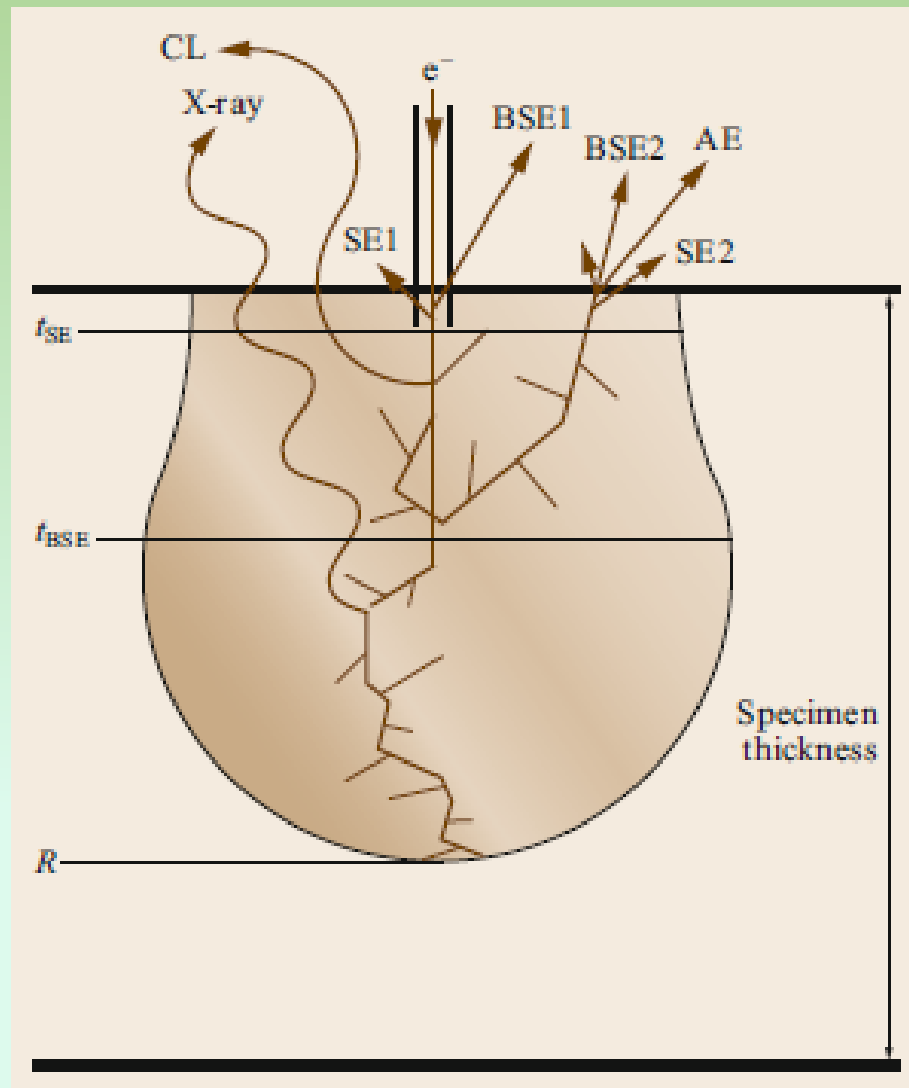


Моделирование методом Монте Карло

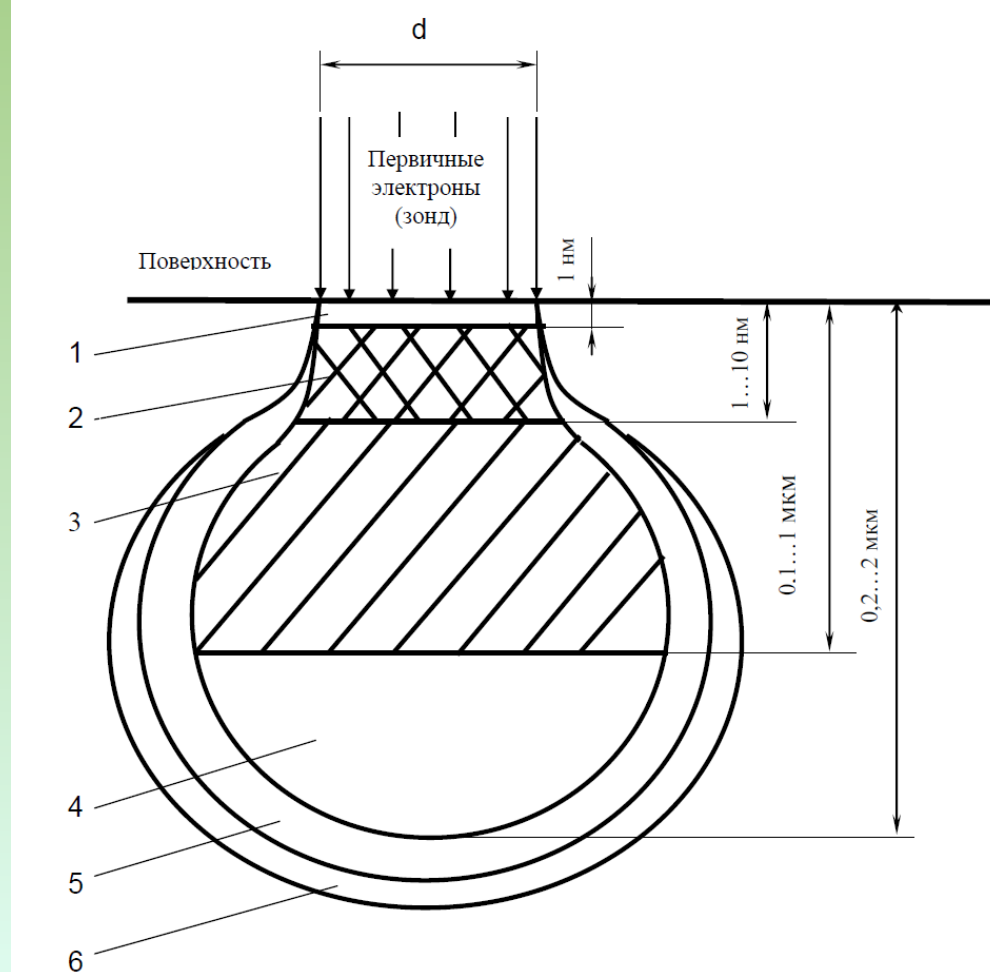
$E_0 = 20 \text{ keV}$; 0° tilt



Глубина формирования сигнала

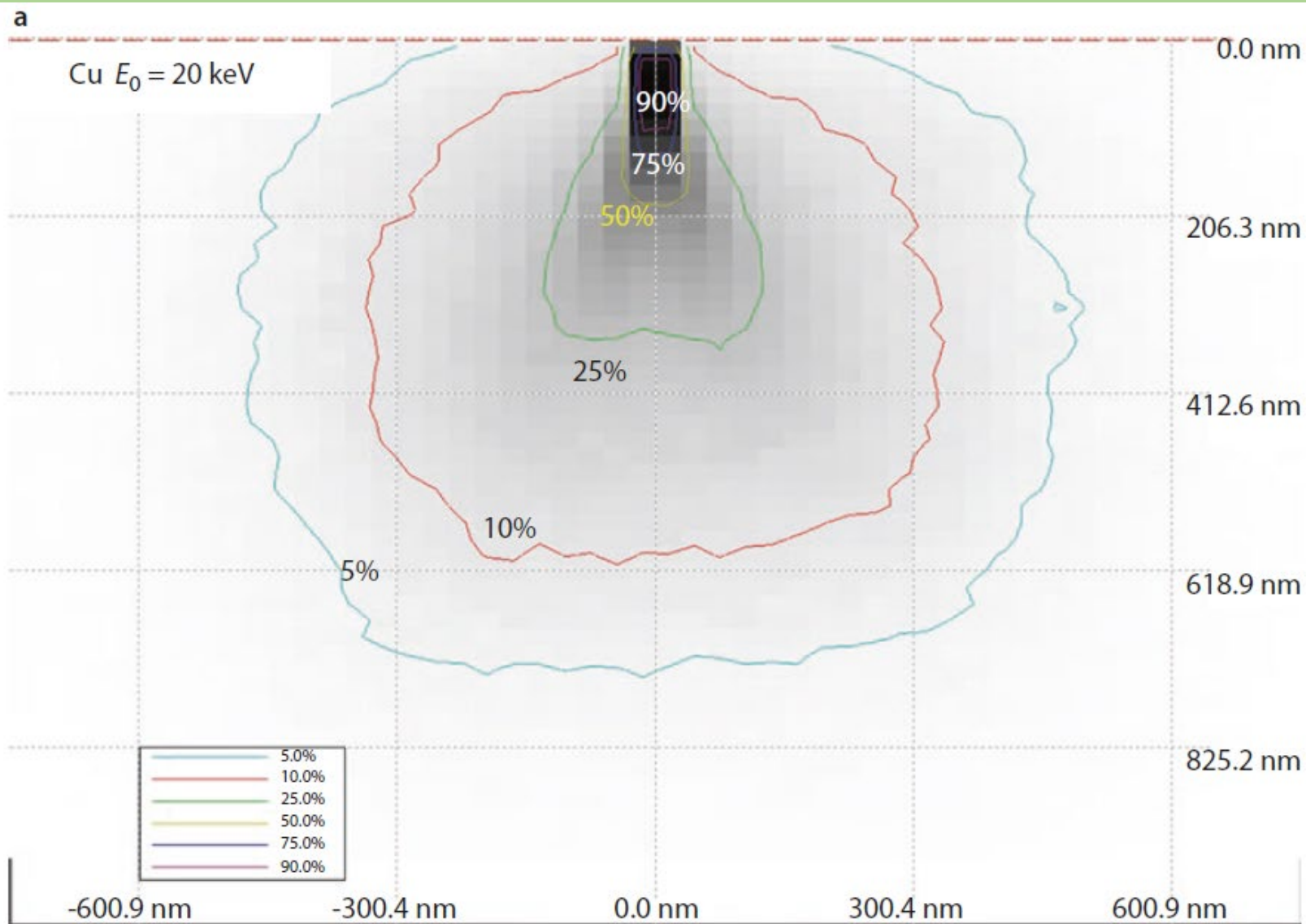


Глубина формирования сигнала

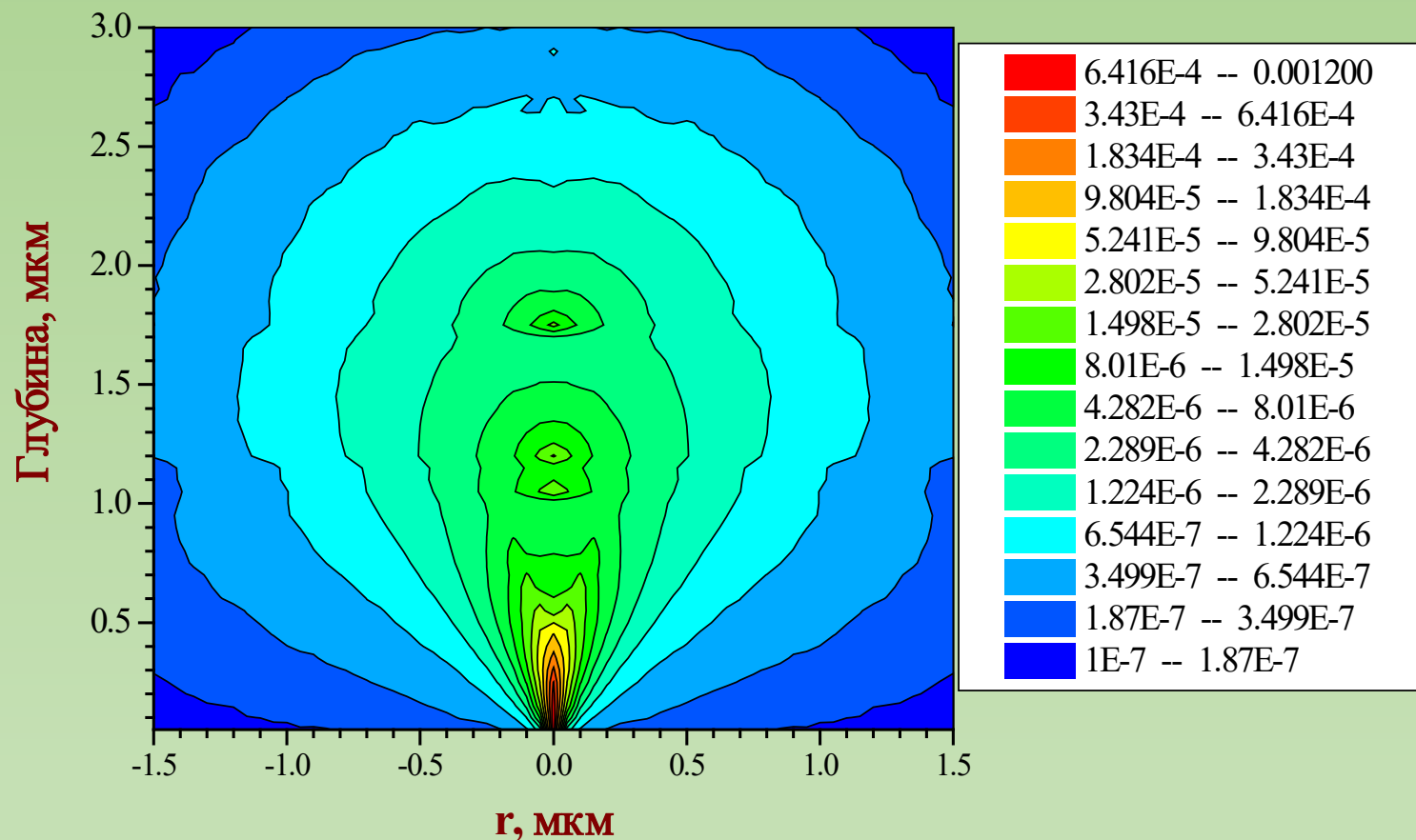


1 - Оже-электроны, 2 – SE, 3 – BSE, 4 – X-Ray (характеристическое), 5 – X-Ray (тормозное), 6 – Люминесценция.

Моделирование методом Монте Карло

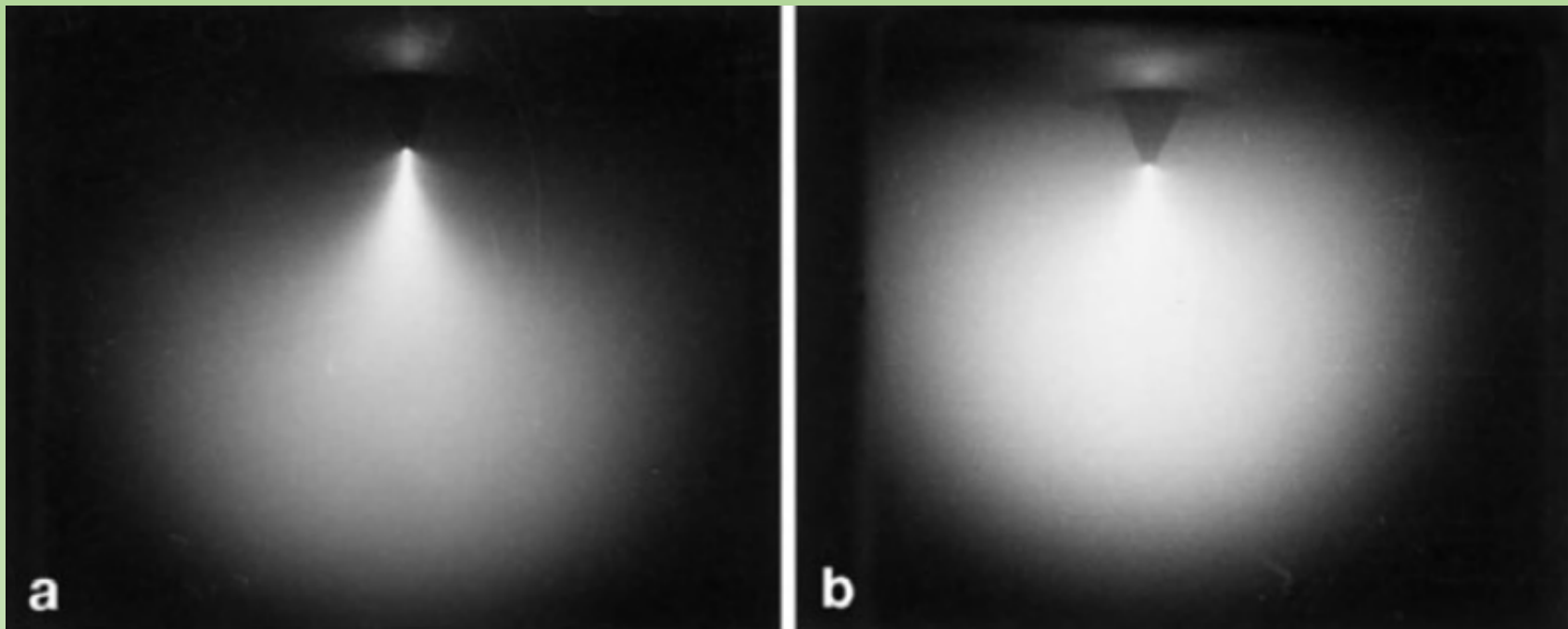


Моделирование методом Монте Карло



HgCdTe, $E_b = 35$ keV

Экспериментальное наблюдение области рассеяния в газе



Эмиссия света при облучении 100 кэВ электронами в N_2 (a) и Ar (b)

