

Я.П. Салій, І.М. Фреїк, І.Й. Перкатюк

Розподіл енергетичних втрат α -частинок в $A^{IV}B^{VI}$

Фізико-хімічний інститут Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника,
вул. Галицька, 201, Івано-Франківськ, 76008, Україна, E-mail: freik@pu.if.ua

Розраховано і представлено просторовий розподіл іонізаційних і ядерних втрат енергії швидкими α -частинками в напівпровідниках $A^{IV}B^{VI}$.

Ключові слова: сполуки $A^{IV}B^{VI}$, α -частинки, іонізаційні втрати, ядерні втрати, нерівноважна концентрація носіїв.

Стаття поступила до редакції 10.01.2006; прийнята до друку 01.03.2006

Вступ

Методи радіаційної модифікації властивостей напівпровідникових матеріалів; розробка, вибір режимів експлуатації та радіаційної стійкості детекторів іонізуючого випромінювання вимагають визначення профілів іонізаційних втрат та пошкоджень кристалічної ґратки під дією випромінювання.

Іонізаційні втрати заряджених частинок в напівпровіднику значною мірою йдуть на утворення електрон-діркових пар. Знання величини концентрації генерованих нерівноважних носіїв струму необхідне при використанні напівпровідників для детекторів випромінювання [1,2]. Також іонізаційними втратами в основному визначається довжина пробігу зарядженої частинки. Хоча вважають [2], що задача адекватного теоретичного опису глибоких профілів імплантації і дефектоутворення (у випадку коли орієнтаційними ефектами можна знехтувати) успішно вирішена, часто такі розв'язки, особливо для сполук, або відсутні, або вони виявляється досить грубими, або для розрахунку потребують складних програм, що, наприклад, використовують метод Монте-Карло.

В роботі представлено розрахунки пробігів і розподіли іонізаційних та ядерних втрат енергії α -частинок в $A^{IV}B^{VI}$ за емпіричними даними і за моделями Бете - Блоха, Лінхарда - Шарфа, Пучерова.

1. Пробіги α -частинок в $A^{IV}B^{VI}$

З таблиць довідника [3] знаходимо пробіги в мг/см^2 α -частинок з енергією 5,5 МеВ (Pu^{238}) в Pb, Te, Sn, Se, вони представлені в табл. 1. Пробіг частинки в сполуці АВ знаходять з

Таблиця 1

Величини необхідні для розрахунків за наведеними формулами

	Pb	Te	Sn	Se
A , г/моль	207,2	128	118,7	78,96
Z	82	52	50	34
a	0,18	0,15	0,15	0,10
b	2,3	3,3	3,3	4,2
R_1 , мг/см ² [5]	18,57	14,59	14,05	11,46
R_2 , мг/см ² [3]	20,35	15,4	14,81	11,8

молярних мас складових елементів (табл. 1). Пробіги, розраховані за формулою:

$$R_{AB} = (A_A + A_B) / (A_A/R_A + A_B/R_B) \quad (1)$$

з врахуванням густин сполук, представлено в табл. 2.

Таблиця 2

Пробіги α -частинок розраховані за представленими формулами та за іонізаційними втратами

	PbSe	PbTe	SnTe
ρ , г/см ³	8,15	8,16	6,45
R_1 , мг/см ²	16,96	18,13	15,11
R_2 , мкм (1)	20,8	22,2	23,4
R_2 , мкм (3)	19,5	20,6	22,2
R_2 , мкм (6)	19,9	18,3	21,2
K_{1A} , МеВ ² /мкм	0,269	0,230	0,151
K_{2A} , МеВ	2,05	2,05	1,25
K_{1B} , МеВ ² /мкм	0,112	0,146	0,157
K_{2B} , МеВ	0,85	1,30	1,30

