

СПЕКТРОСКОПИЯ РАССЕЯНИЯ МЕДЛЕННЫХ ИОНОВ

В.И. Троян, М.А. Пушкин, В.Д. Борман, В.Н. Тронин

презентация к лекциям по курсу «Физические методы
исследования поверхности и наноструктур»



Лекция 1 Спектроскопия рассеяния медленных ионов.

Классификация методов рассеяния ионов:

- СРМИ (LEIS), $E=0,1 - 10$ кэВ;
- СРСИ (MEIS)
- СРБИ (HEIS), $E=0,01 - 2$ МэВ;
- ОРР (RBS), $E > 2$ МэВ

Получаемая информация:

- 1) Элементный состав поверхности образца (положение линий);
- 2) Относительная концентрация поверхностных атомов (интенсивность линий);
- 3) Структура поверхностной решетки (угловые зависимости);
- 4) Химическое состояние поверхностных атомов (тонкая структура, иногда).

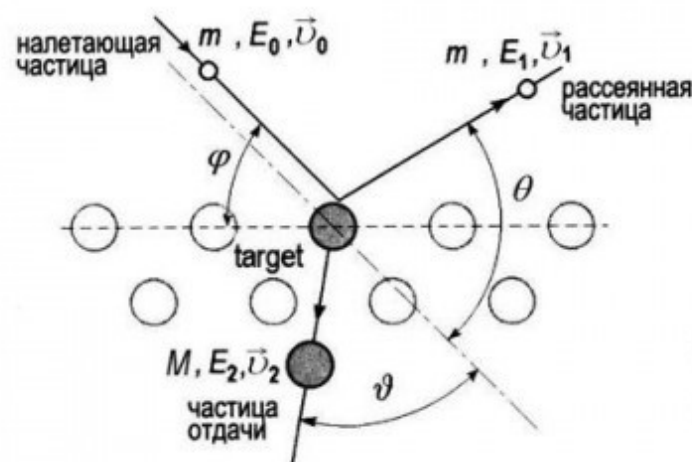
Особенности метода СРМИ: Глубина зондирования один-два атомных слоя поверхности, вследствие:

- 1) ослабления интенсивности ионного пучка по мере его проникновения вглубь образца вследствие большого сечения рассеяния;
- 2) увеличения вероятности нейтрализации ионов, рассеянных на глубоких поверхностных слоях.

Историческая справка. Первое применение РМИ для исследования поверхности (1967).



Лекция 1 СРМИ. Кинематический фактор.



$E_1 = kE_0$

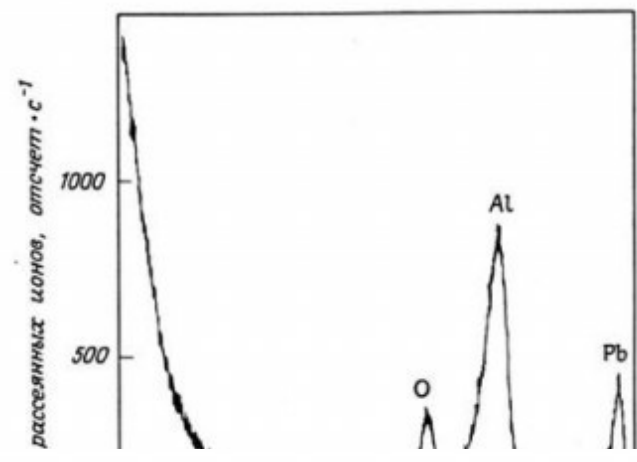
$k = \frac{1}{(1 + \mu)^2} \left[\cos \theta \pm (\mu^2 - \sin^2 \theta)^{1/2} \right]^2$

$\mu = M / m$

знак «+» при рассеянии на тяжелом атоме,
знак «-» при рассеянии на легком атоме

Учет неупругих потерь энергии – фактор Q:

$k = \frac{1}{(1 + \mu)^2} \left[\cos \theta \pm \left(\mu^2 - \sin^2 \theta - \mu(1 + \mu) \frac{Q}{E_0} \right)^{1/2} \right]^2$



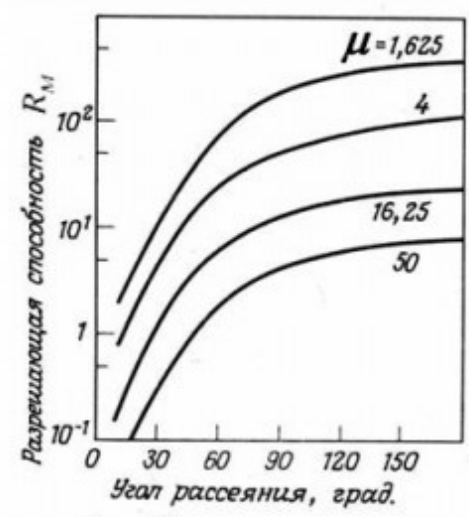
Лекция 1 СРМИ. Ширина линий.

