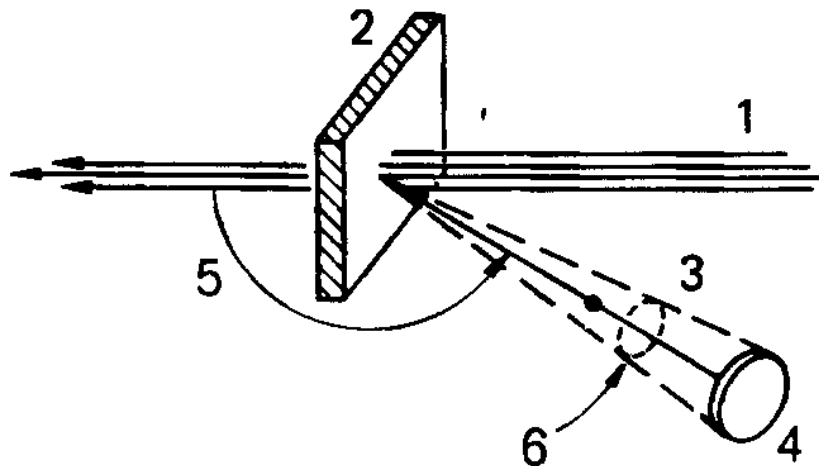


## II. Ионная спектроскопия (продолжение)

4. Резерфордское обратное рассеяние (ROR)
5. Спектроскопия рассеяния медленных ионов (СРМИ)
6. Вторичная ионная масс-спектрометрия (ВИМС)

# Резерфордовское обратное рассеяние (ROR)



1 – падающий пучок частиц

2 – образец

3 – рассеянные частицы

4 – детектор

5 – угол рассеяния  $\theta$

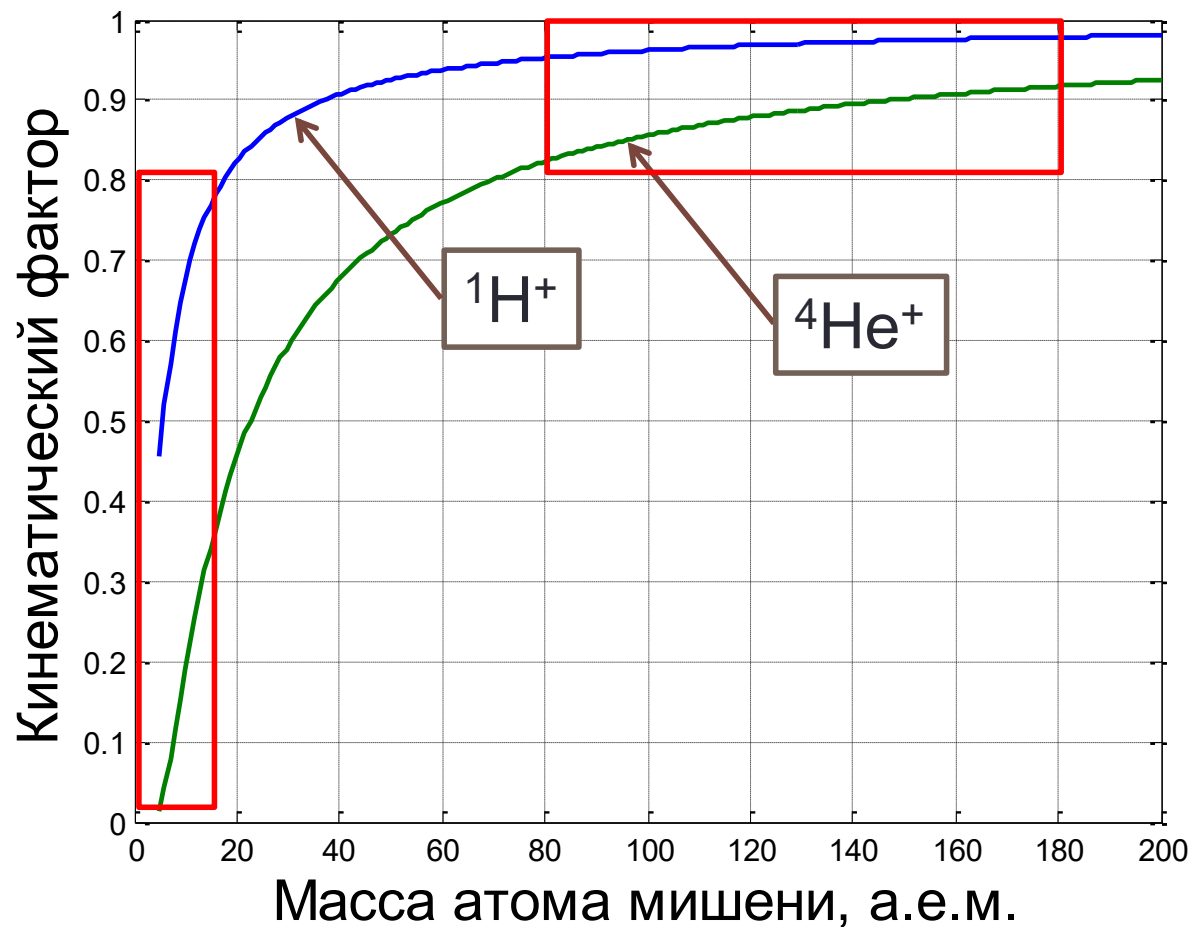
6 – телесный угол  $\Omega$  захвата  
детектора

# Резерфордовское обратное рассеяние (ROR)



- Rutherford backscattering spectroscopy (RBS).
- **Упругое рассеяние ускоренных ионов** ( $^1\text{H}^+$ ,  $^2\text{D}^+$ ,  $^4\text{He}^+$ ,  $^4\text{He}^{++}$ ) с энергией от сотен кэВ до 2-3 МэВ.
- Энергия рассеянных частиц зависит от массы атома – проведение **элементного анализа** материала.
- **Глубина анализа** определяется начальной энергией иона, геометрией испытаний, массы атомов мишени, тормозной способности мишени.