Щоб оцінити глибини проникнення R_α α -частинок енергією E_α в щільне конденсоване середовище скористаємось емпіричною формулою, наведеною в [4], для розрахунку пробігу частинок у фотоемульсії:

$$E_{\alpha} = \alpha (m_{\alpha}/m_p)^{1-n} z_{\alpha}^{2n} R^n,$$

де параметри залежності $\alpha = 0,25$, $n = 0,58$, а $m_{\alpha}/m_p = 4$, $z_{\alpha} = 2$ – характеристики частинки. Пробіг виражається формулою:

$$R_{\alpha} = (E_{\alpha}/4\alpha)^{1/n}, \quad (2)$$

а для $E_{\alpha} = 5,5$ MeB маємо $R_{\alpha} = 18,90$ мкм. Одержане значення близьке до наведених у табл. 2.

В [5] представлено формулу для розрахунку пробігу α -частинок:

$$R_{\alpha} = E_{\alpha}(E_{\alpha} A)^{1/2}/\rho,$$

де R_{α} вимірюється в мкм, E_{α} - MeB, ρ - г/см³, а A - атомний номер. Знайдемо густини складових у сполучі:

$$\rho_A = \rho_{AB} A_A/(A_A+A_B),$$

$$\rho_B = \rho_{AB} A_B/(A_A+A_B),$$

і за формулою (1) для пробігів у мкм

$$1/R_{\alpha,AB} = 1/R_{\alpha,A} + 1/R_{\alpha,B},$$

одержимо вираз для пробігу у сполучі:

$$R_{\alpha,AB} = E_{\alpha}^{3/2} (A + B)/(\rho (A_A^{1/2} + A_B^{1/2})). \quad (3)$$

Розраховані згідно формули (3) значення також представлені у табл. 2.

II. Іонізаційні втрати енергії α -частинок в $A^{IV}B^{VI}$ за моделями Бете-Блоха, Лінхарда-Шарфа, Пучерова

Через те, що швидкість частинки $v_{\alpha} = (2E/m_{\alpha})^{1/2}$, яка наприклад для $E_{\alpha} = 0,1-5,5$ MeB становить відповідно 0,0073 - 0,05412 с, є більшою за борівську швидкість електронів $v_B = c/137 = 0,00730$ с, де c - швидкість світла, то можна використовувати модель іонізаційних втрат Бете-Блоха [6]:

$$dE/dx_{\text{Bete}} = K_1 \ln(E_{\alpha}/K_2)/E_{\alpha}, \text{ MeB/мкм}, \quad (4)$$

де

$$K_1 = 2\pi n_e Z_{\alpha}^2 e^4 m_{\alpha}/m_e (1,60 \cdot 10^{-6} \text{ ерг/MeB})^2, \text{ MeB}^2/\text{мкм},$$

$$K_2 = I m_{\alpha} / 4m_e, \text{ MeB}.$$

Потенціал іонізації $I = 13,6 \cdot 10^{-6} Z_A \text{ MeB}$, $e = 4,80 \cdot 10^{-10}$ од. зар. СГСЕ, $m_{\alpha} = 3755,62 \text{ MeB}$,

$m_e = 0,511 \text{ MeB}$, $Z_{\alpha} = 2$. Розраховані значення коефіцієнтів K_1 і K_2 для формули Бете-Блоха для обох підгруп в сполуках $A^{IV}B^{VI}$ представлені в табл. 2. Повна концентрація електронів в PbSe

$$n_e = N_{\text{ат}} (Z_{\text{Pb}} + Z_{\text{Se}})/2.$$

В області малих енергій для легких частинок іонізаційні втрати розраховують за моделлю Ліндхарда - Шарфа для атома Томаса - Фермі [7]:

$$dE/dx_{\text{Lindhard}} = 8\pi a_B Z_{\alpha}^{7/6} Z_A (Z_{\alpha}^{2/3} + Z_A^{2/3})^{-3/2} N_{\text{ат}} e^2 v_{\alpha}/v_B, \quad (5)$$

де борівський радіус $a_B = 5,29 \cdot 10^{-9}$ см. З формули видно, що втрати слабо залежать від Z_A . Втрати частинки з енергією 5,5 MeB становлять 0,008715 ерг/см, щоб перейти до величини в MeB/мкм значення розраховані за наведеною формулою розділено на $1,6 \cdot 10^{-2}$.