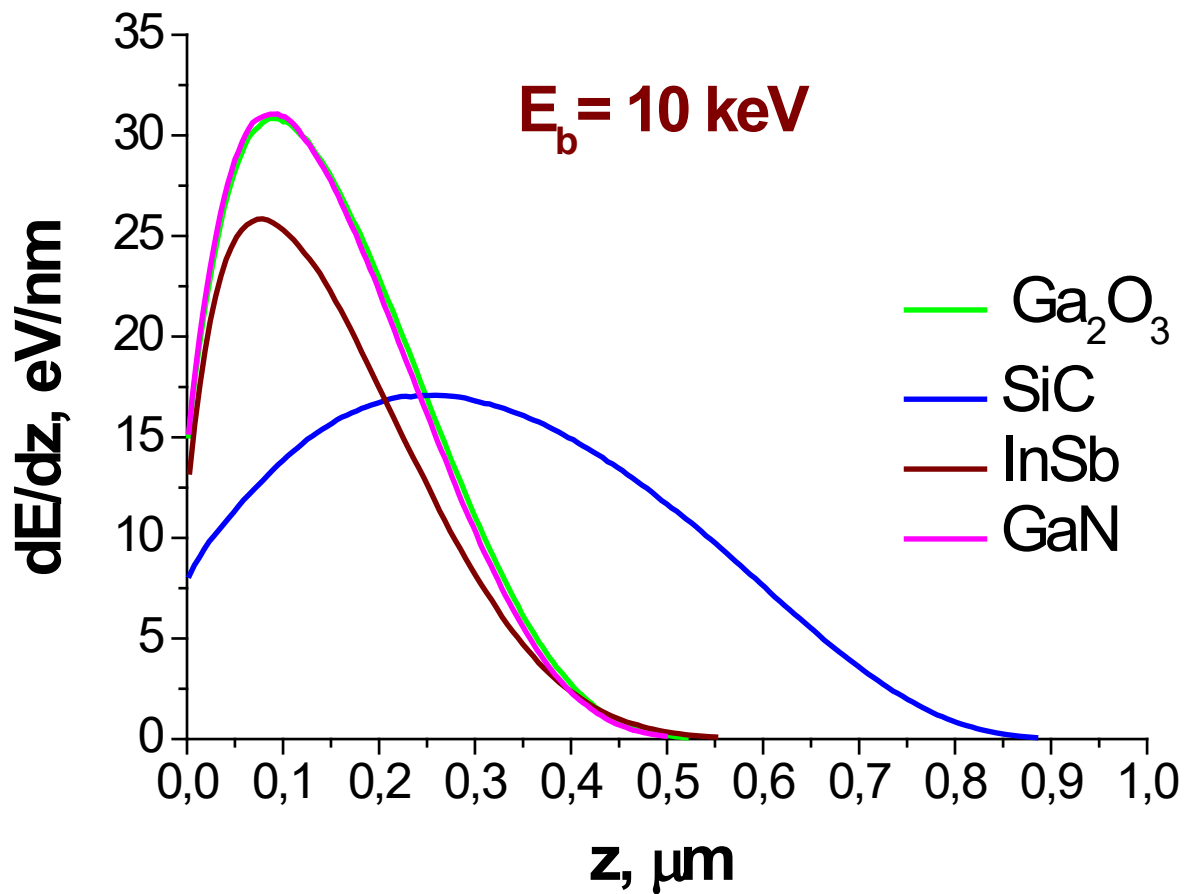
Размеры по глубине и ширине сопоставимы

Объем области рассеяния энергии

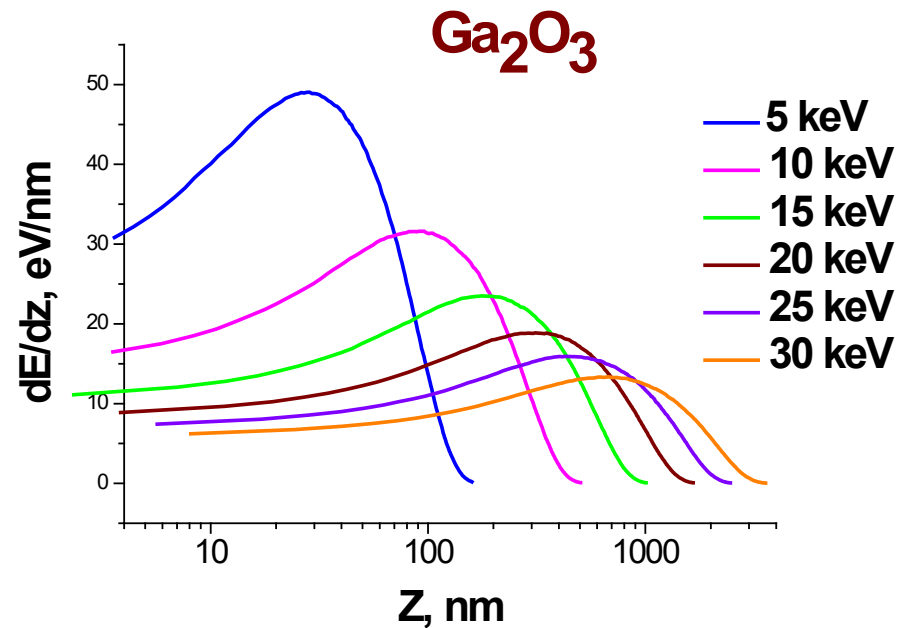
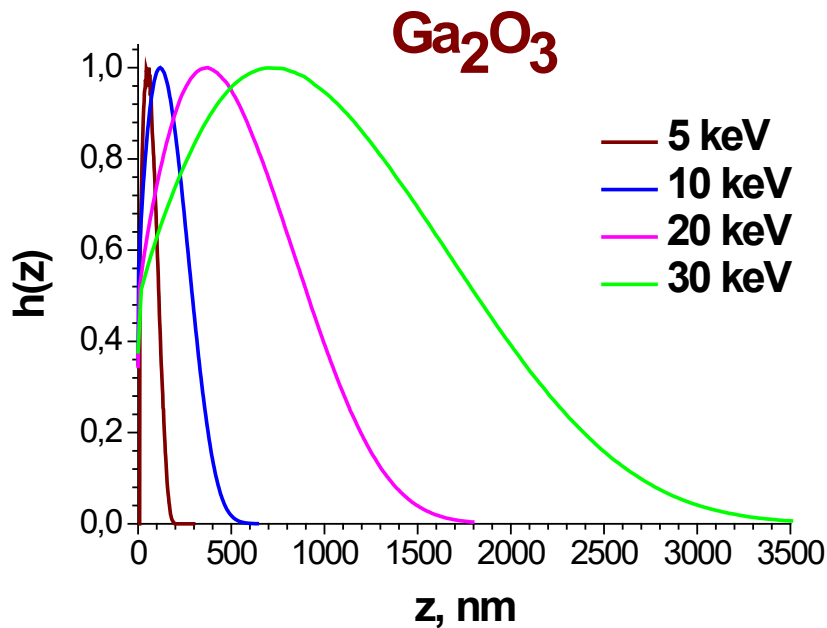
Форма области рассеяния зависит от Z (форма груши при малых Z и яблока – при больших Z).

Вблизи поверхности область рассеяния вытянута в глубину, однако при потерях энергии $> 50\%$ ширина области рассеяния сравнима с ее размерами по глубине.

Распределение поглощенной энергии по глубине

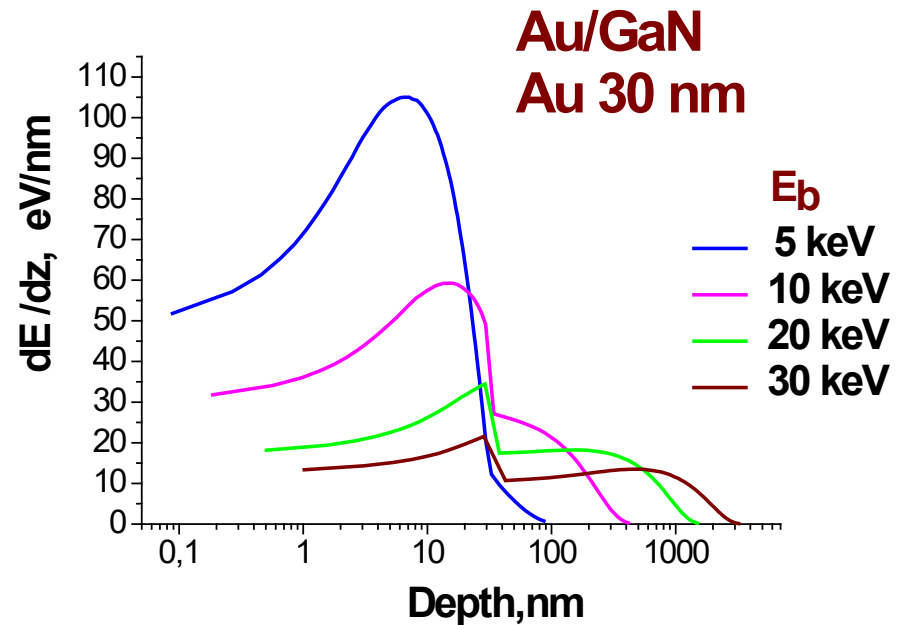
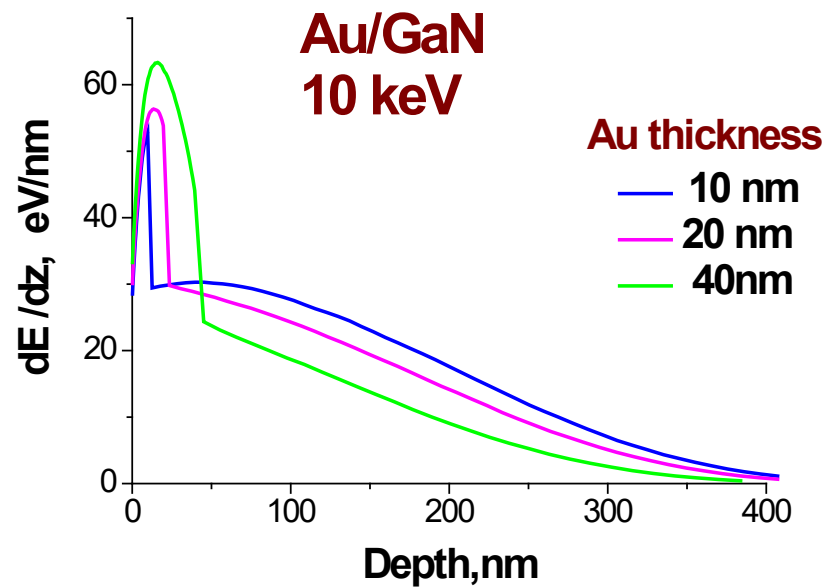


Распределение поглощенной энергии по глубине

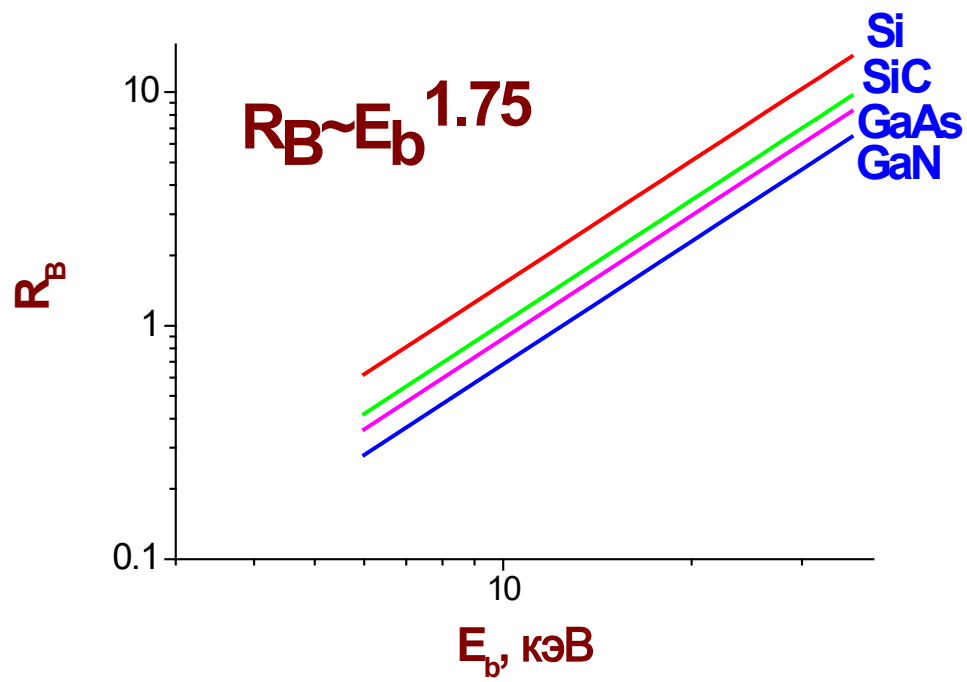
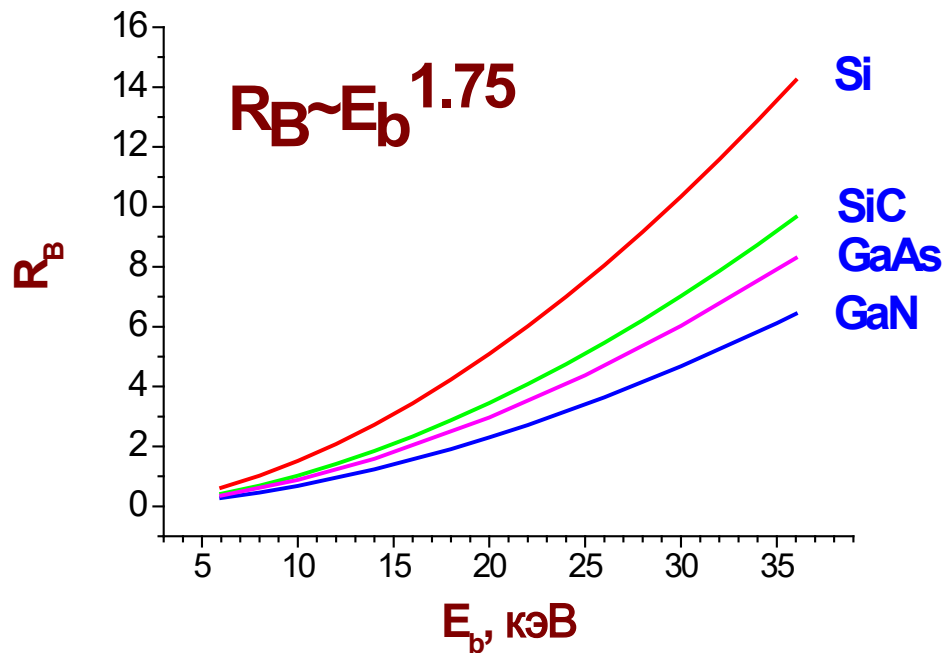


$$R \sim E_b^n, n > 1$$

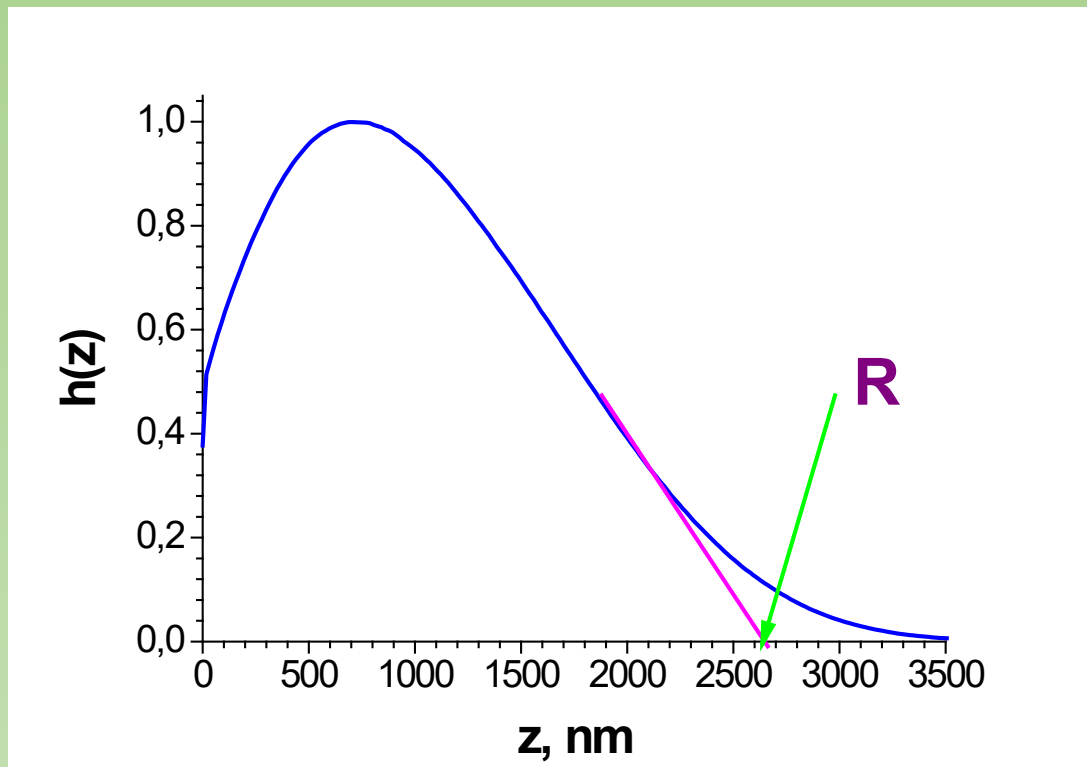
Поглощение энергии в барьере Шоттки



Зависимость R_{Bethe} от E_b

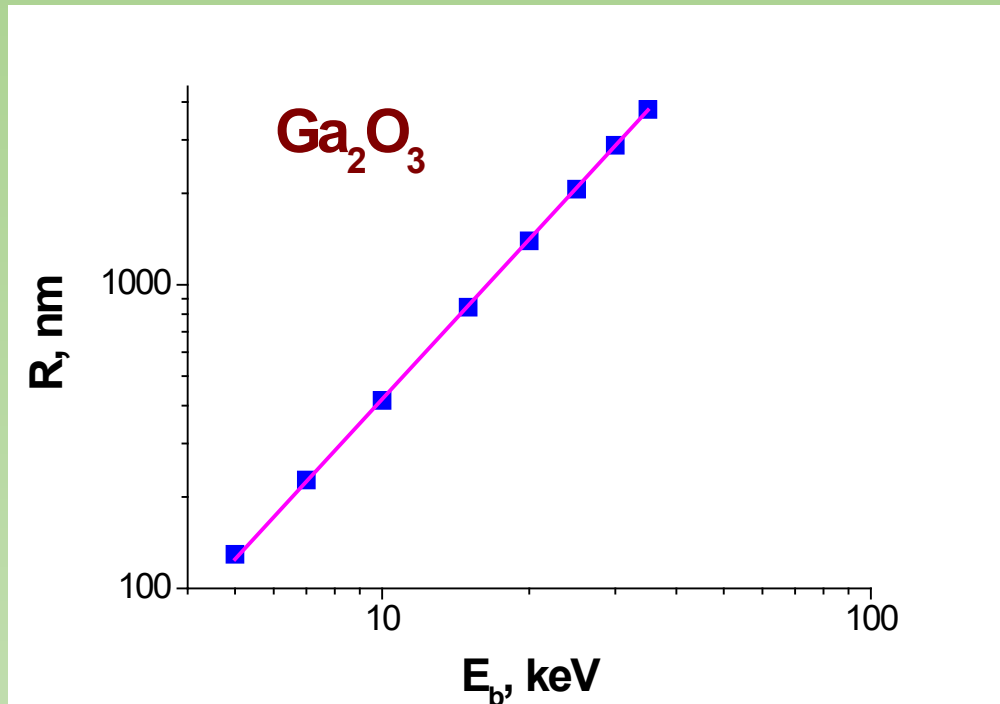


Определение R



Более объективное определение
R – толщина слоя, в котором
поглощается 99% энергии пучка.