- Избирательность метода определяется массовым разрешением  $\Delta M/M_1$ , где  $\Delta M$  – минимальная разница в массе соседних элементов, которые ещё можно различить на энергетическом спектре.
- Разрешение спектра  $\Delta E = E_2 - E_1 = \Delta(K_{M_2})_i \cdot E_0$ :
  - $\theta \approx 160^\circ - 170^\circ$  – ограничение из-за конечных размеров детектора.
  - Для разрешения элементов с близкими массами целесообразно выбирать высокое значение  $E_0$ , но менее 2-3 МэВ, чтобы не возникали эффект резонанса и ядерные реакции.



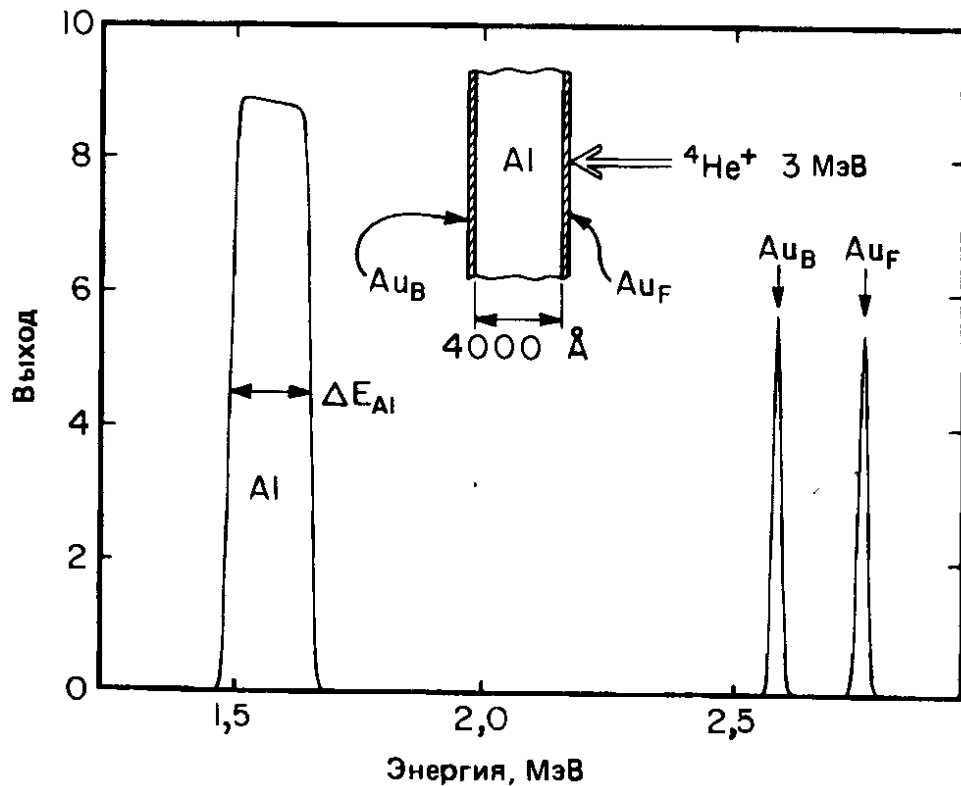
Анализ **лёгких**

элементов –  $^1\text{H}^+$

Анализ **тяжёлых**

элементов –  $^4\text{He}^+$

# Ширина спектра в РОР



$$\Delta E = \Delta t \cdot [S]$$

$$E_1 - E_0 = \Delta E$$

# Форма спектра обратного рассеяния

Полное число зарегистрированных частиц  $Q_D$ , или **выход рассеяния**  $Y$ , от тонкого слоя атомов  $\Delta t$  равно

$$Q_D \equiv Y = \frac{d\sigma}{d\Omega} \cdot \Omega \cdot Q \cdot N \cdot \Delta t = \frac{d\sigma}{d\Omega} \cdot \Omega \cdot Q \cdot N_s,$$

где  $Q$  – число падающих частиц;

$N$  – объёмная концентрация атомов мишени;

