

Министерство образования и науки Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МЭИ»
Институт Радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова
Кафедра электроники и нанoeлектроники

Лабораторная работа
по дисциплине
Современные методы исследования поверхности полупроводников
Тема: Резерфордское обратное рассеяние

Студент гр.
ЭР-05м-21

Маринин Н.С.

(подпись)

Преподаватель

Баринов А.Д.

(подпись)

Москва 2022

1. Оглавление

2. Исходные данные	3
3. Задание	4
4. Расчёт.....	5
4.1. Построить кривые зависимости сечения торможения от энергии иона для каждого из элементов плёнки и подложки, а также для материала самой плёнки и подложки на одном графике в диапазоне энергий от 0,5 до 3 МэВ	5
4.2. Постройте спектр обратного рассеяния, укажите особенности спектра (начало, конец, высоту и ширину)	7
4.2.1. Металл IN.....	9
4.2.2. Плёнка VO ₂	10
4.2.3. Подложка Ga ₂ O ₃	12
4.2.4. Построение спектра	14

2. Исходные данные

№	ФИО студента	Подложка	Плёнка	Толщина плёнки t , нм	Металл	Ион
8	Маринин Н.С.	Ga2O3	VO2	200	In	${}^1\text{He}^+$

Константы:

Элементарный электрический заряд: $e = 1.6 \cdot 10^{-19}$ Кл

Молярная масса электронов: $m_0 = 0.00055$ г/моль

Число Авогадро: $N_A = 6.022 \cdot 10^{23}$ моль $^{-1}$

Коэффициент пропорциональности: $k_c = 9 \cdot 10^9$ м/Ф

Параметры элементов и материалов:

	He	In	V	O	Ga	VO2	Ga2O3
Атомный номер Z	2	49	23	8	31	--	--
Молярная масса M, г/моль	4	115	51	16	70	83	188
Плотность ρ, г/см3	0.0001	7.31	--	--	--	4.34	6.44

3. Задание

Ионы ${}^4\text{He}^+$ с энергией $E_0 = 2.5$ МэВ бомбардируют поверхность плёнки VO_2 толщиной $t = 250$ нм, напылённой на подложку Ga_2O_3 и сверху покрытой тонким слоем металла In .

Ток пучка ионов $I_0 = 10$ мкА, длительность бомбардировки $\tau = 30$ сек. Угол рассеяния составляет $\theta = 170^\circ$. Площадь приёмного окна детектора составляет $A = 0.1$ см², расстояние от мишени до детектора $L = 5$ см. Разрешение детектора принять равным $\delta E_d = 20$ кэВ. Энергия нулевого канала $E_{n0} = 0.1$ МэВ, ширина канала $\Delta E_n = 5$ кэВ.

