

# Введение. Назначение РЭМ

Получение увеличенного изображения объектов

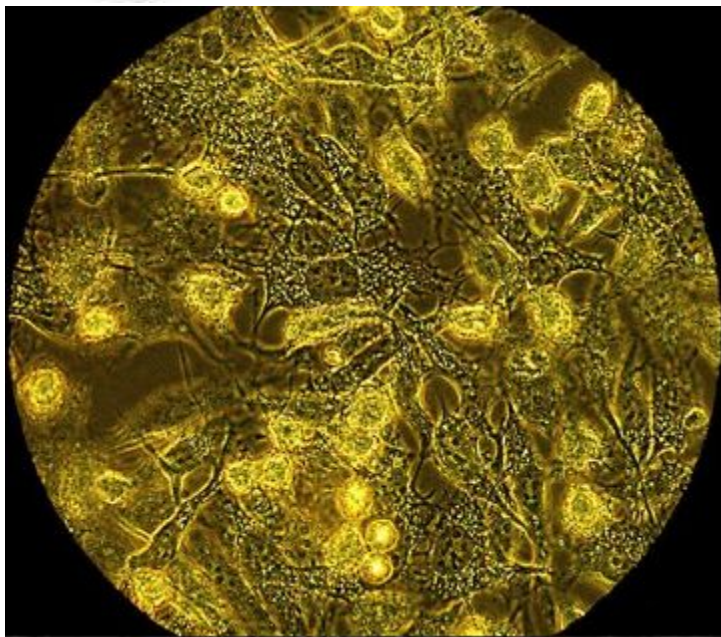


Оптический микроскоп

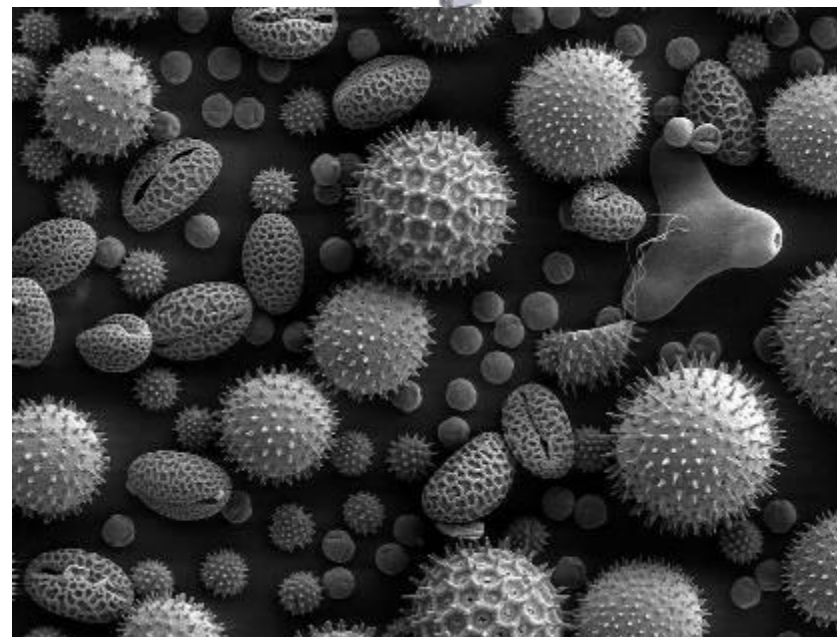
Растровый электронный микроскоп



Изображение пылицы

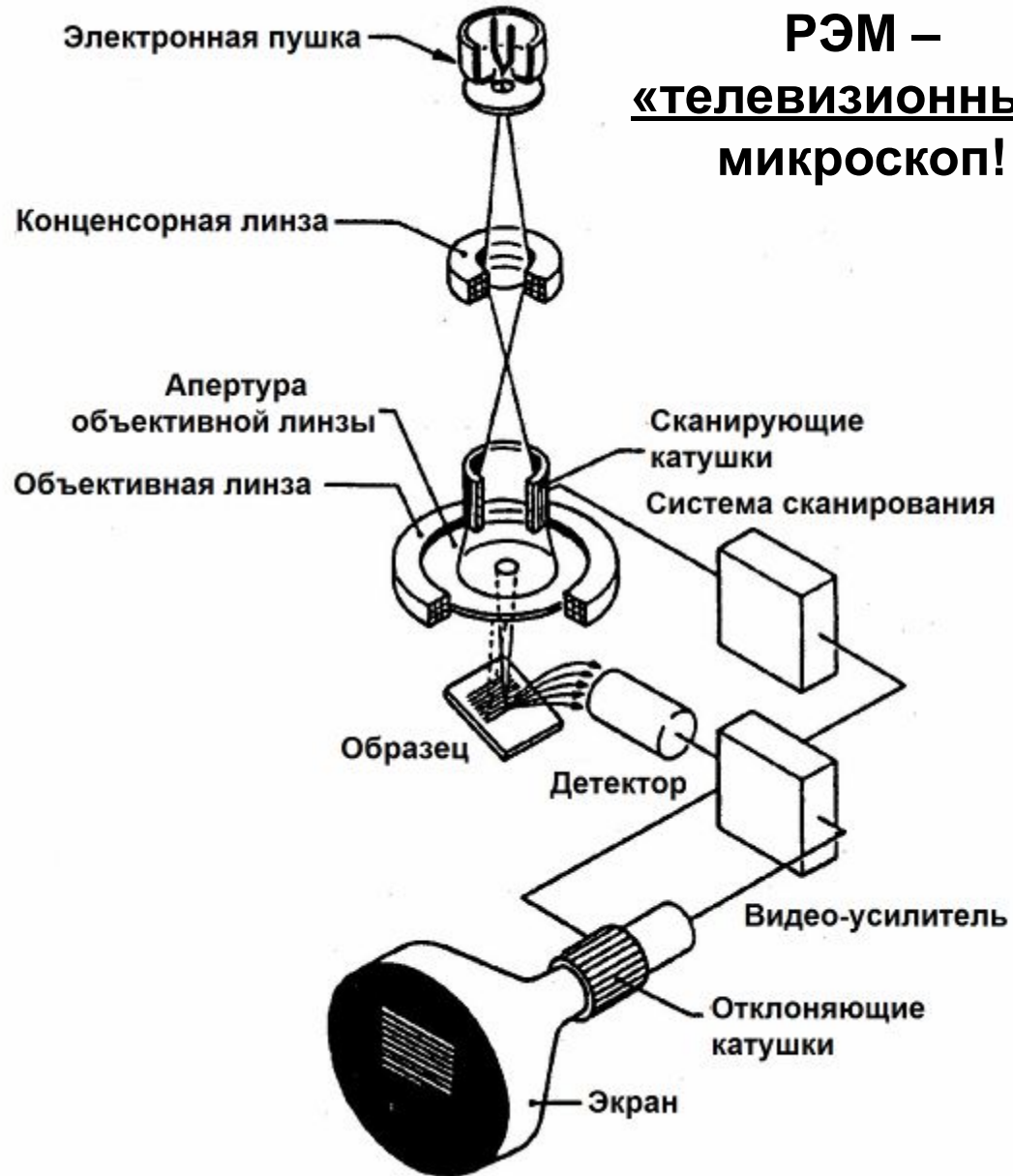
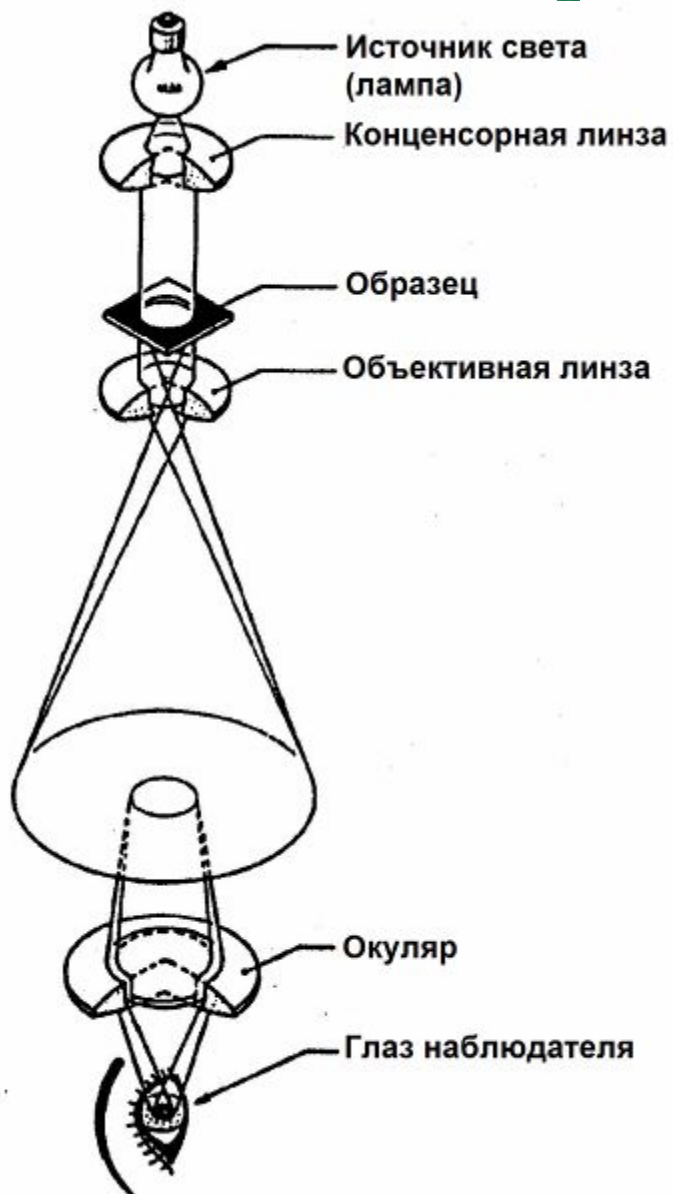


Увеличение: до 1 000 – 1 500 раз



до 100 000 – 200 000 раз

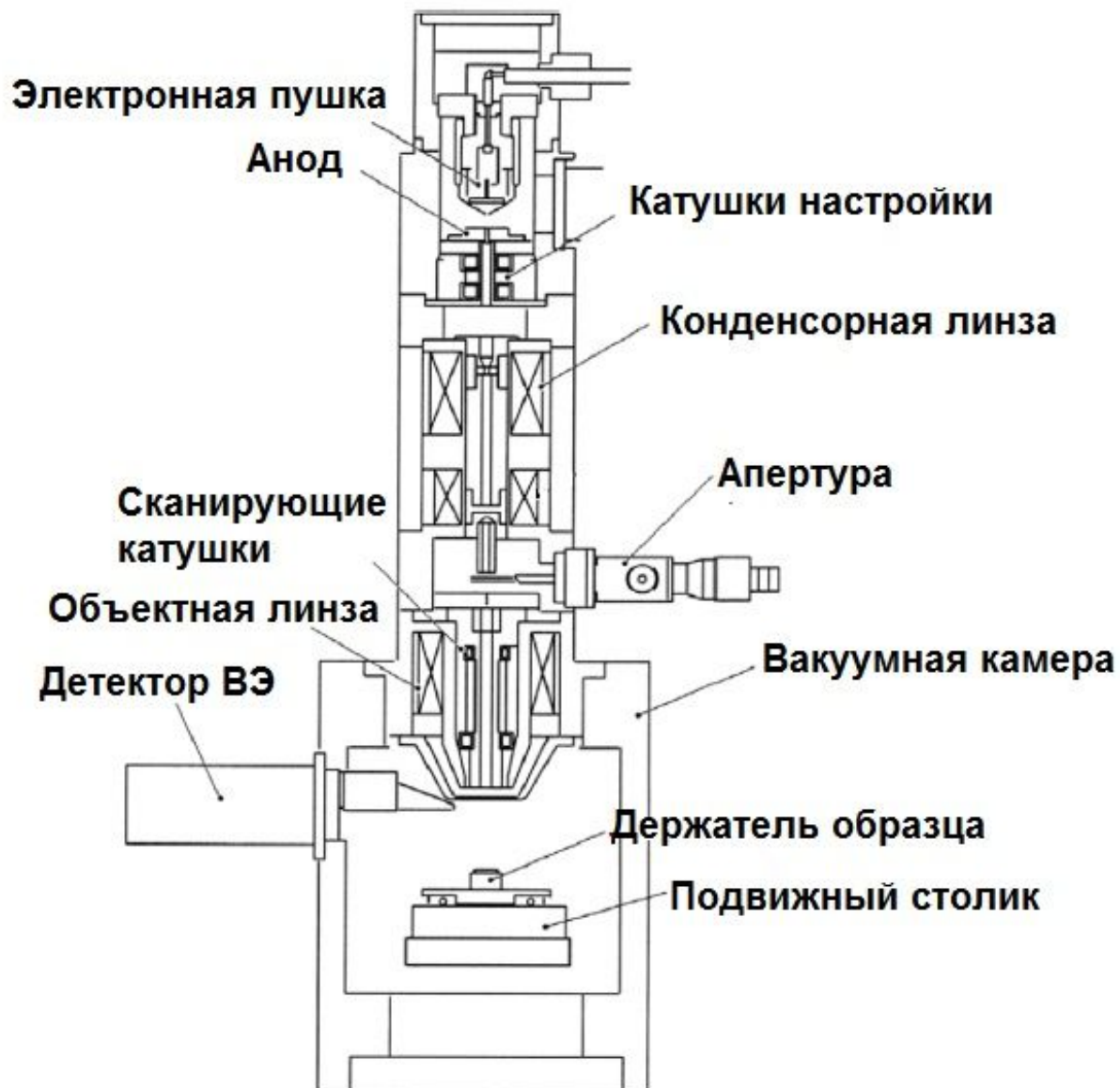
# Введение. Принцип работы



---

# Устройство РЭМ

# Основные узлы РЭМ

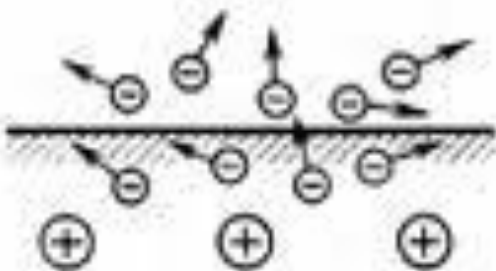


---

# Электронная оптика

# Термоэлектронная эмиссия

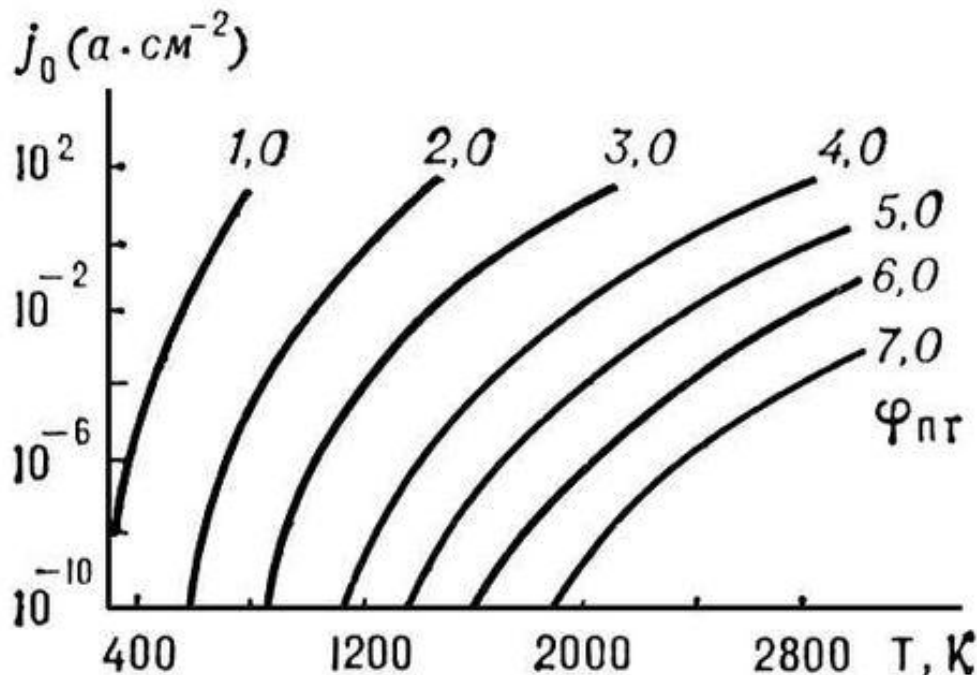
Термоэлектронная эмиссия (эффект Ричардсона, эффект Эдисона) — явление испускания электронов нагретыми телами.



$$j_c = AT_c^2 \exp\left(-\frac{\varphi_w}{kT_c}\right)$$

$$A \approx 1,68 \cdot 10^{-23} \text{ A} \cdot \text{K}^{-2}$$

$$A \approx 120 \text{ A} \cdot \text{K}^{-2}$$



$\varphi_w$  — работа выхода материала катода (2- 6 эВ)

При  $T=273 \text{ }^\circ\text{K}$   $kT = 0,025 \text{ эВ}$

# Автоэлектронная эмиссия

**Автоэлектронная (полевая) эмиссия** – явление выхода электронов из металла или полупроводника под действием сильного электрического поля. Название, отражающее природу явления – туннельная эмиссия.

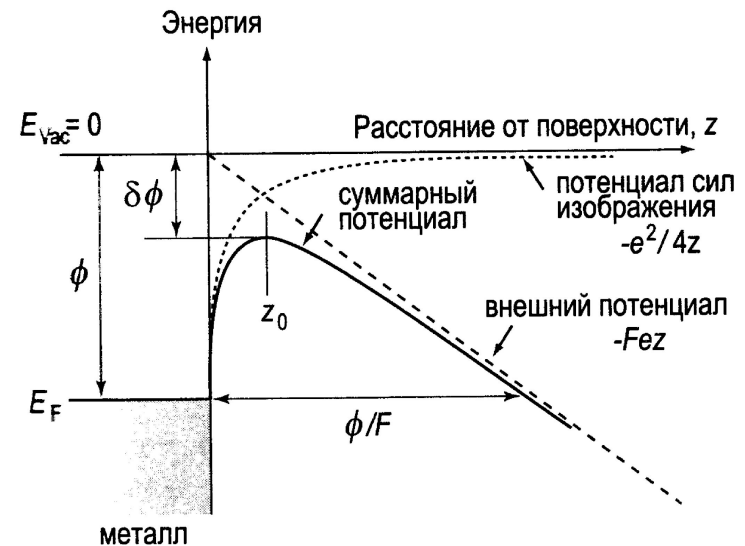
$$j_c = \frac{k_1 E^2}{\Phi_{Weff}} \exp\left(-\frac{k_2 \Phi_{Weff}^{3/2}}{|E|}\right)$$

$$B > c 10^7 \quad j_c = \frac{W_1 E^2}{\phi_w} \exp\left(-\frac{k_2 \phi^{3/2}}{|E|}\right)$$

$\Phi_{Weff}$  – эффективная работа выхода материала катода

$T_c$  – температура катода

$E$  – напряженность поля вблизи катода



# Эффект Шоттки

Эмиссии электронов из металла препятствует потенциальный барьер, образованный из электрических сил изображения.

