

С.А. Федосов¹, Д.А. Захарчук², Ю.В. Коваль², Л.В. Ящинський², О.А. Урбан²

Кінетичні ефекти у кристалах антимоніду кадмію до і після гамма-опромінення

¹Східноєвропейський національний університет імені Лесі Українки, Луцьк, Україна, fedosov.Serhiy@eenu.edu.ua

²Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна, dima.zakharchuk@gmail.com

Проведено дослідження впливу великих доз гамма-квантів ⁶⁰Со на електричні властивості кристалів антимоніду кадмію з різною вихідною електропровідністю. Виявлено, що при гамма-опроміненні в ґратку матеріалу вводяться радіаційні дефекти як донорного, так і акцепторного типів. Їх вплив залежить від рівня легування та типу провідності вихідного матеріалу. Ефективність видалення носіїв є наслідком участі атомів домішки в утворенні відповідних радіаційних дефектів з глибокими енергетичними рівнями.

Ключові слова: антимонід кадмію, гамма-опромінення, доза опромінення, радіаційні дефекти, концентрація носіїв.

Подано до редакції 05.05.2020; прийнято до друку 15.06.2020.

Вступ

Існування багатостороннього впливу ядерних випромінювань на властивості напівпровідників відкриває велике прикладне значення радіаційної фізики. Найважливішою є проблема забезпечення радіаційної стійкості напівпровідників і напівпровідникових приладів [1-3]. Це визначає надійність роботи електронних систем в умовах ядерного опромінення, в атомній промисловості й ін. Підбором виду випромінювання, дози і умов опромінення можна добитися напрямленої зміни властивостей опромінених напівпровідникових пристроїв. Таким чином виникають нові ефективні методи радіаційної технології [4-7].

Перетворення первинних радіаційних дефектів у більш складні порушення починаються лише з їх деякої концентрації і обумовлені кількістю існуючих дефектів, швидкістю утворенням нових, температурою, при якій відбувається опромінення кристалу [8]. У результаті опромінення виникають стійкі зміни градієнтів питомого опору внаслідок змін концентрації та рухливості носіїв струму, зумовлених вторинними радіаційними дефектами [9]. Зміна концентрації носіїв струму в результаті опромінення відбувається по-різному в кристалах з

різним вмістом домішок і типу провідності та є функцією початкової концентрації домішки [10-11].

I. Експериментальні результати та їх обговорення

У даній роботі досліджено кристали антимоніду кадмію, які вирощені методом зонної плавки, спеціально нелеговані та леговані індієм до і після γ -опромінення. До опромінення нелеговані кристали CdSb мали р-тип провідності за рахунок мілких акцепторів з $E_1 = 3,65$ меВ і $E_2 = 6,2$ меВ, пов'язаних з вакансіями кадмію (V_{Cd}). Атоми In переважно входять в підґратку Cd, що призводить до зростання концентрації вільних електронів. Домішка In широко використовуються при легуванні для отримання n-CdSb з різною концентрацією вільних електронів [12]. Опромінення досліджуваних зразків проводилось від джерела ⁶⁰Со дозами $10^{18} \div 10^{19}$ см⁻². При великих дозах опромінення концентрація радіаційних дефектів перевищує концентрацію неконтрольованих домішок і роль власних радіаційних дефектів у визначенні фізичних властивостей напівпровідника є домінуючою. Температура опромінення не перевищувала 340 К.

