

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання комплексної практичної роботи:

«Профілі розподілу імплантованих частинок і виділеної енергії у твердих тілах» з навчальних дисциплін «Радіаційна стійкість матеріалів», «Фізика взаємодії прискорених частинок з твердим тілом», «Плазмова та радіаційна поверхнева взаємодія матеріалів в екстремальних умовах» для студентів денної та заочної форми навчання за спеціальністю «Прикладна фізика та наноматеріали»

Затверджено
редакційно-видавничою
радою університету,
протокол № 2 від 26.06.2025 р.

Харків
НТУ «ХП»

2025

Методичні вказівки до виконання комплексної практичної роботи «Профілі розподілу імплантованих частинок і виділеної енергії у твердих тілах» з навчальних дисциплін «Радіаційна стійкість матеріалів», «Фізика взаємодії прискорених частинок з твердим тілом», «Плазмова та радіаційна поверхнева взаємодія матеріалів в екстремальних умовах» для студентів денної та заочної форми навчання за спеціальністю «Прикладна фізика та наноматеріали»/ Зубарев Є.М., Малихін С.В., Сіпатов О.Ю., Конотопський Л.Є. – Харків: НТУ «ХП», 2025. – 14 с.

Укладачі: Є. М. Зубарев

С. В. Малихін

О. Ю. Сіпатов

Л. Є. Конотопський

Рецензент: В.В. Старіков

Кафедра фізики металів та напівпровідників.

Вступ

Дане видання є методичними вказівками до практичної роботи «Профілі розподілу імплантованих частинок і виділеної енергії у твердих тілах» за курсом «Радіаційна стійкість матеріалів».

Мета роботи – набуття практичних навичок застосування таблиць розподілу пробігів, радіаційних дефектів та виділеної енергії у твердих тілах при іонній імплантації.

Завдяки розширенню сфери застосування пучків заряджених частинок у науці та техніці стали більш інтенсивними дослідження процесів взаємодії прискорених іонів із речовиною, головним чином із твердими тілами. Найзначнішим досягненням у цьому науково-технічному напрямі є широке застосування іонної імплантації у технології виробництва елементів мікроелектроніки, зокрема надвеликих інтегральних схем (НВІС). Іонна імплантація застосовується також для модифікації поверхні відповідальних конструкційних елементів виробів точної механіки, що дозволяє отримати унікальні фізичні властивості: міцності, трибологічні, хімічні та магнітні. Для цілеспрямованого вибору технологічних режимів, що забезпечують планомірне створення необхідного виду концентраційного профілю легуючих елементів та радіаційних порушень на заданій глибині, потрібна точна інформація про просторовий розподіл проникних іонів та енергії, виділеної в каскаді зіткнень з атомами твердого тіла. За допомогою розроблених останнім часом експериментальних методів можна досить точно визначати профілі іонно-імплантованої домішки та радіаційних дефектів. Однак у експериментальних дослідженнях неможливо охопити все різноманіття комбінацій іон-мішень, що зустрічаються на практиці, при різних енергіях імплантації. Основним джерелом отримання теоретичної інформації про розподіл пробігів іонів та виділеної енергії в твердому тілі є метод Ліндхарда [1, 2], який у 70-ті роки ХХ століття отримав подальший розвиток. При цьому основна увага була зосереджена на уточненні параметрів пружного та непружного гальмування прискорених іонів у твердому тілі, розробці

чисельних методів та програм розрахунків, створення таблиць розподілу проникних іонів та виділеної енергії у каскадах зіткнень. Параметри розподілу іонно-імплантованих домішок та енергії, виділеної в пружних та непружних зіткненнях, представлені в таблицях, складених авторами робіт [1, 2].

1. Таблиці розподілу енергії та домішки при іонній імплантації

Кожна таблиця містить параметри просторового розподілу пробігів і енергії, виділеної в пружних і непружних процесах зіткнення, при імплантації певного сорту іонів в однокомпонентну мішень. У верхніх рядках кожної таблиці наведені основні характеристики матеріалу мішені, позначені індексом 2, іонів, що імплантуються, позначені індексом 1 (табл. 1.1).

