

Национальный исследовательский университет "МЭИ"

кафедра
Электроники и нанoeлектроники

Типовой расчёт по курсу:
"Современные методы
исследования
полупроводников"
Вариант №8

Студент: Маринин Н. С.

Группа: ЭР-05м-21

Преподаватель: Баринов АД

Москва 2019

Ионы с энергией 2,5 МэВ бомбардируют поверхность пленки толщиной t , напыленной на подложку и сверху покрытой тонким слоем металла

1. Постройте кривые зависимости сечения торможения от энергии иона для каждого из элементов пленки и подложки, а также для материала самой пленки и подложки в диапазоне энергий от 0,5 до 3 МэВ

2. Постройте спектр обратного рассеяния, укажите особенности спектра (начало, конец, высоту и ширину)

Ток пучка ионов равен 10 мкА, длительность бомбардировки - 30 сек.

Угол рассеяния составляет 170 (градусов). площадь приемного окна детектора составляет 0,1 см², расстояние от мишени до детектора - 5 см. Разрешение детектора принять равным 20 кэВ. Энергия нулевого канала - 0,1 МэВ, ширина канала - 5 кэВ.

Материаллы:

Подложка Ga₂O₃

Пленка VO₂

Толщина пленки 250 нм

Металл In

Ион ⁴He⁺

Размерности в расчете

Постоянная Кулона $k_c := 9 \cdot 10^9 \frac{\text{м}}{\text{Ф}}$

Заряд электрона $q := 1.6 \cdot 10^{-19} \text{coul}$

Масса электрона $m_0 := 9.1 \cdot 10^{-31} \text{kg}$

Число Авогадро $N_a := 6 \cdot 10^{23} \text{mol}^{-1}$

10¹⁵ атомов $\text{atom} := 10^{15}$

Размерности в расчетах

Атомные единицы массы в граммы $\text{aem} := 1.67 \cdot 10^{-24} \text{gm}$

Электрон Вольты в Джоули $\text{eV} := 1.6 \cdot 10^{-19} \text{J}$

Дано:

Начальная энергия частиц	$E_0 := 2.5 \cdot 10^6 \text{eV}$
Толщина пленки	$t_f := 250 \text{nm}$
Ток частиц	$I := 10 \cdot 10^{-6} \text{A}$
Время бомбардировки	$t_{\text{bomb}} := 30 \text{s}$
Угол детектора	$\theta := 170 \cdot \frac{\pi}{180}$
Площадь детектора	$S_d := 0.1 \text{cm}^2$
Расстояние до детектора	$d_{td} := 5 \text{cm}$
Разрешение детектора	$dE := 20 \cdot 10^3 \text{eV}$
Энергия нулевого канала	$E_{ch0} := 0.1 \cdot 10^6 \text{eV}$
Ширина канала	$W_{ch} := 5 \cdot 10^3 \text{eV}$

Атомные массы элементов:

$$M_{\text{He}} := 4 \text{aem} \quad M_{\text{Ga}} := 69.723 \text{aem} \quad M_{\text{O}} := 15.999 \text{aem} \quad M_{\text{V}} := 50.942 \text{aem}$$

$$M_{\text{In}} := 114.820 \cdot \text{aem}$$

$$M_{\text{HeM}} := 4 \frac{\text{gm}}{\text{mol}} \quad M_{\text{GaM}} := 69.723 \frac{\text{gm}}{\text{mol}} \quad M_{\text{OM}} := 15.999 \frac{\text{gm}}{\text{mol}} \quad M_{\text{VM}} := 50.942 \frac{\text{gm}}{\text{mol}}$$

$$M_{\text{InM}} := 114.820 \cdot \frac{\text{gm}}{\text{mol}}$$

$$\text{Молярная масса VO}_2 : \quad M_{\text{VO}_2\text{M}} := M_{\text{VM}} + 2 \cdot M_{\text{OM}} = 82.94 \cdot \frac{\text{gm}}{\text{mol}}$$

$$\text{Молярная масса GaO}_3: \quad M_{\text{Ga}_2\text{O}_3\text{M}} := 2 \cdot M_{\text{GaM}} + 3 \cdot M_{\text{OM}} = 187.443 \cdot \frac{\text{gm}}{\text{mol}}$$

Заряды ядер элементов:

$$Z_{\text{He}} := 2 \quad Z_{\text{Ga}} := 31 \quad Z_{\text{O}} := 8 \quad Z_{\text{V}} := 23 \quad Z_{\text{In}} := 49$$

Плотности:

$$\rho_{\text{In}} := 7.31 \frac{\text{gm}}{\text{cm}^3} \quad \rho_{\text{Ga}_2\text{O}_3} := 6.44 \frac{\text{gm}}{\text{cm}^3} \quad \rho_{\text{VO}_2} := 4.34 \frac{\text{gm}}{\text{cm}^3}$$

Первый пункт

Построить кривые зависимости сечения торможения от энергии иона для каждого из элементов плёнки и подложки, а также для материала само плёнки и подложки на одном графике в диапазоне энергий от 0.5 МэВ до 3 МэВ.