В проміжній області енергій, коли швидкості іонів порівняні з швидкостями атомних електронів, теоретичний розгляд відсутній. В цій області швидкостей непружні втрати енергії мають максимум. При проведенні розрахунків переносу іонів проміжної енергії в речовині найчастіше використовується зшивка значень одержаних за формулою (5) для низьких енергій і формулою (4) для високих.

Зауважимо що для легких іонів (водень і гелій), для яких максимум гальмівної здатності припадає на область енергій, що інтенсивно використовується експериментально, $\sim 1 \text{ MeB}$ у наявності є інтерполяційні залежності, одержані на основі значного експериментального матеріалу [8]:

$$S_e = 0,235 Z_{\text{ат}} Z_{\alpha}^2 T^{0,6} \ln(b(T^2 + 0,01 Z_{\text{ат}} + 0,08)/(T + 0,003 Z_{\text{ат}} + 0,024)) / (T^{1,6} + a)$$

$$dE/dx_{\text{аргох}} = S_e N_{\text{ат}} \quad (6)$$

де $N_{\text{ат}} = N_A \rho / (A_{\text{Pb}} + A_{\text{Se}}) = 1,71 \cdot 10^{22} \text{ атом/см}^3$, $\rho = 8,15 \text{ г/см}^3$. В розрахунку за формулою (6) використовувалась концентрація атомів кожного сорту, яка становить половину наведеної величини, $T = E_{\alpha}/4$, E_{α} енергія α -частинок, MeB; a , b – змінювані парметри (табл. 1), які підбиралися так, щоб забезпечити оптимальне

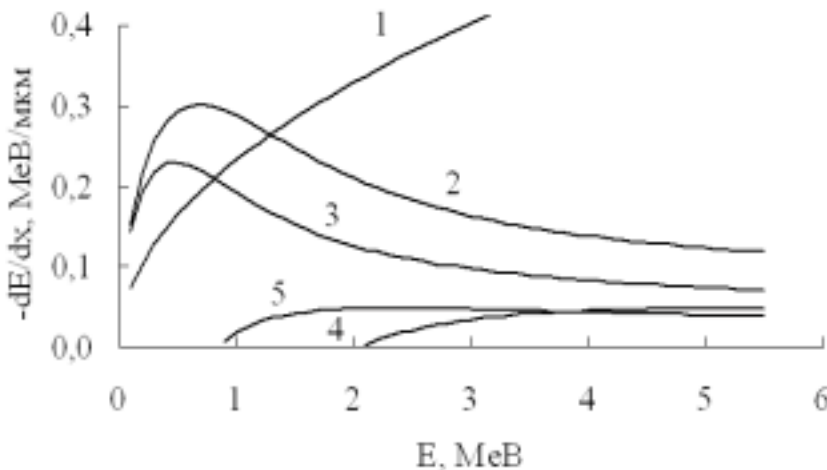


Рис. 1. Іонізаційні втрати в PbSe від енергії α -частинок для трьох розглянутих моделей: (1) Лінхарда-Шарфа, (2), (3) Пучерова для Pb і Se, (4), (5) Бете-Блоха Pb і Se.

узгодження з попередніми результатами. Поперечний переріз гальмування α -частинок в металах виражався в одиницях 10^{-15} еВ \cdot см²/атом. Розраховані за іонізаційними втратами (4) пробіги представлені в табл. 2.

На рис. 1. представлено залежності іонізаційних втрат для PbSe від енергії α -частинок для трьох розглянутих моделей. Енергія α -частинок і іонізаційні втрати в залежності від пробігу для сполук $A^{IV}B^{VI}$ згідно моделі роботи [8] представлено на рис. 2.

