

***Взаимодействие  
электронов с веществом и  
формирование  
изображения в РЭМ***

# Взаимодействие электронного пучка с веществом

Электроны первичного пучка, попав в образец, могут:

- Не испытать взаимодействия
- Изменить траекторию (и/или энергию в результате взаимодействия с электрическими полями электронных оболочек и атомных ядер)
- Изменить траекторию и/или энергию в результате столкновений с электронами вещества

Диффузия электронов в материал. Размер области взаимодействия

$$r(\text{мкм}) = \frac{2.76 \cdot 10^{-2} A E_0^{1.67}}{\rho Z^{0.89}},$$

где  $\rho$  – плотность, г/см<sup>3</sup>

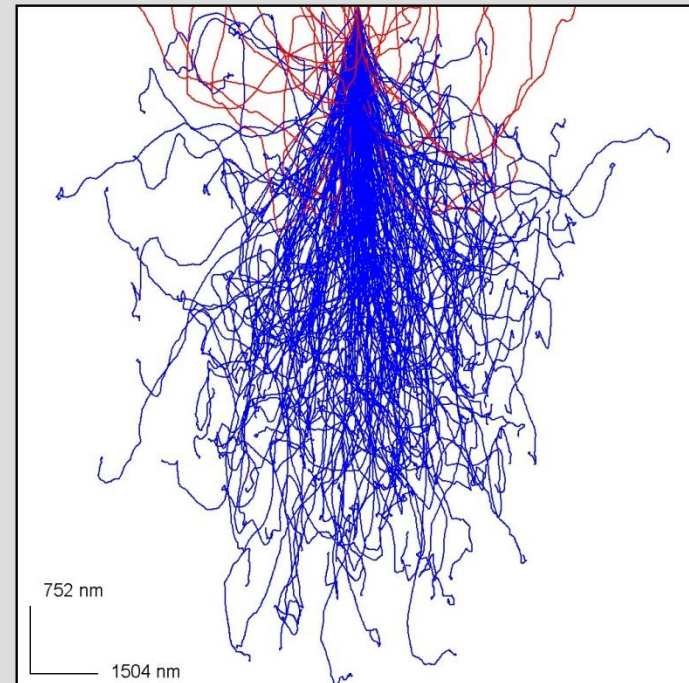
$Z$  – атомный номер

$A$  – атомная масса

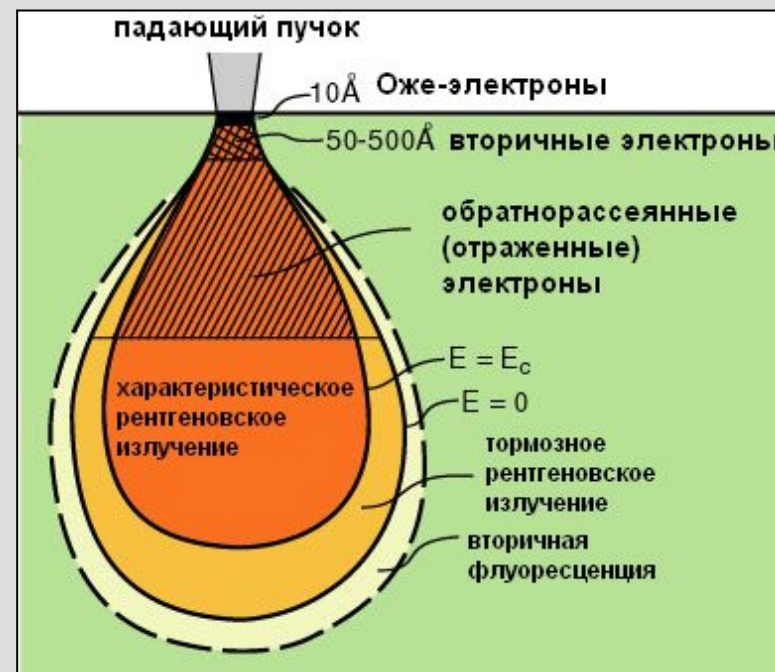
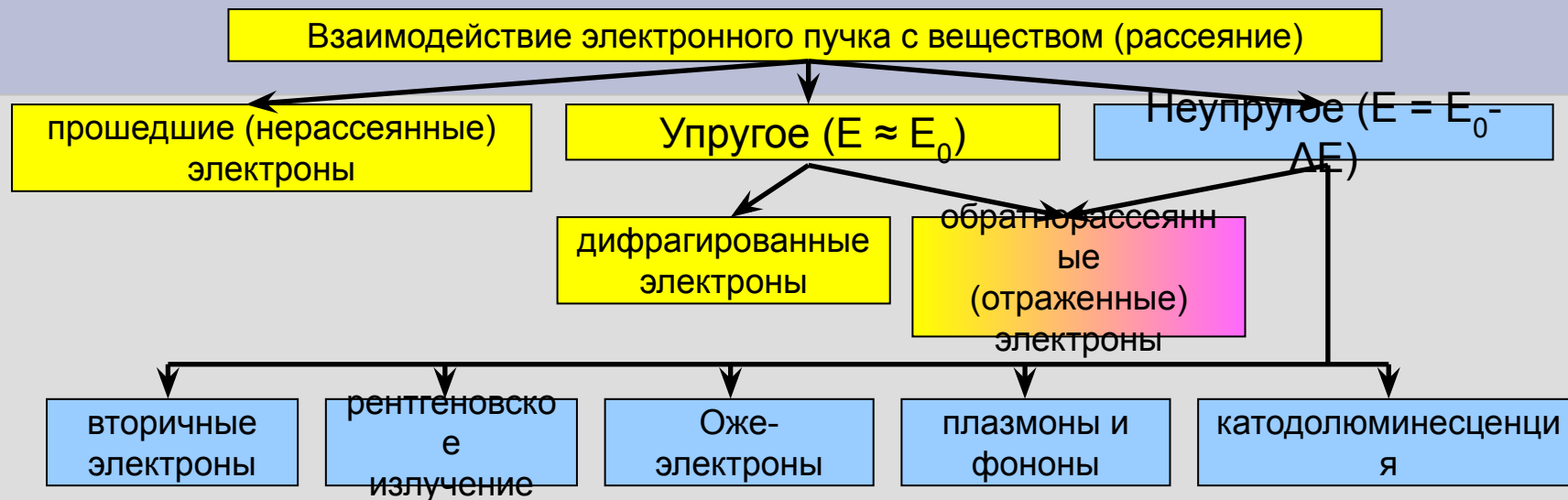
$E_0$  – энергия электронов, кэВ