Для определения сечения торможения нужно знать порядковый номер и энергию ионизации атомов мишени.

Сечение торможения

$$\varepsilon(Z, I, E) := k_c^2 \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot Z_{\text{He}}^2 \cdot q^4}{E \cdot \text{eV}} \cdot Z \cdot \frac{M_{\text{He}}}{m_0} \cdot \ln \left(\frac{4 \cdot m_0 \cdot E \cdot \text{eV}}{M_{\text{He}} \cdot I} \right)$$

Средняя энергия возбуждения электрона

$$I_{\text{In}} := 12 \text{eV} \cdot Z_{\text{In}} = 588 \cdot \text{eV}$$

$$I_{\text{V}} := 12 \text{eV} \cdot Z_{\text{V}} = 276 \cdot \text{eV}$$

$$I_{\text{O}} := 12 \text{eV} \cdot Z_{\text{O}} = 96 \cdot \text{eV}$$

$$I_{\text{Ga}} := 12 \text{eV} \cdot Z_{\text{Ga}} = 372 \cdot \text{eV}$$

$$I_{\text{Ga}_2\text{O}_3} := 12 \text{eV} \cdot (2 \cdot Z_{\text{Ga}} + 3 \cdot Z_{\text{O}}) = 1.032 \times 10^3 \cdot \text{eV}$$

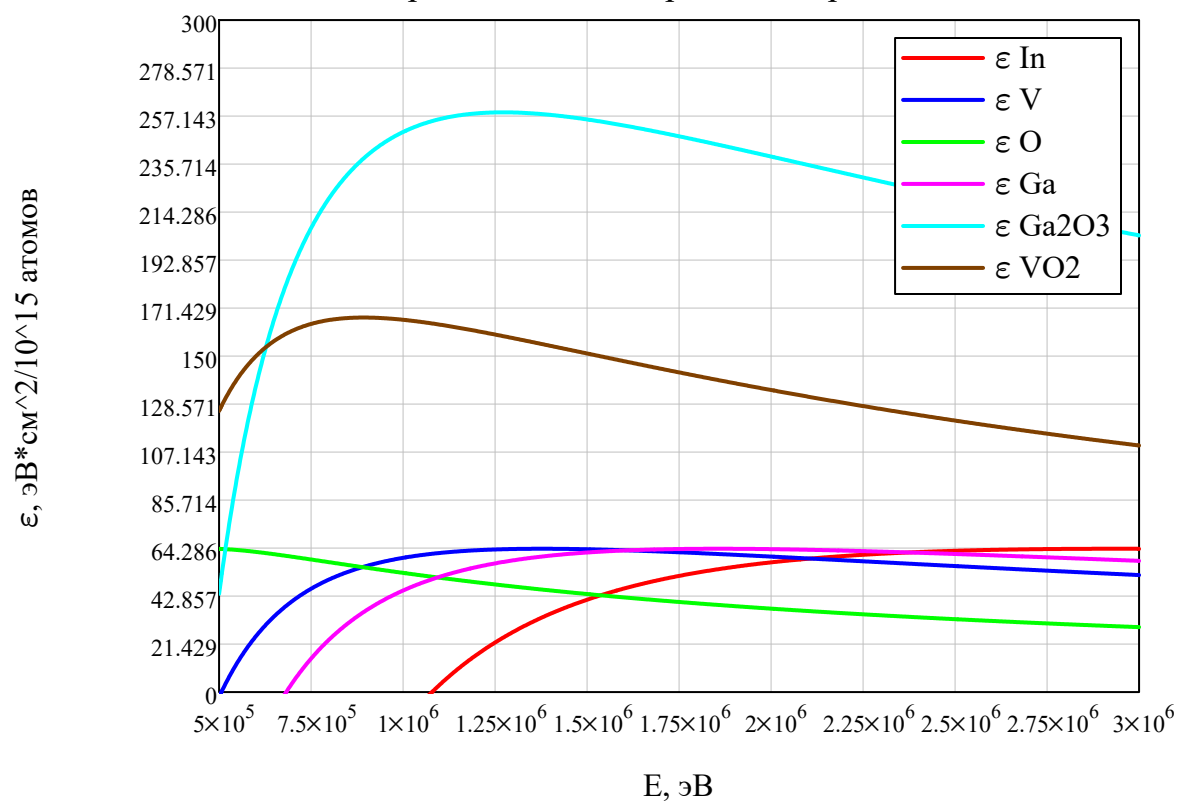
$$I_{\text{VO}_2} := 12 \text{eV} \cdot (Z_{\text{V}} + 2 \cdot Z_{\text{O}}) = 468 \cdot \text{eV}$$