Снижение этого барьера по мере увеличения прилагаемого внешнего электрического поля называется **эффектом Шоттки**.

$$W_P(x) = \frac{q^2}{16\pi\epsilon_0 x} + qEx$$

$$\varphi_{W_{eff}} = \varphi_W - e \sqrt{\frac{eE}{4\pi\epsilon_0}}$$

$E$  – напряженность поля вблизи катода

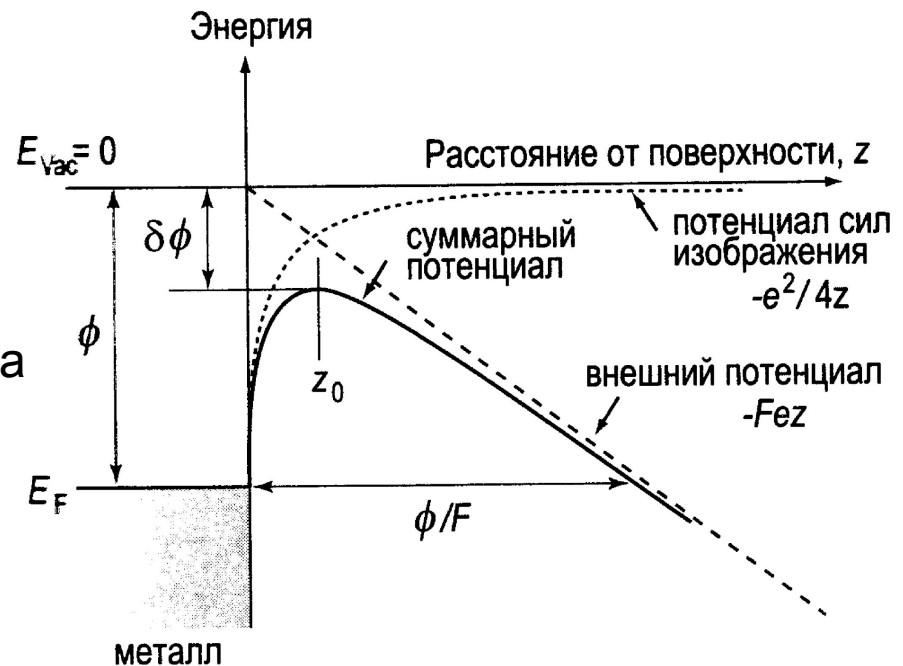
При  $E = 10^5$  В/см,  $\Delta\varphi = 0,12$  В,

При  $E = 10^7$  В/см,  $\Delta\varphi = 1,2$  В

$$j_c = AT_c^2 \exp\left(-\frac{\varphi_W}{kT_c}\right)$$

$\varphi_W$  – работа выхода материала катода (2- 6 эВ)

При  $T=273$  °К  $kT = 0,025$  эВ





Сравнение характеристик различных типов источников электронов

| Характеристика                                     | Термоэлектронная эмиссия |                      |   | Полевая эмиссия                                   |  |
|--|--------------------------|----------------------|---|---|--|
|  |                          |                      |   | Термополевые пушки                                | Пушки с холодной полевой эмиссией W (310)                            |
|  | W                        | LaB <sub>6</sub>     | ZrO/W(100)                              | W (100)   | W (310)  |
| Яркость (А/см <sup>2</sup> стер)                   | -5 x 10 <sup>5</sup>     | -5 x 10 <sup>6</sup> | -5 x 10 <sup>6</sup>                    | -5 x 10 <sup>8</sup>                              | -5 x 10 <sup>8</sup>   |
| Размер источника                                   | 50 мкм                   | 10 мкм               | 0,1-1,0 мкм                             | 10-100 нм   | 10-100 нм  |
| Разброс электронов по энергии (эВ)                 | 2,3                      | 1,5                  | 0,6-0,8                                 | 0,6 0,8   | 0,3-0,5  |
| Условия работы<br>давление (Па)<br>температура (К) | 10 <sup>-3</sup>         | 10 <sup>-5</sup>     | 10 <sup>-7</sup>                        | 10 <sup>-7</sup>                                  | 10 <sup>-8</sup>   |
|  | 2800                     | 1800                 | 1800                                    | 1600  | 300  |
| Эмиссия<br>ток эмиссии (мкА)                       | ~ 100                    | ~ 20                 | ~100                                    | 20-100  | 20-100   |
| стабильность в течение короткого времени           | 1%                       | 1%                   | 1%                                      | 7%  | 5%   |
| стабильность в течение длительного времени         | 1 %/ч                    | 3 %/ч                | 1 %/ч                                   | 6 %/ч   | 5 %/15 мин   |
| эффективность сбора тока эмиссии                   | 100%                     | 100%                 | 10%                                     | 10%   | 1%   |
| Техническое обслуживание                           | Не требуется             | Не требуется         | Требуется некоторое время для настройки | Несколько раз требуется наращивание нового острия | Каждые несколько часов требуется очистка острия катода путем вспышки |
| Стоимость/простота в обращении                     | Низкая/простая           | Низкая/простая       | Высокая/простая                         | Высокая/простая                                   | Высокая/сложная в обращении  |

Яркость электронной пушки

$$\beta = \frac{\Delta I_c}{\Delta S \Delta \Omega} = \frac{j_c}{\pi \alpha^2}$$

$$E_p = kT$$

# Сравнение параметров

| Тип катода                                 | Яркость,<br>А/см <sup>2</sup> *с<br>м <sup>2</sup> | Размер<br>виртуального<br>источника | Температура,<br>К | Разброс<br>энергии<br>электронов,<br>эВ | Ток<br>пучка, нА | Вакуум,<br>торр   | Время<br>работы,<br>час |
|--|--|-------------------------------------|-------------------|---|------------------|-------------------|-------------------------|
| Вольфрам                                   | 10 <sup>5</sup>                                    | 25 мкм                              | 2700              | 2 – 3                                   | до 1000          | 10 <sup>-5</sup>  | 100                     |
| LaB <sub>6</sub>                           | 5×10 <sup>6</sup>                                  | 10 мкм                              | 1700              | 2 – 3                                   | до 1000          | 10 <sup>-6</sup>  | 500                     |
| Термоавто-<br>эмиссионный<br>(катод Шотки) | 10 <sup>8</sup>                                    | 20 нм                               | 1700              | 0,9                                     | до 200           | 10 <sup>-8</sup>  | >1500                   |
| Холодный<br>автоэмиссионный                | 10 <sup>9</sup>                                    | 5 нм                                | 300               | 0,22                                    | до 2             | 10 <sup>-10</sup> | >1500                   |

# Источник электронов – термоэлектронный катод

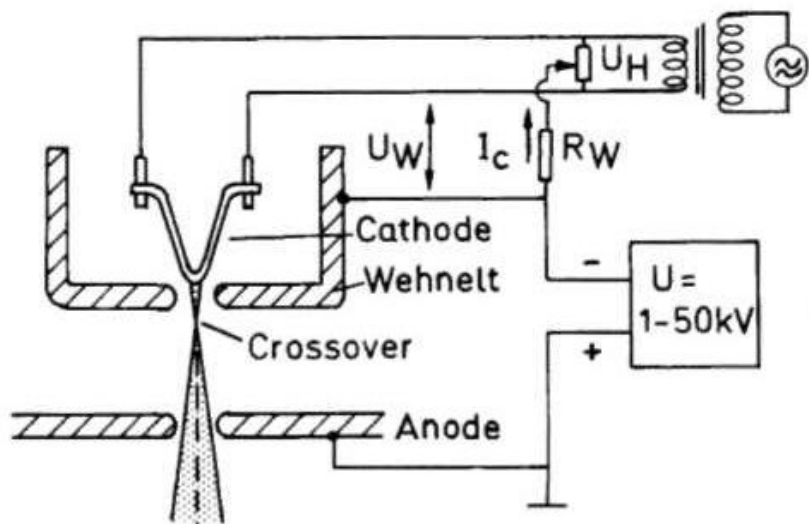
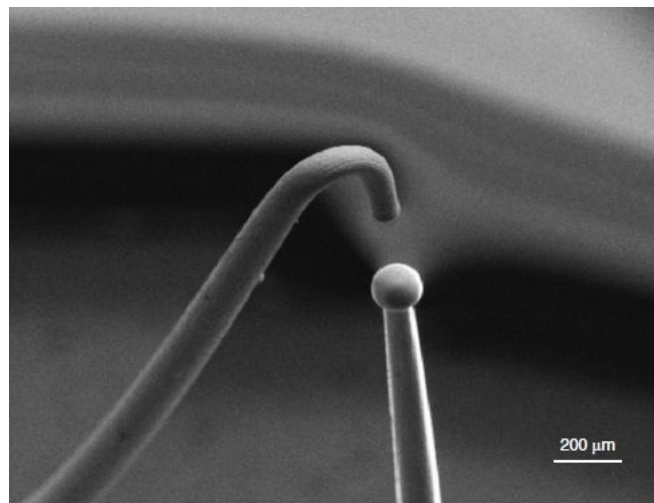
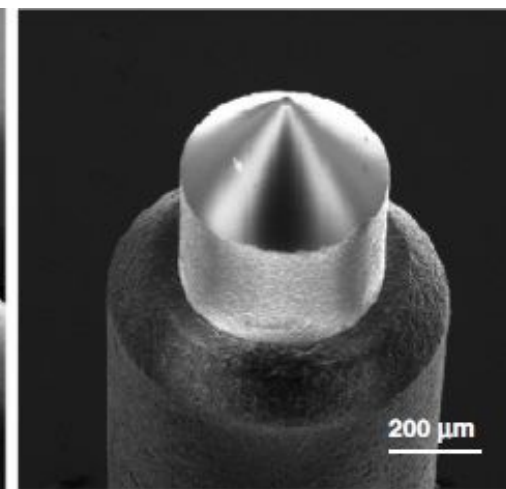
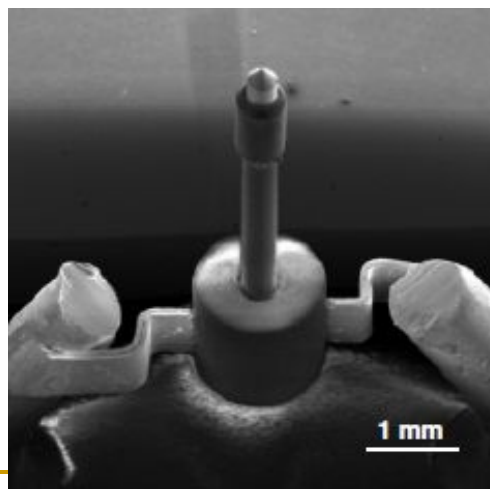
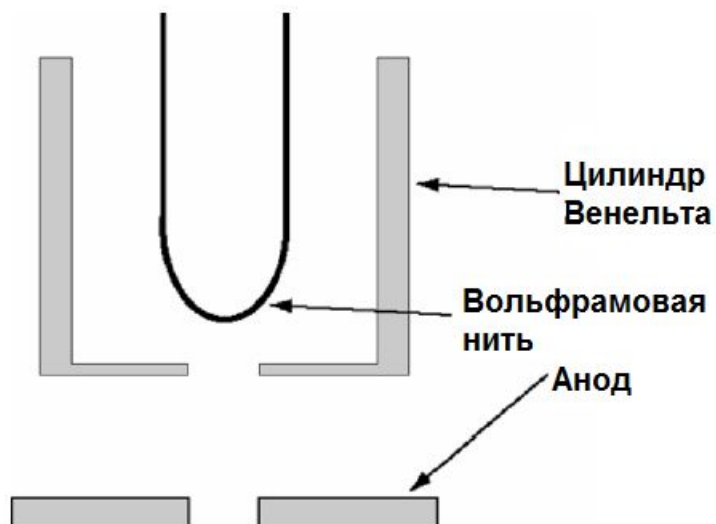


Схема электронной пушки



Перегоревший вольфрамовый катод  
(время жизни ~ 100 часов)



Катод  $\text{LaB}_6$  (время жизни ~ 500 часов)

# Источник электронов – автоэлектронный катод

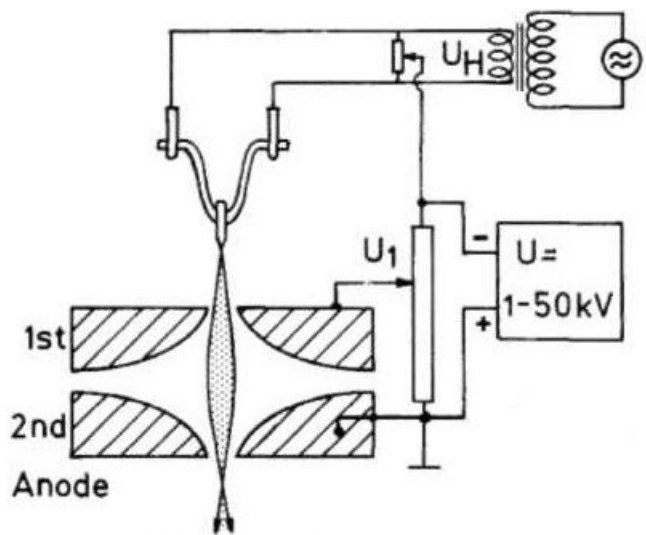
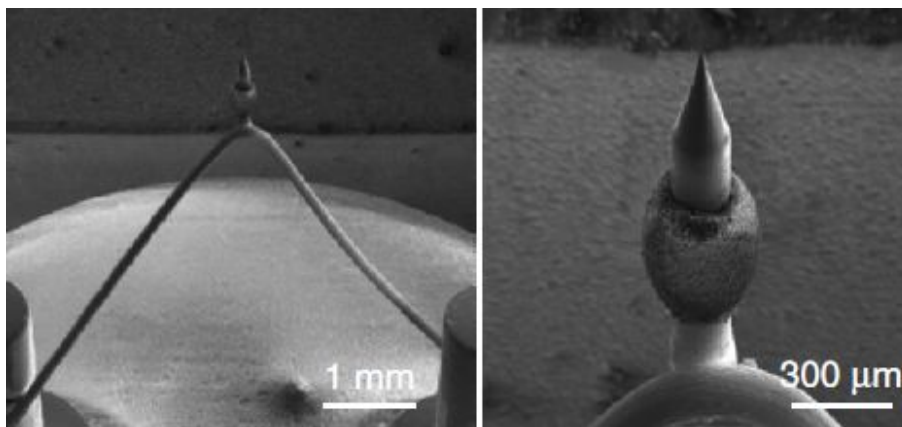
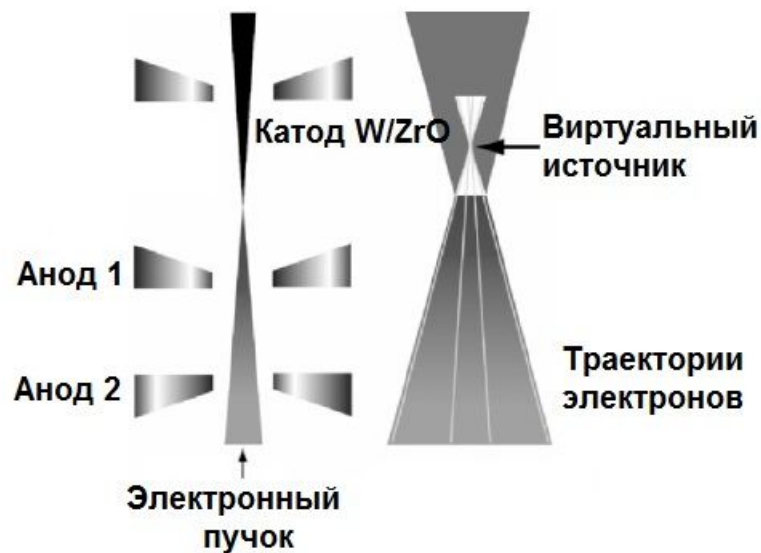
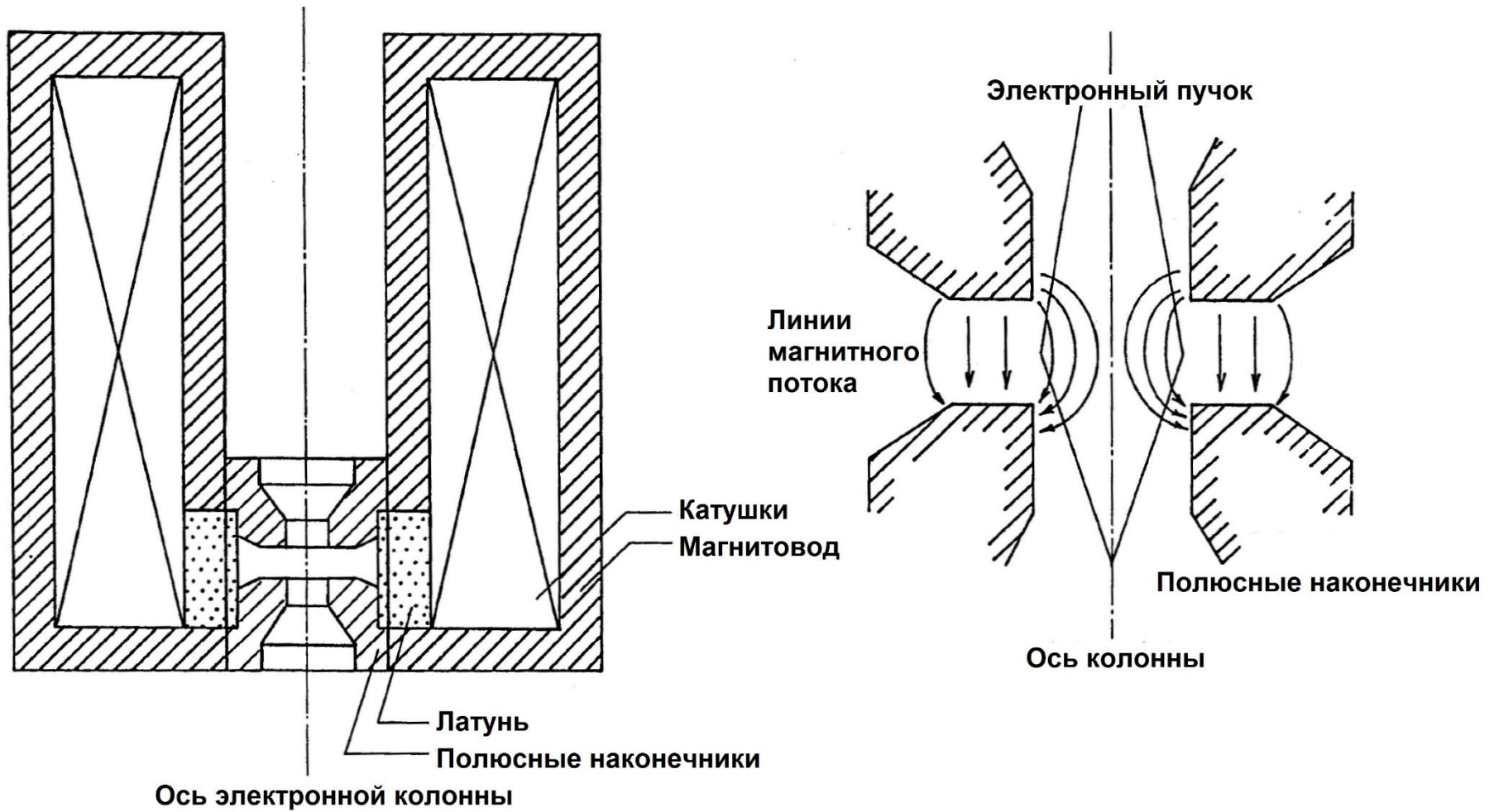


Схема электронной пушки



Автоэмиссионный катод W (310)  
(время жизни > 1500 часов)