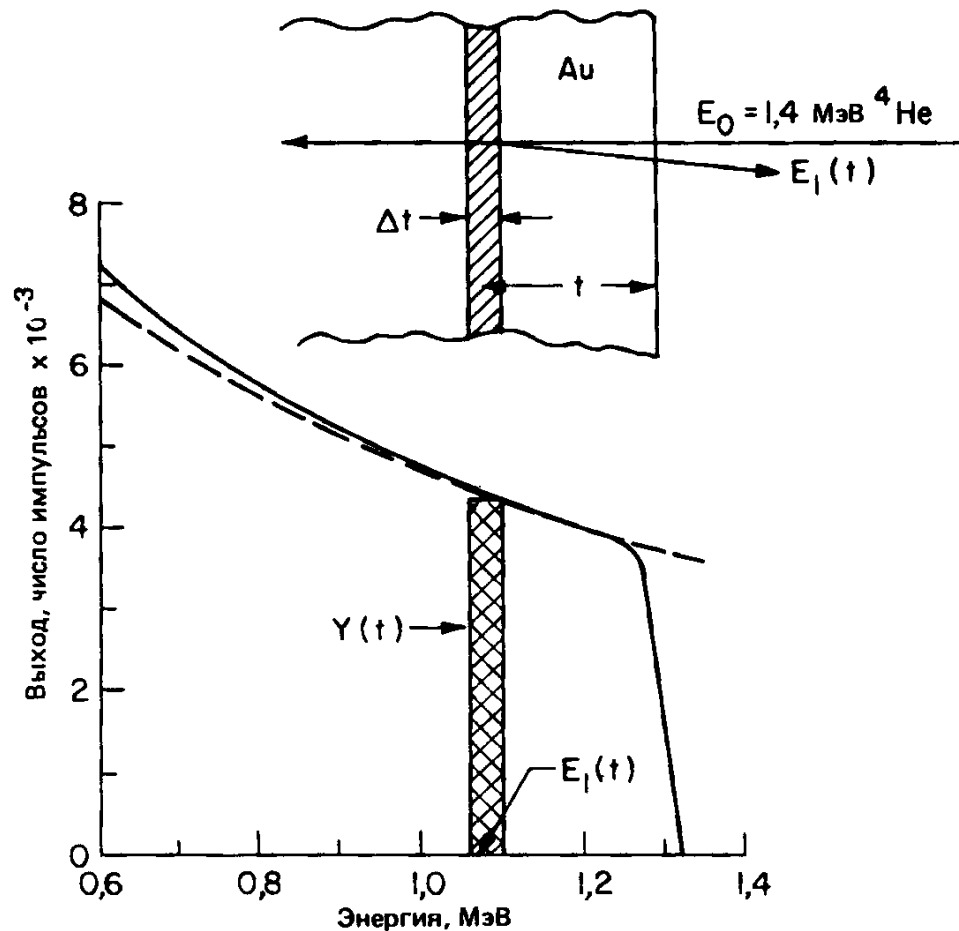
$N_s$  - поверхностная концентрация атомов мишени.