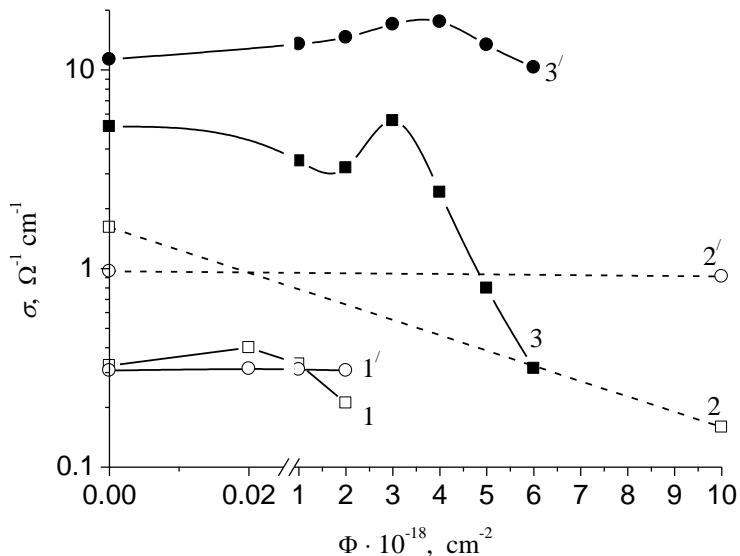


Рис. 1. Дозові залежності питомої провідності $\sigma = f(\Phi)$ для кристалів CdSb (1-2') та CdSb<In> (3, 3') при температурах T , К: 1-3 – 77; 1'-3' – 295.

Щоб зменшити радіоактивність до безпечного рівня, зразки витримувались у гарячих камерах $5 \div 8$ місяців.

За даними вимірів питомої провідності та ефекту Холла побудовано дозові залежності питомої провідності $\sigma = f(\Phi)$ для кристалів p-CdSb (рис. 1). Поява радіаційних порушень в сурм'янистому кадмії змінює його електричні властивості. Однак ця зміна наростає не пропорційно інтегральній дозі, а складним чином. Особливо відчутні ці зміни при $T = 77$ К. Опромінення призводить при $\Phi = 0 \div 1,9 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ ($0 \div 10^7$ Р) до збільшення питомої провідності кристалу від 0,325 до 0,4 Ом⁻¹см⁻¹, а при подальшому рості дози опромінення $\Phi > 1,9 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ ($> 10^7$ Р) до її зменшення (0,210 Ом⁻¹см⁻¹) нижче вихідного значення (крива 1 рис. 1). При опроміненні дозами $\approx 10^{19} \text{ см}^{-2}$ більш низькоомних кристалів p-CdSb (лінія 2 рис. 1) питома провідність зменшується на порядок від 1,61 до 0,16 Ом⁻¹см⁻¹. Складний характер залежності $\sigma = f(\Phi)$ спостерігався (криві 3, 3' рис. 1) також у кристалах антимоніду кадмію, легованого домішкою індію CdSb<In>, при опроміненні їх γ -квантами ⁶⁰Со [11].

При опроміненні дозами $\Phi = 0 \div 1,9 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ ($0 \div 10^7$ Р) p-CdSb виникають додаткові домішкові центри, які мають ту ж природу, що і домішки у вихідному кристалі. Поява додаткових акцепторів і числа дірок у валентній зоні призводить до збільшення σ при азотних температурах [8]. Зменшення провідності зі збільшенням дози γ -опромінення більше $1,9 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ ($> 10^7$ Р) пояснюється зменшенням числа центрів, що забезпечують діркову провідність [10].

Створення структурних порушень у p-CdSb γ -опроміненням дозами до $1,9 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ (10^7 Р) призводить до росту провідності, концентрації і

рухливості носіїв струму [8]. З подальшим збільшенням дози характер зміни цих величин стає зворотнім, хоча кількість порушень при цьому продовжує зростати. Напевно, виникаючі первинні радіаційні порушення перетворюються при їх деякій концентрації у центри, які звільнюють захоплені раніше валентні електрони. Це призводить до їх росту у валентній зоні та зменшенні кількості основних носіїв (дірок). Зменшення кількості дірок (менше, ніж у вихідному кристалі) після доз опромінення $> 1,9 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ ($> 10^7$ Р) свідчить про наявність додаткового механізму розсіяння носіїв, викликаного опроміненням. Усе це вказує на появу додаткової взаємодії між виникаючими порушеннями.

