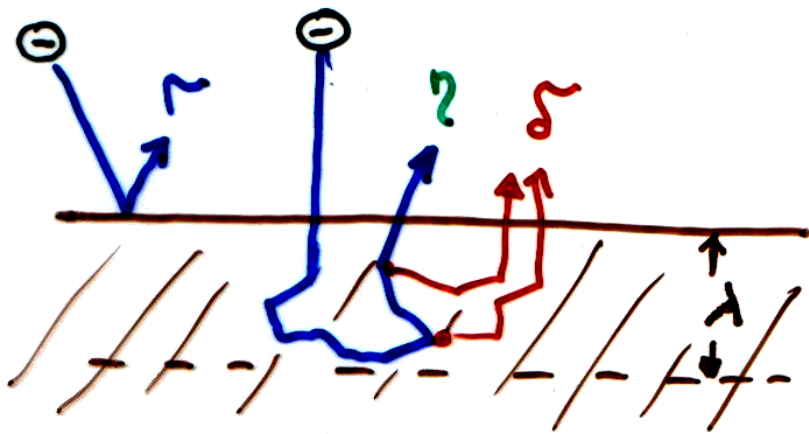


Вторичная эмиссия

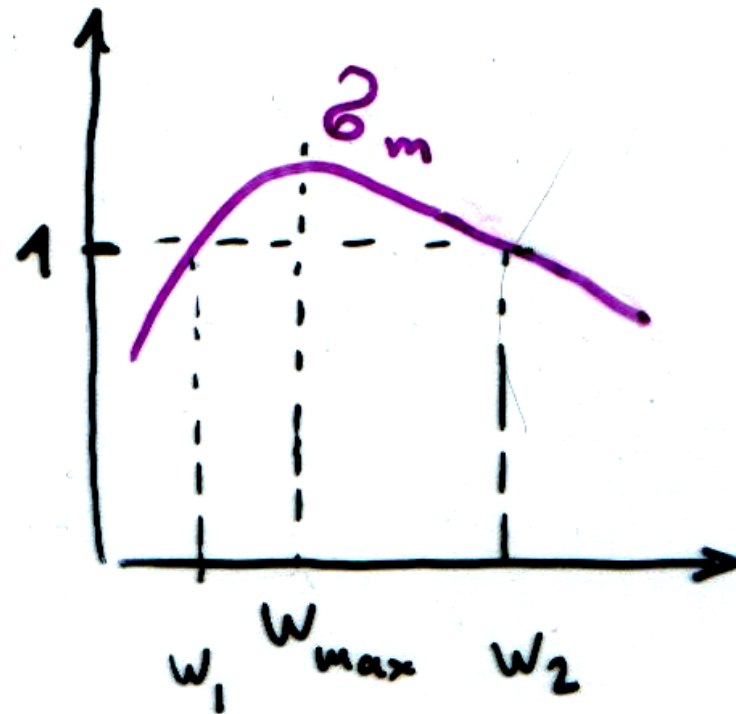
- Электрон-электронная
- Ион-электронная
- Фото-электронная

Электрон-электронная эмиссия



λ - эффективная глубина проникновения
(максимум возбуждения - в глубине)

$$\sigma = \underbrace{\sigma_1}_{\text{упруго отражение}} + \underbrace{\sigma_2}_{\text{неупруго отражение}} + \underbrace{\sigma_3}_{\text{истинно-вторичные}} = \frac{I_{\text{от}}}{I_{\text{е}}}$$



Интегральный коэффициент ВЭЭЭ

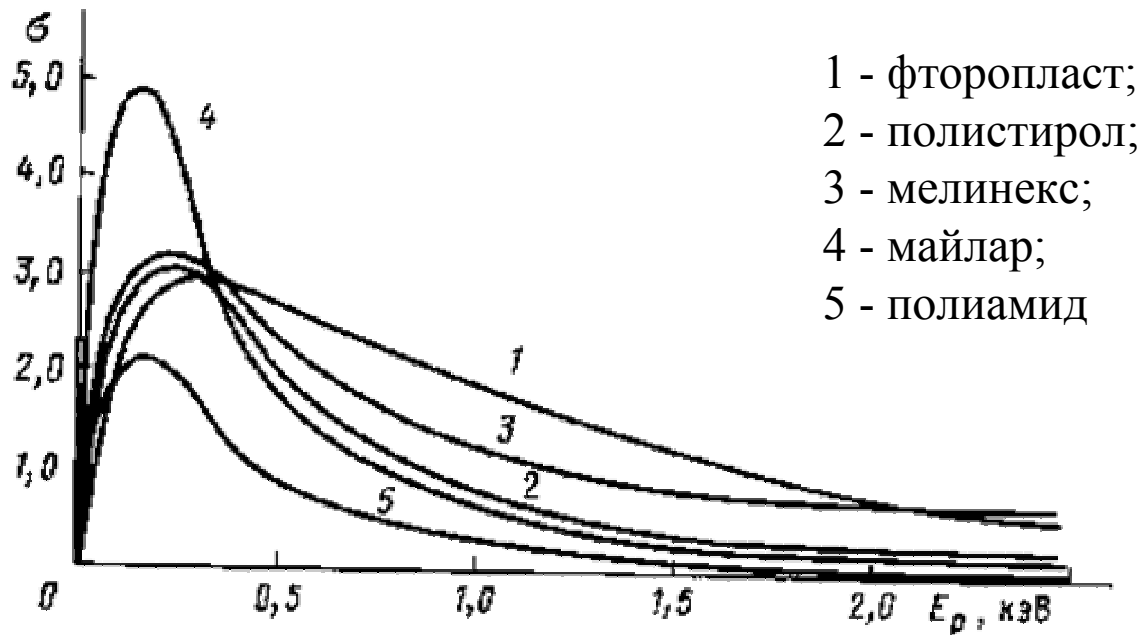
Металлы: $\sigma = 0,5 - 1,8$ при $0,2-0,9$ кэВ

Полупроводники: $\sigma = 1 - 1,5$ при $0,3-0,8$ кэВ

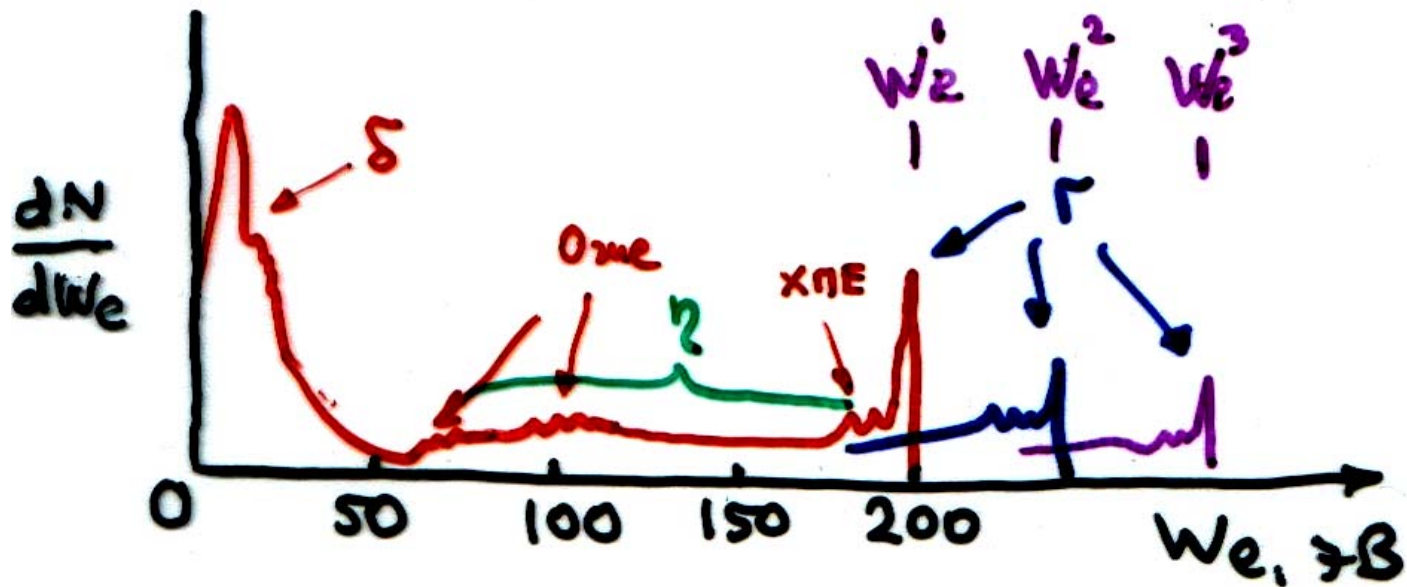
У эффективных эмиттеров $\sigma = 10 - 35$

Диэлектрики: NaCl, CsI, MgO, CaO, SrO $\sigma = 10-20$ при $0,6-2,5$ кэВ

ОБЫЧНО макс. $\sigma = 2-5$ при $0,2-0,5$ кэВ (на. рисунке)



Энергоспектр вторичных электронов



Отраженные электроны ($W > 50$ эВ):

γ – упруго-отраженные (поверхностный пик)

η - неупруго-отраженные (диффузные)

Истинно-вторичные электроны ($W \leq 50$ эВ)

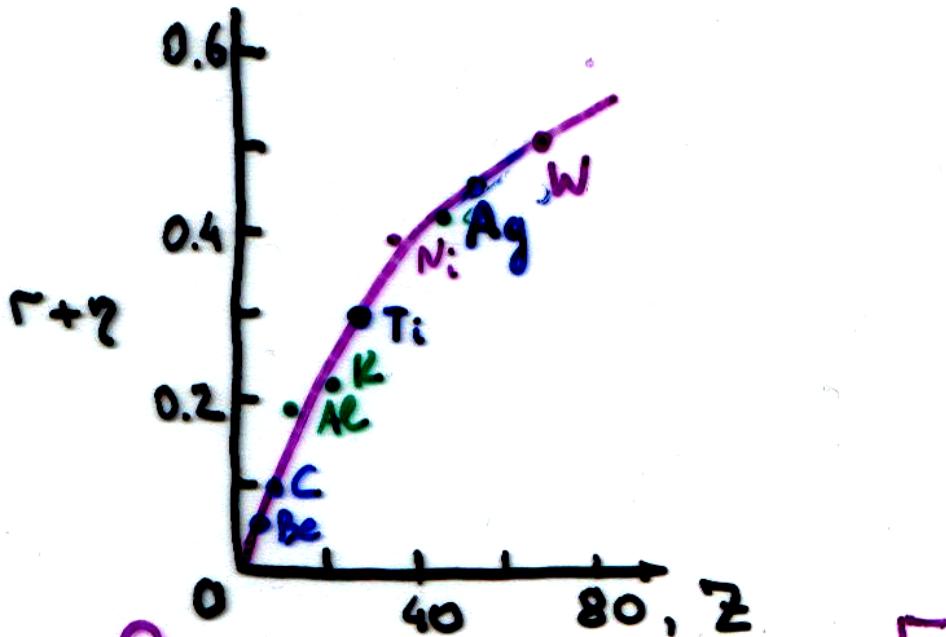
Наиболее вероятная энергия: 2-5 эВ (пик)