Составной материал

$$\varepsilon_{\text{Ga}_2\text{O}_3}(E) := 2 \varepsilon(Z_{\text{Ga}}, I_{\text{Ga}}, E) + 3 \cdot \varepsilon(Z_{\text{O}}, I_{\text{O}}, E)$$

$$\varepsilon_{\text{VO}_2}(E) := \varepsilon(Z_{\text{V}}, I_{\text{V}}, E) + 2 \cdot \varepsilon(Z_{\text{O}}, I_{\text{O}}, E)$$

Сечения торможения от энергии электрона для элементов



Второй Пункт

Кинематический фактор:

$$K(\mu) := \left[\frac{\cos(\theta) + \sqrt{\mu^2 - (\sin(\theta))^2}}{1 + \mu} \right]^2$$

$$\mu_{Ga} := \frac{M_{Ga}}{M_{He}} = 17.431 \quad K_{Ga} := K(\mu_{Ga}) = 0.796$$

$$\mu_V := \frac{M_V}{M_{He}} = 12.736 \quad K_V := K(\mu_V) = 0.732$$

$$\mu_O := \frac{M_O}{M_{He}} = 4 \quad K_O := K(\mu_O) = 0.363$$

$$\mu_{In} := \frac{M_{In}}{M_{He}} = 28.705 \quad K_{In} := K(\mu_{In}) = 0.871$$

Телесный угол приемника:

$$\Omega := \frac{S_d}{d_{td}^2} = 4 \times 10^{-3}$$

Количество налетающих частиц:

$$Q := \frac{I \cdot t_{bomb}}{q} = 1.875 \times 10^{15}$$

Формула Резерфорда для сечения рассеяния без учета эффекта отдачи (для тяжёлых атомов)

$$d\sigma d\Omega_H(Z, E_0, \mu) := k_c^2 \cdot \left(\frac{Z \cdot Z_{He} \cdot q^2}{4 \cdot E_0} \right)^2 \cdot \frac{1}{\left(\sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \right)^4}$$

Формула Резерфорда для сечения рассеяния с учетом эффекта отдачи (для лёгких атомов)

$$d\sigma d\Omega_L(Z, E_0, \mu) := k_c^2 \cdot \left(\frac{Z \cdot Z_{He} \cdot q^2}{4 \cdot E_0} \right)^2 \cdot \frac{4}{(\sin(\theta))^4} \cdot \frac{\left[\sqrt{1 - \left(\frac{1}{\mu} \cdot \sin(\theta) \right)^2} + \cos \right]}{\sqrt{1 - \left(\frac{1}{\mu} \cdot \sin(\theta) \right)^2}}$$

Выход рассеяния

$$Y(d\sigma d\Omega, N) := d\sigma d\Omega \cdot Q \cdot N \cdot \Omega$$

Высота

$$H(d\sigma d\Omega, E, E_0, N_s, \mu) := \frac{Y(d\sigma d\Omega, N_s)}{\sqrt{4\pi \cdot \left(\frac{dE}{W_{ch}}\right)^2}} \cdot \exp\left[-\frac{(E_0 - E)^2}{2 \cdot dE^2}\right]$$

$$\varepsilon(Z, I, E) := k_c^2 \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot Z_{He}^2 \cdot q^4}{E} \cdot Z \cdot \frac{M_{He}}{m_0} \cdot \ln\left(\frac{4 \cdot m_0 \cdot E}{M_{He} \cdot I}\right)$$

Плотность атомов в веществе

$$N(\rho, M) := N_a \cdot \frac{\rho}{M}$$

Плотность атомов на поверхности

$$N_S(N) := N^{\frac{2}{3}}$$

Скорость потери энергии частицы

$$dEdx(\varepsilon, N) := \varepsilon \cdot N$$

Коэффициент энергетических потерь обратного рассеяния

$$S_{loss}(K, dEdx_{in}, dEdx_{out}) := K \cdot dEdx_{in} + \frac{1}{|\cos(\theta)|} \cdot dEdx_{out}$$

где $dEdx(in)$ -скорость потери энергии при входе, а $dEdx(out)$ - скорость потерь энергии при выходе