Зависимость R от E_b

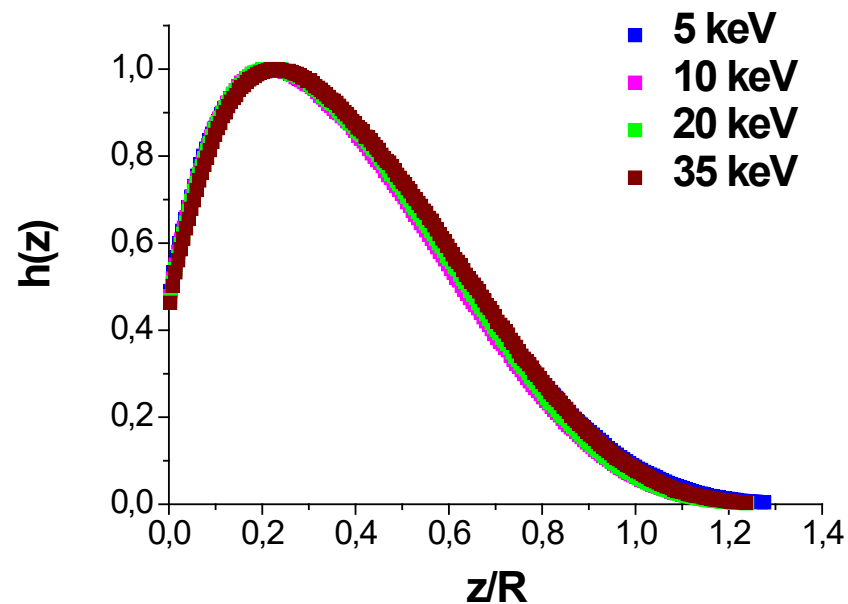
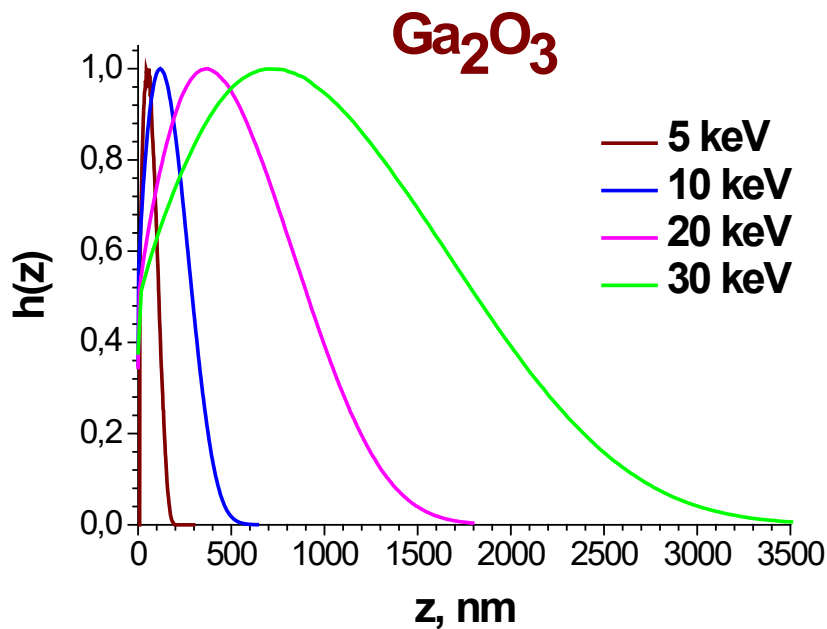


$$R \sim E_b^n$$

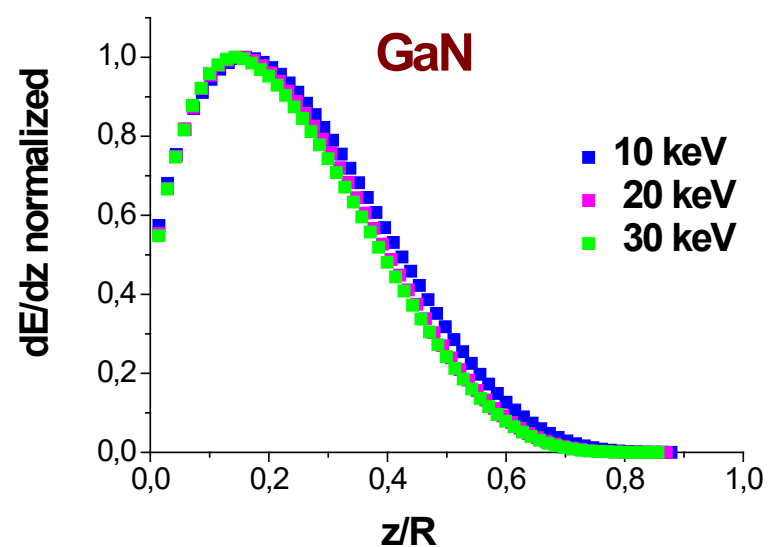
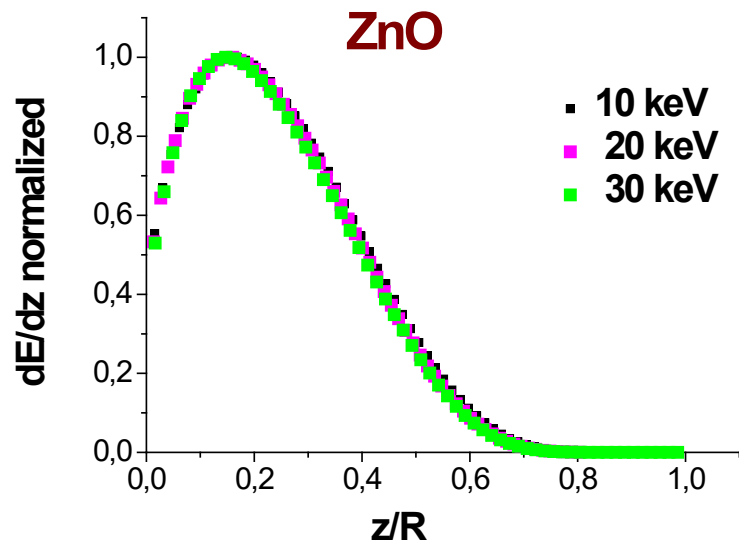
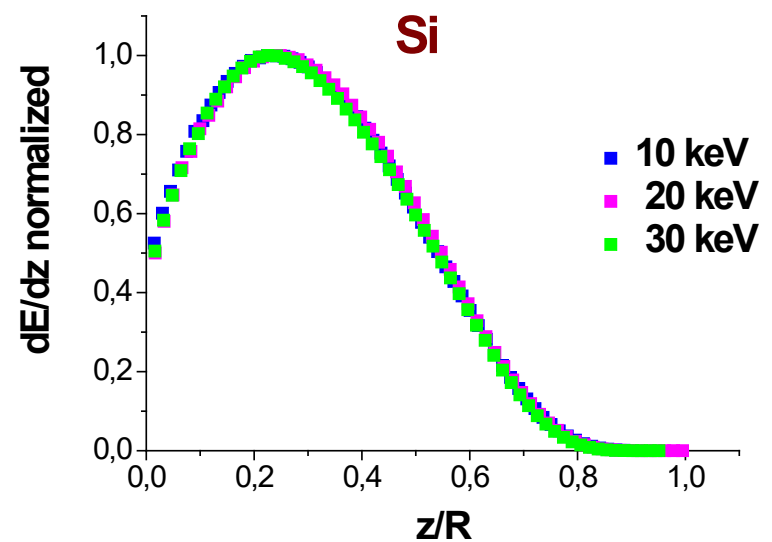
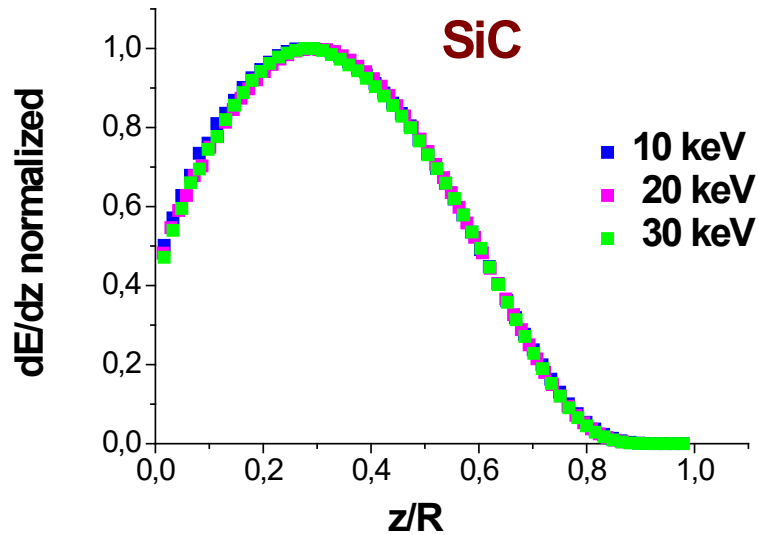
$n = 1.34 - 1.67$ (литература)

$n = 1.75$ (Монте Карло)

Нормированные распределения поглощенной энергии по глубине



Нормированные распределения поглощенной энергии по глубине



Универсальная зависимость потерь энергии

$$h_s(z) = \frac{1.402}{R} \exp \left[-A \left(\frac{z}{R} - 0.33 \right)^2 \right]$$

$$R(\text{nm}) = 14.1 \cdot E_b(\text{keV})^{1.75} \text{ и } A = \begin{cases} 6.38, z < 0.33 \cdot R \\ 3.76, z \geq 0.33 \cdot R \end{cases}$$

4H-SiC

$$h_s(z) = \frac{1.603}{R} \exp \left[-A \left(\frac{z}{R} - 0.22 \right)^2 \right]$$

$$R(\text{nm}) = 7.34 \cdot E_b(\text{keV})^{1.75} \text{ и } A = \begin{cases} 12.86, z < 0.22 \cdot R \\ 3.97, z \geq 0.22 \cdot R \end{cases}$$

β -Ga₂O₃

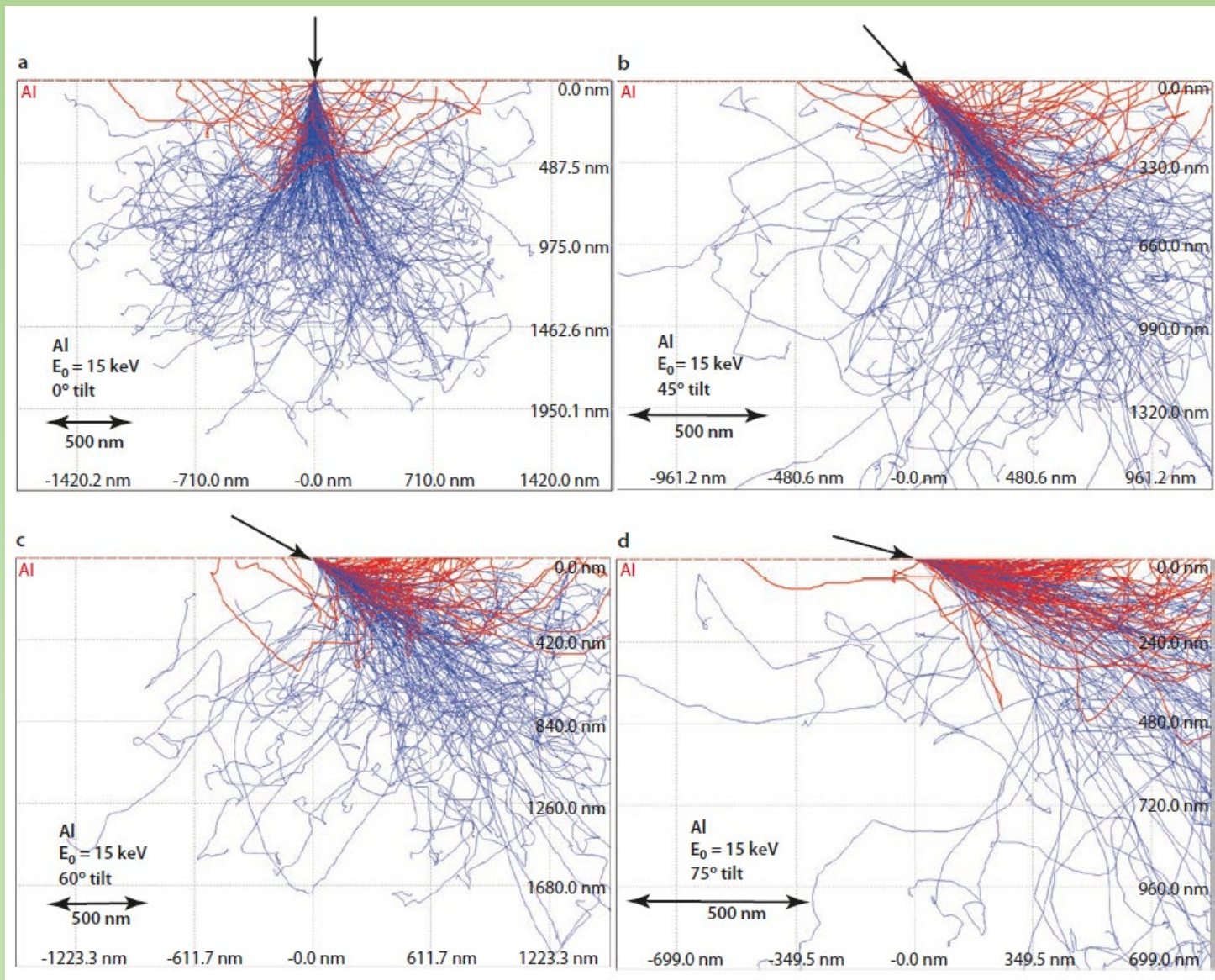
$$h_s(z) = \frac{3.207}{R} \exp \left[-A \left(\frac{z}{R} - 0.11 \right)^2 \right]$$

$$R(\text{nm}) = 13.2 \times E_b(\text{keV})^{1.75}$$

$$A = \begin{cases} 42.8, z < 0.11 \cdot R \\ 16.5, z \geq 0.11 \cdot R \end{cases}$$

