



# Оже спектроскопия

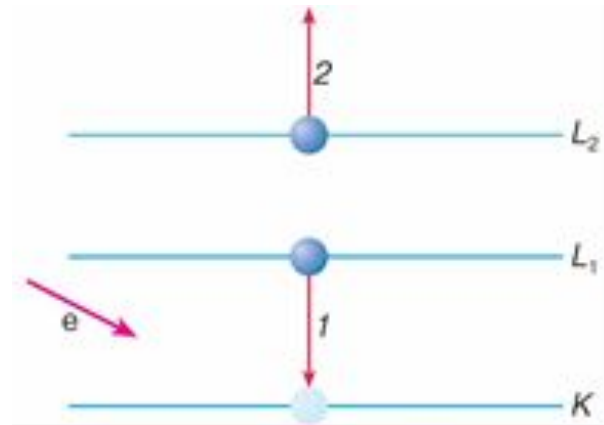
Горохова Е.О. МН-15

---

# Что такое оже спектроскопия

- Это метод электронной спектроскопии, основанный на анализе распределения по энергии электронов возникших в результате Оже-эффекта.
- Оже-эффект – это явление, в ходе которого происходит заполнение электроном вакансии, образованной на одной из внутренних электронных оболочек атома

Фрагмент электронной структуры атома, в состав которого входят три электронных уровня, частично или полностью занятые электронами ( $K, L_1, L_2$ )



# Через последовательность уравнений

- Измерив энергию такого электрона, можно определить, какому элементу периодической таблицы Менделеева соответствуют обстреливаемые электронным пучком атомы.
- Если обозначить оже-процесс обычным образом через последовательность уровней, принимающих в нем участие,  $KL_1L_2$ , то в первом приближении энергия оже-электронов  $E(KL_1L_2)$  определяется формулой
- $E(KL_1L_2) = E(K) - E(L_1) - E(L_2)$ ,
- где  $E(K)$ ,  $E(L_1)$  и  $E(L_2)$  – энергии связи электронов на уровнях  $K$ ,  $L_1$ ,  $L_2$ .

# Более строгий подход

- При более строгом подходе для энергии оже-электронов вводят поправку  $\Delta E$ , связанную с тем, что после оже-процесса в атоме образуются две дырки.
- Существуют различные способы определения  $\Delta E$ . Самый простой - способ, при котором наличие дырок учитывается привлечением данных для соседнего элемента с более высоким атомным номером. Тогда в общем случае для любого оже-процесса ABC, происходящего в атоме с порядковым номером  $Z$ , можно записать
- $E^Z(ABC) = E(A)^Z - E(B)^Z - E(C)^{Z+1}$ ,  
где через A, B и C по-прежнему обозначены уровни, участвующие в процессе.

- В твердых телах наличие двух дырок приводит к перераспределению зарядов и возникающая при этом поляризация увеличивает энергию эмитируемых электронов по сравнению со свободными атомами. Этот сдвиг в некоторых случаях может достигать 10-20 эВ.

# Глубина выхода оже-электронов

- Главное преимущество ОЭС - очень малая глубина анализа -> методика пригодной для исследования поверхности
- Глубина анализа определяется длиной свободного пробега электронов в твердом теле в смысле неупругих взаимодействий

# Глубина выхода оже-электронов

- Если зародившийся в твердом теле оже-электрон при движении к поверхности испытает хоть одно неупругое взаимодействие, то он потеряет часть энергии и не будет зарегистрирован в интересующем нас месте энергетического спектра вторичных электронов, который формируется при бомбардировке твердого тела ускоренными электронами



# Глубина выхода оже- электронов

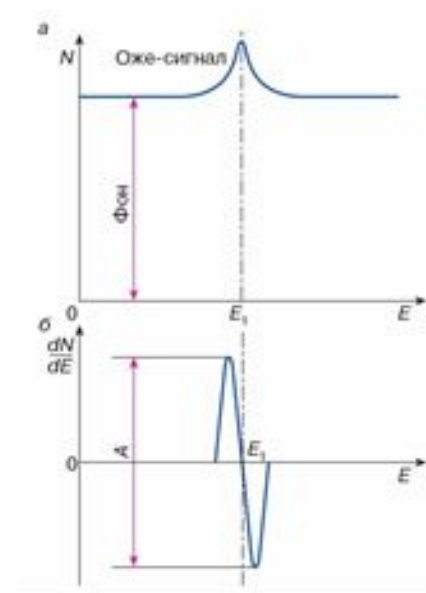
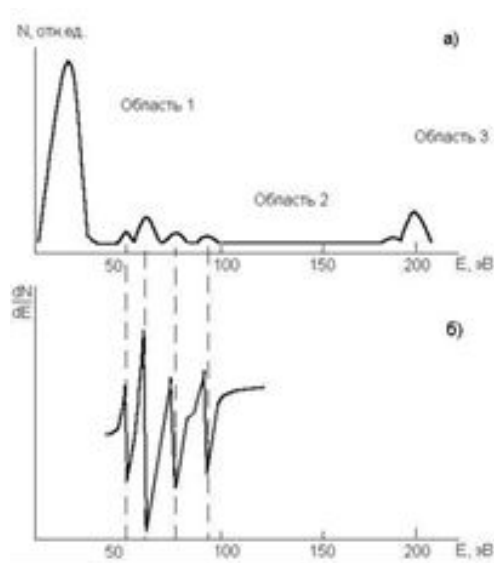
- Оже-электроны, рожденные на глубине большей, чем длина свободного пробега, не будут нести информацию о нахождении атомов данного сорта
- Длина свободного пробега зависит от скорости движения и от энергии электронов