У першому рядку, що характеризує мішень, назва матеріалу мішені, заряд ядра (атомний номер) атомів мішені $Z2$, маса атомів мішені, виражена в атомних одиницях маси ($1 \text{ а.о.м.} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$), $M2$ та атомна концентрація $N2 \cdot 10^{-22} \text{ атом/см}^3$, далі $N2$.

У другому рядку, що характеризує імплантовані іони, назва іонів, заряд ядра (атомний номер) іона $Z1$, маса іона, виражена в атомних одиницях маси, $M1$ і коефіцієнт передачі енергії $GAMMA = 4M1 \cdot M2 / (M1 + M2)^2$ – максимальна частка енергії, що передається при пружному лобовому зіткненні.

Таблиця 1.1 – Іони гелію-4 в залізі

мішень: залізо $Z2 = 26$ $M2 = 55,85$ $N2 = 8,50$											
іон: гелій - 4 $Z1 = 2$ $M1 = 4$ $GAMMA = 0,249$											
$CE = 1,814E - 01$ $CRO = 1,410E - 02$ $KE = 0,861$ $RL = 1,000$											
E	NU	RPR	RPD	RPI	$DRPR$	$DRPD$	$DRPI$	DYR	SKR	SKD	SKI
1	0,40	4,04	3,50	3,33	4,9	3,5	3,3	4,8	-0,1	0,3	0,4
3	0,99	10,17	8,53	7,87	10,1	7,4	6,9	10,0	-0,2	0,2	0,4
5	1,42	16,53	13,64	12,24	14,2	10,8	9,8	14,4	-0,2	0,2	0,4
10	2,20	32,96	26,60	22,66	22,7	18,2	16,4	23,6	-0,4	0,1	0,4
20	3,13	65,99	52,36	41,55	34,9	30,4	27,7	38,1	-0,6	-0,1	0,4
30	3,71	97,82	77,11	58,28	43,6	40,6	37,7	49,3	-0,8	-0,2	0,3

40	4,13	128,2	100,7	73,38	50,3	49,8	46,9	58,5	-0,9	-0,3	0,3
60	4,71	184,7	144,9	100,0	60,1	65,7	63,5	73,0	-1,1	-0,4	0,3
80	5,11	236,6	185,8	123,3	67,2	79,7	78,5	84,2	-1,3	-0,5	0,3
100	5,41	284,9	224,1	144,3	72,7	92,3	92,2	93,2	-1,4	-0,6	0,3
150	5,94	393,9	311,5	189,9	82,3	120	123	110	-1,7	-0,8	0,3
200	6,29	491,2	390,5	229,5	88,9	144	149	123	-1,9	-0,9	0,3

Примітка. Фрагмент таблиці моментів просторового розподілу, що наводиться у роботі [2]

У третьому рядку представлені коефіцієнти переведення енергії E та довжини R у безрозмірні одиниці Ліндхарда ε і ρ :

$$\varepsilon = CE \cdot E, \quad \rho = CRO \cdot R, \quad (1)$$

де коефіцієнт CE має розмірність keV^{-1} , а CRO – nm^{-1} . У цьому рядку дано значення коефіцієнта електронного гальмування KE і відношення RL прийнятого при розрахунках коефіцієнта електронного гальмування до стандартного значення за формулою Ліндхарда-Шарфа:

$$k_e = \frac{8\pi a_0 \xi z_1 z_2 e^2}{v_0 (z_1^{2/3} + z_2^{2/3})^{3/2}} \quad (2)$$

де a_0 - радіус Бору ($0,53 \text{ \AA}$); v_0 - швидкість електрона на борівській орбіті ($2 \cdot 10^6 \text{ м/с}$); $\xi = (1 \div 2)$ та змінюється як $Z_I^{1/6}$. Коефіцієнт RL враховує осциляції непружного гальмування, обумовлені дискретністю електронних оболонок, при $Z_{1,2} \lesssim 20$.