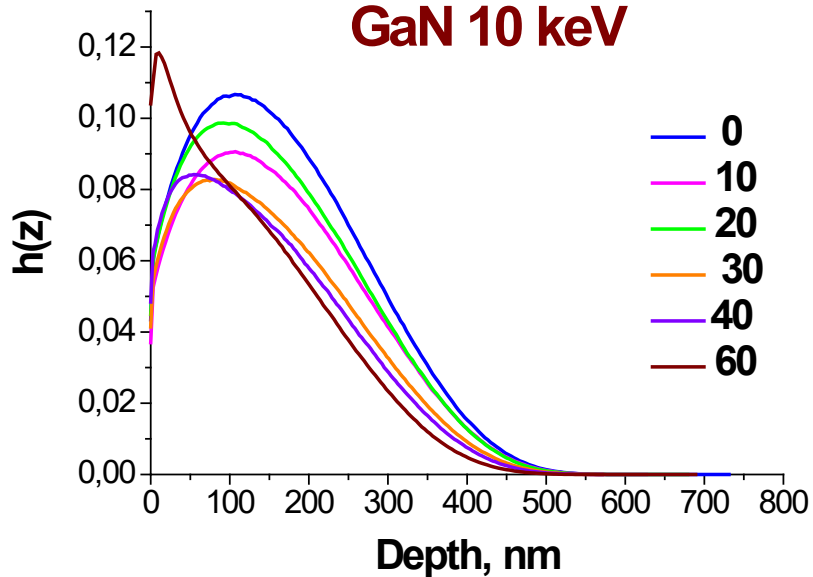
GaN

Зависимость распределения поглощенной энергии по глубине от угла падения

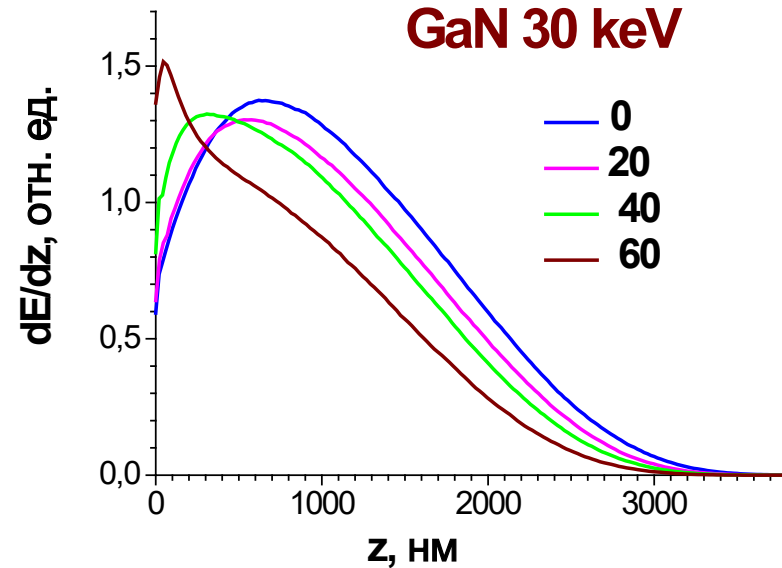


Зависимость распределения поглощенной энергии по глубине от угла падения

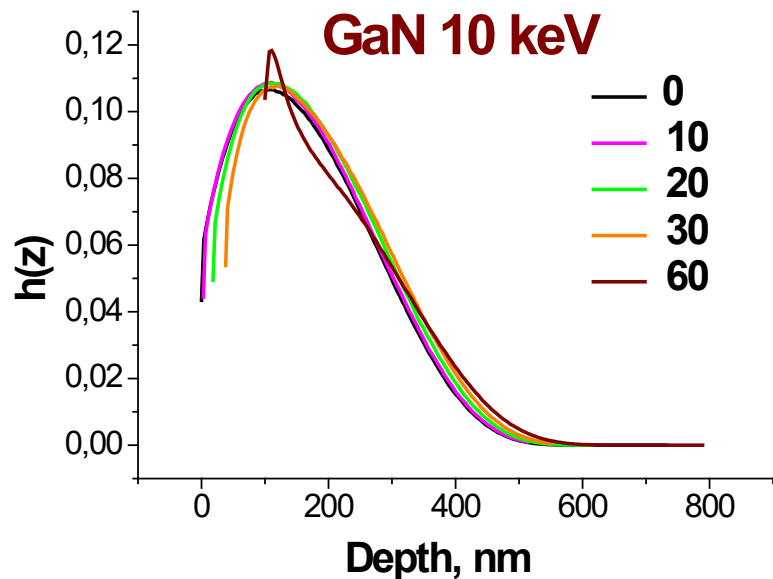
GaN 10 keV



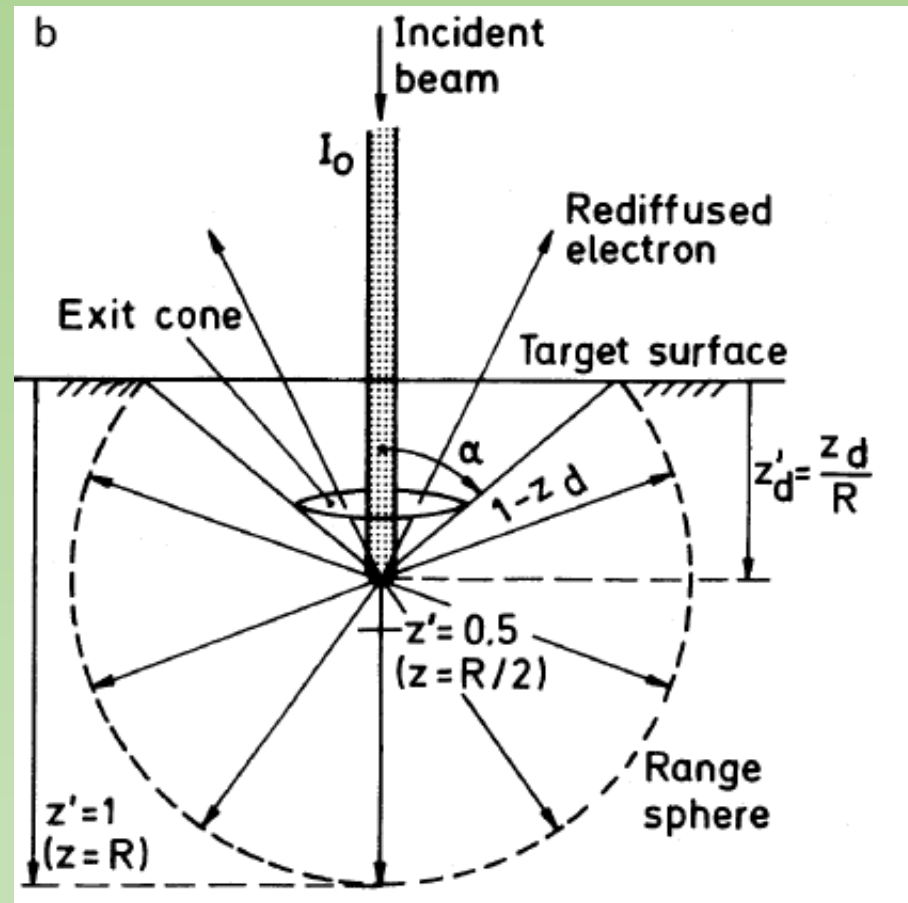
GaN 30 keV



Зависимость распределения поглощенной энергии по глубине от угла падения



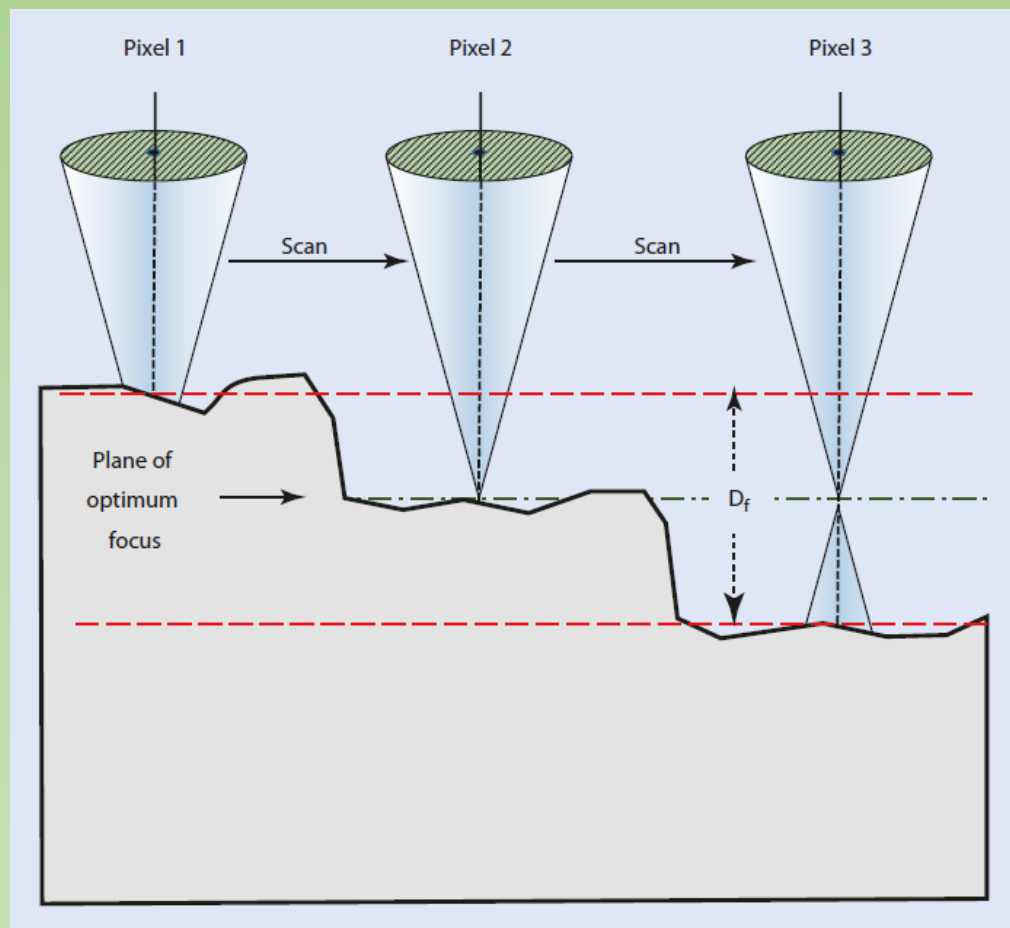
Max  **с углом наклона**



Archard's point-source model

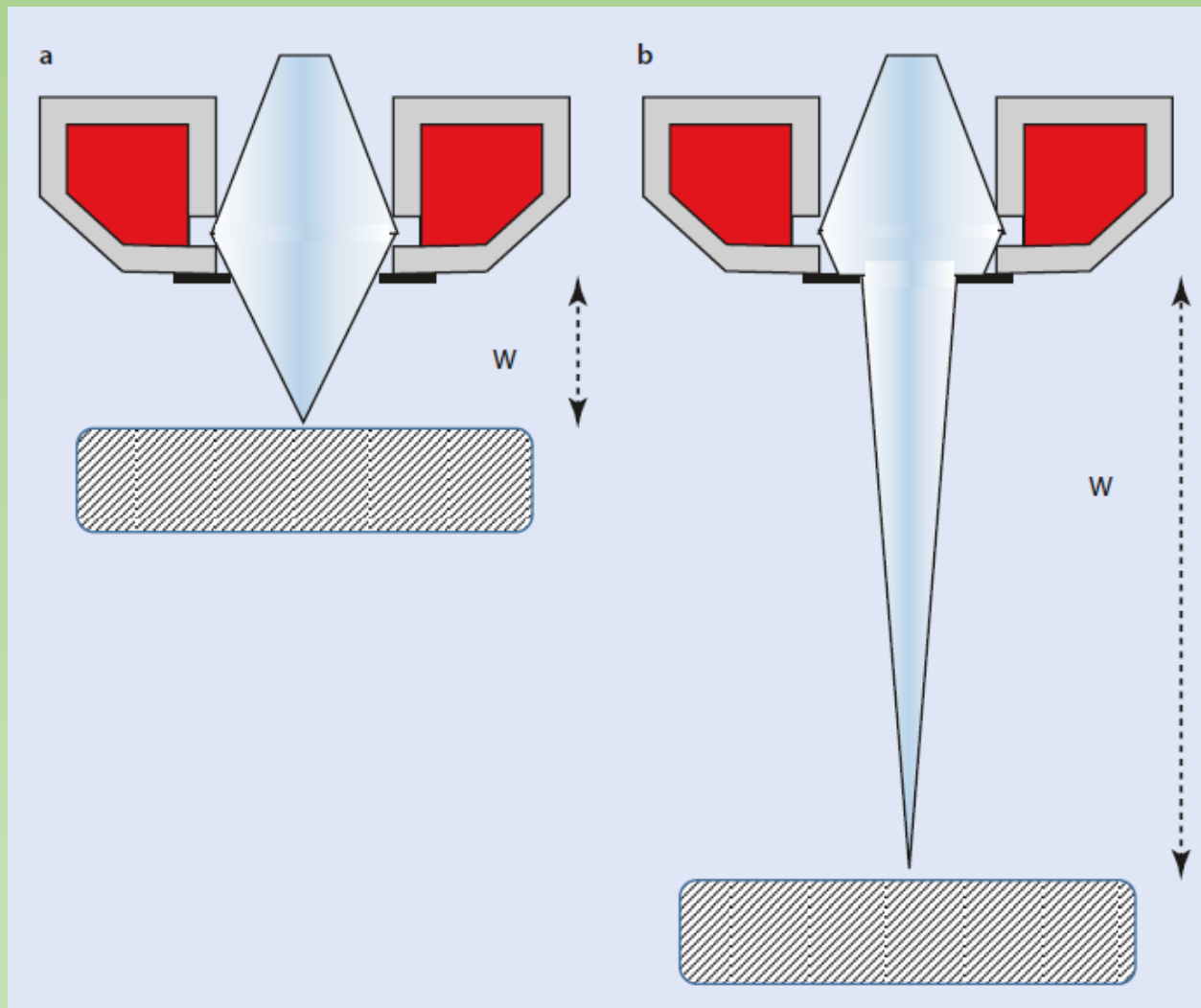
Глубина фокуса

Глубина фокуса в
оптике мала



Глубина фокуса (глубина поля зрения)

Глубина фокуса



Для увеличения глубины фокуса надо уменьшить конечную диафрагму и увеличить рабочее расстояние

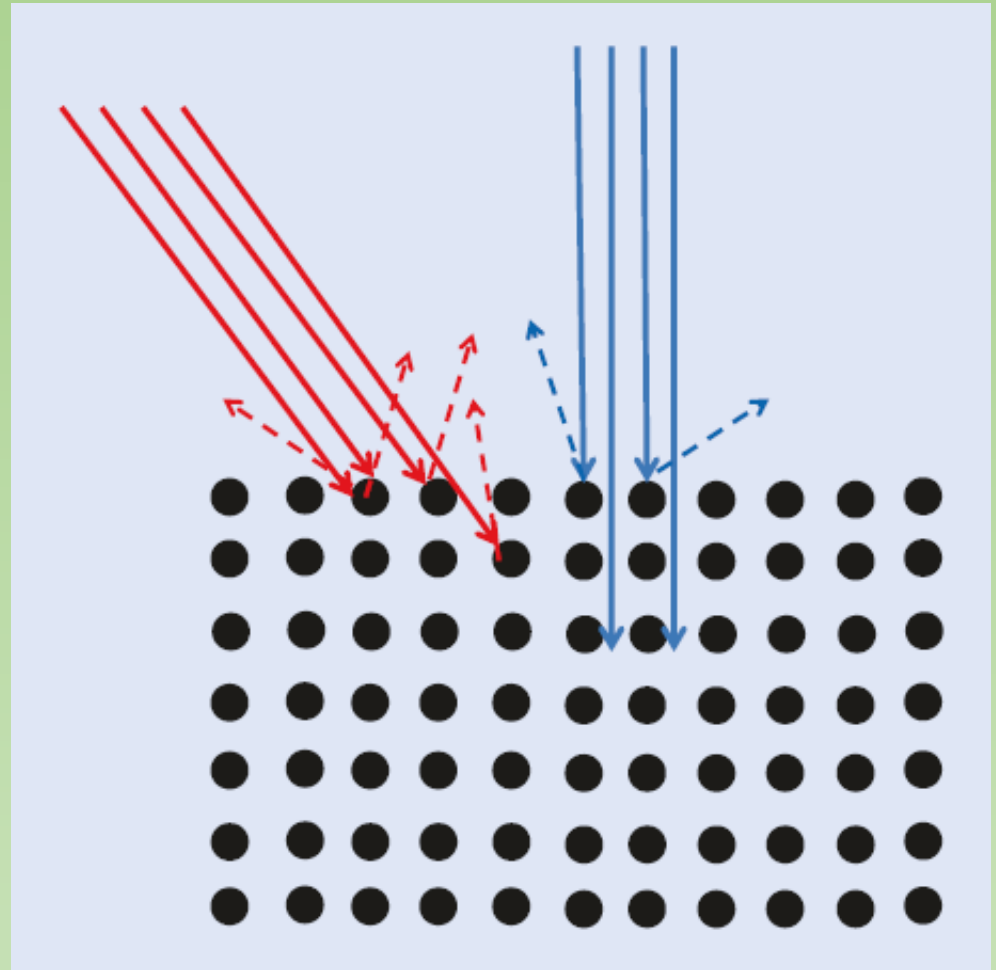
Режим канализирования

Контраст изменяется при
угле Брэгга

$$n\lambda = 2d \sin \theta_B$$

$$\lambda_e = h/p$$

При 15 кэВ $\lambda_e = 0.00994$ нм



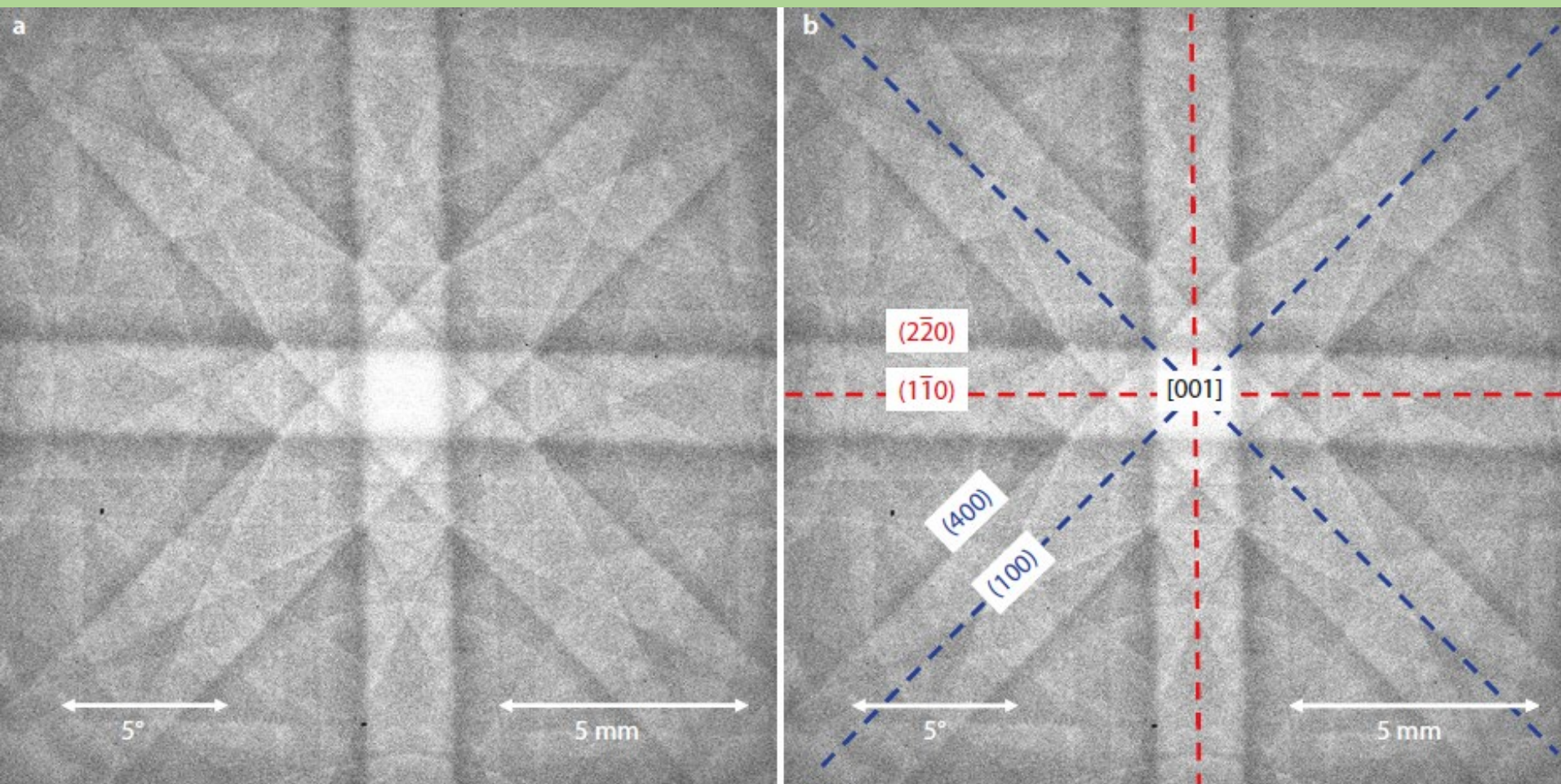
Контраст не превышает 2-5 %, т.к. электроны
быстро «забывают» свою траекторию

Углы Брэгга для Si при 15 кэВ

Planes (hkl)	Spacing (nm)	θ_B (degrees)
111	0.314	0.908
220	0.192	1.48
311	0.164	1.74
400	0.136	2.10
422	0.111	2.57
511	0.105	2.72

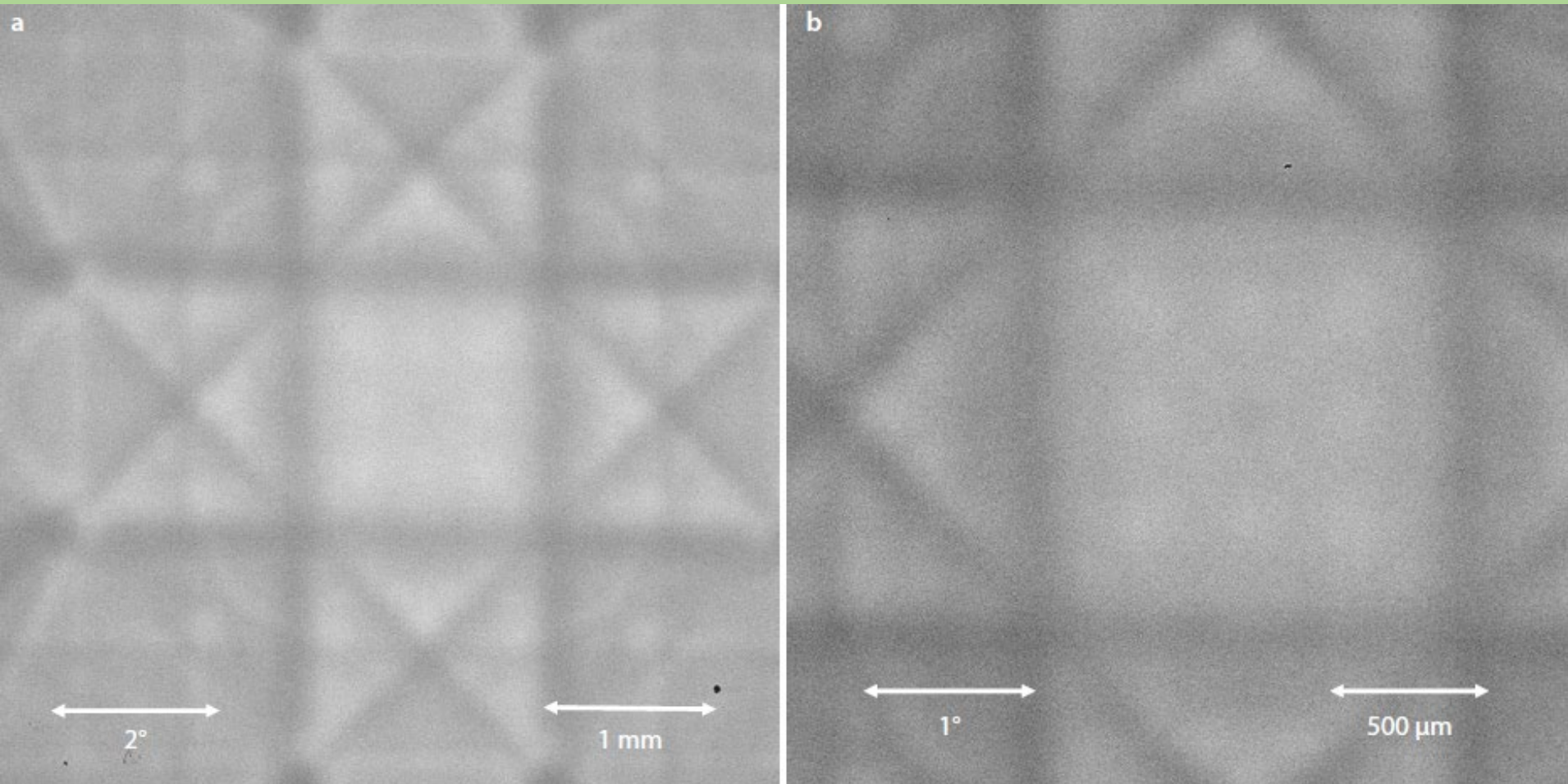
При рабочем расстоянии 10 мм и ширине области сканирования 2 мм угол падения изменяется в диапазоне $\pm 12^\circ$