$$x(\mu\text{м}) = \frac{0.1 E_0^{1.5}}{\rho}$$

$$y(\mu\text{м}) = \frac{0.077 E_0^{1.5}}{\rho}$$

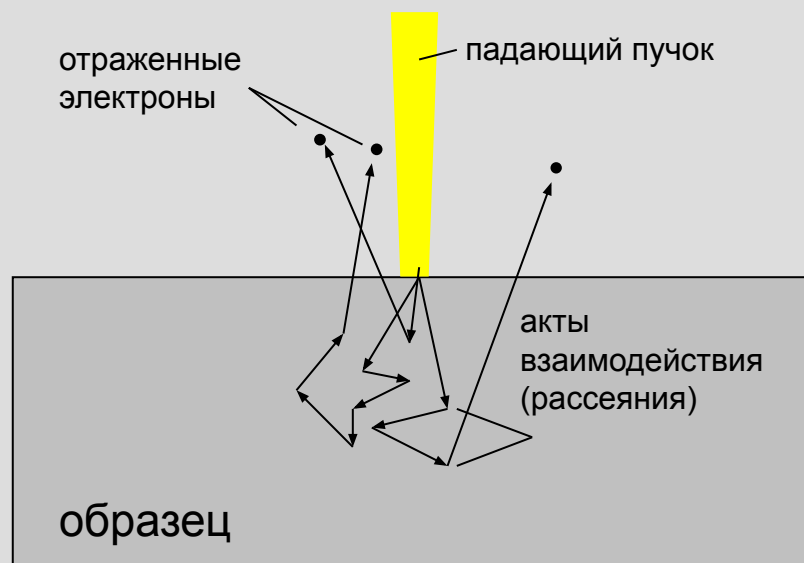


# Эффекты, возникающие при взаимодействии пучка с веществом



# Обратнорассеянные (отраженные) электроны

**Обратнорассеянные (отраженные) электроны (BSE)** – это электроны первичного пучка, покинувшие объем образца вследствие изменения траектории своего движения при упругих или неупругих взаимодействиях. Такие электроны могут сохранить значительную часть своей первоначальной энергии.



Доля обратнорассеянных электронов прямо пропорциональна среднему атомному номеру материала исследуемого объекта.

# Дифракция обратнорассеянных электронов (каналирование)

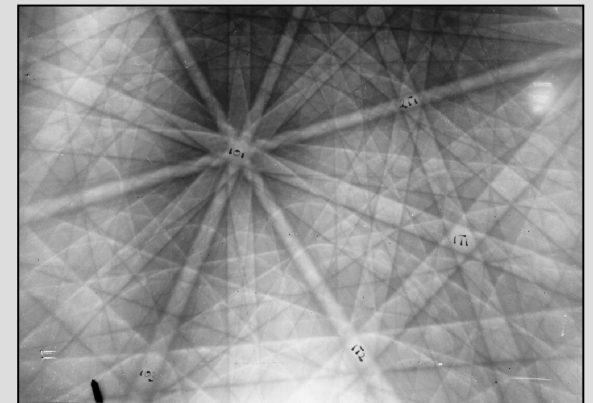
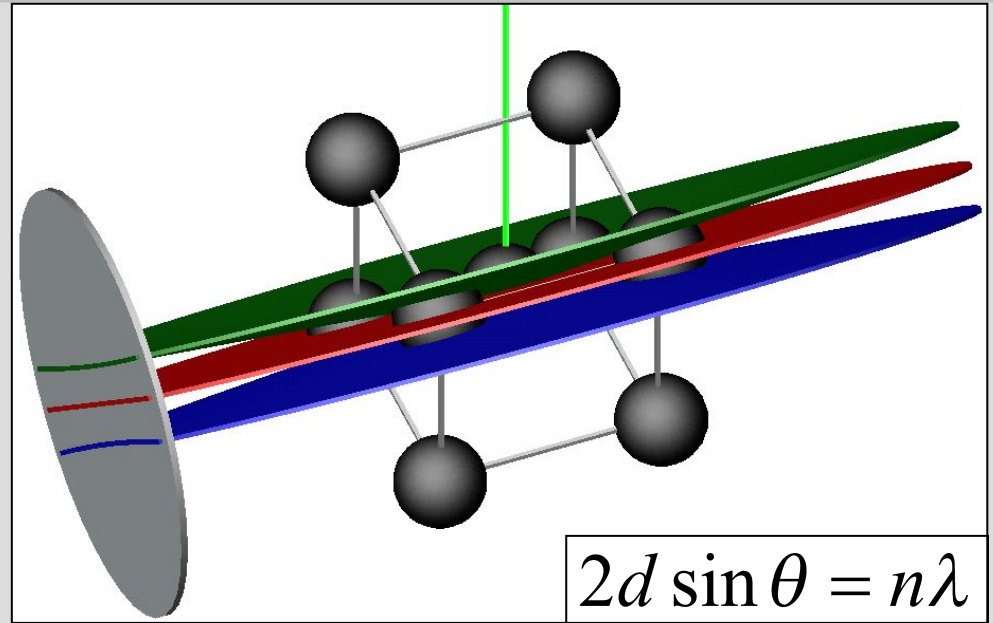
Обладая волновыми свойствами, электроны могут испытывать дифракцию на периодических структурах, период которых сопоставим с длиной волны электронов (т.е. на атомных плоскостях кристаллической решетки)