За вимірами [13] питомої провідності та ефекту Холла в інтервалі доз $\Phi = (1 \div 6) \times 10^{18} \text{ см}^{-2}$

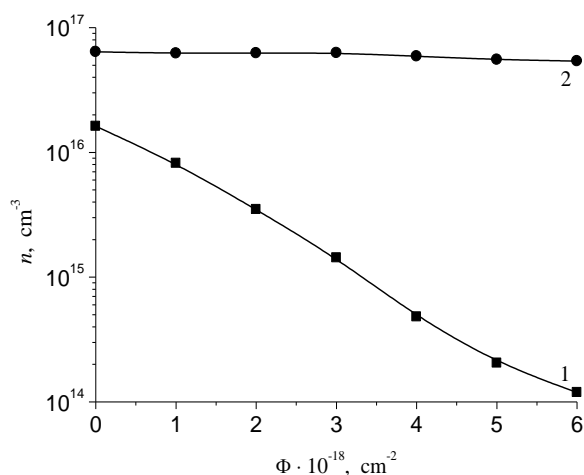


Рис. 2. Дозові залежності концентрації носіїв струму $n = f(\Phi)$ для кристалів CdSb<In> при температурах T , К: 1 – 77; 2 – 295.

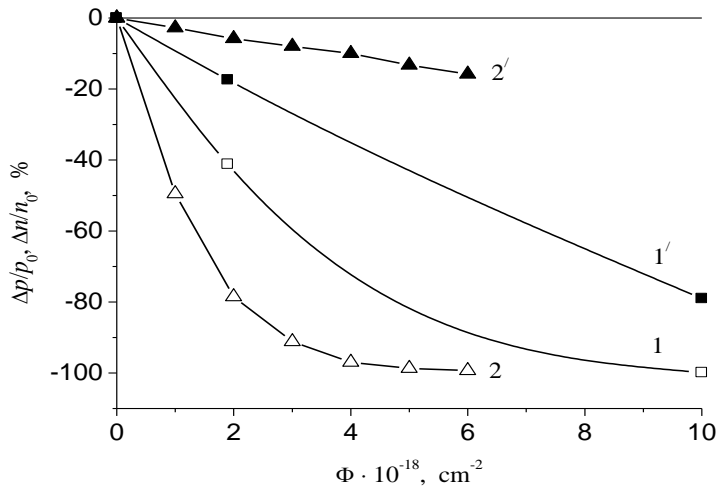


Рис. 3. Дозові залежності відносної зміни концентрації носіїв струму $\frac{\Delta p}{p_0} = f(\Phi)$, $\frac{\Delta n}{n_0} = f(\Phi)$ для CdSb при температурах $T = 77$ (1-2) та 295 К (1'-2'): 1, 1' – p-CdSb; 2, 2' – n-CdSb<In>.

Таблиця 1

Ефективності видалення носіїв струму в γ -опромінену антимоніди кадмію

	p-CdSb, cm^{-1}		n-CdSb<In>, cm^{-1}
p_0, n_0, cm^{-3}	$3,3 \times 10^{15}$	$8,1 \times 10^{16}$	$6,4 \times 10^{16}$
$T \approx 77 \text{ K}$	$2,43 \times 10^{-4}$	$1,40 \times 10^{-3}$	$2,68 \times 10^{-3} \div 8,02 \times 10^{-3}$
$T \approx 295 \text{ K}$	$3,00 \times 10^{-4}$	$6,40 \times 10^{-3}$	$1,61 \times 10^{-3} \div 1,86 \times 10^{-3}$

побудовані дозові залежності концентрації носіїв струму $n = f(\Phi)$ (рис. 2) для CdSb<In>.

Практично відсутні зміни концентрації носіїв струму від дози опромінення при кімнатній температурі (крива 2 рис. 2). Проте при азотних температурах (крива 1 рис. 2) концентрація носіїв струму при збільшенні дози опромінення має більш різко виражений характер. Зменшення концентрації в CdSb<In> пояснюється видаленням електронів із зони провідності, що ймовірно спричиняється, згідно [2], утворенням радіаційних дефектів з глибокими рівнями в забороненій зоні кристала. Крім того, для кристалів CdSb є характерним існування неоднорідностей в розподілі домішок вздовж осі росту, що, в свою чергу, може істотно впливати на значення кінетичних коефіцієнтів [14].