Ширина спектра

$$\Delta E(t, S_{loss}) := t \cdot S_{loss}$$

Металл

Плотность атомов в веществе и на поверхности

$$N_{\text{In}} := N(\rho_{\text{In}}, M_{\text{InM}}) = 3.82 \times 10^{22} \cdot \frac{1}{\text{cm}^3}$$

$$N_{\text{s.In}} := N_{\text{S}}(N_{\text{In}}) = 1.134 \times 10^{15} \cdot \frac{1}{\text{cm}^2}$$

Кинематический фактор

$$K_{\text{In}} := K(\mu_{\text{In}}) = 0.871$$

Выходная энергия

$$E_{\text{In}} := E_0 \cdot K_{\text{In}} = 2.177 \times 10^6 \cdot \text{eV}$$

Формула Резерфорда для сечения рассеяния (с учетом эффекта отдачи)

$$d\sigma d\Omega_{\text{In}} := d\sigma d\Omega_{\text{H}}(Z_{\text{In}}, E_{\text{In}}, \mu_{\text{In}}) = 2.667 \cdot \frac{\text{barn}}{\text{sr}}$$

Выход рассеяния

$$Y_{\text{In}} := Y(d\sigma d\Omega_{\text{In}}, N_{\text{s.In}}) = 2.268 \times 10^4$$

Не имея данных о толщине пленки металла, рассчитать разрешение страгглинга нельзя, поэтому примем предел разрешения равным разрешению детектора.

$$dE_{\text{In}} := dE = 2 \times 10^4 \cdot \text{eV}$$

Зная выход рассеяния и предел разрешения, сможем посчитать высоту спектра

$$H_{\text{In}} := H(d\sigma d\Omega_{\text{In}}, E_{\text{In}}, E_0, N_{\text{s.In}}, \mu_{\text{In}}) = 3.669 \times 10^{-54}$$

Тонкая плёнка

Плотность атомов в веществе и на поверхности

$$N_{VO2} := N(\rho_{VO2}, M_{VO2M}) = 3.14 \times 10^{22} \cdot \frac{1}{\text{cm}^3}$$

$$N_{s.VO2} := N_S(N_{VO2}) = 9.952 \times 10^{14} \cdot \frac{1}{\text{cm}^2}$$

$$N_V := \frac{1}{3} \cdot N_{VO2} = 1.047 \times 10^{22} \cdot \frac{1}{\text{cm}^3}$$

$$N_O := \frac{2}{3} \cdot N_{VO2} = 2.093 \times 10^{22} \cdot \frac{1}{\text{cm}^3}$$

Кинематический фактор

$$K_V = 0.732$$

$$K_O = 0.363$$

Выходная энергия

$$E_{V1} := E_0 \cdot K_V = 1.829 \times 10^6 \cdot \text{eV}$$

$$E_{O1} := E_0 \cdot K_O = 9.068 \times 10^5 \cdot \text{eV}$$

Сечение торможения

$$\varepsilon_{V.0} := \varepsilon(Z_V, I_V, E_0) = 56.19 \cdot \frac{\text{eV} \cdot \text{cm}^2}{\text{atom}}$$

$$\varepsilon_{O.0} := \varepsilon(Z_O, I_O, E_0) = 32.472 \cdot \frac{\text{eV} \cdot \text{cm}^2}{\text{atom}}$$

$$\varepsilon_{VO2.0} := \varepsilon_{V.0} + \varepsilon_{O.0} = 88.663 \cdot \frac{\text{eV} \cdot \text{cm}^2}{\text{atom}}$$

$$\varepsilon_{V.1} := \varepsilon(Z_V, I_V, E_{V1}) = 61.767 \cdot \frac{\text{eV} \cdot \text{cm}^2}{\text{atom}}$$

$$\varepsilon_{O.1} := \varepsilon(Z_O, I_O, E_{O1}) = 55.298 \cdot \frac{\text{eV} \cdot \text{cm}^2}{\text{atom}}$$

$$\varepsilon_{VO2.1} := \varepsilon_{V.1} + \varepsilon_{O.1} = 117.065 \cdot \frac{\text{eV} \cdot \text{cm}^2}{\text{atom}}$$

Скорость потери энергии частицы

$$dEdx_{VO2.0} := dEdx(\epsilon_{VO2.0}, N_{VO2}) = 2.784 \times 10^9 \cdot \frac{eV}{cm}$$

$$dEdx_{VO2.1} := dEdx(\epsilon_{VO2.1}, N_{VO2}) = 3.675 \times 10^9 \cdot \frac{eV}{cm}$$

Коэффициент энергетических потерь обратного рассеяния

$$S_{loss.V} := S_{loss}(K_V, dEdx_{VO2.0}, dEdx_{VO2.1}) = 57.69 \cdot \frac{eV}{Angstrom}$$

$$S_{loss.O} := S_{loss}(K_O, dEdx_{VO2.0}, dEdx_{VO2.1}) = 47.418 \cdot \frac{eV}{Angstrom}$$