- Ширина пиков рассеяния определяется:
- степенью немонохроматичности ионного пучка;
 - расходимостью первичного пучка;
 - углом сбора рассеянных ионов и разрешающей способностью энергоанализатора;
 - кинетической энергией рассеянных ионов.

Разрешающая способность по массе:

$R_M = \frac{M}{\Delta M} = \frac{E}{\Delta E} = \frac{2\mu}{1 + \mu} \left(\frac{\mu^2 + \sin^2 \theta - \cos \theta \cdot (\mu^2 - \sin^2 \theta)^{1/2}}{\mu^2 - \sin^2 \theta + \cos \theta \cdot (\mu^2 - \sin^2 \theta)^{1/2}} \right)^2$

- 1) R_M мало для малых углов рассеяния, при $\theta \rightarrow 0$ $k \rightarrow \frac{(1 + \mu)^2}{(1 - \mu)^2} \rightarrow 1$ при $\mu > 1$
- 2) R_M возрастает при уменьшении μ .



- 3) С уменьшением μ сокращается область возможных углов рассеяния. При $\theta = 90^\circ$ $k = \frac{\mu - 1}{\mu + 1}$, т.е. рассеяние на этот угол невозможно на атомах, масса которых меньше массы рассеивающегося иона.

Таким образом, оказывается невозможным одновременно достичь максимальной интенсивности и наибольшего диапазона регистрируемых элементов.

Лекция 2

СРМИ. Интенсивность спектральных линий.

Сечение рассеяния.

$$I = I_0 N \frac{d\sigma}{d\Omega} \Omega_0 P_i$$

Сечение рассеяния

определяется потенциалом взаимодействия иона и атома-рассеивателя

- Кулоновский потенциал: $V(r) = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{r}$
- Боровский экранированный потенциал: $V_B(r) = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{r} e^{-r/a}$

$$a = a_B (Z_1^{2/3} + Z_2^{2/3})^{1/2}$$
- Потенциал с экранировкой Томаса-Ферми: $V_{TF}(r) = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{r} \phi(r/b)$

$$\phi(y) = 0.35y + 0.55y^4 + 0.10y^{20} \qquad y = e^{-0.3r/b} \qquad b = 0.89a_B (Z_1^{1/2} + Z_2^{1/2})^{-1/3}$$
- Потенциал Борна-Майера: $V_{BM}(r) = Ae^{-Br}$

Лекция 2

СРМИ. Эффект нейтрализации ионов.

- Резонансная нейтрализация
- Квази-резонансная нейтрализация
- Оже-нейтрализация.

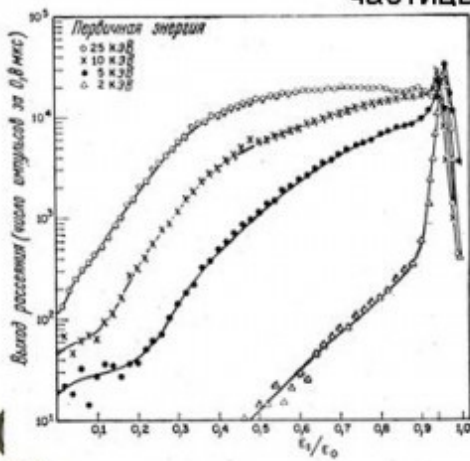
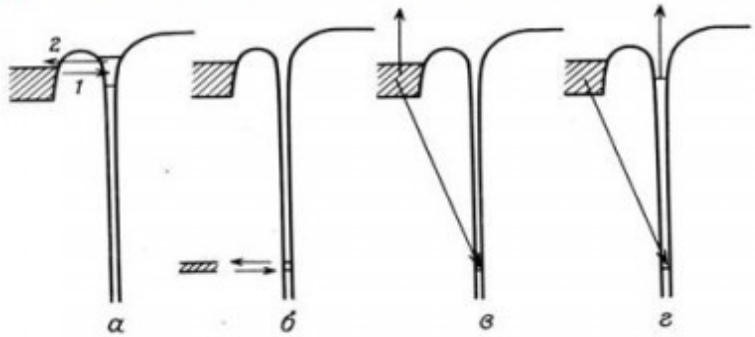
Время нейтрализации $\tau_n \sim \hbar/\Gamma$
 Скорость нейтрализации $R_n = 1/\tau_n$