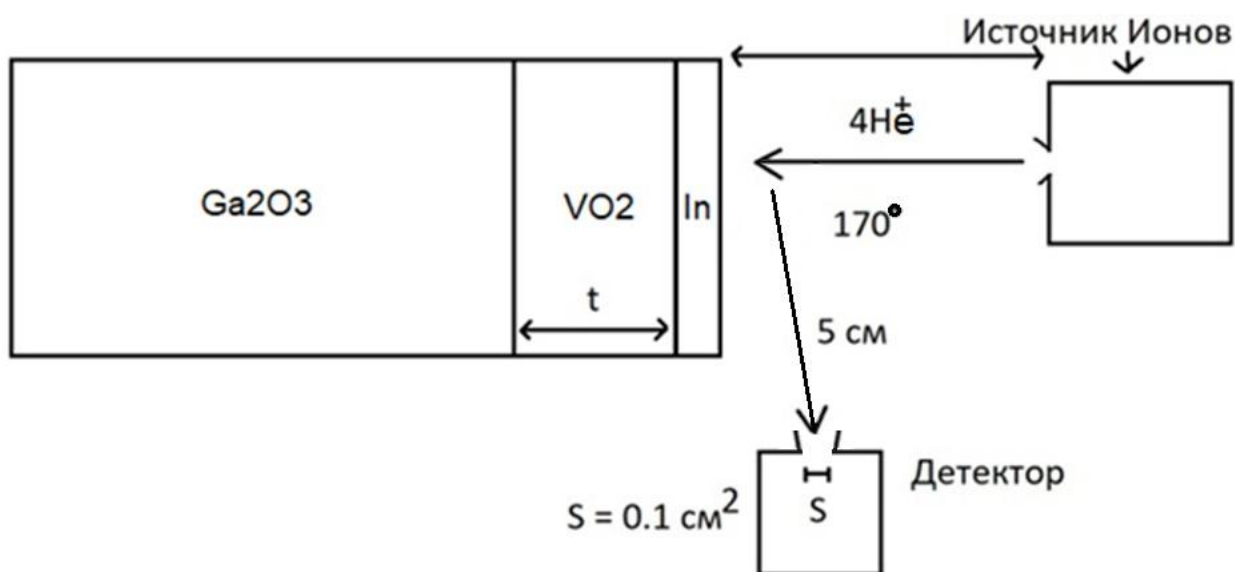


Рисунок 1 Подложка Ga_2O_3 с напылённой на неё плёнкой VO_2 и покрытой сверху тонким слоем металла In

4. Расчёт

4.1. Построить кривые зависимости сечения торможения от энергии иона для каждого из элементов плёнки и подложки, а также для материала самой плёнки и подложки на одном графике в диапазоне энергий от 0,5 до 3 МэВ

Средняя энергия возбуждения электрона:

$$I = n \cdot Z \quad (1)$$

где n меняется от 10 до 12 в зависимости от Z атома.

По формуле (1):

	In	V	Ga	O	VO2	Ga2O3
I, эВ	490	253	341	96	390	860

Зависимость сечения торможения от энергии E иона ${}^4\text{He}^+$ для элементов плёнки и подложки (Z и I – для соответствующего элемента):

$$\varepsilon(E) = k_c^2 \cdot \frac{2\pi \cdot Z_H^2 \cdot e^4}{E} \cdot Z \cdot \frac{M_H}{m_0} \cdot \ln \left(\frac{4 \cdot m_0 \cdot E}{M_{He} \cdot I} \right) \quad (2)$$

Исходя из формулы (2) и используя правило Брегга, получаем зависимость сечения торможения от энергии иона ${}^4\text{He}^+$ для материала самой плёнки и подложки соответственно:

$$\varepsilon_{VO2}(E) = \varepsilon_V(E) + 2\varepsilon_O(E) \quad \text{и} \quad \varepsilon_{Ga2O3}(E) = 2\varepsilon_{Ga}(E) + 3\varepsilon_O(E) \quad (3)$$

По формулам (2) и (3) построим зависимости сечения торможения от энергии иона:

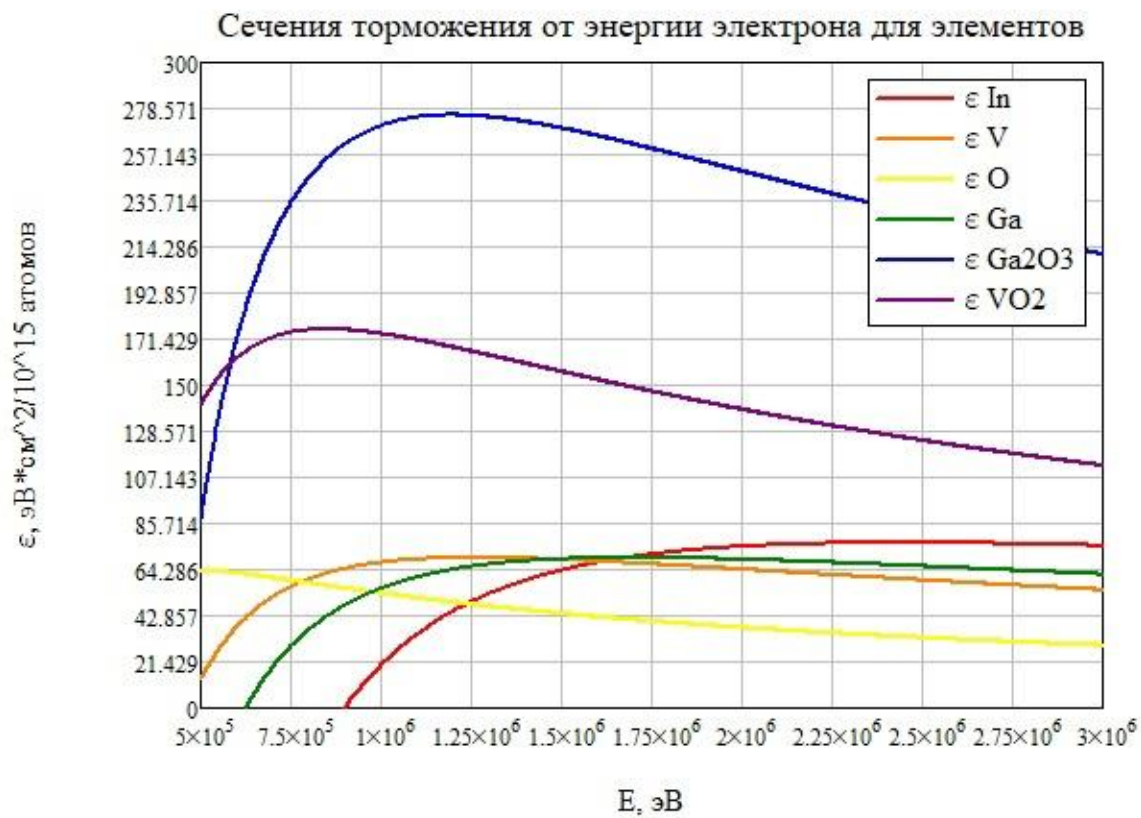


Рисунок 2 Зависимость сечения торможения от энергии иона для плёнки VO2

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

Ниже приведены формулы для расчета всего необходимого в данном расчёте:

Количество падающих ионов: $Q = \frac{I_0 \cdot \tau}{e} = 1.875 \cdot 10^{15}$.

Вероятность рассеяния в телесный угол: $\Omega = \frac{A}{L^2} = 4 \cdot 10^{-3}$ ср.

Концентрация атомов мишени:

$$N = \frac{N_A}{M} \cdot \rho \quad (4)$$

Кинематический фактор (M – молярная масса атомов мишени):

$$K = \left(\frac{\cos \theta + \sqrt{|\mu^2 - \sin^2 \theta|}}{1 + \mu} \right)^2 \quad (5)$$

где μ – отношение массы элементов к массе атома гелия.

Энергия после соударения:

$$E = E_0 \cdot K \quad (6)$$

Формула Резерфорда для расчёта сечения рассеяния при $M \gg M_{He}$ и поправка:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = k_c^2 \cdot \left(\frac{Z_H \cdot Z \cdot e^2}{4 \cdot E} \right)^2 \cdot \left(\sin \frac{\theta}{2} \right)^{-4} \quad \text{и} \quad 2 \cdot \left(\frac{M_{He}}{M} \right)^2 \quad (7)$$

Выход рассеяния (высота спектра):

$$Y = \frac{d\sigma}{d\Omega} \cdot \Omega \cdot Q \cdot N \cdot t = \frac{d\sigma}{d\Omega} \cdot \Omega \cdot Q \cdot (N)^{\frac{2}{3}} \quad (8)$$

Скорость потерь энергии:

$$\frac{dE}{dx} = \varepsilon \cdot N \quad (9)$$

где сечения торможения вычисляется по (2)

Коэффициент энергетических потерь обратного рассеяния:

$$[S] = K \cdot \frac{dE}{dx_{E_{\text{вх}}}} + \frac{1}{|\cos \theta|} \cdot \frac{dE}{dx_{E_{\text{вых}}}} \quad (10)$$

Ширина спектра:

$$\Delta E = [S] \cdot t = [S] \cdot N_s = [S] \cdot N^{2/3} \quad (11)$$

Левая граница спектра:

$$E_2 = E_1 - \Delta E \quad (12)$$

Разрешение по энергии:

$$\delta E^2 = \delta E_d^2 + \delta E_s^2 \quad (13)$$

где δE_s – разрешение от страгглинга.