Основну частину кожної таблиці поділено на 12 колонок. У таблицях використано прийняте у програмуванні позначення показника ступеня десяти, наприклад, $E-02$ для величин типу 10^{-2} . У першій колонці надруковані значення енергії E іонів, які бомбардують мішень, в кілоелектронвольтах (keV), далі E_I . У другій колонці – частина енергії NU , передана в пружних зіткненнях, далі $\nu(E)$, також у кілоелектронвольтах. Наступні колонки є параметрами просторового розподілу пробігів іонів і енергії, виділеної в пружних і непружних зіткненнях з урахуванням розсіювання енергії каскадом

зіткнень. Позначення такі: RPR – середній проективний пробіг, далі R_{pR} ; RPD – середня глибина просторового розподілу енергії, виділеної в пружних зіткненнях, далі R_{pD} ; RPI – середня глибина просторового розподілу енергії, виділеної в електронну підсистему, далі R_{pI} ; $DRPR$ – середньоквадратичний розкид проективних пробігів (страглінг пробігів), далі ΔR_{pR} ; $DRPD$ – середньоквадратичний розкид по глибині просторового розподілу енергії, виділеної в пружних зіткненнях, далі ΔR_{pD} ; $DRPI$ – середньоквадратичний розкид по глибині просторового розподілу енергії, виділеної в електронну підсистему, далі ΔR_{pI} ; DYR – середньоквадратичний розкид пробігів іонів у поперечному напрямку (середньоквадратичне проникнення іонів під край абсолютно різкої непроникної маски), далі $\Delta Y_R = \Delta R_{\perp} / \sqrt{2}$; SKR – асиметрія профілю проникнення іонів, далі S_{kR} ; SKD – асиметрія профілю глибинного розподілу енергії, виділеної в пружних зіткненнях, далі S_{kD} ; SKI – асиметрія профілю глибинного розподілу енергії, виділеної в електронну підсистему, далі S_{kI} . Величини R_{pR} , R_{pD} , R_{pI} , ΔR_{pR} , ΔR_{pD} , ΔR_{pI} , ΔY_R мають розмірність довжини і виражені в нанометрах. Параметри асиметрії S_{kR} , S_{kD} , S_{kI} безрозмірні.

2. Побудова глибинних профілів

Наведені в таблицях параметри просторового розподілу дозволяють побудувати глибинні профілі проникнення іонів і виділеної в мішені енергії з урахуванням їх асиметрії. Як приклад, розглянемо побудову глибинних профілів для іонів ${}^4\text{He}^+$, що імплантуються в залізо з енергією $E_I = 10$ кеВ (дивися зазначений рядок у таблиці 1.1).

Для побудови глибинних профілів застосовується функція розподілу Пірсона IV типу (табл. 2.1). Кожна колонка таблиць розподілу Пірсона відповідає одному значенню асиметрії, а кожен рядок – певній глибині X . Слід наголосити, що табличні значення функції розподілу $F^H(X)$ та глибини X є безрозмірними величинами.