Зміна концентрації носіїв струму після опромінення $\Phi > 10^{18} \text{ cm}^{-2}$ відбувається по-різному для різних зразків при температурах $T = 77 \text{ K}$ та 295 K (рис. 3). γ -опромінення CdSb, CdSb<In> призводить, як при $T = 77 \text{ K}$ (від $1,1 \times 10^{15}$ до $6,6 \times 10^{14}$, від $1,4 \times 10^{16}$ до $1,2 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$), так і 295 K (від $3,3 \times 10^{15}$ до $2,7 \times 10^{15}$, від $8,1 \times 10^{16}$ до $1,7 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$) до зменшення концентрації носіїв струму. Значно суттєвіші зміни спостерігаються при нижчих температурах. Для p-CdSb при температурах як $T = 77 \text{ K}$, так і $T = 295 \text{ K}$ більш чутливими до опромінення виявились зразки з нижчою (залежності 1, 1') вихідною концентрацією носіїв струму. При незначних змінах зі збільшенням дози γ -квантів ^{60}Co

при $T \approx 295 \text{ K}$ (залежність 2), CdSb<In> при $T \approx 77 \text{ K}$ стає дуже чутливим до опромінення і при $\Phi \approx 5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-2}$ залежність 2' виходить на насичення.

Ефективності (швидкості) видалення носіїв струму $\Delta p/\Phi$, $\Delta n/\Phi$ підкреслюють відмінність у поведінці цих матеріалів при опроміненні (табл. 1).

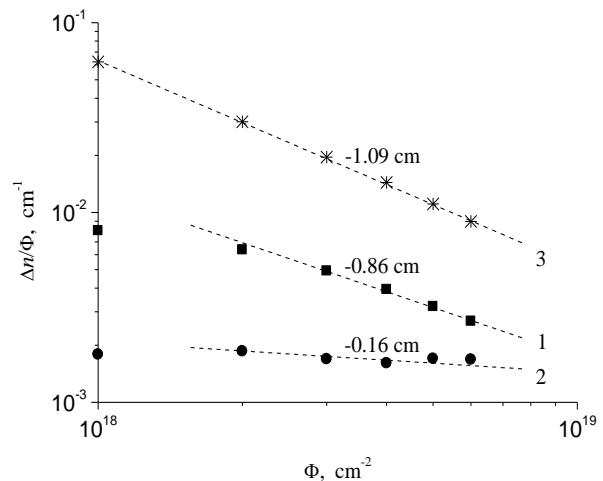


Рис. 4. Залежність ефективностей (швидкостей) видалення носіїв струму (1, 2) та введення глибоких енергетичних рівнів (3) від дози γ -квантів ^{60}Co $\frac{\Delta n}{\Phi} = f(\Phi)$ для кристалів CdSb<In> при температурах $T, \text{ K}$: 1 – 77; 2, 3 – 295.

На рис. 4 наведені розраховані залежності (1 та 2) ефективності видалення носіїв струму $\Delta n/\Phi$ при зміні дози γ -квантів ^{60}Co у кристалах $\text{CdSb}\langle\text{In}\rangle$ при температурах $T=77$ та 295 К. Значення величин $\Delta n/\Phi$ залишаються практично сталими (залежність 2) зі збільшенням дози опромінення при $T \approx 295$ К. Більш відчутні зміни спостерігаються (залежність 1) при $T \approx 77$ К, тобто $\text{CdSb}\langle\text{In}\rangle$ стає чутливим до γ -опромінення. Розрахована зміна від Φ ефективності видалення носіїв струму при $T=77$ та 295 К описується відповідно: $\frac{\Delta n}{\Phi} \propto \Phi^{-0,86}$, $\frac{\Delta n}{\Phi} \propto \Phi^{-0,16}$.