Средняя энергия истинно-вторичных: ~ 10 эВ

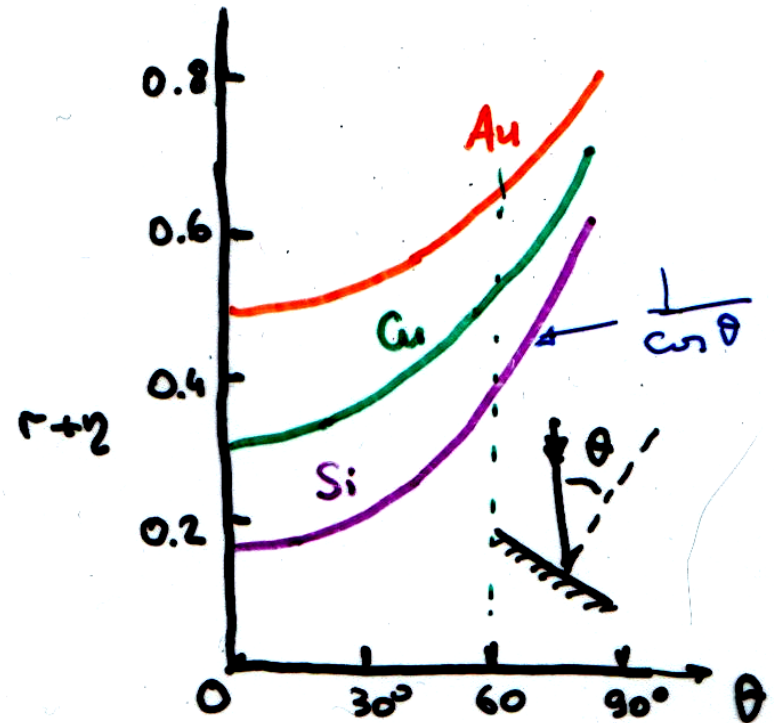
Зависимость

от материала мишени

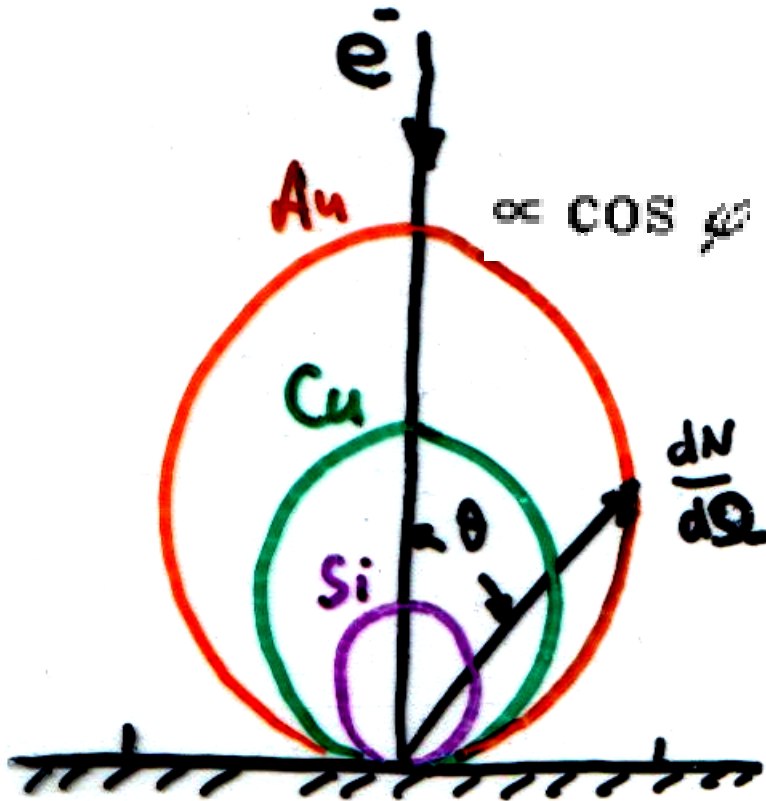
и угла падения



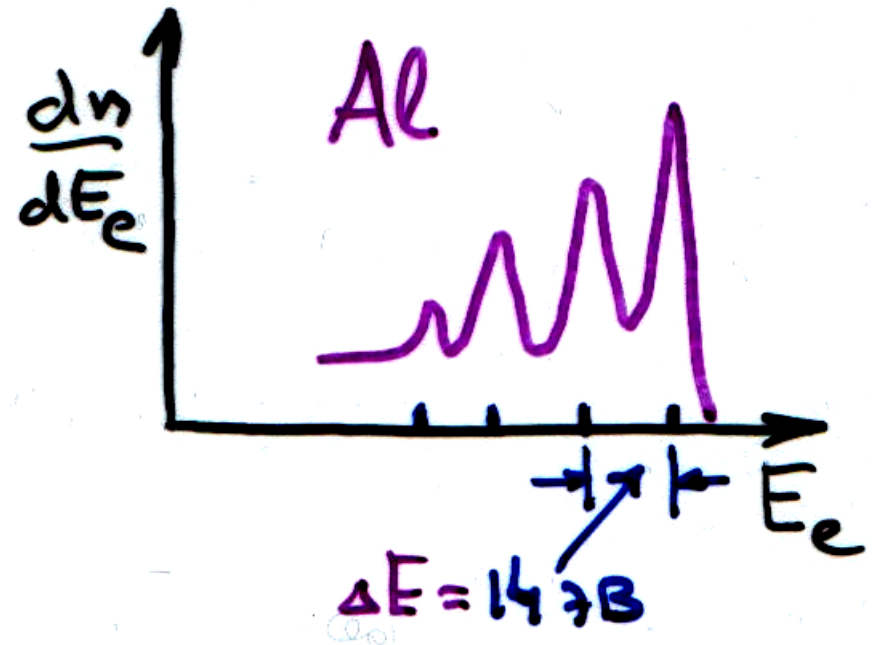
СЛАБО ЗАВИСИТ ОТ E
 (при $Z \uparrow$ $\Gamma + \eta$ возрастает
 при увеличении энергии
 в диапазоне 200 - 10 кэВ)



Отраженные электроны



Угловое распределение
отраженных электронов
(нормальное падение)



Характеристические
потери энергии

$$\Delta E = h \omega_p \quad \omega_p^2 = \frac{4\pi n e^2}{m}$$

Спектроскопия характеристических потерь энергии электронов (СХПЭЭ)

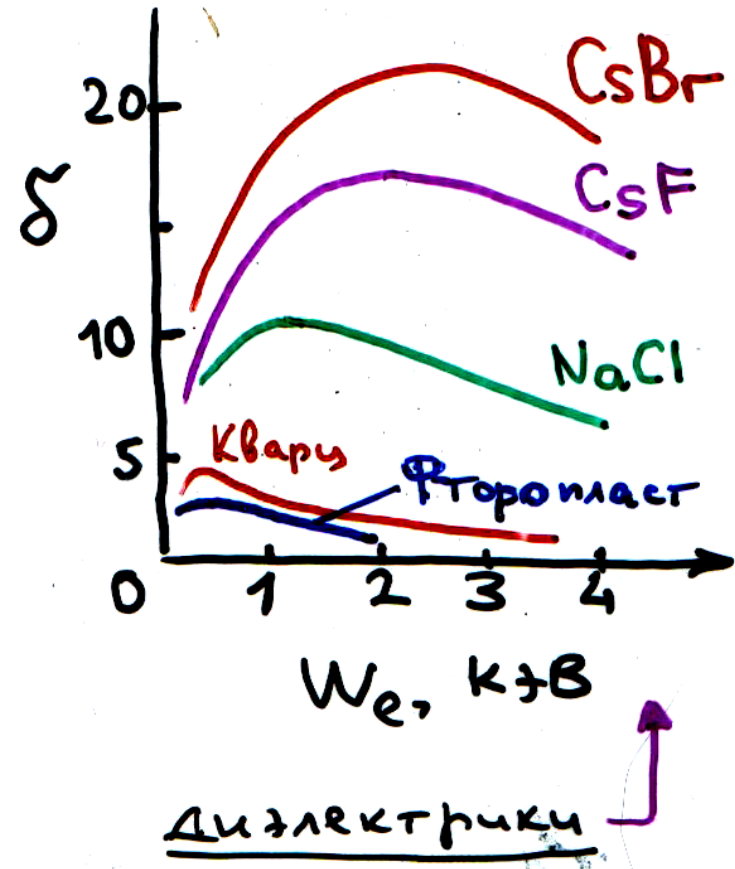
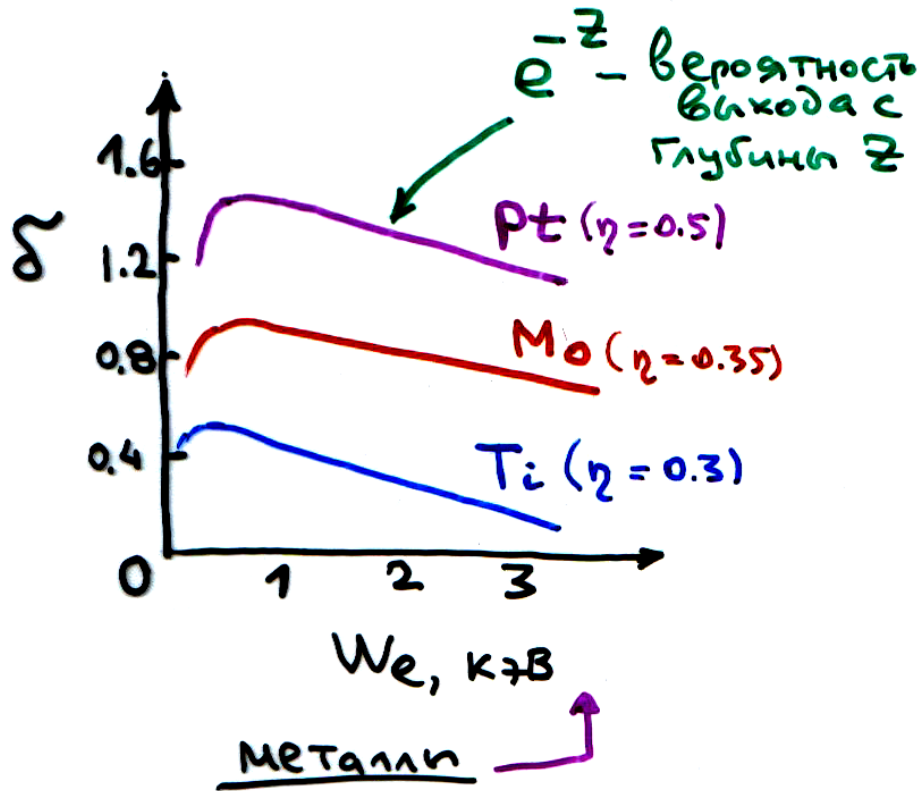


Типы характеристических потерь энергии при отражении электронов

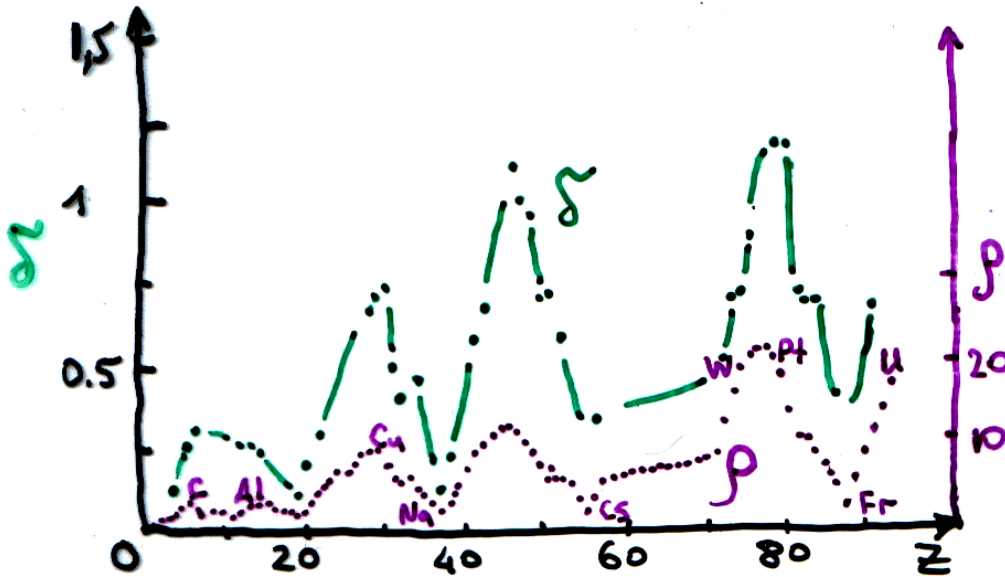
Малые потери < 20 эВ ($\Delta E \sim 1$ мэВ) – Видны атомы адсорбата!