Таблиця 2.1 - Розподіли Пірсона

Sk	0,0	-0,1	-0,2	-0,3	-0,4
β_2	3,000	3,029	3,115	3,260	3,462
$ \Delta_M /\Delta R_P$	0,0	0,050	0,097	0,139	0,176
$F^{\Pi}(R_M)$	1,000	1,003	1,011	1,023	1,039
X			$F^{\Pi}(X)$		
-6,0	1,523 E-08	3,212 E-07	3,400 E-06	1,860 E-05	6,186 E-05
-5,0	3,727 E-06	2,051 E-05	8,031 E-05	2,234 E-04	4,718 E-04
-4,0	3,355 E-04	7,519 E-04	1,455 E-03	2,433 E-03	3,552 E-03
-3,0	1,111 E-02	1,463 E-02	1,827 E-02	2,267 E-02	2,459 E-02
-2,0	1,353 E-01	1,388 E-01	1,404 E-01	1,403 E-02	1,390 E-01
-1,0	6,065 E-01	5,864 E-01	5,665 E-01	5,476 E-01	5,300 E-01
-0,6	8,353 E-01	8,142 E-01	7,950 E-01	7,779 E-01	7,628 E-01
-0,4	9,231 E-01	9,069 E-01	8,932 E-01	8,818 E-01	8,725 E-01
-0,2	9,802 E-01	9,719 E-01	9,666 E-01	9,636 E-01	9,628 E-01
-0,1	9,950 E-01	9,616 E-01	9,910 E-01	9,929 E-01	9,969 E-01
0,0	1,000	1,002	1,006	1,013	1,022
0,1	9,950 E-01	1,002	1,011	1,022	1,036
0,2	9,802 E-01	9,931 E-01	1,005	1,021	1,039
0,3	9,560 E-01	9,713 E-01	9,890 E-01	1,009	1,030
0,4	9,231 E-01	9,418 E-01	9,627 E-01	9,854 E-01	1,009
0,5	8,825 E-01	9,037 E-01	9,269 E-01	9,514 E-01	9,767 E-01
0,6	8,353 E-01	8,582 E-01	8,824 E-01	9,076 E-01	9,332 E-01
0,7	7,827 E-01	8,062 E-01	8,306 E-01	8,554 E-01	8,800 E-01
0,8	7,262 E-01	7,494 E-01	7,728 E-01	7,961 E-01	8,186 E-01
1,0	6,065 E-01	6,266 E-01	6,456 E-01	6,633 E-01	6,791 E-01
1,5	3,247 E-01	3,295 E-01	3,316 E-01	3,307 E-01	3,271 E-01
2,0	1,353 E-01	1,298 E-01	1,226 E-01	1,142 E-01	1,052 E-01
3,0	1,111 E-02	8,075 E-03	5,752 E-03	4,146 E-03	3,115 E-03

Примітка. Початок таблиці функції розподілу Пірсона IV типу, що наводиться у роботі [2]

Вказана також відповідна кожному значенню асиметрії Sk величина ексцесу β_2 , різниця між модальним і проективним пробігом $|\Delta_M|$, віднесена до

значення середньоквадратичного розкиду R_p , і максимальне значення функції розподілу $F''(R_M)$ на глибині модального пробігу R_M .

У таблицях значення функції розподілу Пірсона IV типу $F''(X)$ наведено в залежності від безрозмірної глибини X , яка пов'язана з конкретними параметрами даного розподілу, вираженими в нанометрах, таким співвідношенням:

$$X = (x - R_p) / \Delta R_p, \quad (3)$$

де x - глибина, що відраховується від поверхні мішені; R_p – величина проективного пробігу; ΔR_p – середньоквадратичний розкид пробігів. Функція $F''(X)$ нормована так, що

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} F''(X) dX = 1 \quad (4)$$

Зазначимо, що таблиці побудовані тільки для нульових та негативних значень асиметрії $-20 \leq Sk \leq 0$. У той же час необхідні розподіли можуть мати як негативну, так і позитивну асиметрію (табл. 1.1). Для поширення даних таблиці 2.1 область $Sk > 0$ і формалізації обчислень, необхідно модифікувати вираз (3), перегрупувавши члени і додавши множник $(-1)^\alpha$, що дозволяє при необхідності розгорнути гілки розподілу Пірсона щодо положення проективного пробігу R_p :

$$x = (-1)^\alpha \Delta R_p X + R_p \quad (5)$$

де $\alpha = \text{sgn}(|Sk| + Sk)$ – неелементарна функція *signum* (сигнум) – «знак» ($|Sk| + Sk$), яка в області $Sk \leq 0$ приймає значення $\alpha = 0$, а в області позитивної асиметрії ($Sk > 0$) значення $\alpha = 1$.

Після модифікації виразу (3) знак асиметрії враховується тільки при обчисленні $\alpha(R)$, $\alpha(D)$ та $\alpha(I)$ відповідно до трьох останніх колонок таблиці моментів просторового розподілу (Sk_R , Sk_D , Sk_I у таблиці 1.1). В той же час, можна не брати до уваги знак асиметрії в таблиці функцій розподілу Пірсона (табл. 2.1) і послідовно підставляти (5) значення безрозмірної глибини X , не змінюючи їх знак.