$$R_n = A e^{-as}$$

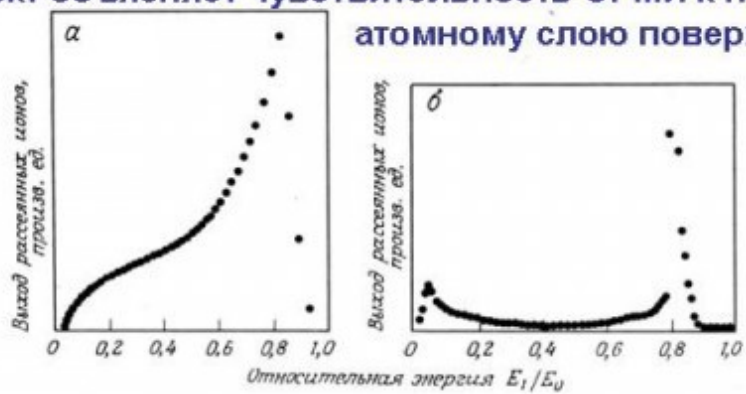
Вероятность «выживания» иона $P_i = \exp \left[A \int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{-as}}{v_{\perp}} ds \right] \approx \exp(-A/av_{\perp})$

$P_i \leq 0.01$

при проникновении иона в глубь поверхностных атомных слоев образца вероятность нейтрализации существенно возрастает, и рассеявшиеся частицы не дают вклада в измеряемый спектр.

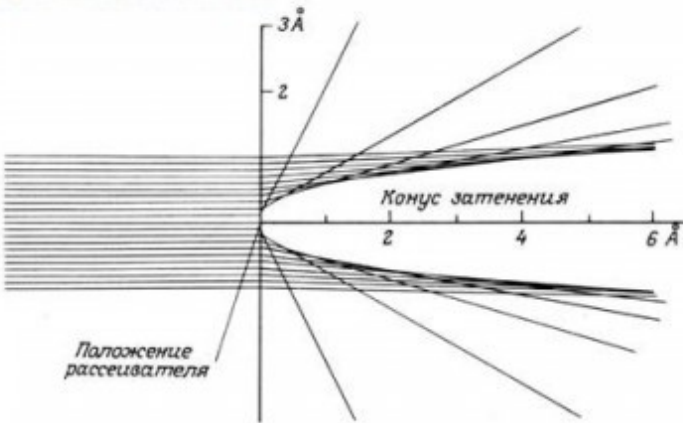
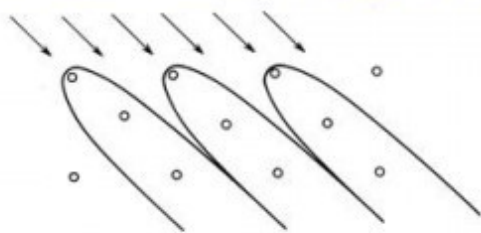


Этот эффект объясняет чувствительность СРМИ к первому атомному слою поверхности.



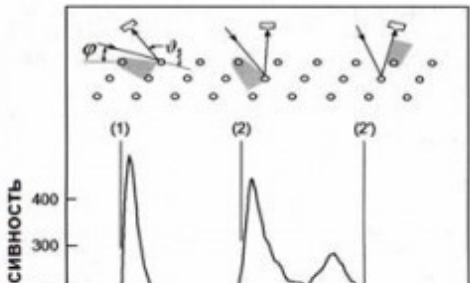
Лекция 2 Структурные эффекты в СРМИ.

Эффект затенения. Конус затенения.

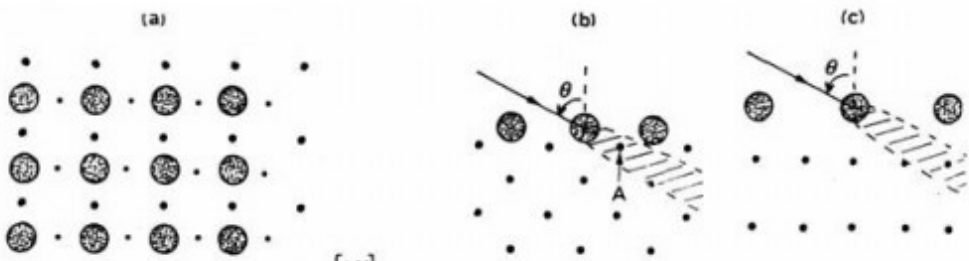


Угловые зависимости интенсивности рассеянных ионов
=> взаимное расположение атомов в поверхностном слое.