100...500 эВ - электронная структура внутренних уровней

Зависимость коэффициента «истинно-вторичной» эмиссии от энергии падающего электрона



Истинно-вторичные электроны



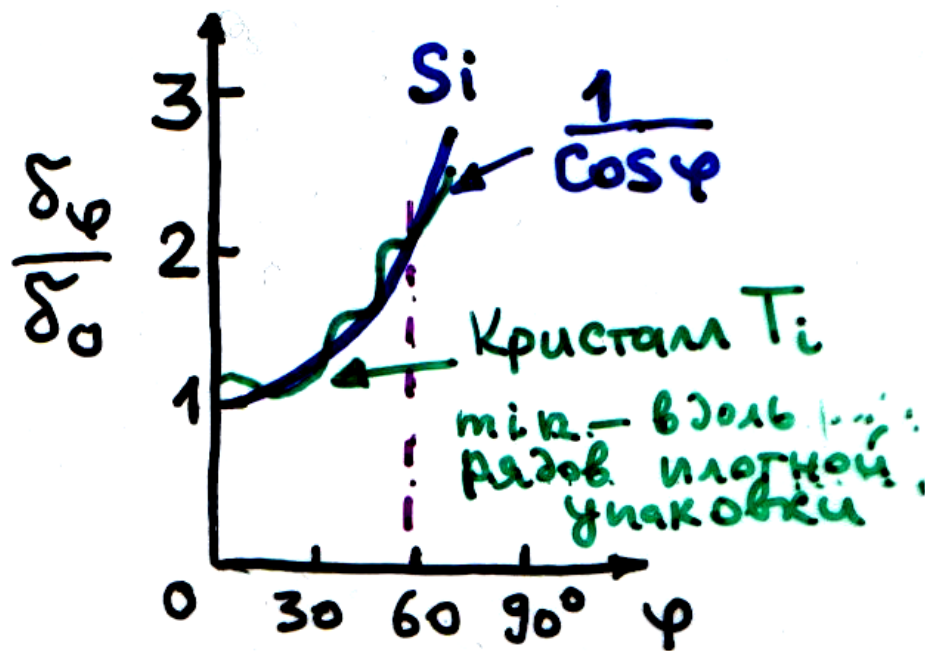
Корреляция ρ и δ

	Cs^{133}	W^{184}	Te^{204}
$\varphi_{\text{эВ}}$	1.8	4.5	4.7
$\frac{\text{Вал}}{\rho}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{2}{20}$	$\frac{3}{12}$
σ_m	0.72	1.35	1.7
W_m	400	650	650

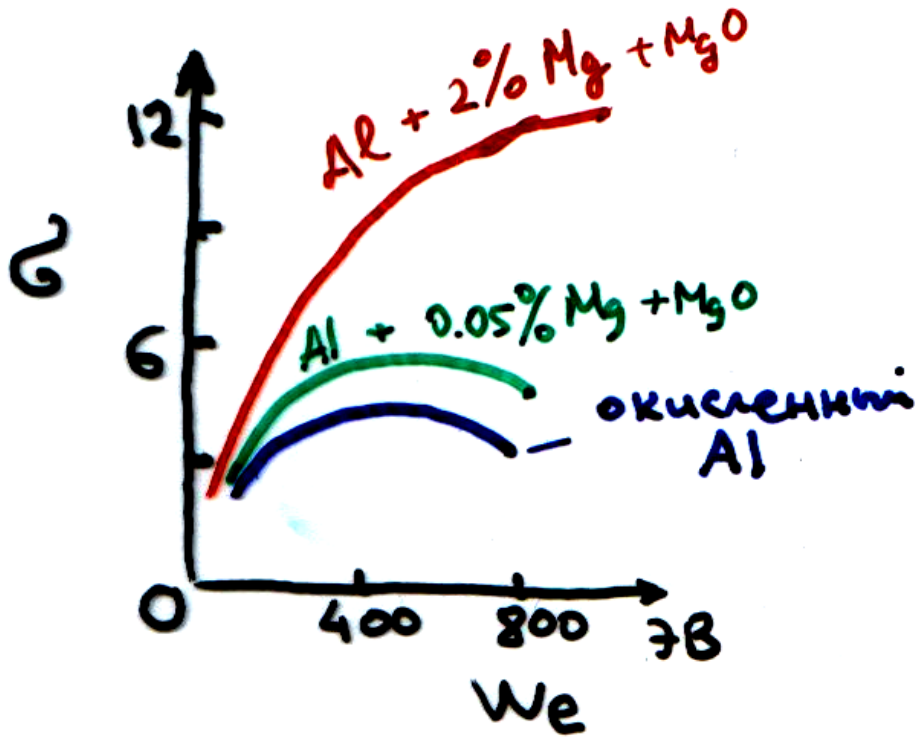
Влияние работы выхода и плотности электронов в зоне проводимости

Зависимость от угла падения

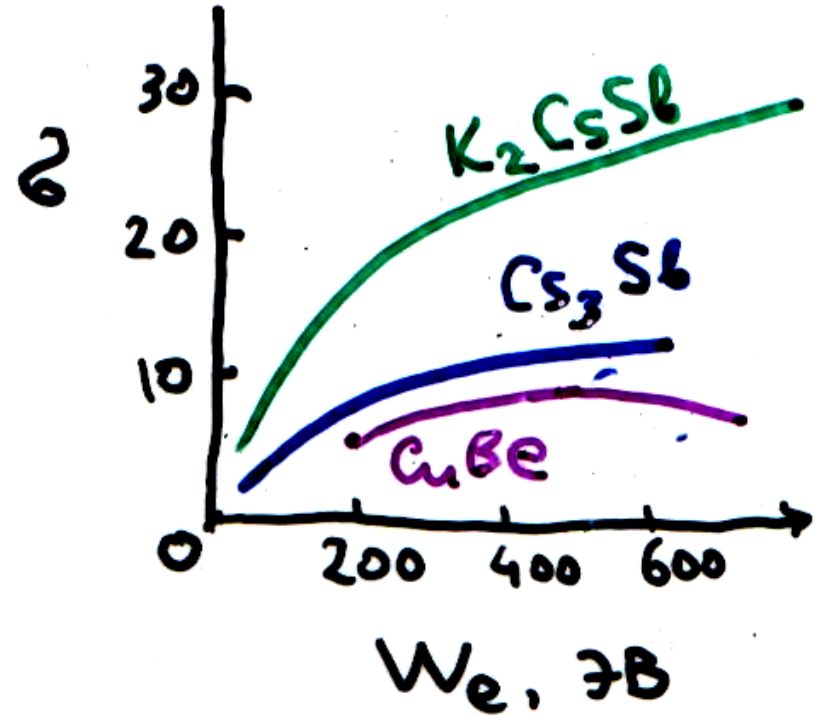
(Истинно-вторичные электроны)



Материалы для эмиттеров вторичных электронов

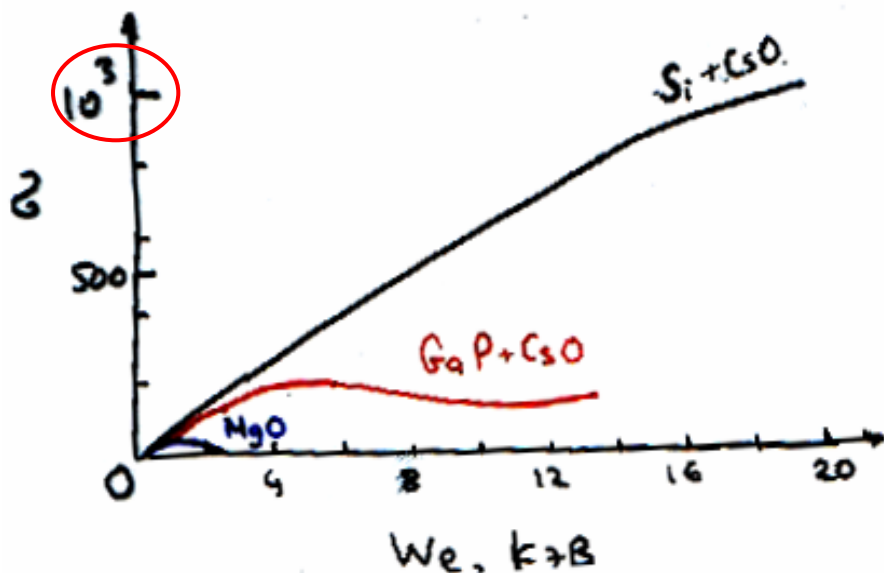


Алюминиево-магниевые сплавы
с окисной пленкой



Сурьмяно-цезиевый,
Медно-бериллиевый
Двухщелочной
эмиттеры

Аномально высокие коэффициенты вторичной эмиссии



Эмиттер	σ_m
$CsNa_2KSb$	39
Cs_3Sb	10
$Cu-Be$	6—8
$Ag-Mg$	12
$GaP(100)$ (монокристалл) — CsO	500
GaP (поликристалл) — CsO	200
$GaAs(100)$ — CsO	540
$Si(100)$ — CsO	950
$GaAs_{0,5}P_{0,5}(100)$ — CsO	110
$CsCl$	20
CsI	20—35
CaF_2	5
MgO	20