Режим канализирования



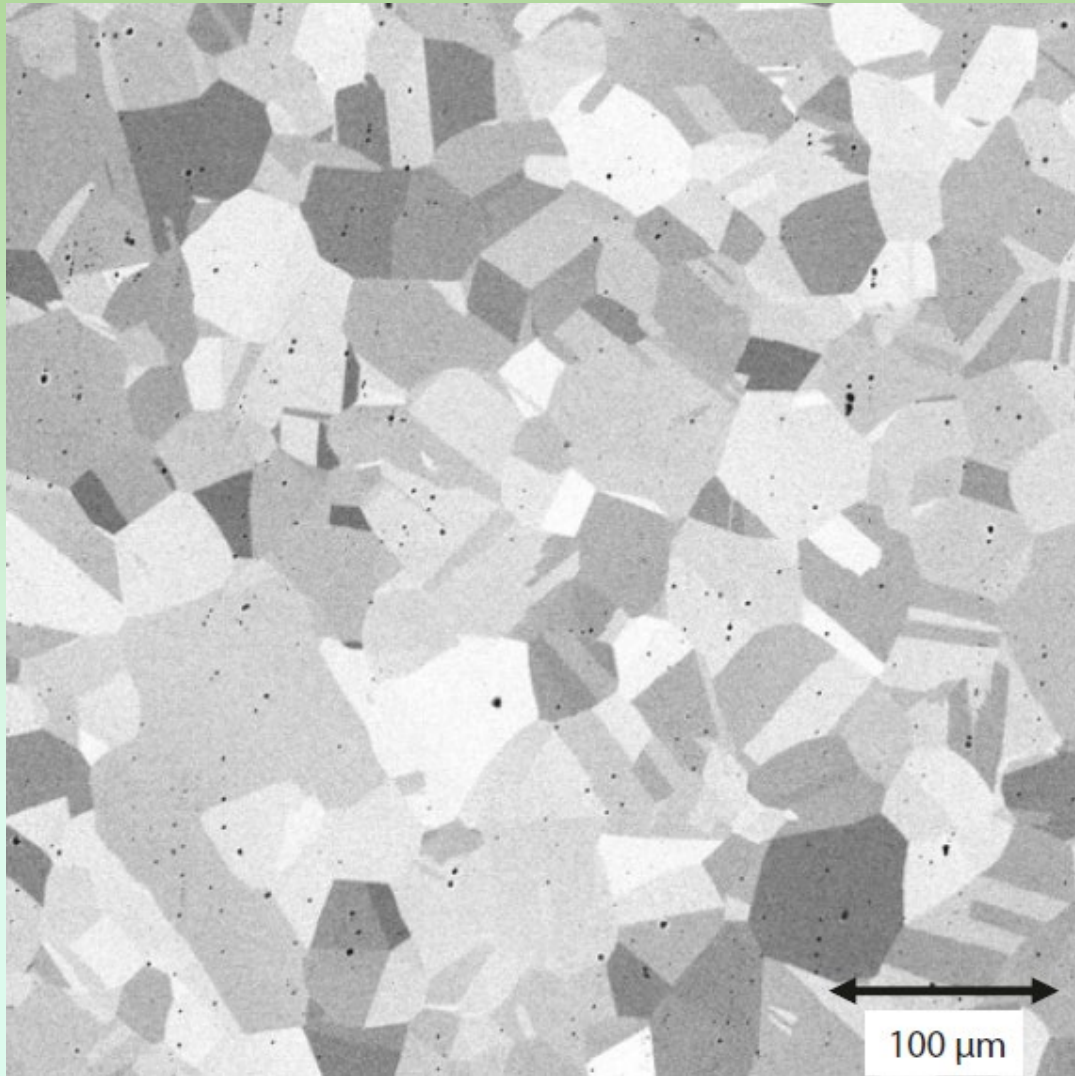
Si (001) при 15 кэВ

Режим канализования



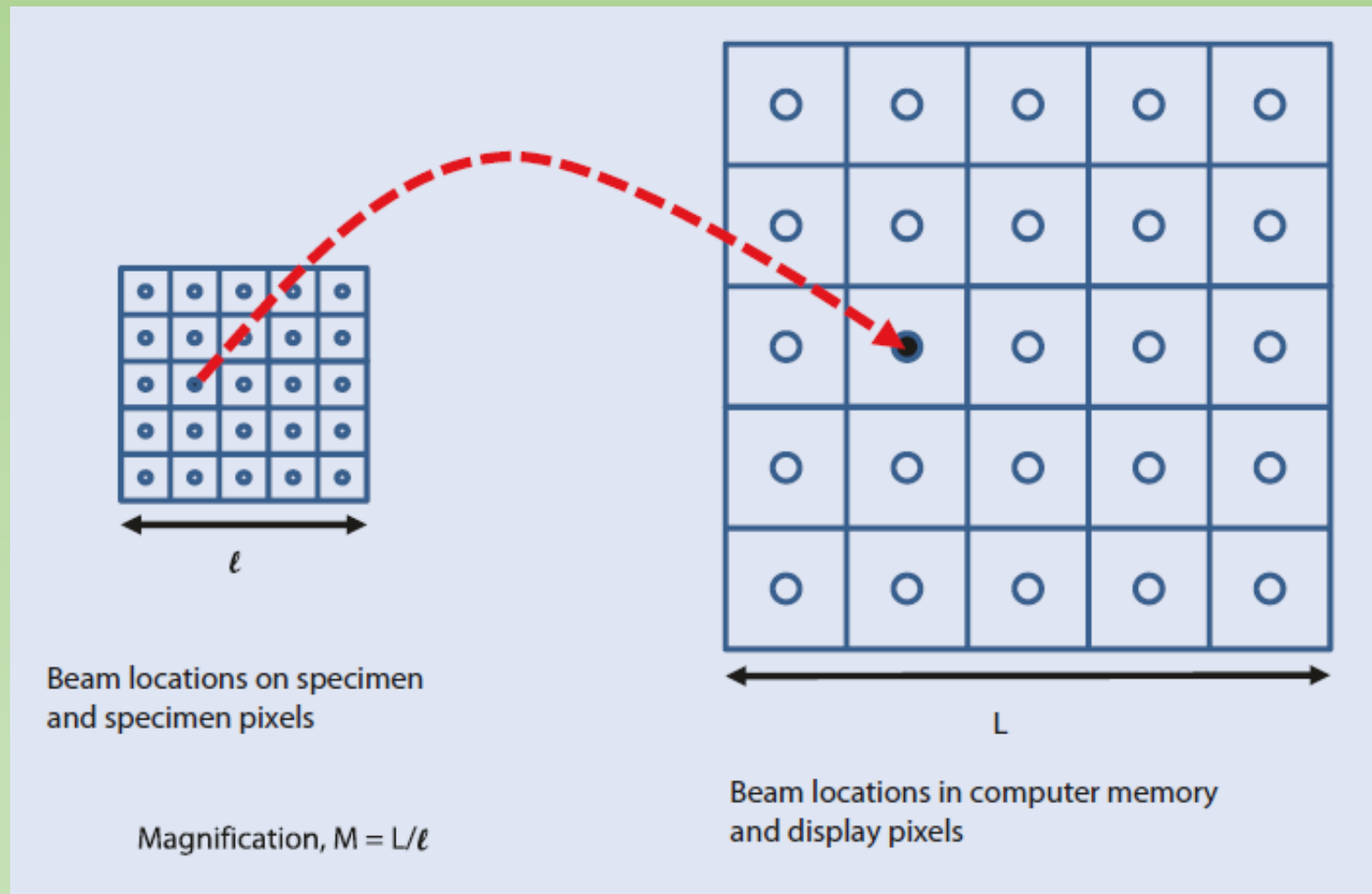
Повышение увеличения ограничивает диапазон углов