# Реализация метода

- ЭОС широко используется для определения элементного состава газов и поверхности твердых тел, для изучения электронного строения и химического состояния атомов в пробе.
- 1. Регистрация оже-электронов
- 2. Получение энергетического спектра

# Регистрация оже-электронов

- Типичное распределение вторичных электронов по энергии  $N(E)$ , наблюдаемое при бомбардировке поверхности мишени первичными электронами с энергией  $E_0$ , можно условно разбить на три области



# Регистрация оже-электронов

- ▣ Область 1 соответствует истинно-вторичным электронам (~90% от числа всех электронов) и характеризуется наличием большого пика с полушириной около 10эВ.
- ▣ Область 2 представляют неупруго-рассеянные первичные электроны, которые потеряли часть своей энергии в процессе многократных соударений и поэтому распределены в довольно широкой энергетической полосе.
- ▣ Область 3 содержит пик с энергией, равной  $E_0$ . Этот пик соответствует упруго-отраженным от мишени электронам, количество которых невелико (~3% от общего числа вторичных электронов).

# Регистрация оже-электронов

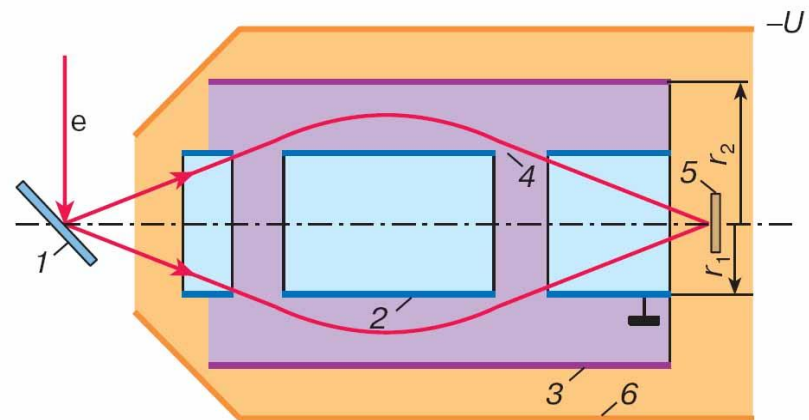
- Вторичные электроны образуются в процессе электронной бомбардировки из электронных оболочек атомов мишени.
- Оже-электроны на кривой  $N(E)-f(E)$  расположены на большом фоне вторичных электронов в виде небольших пиков и при фиксированных значениях энергии

# Регистрация оже-электронов

- Харрис предложил продифференцировать спектр  $N(E)$ , то есть превратить его в  $\frac{dN(E)}{dE}$ , в результате чего фон практически исчезает, а на месте слабого оже-сигнала колоколообразной формы появляется интенсивный двухполярный пик с амплитудой  $A$ , который легко может быть зарегистрирован

# Получение энергетического спектра

- Для обнаружения оже-электронов необходимо уметь выделять электроны, находящиеся в очень узком интервале энергий. Для этого используют энергоанализаторы. В ОС используют анализаторы типа «цилиндрическое зеркало».



# Получение энергетического спектра

- Основные элементы: два металлических коаксиальных цилиндра 2 и 3 с радиусами  $r_1$  и  $r_2$
- Внутренний цилиндр обычно заземляют, а на внешний подается отрицательный потенциал. Между цилиндрами образуется анализирующее поле.
- Вторичные электроны попадают в это поле и при своем движении отклоняются к оси цилиндра. При некотором значении потенциала  $U$  на внешнем цилиндре только электроны с энергией  $E$  проходят в выходные окна 4 во внутреннем цилиндре и попадают на коллектор 5.



# Получение энергетического спектра

- Изменение потенциала  $U$   $\rightarrow$  на коллекторе будут собираться электроны с другим значением энергии
- Если осуществить медленную развертку напряжения между цилиндрами, то будет записан непрерывный спектр вторичных электронов.
- легкие электроны сильно отклоняются даже в слабых магнитных полях. Для защиты от них используется специальный магнитный экран 6.