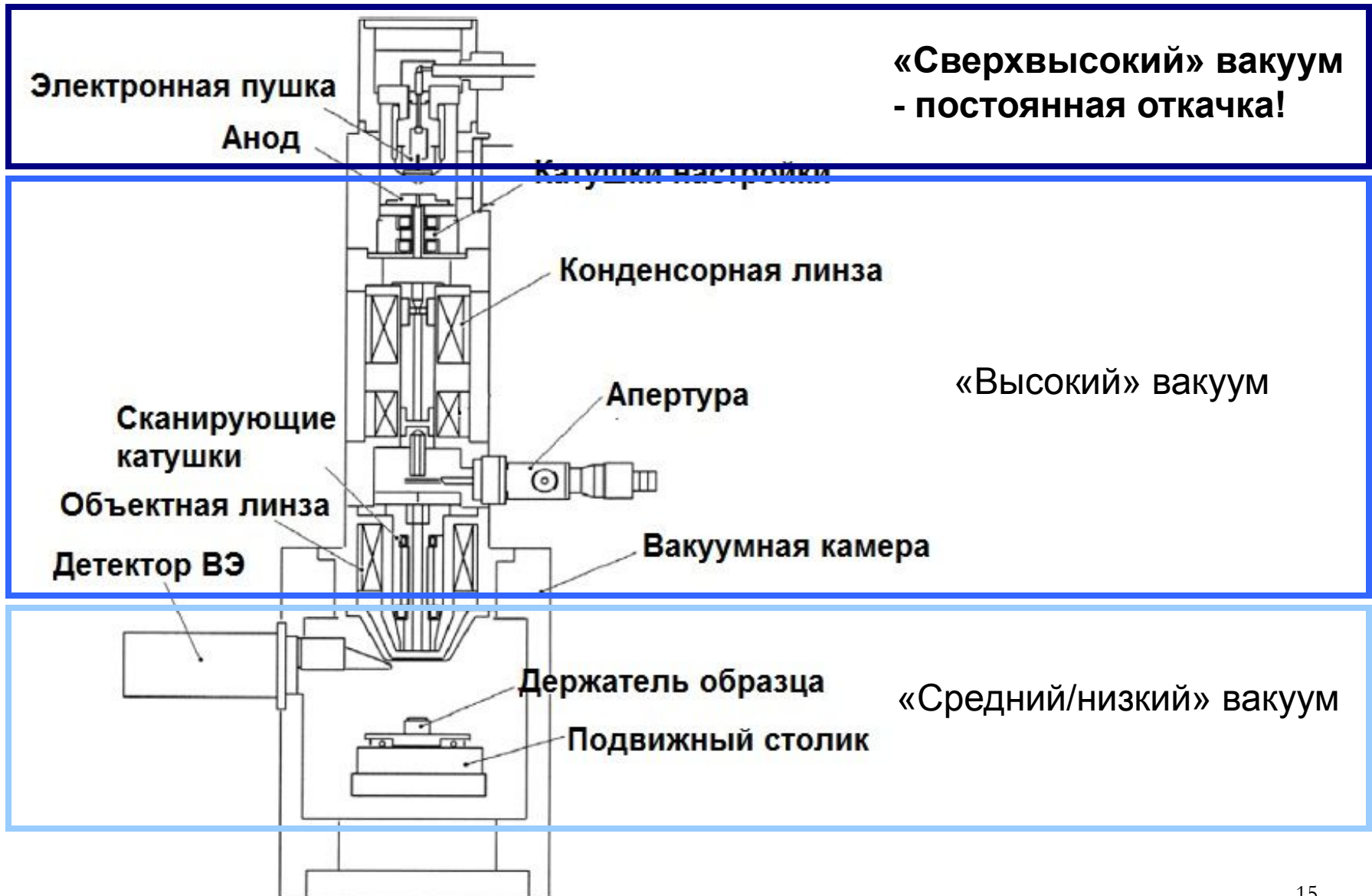
# Электромагнитные линзы



---

# Вакуумная система

# Дифференцированная откачка



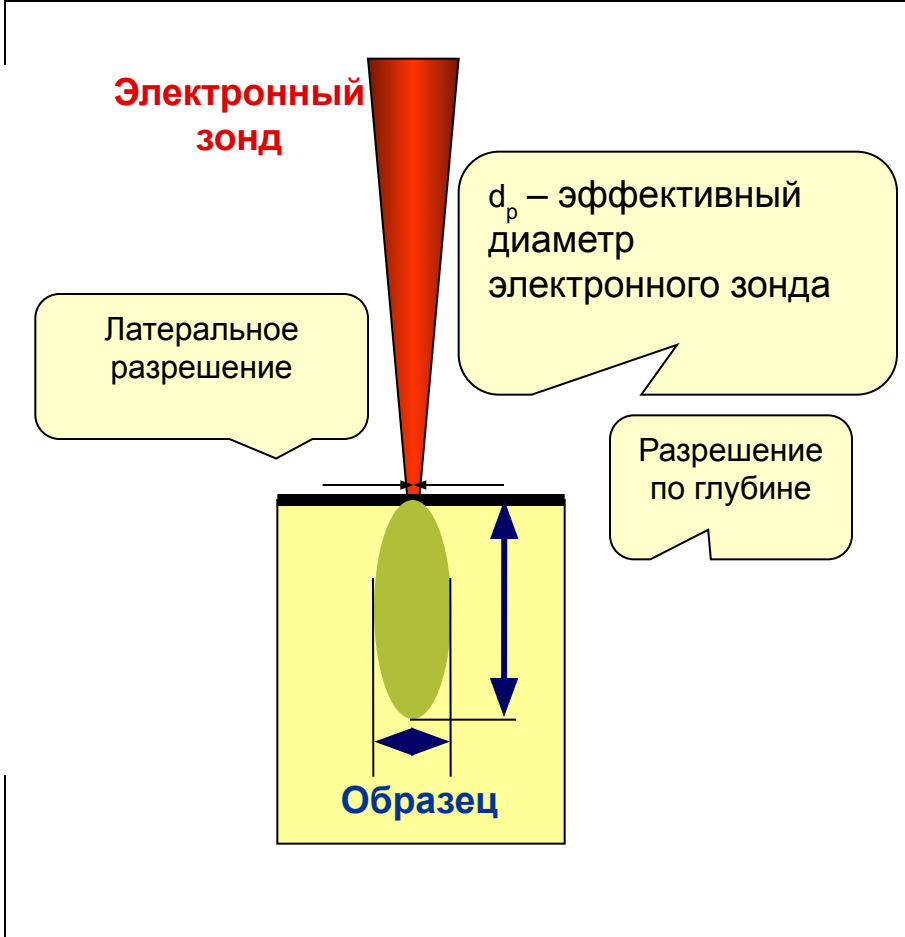
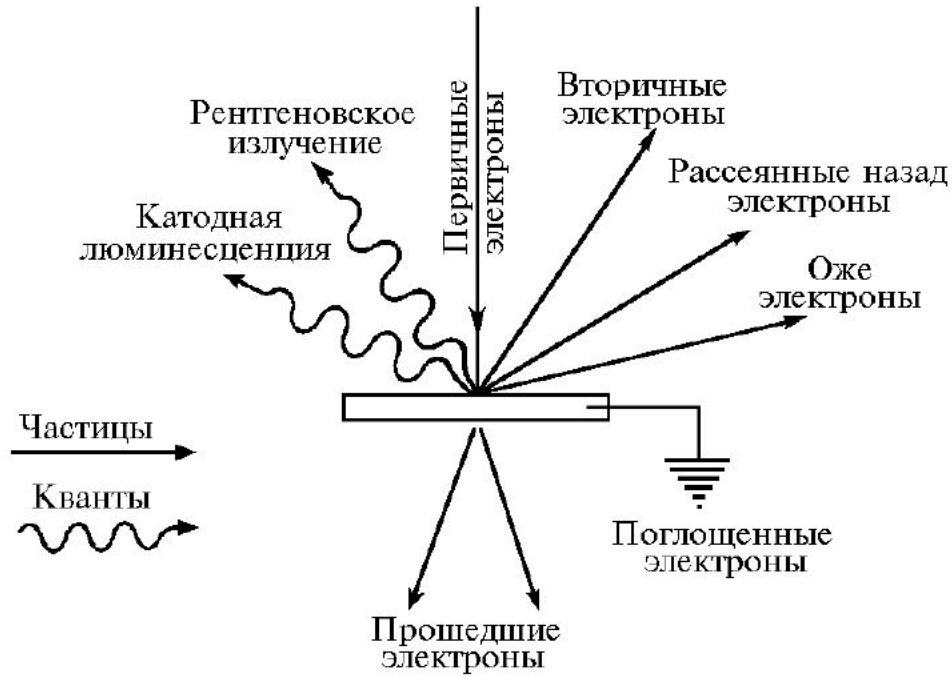
---

Взаимодействие электронного зонда с  
образцом.

Информативность получаемых  
СИГНАЛОВ.



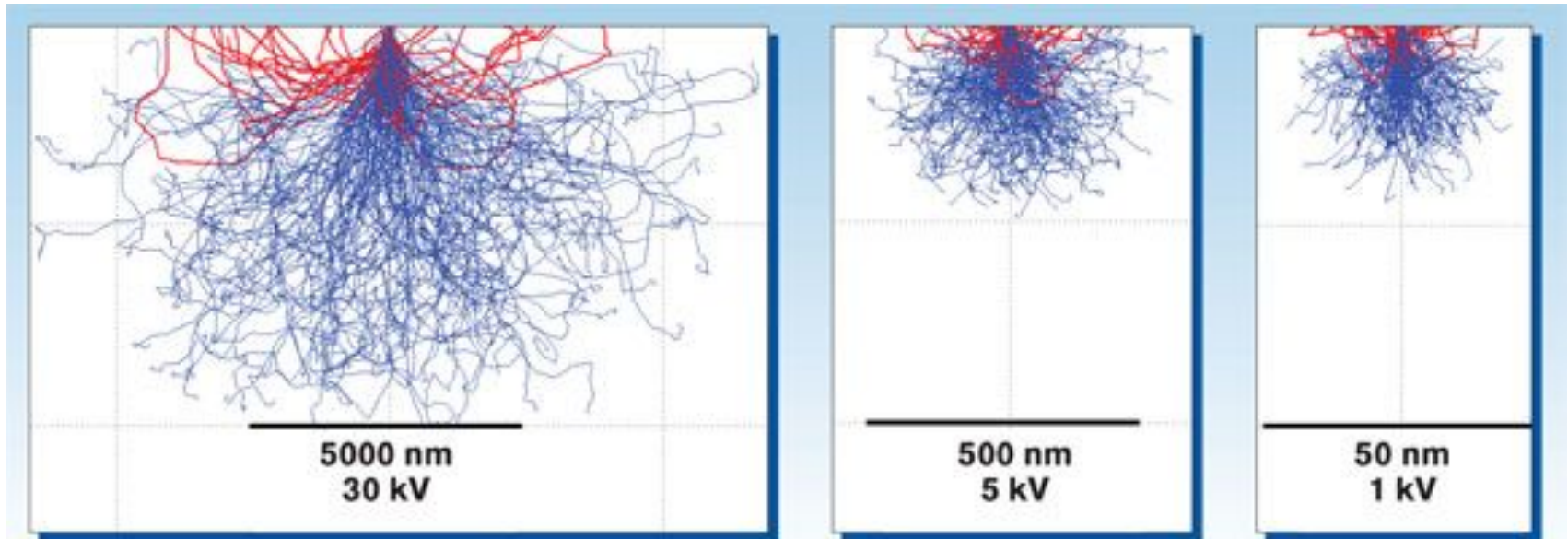
# Взаимодействие электронного зонда с образцом



$$E_p = kT$$

Пространственное разрешение РЭМ определяется размером области, из которой регистрируется информативный сигнал!

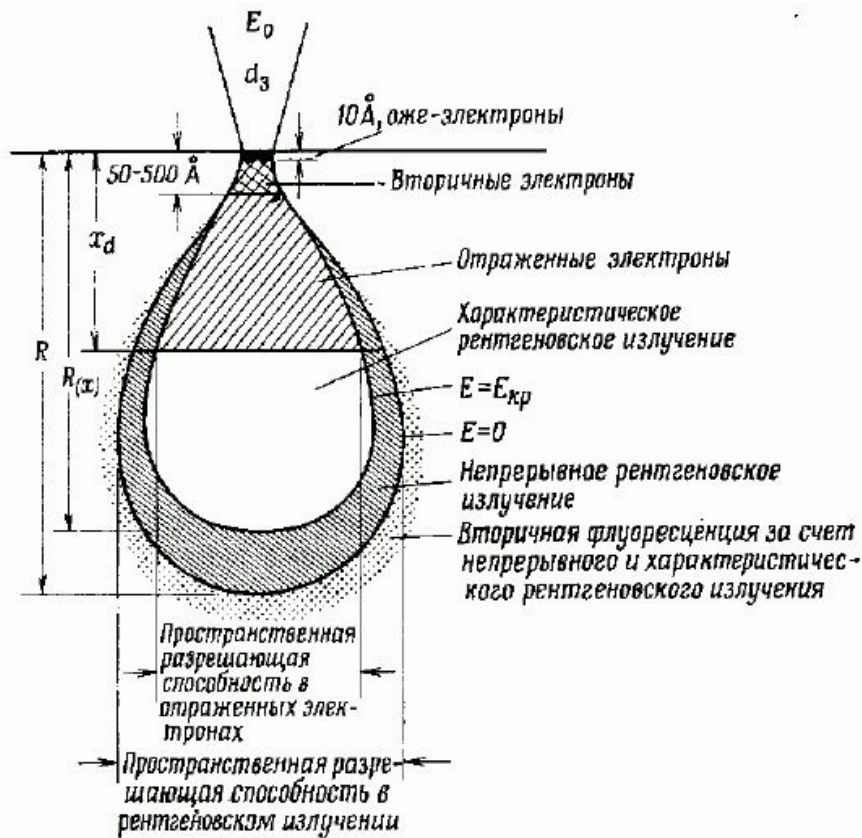
# Область взаимодействия электронного зонда с образцом



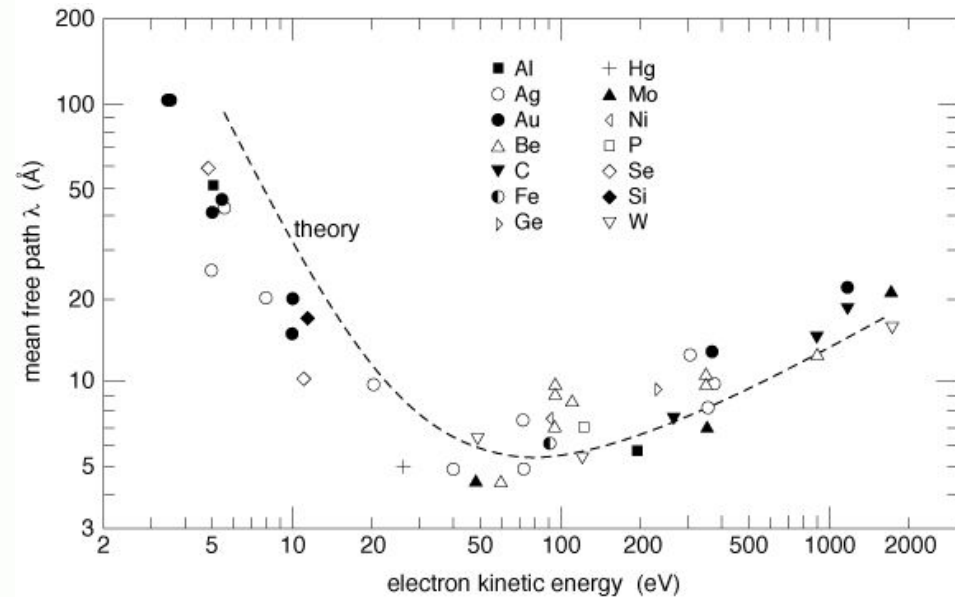
Рассеяние сфокусированного электронного пучка различной энергии в кремнии. Синие траектории – первичные электроны, красные – обратно рассеянные электроны.

$E_p = kV$  (Моделирование методом Монте-Карло, программа *CASINO*).

# Взаимодействие электронного зонда с образцом

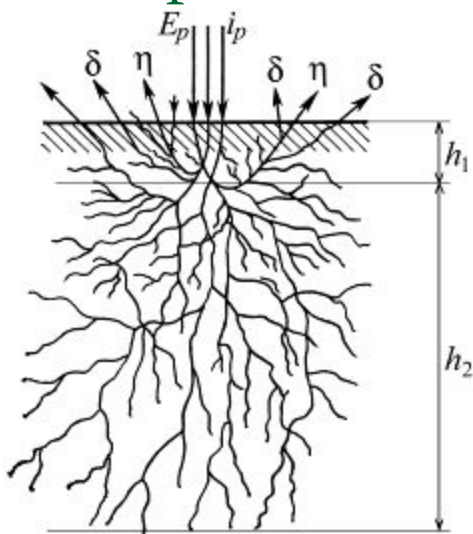


$$E_p = kT$$



Пространственное разрешение РЭМ определяется размером области, из которой регистрируется информативный сигнал!

# Вторичные электроны и обратно-рассеянные электроны

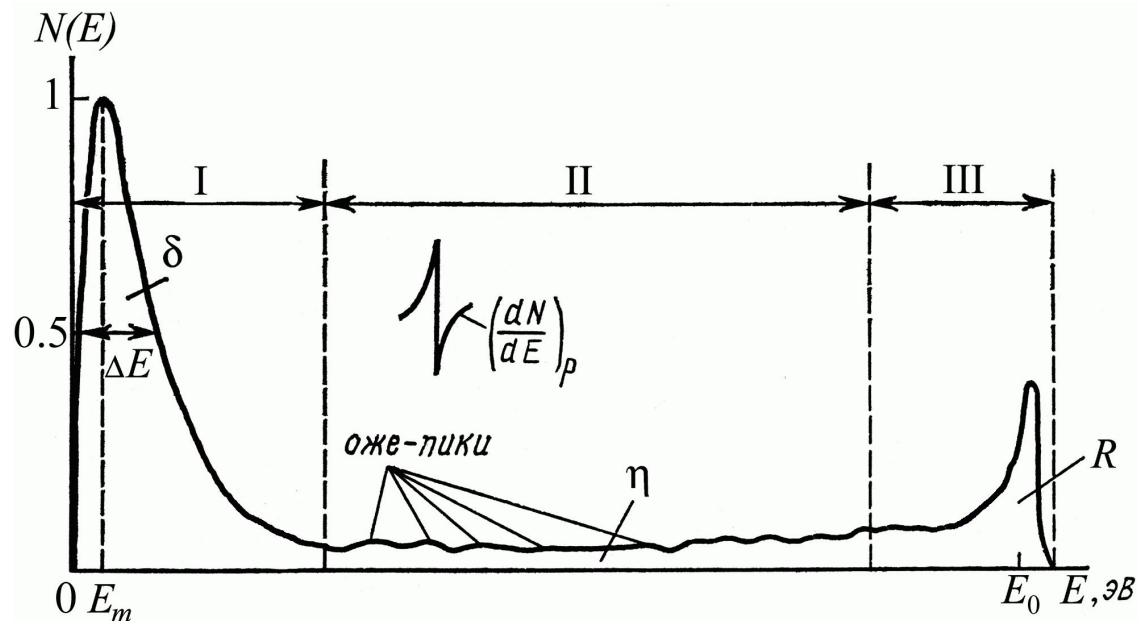


$$\delta = \frac{I_{SE}}{I_0} \quad \text{коэффициент ВЭ}$$

$$I_{SE} = I_0 \int_0^{50eV} f(E, \Omega) dE d\Omega$$

$$\eta = \frac{I_{BSE}}{I_0} \quad \text{коэффициент ОРЭ}$$

$$I_{BSE} = I_0 \int_{E_{th}}^{E_0} f(E, \Omega) dE d\Omega$$

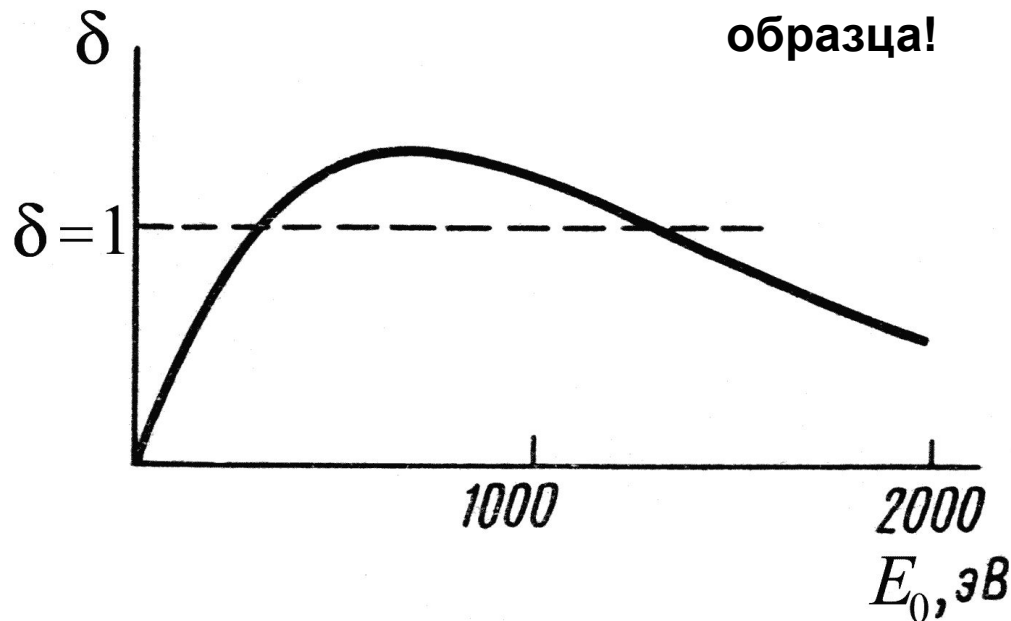


$I_{SE}$  – ток ВЭ,  $I_{BSE}$  – ток ОРЭ,  $E_0$  – ток зонда,  
 $E_0$  – энергия электронов зонда,  
 $E_{th}$  – пороговая энергия детектора ОРЭ,  
 $f(E, \Omega)$  – функция распределения

вышедших электронов

# Зависимость вторичной электронной эмиссии от энергии первичного пучка

$\delta > 1$  – нет локальной зарядки образца!



|          | 5 кэВ | 20 кэВ | 50 кэВ |
|----------|-------|--------|--------|
| Алюминий | 0,40  | 0,10   | 0,05   |
| Золото   | 0,70  | 0,20   | 0,10   |

# Энергия и глубина выхода ВЭ

Диапазон энергий ВЭ: 0 – 50 эВ

Наиболее вероятная энергия ВЭ: 1,5 – 3,5 эВ

Средняя энергия ВЭ: 5 – 12 эВ

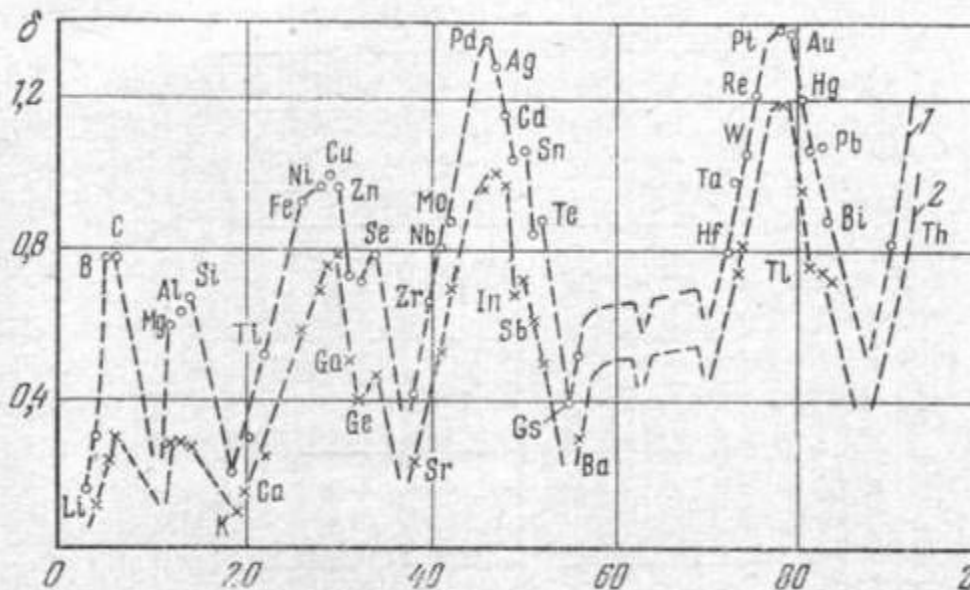
Диапазон значений  $\delta$ : 0,2 – 5 (10)