Эмиттеры вторичных электронов

ФЭУ, ВЭУ

CuAlBe+BeO

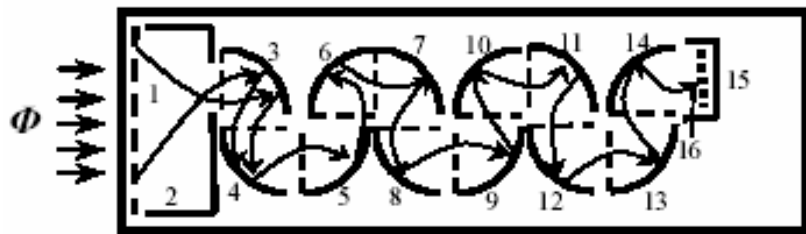
$$\sigma_{50} = 2.3$$

$$\sigma_{100} = 4.5$$

CuAlMg+MgO

$$\sigma_{50} = 2.4$$

$$\sigma_{100} = 4.0$$



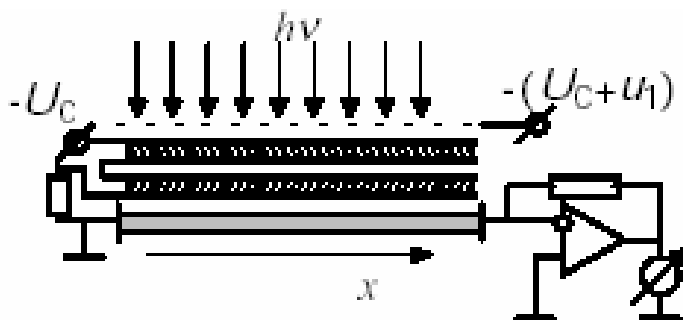
$$K = \sigma^n$$

$$K = 10^5 - 10^8$$

КЭУ – восстановленное свинцовое стекло $\sigma = 3$

МКП – капилляры с диаметром $\sim 10-20$ мкм и длиной ~ 2 мм
 ($10^5/\text{см}^2, < 15^\circ$), усиление $K \sim 10^4$

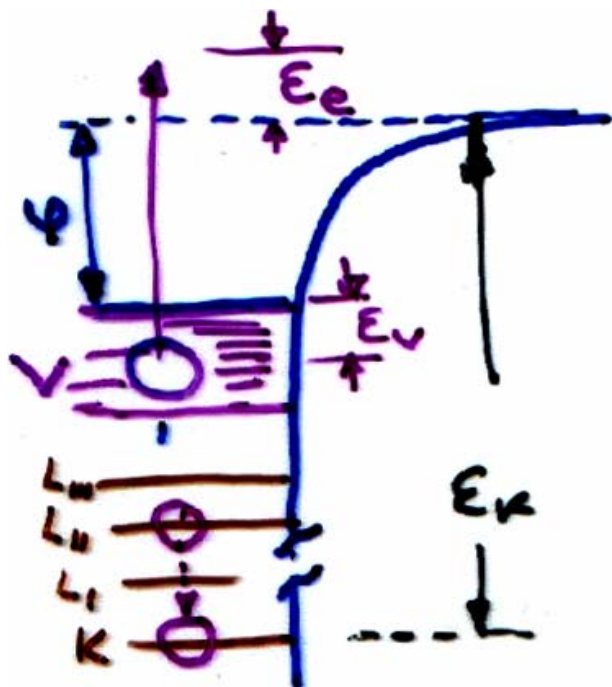
Позиционно-чувствительный детектор !



Шевронная схема: $K \sim 10^7$

Оже-электронная эмиссия

1925, Auger

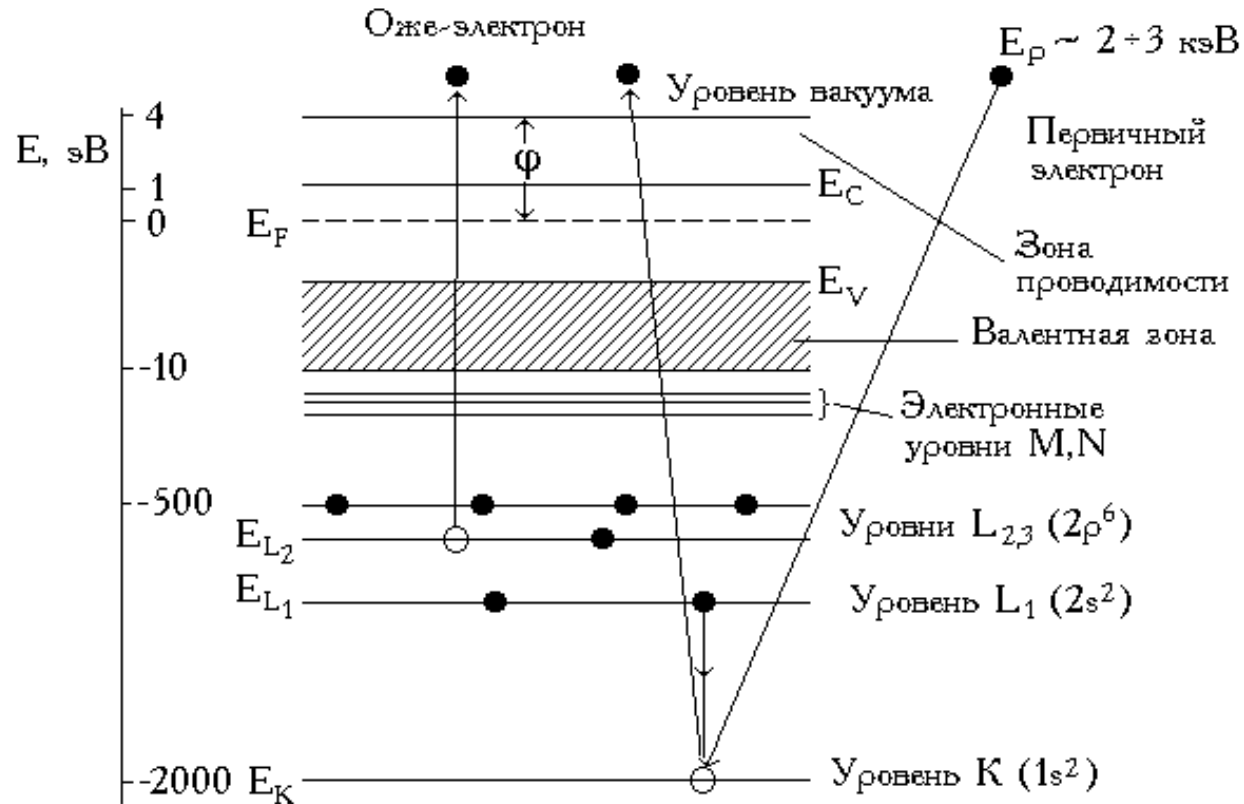


1. Первичный электрон создает вакансию на внутренней оболочке ($K_1 \dots$)
2. За $10^{-14} - 10^{-16}$ с вакансия в K оболочке заполняется электроном из внешней ($L_{||}$) оболочки
3. Избыток энергии ($\epsilon_K - \epsilon_{L_{||}}$):
 - ✓ Испускание фотона (вероятность $\sim z^4$)
 - ✓ Выбивание электрона из внешней (валентной) оболочки (вероятность для легких элементов $\sim 95\%$, для $z > 70$ – 10%)

Эмиттируется электрон с энергией

$$E_e = (E_K - E_{L_{||}}) - (E_v + \phi)$$

Оже-электронная эмиссия

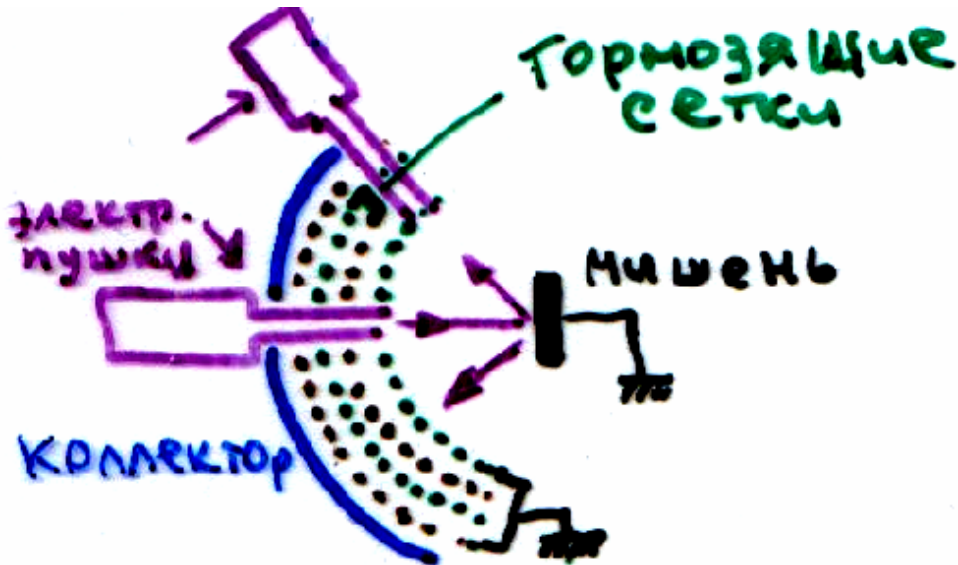


Эмиссия с внутреннего уровня L

Энергия Оже-электрона: $E_A = E_K - E_{L1} - E_{L2} - U(L_1, L_2)$

эмпирическое соотношение $U(L_1, L_2) = \frac{1}{2} (E_{L2}^{Z+1} - E_{L2}^Z + E_{L1}^{Z+1} - E_{L1}^Z)$

Оже-электронная спектроскопия



Спектрометр с задерживающим

потенциалом

$$i_{\text{пад}} = 1 \div 200 \text{ мкА}$$

$$i_{\text{оже}} = 10^{-14} \div 10^{-10} \text{ А}$$

$$i_k(U_T) = e \int_{eU_T}^{E_{\text{max}}} \frac{dN(E)}{dE} dE$$

Модуляция $\Delta U_T = k \sin \omega t$

2-я производная i_k –

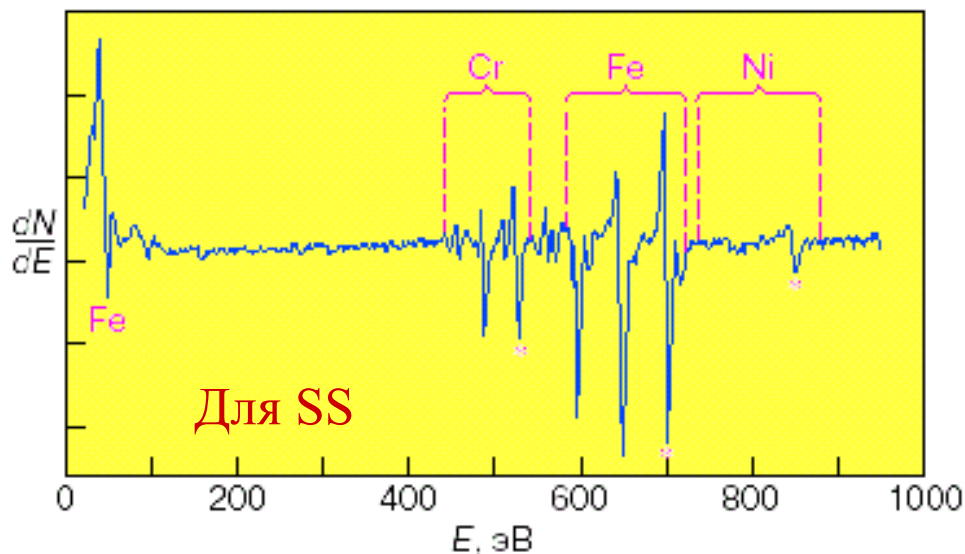
Синхронное детектирование

с усилением 2-й гармоники (2ω)

Оптимальные углы:

- падения пучка – 75°
- наблюдения – 0°

Спектры Оже-электронной эмиссии



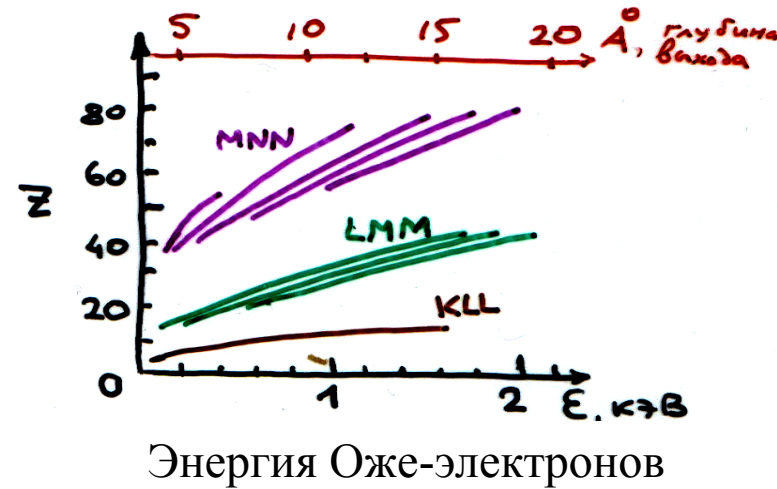
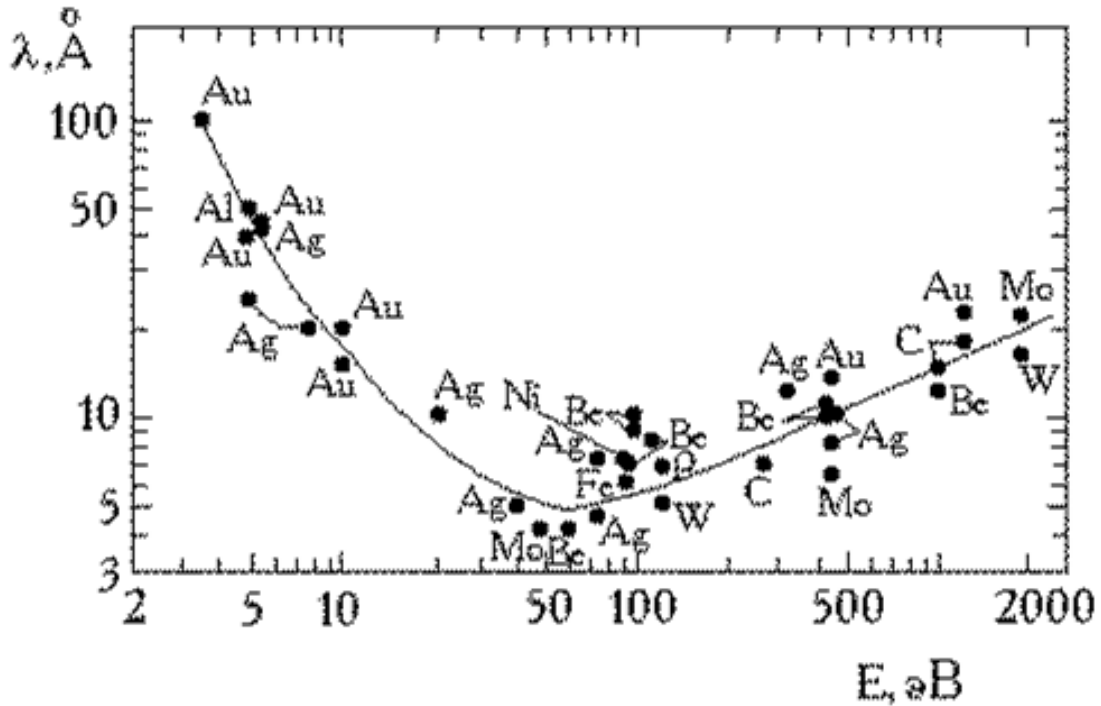
Оже-спектр нерж. стали

Элемент	${}^6\text{C}$	${}^8\text{O}$	${}^9\text{F}$	${}^{12}\text{Mg}$	${}^{17}\text{Cl}$	${}^{19}\text{K}$	${}^{47}\text{Ag}$	${}^{74}\text{W}$
энергия основного пика эВ	272	503	647	1180	181	252	351	1736
относительная оже-чувствительность $i_{\text{оже}}/i_{\text{пер}}^{\text{эВ}}$	0.2	0.5	0.48	0.11	1	0.8	①	0.8
переход	KLL	KLL	KLL	KLL	LMM	LMM	MNN	MNN

$W_{\text{пер}} = 3 \text{ кэВ}$

Основные пики
Оже-электронов

Глубина выхода вторичных электронов



Универсальная зависимость

Зависимость от Z

Оже-микроанализатор



Оже-микроанализатор JEOL JAMP-7810

Эмиттер - LaB₆

Ускоряющее напряжение – до 30кВ

Ток пучка - от 10^{-11} до 5×10^{-6} А

Диапазон энергий - от 0 до 3000 эВ

Энерг. разрешение - от 0.15 до 0.6%

Давление в камере анализа $> 5 \times 10^{-8}$ Па

Ионная пушка

Энергия - 4кэВ

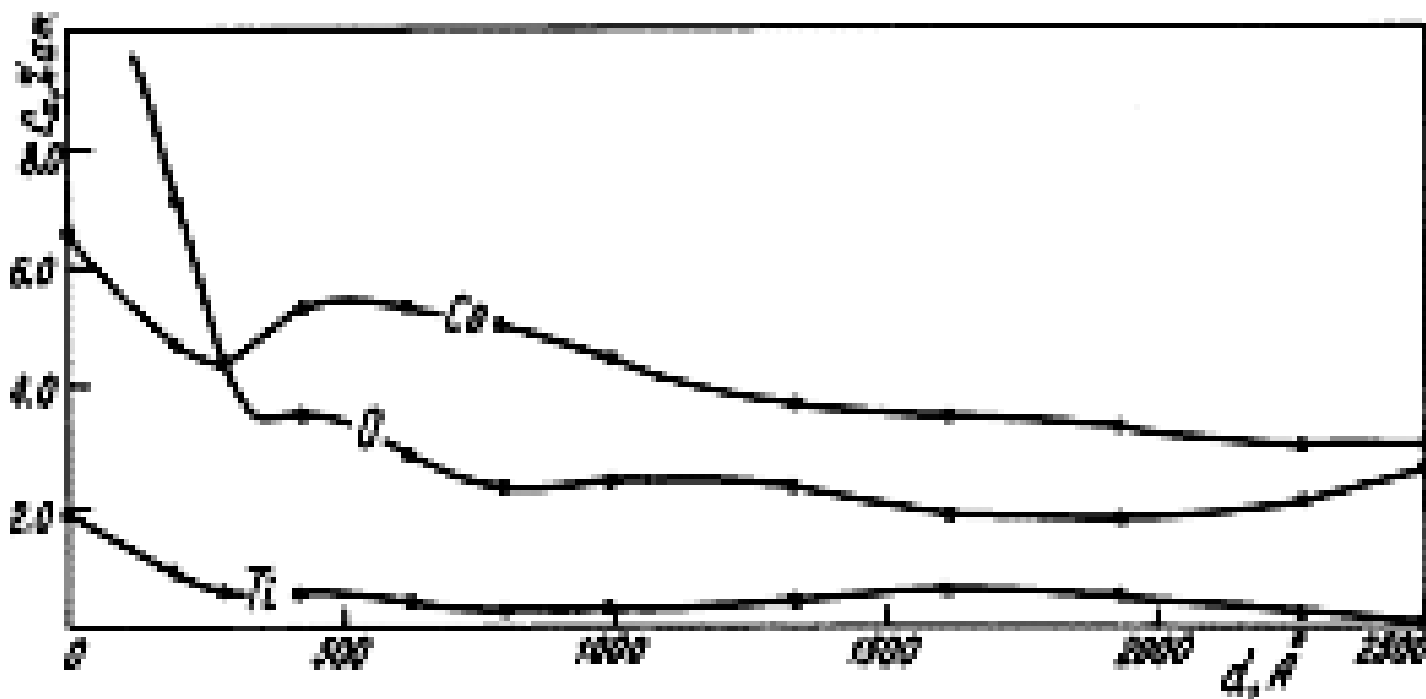
Плотность тока ионов - 3000мкА/см²

Минимальный размер зонда

Вторичные электроны – 8 нм

Оже-анализ – 35 нм

Концентрационные профили элементов

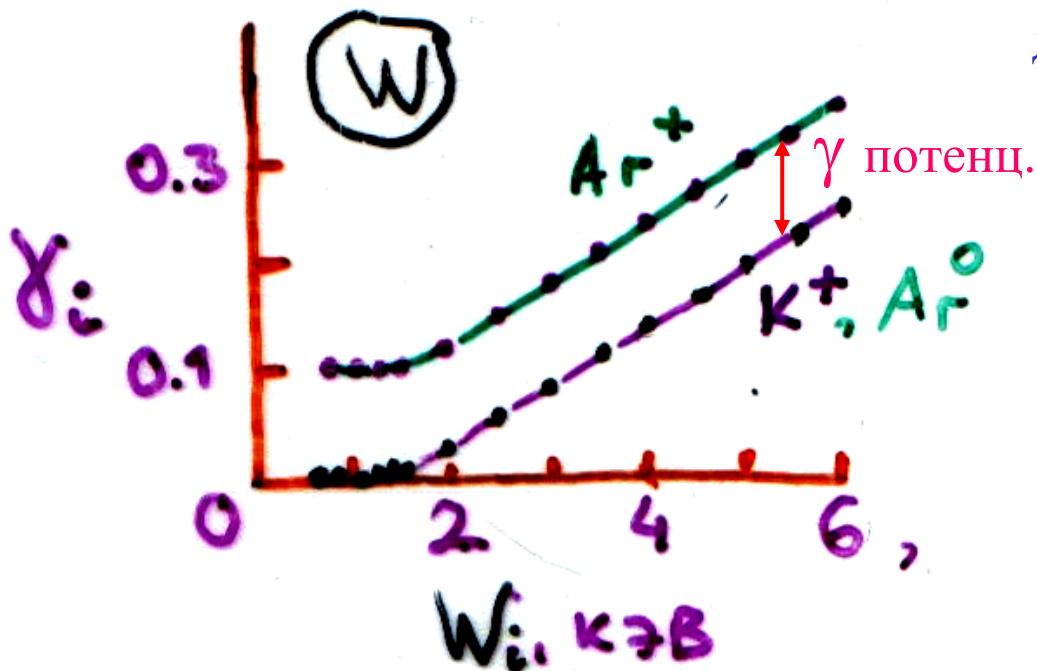


Концентрационные профили элементов в сплаве ВК8 после воздействия на образец одним импульсом МИП с плотностью тока $j_{max} = 50 \text{ А/см}^2$.