При імплантації іонів ${}^4\text{He}^+$ з енергією $E = 10$ кеВ залізо асиметрія розподілів приймає такі значення: $Sk_R = -0,4$, $Sk_D = 0,1$, $Sk_I = 0,4$, а показники ступеня $\alpha(R) = 0$, $\alpha(D) = \alpha(I) = 1$. Щоб уникнути інтерполяції табличних значень функції розподілу $F^{\Pi}(X)$ при побудові глибинних профілів, рекомендується розраховувати глибину x_i (у нм) використовуючи послідовно розташовані (згори донизу) у таблиці 2.1 величини X_i :

$$\begin{aligned}x_{Ri} &= (-1)^{\alpha(R)} \Delta R_{pR} X_i + R_{pR}, \\x_{Di} &= (-1)^{\alpha(D)} \Delta R_{pD} X_i + R_{pD}, \\x_{Ii} &= (-1)^{\alpha(I)} \Delta R_{pI} X_i + R_{pI},\end{aligned}\tag{6}$$

для розподілу домішки (індекс R) та енергії, виділеної в пружних (індекс D) та непружних (індекс I) зіткненнях, відповідно. У прикладі (${}^4\text{He}^+ \rightarrow \text{Fe}$, $E_I = 10$ кэВ) $R_{pR} = 32,96$ нм, $\Delta R_{pR} = 22,7$ нм, $\Delta R_{pD} = 26,60$ нм, $\Delta R_{pI} = 18,2$ нм, $R_{pI} = 22,66$ нм, $\Delta R_{pI} = 16,4$ нм.

Профіль концентрації іонно-імплантованої домішки описується за допомогою виразу:

$$n(x_{Ri}) = \frac{10^7 D}{\Delta R_{pR} \sqrt{2\pi}} F^{\Pi}(x_i)\tag{7}$$

де D – доза проникних іонів, іон/см², а $F^{\Pi}(x_i)$ – значення табульованої функції Пірсона з асиметрією $Sk_R = -0,4$. Концентрація домішки $n(x_{Ri})$ у виразі (7) виходить в одиницях іон/см³, оскільки величина середньоквадратичного розкиду ΔR_{pR} дана в нм.

Якщо задана максимальна концентрація домішки $n(R_M)$, що відповідає модальному пробігу R_M , то необхідна доза імплантації може бути оцінена за такою формулою:

$$D = \frac{n(R_M) \Delta R_{pR} \sqrt{2\pi}}{10^7 F^{\Pi}(R_M)},\tag{8}$$

де $F^{\Pi}(R_M)$ – значення функції Пірсона на глибині R_M (четвертий рядок таблиці 2.1 розподілу Пірсона). В прикладі, який розглядається, (${}^4\text{He}^+ \rightarrow \text{Fe}$, $E_I = 10$ кэВ) $F^{\Pi}(R_M) = 1,039$.

Профіль розподілу енергії, виділеної в пружних зіткненнях (eВ/нм), також може бути побудований на основі розподілу Пірсона:

$$F_D(x_{Di}) = \frac{10^3 v(E)}{\Delta R_{pD} \sqrt{2\pi}} F^{\Pi}(x_i), \quad (9)$$

де $v(E)$ - сумарна енергія, виділена в пружних зіткненнях (2,20 кеВ); ΔR_{pD} - середньоквадратичний розкид по глибині просторового розподілу енергії, виділеної в пружних зіткненнях, (18,2 нм); $F^{\Pi}(X_i)$ – значення функції розподілу Пірсона, яке відповідає асиметрії профілю виділеної енергії, $Sk_D = 0,1$.

Профіль розподілу первинних радіаційних пошкоджень, $n_D(x_{Di})$, можна отримати, розділивши добуток $F_D(x_{Di}) \cdot D$ на подвоєну порогову енергію зміщення E_d атома мішені ($E_d^{Fe} \approx 24$ eВ) з рівноважного положення:

$$n_D(x_{Di}) = \frac{10^7 D}{2E_d} F_D(x_{Di}), \quad (10)$$

де $n_D(x_{Di})$ – кількість пар Френкеля в 1 см³. Формула (10) дає концентрацію первинних радіаційних порушень (пар Френкеля) в залежності від глибини згідно моделі Кінчина-Піза [3] без урахування їх подальшої дифузії та анігіляції.