4.2.1. Металл IN

Плѐнка металла очень тонкая, следовательно, толщиной пренебрегают.

Воспользовавшись вышеизложенными формулами получим следующие параметры:

(4) концентрация атомов мишени: $N_{In} = 3.82 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$

(5) кинематический фактор: $K_{In} = 0.871$

(6) Энергия после соударения: $E_{In} = 2.177 \text{ МэВ}$

(7) сечение рассеяния при энергии $E = E_0$: $\frac{d\sigma}{d\Omega_{In}} = 2.667 \frac{\text{барн}}{\text{ср}}$

(8) выход рассеяния: $Y_{In} = 2.268 \cdot 10^4$

Разрешение по энергии: $\delta E^2 = \delta E_d^2 + \delta E_s^2$, так как толщина металла бесконечно мала и равна нулю, то разрешением по энергии от страгглинга δE_s можно пренебречь, тогда: $\delta E = \delta E_d = 20 \text{ кэВ}$.

4.2.2. Плёнка VO2

Воспользовавшись вышеизложенными формулами получим следующие параметры:

(3) сечение торможения:	$\varepsilon_V(E_0) = 59.252 \frac{\text{эВ} \cdot \text{см}^2}{10^{15} \text{ атом}}$
	$\varepsilon_O(E_0) = 34.472 \frac{\text{эВ} \cdot \text{см}^2}{10^{15} \text{ атом}}$
	$\varepsilon_{VO_2}(E_0) = 91.725 \frac{\text{эВ} \cdot \text{см}^2}{10^{15} \text{ атом}}$
	$\varepsilon_V(E_1) = 65.952 \frac{\text{эВ} \cdot \text{см}^2}{10^{15} \text{ атом}}$
	$\varepsilon_O(E_1) = 55.298 \frac{\text{эВ} \cdot \text{см}^2}{10^{15} \text{ атом}}$
	$\varepsilon_{VO_2}(E_1) = 121.25 \frac{\text{эВ} \cdot \text{см}^2}{10^{15} \text{ атом}}$
(4) концентрация атомов мишени:	$N_{VO_2} = 3.14 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$
	$N_V = 1.047 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$
	$N_O = 2.093 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$
(5) кинематический фактор:	$K_V = 0.732$
	$K_O = 0.363$
(6) Энергия после соударения:	$E_{V1} = 1.829 \text{ МэВ}$
(правая граница спектра)	$E_{O1} = 0.906 \text{ МэВ}$
(7) сечение рассеяния:	$\frac{d\sigma}{d\Omega_V} = 0.832 \frac{\text{барн}}{\text{ср}}$
	$\frac{d\sigma}{d\Omega_O} = 0.361 \frac{\text{барн}}{\text{ср}}$
(8) выход рассеяния:	$Y_V = 1.633 \cdot 10^6$
	$Y_O = 1.416 \cdot 10^6$
(9) скорость потерь энергии:	$\frac{dE}{dx_{VO_2E_0}} = 28.798 \frac{\text{эВ}}{\text{А}}$
	$\frac{dE}{dx_{VO_2E_1}} = 38.068 \frac{\text{эВ}}{\text{А}}$

(10) коэффициент энергетических потерь: $S_V = 59.728 \frac{\text{эВ}}{\text{А}}$

$$S_O = 49.101 \frac{\text{эВ}}{\text{А}}$$

(11) ширина спектра:

$$\Delta E_V = 0.149 \text{ МэВ}$$

$$\Delta E_O = 0,123 \text{ МэВ}$$

(12) левая граница спектра:

$$E_{V2} = 1.68 \text{ МэВ}$$

$$E_{O2} = 0.784 \text{ МэВ}$$

(14) разрешение по энергии:

$$\delta E = 20.059 \text{ кэВ}$$

4.2.3. Подложка Ga2O3

При расчете сечения торможения необходимо учесть потерю энергии на торможении в плёнке, и брать значение энергии не E_0 , а E'_0 :

$$E'_0 = E_0 - E_{loss}, \text{ где } E_{loss} = \frac{dE}{dx_{thinfilm, E_0}} \cdot t_f \quad (14)$$