Ион-электронная эмиссия

Потенциальная эмиссия – за счет внутренней энергии падающей частицы (иона или метастабильного атома)

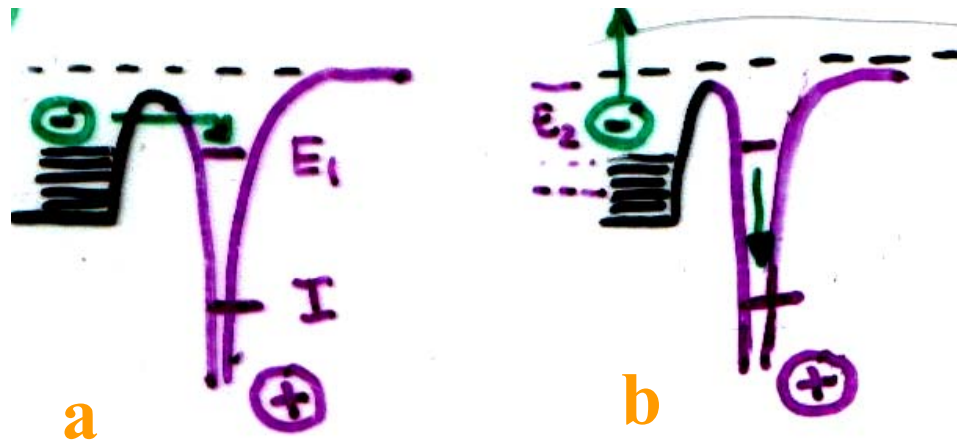
Кинетическая эмиссия – за счет кинетической энергии иона/атома



для иона Ar^+ $\gamma_{\Sigma} = \gamma_{\text{пот}} + \gamma_{\text{кин}}$

для K^+ и Ar $\gamma = \gamma_{\text{кин}}$

Потенциальная ион-электронная эмиссия



$$E_2 + E_e = I - E_1$$

1 канал – через возбужденный уровень:

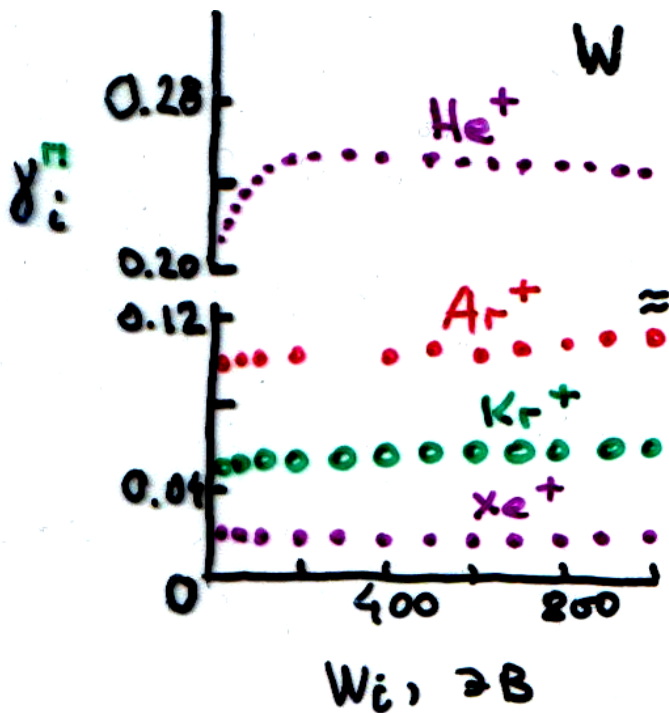
1а. Переход на
возбужденный
уровень иона

1б. Снятие возбуждения
энергия передается
2-му электрону металла

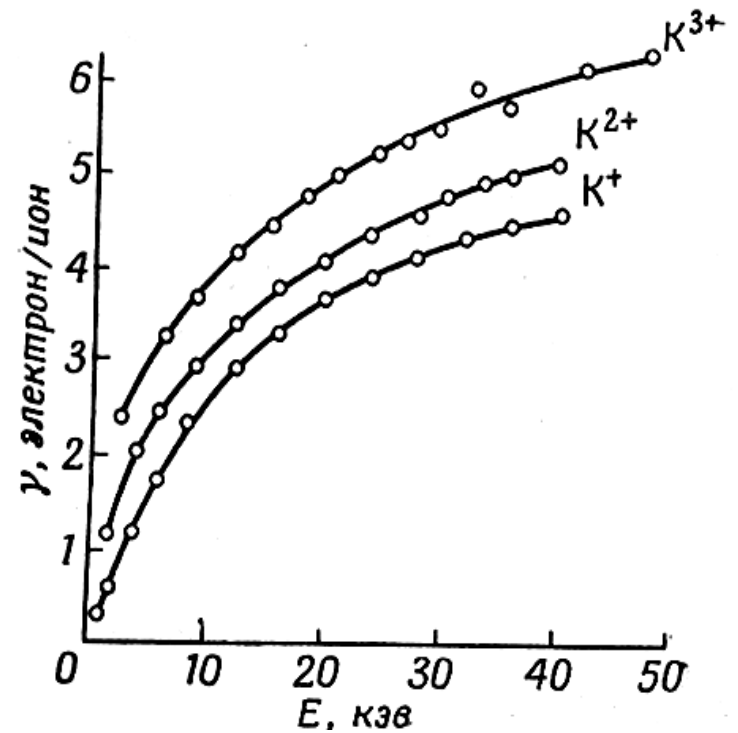
2 канал- прямой:

Прямой переход на основной
уровень иона с передачей
энергии 2-му электрону

Зависимость коэффициента ПЭ от энергии



при облучении ионами инертных газов

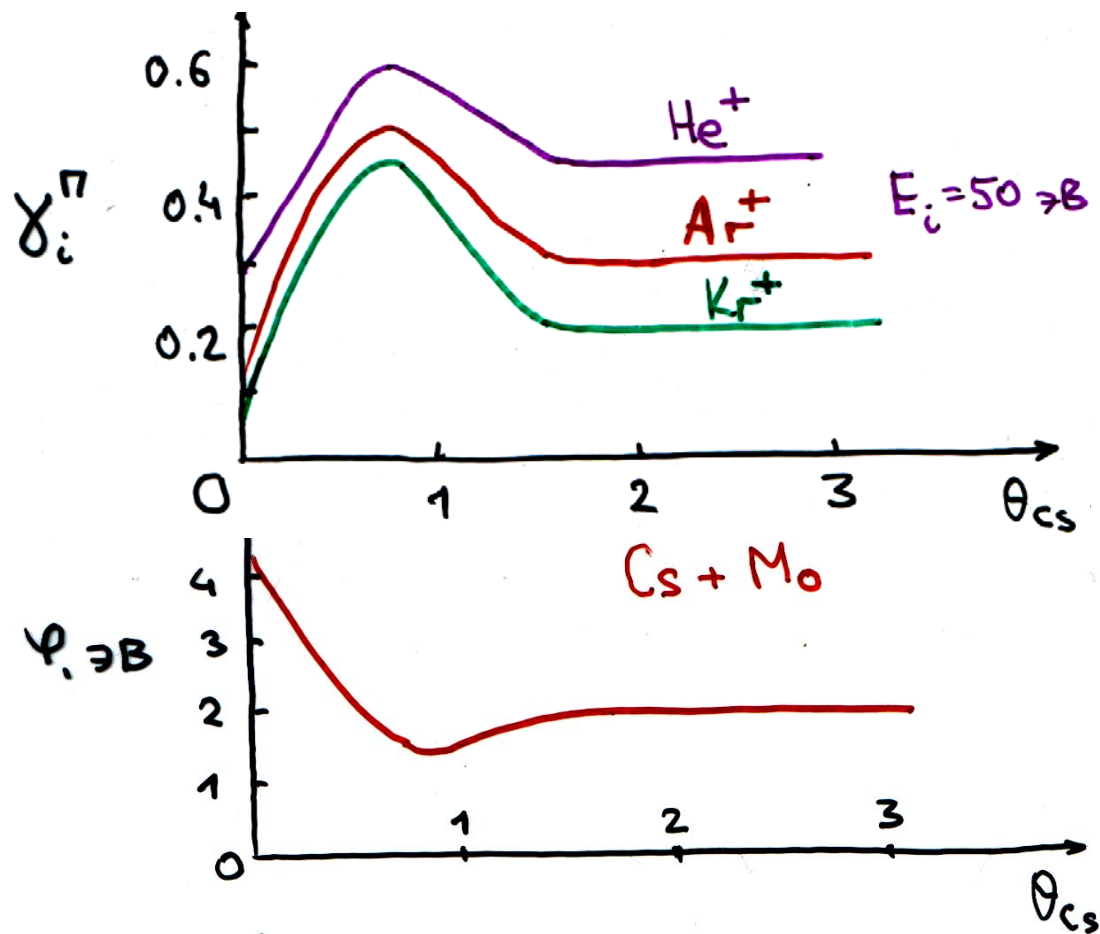


при облучении поверхности Pt

$\Delta\gamma$ не зависит от энергии

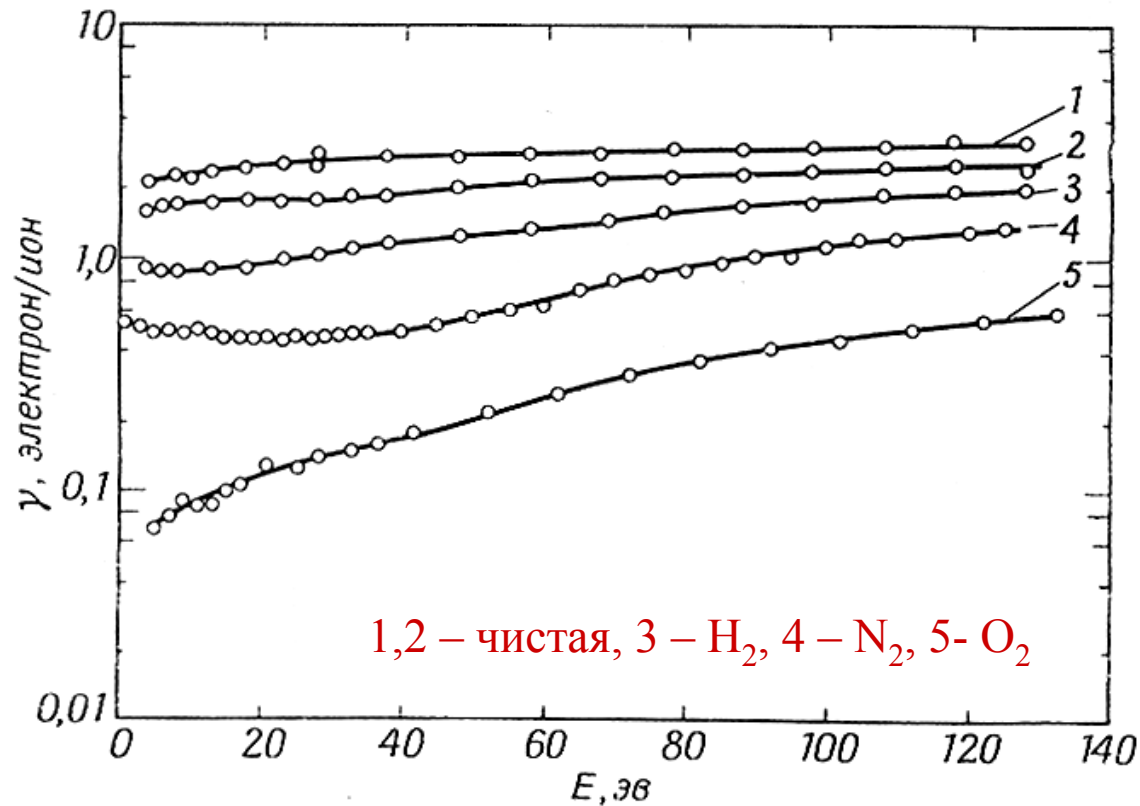
$$\gamma_i^n \sim (I - 2\varphi) \text{ [эВ]} (\pm 25 \%)$$