Ширина спектра

$$\Delta E_V := \Delta E(t_f, S_{loss.V}) = 1.442 \times 10^5 \cdot eV$$

$$\Delta E_O := \Delta E(t_f, S_{loss.O}) = 1.185 \times 10^5 \cdot eV$$

Левая граница спектра

$$E_{V2} := E_{V1} - \Delta E_V = 1.685 \times 10^6 \cdot eV$$

$$E_{O2} := E_{O1} - \Delta E_O = 7.883 \times 10^5 \cdot eV$$

Потеря энергии в плёнке

$$E_{loss.VO2} := dEdx_{VO2.0} \cdot t_f = 6.959 \times 10^4 \cdot eV$$

Формула Резерфорда для сечения рассеяния (с учетом эффекта отдачи)

$$d\sigma d\Omega_V := d\sigma d\Omega_H(Z_V, E_{V1}, \mu_V) = 0.832 \cdot \frac{barn}{sr}$$

$$d\sigma d\Omega_O := d\sigma d\Omega_L(Z_O, E_{O1}, \mu_O) = 0.361 \cdot \frac{barn}{sr}$$

Выход рассеяния

$$Y_V := Y(d\sigma d\Omega_V, N_V) \cdot t_f = 1.633 \times 10^6$$

$$Y_O := Y(d\sigma d\Omega_O, N_O) \cdot t_f = 1.416 \times 10^6$$

Разрешение страгглинга с применением формулы Бора для двух компонентов пленки

$$dE_{s,V} := 2.35 \cdot \sqrt{4 \cdot \pi \cdot k_c^2 \cdot Z_{He}^2 \cdot q^4 \cdot N_V \cdot Z_V \cdot t_f} = 5.885 \times 10^3 \cdot eV$$

$$dE_V := \sqrt{dE_{s,V}^2 + dE^2} = 2.085 \times 10^4 \cdot eV$$

$$dE_{s,O} := 2.35 \cdot \sqrt{4 \cdot \pi \cdot k_c^2 \cdot Z_{He}^2 \cdot q^4 \cdot N_O \cdot Z_O \cdot t_f} = 4.909 \times 10^3 \cdot eV$$

$$dE_O := \sqrt{dE_{s,O}^2 + dE^2} = 2.059 \times 10^4 \cdot eV$$

Подложка

Плотность атомов в веществе и на поверхности

$$N_{\text{Ga}_2\text{O}_3} := N(\rho_{\text{Ga}_2\text{O}_3}, M_{\text{Ga}_2\text{O}_3\text{M}}) = 2.061 \times 10^{22} \cdot \frac{1}{\text{cm}^3}$$

$$N_{\text{s.Ga}_2\text{O}_3} := N_{\text{S}}(N_{\text{Ga}_2\text{O}_3}) = 7.518 \times 10^{14} \cdot \frac{1}{\text{cm}^2}$$

$$N_{\text{Ga}} := \frac{2}{5} \cdot N_{\text{Ga}_2\text{O}_3} = 8.246 \times 10^{21} \cdot \frac{1}{\text{cm}^3}$$

$$N_{\text{O.sub}} := \frac{3}{5} \cdot N_{\text{Ga}_2\text{O}_3} = 1.237 \times 10^{22} \cdot \frac{1}{\text{cm}^3}$$

Кинематический фактор

$$K_{\text{Ga}} = 0.796$$

$$K_{\text{O}} = 0.363$$

Выходная энергия

До подложки будет доходить частично рассеяная на плёнке энергия

$$\varepsilon_{\text{temp}}(Z, I, E) := \varepsilon(Z, I, E) + \varepsilon(Z, I, E)$$

$$\varepsilon_{\text{VO2.0.Ga}} := \varepsilon_{\text{temp}}[Z_V, I_V, (E_0 - E_{\text{loss.VO2}}) \cdot K_{\text{Ga}}] = 121.897 \cdot \frac{\text{eV} \cdot \text{cm}^2}{\text{atom}}$$

$$\varepsilon_{\text{VO2.0.O}} := \varepsilon_{\text{temp}}[Z_V, I_V, (E_0 - E_{\text{loss.VO2}}) \cdot K_{\text{O}}] = 110.622 \cdot \frac{\text{eV} \cdot \text{cm}^2}{\text{atom}}$$

$$dEdx_{\text{Ga}} := dEdx(\varepsilon_{\text{VO2.0.Ga}}, N_{\text{VO2}}) = 3.827 \times 10^9 \cdot \frac{\text{eV}}{\text{cm}}$$

