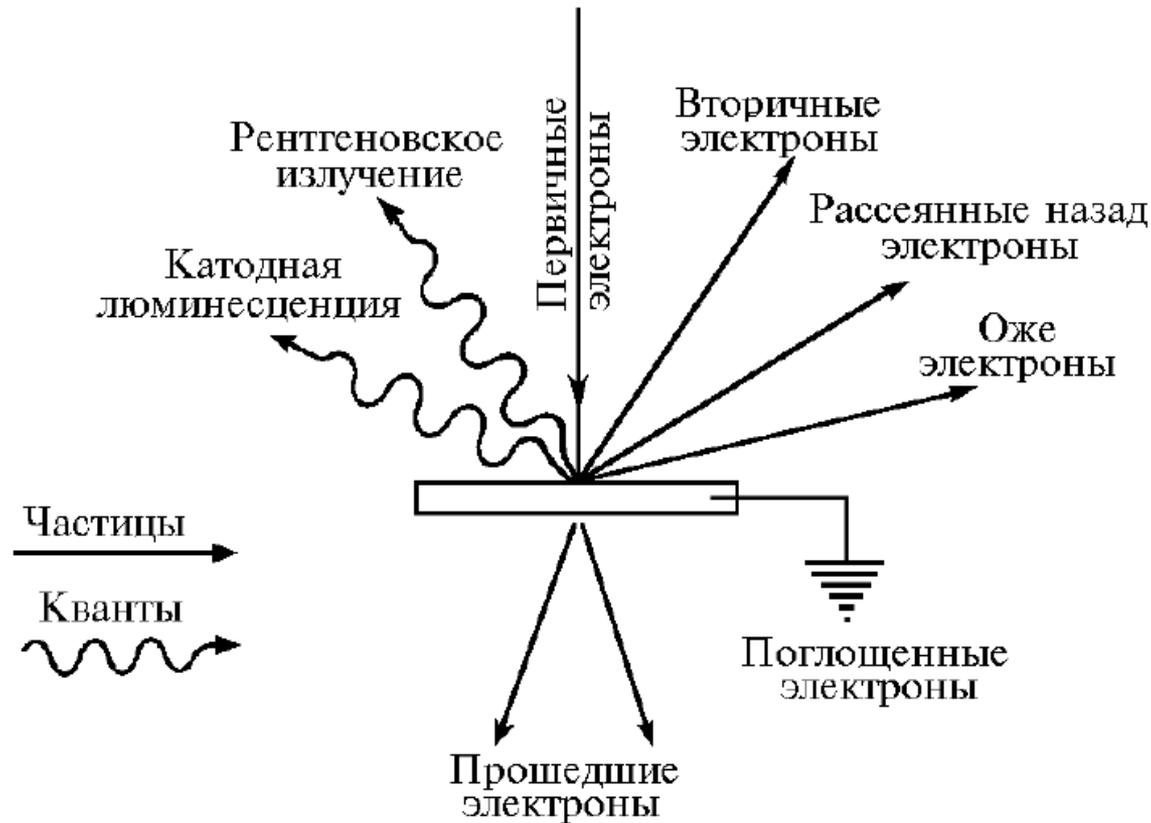


**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА С
ВЕЩЕСТВОМ.
ДЕТЕКТОРЫ.**

Что происходит?

Схема образования вторичных сигналов при взаимодействии электронов зонда с веществом мишени



Эти основные источники вторичных сигналов используются при изучении структуры и свойств методами сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии.

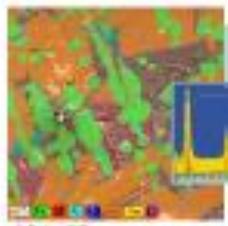
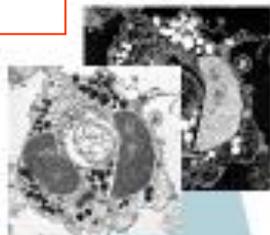
Детектор прошедших электронов (TE)

Детектор катодолюминесцентного излучения (CL)

Детектор вторичных электронов (SE - secondary electrons)

Детектор вторичных электронов для режима низкого вакуума (LVSTD - Low Vacuum Secondary Tescan Detector)

Детектор тока, индуцированного электронным пучком (EBIC)



Детектор для анализа картины дифракции обратно рассеянных электронов (EBCD)

Детектор для анализа характеристического рентгеновского излучения (EDX/WDX)

Детекторы



EBIC

TE

CL

SE

LVSTD

BSE

EBCD

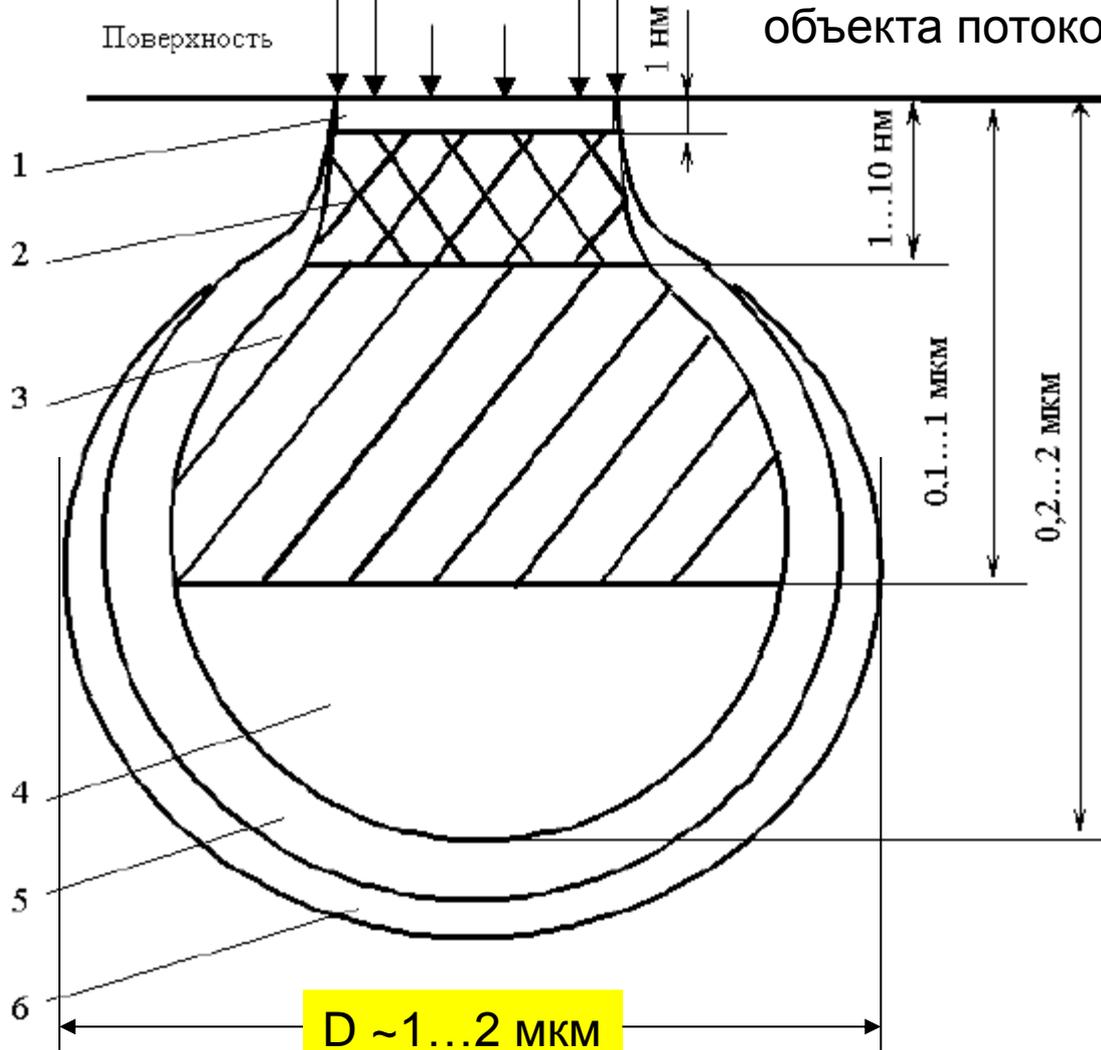
EDX/WDX

Детекторы отраженных электронов (BSE – back-scattered electrons)

$d \sim 10 \text{ нм}$

При проникновении первичных электронов в образец они рассеиваются во всех направлениях

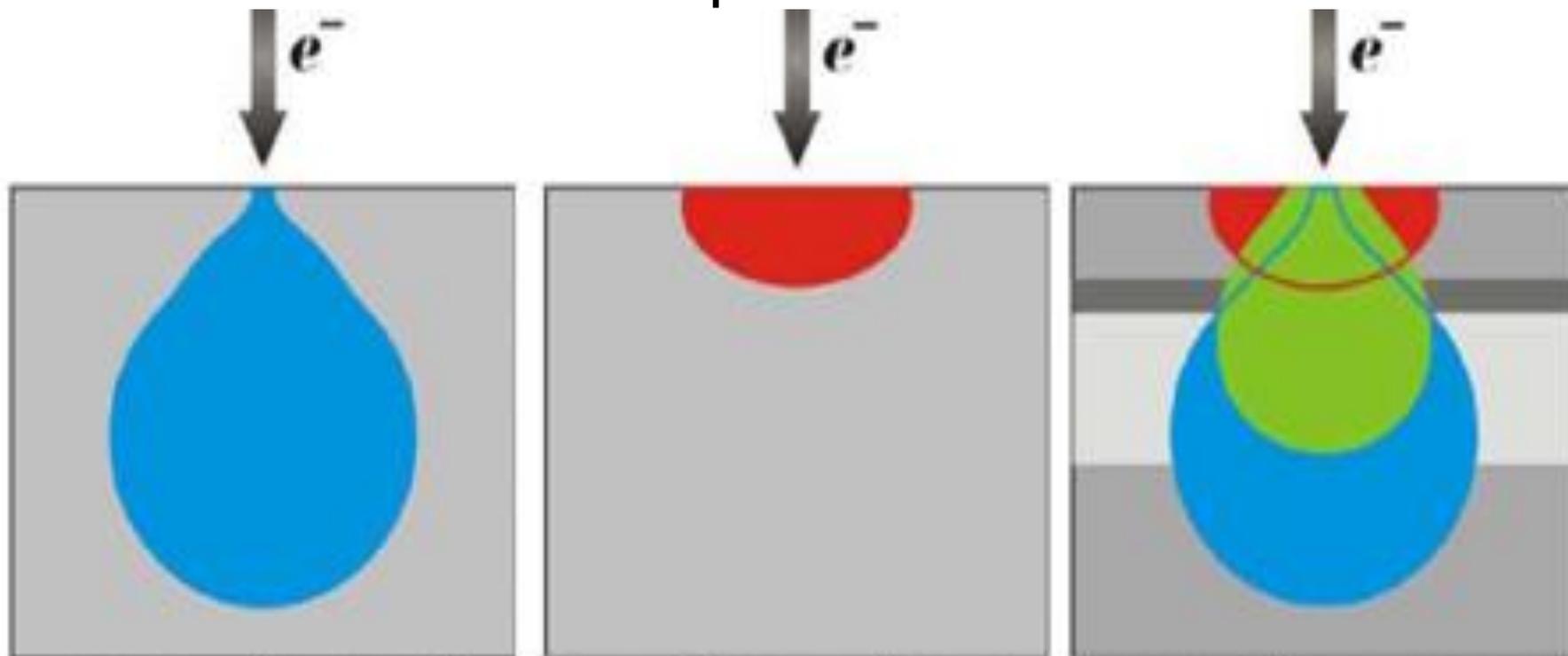
Области сигналов и пространственное разрешение при облучении поверхности объекта потоком электронов.