III. Ядерні втрати енергії α -частинок в $A^{IV}B^{VI}$

Для нормованої ядерної гальмівної здатності використовуємо аналітичний вираз взятий з роботи [10]:

$$S_n = 0,5 \ln(1+1,1383\epsilon)/(\epsilon + 0,01321 \epsilon^{0,21226} + 0,1959 \epsilon^{0,5}),$$

де

$$\epsilon = E a_b M_a / (1,13 Z_a Z_\alpha (Z_\alpha^{2/3} + Z_a^{2/3})^{1/2} e^2 (M_\alpha + M_a)),$$

а величина гальмівної здатності у максимумі дорівнює

$$S_n = 3,62 N_a a_b Z_a Z_\alpha M_\alpha e^2 / ((Z_\alpha^{2/3} + Z_a^{2/3})^{1/2} (M_\alpha + M_a))$$

ерг/см.

На рис. 2. представлені ядерні втрати в підгратках металу і халькогену для PbSe, PbTe і SnTe. З рисунка видно, що максимум втрат на важчих елементах сполуки знаходиться ближче до поверхні зразка.

Висновки

1. Іонізаційні втрати α -частинок в $A^{IV}B^{VI}$ добре описуються залежністю представленою в [4], і яка поєднує моделі Бете - Блоха і Лінхарда - Шарфа.
2. Розраховано і представлено просторовий розподіл іонізаційних і ядерних втрат енергії швидкими α -частинками в напівпровідниках $A^{IV}B^{VI}$.

Робота фінансується ДФФД МОН України, реєстраційний номер 0105U007494.

Салій Я.П. – кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри фізики і хімії твердого тіла;
Фреїк І.М. – аспірант кафедри фізики і хімії твердого тіла;
Перкатуєк І.Й. – кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри алгебри і геометрії.

- [1] В.А. Никеров. *Применение частиц и излучений высоких энергий*. М.: Высшая школа, 152 с. (1988).
- [2] *Фундаментальные вопросы ионной имплантации*: (Материалы III Всесоюзной школы, 17 - 23 июня 1985 г, Алма-Ата). Алма-Ата: Наука, 236 с. (1987).
- [3] О.Ф. Немец, Ю.В. Гофман. *Справочник по ядерной физике*. Киев: Наукова думка, 414 с. (1975).
- [4] К.Н. Мухин. *Введение в ядерную физику*. М.: Наука, 584 с. (1975).
- [5] Т.Д. Джафаров. *Радиационно-стимулированная диффузия в полупроводниках*. М.: Энергоатомиздат, 220 с. (1991).
- [6] И.А. Ахиезер, Л.Н. Давыдов. *Введение в теоретическую радиационную физику металлов и сплавов*. Киев: Наукова думка, 250 с. (1975).
- [7] Ю.Д. Лизунов, А.К. Рязанов. *Исследование торможения заряженных частиц и образование точечных дефектов*. М.: Препринт. Институт атомной энергии, 36 с. (1988).
- [8] Н.Н. Пучеров, Т.Д. Чеснокова. Тормозная способность металлов для заряженных частиц малых энергий // *Вопросы атомной науки и техники*. 9(1), сс. 10-12 (1979).
- [9] J.F. Zeigler. *He-stopping powers and ranges in all elements*. N.Y.: Pergamon Press, 68 p. (1977).
- [10] J.P. Biersack. Computer Simulations of Sputtering // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*. B27 pp. 21-36 (1987).

Ya.P. Saliy, I.M. Freik, I.Yo. Perkatyuk

Distribution of Energy Loss of α -partical in $A^{IV}B^{VI}$

*Precarpathian National University
57, Shevchenko Str., Ivano-Frankivsk 76000, Ukraine*

The spatial distribution of ionisation and nuclear energy loss of fast α -partical in semiconductor $A^{IV}B^{VI}$ are calculated.