Режим канализования

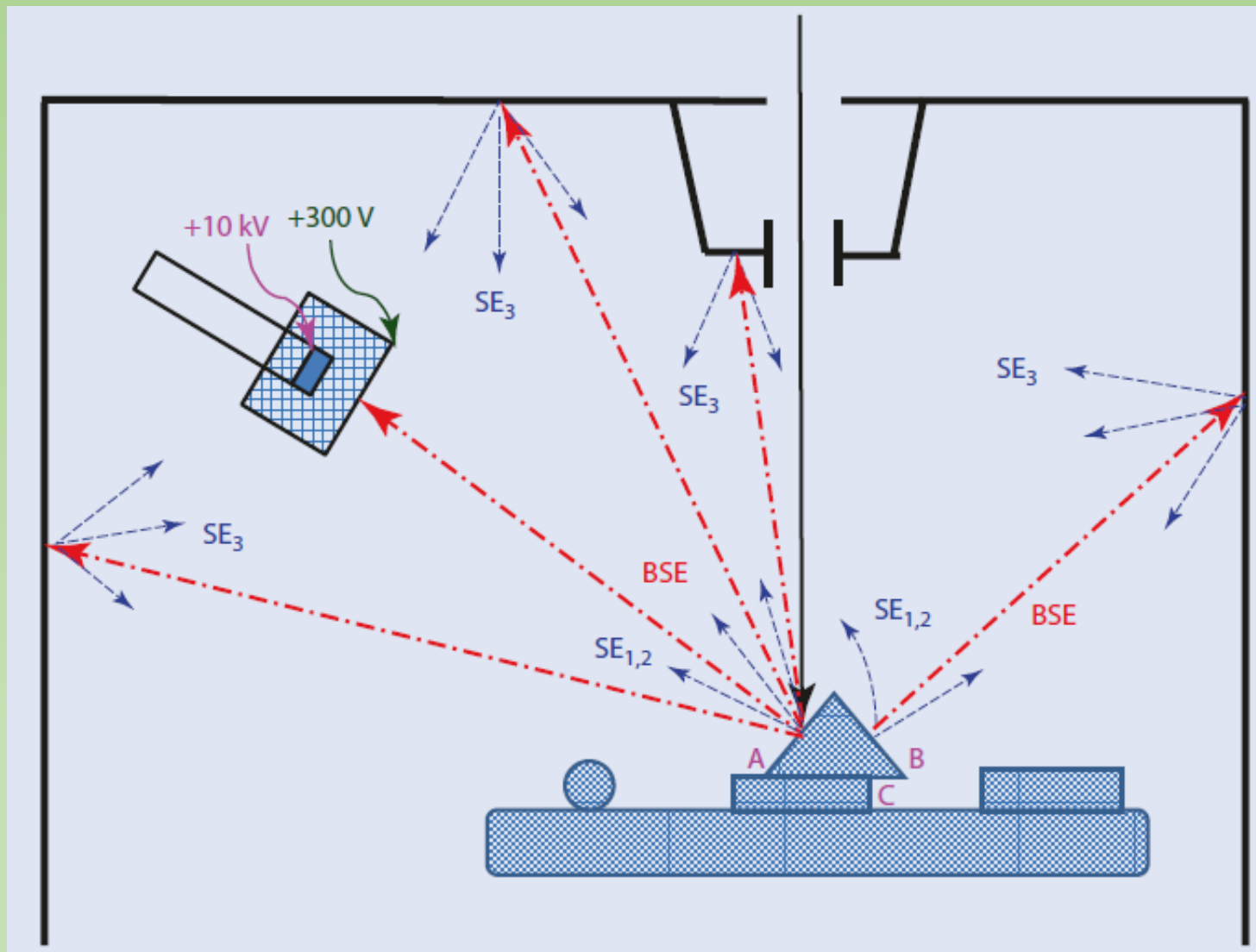


Зерна в поликристаллическом FeNi, $E_b = 15$ кэВ

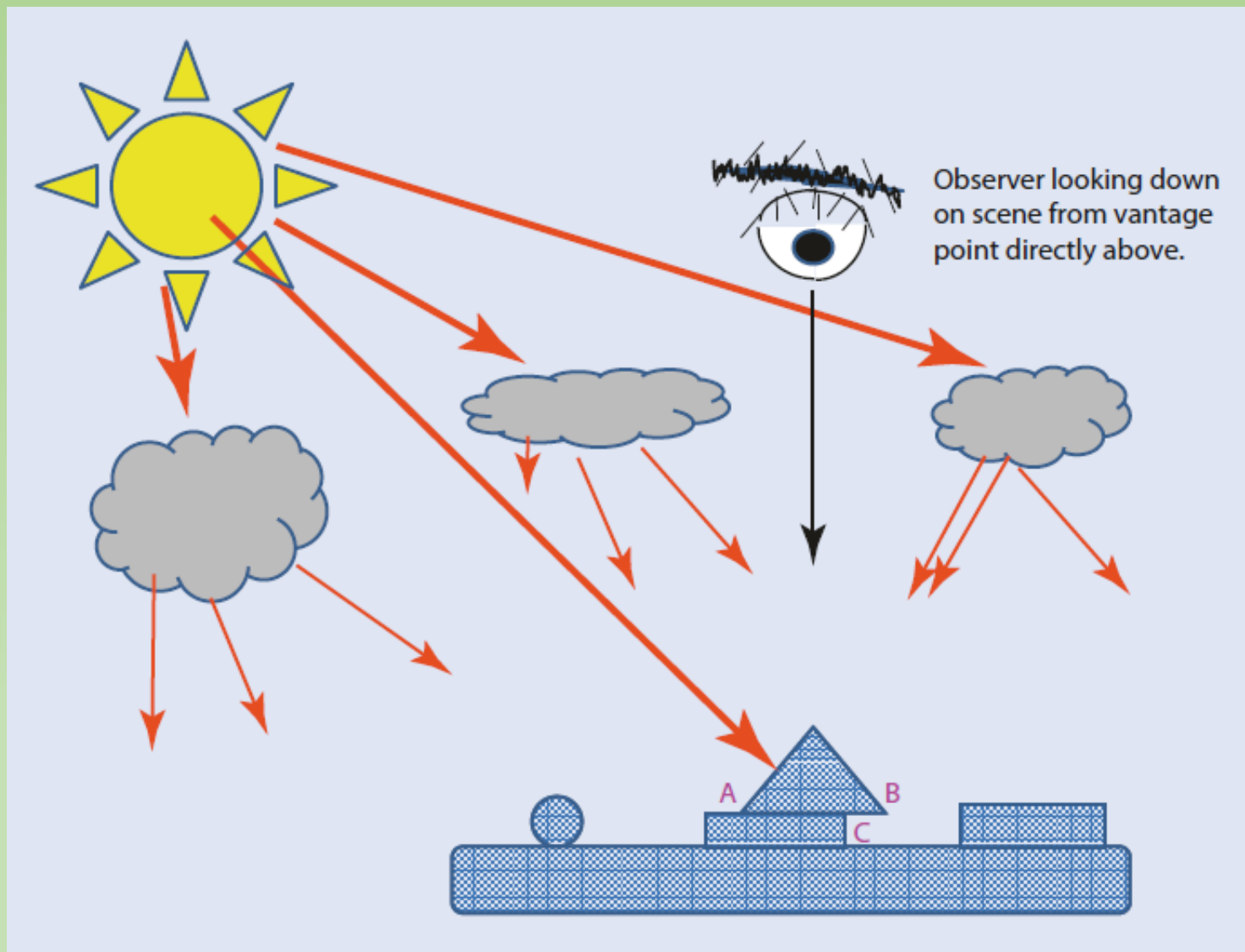
Формирование изображения в РЭМ



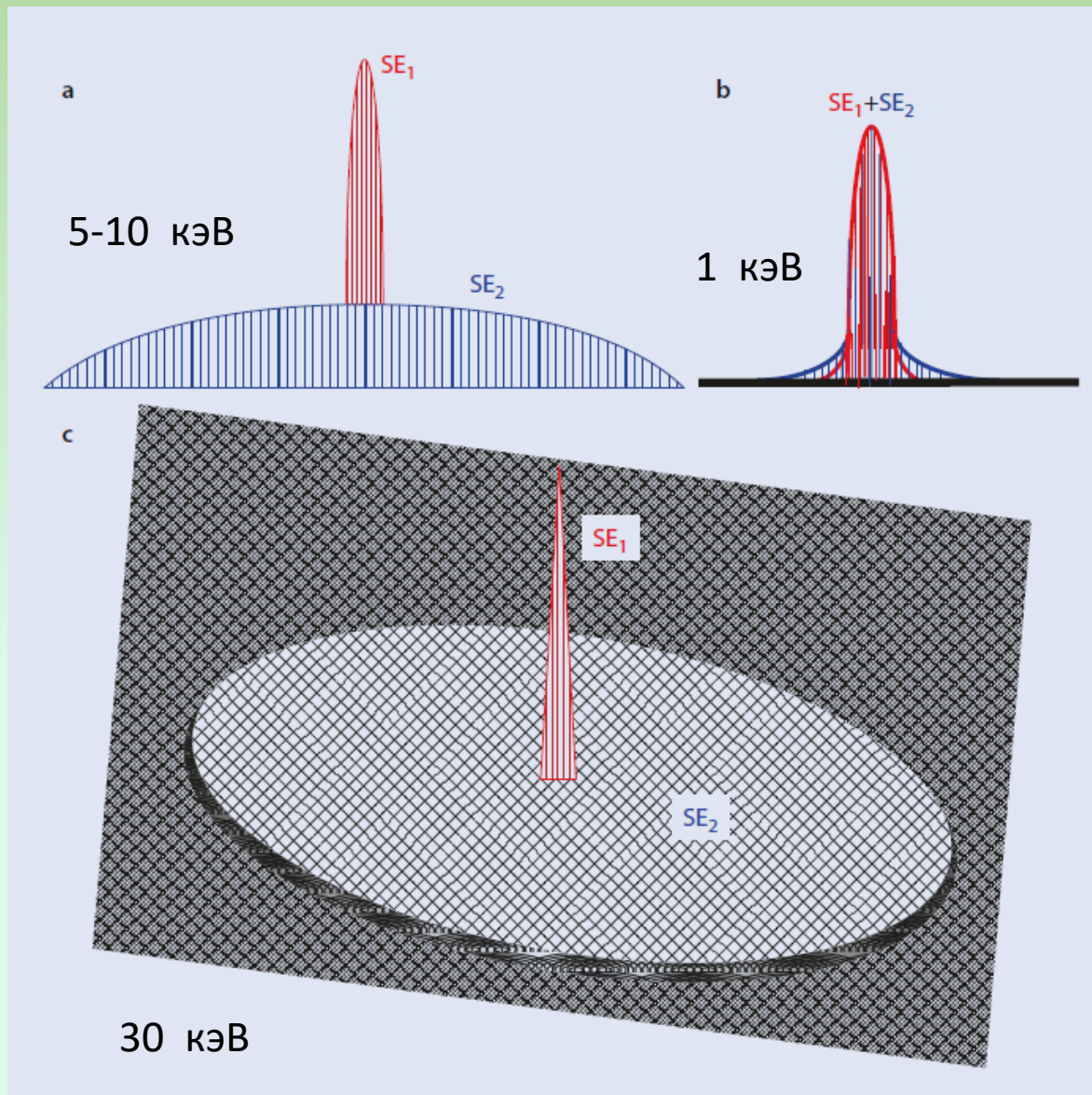
Формирование изображения



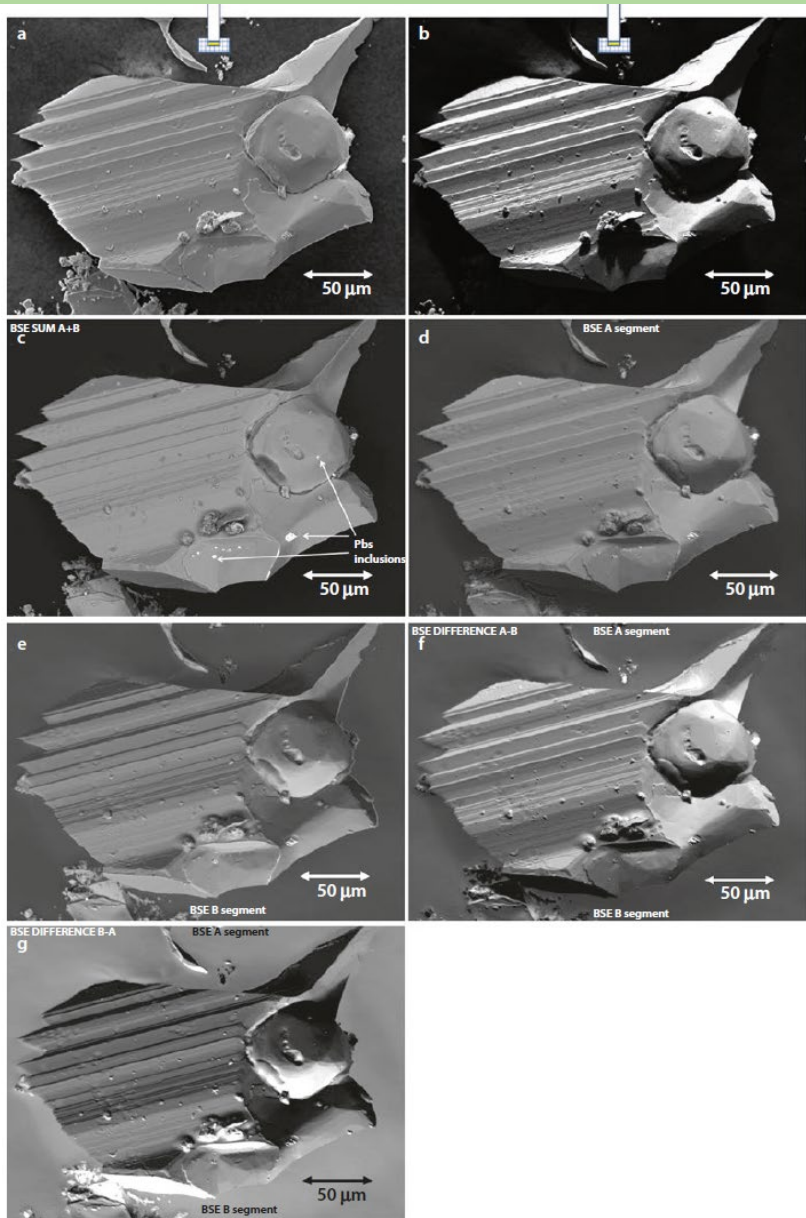
Формирование изображения



Пространственное разрешение

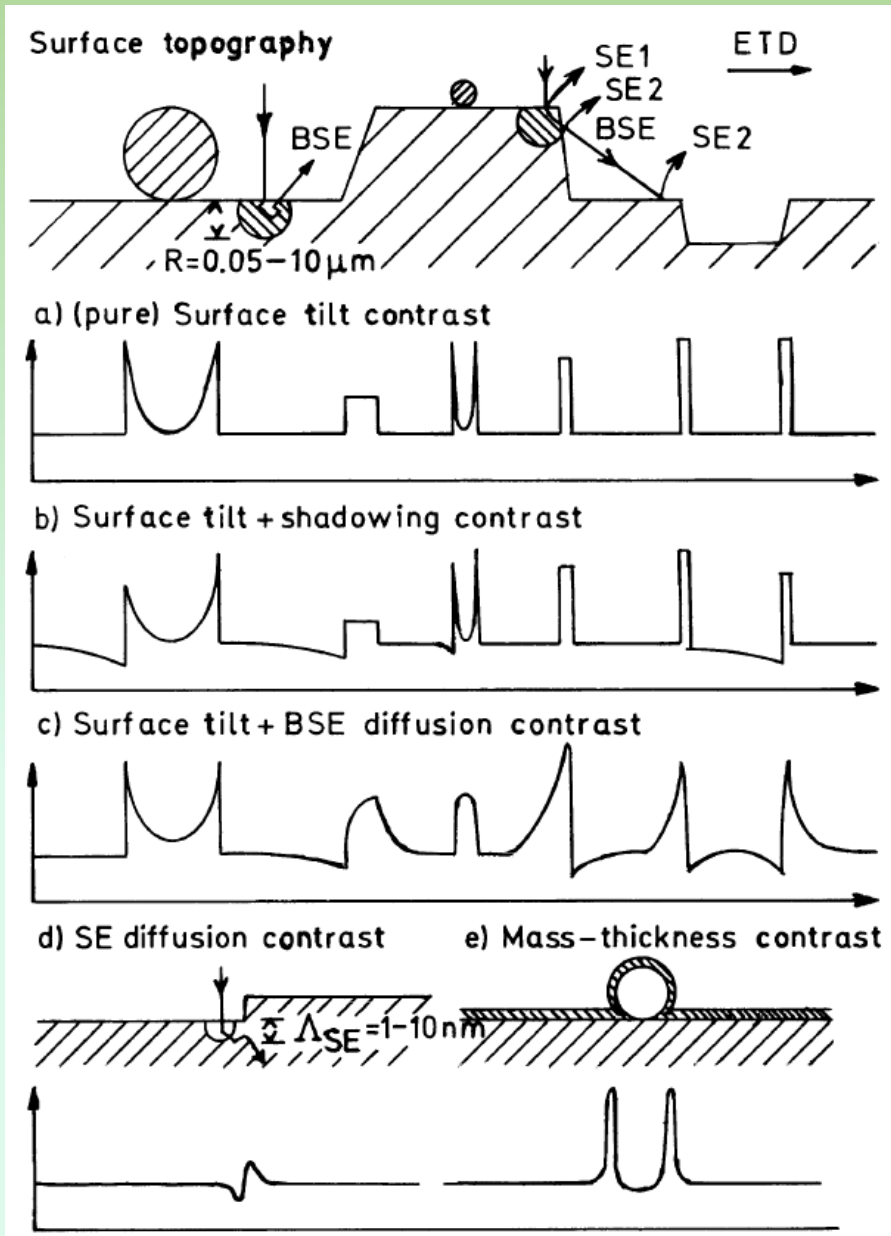


Интерпретация изображения

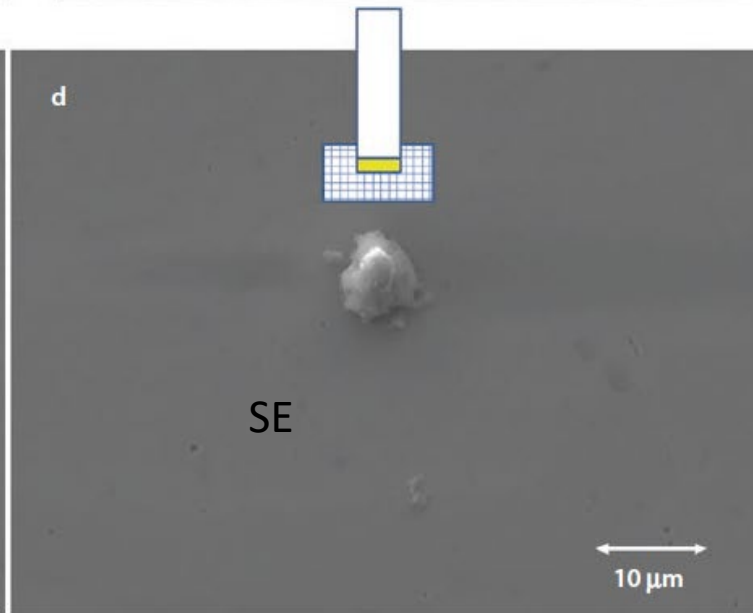
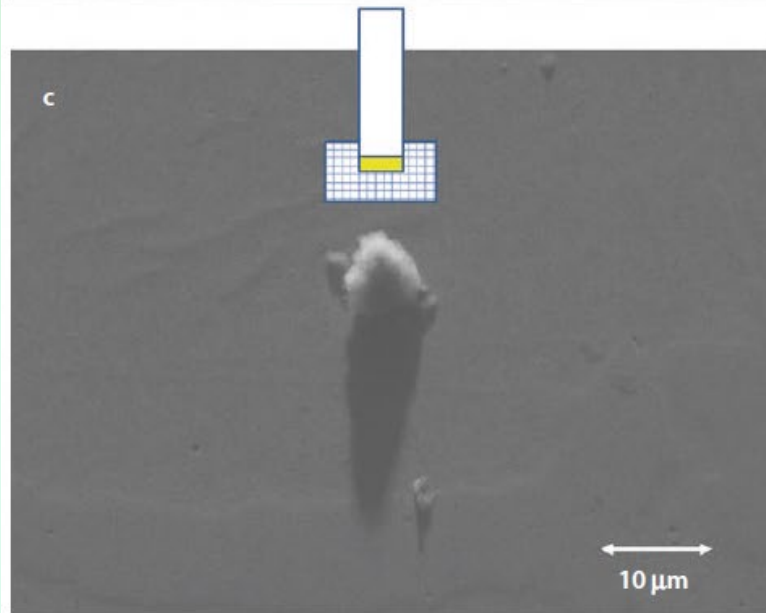
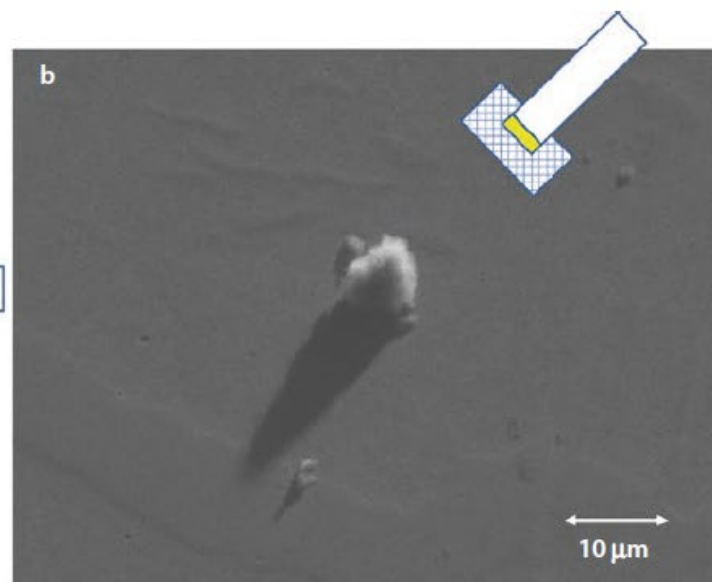
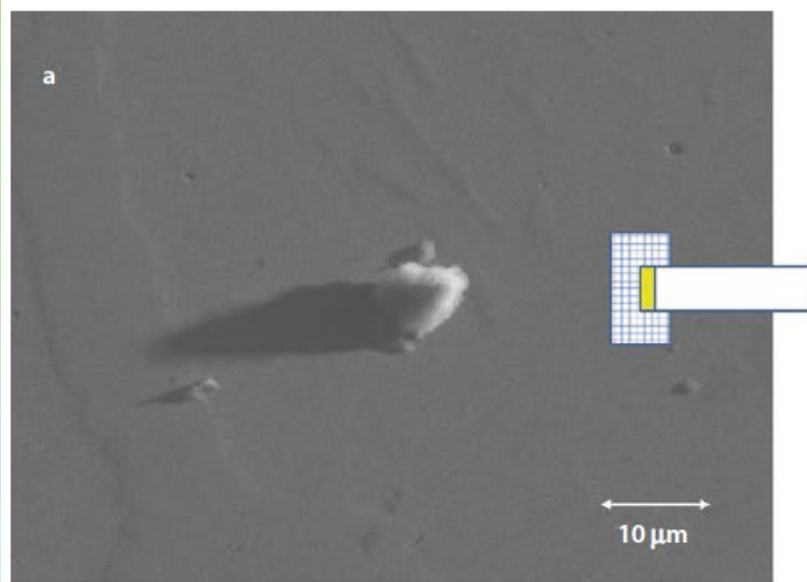


Изображение кусочка пирита (FeS₂)
при 20 кэВ
а и б - SE с +V и -V
2-х секторный BSE с разными
комбинациями сигналов секторов

Интерпретация изображения

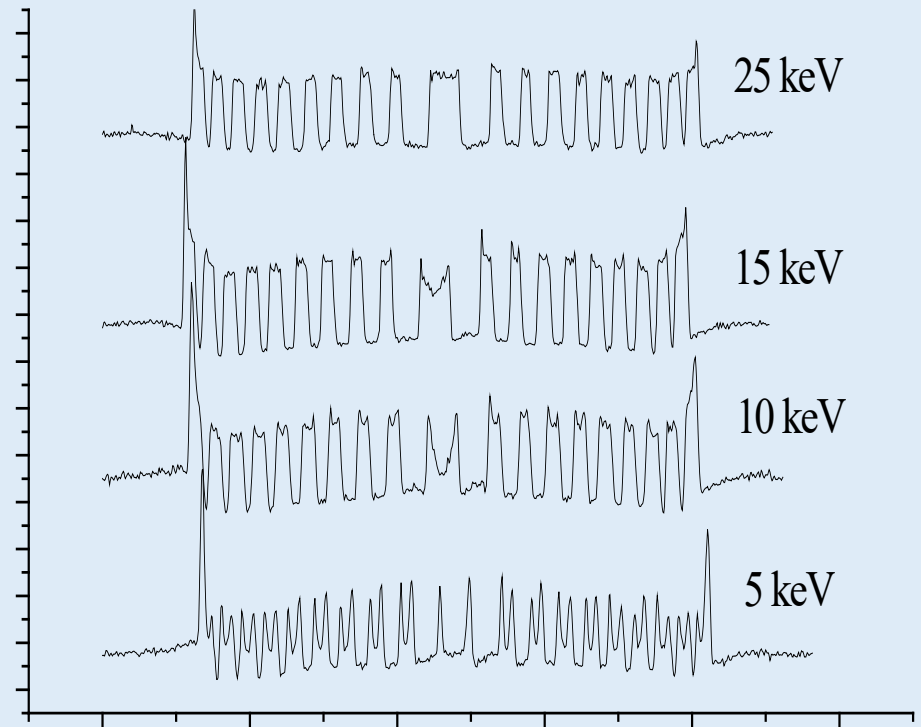
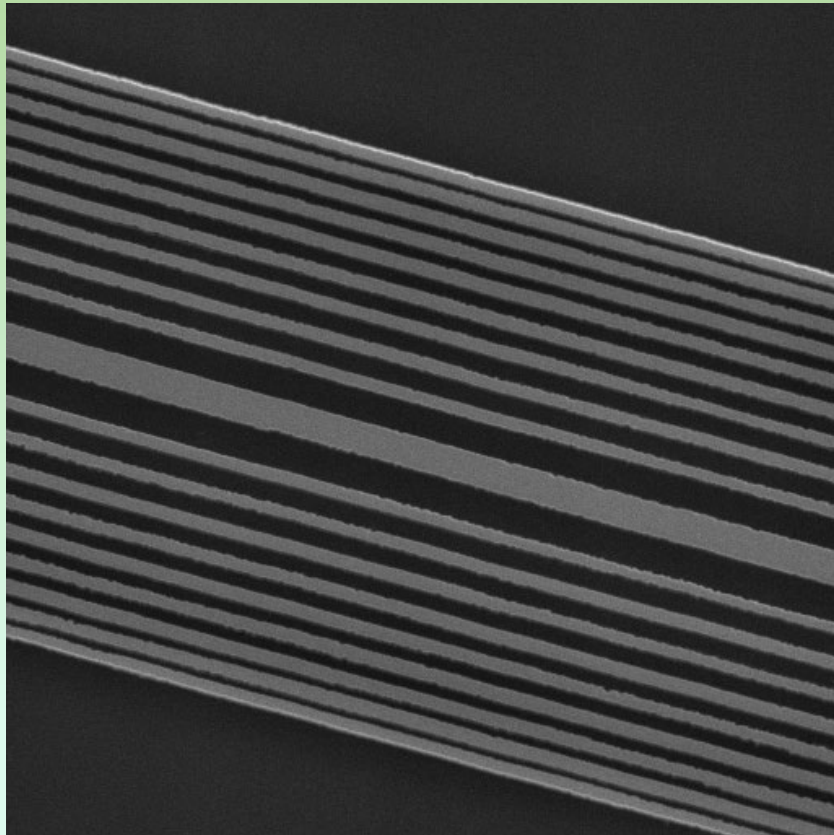


Интерпретация изображения



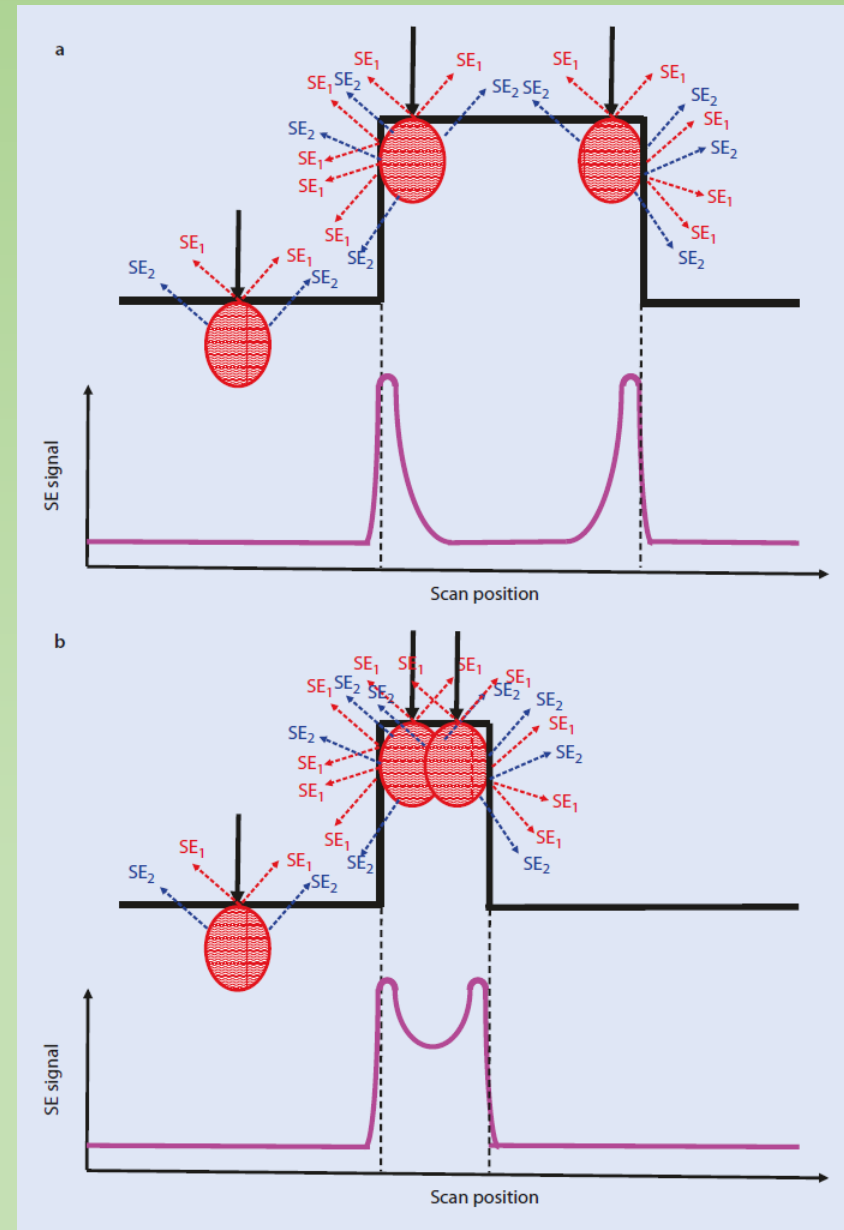
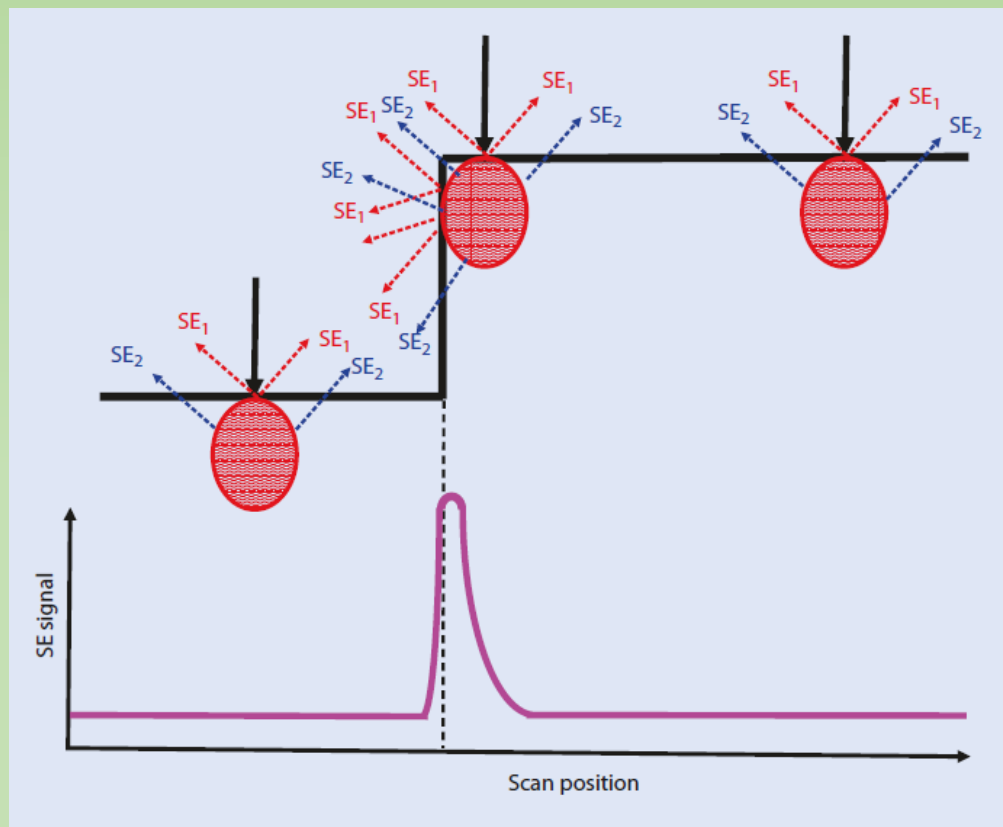
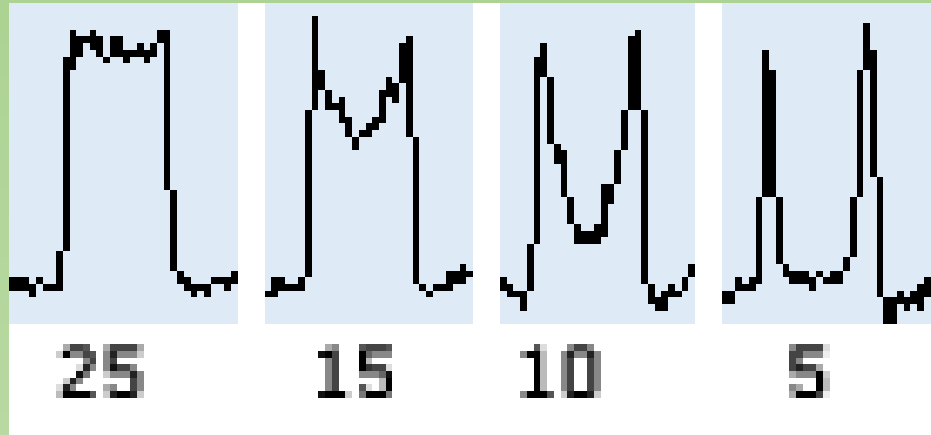
a-c $-V$
d $+V$