Вероятность выхода ВЭ с глубины  $t$

$$p(t) = p(0) \exp\left(-\frac{t}{t_{SE}}\right)$$

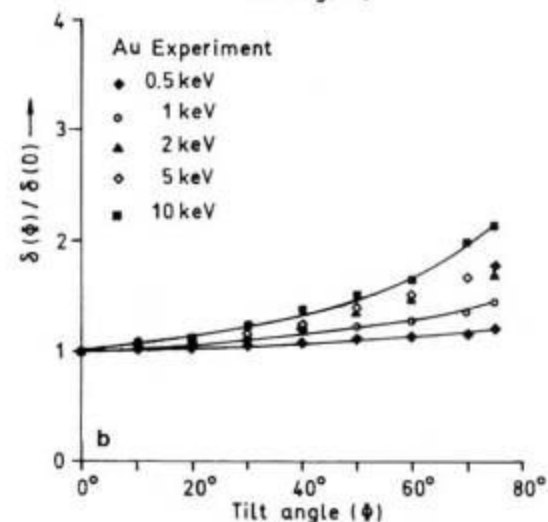
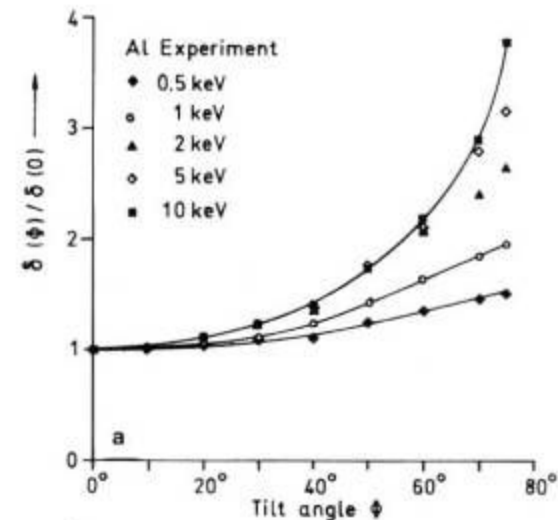
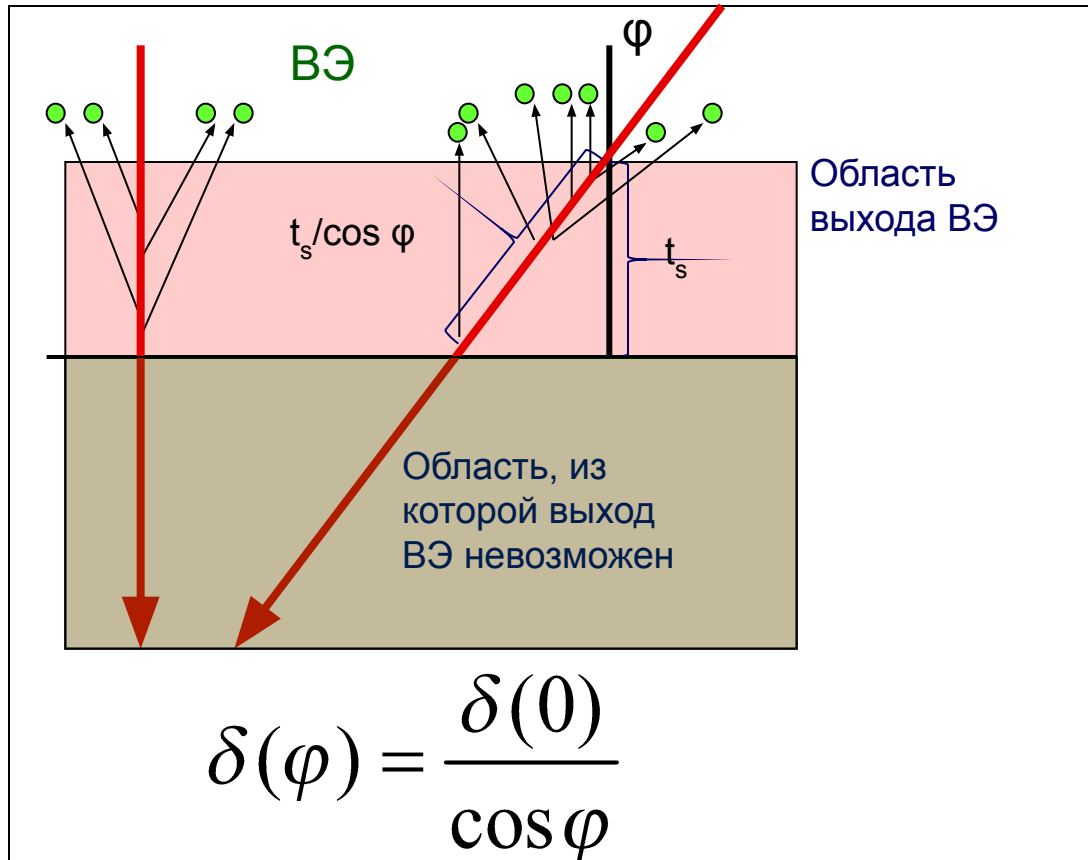
$t_{SE}$  – глубина выхода ВЭ  
металлы 0,5 – 1,5 нм, уголь - 10 нм,  
диэлектрики – до 20 нм

## Зависимость $\delta$ от атомного номера $Z$



$$E_p = kT$$

# Зависимость $\delta$ от угла падения электронного зонда

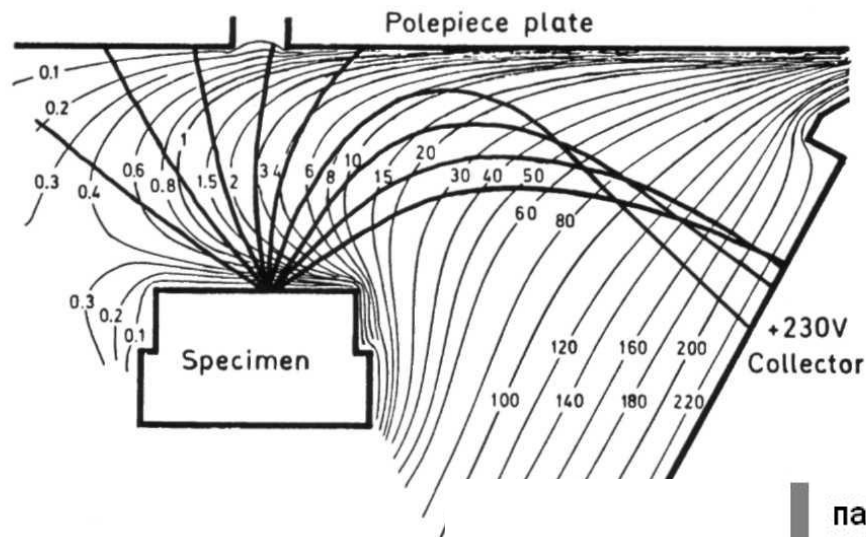


$$E_p = kT$$

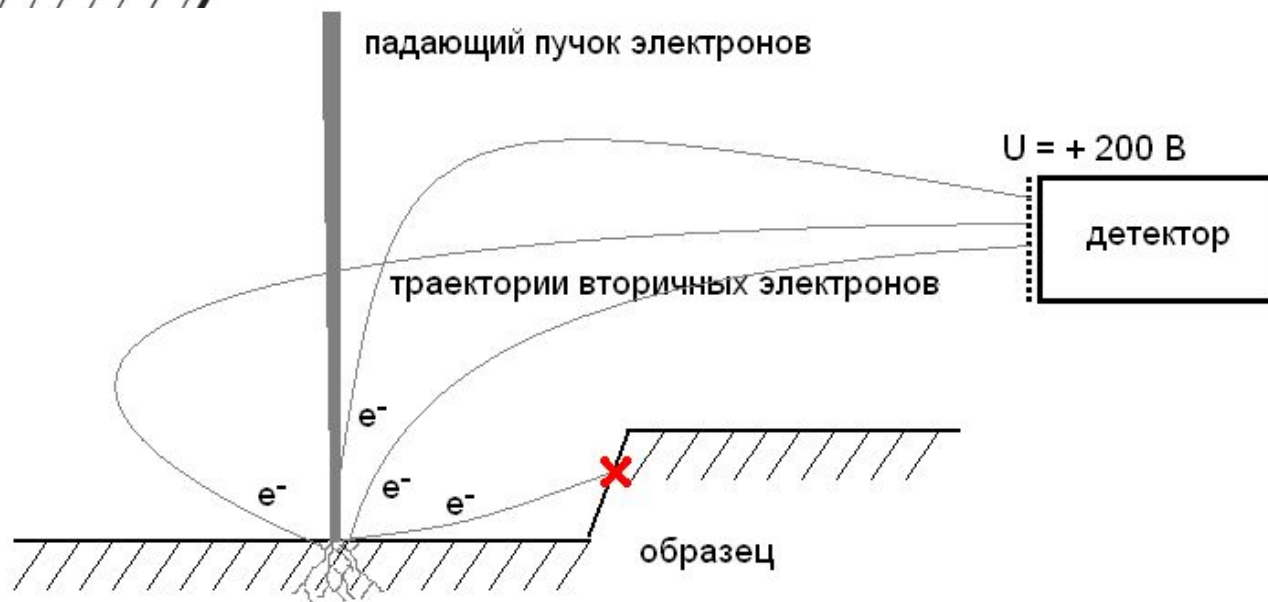
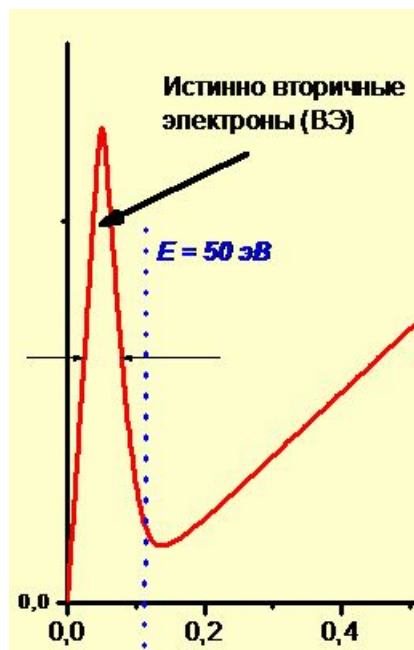
Зависимость интегрального коэффициента ВЭ  $\delta$  от угла падения электронного зонда для Al и Au при различных энергиях зонда

# Детектор истинно-вторичных электронов

## Детектор Эверхарта-Торнли



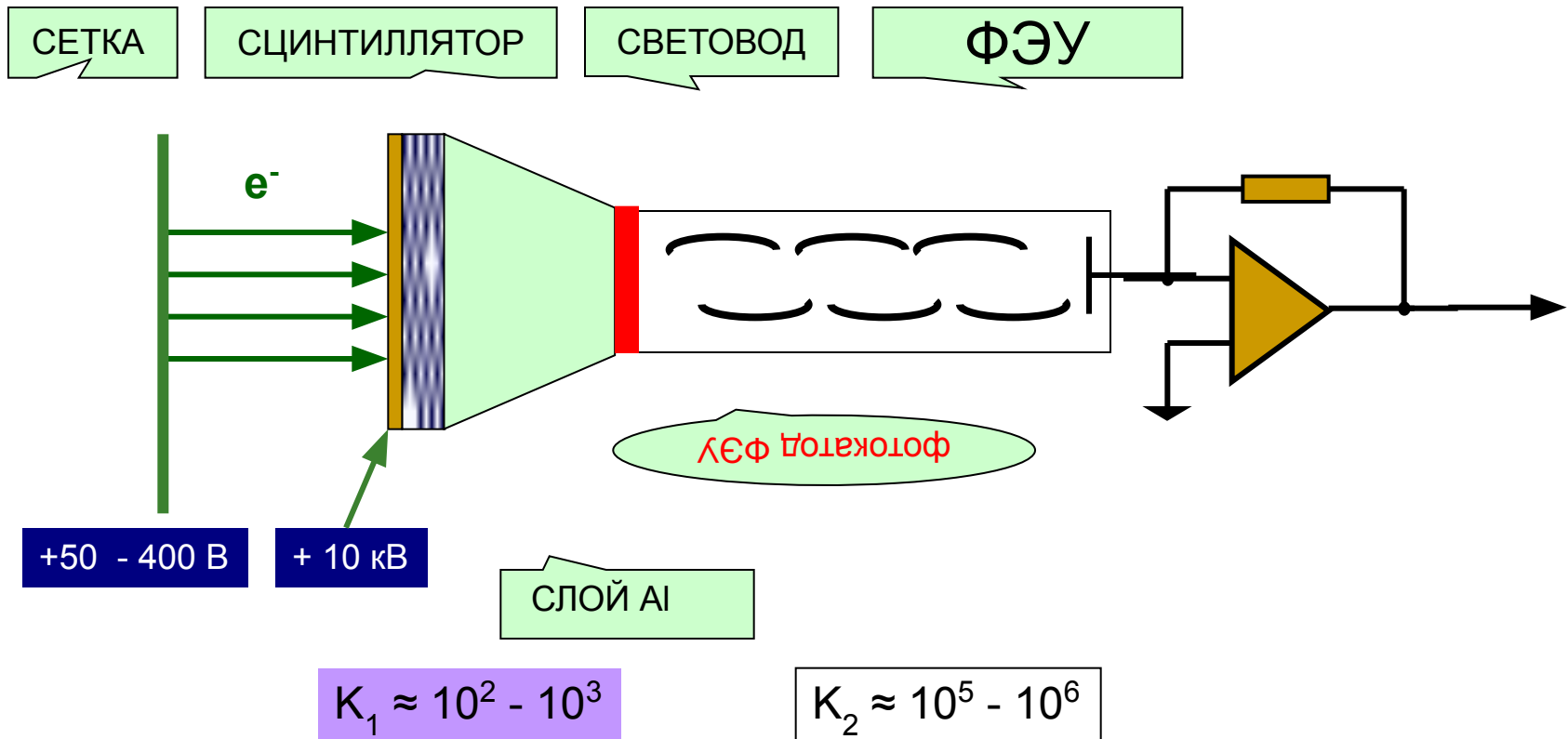
Сетка, на которую подан положительный потенциал эффективно собирает медленные вторичные электроны





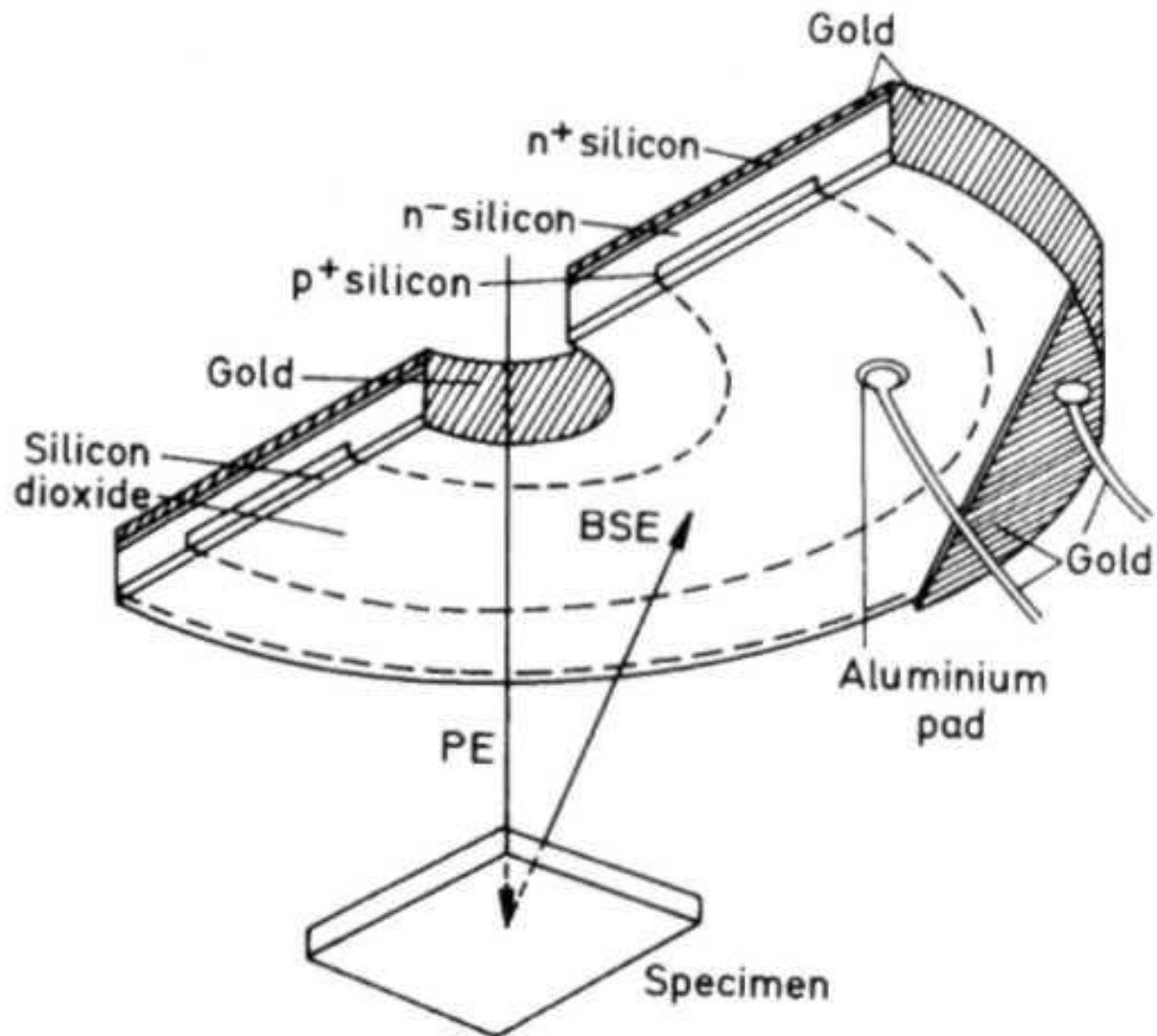
# Детектор истинно-вторичных электронов

Сцинтиллятор – фотоэлектронный умножитель



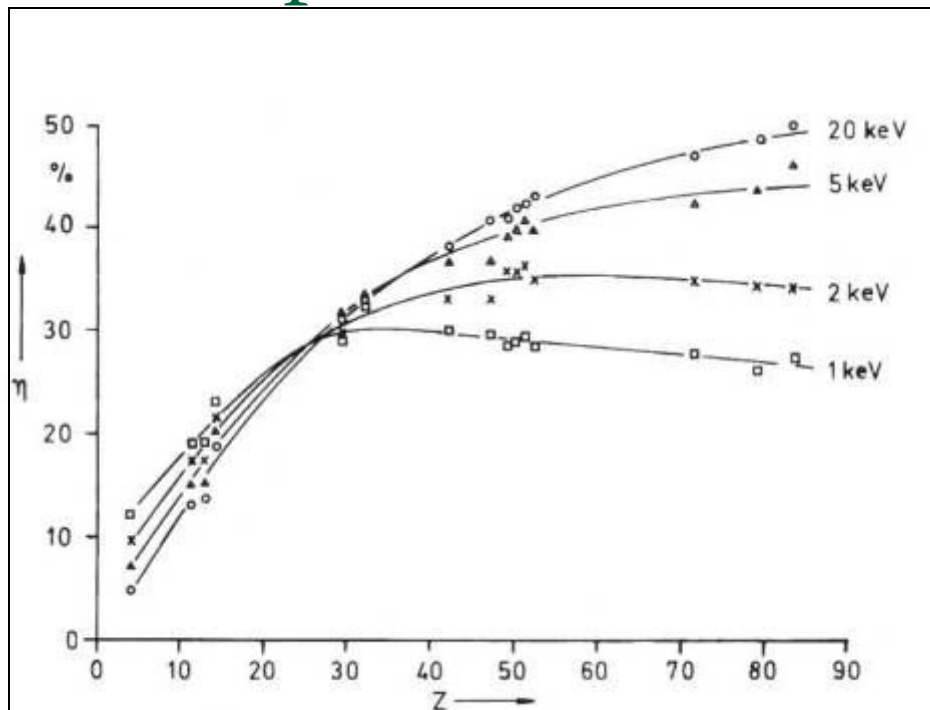
**Возможна регистрация единичных электронов!**