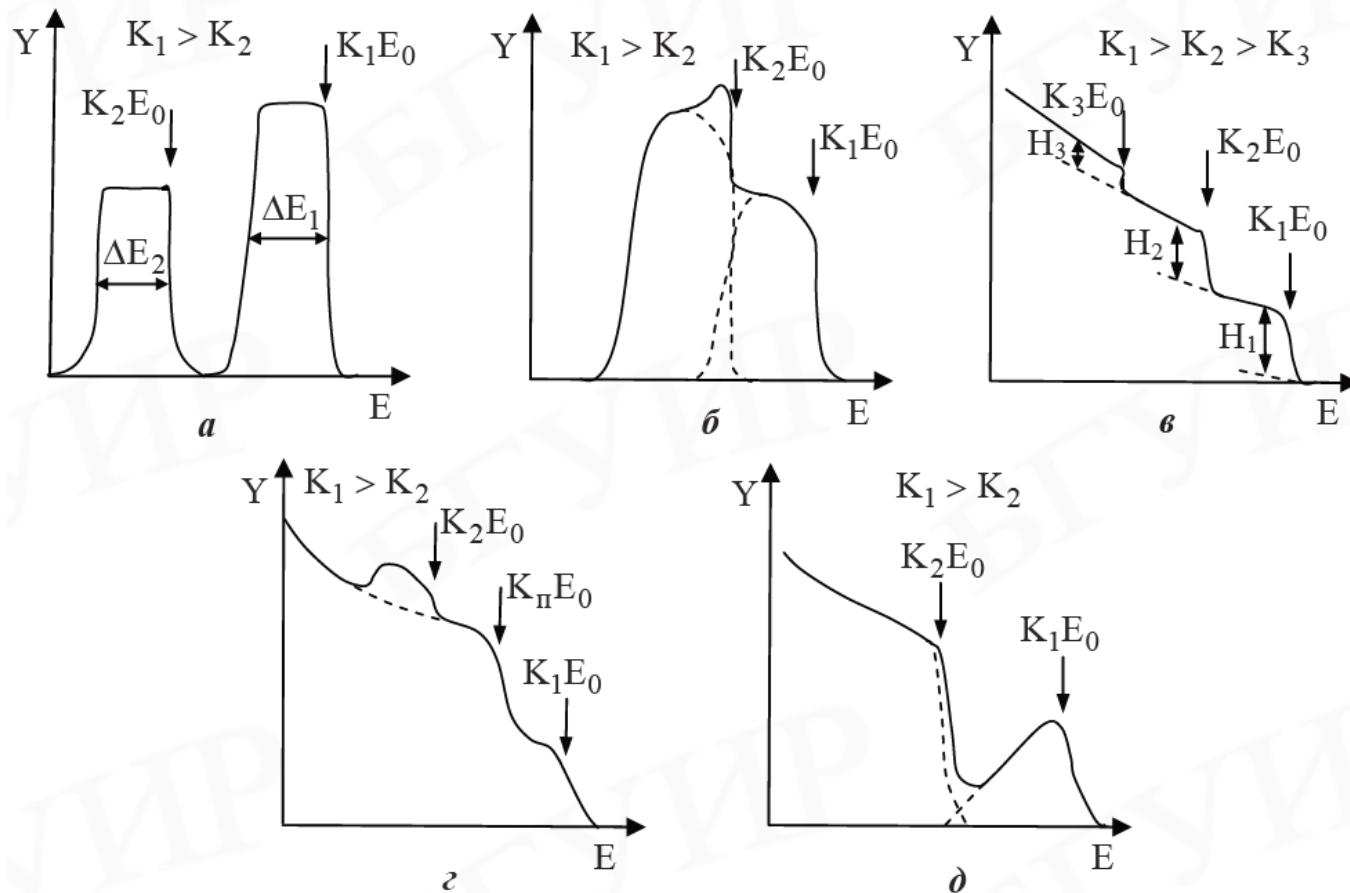


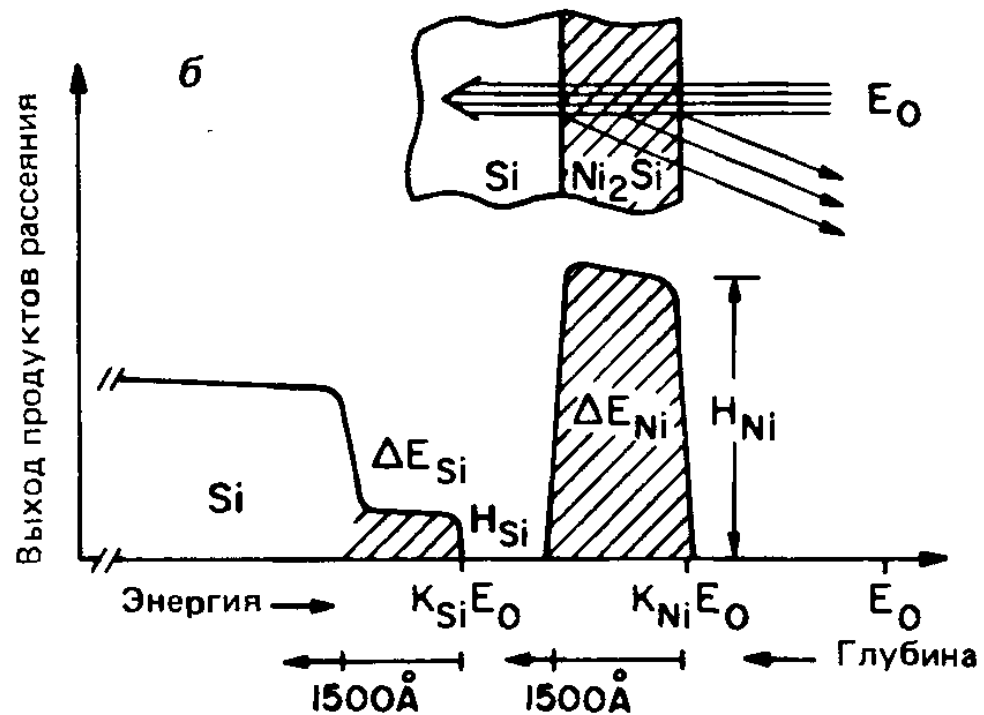
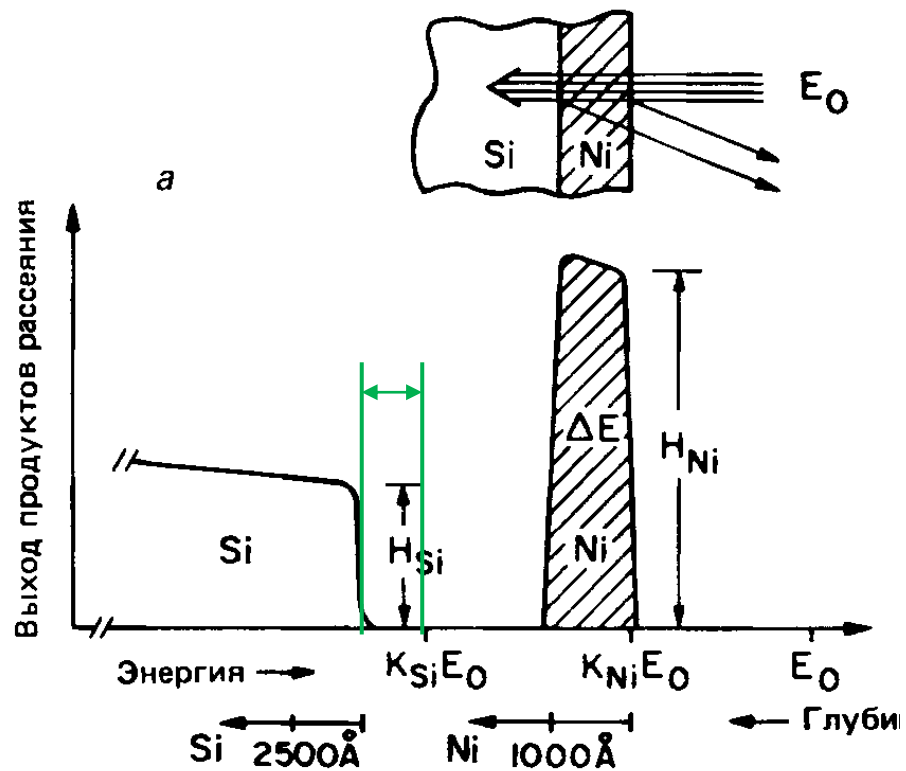
$$Y(t) = \frac{d\sigma}{d\Omega} \cdot \Omega \cdot Q \cdot N \cdot \Delta t$$

$$= k_c^2 \left( \frac{Z_1 Z_2 e^2}{4E(t)} \right)^2 \cdot Q \cdot N \cdot \Delta t \cdot \Omega$$

$$Y(t) \propto \frac{1}{E(t)^2}$$







# Количественный анализ

Относительное содержание элемента  $A$  в материале с химической формулой  $A_mB_n$  определяется как

$$\frac{H_A \cdot \Delta E_A}{H_B \cdot \Delta E_B} = \frac{Y_A}{Y_B} = \frac{d\sigma_A/d\Omega \cdot \Omega \cdot Q \cdot N_A \cdot \Delta t}{d\sigma_B/d\Omega \cdot \Omega \cdot Q \cdot N_B \cdot \Delta t} \approx \frac{d\sigma_A/d\Omega}{d\sigma_B/d\Omega} \cdot \frac{N_A}{N_B} \approx \frac{N_A}{N_B} \cdot \left(\frac{Z_A}{Z_B}\right)^2$$

$$\boxed{\frac{N_A}{N_B} = \left(\frac{H_A}{H_B} \cdot \frac{\Delta E_A}{\Delta E_B}\right)^{-1} \cdot \left(\frac{Z_A}{Z_B}\right)^2 \approx \left(\frac{H_A}{H_B}\right)^{-1} \cdot \left(\frac{Z_A}{Z_B}\right)^2}$$