Области генерации:

- 1 – Оже-электронов,
- 2 – вторичных электронов,
- 3 – отраженных электронов,
- 4 – характеристического рентгеновского излучения,
- 5 – тормозного рентгеновского излучения,
- 6 – флуоресценции.

Зависимость области взаимодействия от условий эксперимента.



Маленький атомный номер или высокая энергия электронов

Большой атомный номер или низкая энергия электронов

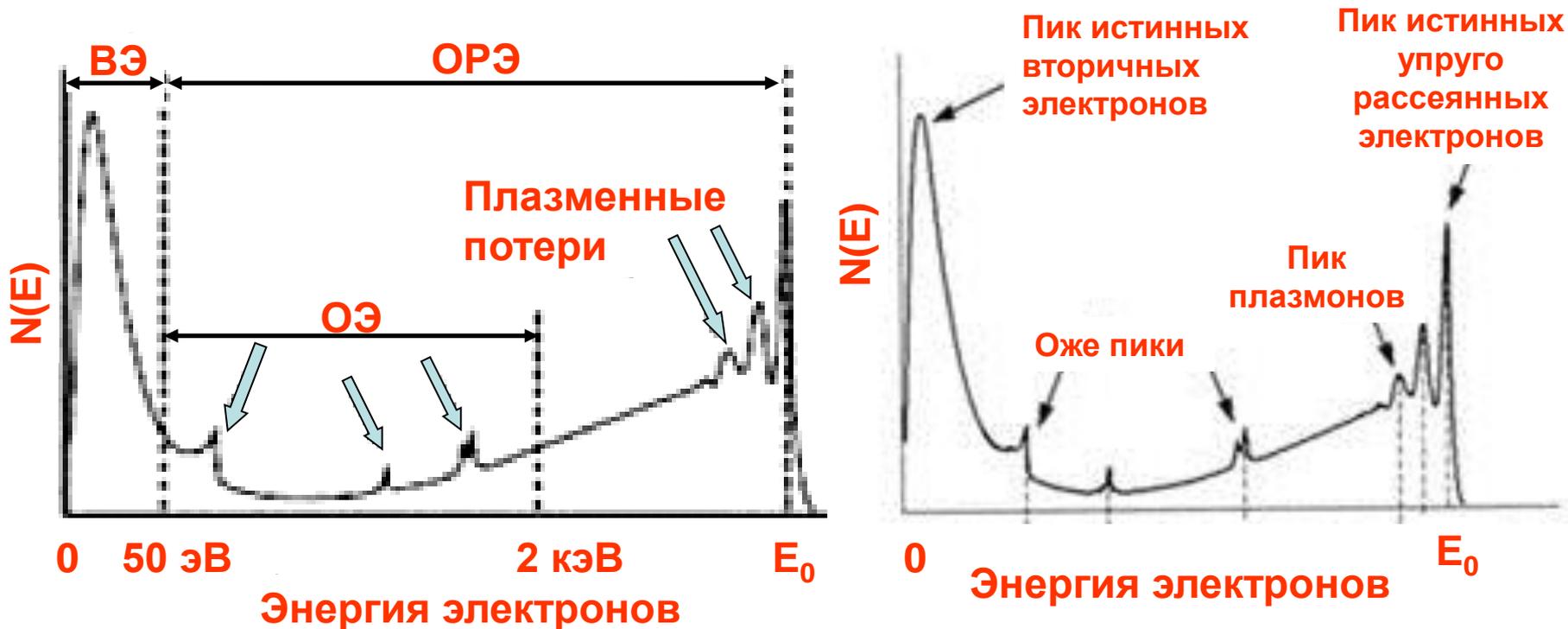
Многослойная структура

Длина пробега электрона в мишени передается формулой Канайя и Окаямя:

$$R = 0,0276 \cdot E^{1,67} \{A/(Z^{0,889} \cdot \rho)\},$$

где E – энергия электрона; A – атомный вес; Z – атомный номер;
 ρ – плотность вещества

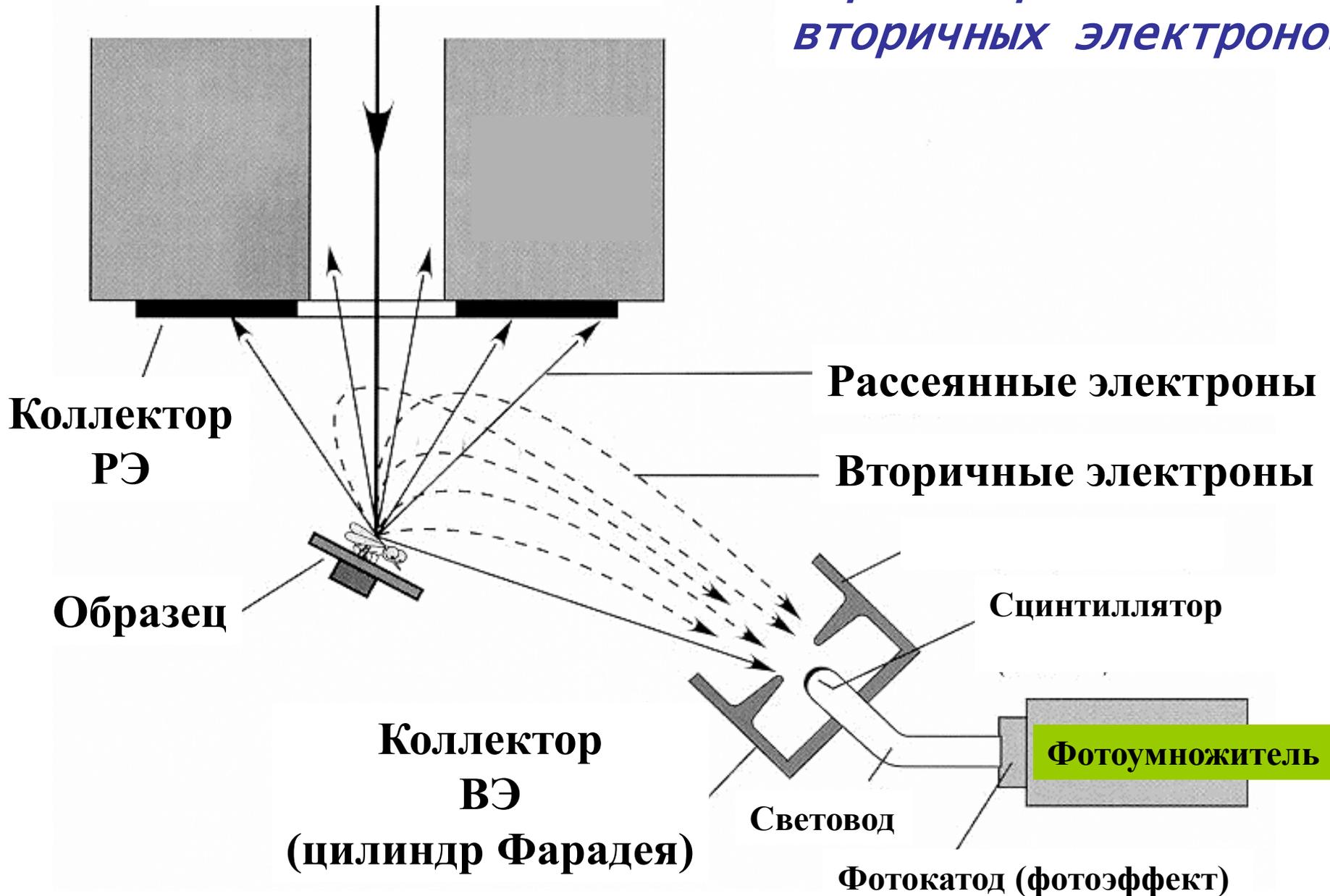
Структура энергетического спектра электронов, испускаемых с поверхности, облучаемой пучком электронов с энергией E_0



Кроме пика истинных упруго рассеянных электронов с энергией E_0 спектр содержит широкий пик вторичных электронов (ВЭ) (от 0 до около 50 эВ) и область неупругих обратно рассеянных электронов (ОРЭ) (от 50 эВ до E_0). Оже-пики и пики потерь на возбуждение плазмонов и межзонных переходов также попадают в диапазон ОРЭ. Подбором соответствующего детектора можно контролировать сигнал электронов соответствующего энергетического диапазона.