Зависимость I от угла скольжения



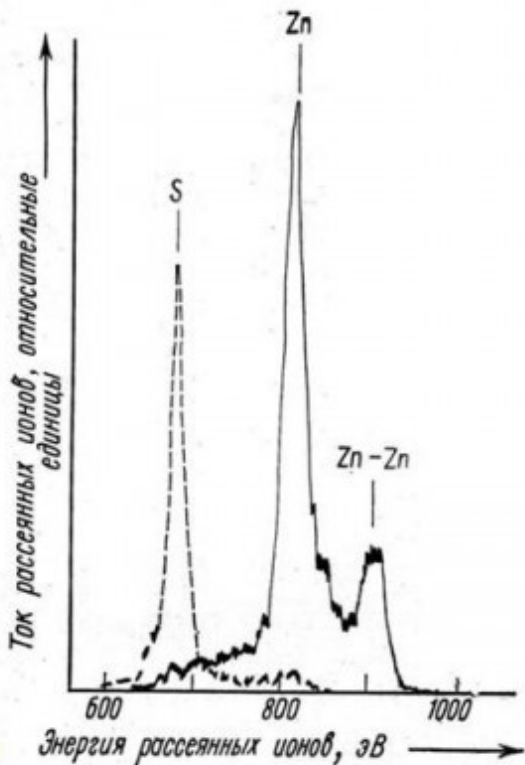
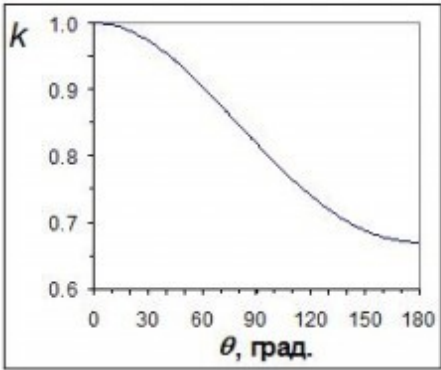
Зависимость I от азимутального угла



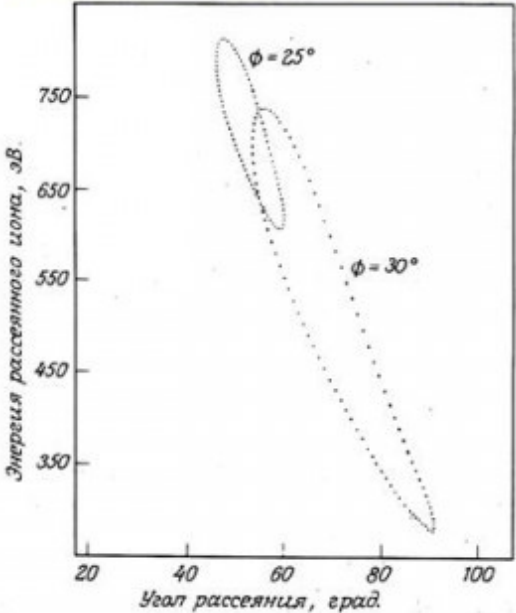
Лекция 3 Эффект многократного рассеяния

$$k_n = \frac{1}{(1 + \mu)^{2n}} \left[\cos(\theta/n) \pm (\mu^2 - \sin^2(\theta/n))^{1/2} \right]^{2n}$$

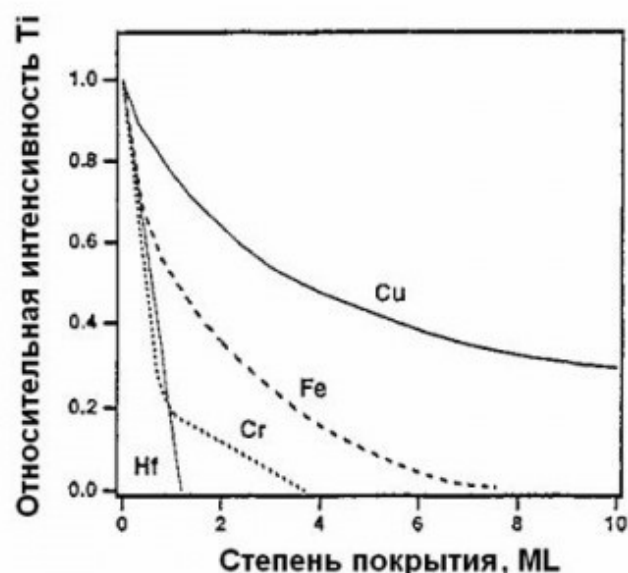
$$\Delta E(\theta_1) + \Delta E(\theta_2) < \Delta E(\theta_1 + \theta_2)$$