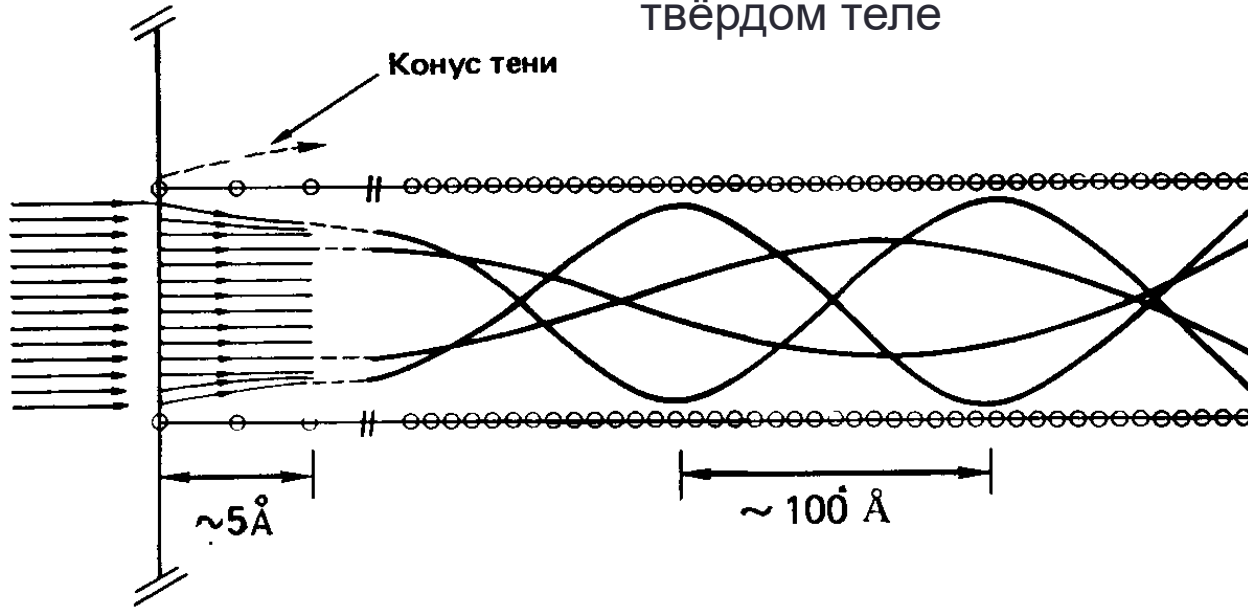
# Расчётное задание № 1 (POP)

Ионы гелия  ${}^4\text{He}^+$  с энергией 2,5 МэВ бомбардируют поверхность плёнки толщиной  $t$ , напылённой на подложку и сверху покрытой тонким слоем металла (толщиной можно пренебречь).

1. Постройте кривые зависимости сечения торможения от энергии иона (от 0,5 до 3 МэВ).
2. Постройте спектр обратного рассеяния, укажите особенности спектра.