$$dEdx_{\text{O}} := dEdx(\varepsilon_{\text{VO2.0.O}}, N_{\text{VO2}}) = 3.473 \times 10^9 \cdot \frac{\text{eV}}{\text{cm}}$$

$$E_{\text{Ga1}} := K_{\text{Ga}} \cdot (E_0 - E_{\text{loss.VO2}}) - \frac{1}{|\cos(\theta)|} \cdot dEdx_{\text{Ga}} \cdot t_f = 1.838 \times 10^6 \cdot \text{eV}$$

$$E_{\text{O1.sub}} := K_{\text{O}} \cdot (E_0 - E_{\text{loss.VO2}}) - \frac{1}{|\cos(\theta)|} \cdot dEdx_{\text{O}} \cdot t_f = 7.934 \times 10^5 \cdot \text{eV}$$

Сечение торможения

$$\varepsilon_{\text{Ga.0}} := \varepsilon(Z_{\text{Ga}}, I_{\text{Ga}}, E_0) = 61.575 \cdot \frac{\text{eV} \cdot \text{cm}^2}{\text{atom}}$$

$$\varepsilon_{\text{O.0.sub}} := \varepsilon(Z_{\text{O}}, I_{\text{O}}, E_0) = 32.472 \cdot \frac{\text{eV} \cdot \text{cm}^2}{\text{atom}}$$

$$\varepsilon_{\text{Ga2O3.0}} := \varepsilon_{\text{Ga.0}} + \varepsilon_{\text{O.0.sub}} = 94.047 \cdot \frac{\text{eV} \cdot \text{cm}^2}{\text{atom}}$$

$$\varepsilon_{\text{Ga.1}} := \varepsilon(Z_{\text{Ga}}, I_{\text{Ga}}, E_{\text{Ga1}}) = 63.904 \cdot \frac{\text{eV} \cdot \text{cm}^2}{\text{atom}}$$

$$\varepsilon_{\text{O.1.sub}} := \varepsilon(Z_{\text{O}}, I_{\text{O}}, E_{\text{O1.sub}}) = 58.048 \cdot \frac{\text{eV} \cdot \text{cm}^2}{\text{atom}}$$

$$\varepsilon_{\text{Ga2O3.1}} := \varepsilon_{\text{Ga.1}} + \varepsilon_{\text{O.1.sub}} = 121.952 \cdot \frac{\text{eV} \cdot \text{cm}^2}{\text{atom}}$$

Скорость потери энергии частицы

$$d\text{Edx}_{\text{Ga2O3.0}} := d\text{Edx}(\varepsilon_{\text{Ga2O3.0}}, N_{\text{Ga2O3}}) = 1.939 \times 10^9 \cdot \frac{\text{eV}}{\text{cm}}$$

$$d\text{Edx}_{\text{Ga2O3.1}} := d\text{Edx}(\varepsilon_{\text{Ga2O3.1}}, N_{\text{Ga2O3}}) = 2.514 \times 10^9 \cdot \frac{\text{eV}}{\text{cm}}$$

Коэффициент энергетических потерь обратного рассеяния

$$S_{\text{loss.Ga}} := S_{\text{loss}}(K_V, d\text{Edx}_{\text{Ga2O3.0}}, d\text{Edx}_{\text{Ga2O3.1}}) = 39.714 \cdot \frac{\text{eV}}{\text{Angstrom}}$$

$$S_{\text{loss.O.sub}} := S_{\text{loss}}(K_O, d\text{Edx}_{\text{Ga2O3.0}}, d\text{Edx}_{\text{Ga2O3.1}}) = 32.56 \cdot \frac{\text{eV}}{\text{Angstrom}}$$

Ширина спектра

$$\Delta E_{Ga} := \Delta E(t_f, S_{loss.Ga}) = 9.928 \times 10^4 \cdot \text{eV}$$

$$\Delta E_{O.sub} := \Delta E(t_f, S_{loss.O.sub}) = 8.14 \times 10^4 \cdot \text{eV}$$

Левая граница спектра

$$E_{Ga2} := E_{Ga1} - \Delta E_{Ga} = 1.738 \times 10^6 \cdot \text{eV}$$

$$E_{O2.sub} := E_{O1.sub} - \Delta E_{O.sub} = 7.12 \times 10^5 \cdot \text{eV}$$

Формула Резерфорда для сечения рассеяния (с учетом эффекта отдачи)

$$d\sigma d\Omega_{Ga} := d\sigma d\Omega_H(Z_{Ga}, E_{Ga1}, \mu_V) = 1.498 \cdot \frac{\text{barn}}{\text{sr}}$$

$$d\sigma d\Omega_{O.sub} := d\sigma d\Omega_L(Z_O, E_{O1.sub}, \mu_O) = 0.471 \cdot \frac{\text{barn}}{\text{sr}}$$