Первичные электроны
(зонд)

ДЕТЕКТОРЫ СИГНАЛОВ
обратно рассеянных и
вторичных электронов



Регистрация вторичных электронов

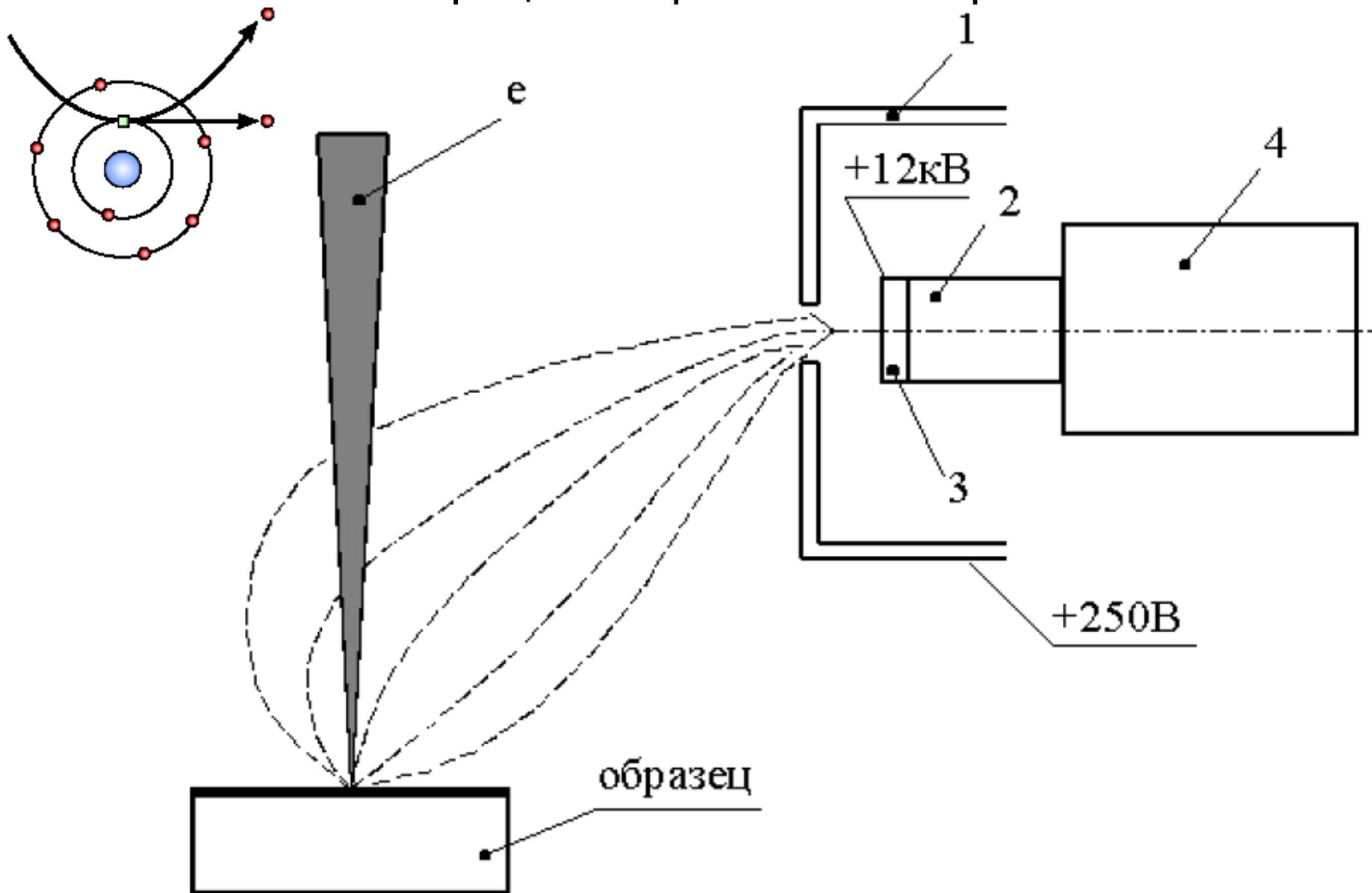
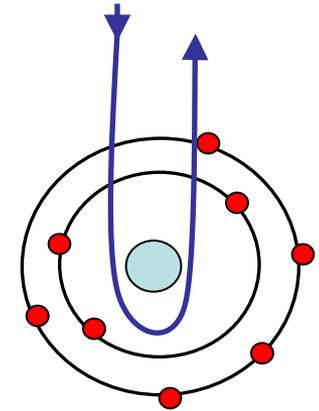
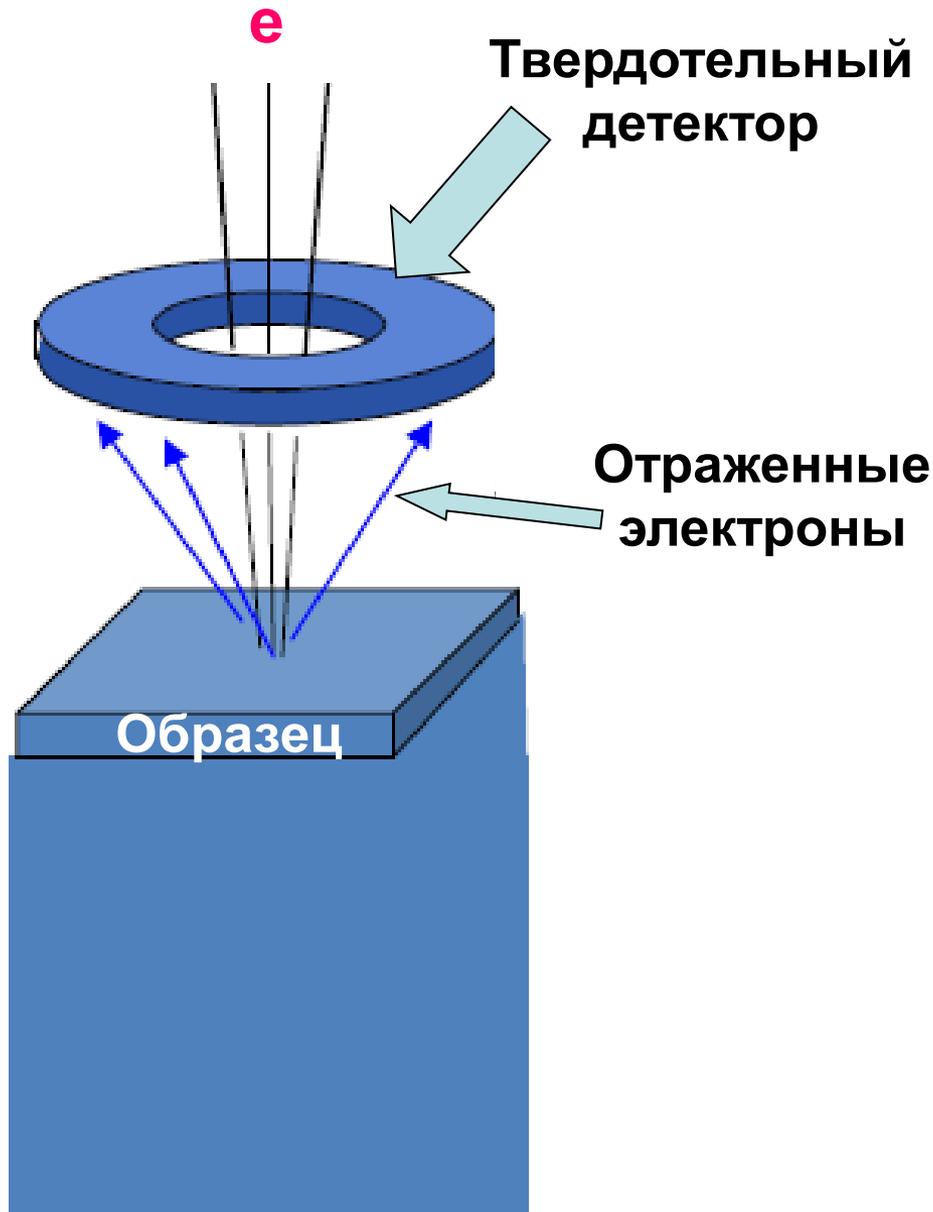
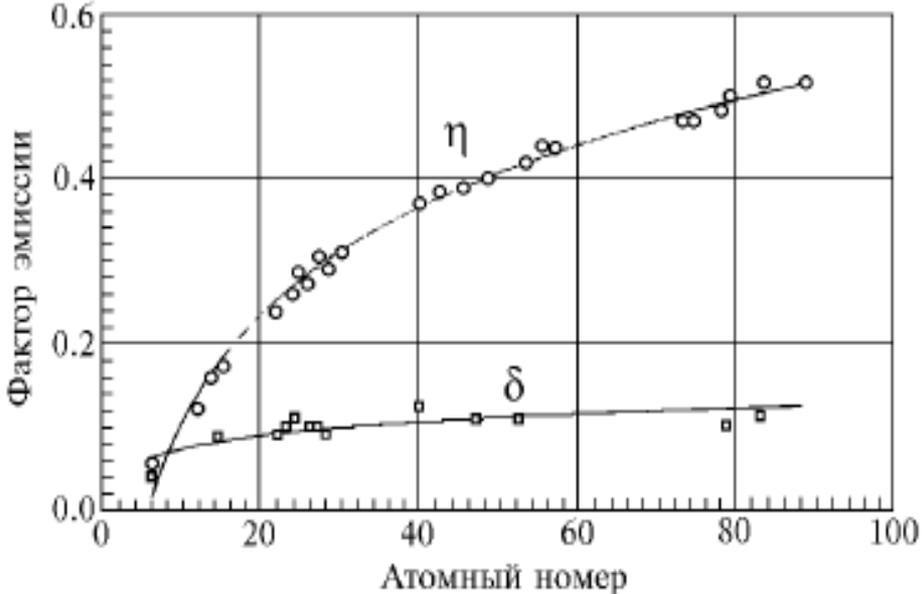


Рис. 2. Схема детектора эмитированных (вторичных) электронов Эверхарта-Торнли. 1 – коллектор, 2 – световод, 3 – сцинтиллятор, 4 – фотоумножитель.

Регистрация отраженных электронов



Основная масса отражённых электронов направлена навстречу падающему пучку. Так как, в отличие от истинно вторичных, отражённые электроны обладают большими энергиями, для их регистрации используется менее чувствительный твёрдотельный детектор. Детектор изготавливается в форме кольца, охватывающего первичный пучок электронов.