Также изменится и формула расчёта энергии после соударения:

$$E_1 = K \cdot E'_0 - \frac{1}{|\cos \theta|} \cdot \frac{dE}{dx_{thinfilm, E'_0}} \cdot t_f \quad (15)$$

Далее воспользовавшись вышеизложенными формулами получим следующие параметры:

(3) сечение торможения:

$$\varepsilon_{Ga}(E'_0) = 66.223 \frac{\text{эВ} \cdot \text{см}^2}{10^{15} \text{ атом}}$$

$$\varepsilon_O(E'_0) = 33.067 \frac{\text{эВ} \cdot \text{см}^2}{10^{15} \text{ атом}}$$

$$\varepsilon_{Ga2O3}(E'_0) = 99.29 \frac{\text{эВ} \cdot \text{см}^2}{10^{15} \text{ атом}}$$

$$\varepsilon_{Ga}(E_1) = 69.541 \frac{\text{эВ} \cdot \text{см}^2}{10^{15} \text{ атом}}$$

$$\varepsilon_O(E_1) = 58.408 \frac{\text{эВ} \cdot \text{см}^2}{10^{15} \text{ атом}}$$

$$\varepsilon_{Ga2O3}(E_1) = 127.95 \frac{\text{эВ} \cdot \text{см}^2}{10^{15} \text{ атом}}$$

(4) концентрация атомов мишени:

$$N_{Ga2O3} = 2.061 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$$

$$N_{Ga} = 8.246 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$$

$$N_O = 1.237 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$$

(5) кинематический фактор:

$$K_{Ga} = 0.796$$

$$K_O = 0.363$$

(16) Энергия после соударения:

$$E_{Ga1} = 1.83 \text{ МэВ}$$

(правая граница спектра)

$$E_{O1} = 0.779 \text{ МэВ}$$

- (7) сечение рассеяния: $\frac{d\sigma}{d\Omega_{Ga}} = 1.511 \frac{\text{барн}}{\text{ср}}$
 $\frac{d\sigma}{d\Omega_O} = 0.489 \frac{\text{барн}}{\text{ср}}$
- (8) выход рассеяния: $Y_{Ga} = 4.626 \cdot 10^3$
 $Y_O = 1.962 \cdot 10^3$
- (9) скорость потерь энергии: $\frac{dE}{dx_{Ga2O3E_0}} = 20.47 \frac{\text{эВ}}{\text{\AA}}$
 $\frac{dE}{dx_{Ga2O3E_1}} = 26.38 \frac{\text{эВ}}{\text{\AA}}$
- (10) коэффициент энергетических потерь: $S_{Ga} = 41.76 \frac{\text{эВ}}{\text{\AA}}$
 $S_O = 34.207 \frac{\text{эВ}}{\text{\AA}}$
- (11) ширина спектра: $\Delta E_{Ga} = 0.104 \text{ МэВ}$
 $\Delta E_O = 0,855 \text{ МэВ}$
- (12) левая граница спектра: $E_{Ga2} = 1.725 \text{ МэВ}$
 $E_{O2} = 6.932 \text{ МэВ}$
- (13) высота спектра: $H_{Ga} =$
- (14) разрешение по энергии: $\delta E = 20 \text{ кэВ}$

4.2.4. Построение спектра

Для построения спектра необходимо учитывать, что поток ионов регистрируется детектором с конечными параметрами приёма, а именно:

Разрешение детектора: $\delta E_d = 20$ кэВ

Энергия нулевого канала: $E_{n0} = 0.1$ МэВ

Ширина канала: $\Delta E_n = 5$ кэВ.