предположительный механизм дифракции отраженных электронов:

1. часть попадающих в образец электронов испытывает неупругое рассеяние, теряя малую часть энергии (~1%) и рассеивается во всех направлениях в относительно малом объеме (аналог точечного источника)

2. если электроны выполняют условие Вульфа-Брэггов для какой-либо кристаллографической плоскости, они обособляются («каналуются») от прочих (фоновых) электронов, вызывая вариации в плотности распределения отраженных электронов.

3. для каждой плоскости электроны образуют пару широких конусов, сечение которых плоскостью (экрана, фотопластинки) приводит к наблюдению **Кикучи-полос** (картины дифракции Кикучи)



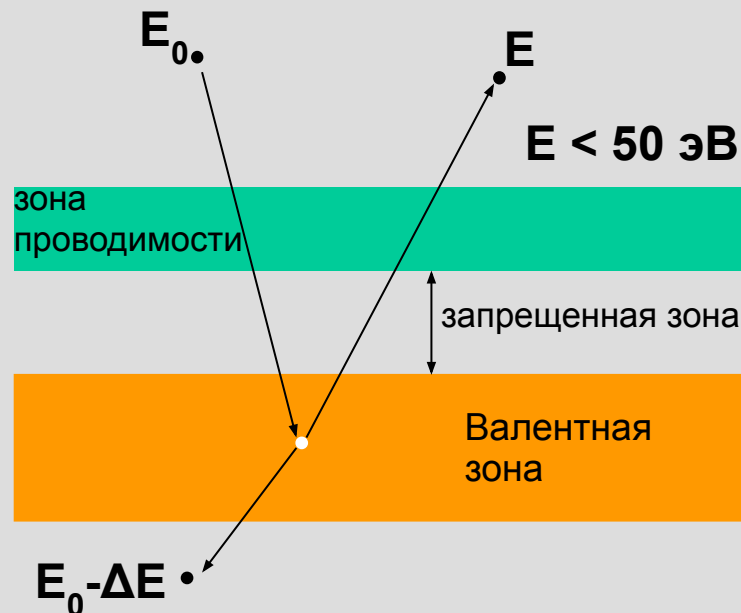
# Вторичные электроны

Электроны первичного пучка могут сообщить электронам вещества энергию, достаточную для их выхода из материала. Такие вышедшие электроны называются **вторичными**. Различают:

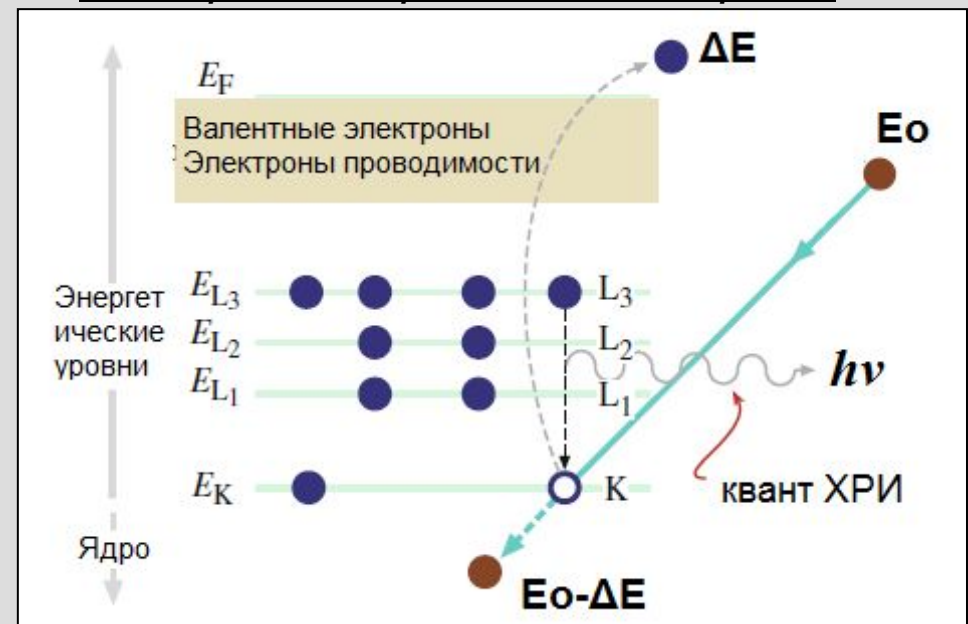
**Медленные вторичные электроны** - выбитые из валентной зоны или зоны проводимости.