Выход рассеяния

$$Y_{Ga} := Y(d\sigma d\Omega_{Ga}, N_S(N_{Ga})) = 4.585 \times 10^3$$

$$Y_{O.sub} := Y(d\sigma d\Omega_{O.sub}, N_S(N_{O.sub})) = 1.89 \times 10^3$$

Не имея данных о толщине пленки металла, рассчитать разрешение страгглинга нельзя, поэтому примем предел разрешения равным разрешению детектора.

$$dE_{Ge} := dE = 2 \times 10^4 \cdot \text{eV}$$

Построение графиков

Энергия нулевого канала

$$E_{ch0} = 1 \times 10^5 \cdot \text{eV}$$

Ширина канала

$$W_{ch} = 5 \times 10^3 \cdot \text{eV}$$

Во всех случаях предел разрешения примем равным разрешению детектора. Так как в единственном случае учёта страгглина результат мало отличается от разрешения детектора.

Полное число каналов

$$n(E) := \text{ceil}\left(\frac{E - E_{ch0}}{W_{ch}}\right)$$

$$n_{In} := n(E_{In}) = 416$$

$$\sigma := \frac{dE}{W_{ch}} = 4 \quad \text{Дисперсия}$$

$$\mu := n_{In} = 416 \quad \text{Математическое ожидание}$$

$$n_{V1} := n(E_{V1}) = 346$$

$$n_{O1} := n(E_{O1}) = 162$$

$$n_{V2} := n(E_{V2}) = 318$$

$$n_{O2} := n(E_{O2}) = 138$$

$$\Delta n_V := n_{V1} - n_{V2} = 28$$

$$\Delta n_O := n_{O1} - n_{O2} = 24$$

$$n_{Ga1} := n(E_{Ga1}) = 348$$

$$n_{O1.sub} := n(E_{O1.sub}) = 139$$

$$n_{Ga2} := 0$$

$$n_{O2.sub} := 0$$

$$\Delta n_{Ga} := n_{Ga1} - n_{Ga2} = 348$$

$$\Delta n_{O2.sub} := n_{O1.sub} - n_{O2.sub} = 139$$

$$n_V := n_{V2} .. n_{V1}$$

$$n_O := n_{O2} .. n_{O1}$$

$$n_{Ga} := n_{Ga2} .. n_{Ga1}$$

$$n_{O.sub} := n_{O2.sub} .. n_{O1.sub}$$

Распределение Гаусса

$$f_{\text{Gauss}}(n, \mu, \sigma) := \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{n - \mu}{\sigma}\right)^2\right]$$

Функция для построения спектра

$$Y_n(n, n_2, n_1, Y) := \begin{cases} n_0 \leftarrow n_2 + \left(\frac{n_1 - n_2}{2}\right) \\ Y_n \leftarrow Y \cdot f_{\text{Gauss}}(n_2, n_2, \sigma) \cdot \left(\frac{n_0}{n}\right)^2 & \text{if } n_2 < n < n_1 \\ Y_n \leftarrow Y \cdot f_{\text{Gauss}}(n, n_2, \sigma) & \text{if } n \leq n_2 \\ Y_n \leftarrow Y \cdot f_{\text{Gauss}}(n, n_1, \sigma) & \text{if } n \geq n_1 \\ Y_n \leftarrow 0 & \text{otherwise} \\ Y_n \end{cases}$$

Средний выход рассеяния

$$E_{\text{av}}(E_2, \Delta E) := E_2 + \frac{\Delta E}{2}$$

$$E_{V.\text{av}} := E_{\text{av}}(E_{V2}, \Delta E_V) = 1.757 \times 10^6 \text{ eV}$$

$$E_{O.\text{av}} := E_{\text{av}}(E_{O2}, \Delta E_O) = 8.475 \times 10^5 \text{ eV}$$

$$E_{\text{Ga.av}} := E_{\text{av}}(E_{\text{Ga}2}, \Delta E_{\text{Ga}}) = 1.788 \times 10^6 \text{ eV}$$

$$E_{O.\text{sub.av}} := E_{\text{av}}(E_{O2.\text{sub}}, \Delta E_{O.\text{sub}}) = 7.527 \times 10^5 \text{ eV}$$

$$d\sigma d\Omega_{V.\text{av}} := d\sigma d\Omega_H(Z_V, E_{V.\text{av}}, \mu_V) = 0.902 \cdot \frac{\text{barn}}{\text{sr}}$$

$$d\sigma d\Omega_{O.\text{av}} := d\sigma d\Omega_L(Z_O, E_{O.\text{av}}, \mu_O) = 0.413 \cdot \frac{\text{barn}}{\text{sr}}$$