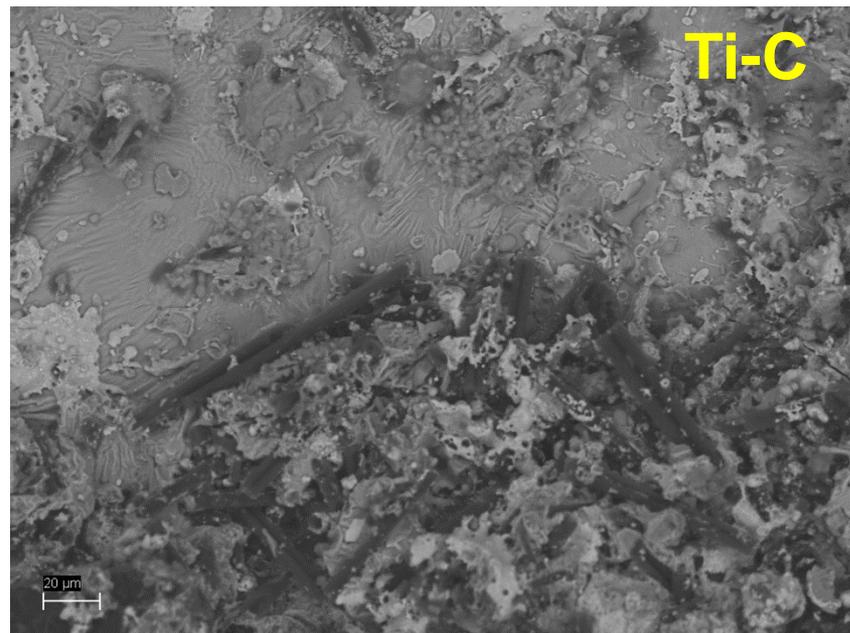
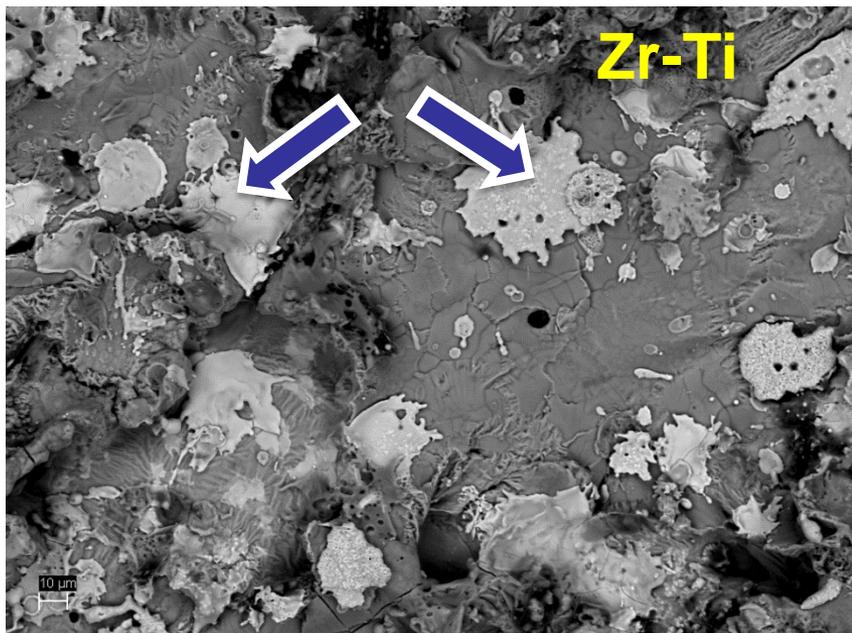


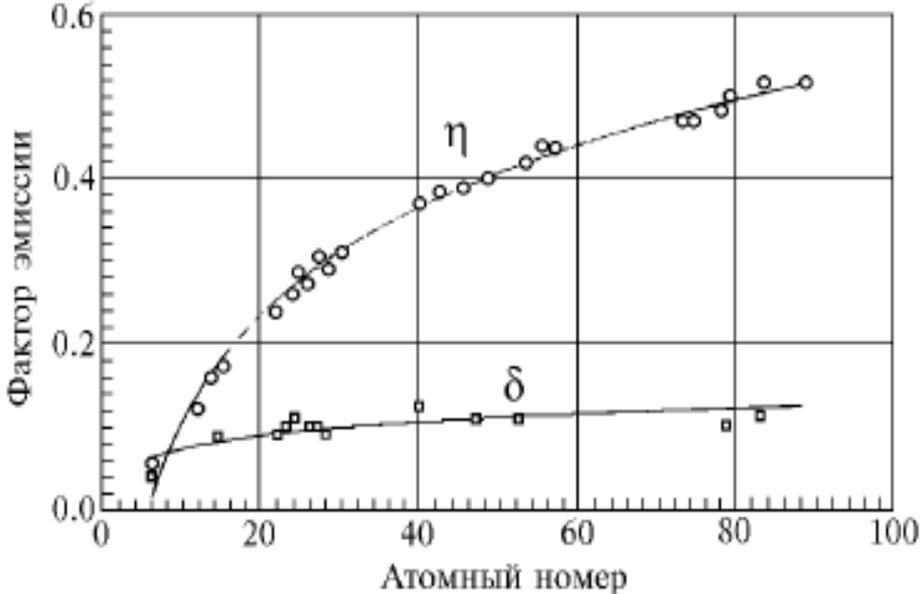
Зависимость коэффициента эмиссии электронов от атомного номера элементов мишени:

δ - коэффициент истинно вторичной эмиссии;

η - коэффициент отражения.

Контраст изображения, полученный в режиме **упруго рассеянных** (отражённых) электронов, в растровой электронной микроскопии позволяет извлекать полезную информацию о различии среднего атомного номера исследуемого объекта. Коэффициент отражения электронов прямо пропорционален атомному номеру **Z** матрицы, поэтому более светлые области на изображении соответствуют фазам с большим средним атомным номером.

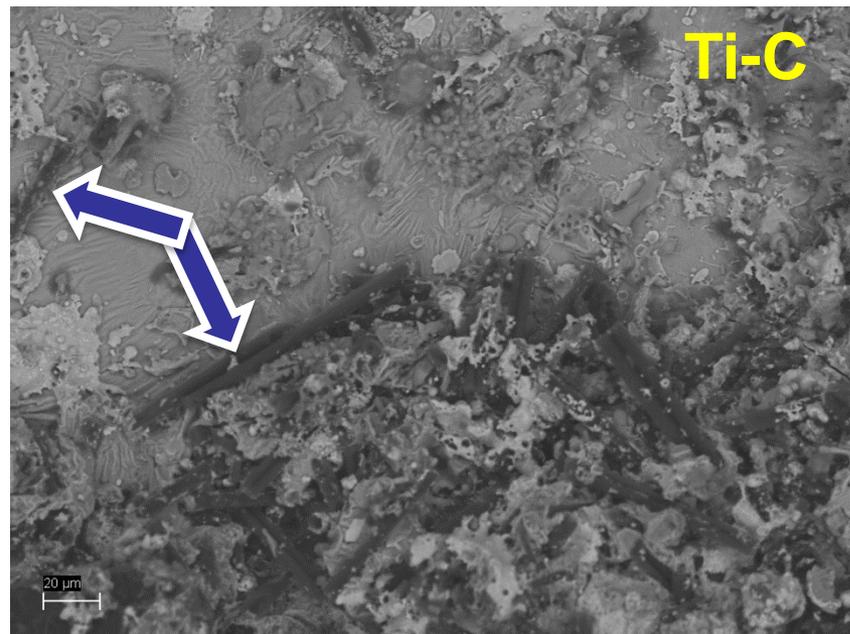
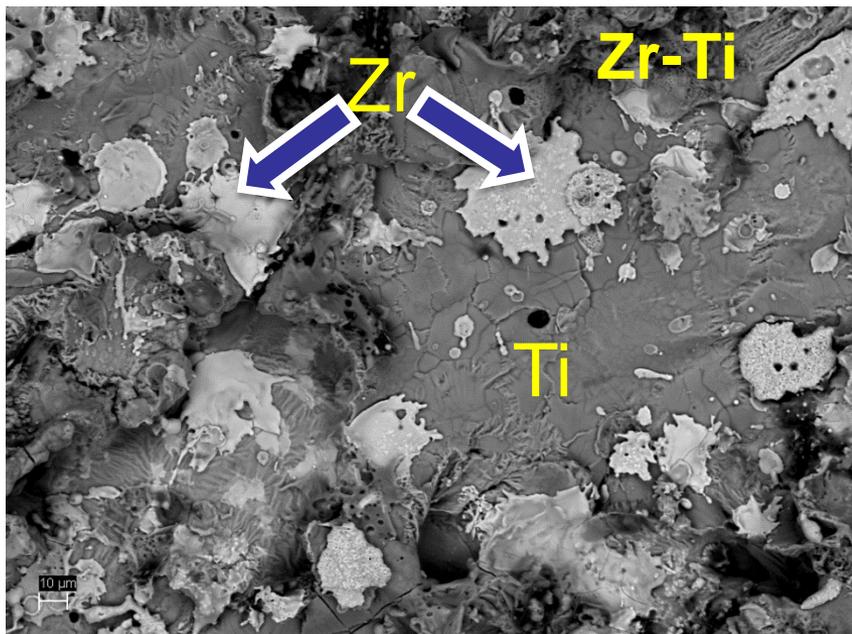


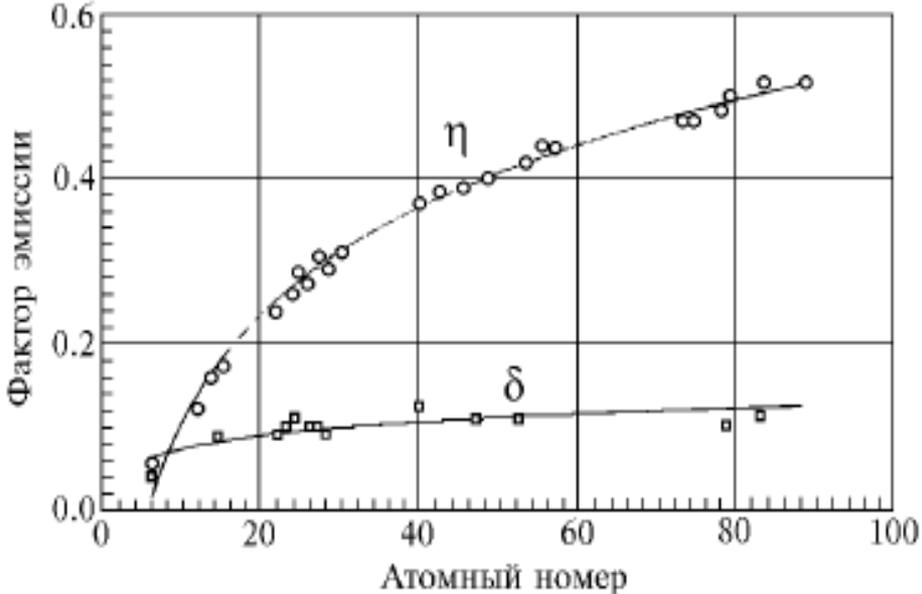


Зависимость коэффициента эмиссии электронов от атомного номера элементов мишени:

δ - коэффициент истинно вторичной эмиссии;
 η - коэффициент отражения.

Контраст изображения, полученный в режиме **упруго рассеянных** (отражённых) электронов, в растровой электронной микроскопии позволяет извлекать полезную информацию о различии среднего атомного номера исследуемого объекта. Коэффициент отражения электронов прямо пропорционален атомному номеру **Z** матрицы, поэтому более светлые области на изображении соответствуют фазам с большим средним атомным номером.