**Быстрые вторичные электроны** - выбитые из внутренних оболочек атомов.  
**Оже – электроны (Auger)**

## Медленные вторичные электроны



## Быстрые вторичные электроны



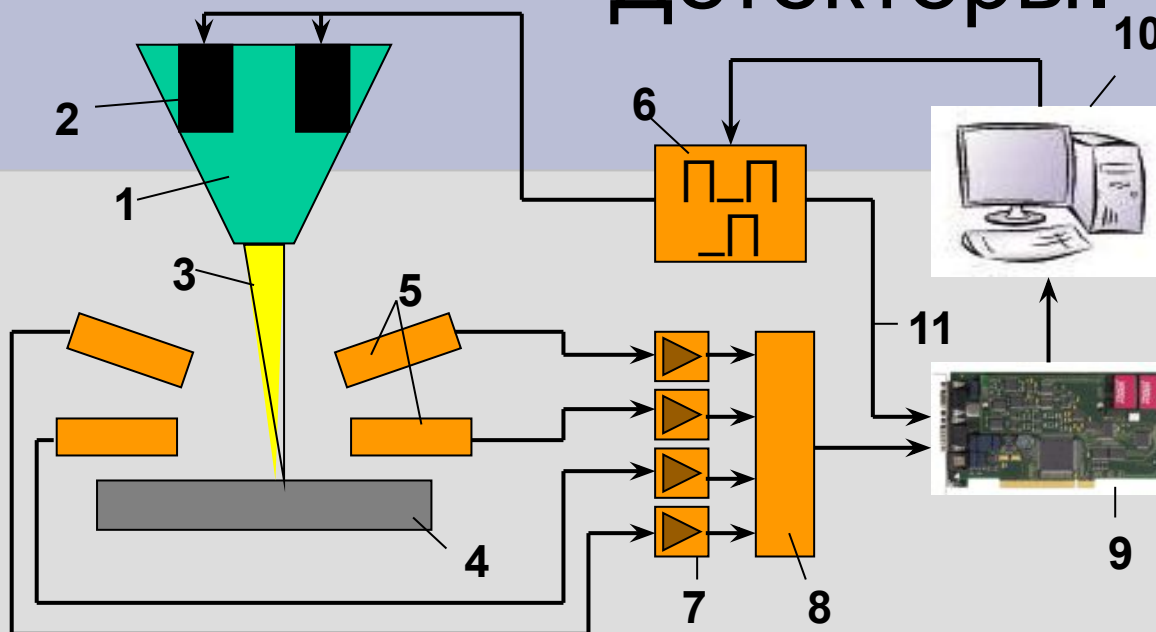
$$50 \text{ эВ} < \Delta E < 1/2 E_0$$

Вследствие малой энергии глубина выхода вторичных электронов ограничена 5-50 нм.

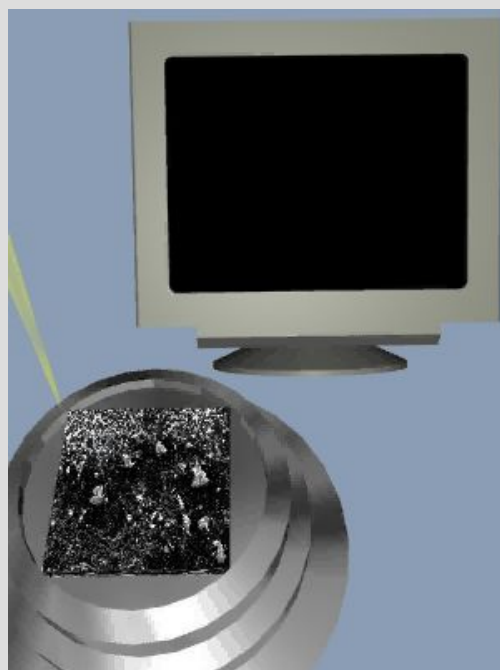
**Вторичные электроны несут информацию об особенностях поверхности образца (топографии)**

# Получение изображения в РЭМ.

## Детекторы.



- 1 – полюсный наконечник объективной линзы;
- 2 – катушки сканирования;
- 3 – пучок электронов (зонд);
- 4 – образец;
- 5 – детекторы;
- 6 – генератор развертки;
- 7 – видеоусилители;
- 8 – селектор сигнала;
- 9 – плата видеозахвата;
- 10 – ПК управления;
- 11 – сигнал синхронизации видеоразвертки