Интерпретация изображения

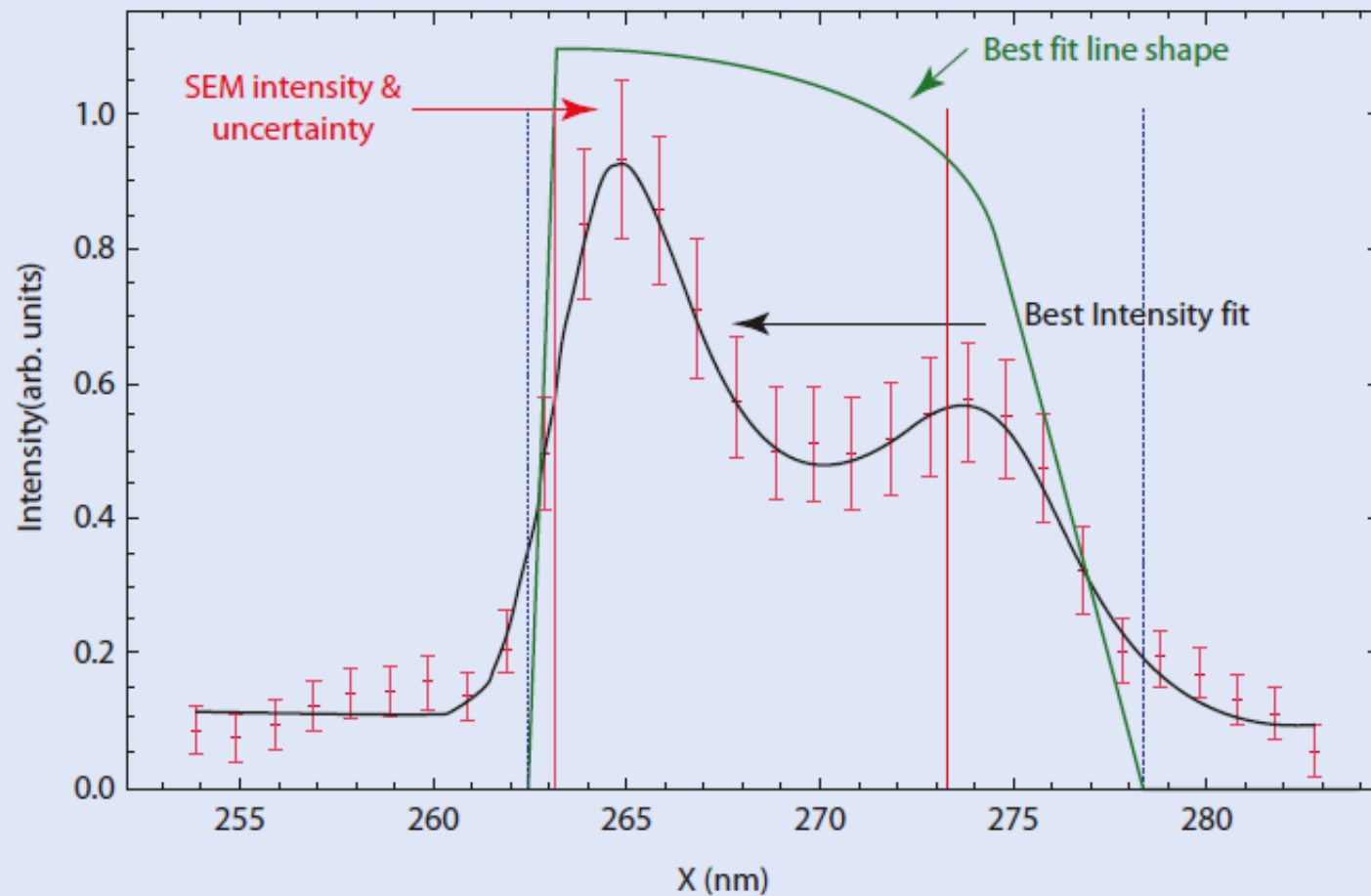


Полоски на кремнии шириной 1 и 2 (центр.) мкм. Расстояние
изменяется от 0.2 до 2 мкм

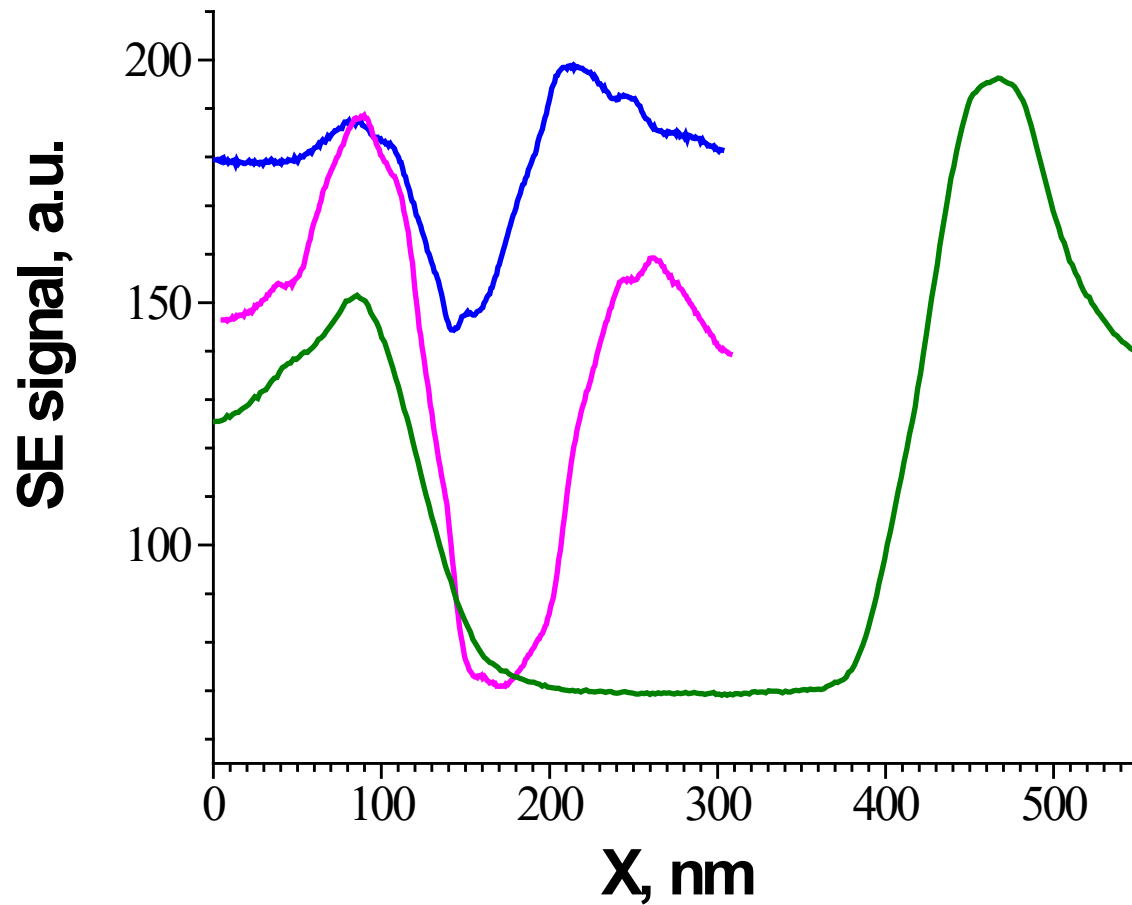
Интерпретация изображения



Интерпретация изображения

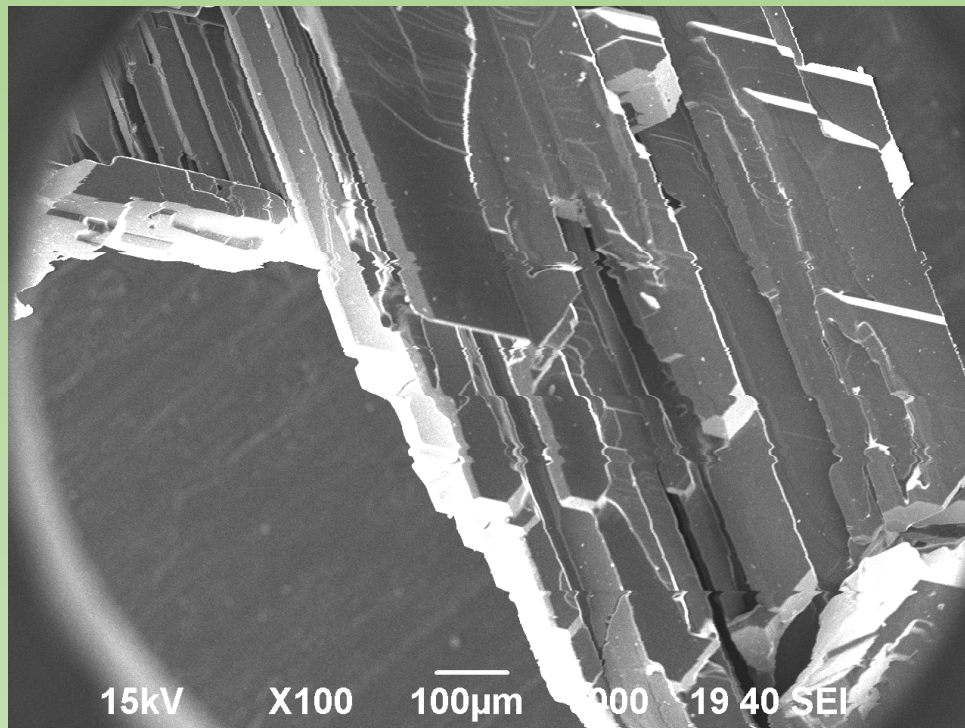
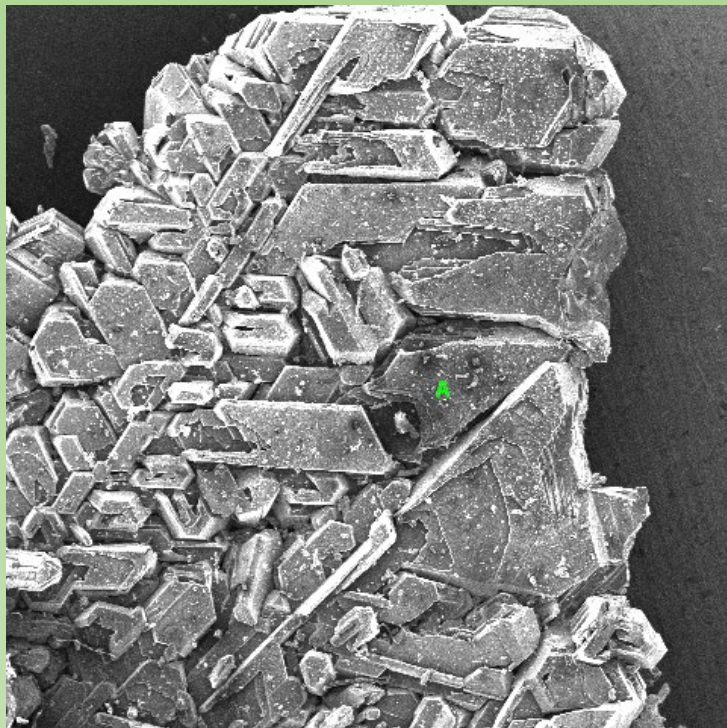


Интерпретация изображения

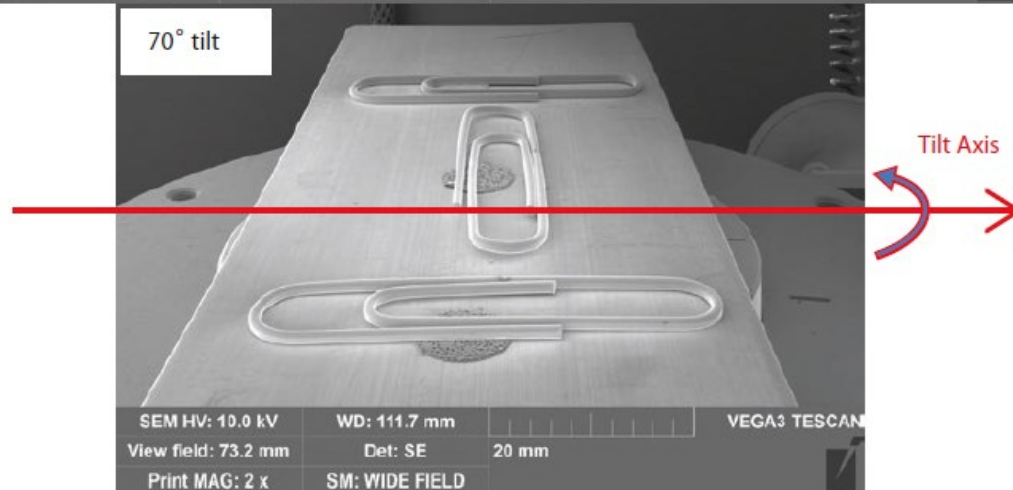
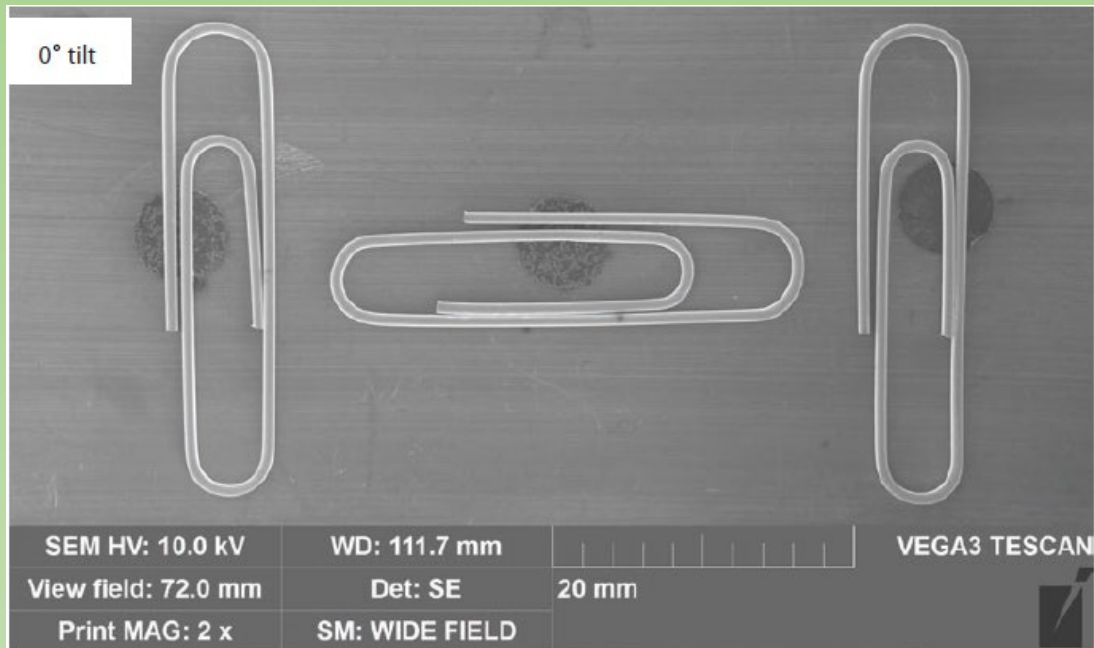


Щель в Si, 35 keV

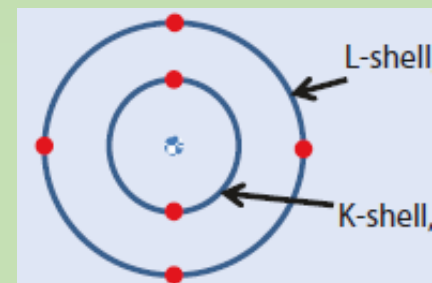
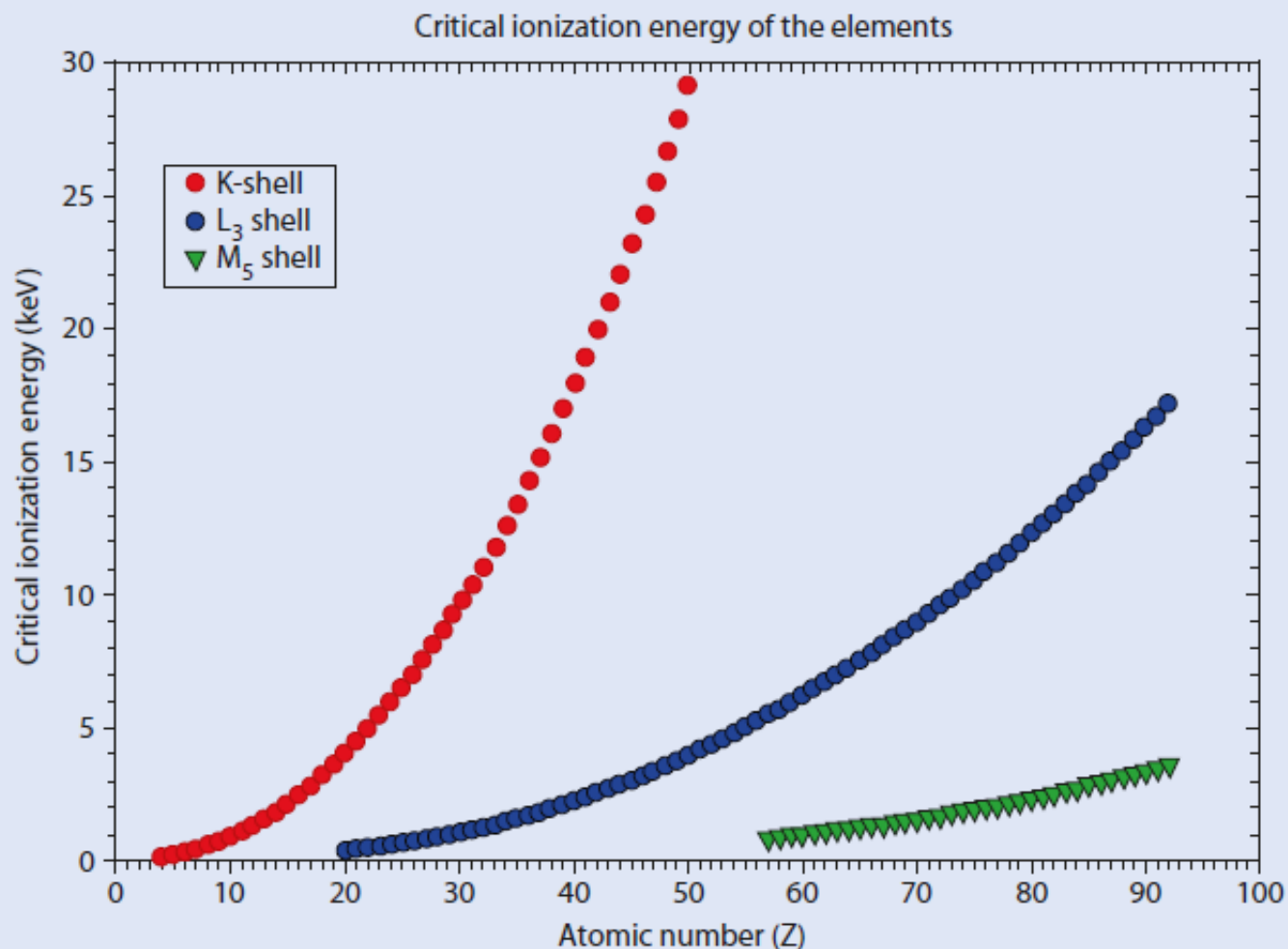
Микрокристаллы SiC