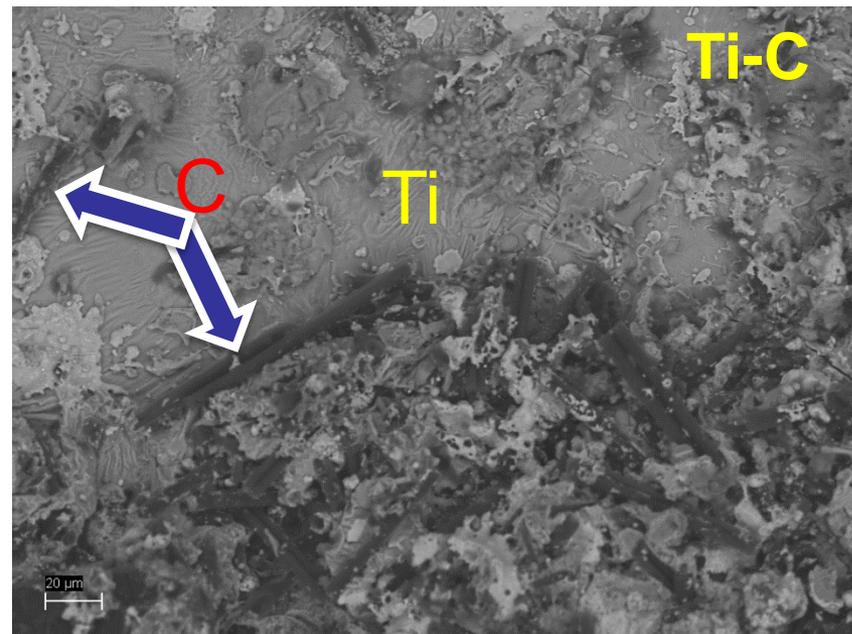
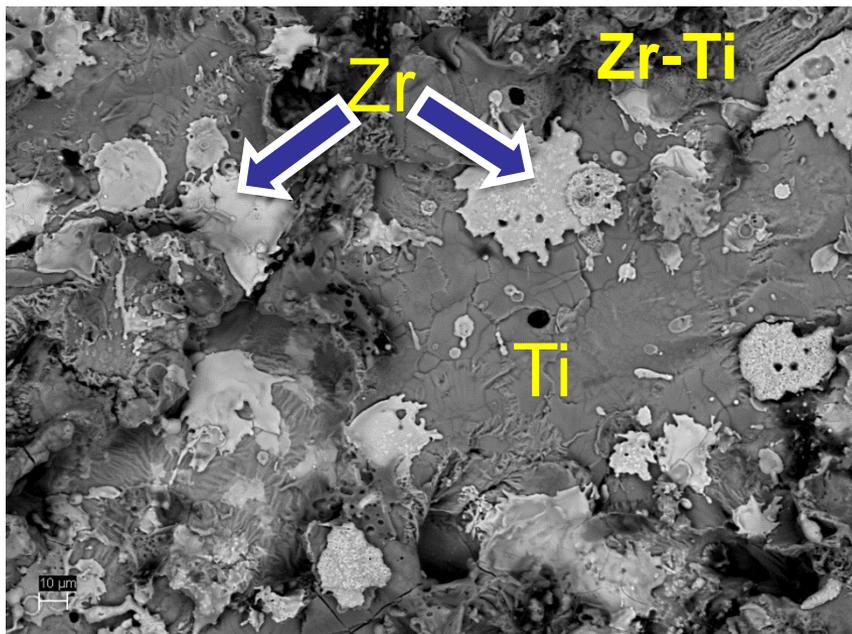




Контраст изображения, полученный в режиме **упруго рассеянных** (отражённых) электронов, в растровой электронной микроскопии позволяет извлекать полезную информацию о различии среднего атомного номера исследуемого объекта. Коэффициент отражения электронов прямо пропорционален атомному номеру **Z** матрицы, поэтому более светлые области на изображении соответствуют фазам с большим средним атомным номером.

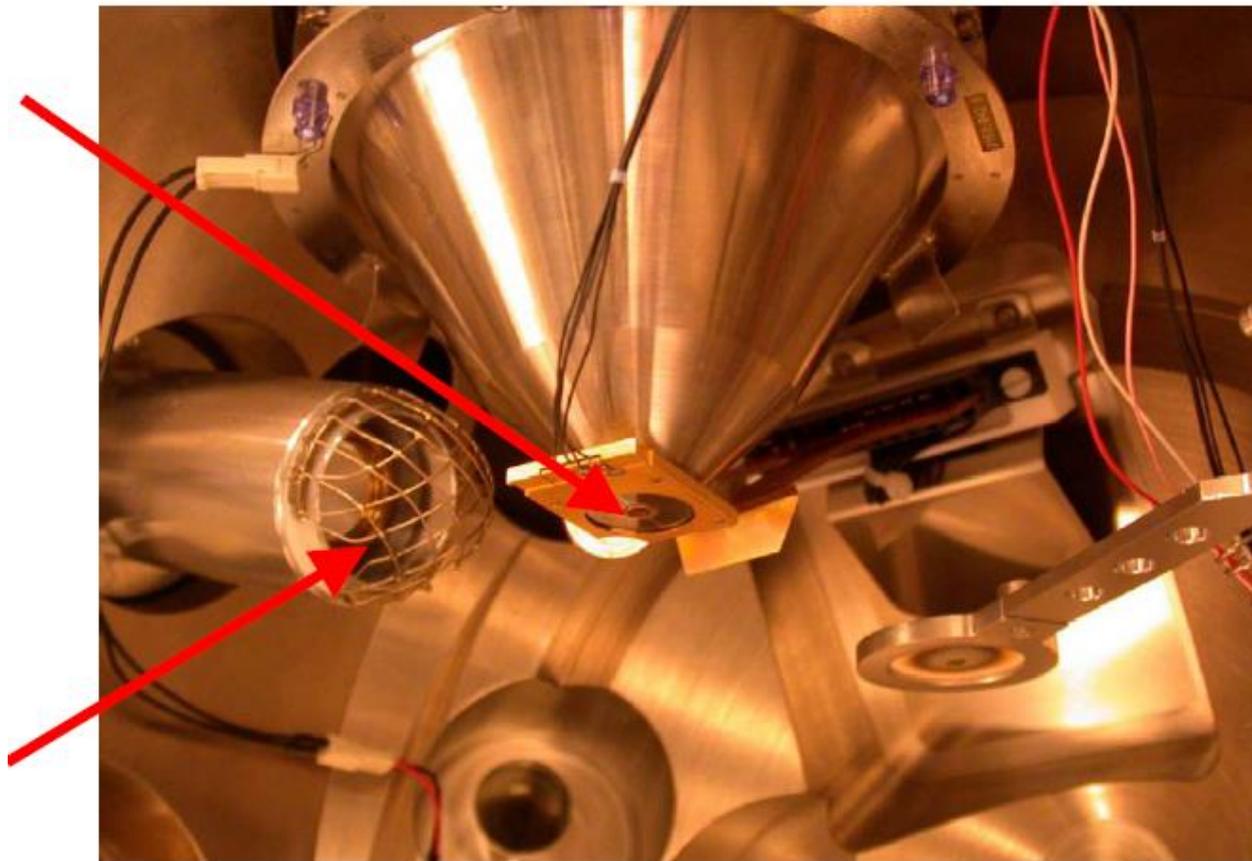
Зависимость коэффициента эмиссии электронов от атомного номера элементов мишени:

δ - коэффициент истинно вторичной эмиссии;
 η - коэффициент отражения.



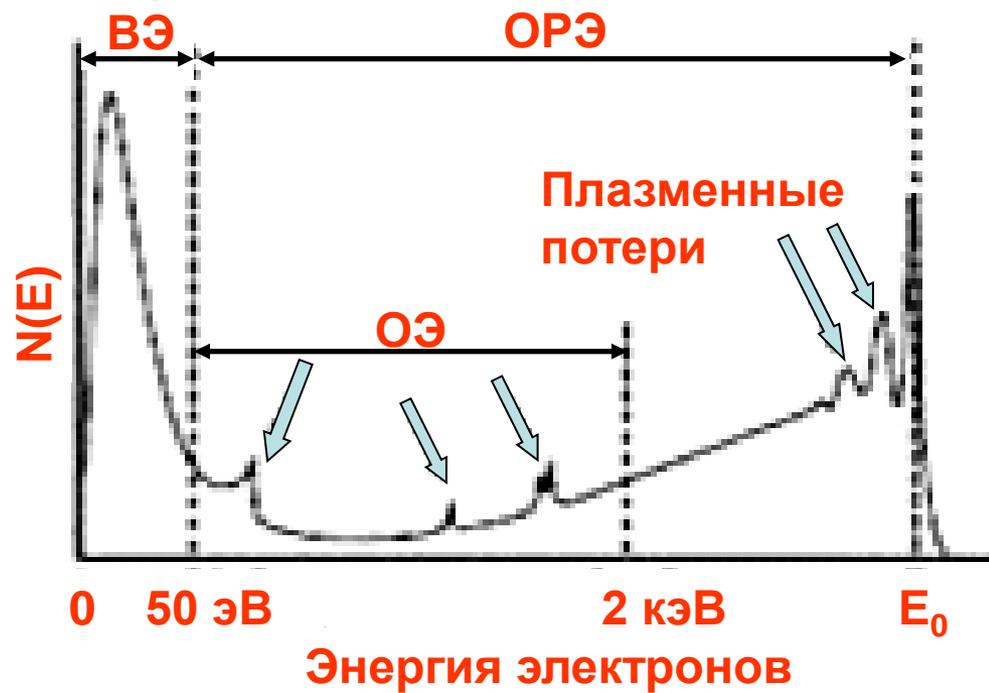
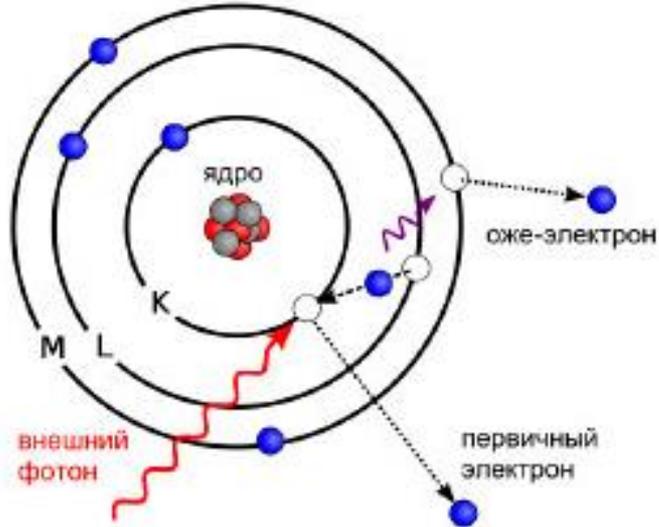
Детекторы электронов в камере сканирующего электронного микроскопа