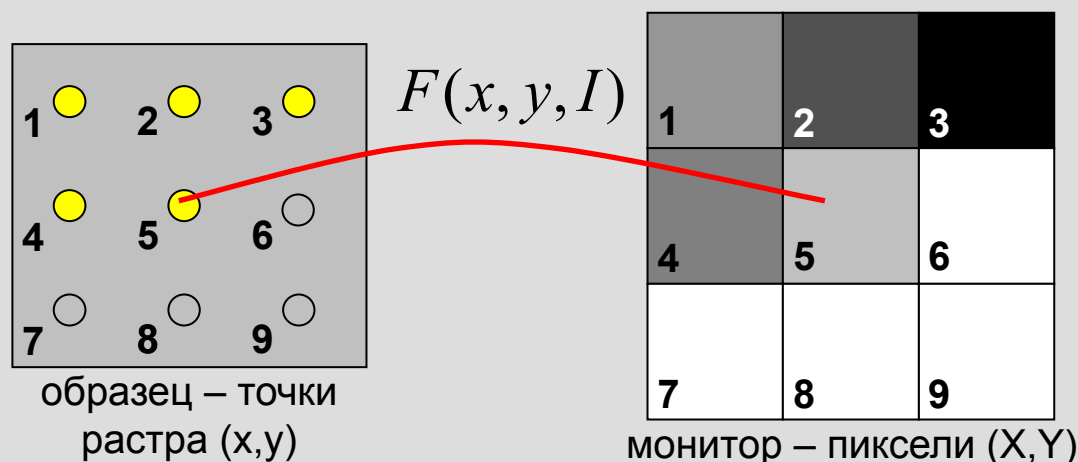
Электронная пушка излучает пучок электронов с нужной энергией

Магнитные линзы и диафрагмы колонны РЭМ формируют электронный зонд нужной геометрии

Отклоняющие катушки последовательно и построчно (слева направо, сверху вниз) позиционируют зонд на поверхности образца, формируя двумерную область сканирования («x - y растр»), которой соответствует область на мониторе

Перемещение зонда по поверхности образца синхронизировано с видеоразверткой монитора управляющего микроскопом ПК

В каждой позиции электронного зонда на поверхности образца детекторы фиксируют интенсивность какого-либо сигнала, возникающего при взаимодействии электронов зонда с образцом; в зависимости от этой интенсивности точке (пикселю) на мониторе присваивается определенный уровень яркости:



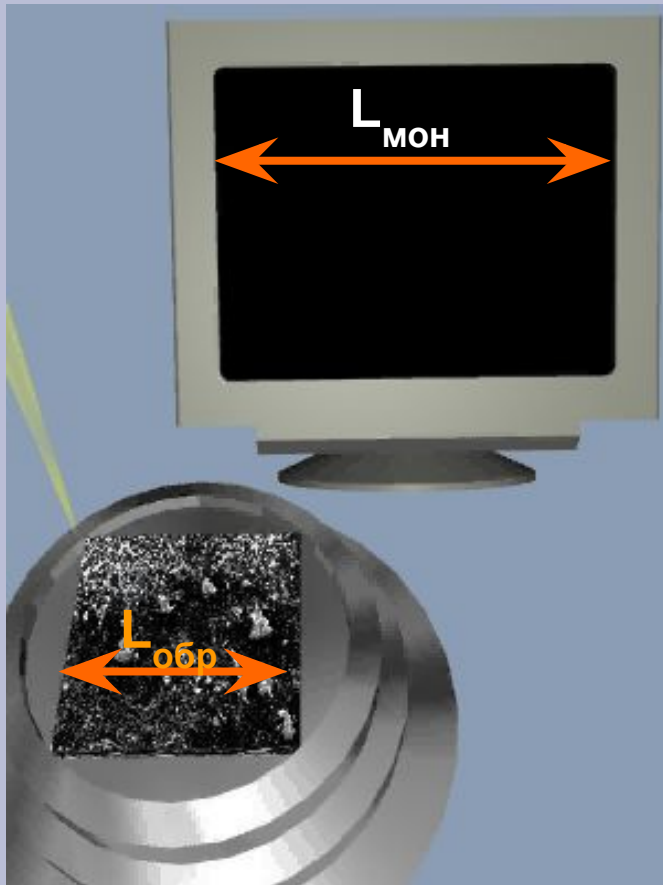
$F(x, y, I)$  – функция передачи информации с яркостной модуляцией (Z-модуляцией)

В результате установления соответствия между позициями зонда на образце (x,y) и пикселями монитора (X,Y,I) формируется **растровое** изображение объекта. Так как движение зонда и видеоразвертка синхронизированы, изображение передает особенности геометрии объекта без искажений.

Растровое электронно-микроскопическое изображение не является действительным и представляет собой абстракцию переноса информации из пространства объекта в пространство монитора !