Профіль розподілу енергії, виділеної в електронну підсистему (eВ/нм), можна розрахувати за допомогою аналогічного виразу (9):

$$F_I(x_{Ii}) = \frac{10^3 [E_I - v(E)]}{\Delta R_{pI} \sqrt{2\pi}} F^{\Pi}(X_i), \quad (11)$$

де $[E_I - v(E)]$ – енергія, виділена в непружних зіткненнях, (10 кеВ – 2,20 кеВ = 7,80 кеВ); ΔR_{pI} – середньоквадратичний розкид за глибиною просторового розподілу енергії, виділеної в електронну підсистему (16,4 нм); $F^{\Pi}(X_i)$ - розподіл Пірсона, що відповідає асиметрії профілю непружних втрат $Sk_I = 0,4$.

3. Інтерполяція

Якщо необхідна комбінація іон-мішень відсутня в таблицях, параметри просторового розподілу домішки та виділеної енергії в мішені в пружних та непружних зіткненнях можна оцінити інтерполяцією наявних даних. Інтерполяція виправдана тим, що параметри просторових розподілів плавно

залежать від порядкового номера та маси іонів та атомів мішеней. Немонотонності в залежності електронного гальмування характерні в основному для легких іонів, тому легкі іони представлені в таблицях досить повно і необхідність інтерполяції для них здебільшого відпадає. Крім того, немонотонність залежності електронного гальмування від порядкових номерів іонів, як видно з експериментів, має плавний і регулярний характер.

Нехай необхідно знайти параметри розподілів для іонів сорту I з енергією $E_I(I)$ у мішені, що складається з атомів сорту T . Як приклад, визначимо формули інтерполяції для проективного пробігу $R_p(I, T)$, оскільки для інших параметрів вони будуть аналогічні. Розглянемо найбільш загальний випадок, коли у таблицях відсутні як іон I , так і мішень T , і застосуємо в цьому випадку лінійну інтерполяцію. Для цього знайдемо спочатку проективний пробіг $R_p(E_I)$ для чотирьох комбінацій іон-мішень (I_1, T_1) , (I_1, T_2) , (I_2, T_1) , (I_2, T_2) , при цьому I_1 та I_2 вибираються так, щоб атомна маса іонів $M(I)$ знаходилася між масами іонів $M(I_1)$ та $M(I_2)$, а атомна маса атомів мішені $M(T)$ – між $M(T_1)$ та $M(T_2)$. Спочатку обчислюються інтерполяційні ваги:

$$i = \frac{M(I) - M(I_1)}{M(I_2) - M(I_1)}, \quad t = \frac{M(T) - M(T_1)}{M(T_2) - M(T_1)} \quad (12)$$

У цьому випадку формула лінійної двовимірної інтерполяції з урахуванням корекції на густину матиме вигляд:

$$R_p(I, T) = (1/N)[(1-i)(1-t)R_p(I_1, T_1)N_1 + t(1-i)R_p(I_1, T_2)N_2 + \\ + i(1-t)R_p(I_2, T_1)N_1 + itR_p(I_2, T_2)N_2], \quad (13)$$

де N_1, N_2 – атомні густини речовин T_1 і T_2 , які є в наявності в таблицях; N – атомна густина речовини T , для якого знаходиться пробіг.

Якщо потрібно провести інтерполяцію лише за іонами чи тільки за мішенями, то формула (13) спрощується. Інтерполяція за іонами здійснюється за допомогою виразу:

$$R_p(I) = (1-i)R_p(I_1, T) + iR_p(I_2, T), \quad (14)$$

а за мішенями – за допомогою виразу:

$$R_p(T) = (1/N)[(1-t)R_p(I, T_1)N_1 + tR_p(I, T_2)N_2]. \quad (15)$$

Так як всі параметри просторових розподілів головним чином залежать від енергії іонів, то лінійна інтерполяція енергії за відсутності необхідного значення в таблицях дасть величину параметрів з достатньою точністю.