Детектор обратно
отраженных
электронов

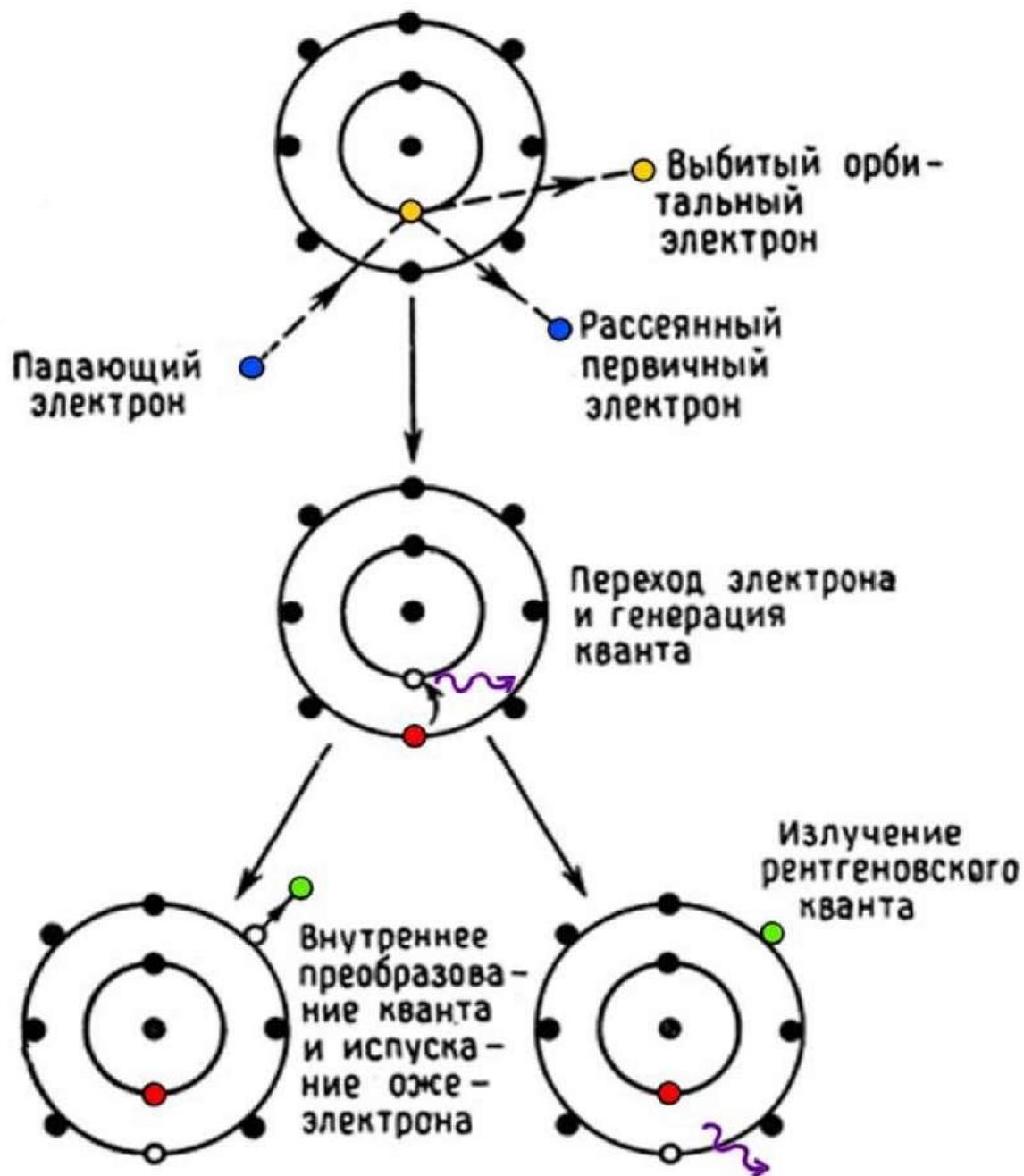


Детектор вторичных
электронов Эверхарта
– Торнли

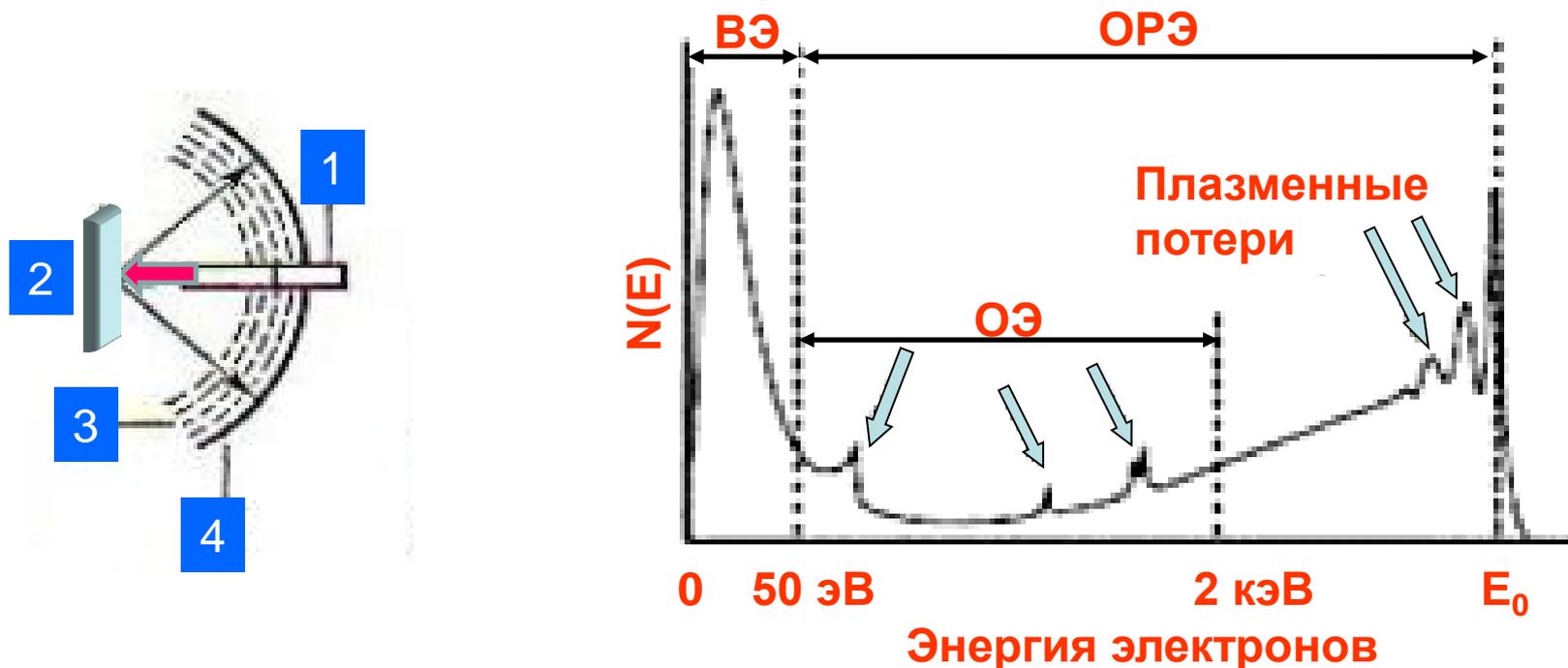
Регистрация Оже-электронов



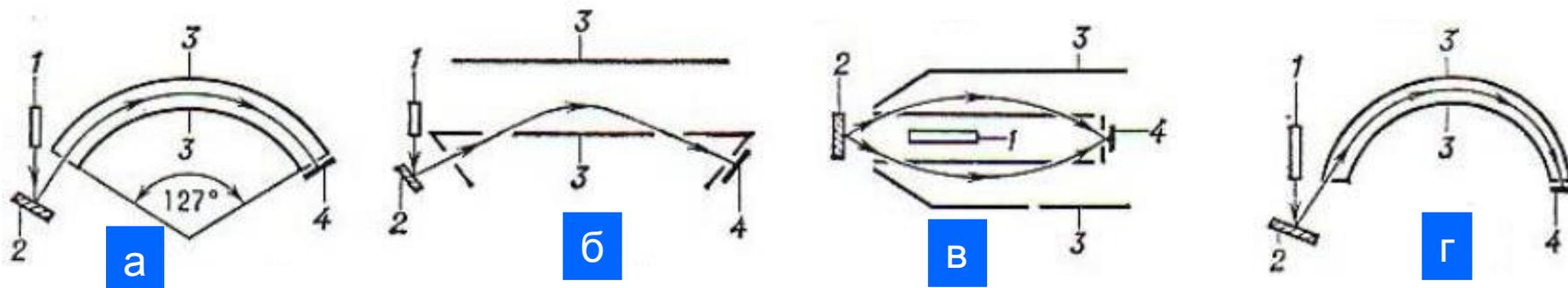
Оже-эффект был открыт в 1925 году; первые приборы, в которых он был использован для исследования поверхности, появились в 60-х годах XX века. Сложности использования Оже-электронов были обусловлены тем, что в области энергий, в которой находятся оже-электроны, существует большое количество неупруго-рассеянных первичных электронов, которые образуют сплошной спектр, являющийся фоном, на котором приходится выделять оже-электроны. Ток неупруго-рассеянных электронов на несколько порядков превышает ток оже-электронов, поэтому возникает обычная трудно решаемая задача выделения полезного сигнала на уровне большого фона. Эта задача впервые была решена в 1962 году Л.А. Харрисом, после чего начался период бурного развития оже-электронной спектроскопии.



Основной узел оже-спектрометра — энергоанализатор оже-электронов. Чаще всего используется электростатические анализаторы с продольными и поперечными энергетическими полями. В анализаторах первого типа направления электрического поля и движения электронов совпадают. К этому типу анализаторов относится многосеточный анализатор с тормозящим полем; в нем максимальная энергия электронов, попадающих на коллектор анализатора, определяется по задерживающему потенциалу на сетках 3.