# Количественная оптическая спектроскопия

- Основная задача - определение концентраций атомов, входящих в состав многокомпонентных образцов
- Идея одного из методов вычисления концентрации заключается в следующем. Атомная концентрация какого-либо сорта атомов  $N_i$  в многокомпонентном образце, содержащем  $n$  сортов атомов, может быть выражена следующим образом: 
$$N_i = \frac{a \cdot I_i}{S_i}$$

# Количественная оже- спектроскопия

- $a$  – некоторая константа,  $I_i$  – соответствующий ток оже-электронов, а  $S_i$  – фактор элементной чувствительности
- для полной концентрации  $N$  всех атомов, входящих в состав образца, можно записать:

$$N = \sum_{i=1}^n \frac{a \cdot I_i}{S_i}$$

- относительная атомная концентрация  $C_x$ :

$$C_x = \frac{N_x}{N} = \frac{I_x}{C_x} / \sum_{i=1}^n \frac{I_i}{S_i}$$

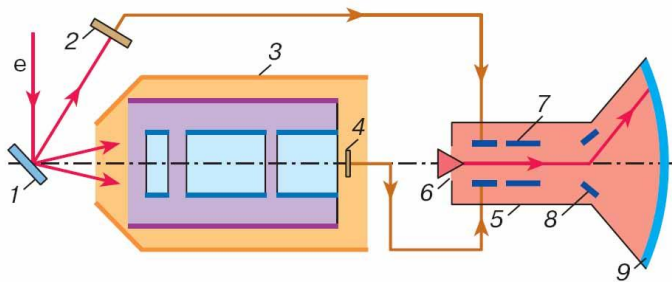
# Растровая ОЭС

- Выпускаются сейчас сканирующие оже-спектрометры, в которых два прибора объединены вместе
- Основа – сканирующий (растровый) электронный микроскоп (РЭМ) (электронный пучок малого диаметра, передвигается в двух перпендикулярных направлениях, засвечивая определенный участок поверхности)
- в каждый момент времени вторичные электроны несут информацию с участка, определяемого размерами электронного пучка

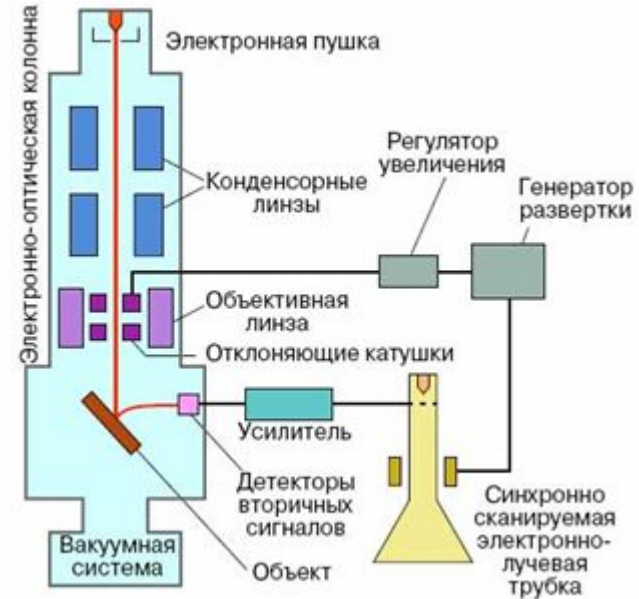
# Растровая ОЭС

- Визуализация картины осуществляется с помощью электронно-лучевой трубки, в которой синхронно с электронным зондом движется свой электронный пучок
- Получается картина, отражающая эмиссионные свойства объекта

# Растровая ОЭС



1 – образец, 2 – коллектор для сбора вторичных электронов, 3 – энергоанализатор электронов, 4 – детектор энергоанализатора, 5 – электронно-лучевая трубка, 6 – катод электронной пушки, 7 – модулятор электронной пушки, 8 – отклоняющие пластины электронно-лучевой трубки, служащие для получения раstra, 9 – экран электронно-лучевой трубки.



блок-схема



Спектрометры типа ЭСО-3УМ и  
ЭСО-5УМ

# Общие технические характеристики спектрометров:

- - возможность регистрации всех элементов с атомными номерами, большими, чем у гелия;
- - высокая чувствительность для лёгких элементов ( $Z < 11$ );
- - возможность получения изображения во вторичных и поглощённых электронах;
- - возможность измерения профиля распределения элементов и его анализ;
- - энергетическое разрешение 0,3%;
- - рабочий вакуум  $2 \cdot 10^{-7}$ - $3 \cdot 10^{-8}$  Па;
- - рабочий газ для ионных пушек - аргон;
- - максимальный размер раstra во вторичных электронах 3 x 3 мм.



# Применение ЭОС

- изучение процессов адсорбции и десорбции на поверхностях твердых тел, коррозии, явлений, происходящих при поверхностном гетерогенном катализе
- контроль за чистотой поверхности в различных технологических процессах
- в микроэлектронике, в том числе для выявления причин отказа различных элементов микросхем