Порядок виконання завдання

1. Отримати у викладача завдання та таблиці, які необхідні для розрахунків.
 2. Для заданої товщини імплантованого шару визначити середній проективний пробіг R_{pR} , середньоквадратичний розкид пробігів ΔR_{pR} , необхідну енергію іонів E_I та параметр асиметрії розподілу Sk_R .
 3. За величиною параметра асиметрії Sk_R знайти потрібний розподіл Пірсона.
 4. За допомогою виразу (3) розрахувати величину X , що відповідає поверхні імплантованої мішені $X(x = 0)$.
 5. Застосовуючи вираз (5), розрахувати глибину $x_{Ri}(X_i)$ (в нм) для інших точок вибраного розподілу.
 6. Побудувати профіль розподілу пробігів $F''(x_{Ri})$.
 7. За допомогою виразу (8) розрахувати дозу іонів $D(\text{іон}/\text{см}^2)$, які, необхідну для отримання заданої максимальної концентрації домішки $n(R_M)$ на глибині модального пробігу R_M .
 8. Побудувати профіль концентрації імплантованих іонів $n(x_{Ri})$.
 9. Для побудови профілів розподілу енергії, виділеної в пружних зіткненнях, $F_D(x_{Di})$, радіаційних пошкоджень $n_D(x_{Di})$ та енергії, виділеної в непружних зіткненнях $F_I(x_{Ii})$, провести розрахунки, керуючись пунктами 3-8 «порядку виконання завдання» та виразами (9) – (11), при значеннях Sk_D , R_{pD} , ΔR_{pD} і Sk_I , R_{pI} , ΔR_{pI} , відповідних обраної енергії імплантації.
- Всі розрахунки та графічні побудови рекомендується проводити за допомогою персонального комп'ютера. Зокрема, графічні побудови глибинних профілів розподілу зручно робити за допомогою програми “*Origin*”.

Контрольні питання

При здачі практичної роботи необхідно вивчити такі теоретичні питання:

1. Утрати енергії прискорених іонів в твердому тілі в пружних та непружних зіткненнях.
2. Каскади атомних зіткнень.
3. Рівняння пробігів іонів у твердому тілі.
4. Метод моментів функції розподілу.
5. Апроксимація профілів розподілу функцією Пірсона IV типу.
6. Пружні та непружні утрати енергії прискореної частинки у твердому тілі.
7. Залежність ядерної та електронної гальмівної здатності речовини від енергії іонів.
8. Вплив ефекту каналірування на розподіл пробігів іонів та виділеної енергії.

Список літератури

1. Ziegler J. F. The Stopping and Range of Ions in Solids / Ziegler J. F., Biersack J. P. and Littmark U. – New York: Pergamon Press, 2003.
2. Ziegler J. F. The Stopping and Range of Ions in Matter. – New York: Pergamon Press, Vol. 2–6, 1977–1975.
3. Kinchin G. H. The displacement of atoms in solids by radiation / G. H. Kinchin, R. S. Pease // Rep. Prog. Phys. – 1955. – Vol. 18. – P. 1–51.

Зміст

Вступ	3
1. Таблиці розподілу енергії та домішки при іонній імплантації	4
2. Побудова глибинних профілів	6
3. Інтерполяція	10
Порядок виконання завдання	12
Контрольні питання	12
Список літератури	13
Зміст	13

Навчальне видання

Методичні вказівки

до виконання комплексної практичної роботи «Профілі розподілу імплантованих частинок і виділеної енергії у твердих тілах» з навчальних дисциплін «Радіаційна стійкість матеріалів», «Фізика взаємодії прискорених частинок з твердим тілом», «Плазмова та радіаційна поверхнева взаємодія матеріалів в екстремальних умовах» для студентів денної та заочної форми навчання за спеціальністю «Прикладна фізика та наноматеріали»

Укладачі:

ЗУБАРЄВ Євгеній Миколайович

МАЛИХІН Сергій Володимирович

СПАТОВ Олександр Юрійович

КОНОТОПСЬКИЙ Леонід Євгенович

Відповідальний за випуск ст. викладач Л. Є. Конотопський

Роботу до видання рекомендував доц. Дроздов А.М.

В авторській редакції

План 2025 р., поз. 573.

Підп. до друку _____ Гарнітура Times New Roman.

Видавничий центр НТУ «ХП»,

вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002

Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 5478 від 21.08.2017 р.

Електронна версія