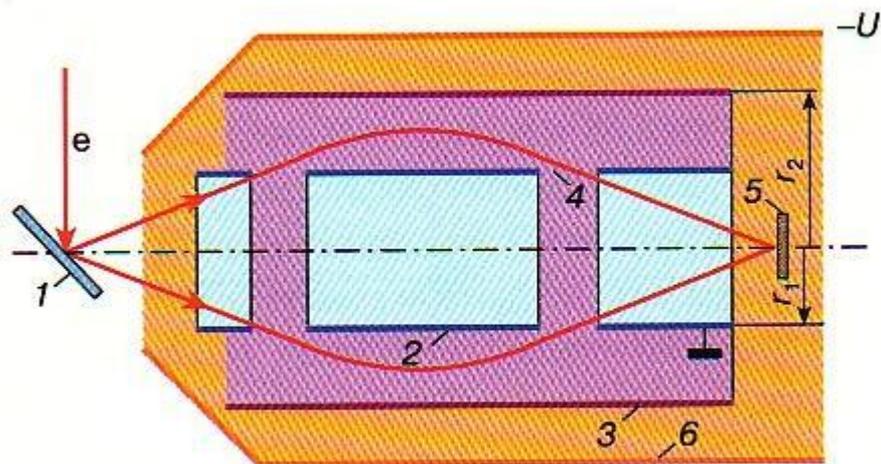
Четырехсеточный энергоанализатор оже-электронов с продольным тормозящим электрическим полем: 1 — источник первичных электронов; 2 — образец; 3 — электроды анализатора — сетки 4 — коллектор электронов — сферический электрод.



Энерго-анализаторы оже-электронов с поперечными электрическими полями: а – 127-градусный анализатор Юза – Рожанского; б, в – плоские, цилиндрические зеркала; г – сферический дефлектор.

В анализаторе второго типа (с дисперсией по энергии) электрон движется в поперечном электрическом поле по окружности, радиус которой зависит от его энергии. Выделив с помощью диафрагм траекторию определенного радиуса и регистрируя ток электронов, движущихся по этой траектории в зависимости от напряженности электрического поля (изменяя разность потенциалов между внешними и внутренними электродами 3 анализатора), измеряют распределение электронов по энергиям. Такие анализаторы обеспечивают чувствительность на два порядка выше по сравнению с многосеточным анализатором с тормозящим полем, однако последний позволяет сочетать методы оже-спектроскопии с дифракцией медленных электронов, что дает возможность наряду с элементарным составом приповерхностных слоев монокристаллических образцов получать сведения об их кристаллической структуре.

Для обнаружения оже-электронов необходимо уметь выделять электроны, находящиеся в очень узком интервале энергий. В оже-спектроскопии часто используют электростатические анализаторы типа "цилиндрическое зеркало". На рисунке приведено схематическое изображение такого анализатора, позволяющее понять принцип его действия.



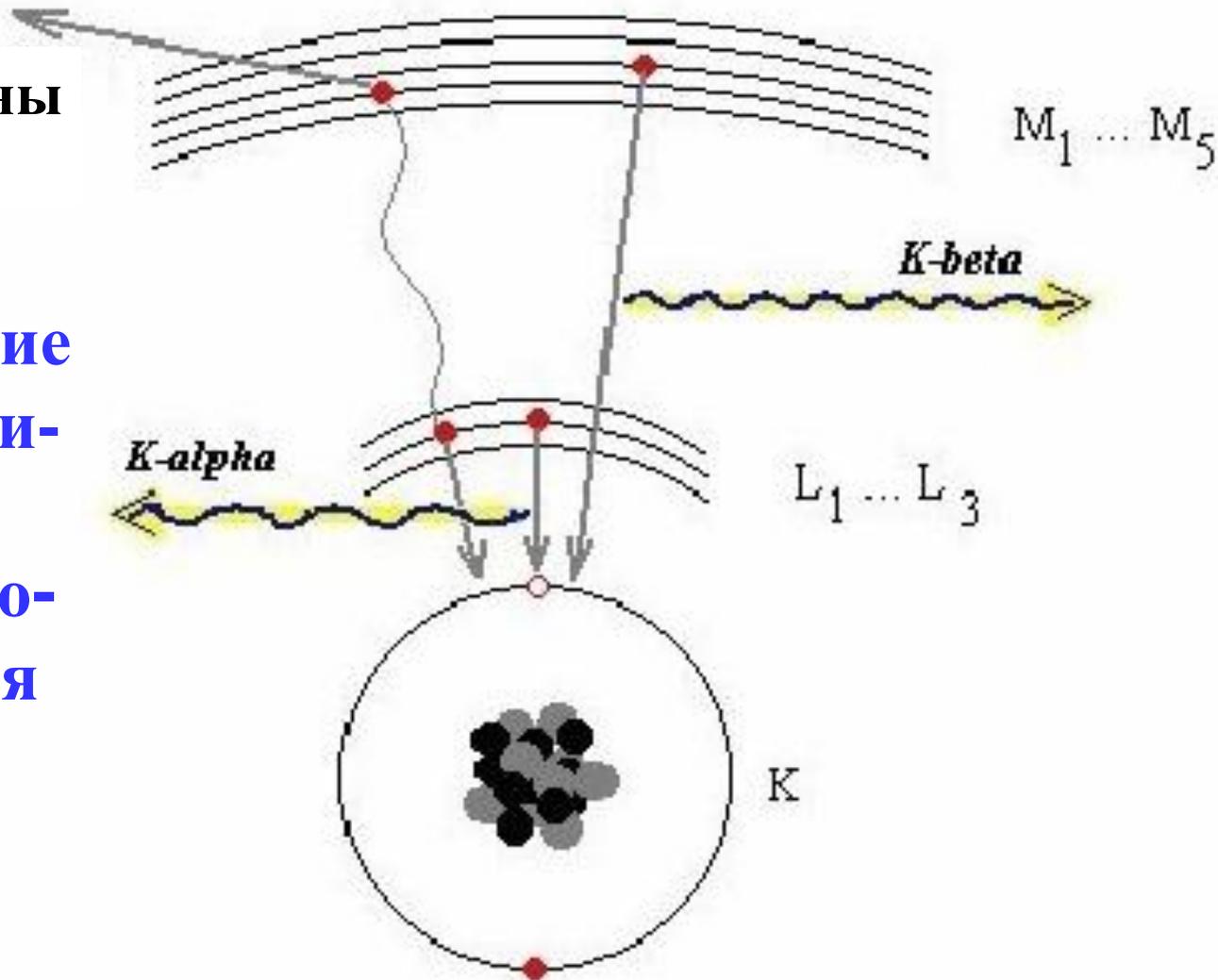
Схематическое изображение энергоанализатора типа "цилиндрическое зеркало": 1 – образец, 2 – внутренний цилиндр, 3 – внешний цилиндр, 4 – окна для входа и выхода электронов, 5 – коллектор, 6 – магнитный экран.

Рентгеноспектральный микроанализ

Под рентгеноспектральным микроанализом понимают определение элементного состава микрообъемов по возбуждаемому в них характеристическому рентгеновскому излучению.

Электроны
Оже

Формирование
характеристического
рентгеновского
излучения



Рентгеноспектральный микроанализ

Качественный анализ: закон Мозли

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = a \cdot Z + b$$

Количественный анализ:

$$C_{об} = Z \cdot A \cdot F \cdot \frac{I_{об}}{I_{эм}} C_{эм}$$

Z - поправка, зависящая от среднего атомного номера исследуемого образца и определяемая процессами отражения и поглощения электронов первичного пучка
A - поправка на поглощение излучения
F - поправка на флуоресценцию