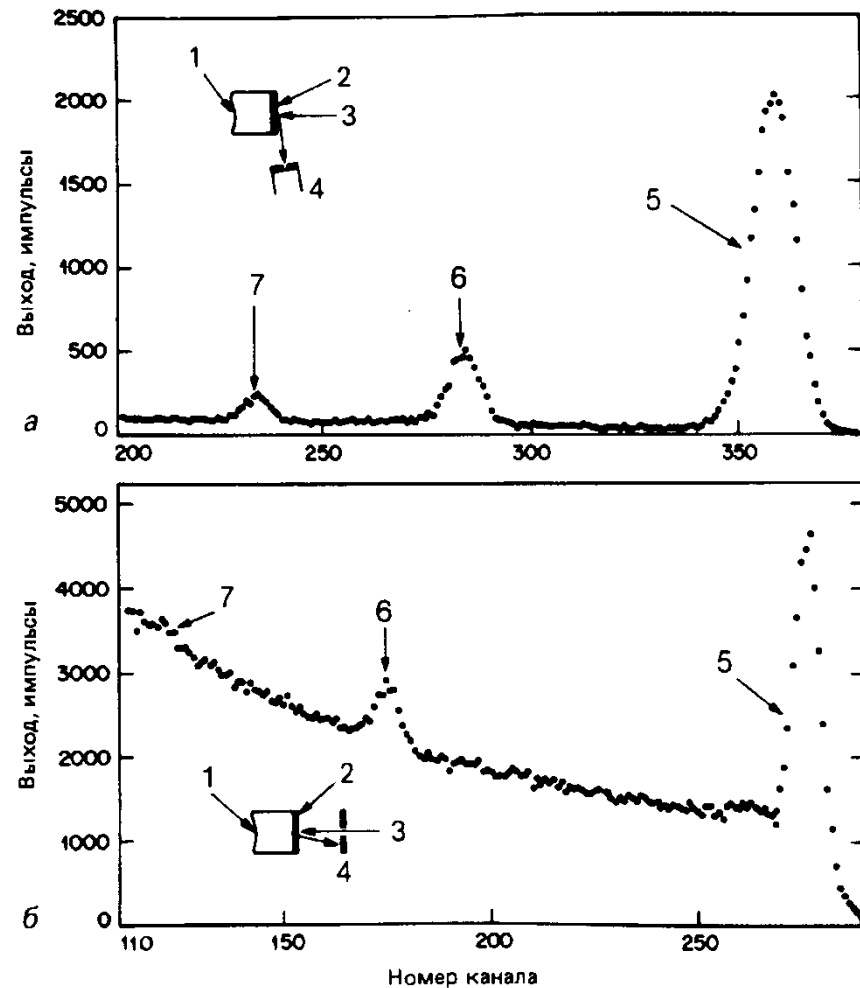
# Каналирование

1965, Линдхард. Каналирование - локализация ионов / электронов в твёрдом теле



Плѐнка  $\text{SiO}_2/\text{Si}$

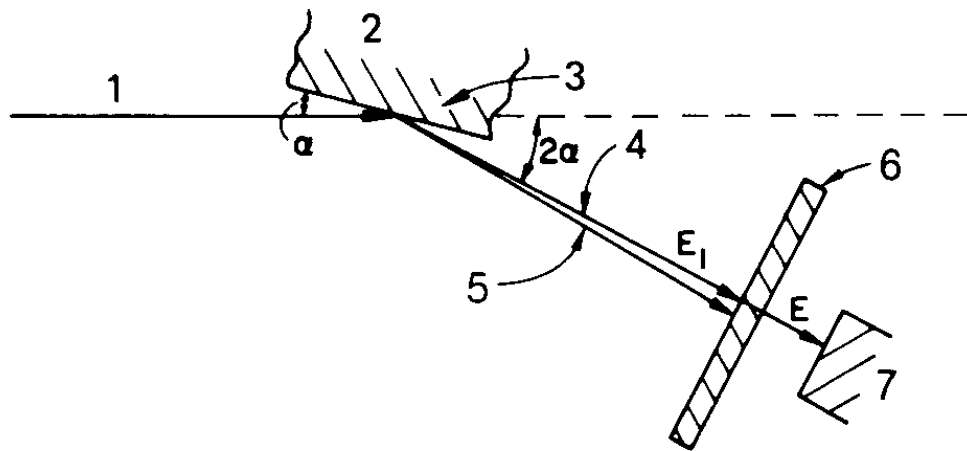
Ориентирование угла падения пучка ионов таким образом, чтобы обеспечивалось каналирование в монокристаллическом кремнии.



# Анализ содержания водорода

- Для анализа лёгких элементов применяется спектрометрия атомов отдачи.
- Измеряется энергия не обратно рассеянных частиц, а ионов отдачи.

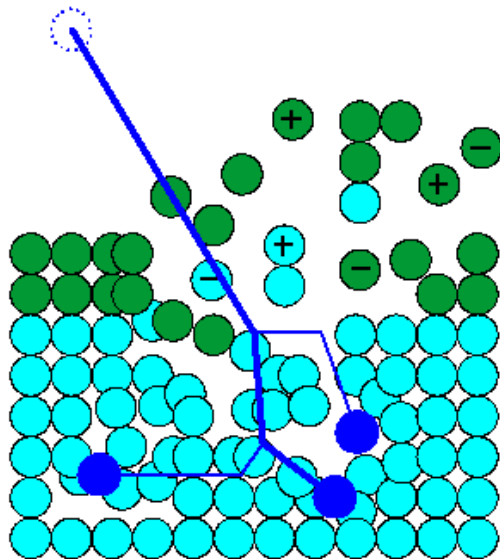
$$E_2 = \frac{4M_1M_2}{(M_1 + M_2)^2} \cdot \cos^2 \varphi \cdot E_0$$





# Предел чувствительности

- Сечение рассеяния  $\frac{d\sigma}{d\Omega} \propto Z_2^2$ , что означает чувствительность к тяжёлым элементам.
- **Распыление.**



# Выход распыления

**Выход распыления**  $Y_s$  – количество атомов, покидающих поверхность мишени, в расчёте на 1 налетающий ион.

$$Y_s = \frac{\Delta N_s \cdot a}{Q},$$

где  $\Delta N_s$  – убыль атомов поверхности, см<sup>-2</sup>;

$a$  – площадь пятна, создаваемая пучком ионов, см<sup>2</sup>;

$Q$  – количество налетающих ионов.

Необходимо, чтобы эрозия была меньше толщины плёнки  $\Delta N_s < N_s$ .

$$Q_D = \frac{d\sigma}{d\Omega} \cdot \Omega \cdot Q \cdot N_s$$

$$\frac{Y_s \cdot Q}{a} < \frac{Q_D}{\frac{d\sigma}{d\Omega} \cdot \Omega \cdot Q}$$

$$Q < \sqrt{\frac{a \cdot Q_D}{Y_s \cdot \frac{d\sigma}{d\Omega} \cdot \Omega}}$$

$$N_s > \sqrt{\frac{Y_s \cdot Q_D}{a \cdot \frac{d\sigma}{d\Omega} \cdot \Omega}}$$

Для плёнки золота ( $Z_2 = 79$ ), бомбардируемой ионами гелия с энергией 2 МэВ, рассеивающимся под углом  $\theta = 170^\circ$ , сечение рассеяния составляет порядка  $\frac{d\sigma}{d\Omega} = 10$  бн/ср, телесный угол захвата детектора при площади поверхности  $1 \text{ см}^2$  и расстоянии от мишени 5 см составляет  $\Omega = 4 \cdot 10^{-2}$  ср. Выход продуктов распыления  $Y_s = 1 \cdot 10^{-3}$ , сечение пучка  $a = 10^{-2} \text{ см}^2$ . Число регистраций  $Q_D = 10^2$ .