# Детектор обратно-рассеянных электронов



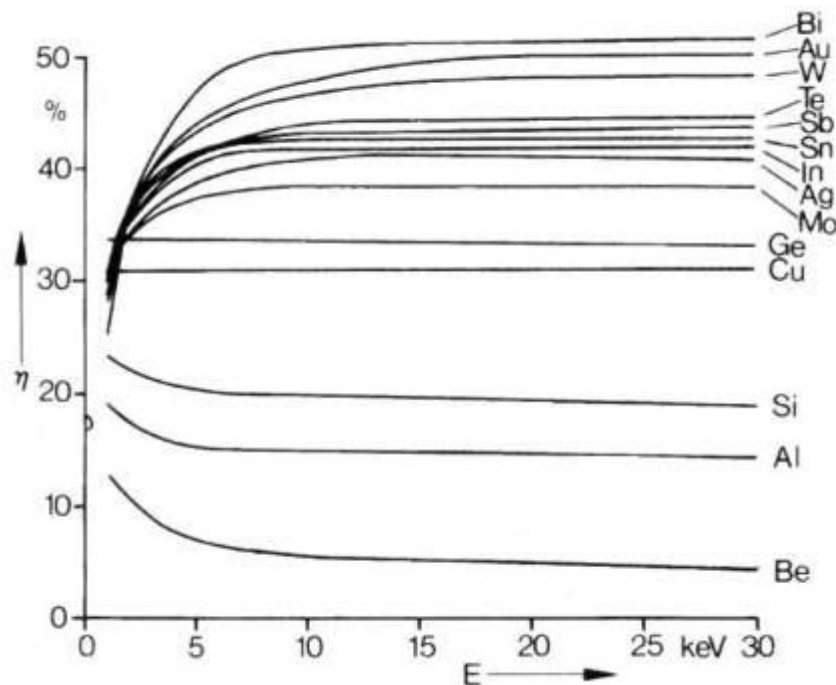
$$E_p =$$

# Зависимость выхода ОРЭ от атомного номера

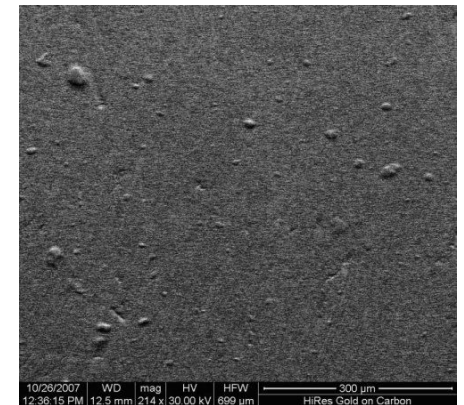
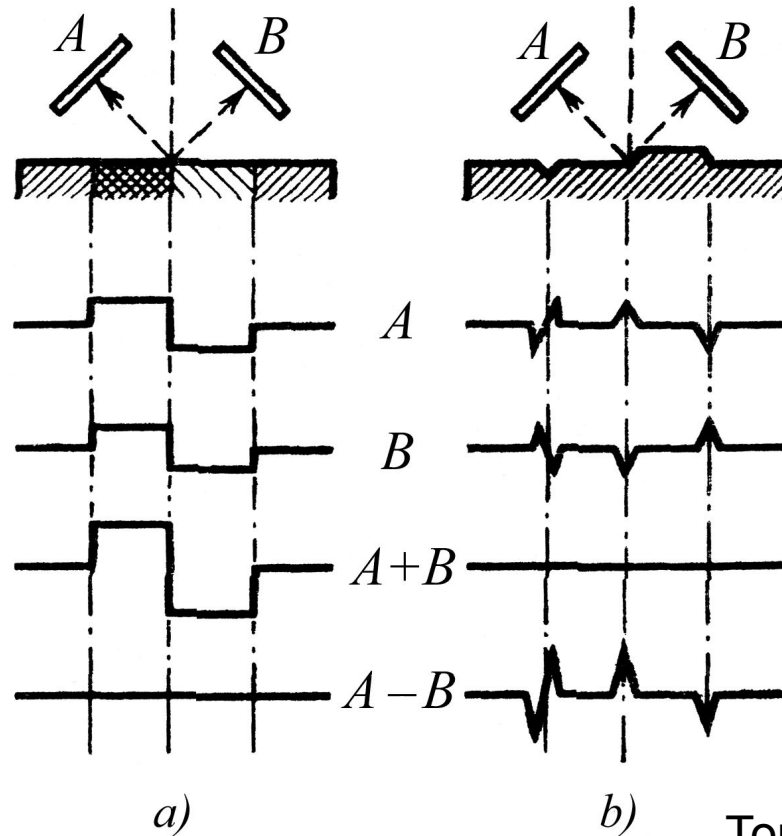
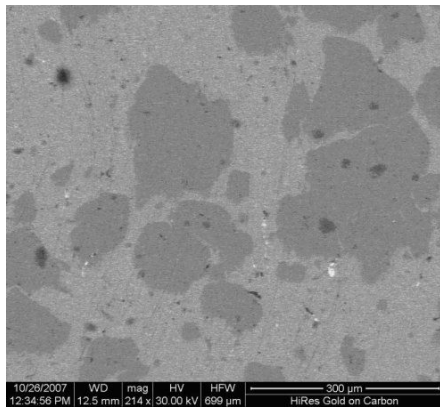


Зависимость интегрального коэффициента ОРЭ  $\eta$  от атомного номера  $Z$  для различных энергий электронного зонда

Зависимость интегрального коэффициента ОРЭ  $\eta$  от атомного номера  $Z$  для различных энергий электронного зонда



# Режим материального контраста и режим топографии



Материальный контраст  
Z-контраст

Топографический контраст  
Рельеф

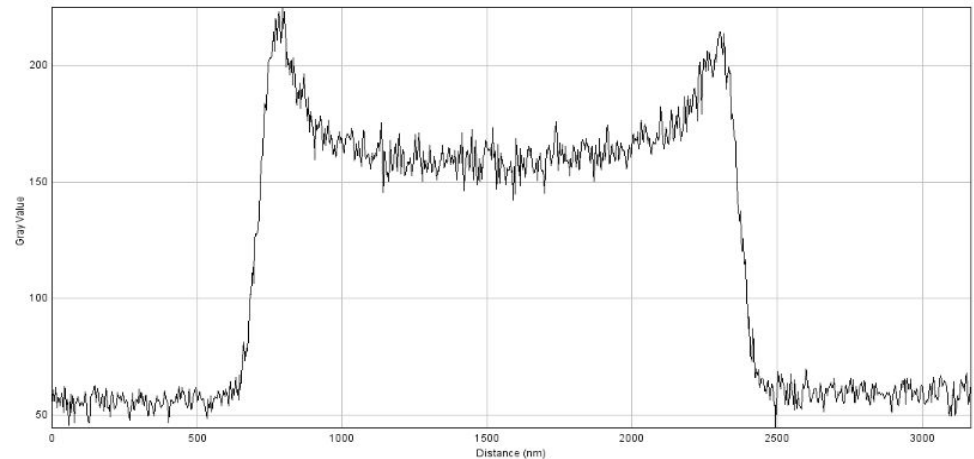
# Соотношение сигнал шум

$$S/N = \frac{n}{\sqrt{n}} = \sqrt{n}$$

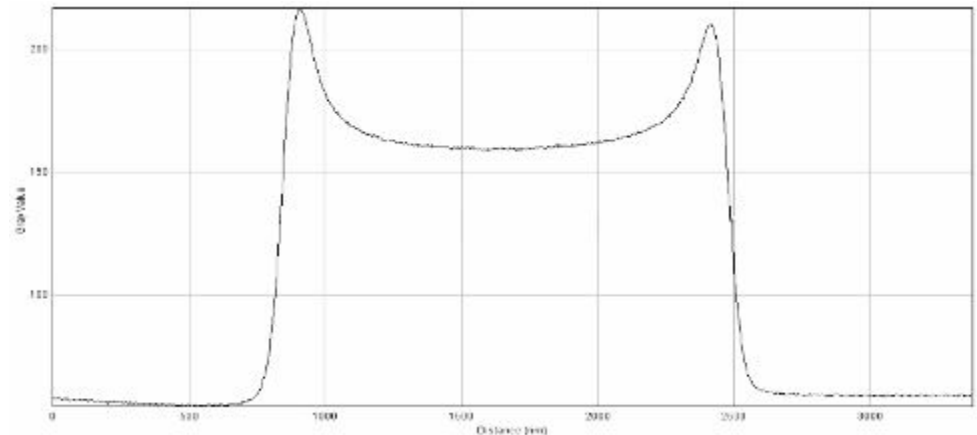
$n$  – число первичных электронов

$$n = n(j, d, t)$$

Число первичных электронов зависит от параметров:  
 $j$  – плотность тока,  
 $d$  – диаметр зонда,  
 $t$  – время накопления сигнала



$t \sim 200$  мкс  $\rightarrow$  0,2 секунды на строку в 1000 точек



$t \sim 2$  мс  $\rightarrow$  2 секунды на строку в 1000 точек

# Ограничение скорости сканирования

- Максимальная скорость
  - плохое соотношение сигнал-шум
  - быстродействие электроники
  
- Минимальная скорость
  - термодрейф образца
  - зарядка образца (плохопроводящих и не проводящих образцов)
  - разрушение образца (локальный нагрев)

# Факторы, определяющие контраст изображения

## В режиме ВЭ

- 1) Микрорельеф поверхности
- 2) Значение коэффициента ВЭ
- 3) Наличие электрических полей на поверхности (заряд, потенциал)
- 4) Наличие магнитных полей на поверхности

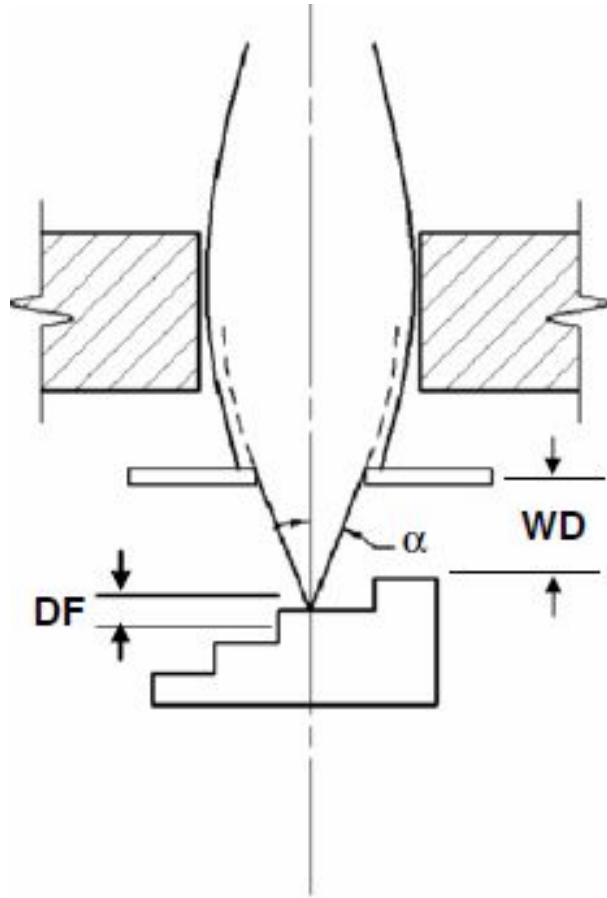
Предельная разрешающая способность 0,8 – 1 нм (с оговорками) – определяется эффективным диаметром электронного зонда

## В режиме ОРЭ

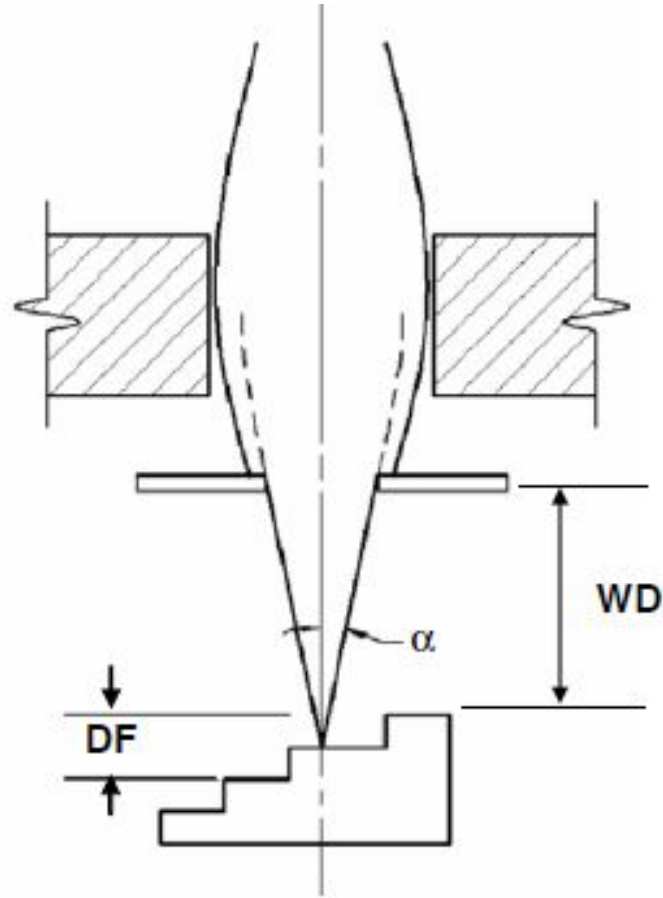
- 1) Эффективный атомный номер микрообъема образца
- 2) Микрорельеф поверхности
- 3) Локальная плотность
- 4) Кристаллическая структура
- 5) Электрические и магнитные поля

Предельная разрешающая способность порядка десятков нм (с оговорками)

# Рабочий отрезок и глубина фокуса



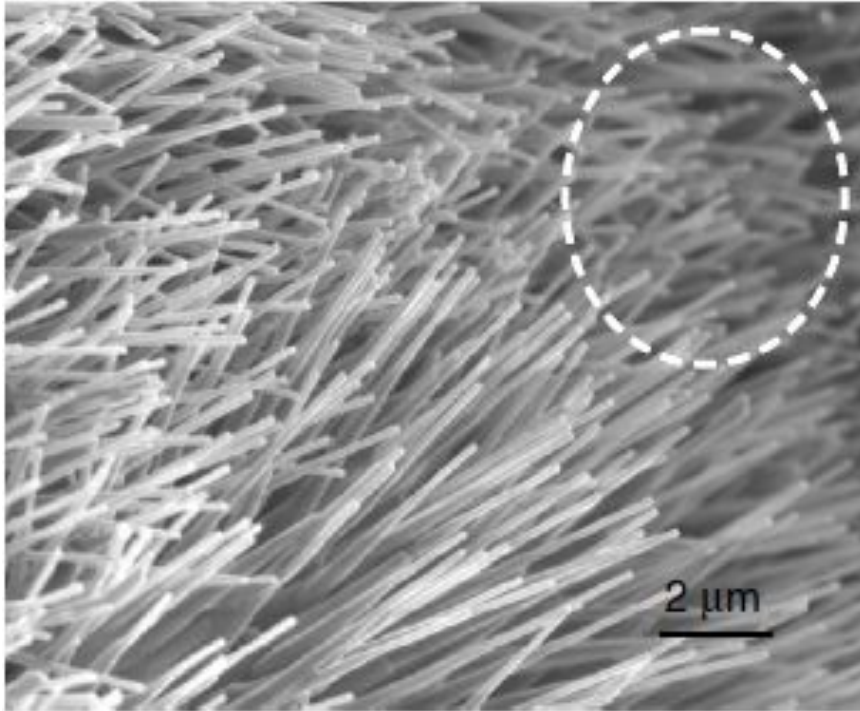
**Чем ближе к объектной линзе  
- тем выше разрешение  
(с оговорками)**



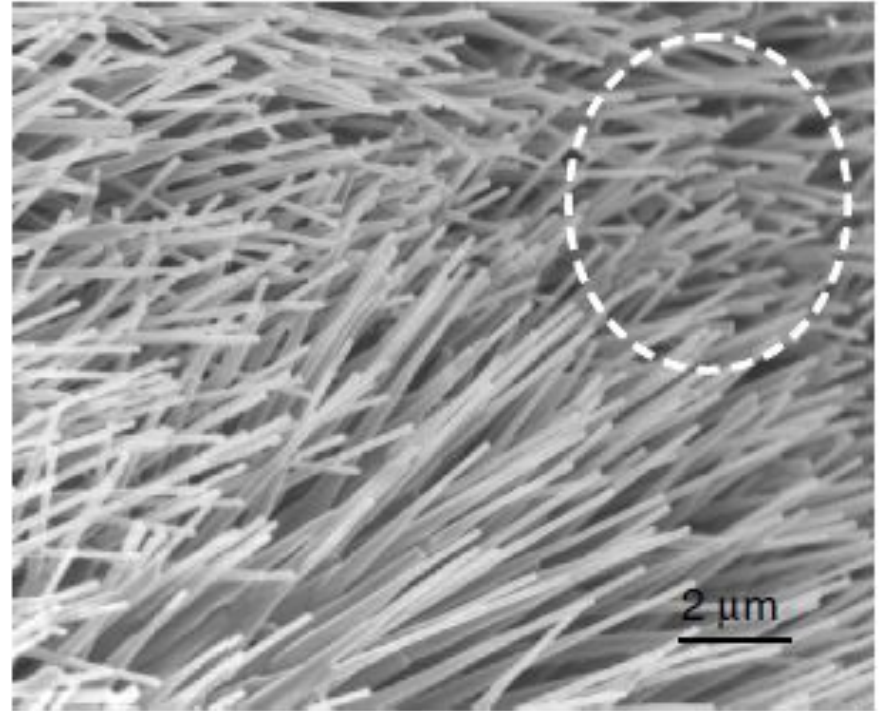
**Чем дальше от объектной линзы и  
чем меньше увеличение  
- тем больше глубина фокуса**



# Рабочий отрезок и глубина фокуса



WD = 3 мм



WD = 12 мм

Чем дальше от объектной линзы и  
чем меньше увеличение  
- тем больше глубина фокуса

---

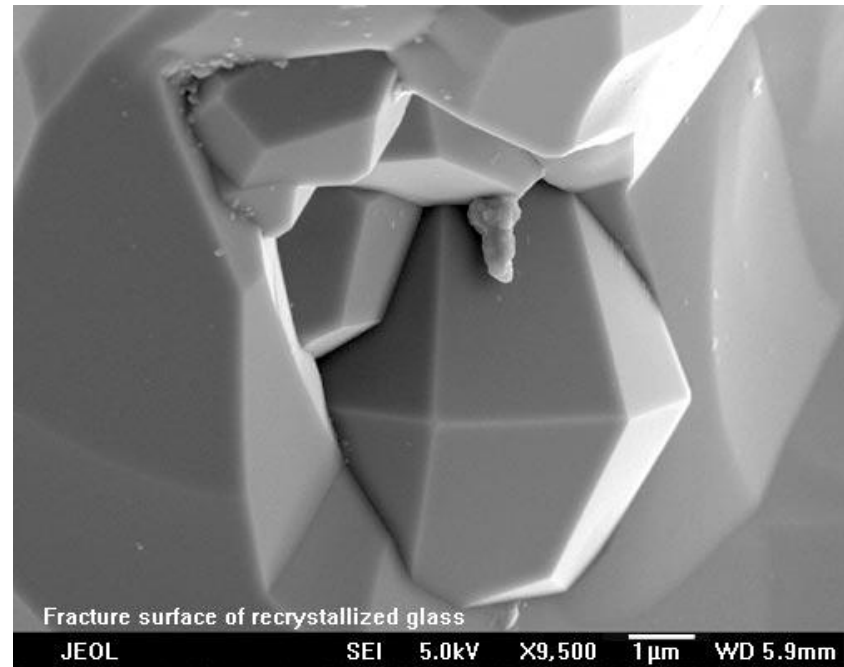
# Выбор скорости сканирования

Конкурирующие факторы:

- выше скорость – хуже сигнал/шум,
- ниже скорость – лучше сигнал/шум,  
больше смещение образца (термодрейф, зарядка)

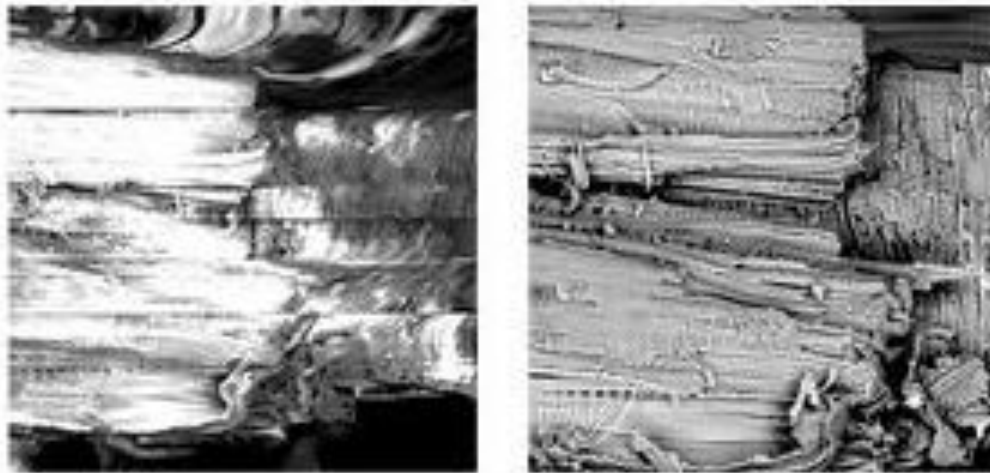
# Борьба с зарядкой образца

- Контакт на верхнюю сторону образца
- Низкие ускоряющие напряжения
- Режим низкого вакуума
- Напыление тонкого слоя металла/углерода (5-10 нм)



# Режим низкого вакуума

**Напуск в камеру паров воды до давления 10-150 Па**  
Молекулы воды снимают заряд с поверхности.  
Разрешение и контраст изображения падают.