# Увеличение в РЭМ



$$M = \frac{L_{\text{мон}}}{L_{\text{обр}}}$$

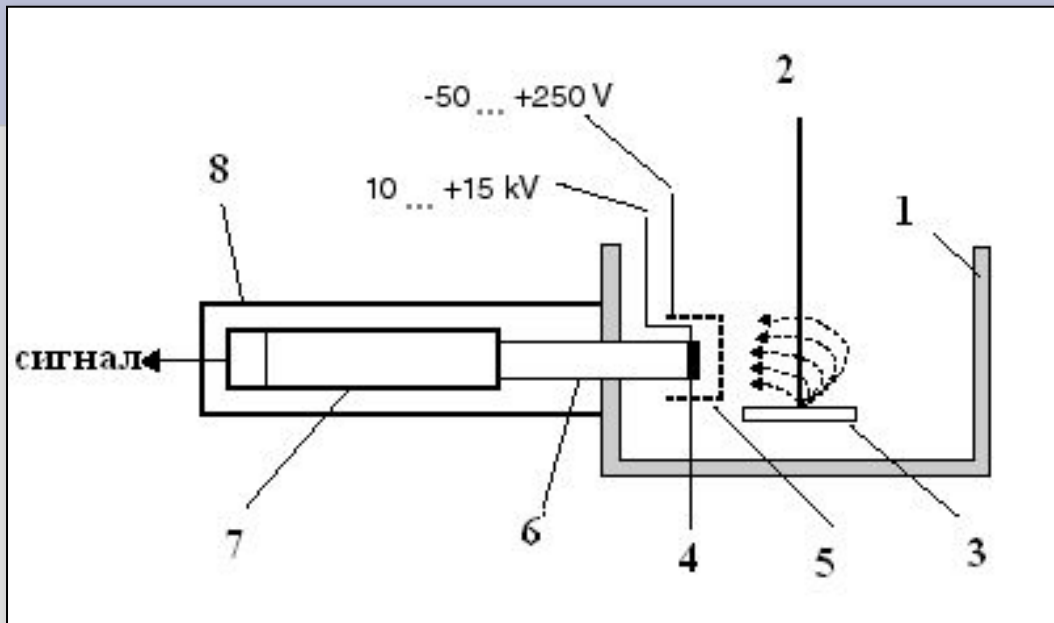
Pm08\_6.dcr

Современные РЭМ могут создать растр размерами до 4096 x 3536 (и более) точек!

***Увеличение в растровом электронном микроскопе создается не линзами, а катушками сканирования! Задача линз в РЭМ – формировать электронный пучок нужной геометрии и интенсивности.***

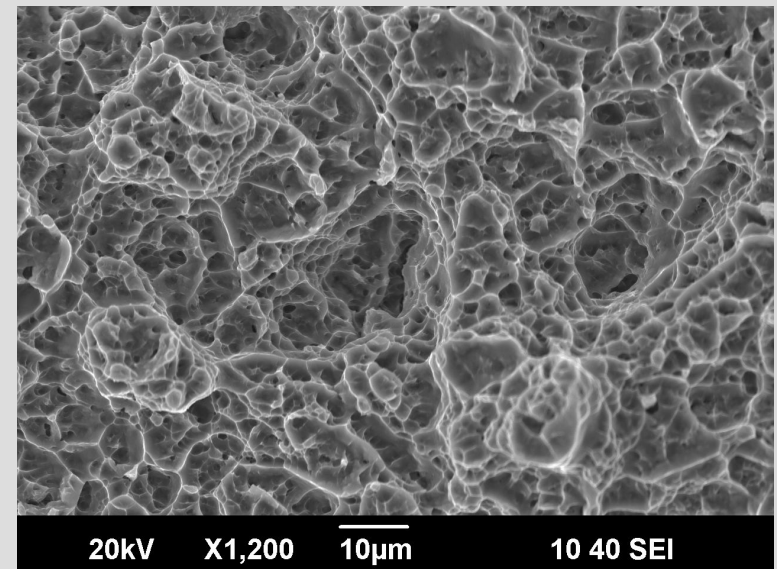
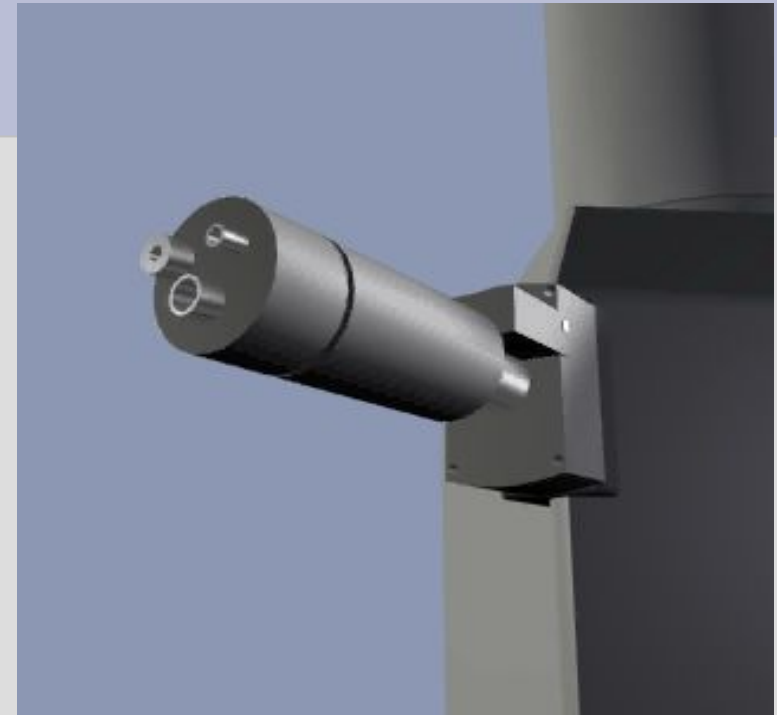
# Вторичные электроны.