**«Петля» рассеяния –
рассеяние на цепочке атомов**



$$\theta = I(\theta) / I^{\infty}$$



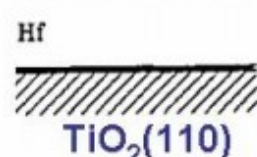
островковый рост (механизм Фолмера–Вебера)



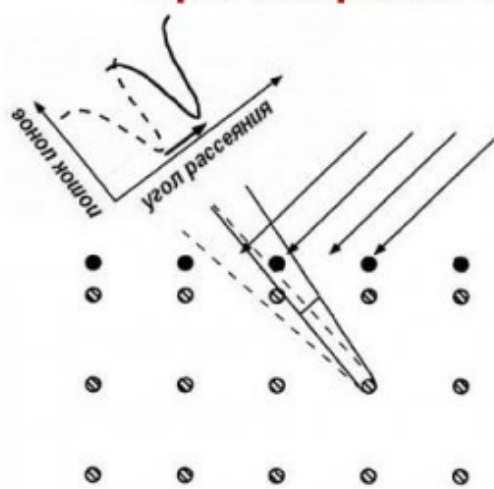
послойно-островковый рост (механизм Франка – Ван-дер-Мерве)



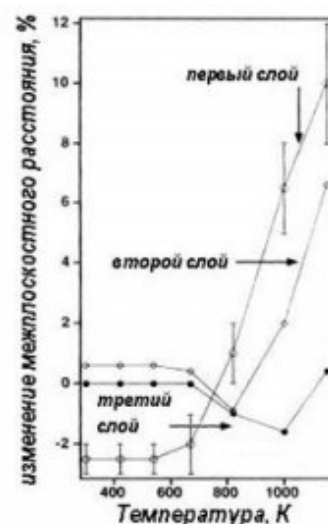
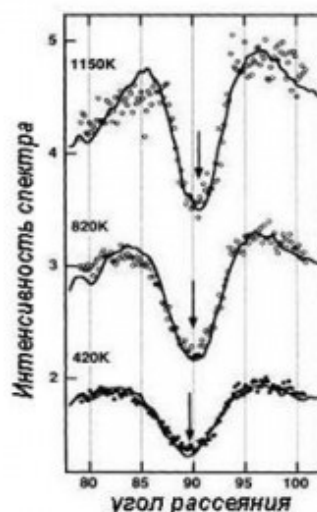
послойный рост (механизм Странского–Крастанова)



$\text{TiO}_2(110)$



Эффект Блокировки:



Релаксация поверхностного атомного слоя приводит к изменению угла рассеяния, отвечающего блокировке.

Угловые спектры рассеяния ионов H^+ с энергией 97.5 кэВ на поверхности Ag(111) при температурах $T=420, 820$ и 1150 K, демонстрирующие сдвиг угла блокировки (б);

Температурная зависимость изменения межплоскостного расстояния относительно объемного значения для трех атомных слоев поверхности Ag(111) (P. Statiris, H.C. Lu, T. Gustafsson // Phys. Rev. Lett. 72 (1994) p.3574).

Источник ионов

He^+ , Ne^+ ,

$I \sim 1 \text{ мкА}$, $E \sim 0.2 - 2.0 \text{ кэВ}$,

разброс по энергии ионов в пучке $5 \div 10 \text{ эВ}$, расходимость \sim одного градуса.

Важность отсутствия изотопов

Сравнение возможностей методов СРМИ и СРБИ

Характеристика	СРМИ	СРБИ
Энергия первичных ионов	0.2÷2.0 кэВ	0.1÷2.0 МэВ
Глубина анализируемого слоя	1÷2 ML: анализ первого атомного слоя	сотни нанометров: анализ толщины тонких пленок, профили концентрации
Ширина линий	10÷50 эВ, упруго рассеянные ионы	сотни эВ, существенный вклад неупругого рассеяния
Нейтрализация	До 99% первичного пучка	Практически отсутствует
Чувствительность	$10^{-4} \div 10^{-3} \text{ ML}$	$10^{-2} \div 10^{-1} \text{ ML}$
Получаемая информация	Элементный состав; структура поверхностной; характер роста конденсата; в ряде случаев – химический состав	Толщина тонких пленок; профиль концентрации по глубине; структура (аморфн./крист.)