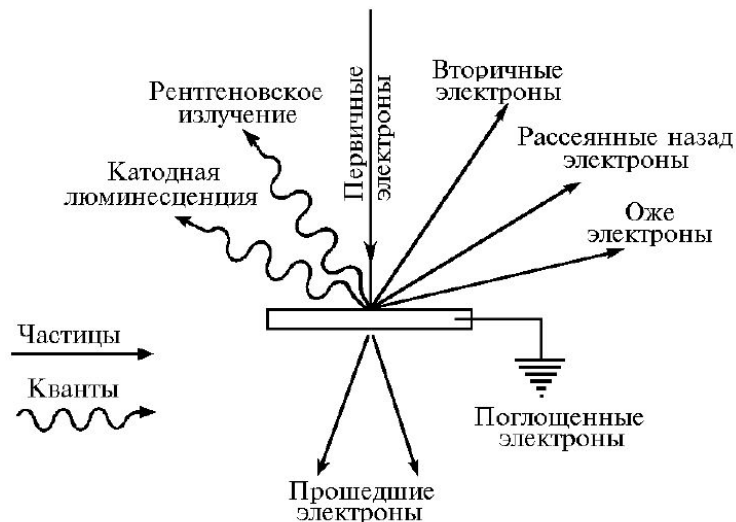
Волокна древесины  
(высокий и низкий вакуум)

Московский физико-технический институт

**Физические методы  
исследований, основанные  
на растровой электронной  
микроскопии**

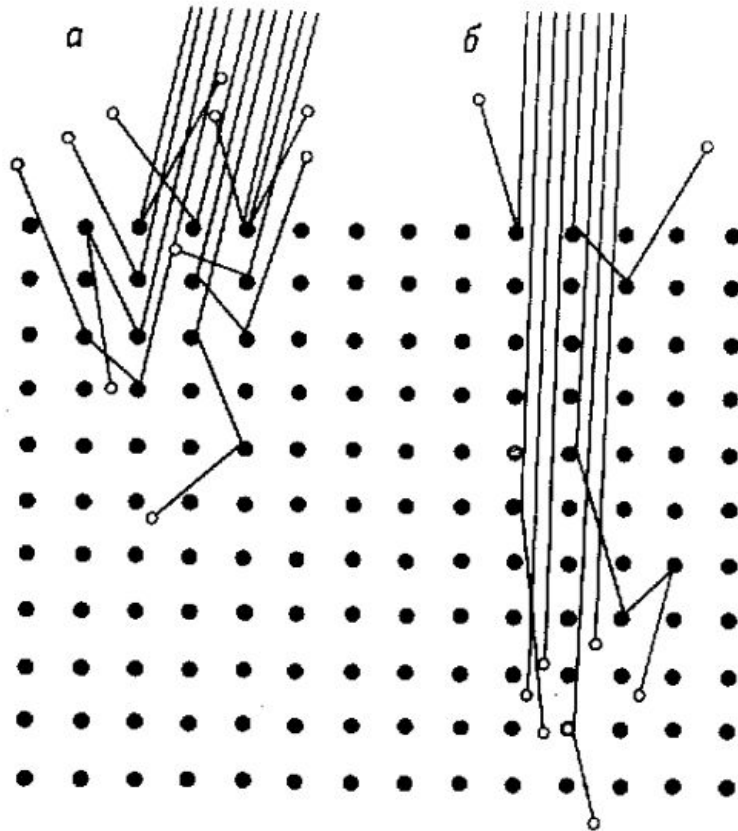
Заблоцкий Алексей  
Васильевич

# Сигналы в РЭМ



| Сигналы   |  | Информативность  |
|-----------|--|--|
| Электроны | Истинно вторичные                          | Морфология поверхности   |
|           | Обратно рассеянные                         | Рельеф (качественно)<br>Элементный контраст<br>Кристаллографическая информация |
|           | Оже-электроны                              | Химический состав (химические связи)   |
| Фотоны    | Характеристическое рентгеновское излучение | Элементный состав  |
|           | Катодолюминесценция                        | Структура энергетических уровней<br>Мелкие примеси                             |

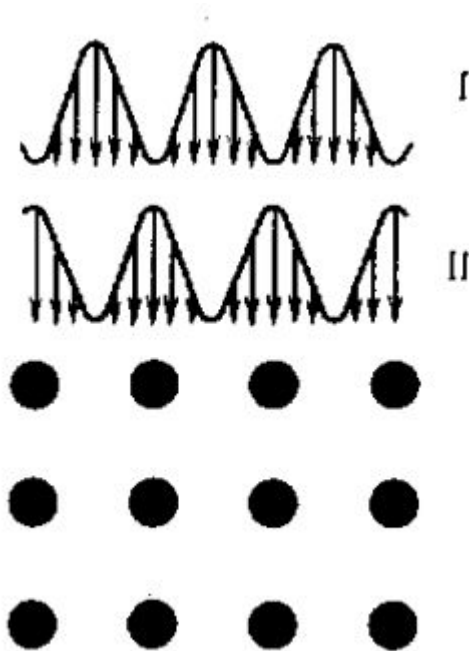
# Каналирование электронов (классическая модель)



При угле падения, изображенном на рис. *а*, происходит сильное взаимодействие электронов у поверхности.

При угле падения, изображенном на рис. *б*, электроны проникают в кристалл, проходя между рядами атомов вдоль каналов

# Каналирование электронов (Блоховская модель)



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

Формула перевода энергии  
электрона в Дебройлевскую длину  
волны

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2mE}} = \frac{0,39}{\sqrt{E}} \text{ \AA}$$

где энергия электронов выражена в  
*кэВ*



# Оже электронная спектроскопия

- Поверхностная чувствительность метода
- Чувствительность к химическому состоянию элементов
- Возможность сканирования образца сфокусированным электронным пучком, позволяющая получать карту распределения элементов по поверхности образца
- Возможность получения трехмерных карт распределения элементов в поверхностных слоях образца



Пьер Оже  
(1899 — 1993)

$$E_{\text{Оже}} = E_0 - \varphi$$

# Оже электронная спектроскопия

## Энергоанализаторы

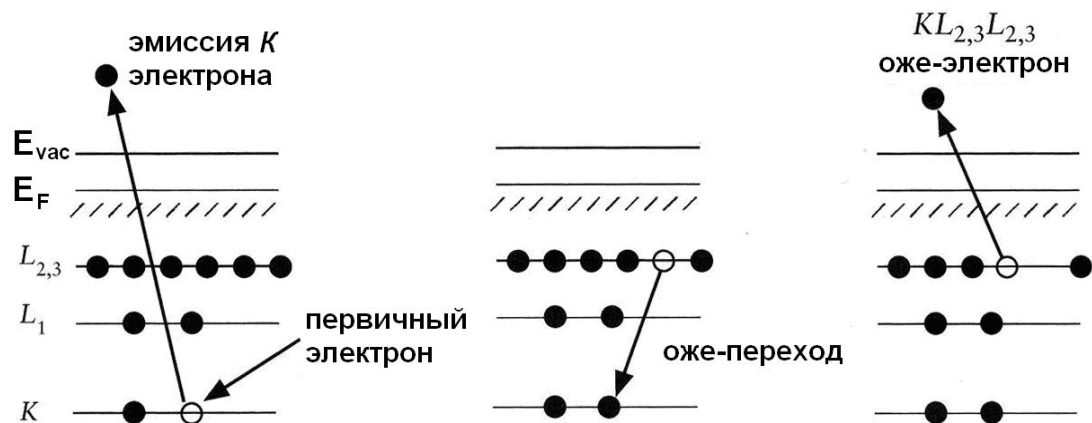
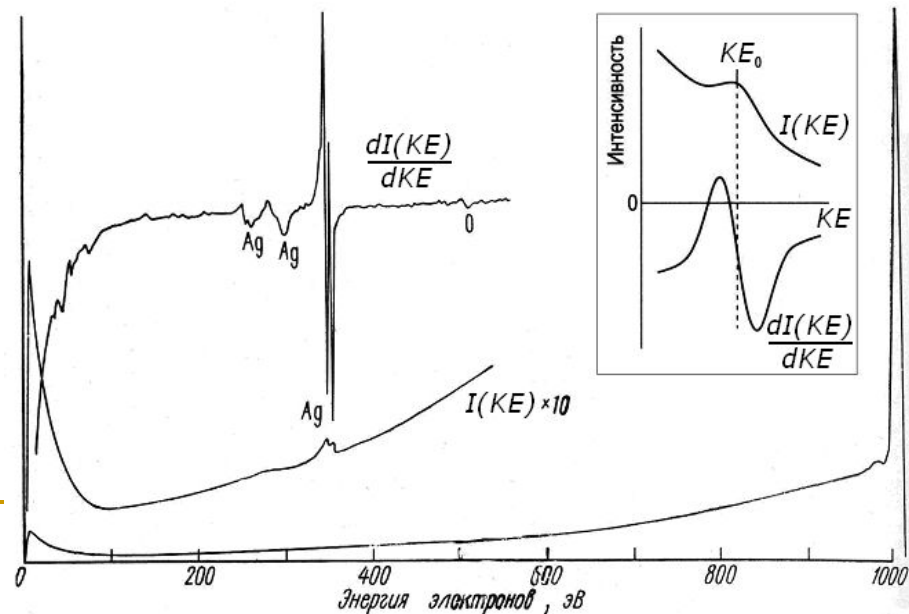


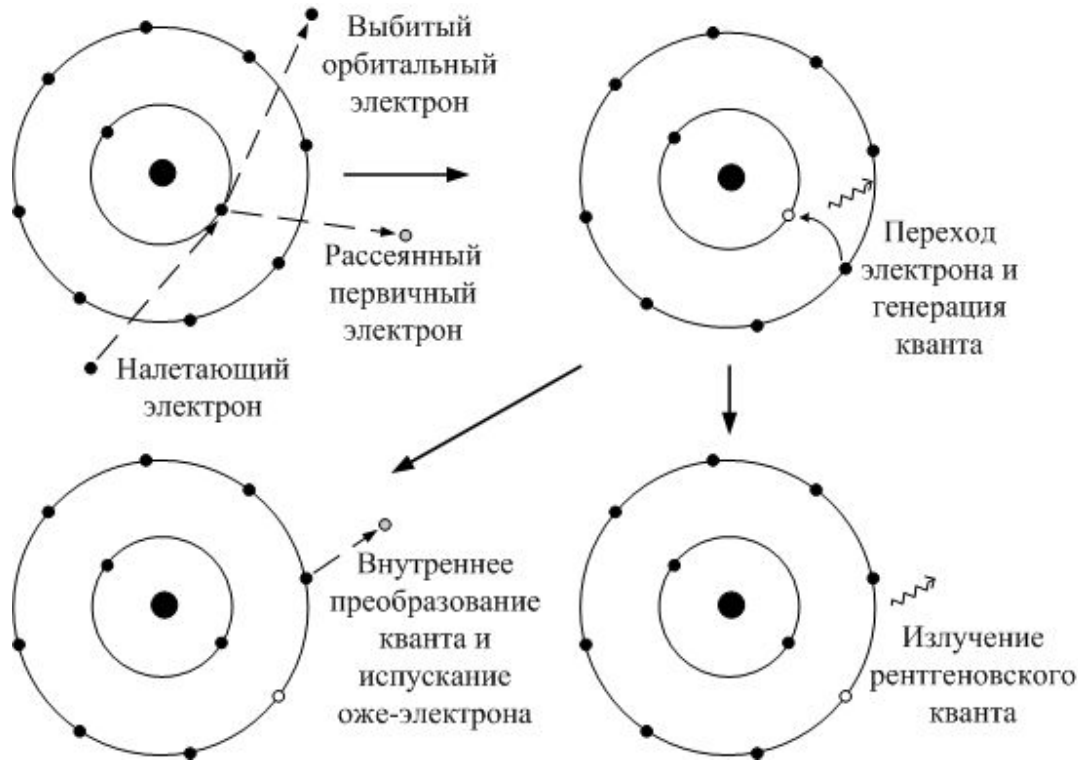
Схема оже-перехода

Обзорный оже-электронный спектр серебра в интегральном и дифференциальном виде



# Рентгеновский микроанализ

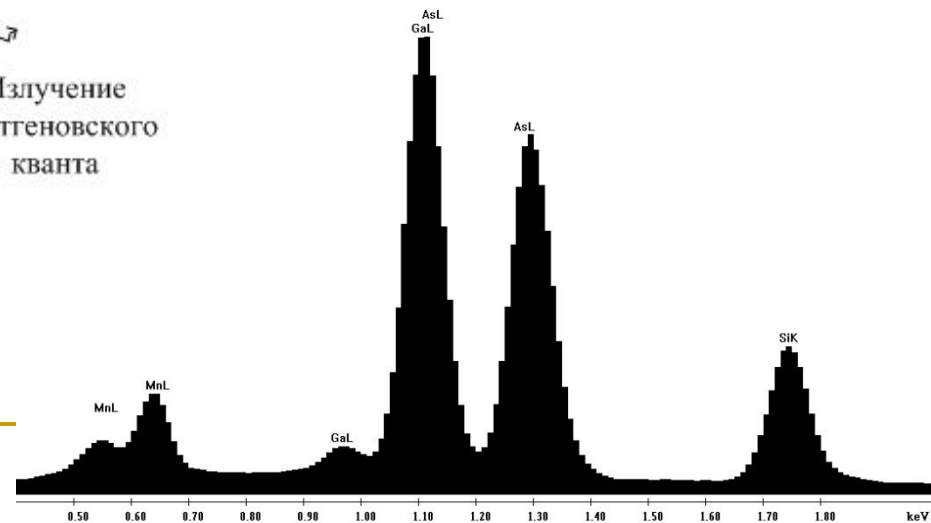
## Принцип



Формула

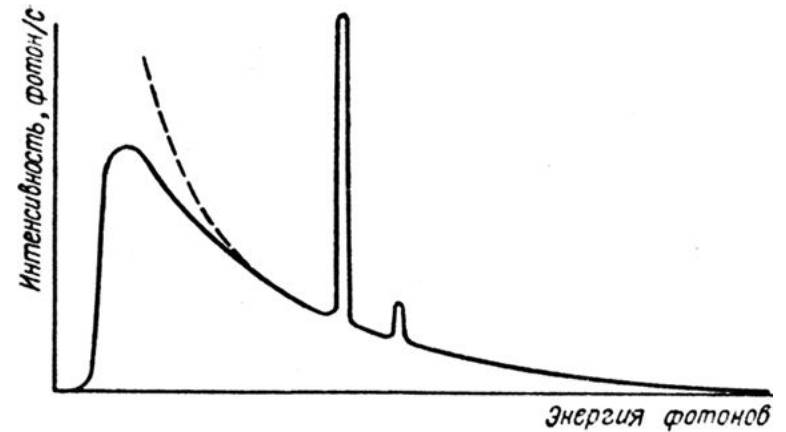
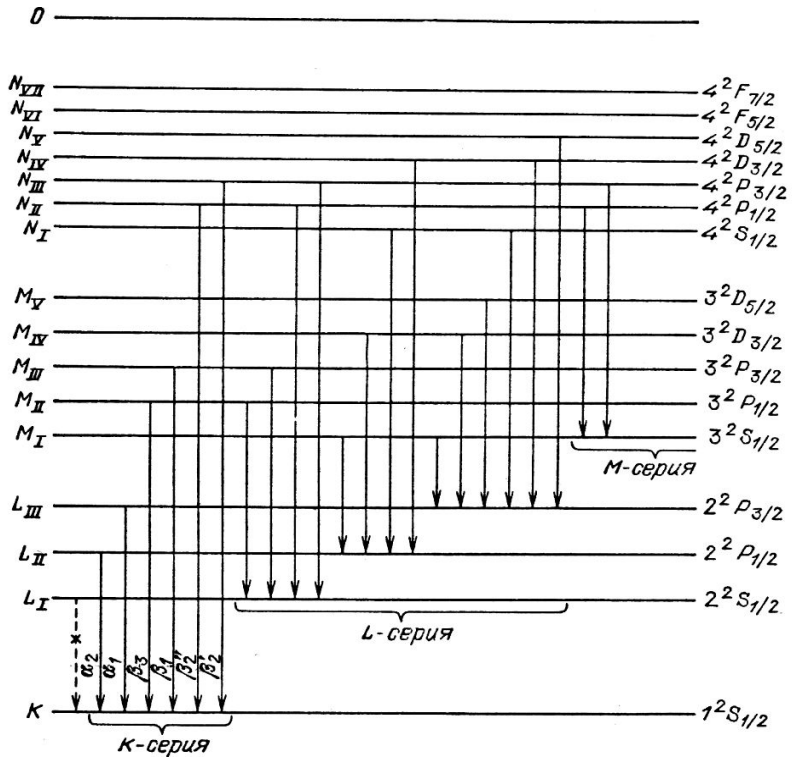
Мозли

$$\omega = \frac{(Z - \sigma)^2 Ry}{\hbar} \left( \frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2} \right)$$



# Рентгеновский микроанализ

## Принцип



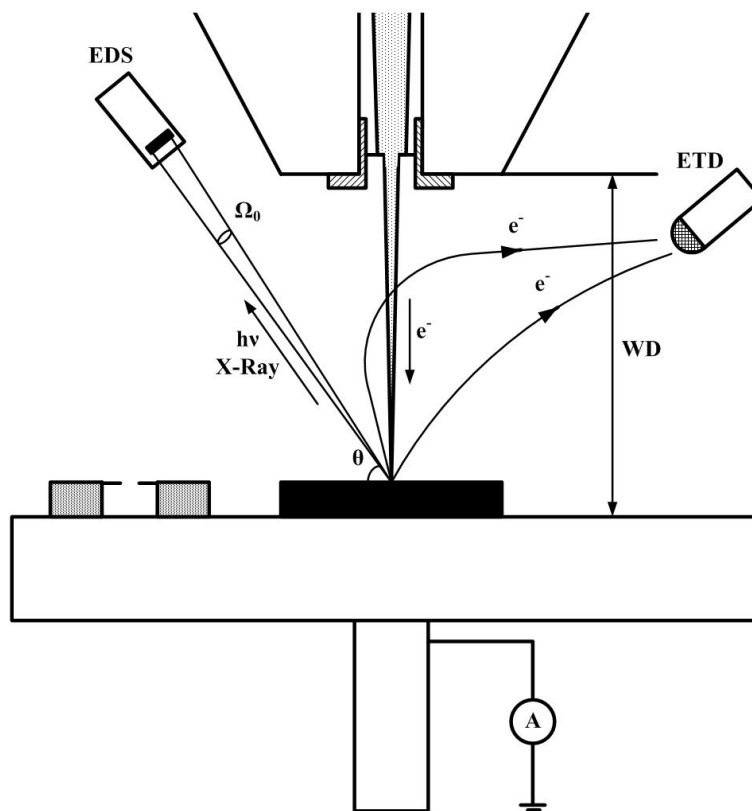
Формула

Мозли

$$\omega = \frac{(Z - \sigma)^2 R_y}{\hbar} \left( \frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2} \right)$$

# Рентгеновский микроанализ

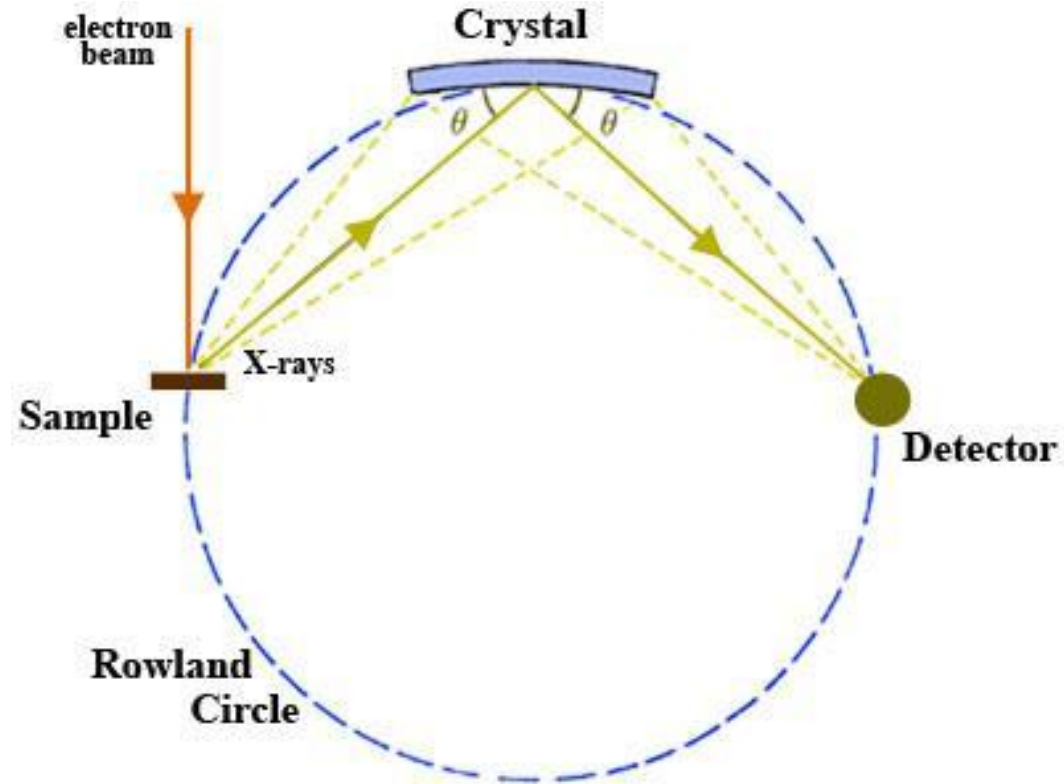
## Устройство рентгеновского микроанализатора



# Рентгеновский микроанализ

WDS

*Волновой детектор*

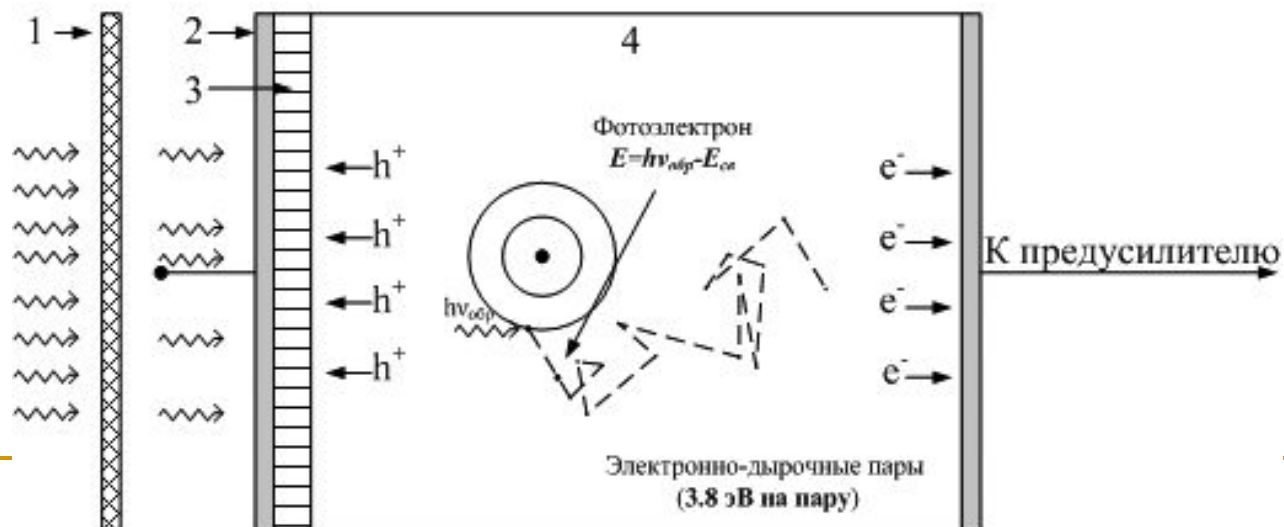
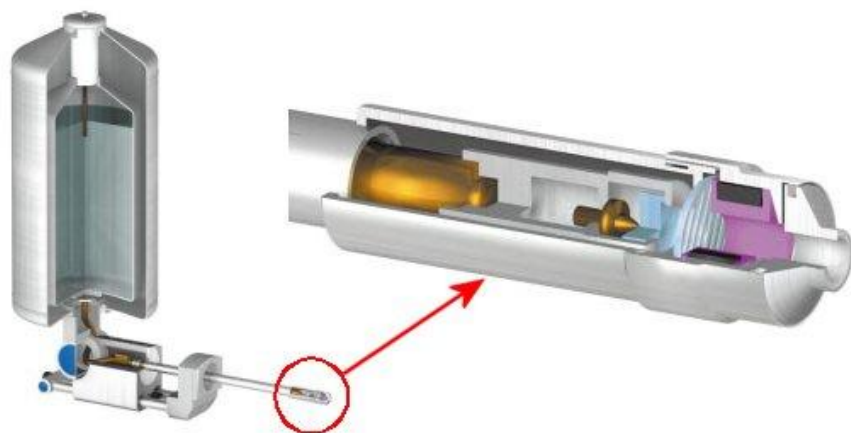


$$2d \sin \theta = n\lambda$$

# Рентгеновский микроанализ

## EDS

Энергодисперсионный детектор



---

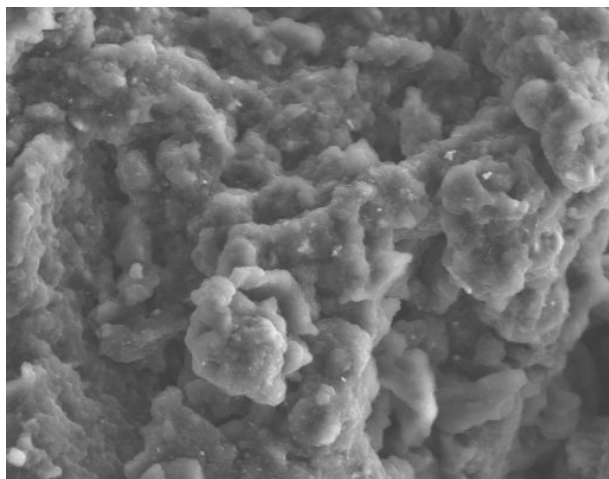
Спасибо за внимание!