## Детектор Эверхарта-Торнли.

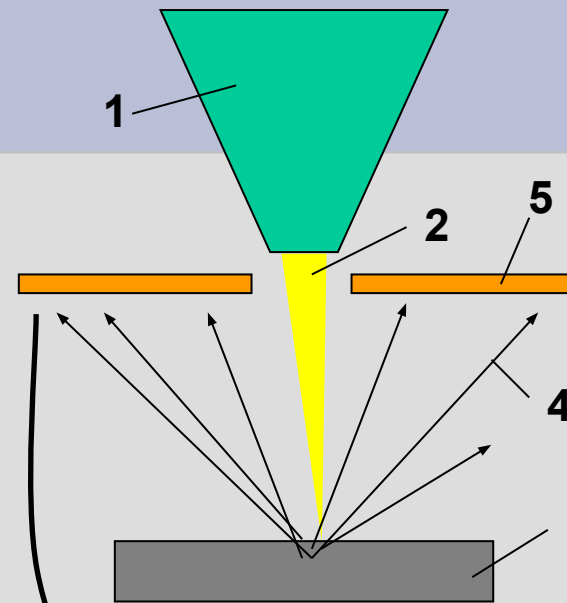
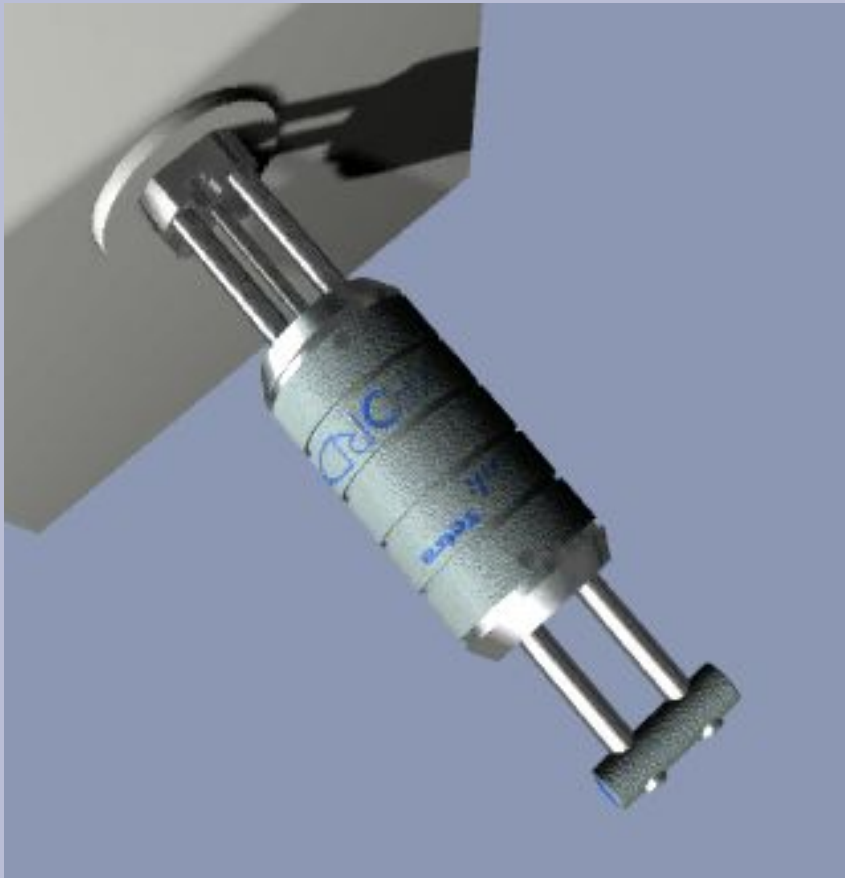


1 – камера образца РЭМ; 2 – электронный пучок; 3 – образец; 4 – сцинтиллятор; 5 – сетка (Фарадея); 6 – световод; 7 – фотоэлектронный умножитель (ФЭУ); 8 – светонепроницаемый корпус

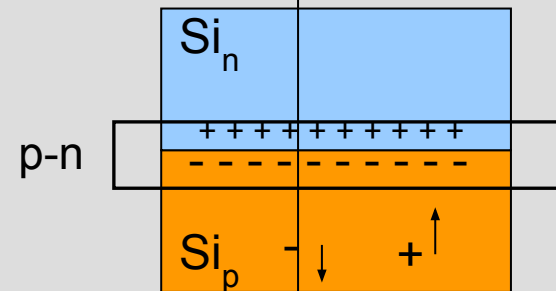
Детектор Э-Т может регистрировать как вторичные и часть обратнорассеянных электронов (положительный потенциал на сетке), так и только часть обратнорассеянных электронов (отрицательный «отталкивающий» потенциал)