$$d\sigma d\Omega_{\text{Ga.av}} := d\sigma d\Omega_H(Z_{\text{Ga}}, E_{\text{Ga.av}}, \mu_{\text{Ga}}) = 1.582 \cdot \frac{\text{barn}}{\text{sr}}$$

$$d\sigma d\Omega_{O.\text{sub.av}} := d\sigma d\Omega_L(Z_O, E_{O.\text{sub.av}}, \mu_O) = 0.524 \cdot \frac{\text{barn}}{\text{sr}}$$

$$Y_{V.av} := Y(d\sigma d\Omega_{V.av}, N_V) \cdot t_f = 1.77 \times 10^6$$

$$Y_{O.av} := Y(d\sigma d\Omega_{O.av}, N_V) \cdot t_f = 8.103 \times 10^5$$

$$Y_{Ga.av} := Y(d\sigma d\Omega_{Ga.av}, N_S(N_{Ga})) = 4.843 \times 10^3$$

$$Y_{O.sub.av} := Y(d\sigma d\Omega_{O.sub.av}, N_S(N_{O.sub})) = 2.1 \times 10^3$$

Полный спектр

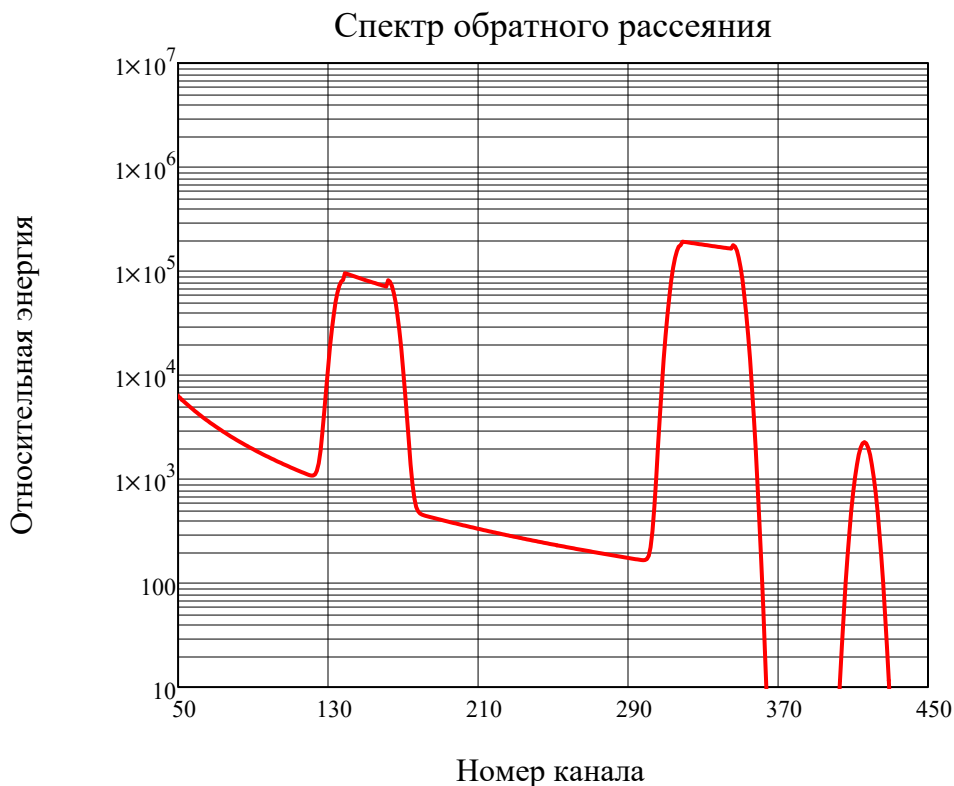
$$n := 0, 1 \dots 500$$

$$Y_{All.1}(n) := Y_{In} \cdot f_{Gauss}(n, \mu, \sigma)$$

$$Y_{All.2}(n) := Y_n(n, n_{V2}, n_{V1}, Y_{V.av}) + Y_n(n, n_{O2}, n_{O1}, Y_{O.av})$$

$$Y_{All.3}(n) := Y_n(n, n_{Ga2}, n_{Ga1}, Y_{Ga.av}) + Y_n(n, n_{O2.sub}, n_{O1.sub}, Y_{O.sub.av})$$

$$Y_{All}(n) := Y_{All.1}(n) + Y_{All.2}(n) + Y_{All.3}(n)$$



Как видно можно заметить спектр от атомов кислорода VO2 (первый пик) и атомов ванадия (второй пик), металла - индия (третий) и спектр от Ga2O3 подложки.

$$\underline{(\theta)}^2$$