[Khan.fv@phystech.edu](mailto:Khan.fv@phystech.edu)

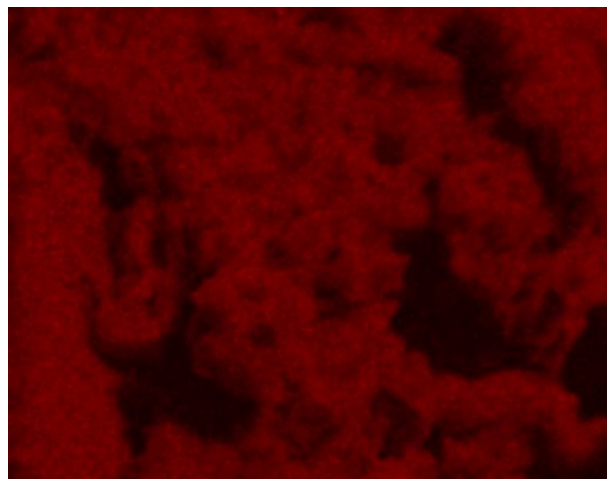


# Рентгеновский микроанализ

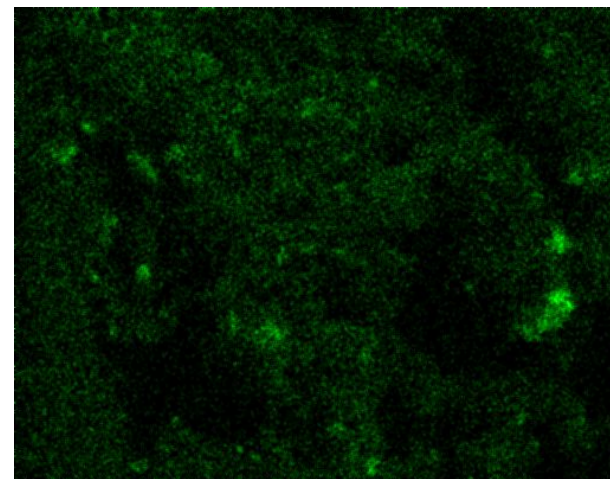
## Картирование модификатора дорожного покрытия



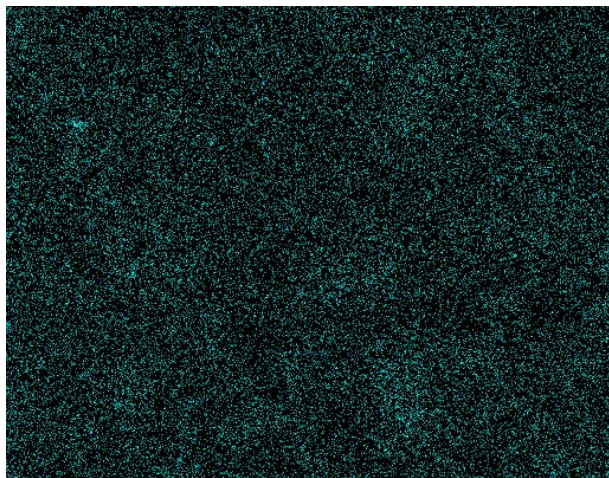
SE



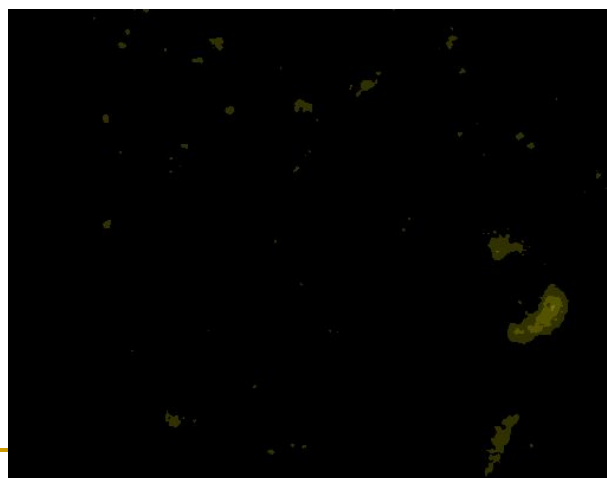
C



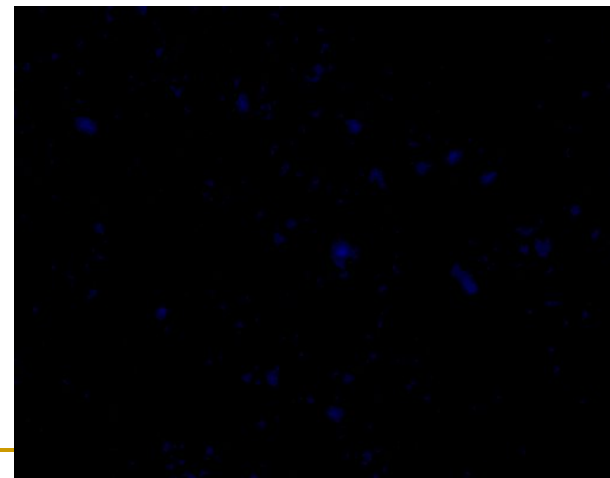
O



S



Al

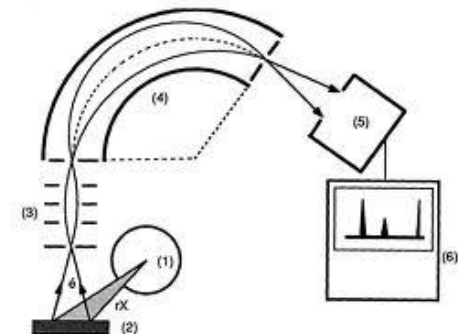
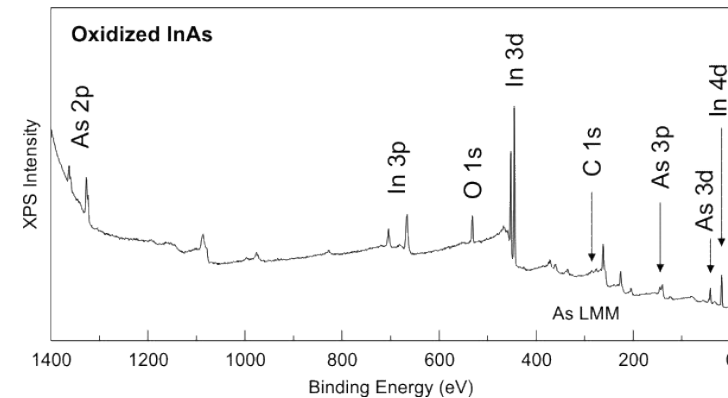
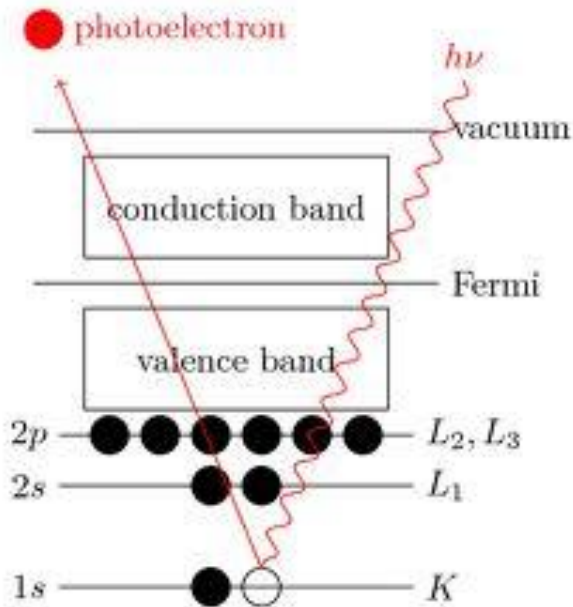


Na

# Рентгенофотоэлектронная спектроскопия

Определение химического состава  
(локальность 15-100 мкм)  
поверхности и тонких плёнок

Чувствительность: на уровне долей ppm  
+ Возможность определения профиля  
состава по глубине



# Катодолюминесценция

## Принцип

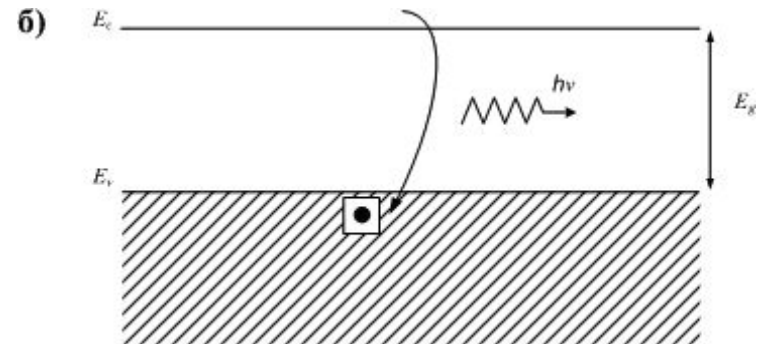
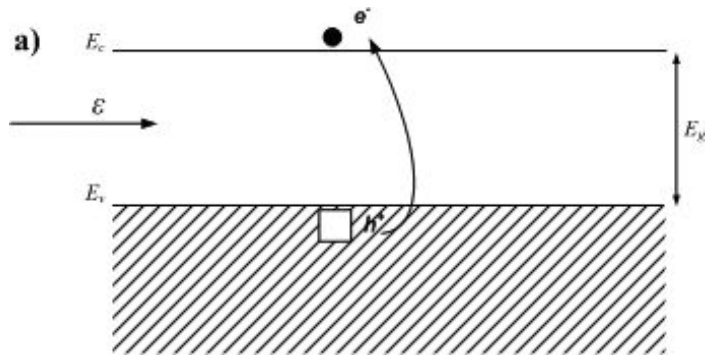
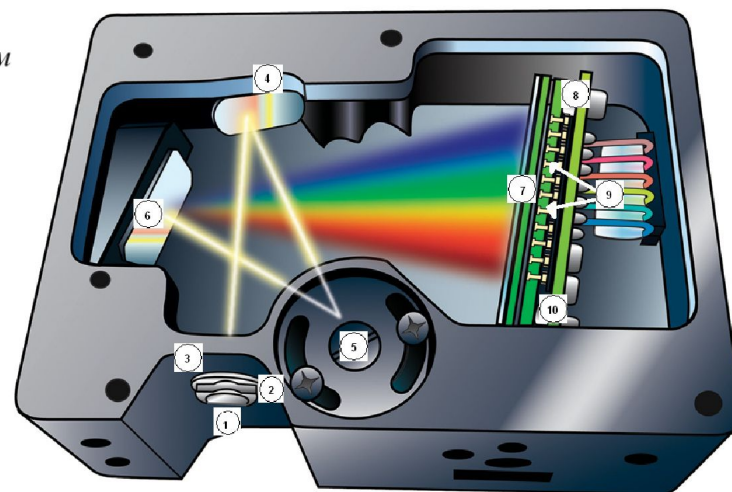
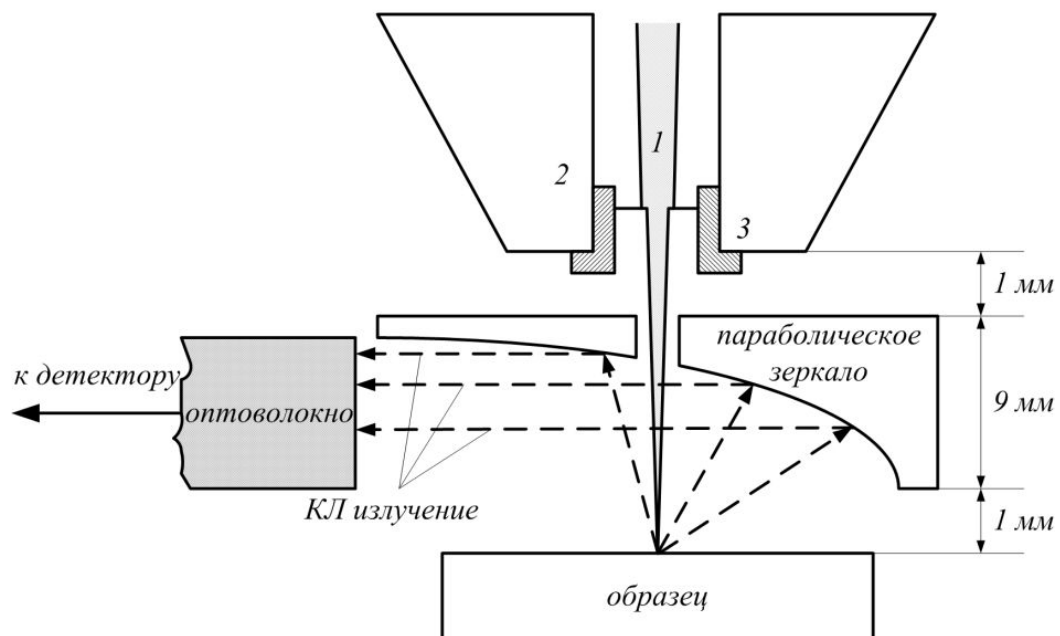


Схема процесса катодолюминесценции при образовании электронно-дырочной пары.

**а** – неупругое рассеяние электронов пучка привело к образованию электронно-дырочных пар;

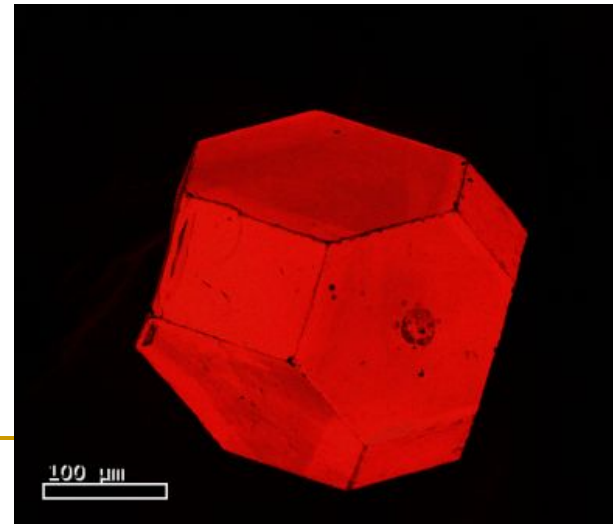
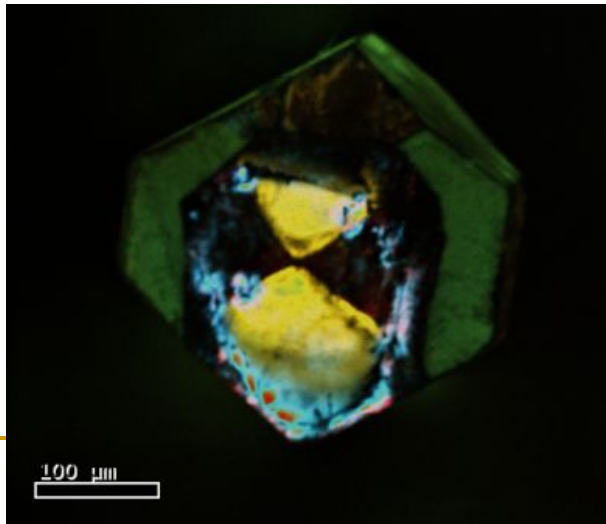
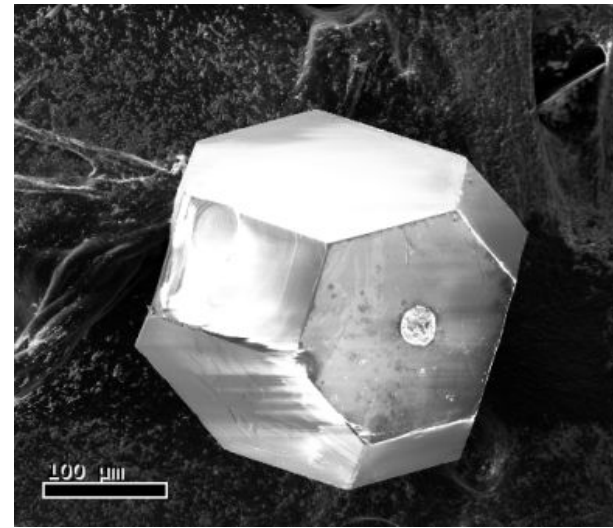
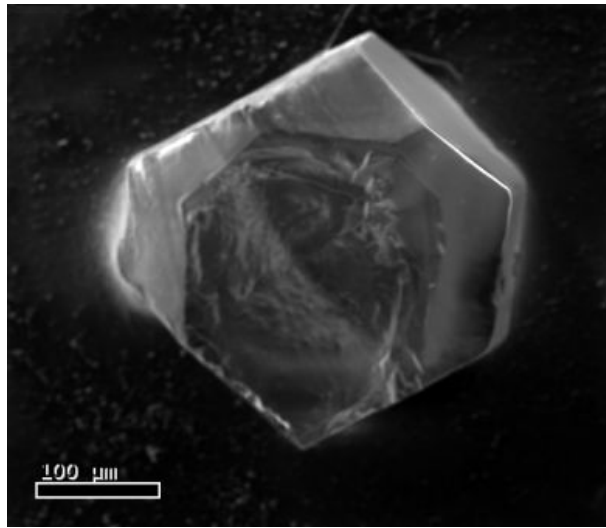
**б** – рекомбинация и аннигиляция электронно-дырочной пары, приводящие к рождению фотона.