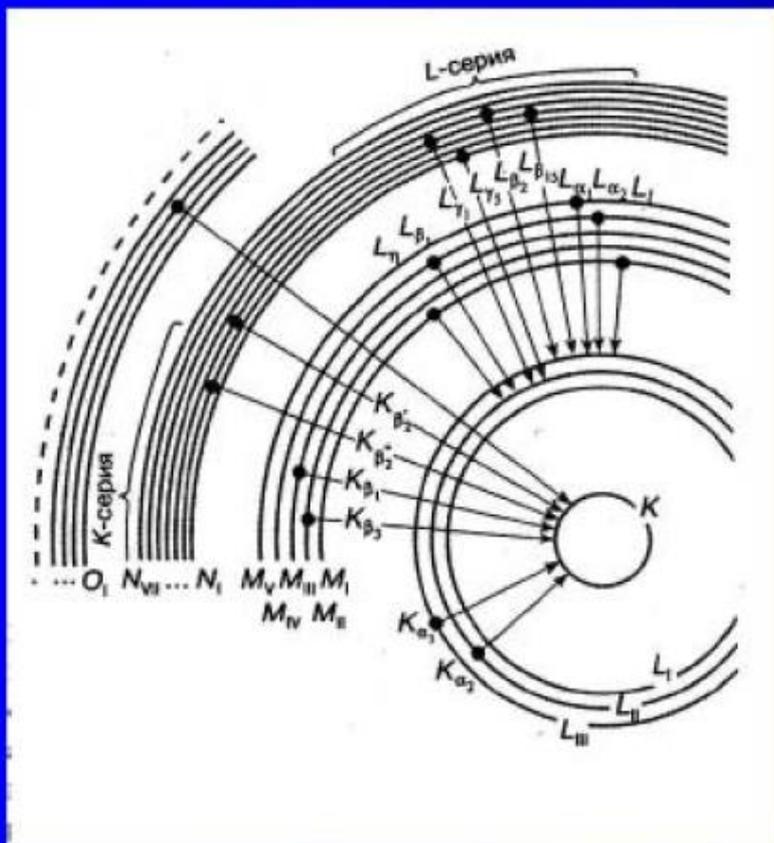
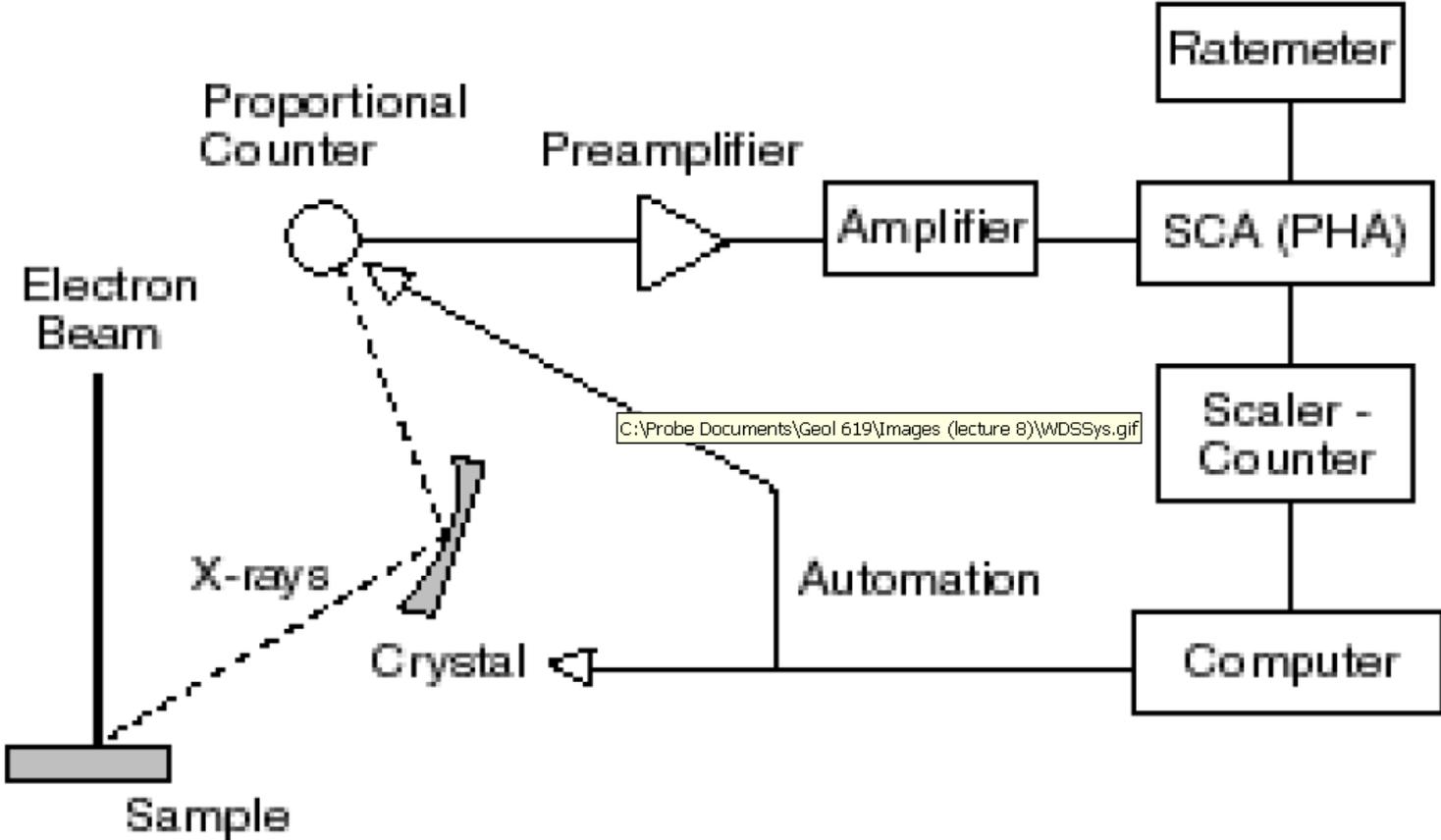
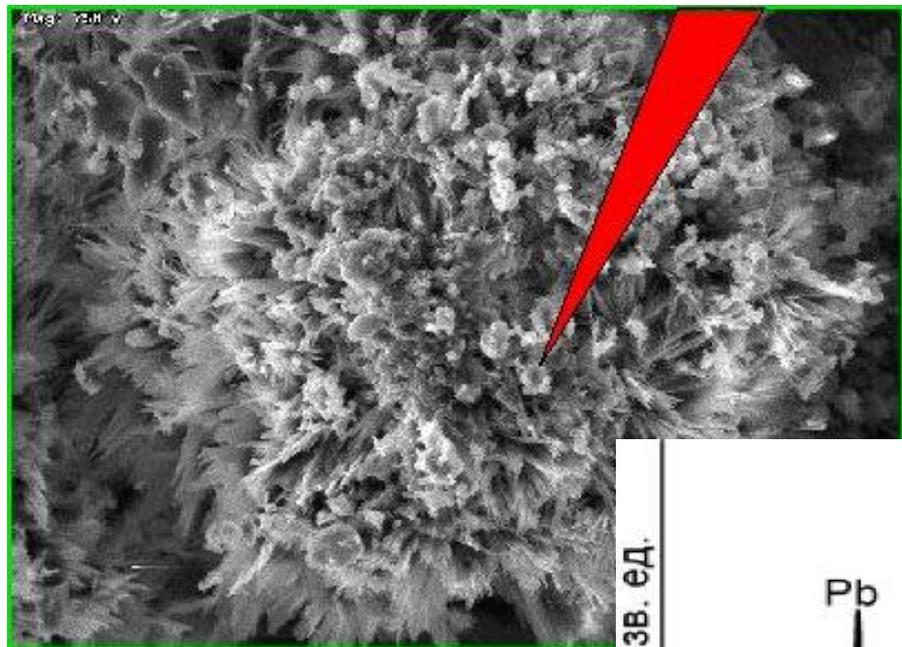


Схема анализа

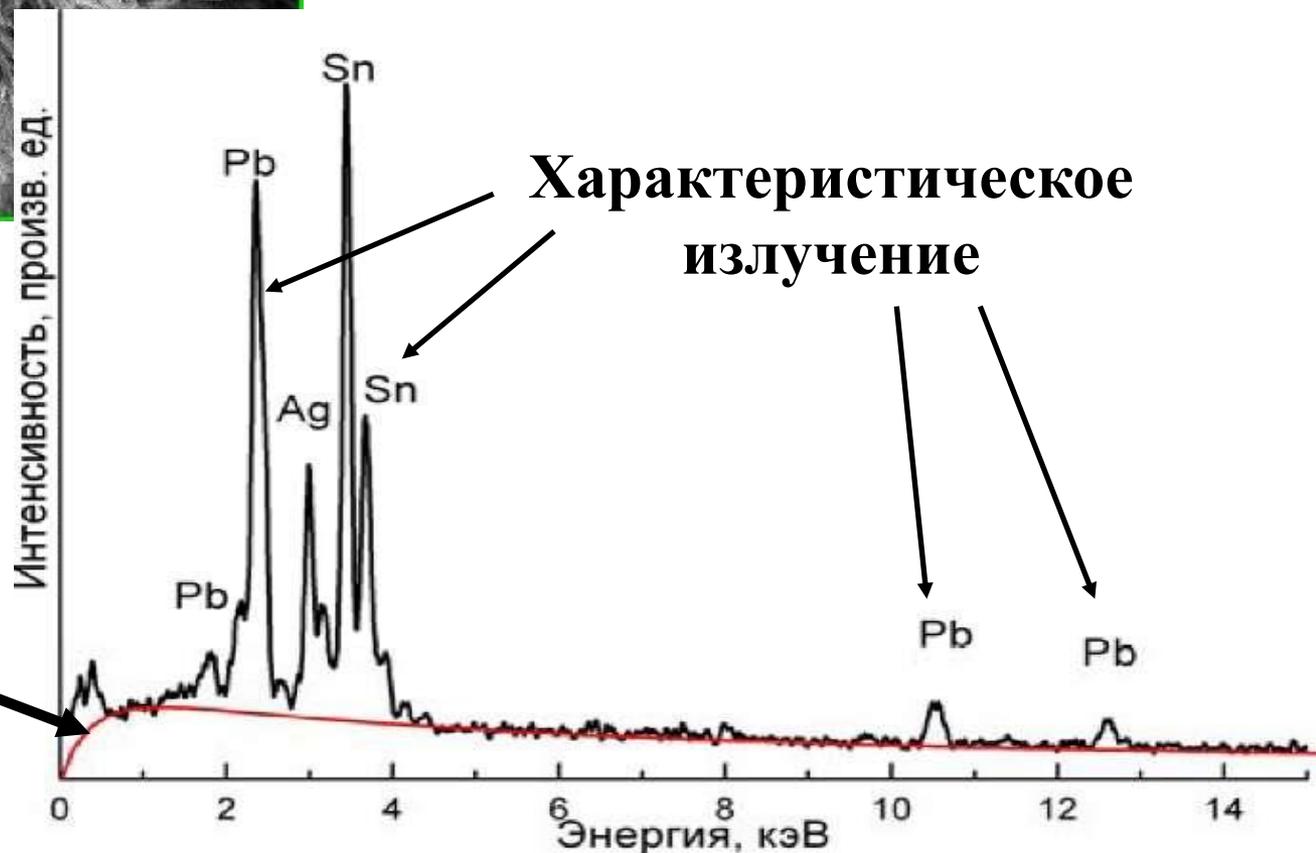


Волновой анализатор

Спектры рентгеновского излучения



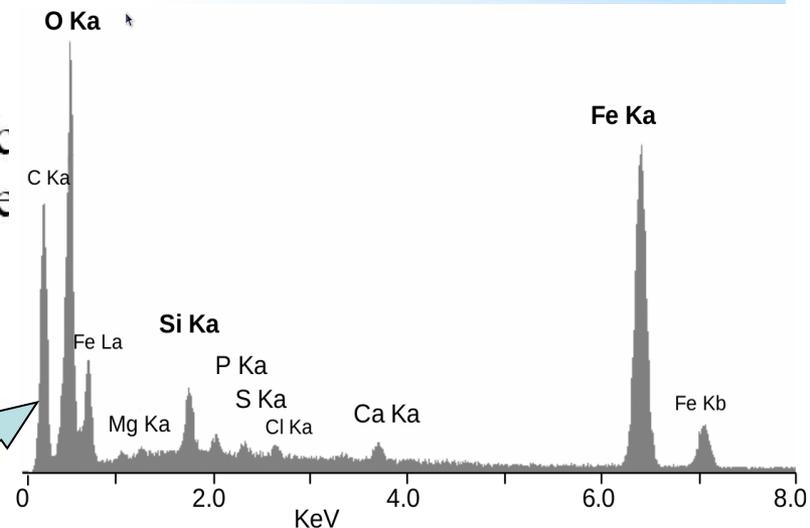
Тормозное излучение





X-ray Detector

Pulse Processor
 Measures the electronic signals to determine the energy of each X-ray detected



| | | |
|--------|----------------|--------|
| Mg | 1.26 +/- 0.05 | 1.47 |
| Al | 89.63 +/- 0.22 | 94.20 |
| Si | 0.26 +/- 0.05 | 0.27 |
| Mn | 0.96 +/- 0.07 | 0.50 |
| Fe | 0.47 +/- 0.07 | 0.24 |
| Ni | 1.44 +/- 0.09 | 0.69 |
| Cu | 3.25 +/- 0.13 | 1.45 |
| Zn | 2.73 +/- 0.14 | 1.18 |
| Totals | 100.00 | 100.00 |

Analyzer
 Displays and interprets the X-ray data