$$N_s > 5 \cdot 10^{12} \text{ ат/см}^2 \approx 1/1000 \text{ монослоя}$$

$$Q < 5 \cdot 10^{13} \text{ ионов} \rightarrow I < 0,2 \text{ мкА при } t = 40 \text{ сек}$$

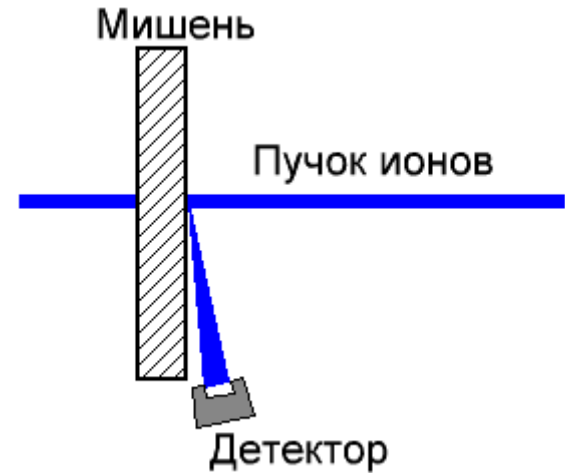
# Разрешение по глубине

Возможность использования спектроскопии РОР для определения изменения состава мишени по глубине определяется разрешением  $\delta t$ , которое связано с разрешением по энергии как:

$$\delta t = \frac{\delta E}{[S]}$$

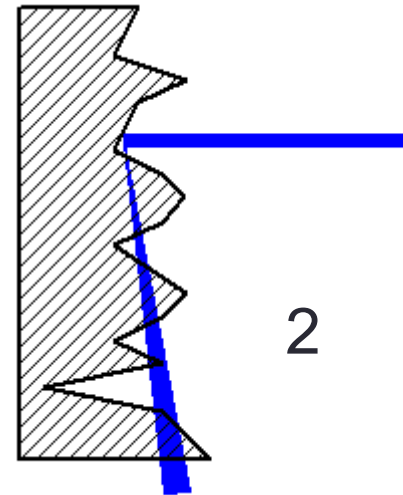
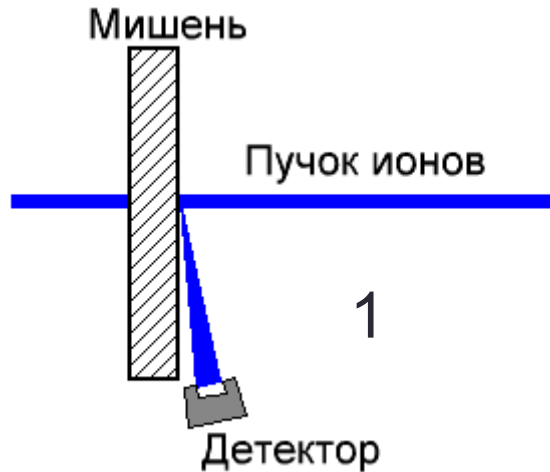
$$\delta t = \frac{\delta E}{[S]} = \frac{\delta E}{K_{M_2} \cdot \left. \frac{dE}{dx} \right|_{E_0} + \frac{1}{|\cos \theta|} \cdot \left. \frac{dE}{dx} \right|_{E_1}}$$

Для увеличения разрешения  $\delta t$  (уменьшения значения) необходимо увеличить потери. Достигается это методом скользящих углов, когда детектирование осуществляется под углом  $\theta \approx 90^\circ$  ( $\cos \theta \rightarrow 0$ ). Разрешение  $\delta t \approx 20 \text{ \AA}$ .



Факторы, ограничивающие разрешение по глубине:

1. Конечный угол захвата детектора.
2. Шероховатость поверхности исследуемого образца.
3. Флуктуация потерь энергии (страгглинг).



Предел разрешения по энергии  $\delta E_1$  устанавливается разрешением детектора  $\delta E_d$  и страгглингом  $\delta E_s$  так, что

$$(\delta E_1)^2 = (\delta E_d)^2 + (\delta E_s)^2.$$

В результате движения ионов вглубь материала происходит потеря энергии. Этот процесс подвержен статистическим флуктуациям. Частицы с одинаковой энергией  $E_0$  после прохождения расстояния  $t$  будут иметь разброс энергии  $\delta E_s$  – энергетический страгглинг.



Распределение частиц по энергиям подчиняется закону Гаусса.

Вероятность то, что частица попадёт в интервал энергий от  $E$  до  $E + dE$  равна

$$p(E)dE = \frac{1}{\sqrt{2\pi\xi^2}} \exp\left(-\frac{E^2}{2\xi^2}\right) dE,$$

где  $\xi$  – среднеквадратичное отклонение.

Формула Бора для энергетического страгглинга:

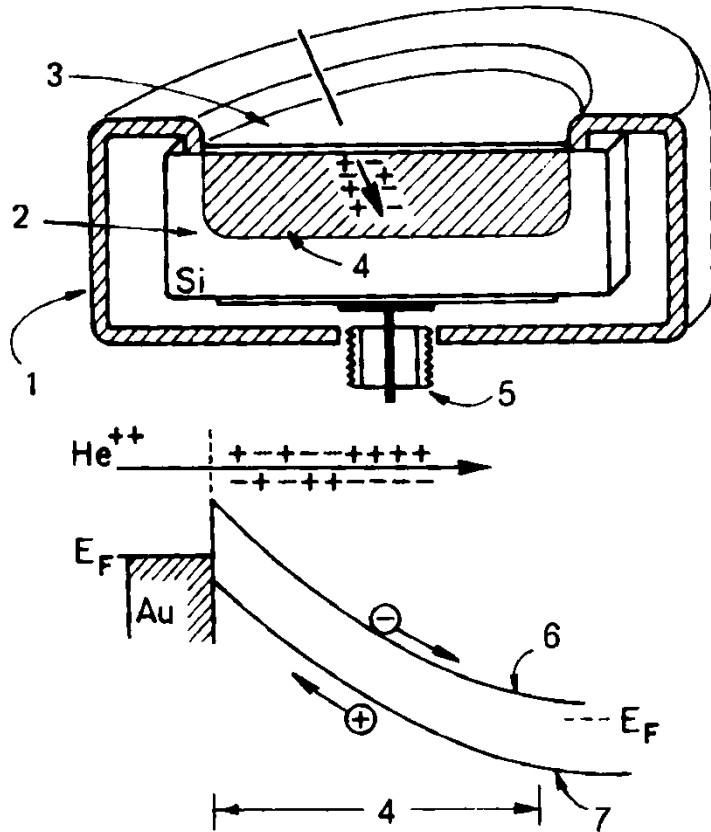
$$\xi^2 = 4\pi k_c^2 Z_1^2 e^4 N Z_2 t.$$

Разрешение составляет  $\delta E_s \approx 2,35\xi$ .

$$\delta E_s \propto Z_1, N, Z_2, t.$$

**Страгглинг** накладывает фундаментальное ограничение на разрешение по глубине.

# Поверхностно-барьерный детектор



Энергия образования электронно-дырочной пары  $E_{обр} \approx 3E_g$  ( 3,8 эВ для Si и 2,9 для Ge).

Число электронно-дырочных пар:

$$N = \frac{E}{E_{обр}}$$

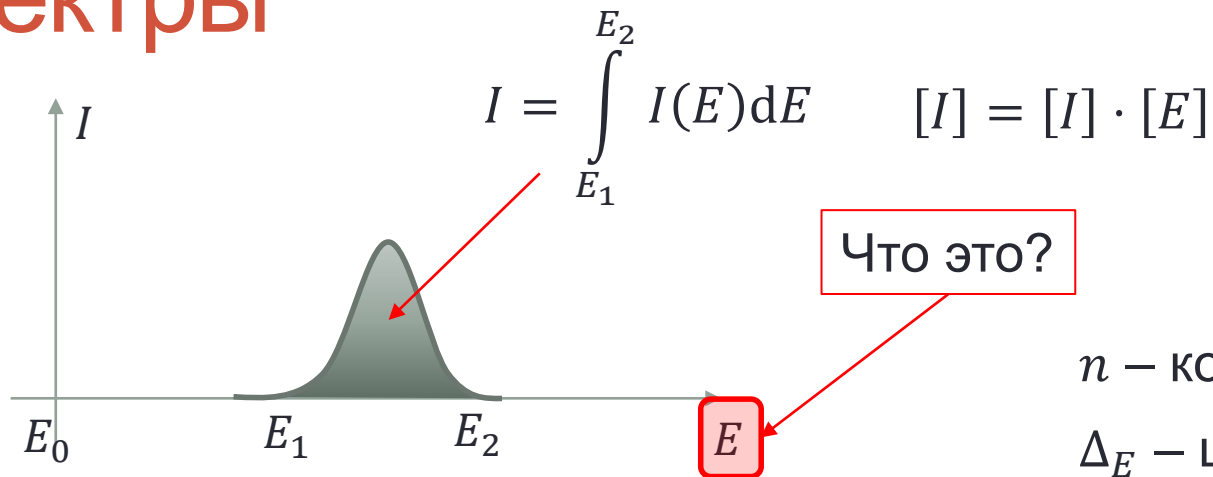
Амплитуда сигнала  $\propto E$ .

Разрешение  $\delta E_d = 10 - 20$  кэВ.

# Поверхностно-барьерный детектор

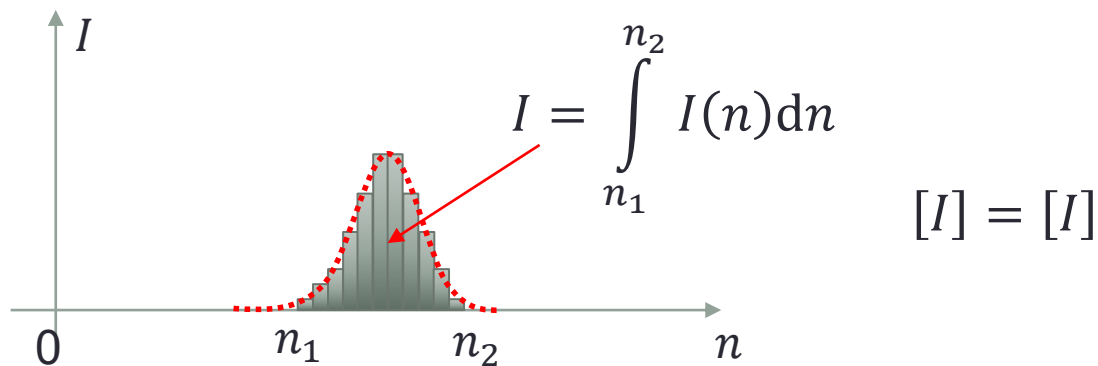


# Спектры



$n$  – количество каналов

$\Delta_E$  – ширина канала



$$E_i = E_0 + i \cdot \Delta_E$$

# Резюме по POP

- Неразрушающий метод.
- Позволяет определить состав материала и распределение элементов по глубине (разрешение по глубине – несколько нм).
- Количественный анализ без эталонов.
- Чувствительность метода: для лёгких элементов – доли % (ат.), для тяжёлых – доли ppm.