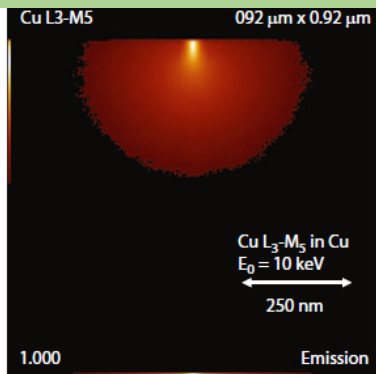
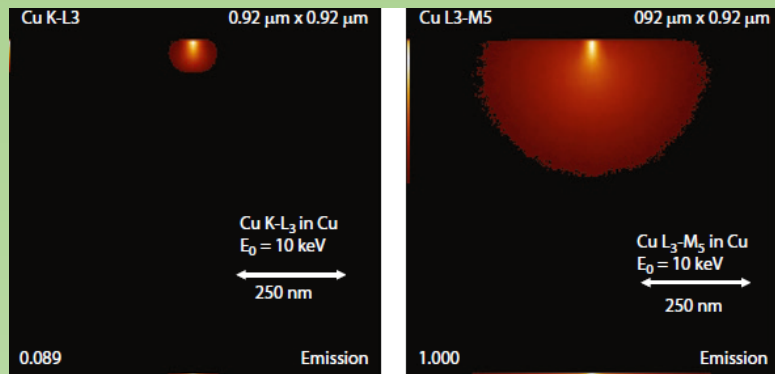
Влияние наклона



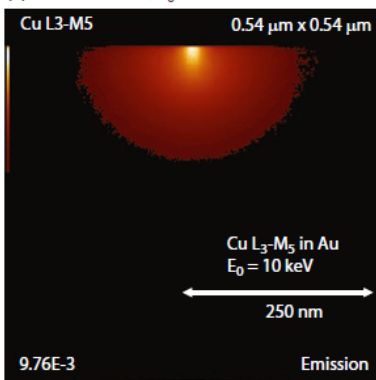
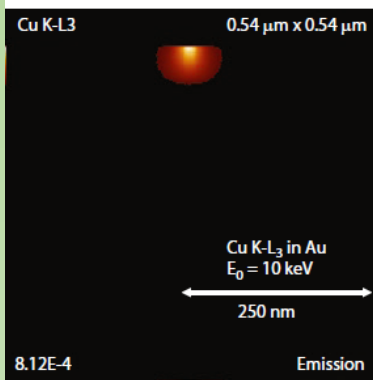
Глубина формирования сигнала



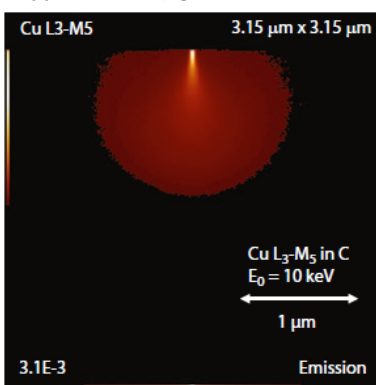
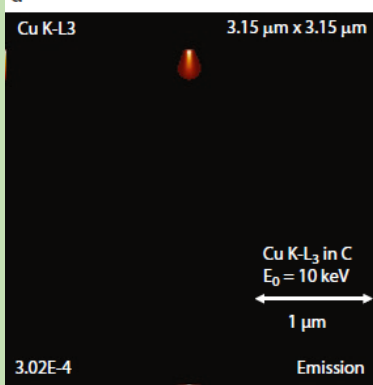
Глубина формирования сигнала



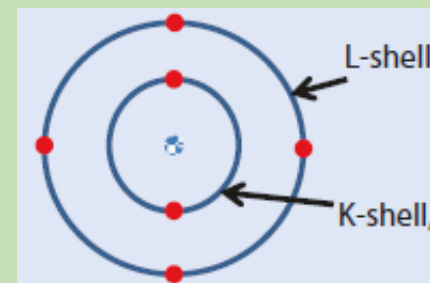
c Monte Carlo (DTSA-II) simulation of Cu X-ray production in Au; $E_0 = 10 \text{ keV}$



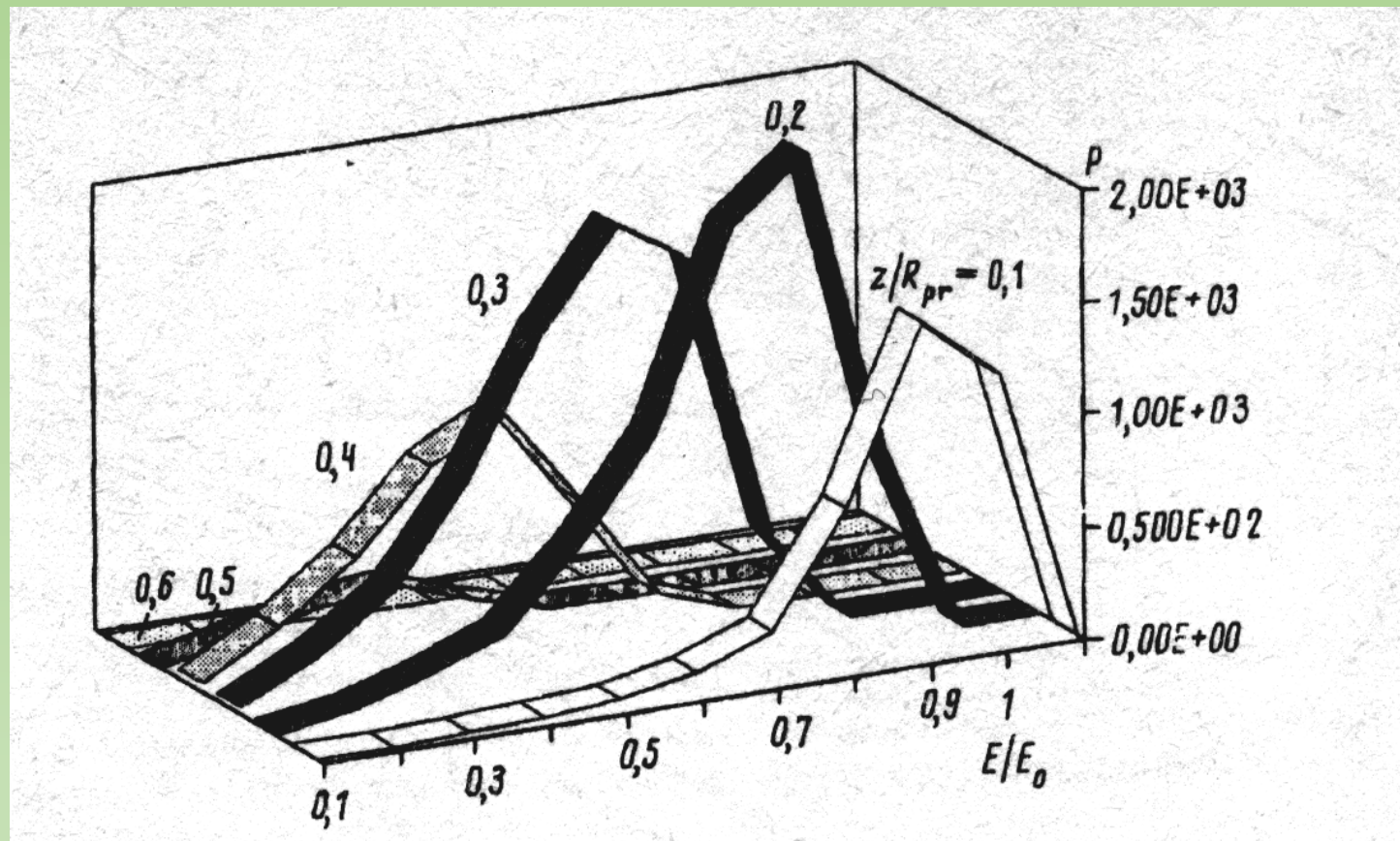
d Monte Carlo (DTSA-II) simulation of Cu X-ray production in C; $E_0 = 10 \text{ keV}$



Cu K-L в Cu, 10 keV
Cu L-M в Cu, 10 keV
Cu K-L в Au, 10 keV
Cu L-M в Au, 10 keV
Cu K-L в C, 10 keV
Cu L-M в C, 10 keV

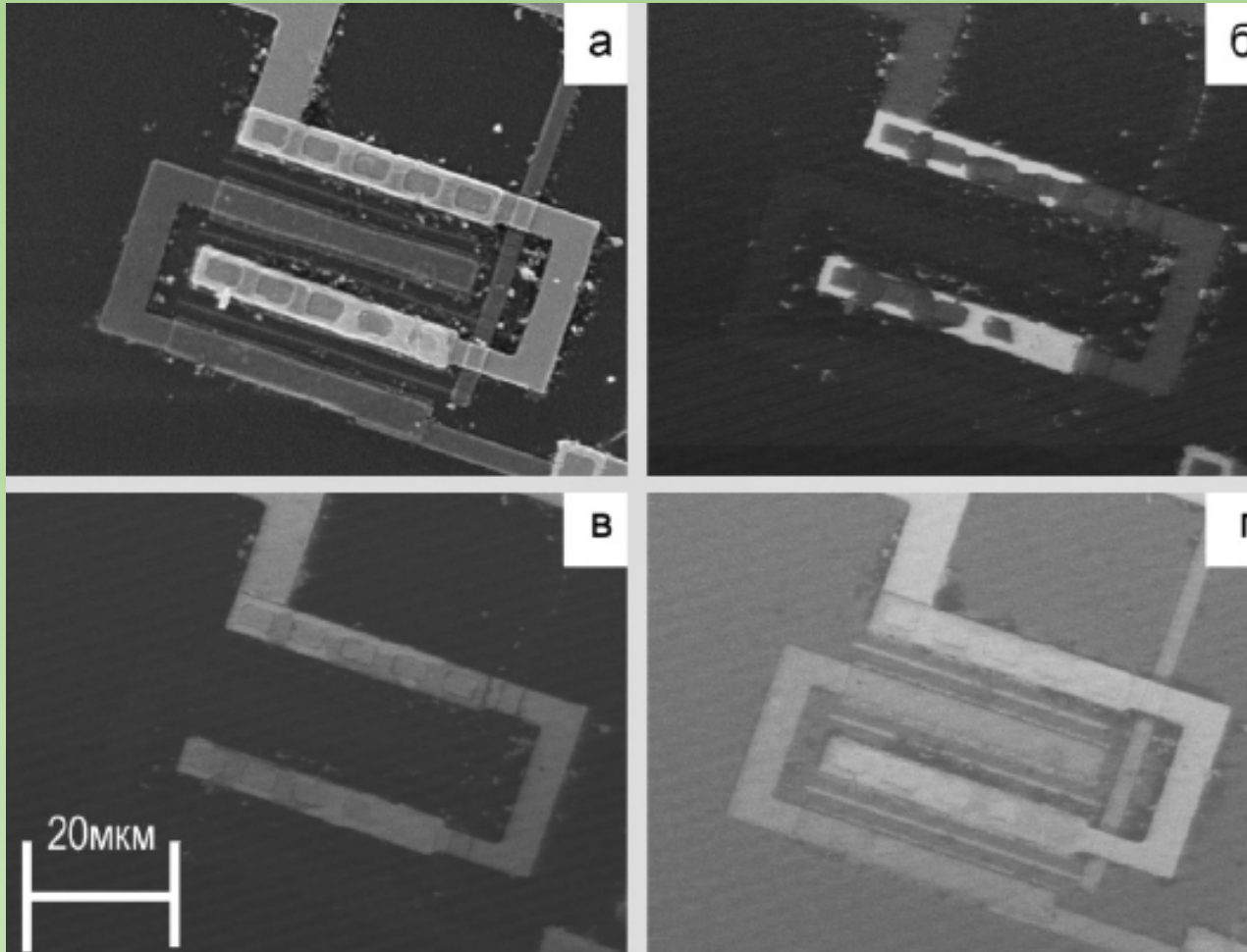


Неразрушающий контроль по глубине



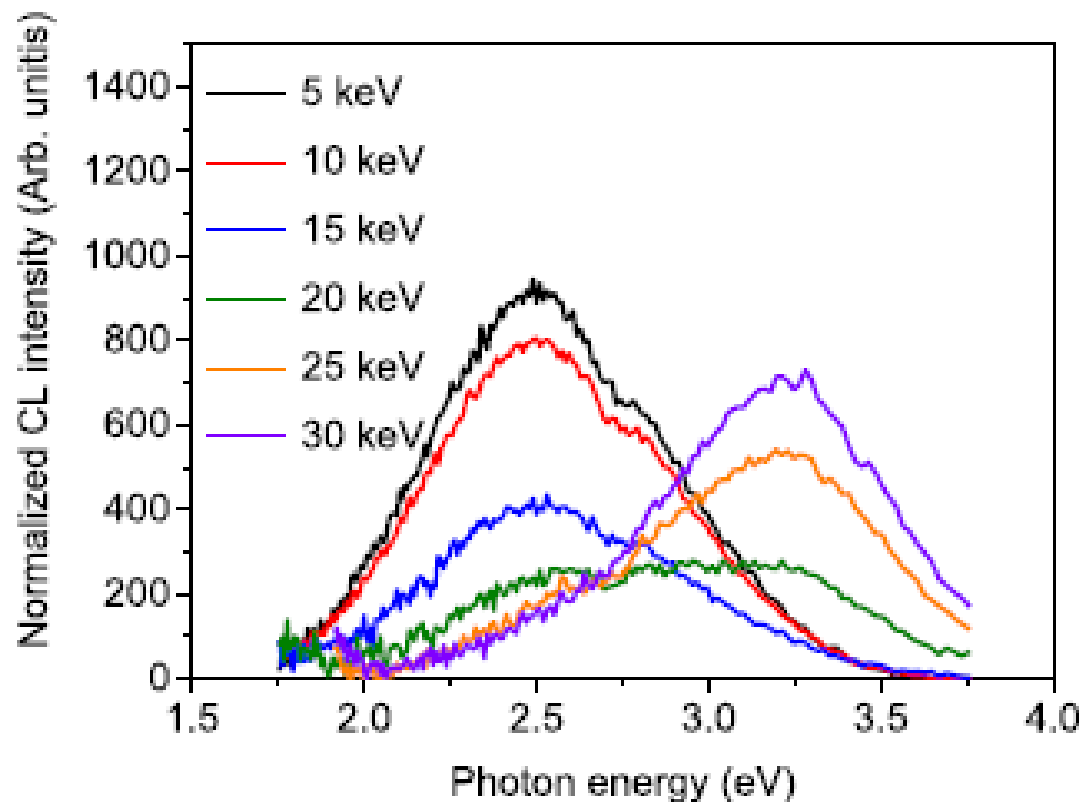
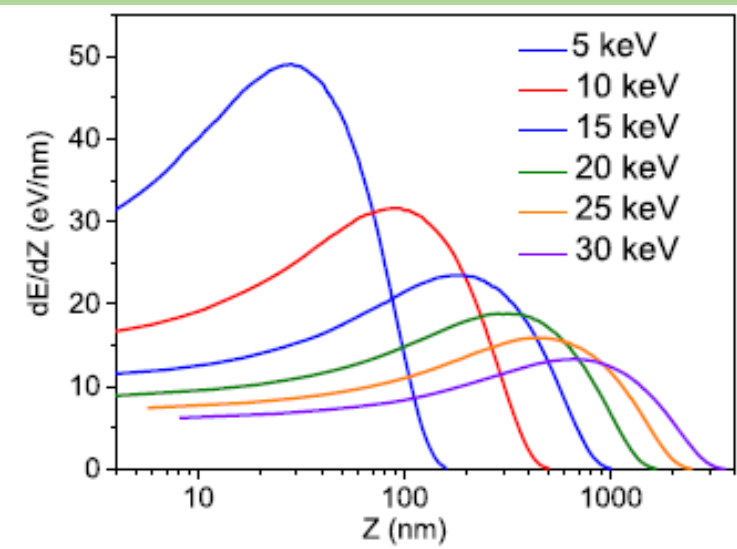
Зависимость вероятности энергии BSE при нескольких глубинах

Неразрушающий контроль по глубине



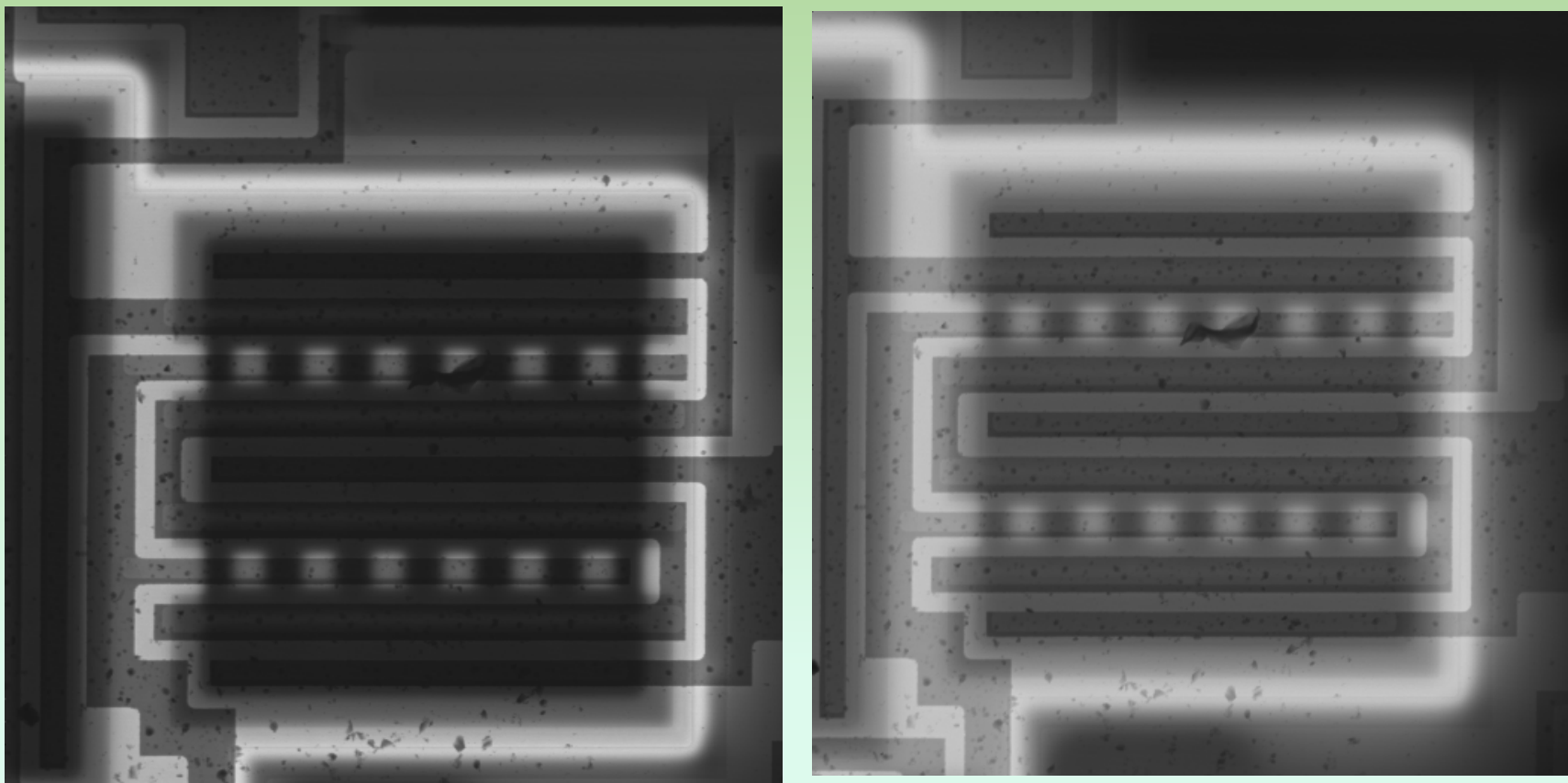
а – SE, б-г – BSE с энергией 19.9, 19.5 и 18.5 кэВ
(фильтрация по энергии), $E_b = 20$ кэВ.

Неразрушающий контроль по глубине



CL γ/β -Ga₂O₃

Неразрушающий контроль по глубине



Изображения фрагмента микросхемы в режиме НТ при 25 (лев.) и 35 кэВ (прав.). Размер изображения 280x280 мкм².