Зависимость коэффициента ПЭ от покрытия



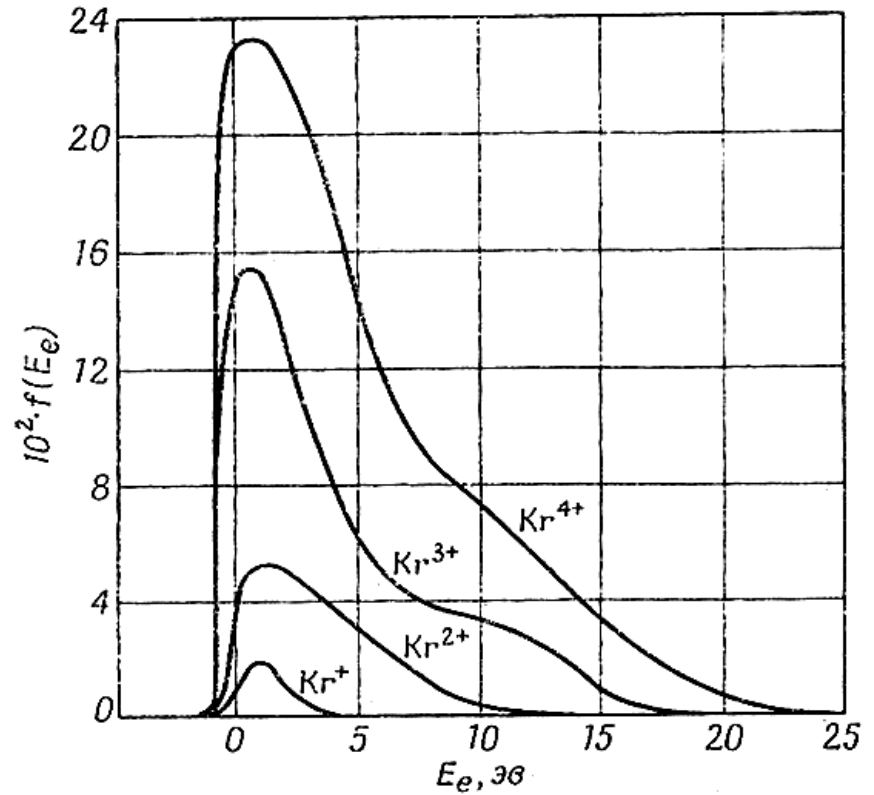
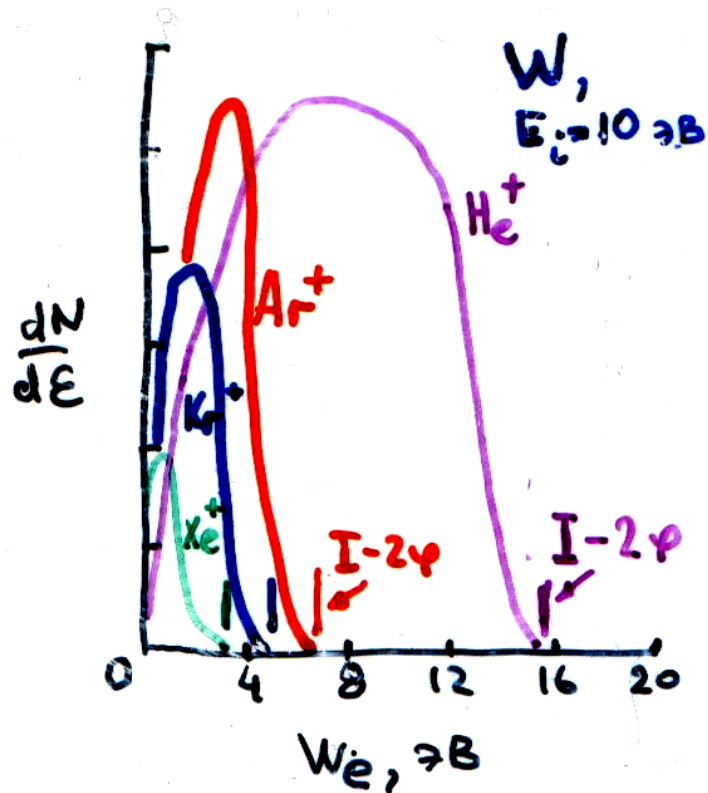
Изменение работы выхода φ и коэффициента γ_i^n при нанесении Cs покрытия на Mo

Коэффициент ПЭ при облучении ионами Ar^+



Наличие пленки на поверхности Pt изменяет γ на порядок:
- окисление Pt увеличивает работу выхода ϕ

Энергоспектр вторичных электронов при ПЭ



$$E_e^{\max} = I - 2\varphi$$

при бомбардировке Мо ионами Kr
различной зарядности и энергией 200 эВ
(потенциальная эмиссия)

Кинетическая ион-электронная эмиссия

Закономерности выхода вторичных электронов при **Кинетической ИЭ** эмиссии аналогичны фотоэффекту и ВЭЭ эмиссии:

- γ_i растет пропорционально $1/\cos\varphi$ угла падения.

Для монокристаллов наблюдается минимумы γ_i

- γ_i больше для структур с большой глубиной выхода:

* диэлектрики – до 500 А

* металлы: 10-100 А

Кинетическая ион-электронная эмиссия

Механизм:

1. Ударная ионизация атомов мишени и бомбардирующей частицы
2. Оже-процессы при заполнении глубоких вакансий

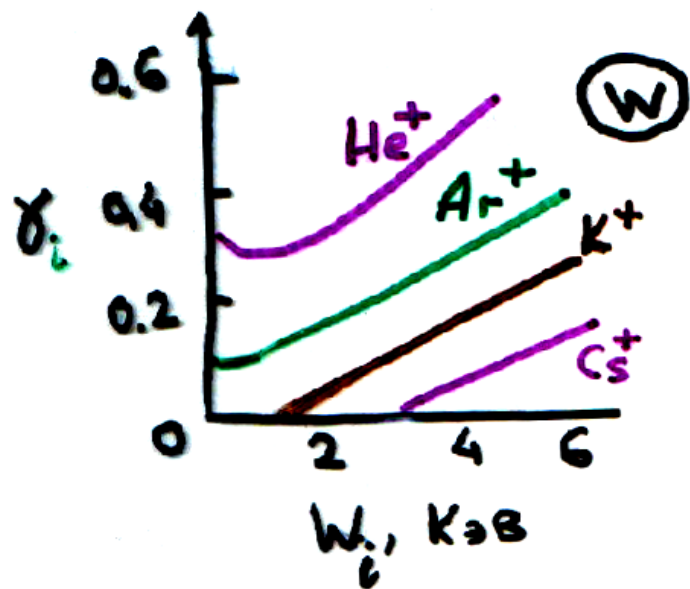
(дискретные уровни энергий электронов в тонкой структуре высокоэнергетического «хвоста»)

Свойства:

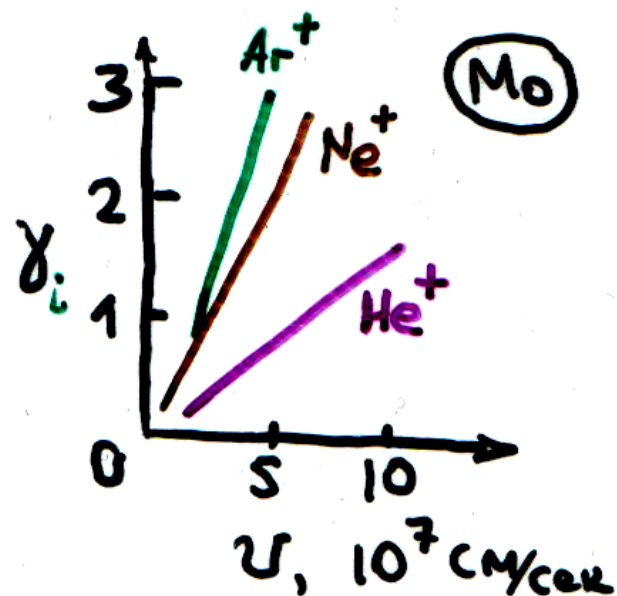
1. Порог ≥ 1 кэВ для тяжелых ионов
2. Аддитивность: при одинаковых скоростях частиц диссоциация молекулярных ионов дает большее количество вторичных электронов:

$$\gamma_{\text{H}^+} : \gamma_{\text{H}_2^+} : \gamma_{\text{H}_3^+} = 1 : 2 : 3 \text{ (для металлов)}$$

Коэффициент кинетической ИЭ эмиссии



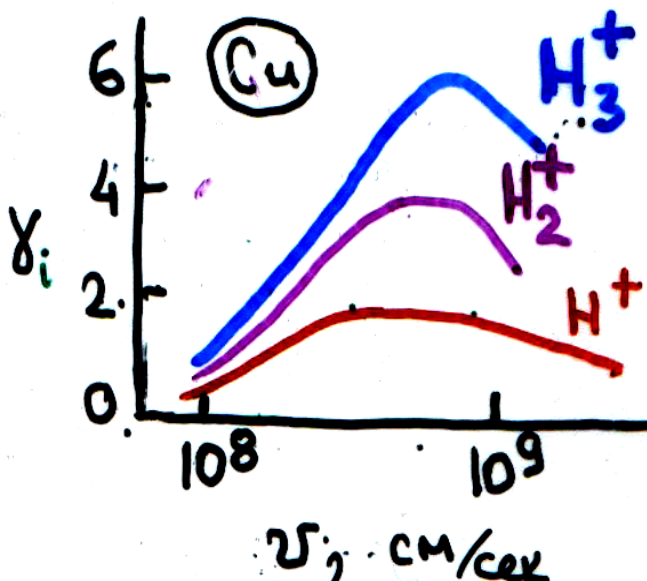
При «малых»
энергиях $\gamma(E) \sim E$



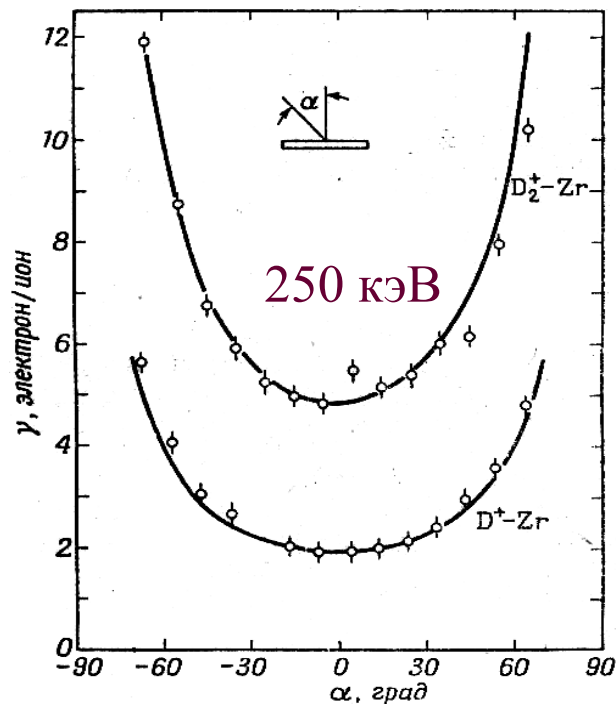
При больших энергиях $\gamma(E) \sim E^{1/2}$