# Катодолюминесценция

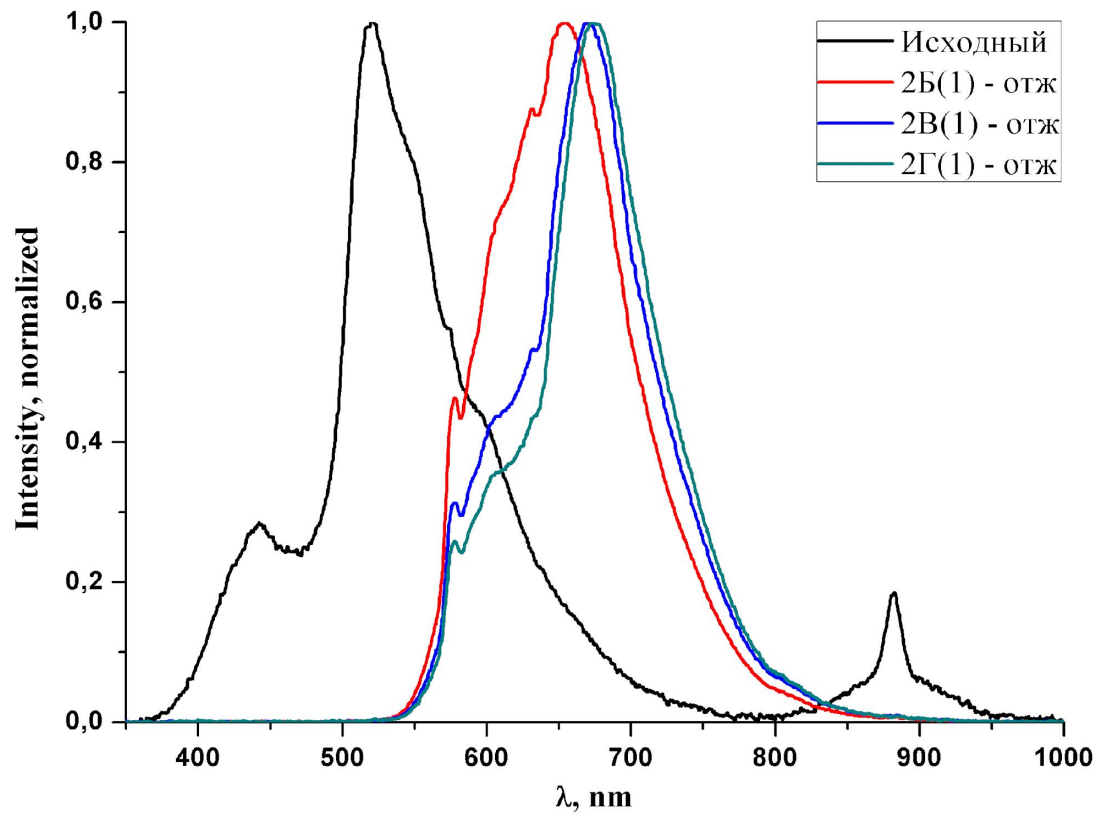


# Катодолюминесценция

## КЛ алмазов с NV центрами

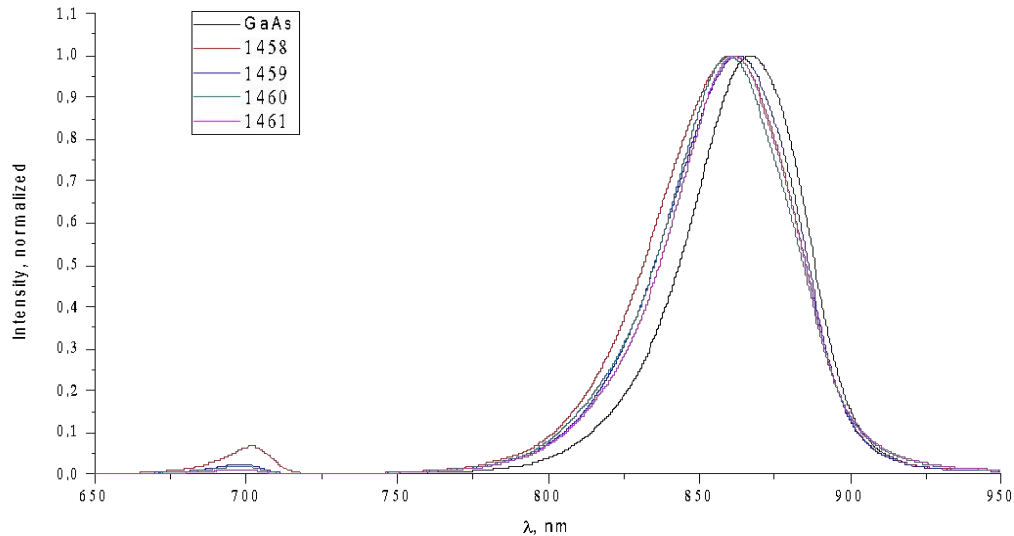


# Катодолуминесценция КЛ алмазов с NV центрами



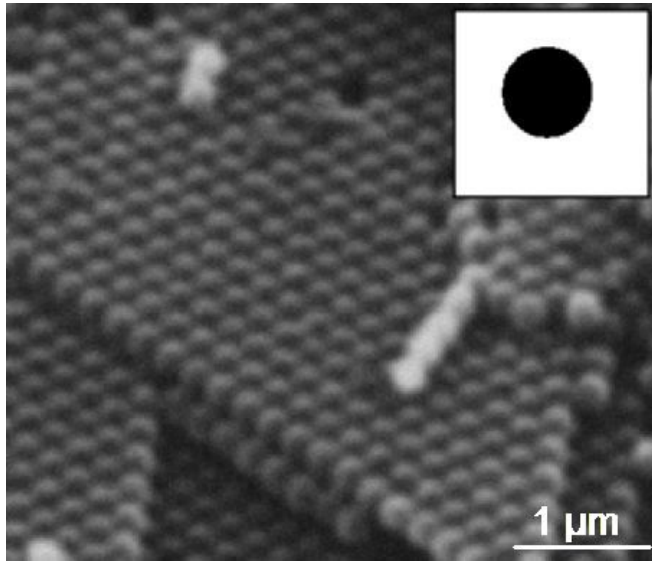
# Катодолюминесценция

## КЛ с гетероструктур $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$

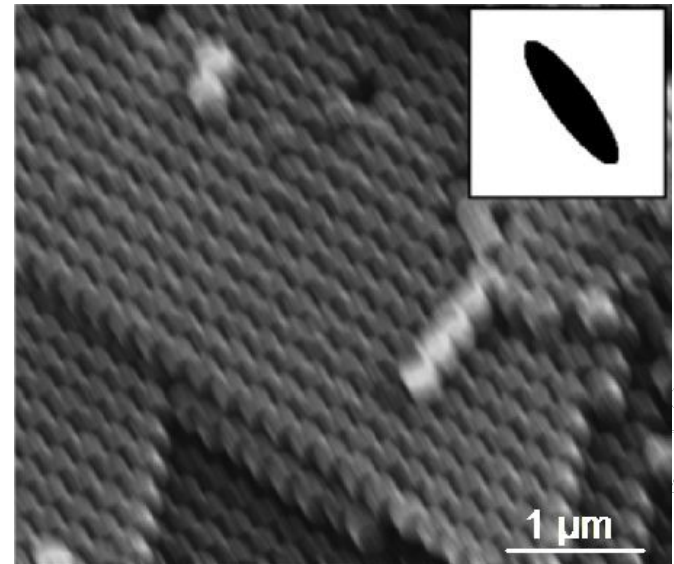


$$E_g = \begin{cases} 1,424 - 10,245x, & \text{при } x < 0,1 \\ 1,911x + 1,0545 + 0,143x^2, & \text{при } x > 0,1 \end{cases}$$

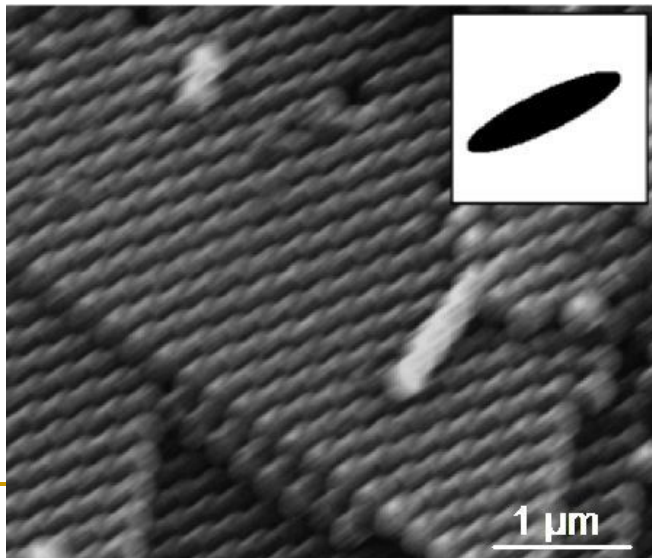
# Астигматизм



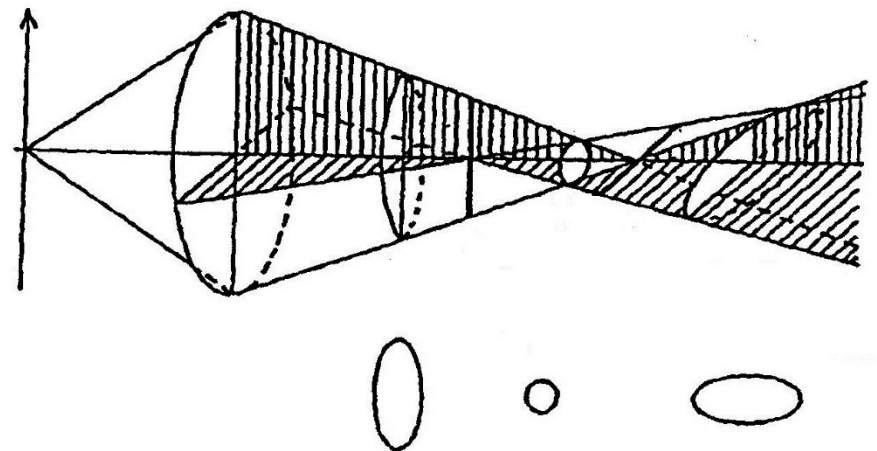
Плохой фокус



Астигматизм



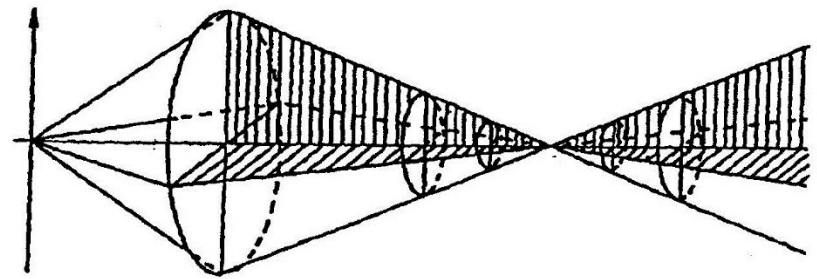
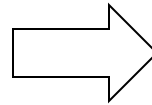
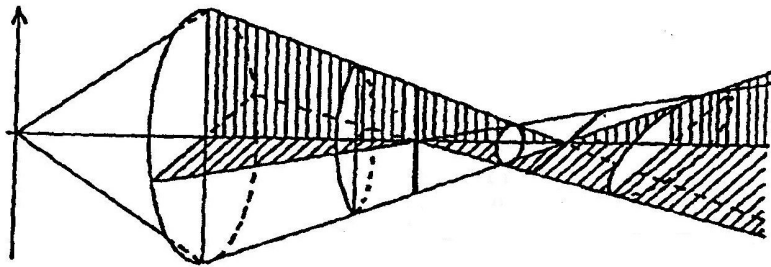
Астигматизм



$$\left. \begin{array}{l} \phi^{3/2} \\ |E| \end{array} \right\}$$

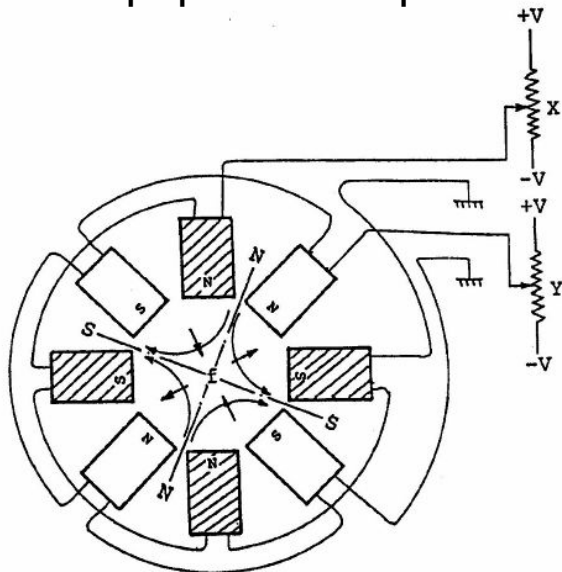


# Стигматор – компенсатор астигматизма

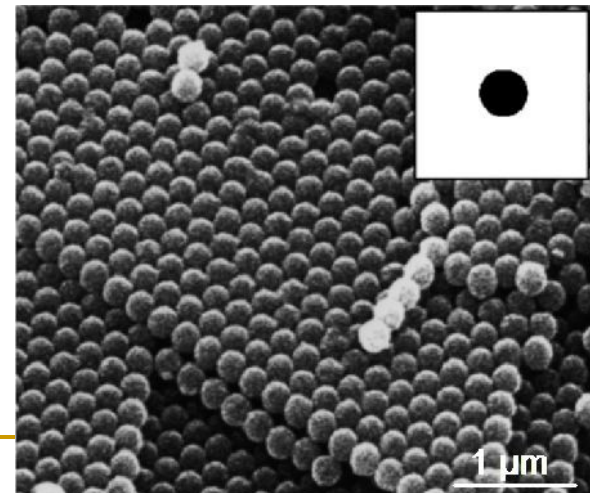


Искаженная форма электронного зонда

Правильная форма электронного зонда

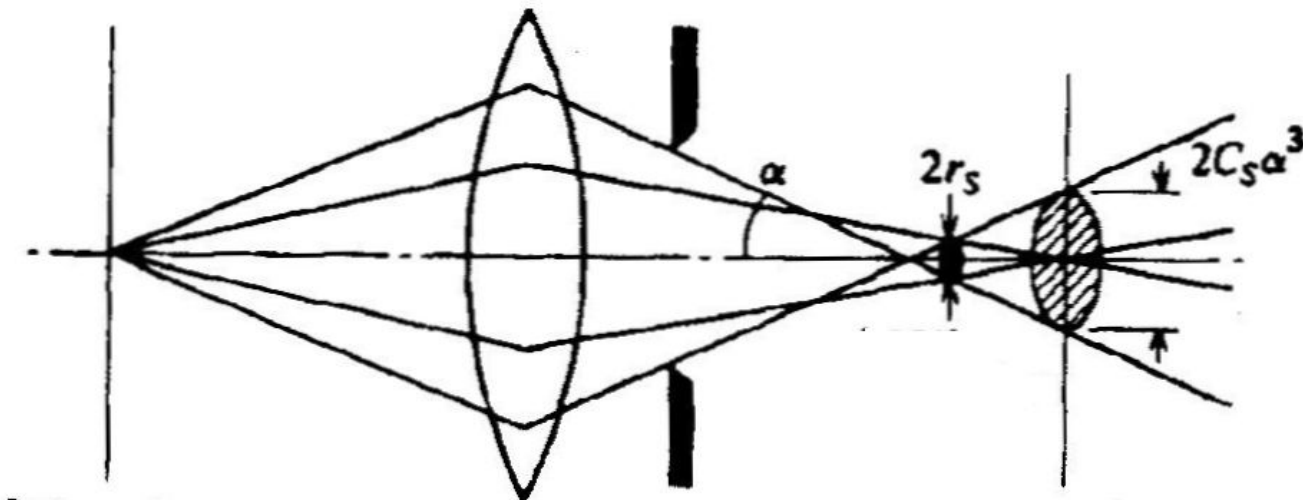


Стигматор



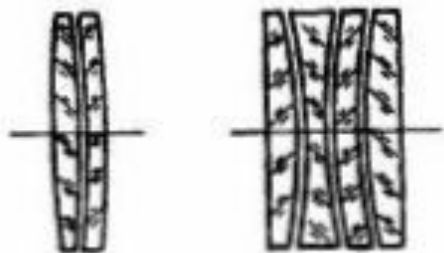
Хороший фокус

# Сферические aberrации



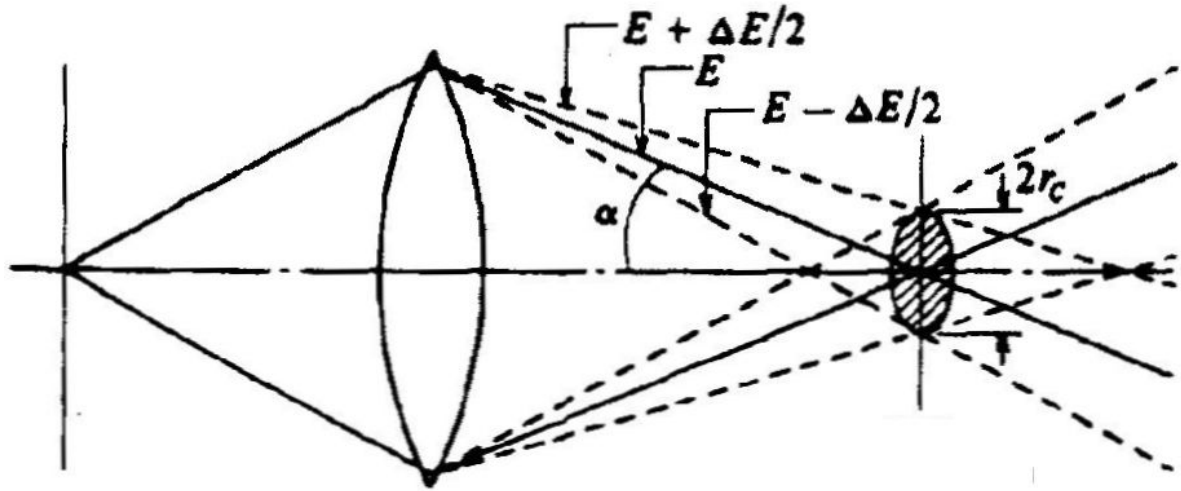
Размытие  $d_s = 2C_s \alpha^3$ , где  $C_s$  – коэффициент сферической aberrации (2–3 фокусных расстояния),  $\alpha$  – угол сходимости пучка

**Меньше диафрагма – меньше aberrации!**

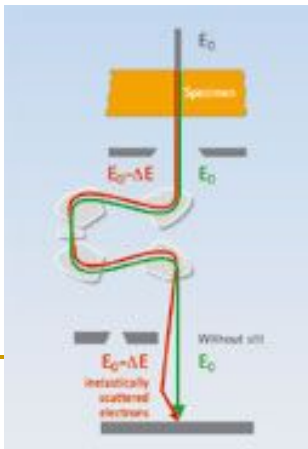


Корректор сферических aberrаций – рассеивающая электромагнитная линза (два октополя)

# Хроматические aberrации



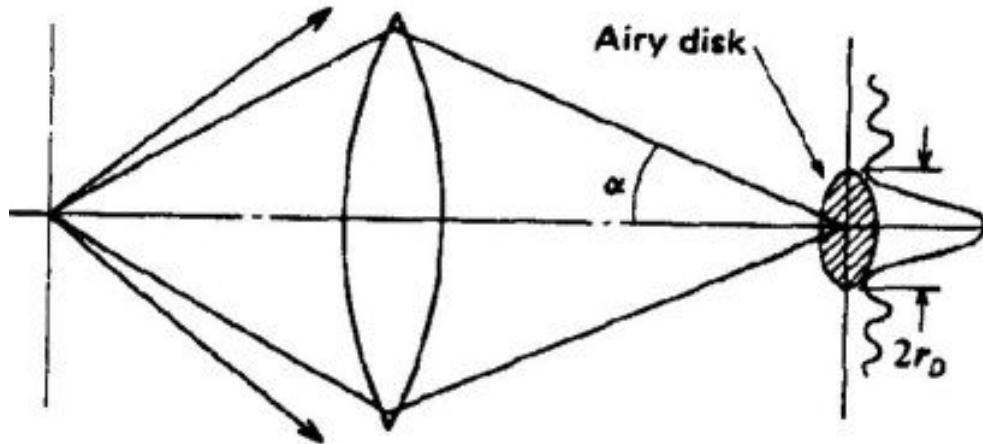
Размытие  $d_c = C_c \alpha \frac{\Delta E}{E}$ , где  $C_c$  – коэффициент хроматической aberrации,  $E$  – энергия электрона,  $\alpha$  – угол сходимости пучка



**Больше энергия – меньше aberrации!**

Корректор сферических aberrаций – система поворота пучка и диафрагмы.

# Дифракционные aberrации



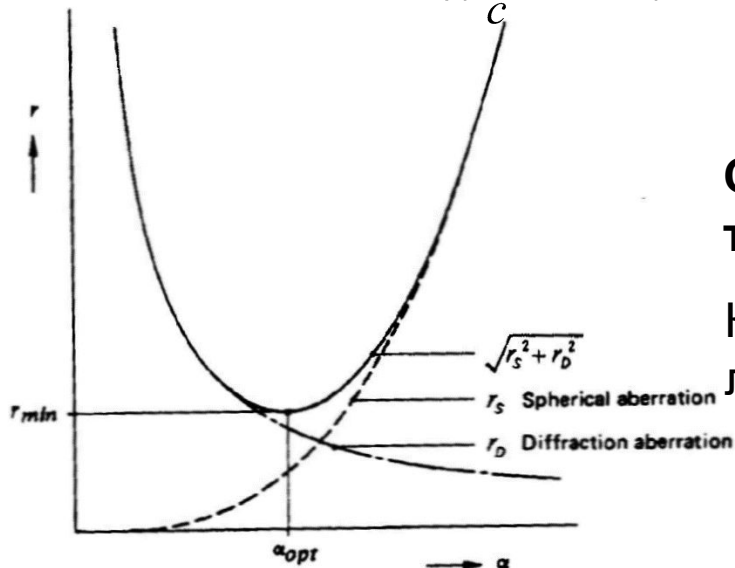
Длина волны де Бройля для электрона

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2mE}}$$

$h$  – постоянная планка,  
 $m$  – масса электрона,  
 $E$  – энергия электрона

Размытие

$$d_c = 1.22 \frac{\lambda}{\alpha}, \text{ где } \alpha \text{ - угол сходимости пучка}$$



**Существует оптимальный угол сходимости – то есть оптимальный рабочий отрезок!**

Как правило – ближе образец к объектной линзе – лучше фокусировка – хуже глубина фокуса