# Полупроводниковые кольцевые детекторы обратнорассеянных электронов

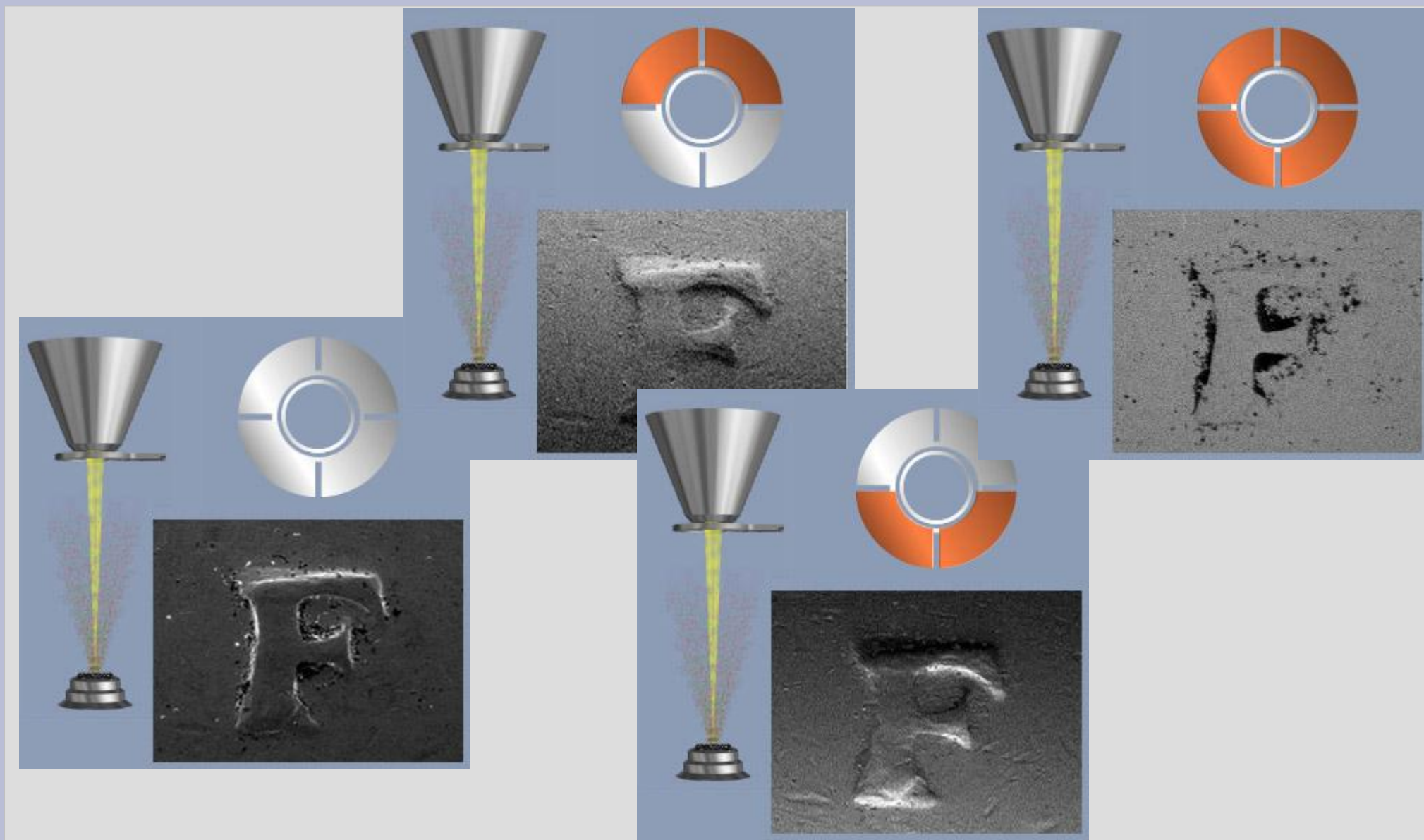


- 1 – полюсный наконечник объективной линзы;
- 2 – электронный пучок;
- 3 – образец;
- 4 – отраженные электроны;
- 5 – кольцевой полупроводниковый детектор

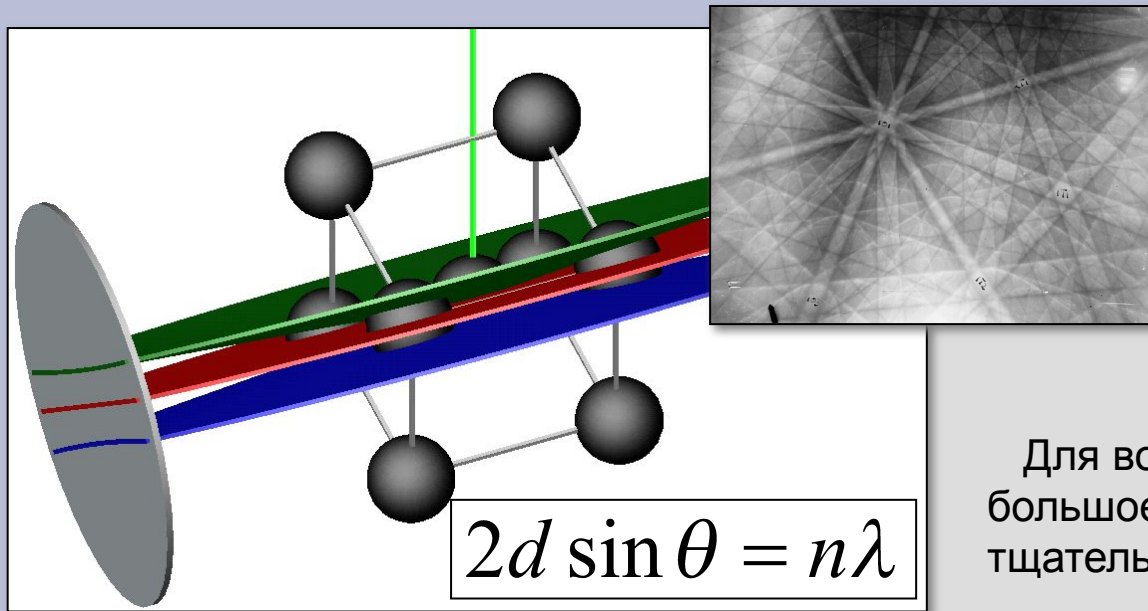


*Сбор быстрых обратнорассеянных электронов, которые отвечают за формирование контраста, по атомному номеру и ориентации кристаллической решетки.*

# Полупроводниковые кольцевые детекторы и топографический контраст



# Полупроводниковые кольцевые детекторы и ориентационный контраст



Из-за явления каналирования угловое распределение плотности отраженных электронов будет изменяться для участков образца с разным типом и/или ориентацией кристаллической решетки, приводя к возникновению **ориентационного контраста**

Для возникновения такого контраста необходимо большое количество отраженных электронов и тщательная подготовка поверхности образца.