Зависимость коэффициента КЭ

от количества
атомов в ионе



от угла падения

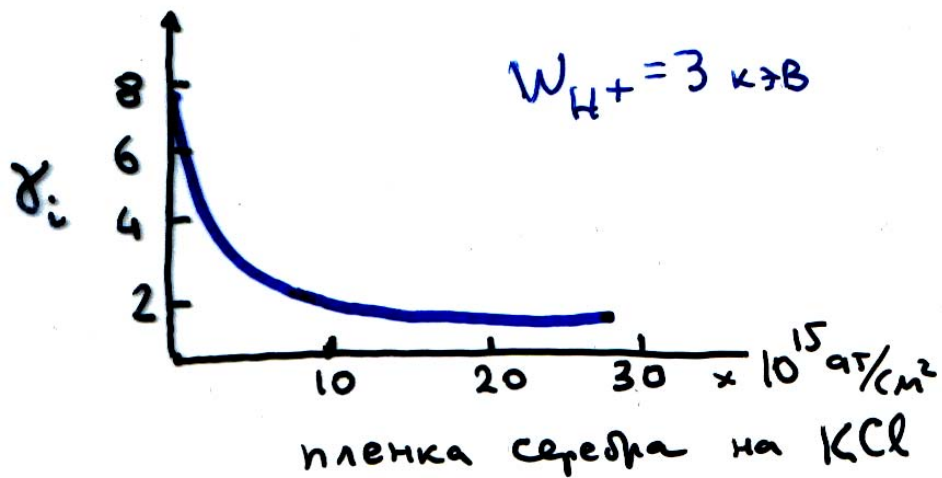
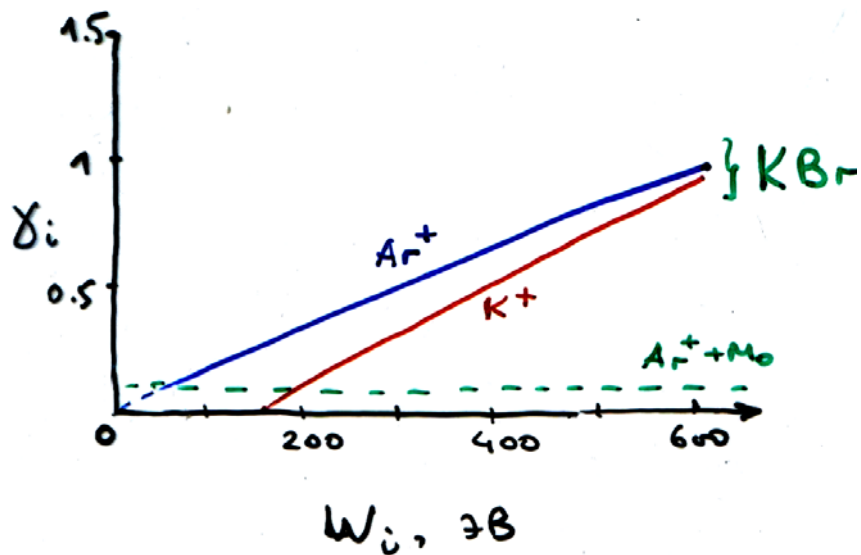


Аддитивность

$$\gamma(H^+) : \gamma(H_2^+) : \gamma(H_3^+) \sim 1 : 2 : 3$$

$$\gamma \sim \left(\frac{1}{\cos \alpha} \right)$$

Эффективные “ионно-электронные” эмиттеры



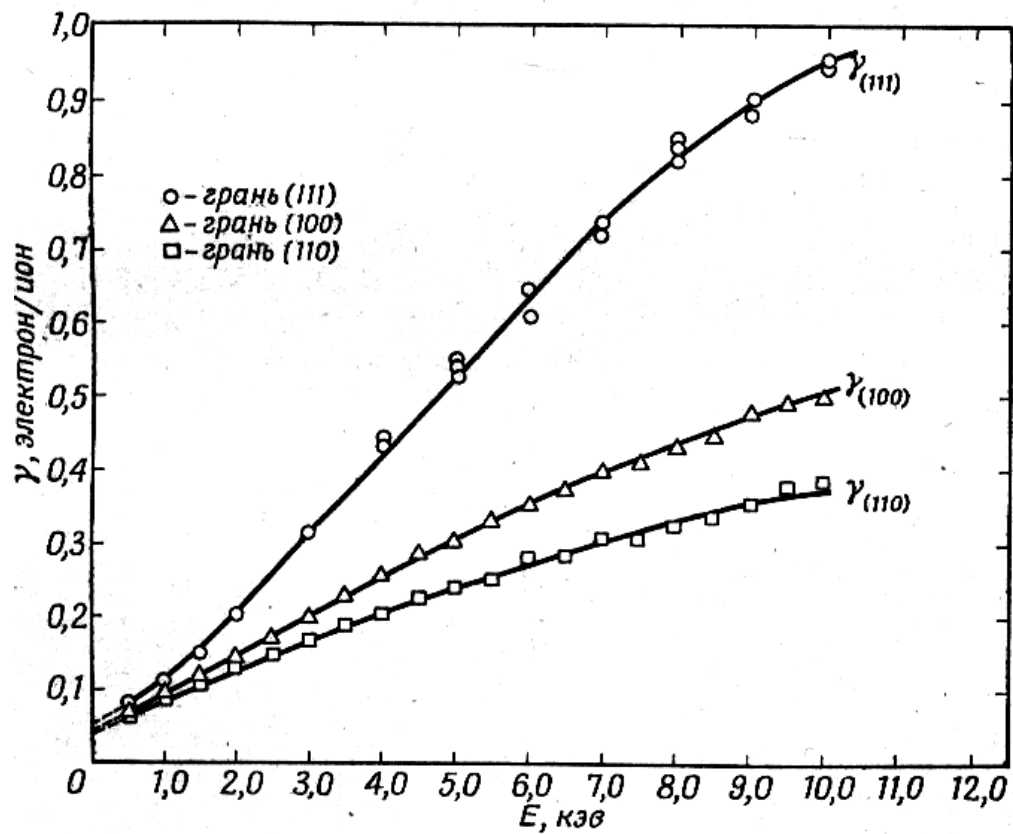
Коэффициент КЭ

При облучении металлов ионами или нейтралами коэффициент кинетической ИЭЭ от заряда не зависит

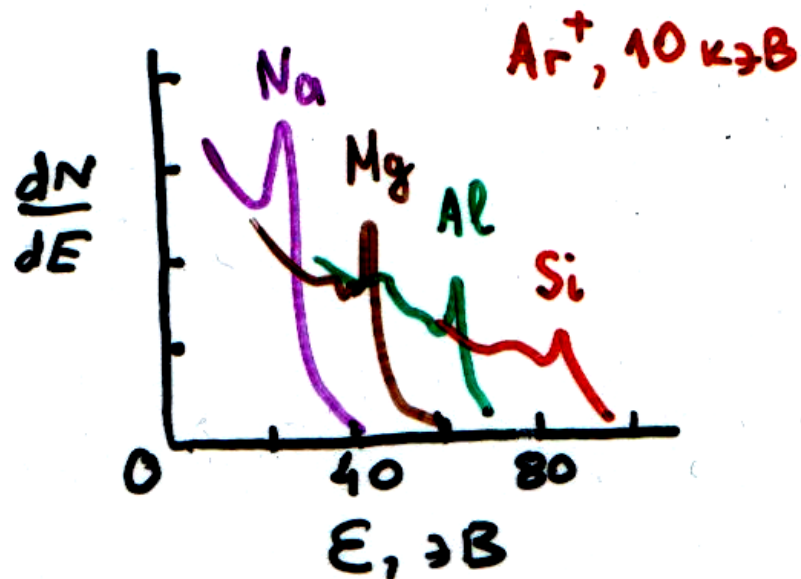
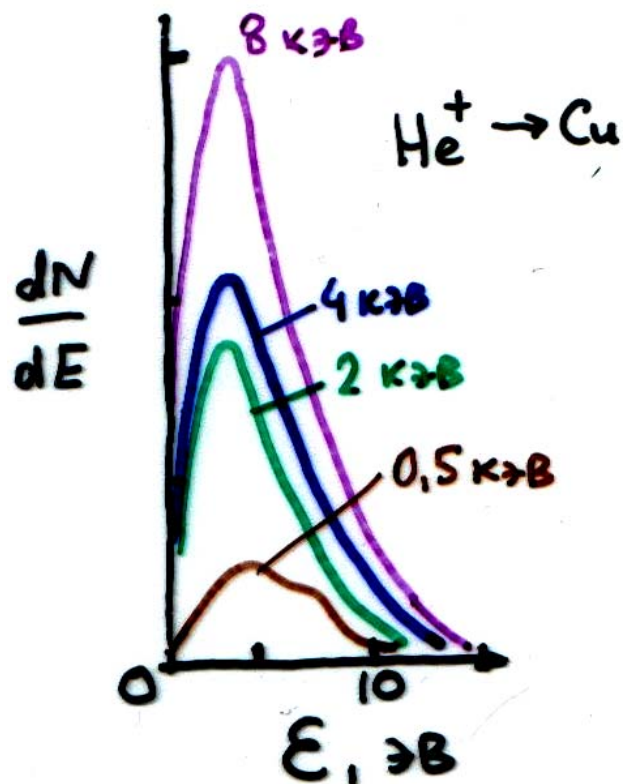
При облучении отрицательными ионами или атомами с энергией 2-10 кэВ коэффициент кинетической ИЭЭ на единицу больше у отрицательных ионов

$$\begin{array}{l} 780 \text{ эВ} \\ W \end{array} \left\{ \begin{array}{ll} \gamma(\text{Na}^+) = 0.25, & \gamma(\text{Na}^-) = 0.41 \\ \gamma(\text{I}^+) = 0.15, & \gamma(\text{I}^-) = 0.26 \\ \gamma(\text{Cl}^+) = 0.49, & \gamma(\text{Cl}^-) = 0.79 \end{array} \right.$$

Коэффициент КЭ на различных гранях монокристалла меди
при облучении ионами Ar^+



Энергоспектр вторичных электронов



Основной участок спектра < 10 эВ

«высокоэнергетический»
хвост распределения > 10 эВ

Наиболее вероятная энергия вторичных электронов: 2-5 эВ

Средняя энергия истинно-вторичных электронов: ~ 10 эВ

Ионная Оже-спектроскопия

- Нет фона неупруго-отраженных электронов
(при электронной ОС – фон в $10^2 - 10^3$ раз больше сигнала)
- Селективное выбивание из атомов заданного сорта
выбором сорта и энергии первичных ионов
- Обычно облучают ионами инертных газов
(которые не изменяют поверхностного слоя и/или легко слетают)

Положение Оже-спектров

		Mg	Al	Si	Ti	V	Fe
энергетич. уровень, эВ	L ₂ VV	54	77	104			
	M ₂ VV				38	43	60
эксперимент. значение энергии оже-пика, эВ		46	68	92	26	30	44
	L-2φ M-2φ	46.5	69	96	30	35	52