Поэтому необходимо произвести перерасчёт с учётом данных параметров по каналам.

Граница канала по границе спектра:

$$n_{1,2} = \text{ceil} \left(\frac{E_{1,2} - E_{n0}}{\Delta E_n} \right) \quad (16)$$

Также для построения используется распределение Гаусса:

$$\rho(n, \mu, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma^2} \cdot \exp \left[-\frac{1}{2} \frac{(n - \mu)^2}{\sigma^2} \right] \quad (17)$$

где математическое ожидание берётся равным границе спектра, дисперсия $\sigma = \frac{\delta E}{\Delta E_n}$.

Итоговая функция для построения:

$$Y_{nspectr}(n) = \bar{Y} \cdot \rho(n, n, \sigma) \cdot \left(\frac{\bar{n}}{n} \right)^2, n_2 < n < n_1$$

$$Y_{nspectr}(n) = \bar{Y} \cdot \rho(n, n_2, \sigma), n \leq n_2$$

$$Y_{nspectr}(n) = \bar{Y} \cdot \rho(n, n_1, \sigma) \cdot \left(\frac{\bar{n}}{n_1} \right)^2, n \geq n_2$$

\bar{Y} - среднее значение выхода рассеяния, что использует в своём вычислении среднюю энергию (по схожей формуле вычисляется и \bar{n}):

$$E_{av} = E_2 + \Delta E / 2 \quad (18)$$

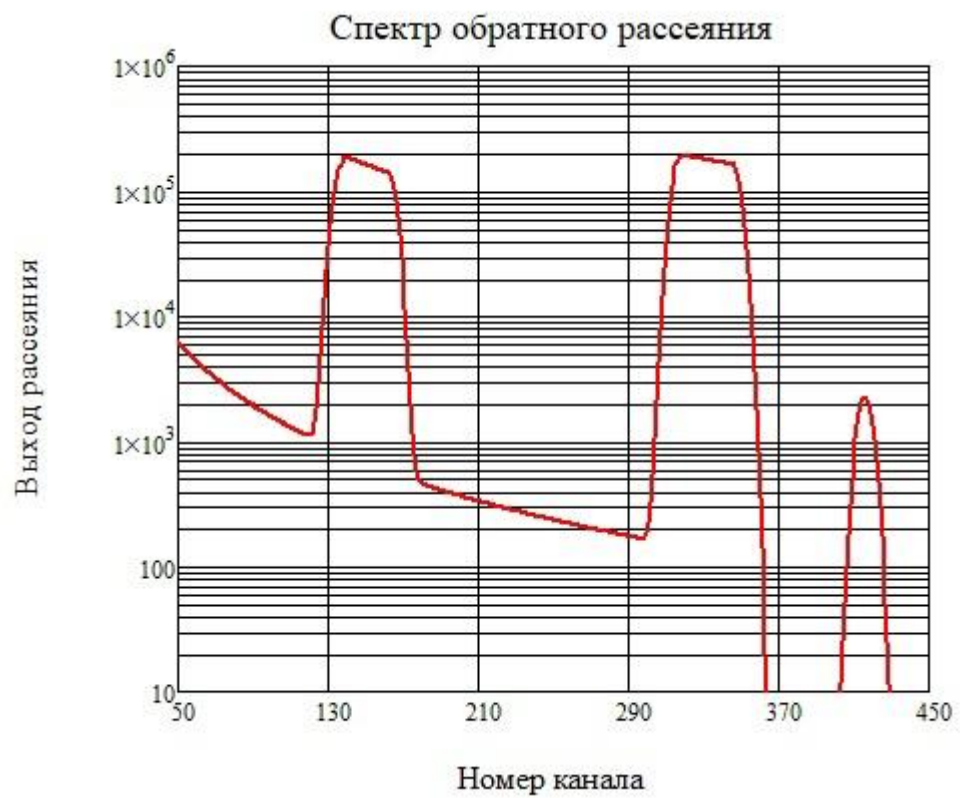


Рисунок 3 Общий спектр обратного рассеяния по каналам