Дані результати показують, що ефективність видалення носіїв струму суттєво залежить від концентрації донорів та акцепторів у кристалах. Очевидно, атоми домішки беруть участь в утворенні відповідних радіаційних дефектів з глибокими рівнями. При повній іонізації рівнів радіаційних дефектів концентрація носіїв не досягає початкового значення до опромінення. Це свідчить про те, що внаслідок опромінення виникають дефекти з більш глибокими рівнями. Аналіз швидкостей утворення глибоких центрів $\Delta n/\Phi$ (де Δn – концентрація носіїв в областях іонізації ($T \approx 295$ К) цих рівнів після опромінення) показує, що ефективність падає зі збільшенням дози γ -квантів ^{60}Co (залежність 3 рис. 4) за законом:

$$\frac{\Delta n}{\Phi} \propto \Phi^m, \text{ або } \Delta n = C\Phi^{m+1},$$

де m розрахована для $T=295$ К дорівнює $-1,09$ см. Спад Δn зі збільшенням дози γ -квантів ^{60}Co

пояснюється введенням радіаційних дефектів N_D ($n_0 - N_D = \Delta n$). Розрахунки концентрації N_D показують, що вона описується залежністю від дози опромінення: $N_D = C\Phi^{0,09}$.

Авторами [9] детально досліджено зміни концентрації носіїв струму при γ -опроміненні n-Ge з широким інтервалом концентрації донорної домішки Sb і підтверджено припущення, що ці зміни є функцією початкової концентрації домішки. Щодо CdSb , то при незначному об'ємі експериментальних даних, інформація про природу радіаційних дефектів та їх вплив на зміну електрофізичних параметрів є неоднозначною, що обумовлено низкою причин.

Зміни концентрації носіїв струму при γ -опроміненні від концентрації домішки описується залежністю типу:

$$\Delta n = Kn_0^m, \tag{1}$$

де $\Delta n = n_0 - n$ (n_0 та n – концентрація носіїв струму до і після γ -опромінення), K – залежить від дози опромінення, а усереднене значення показника степеня m є функцією температури.

Характер відносної зміни концентрації носіїв струму після γ -опромінення від концентрації домішки для кристалів CdSb та $\text{CdSb}\langle\text{In}\rangle$ також є різний (рис. 5). Ці зміни є більш відчутні для зразків з вищим початковим рівнем домішки. При $\Phi > 10^{18} \text{ см}^{-2}$ ($T=295$ К) $\Delta p/p_0$ для CdSb зростає від $\approx 17,4\%$ (при $p_0 \approx 3,3 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$) до $\approx 79\%$ (при $p_0 \approx 8,1 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$), а для $\text{CdSb}\langle\text{In}\rangle$ з

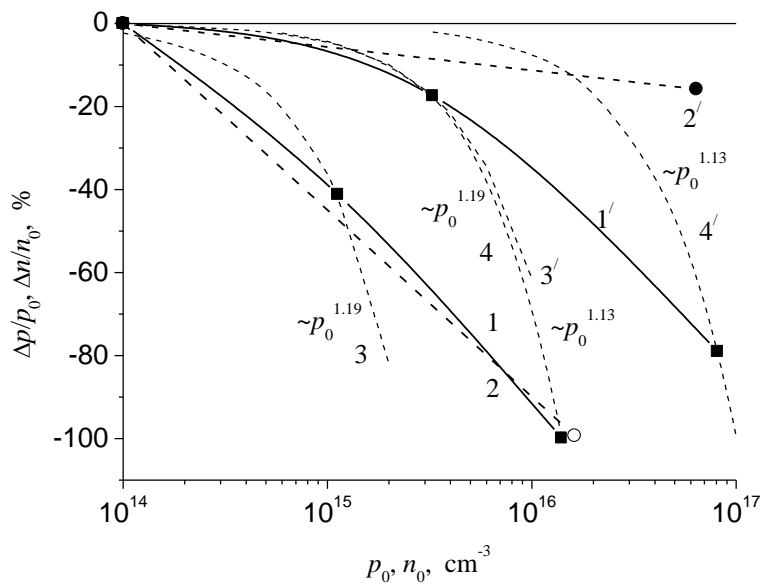


Рис. 5. Залежність відносної зміни концентрації носіїв струму після γ -опромінення від концентрації домішки $\Delta p/p_0 = f(p_0)$, $\Delta n/n_0 = f(n_0)$ для CdSb при температурах $T \approx 77$ (1-4) та 295 К (1'-4'): 1, 1' – p-CdSb; 2, 2' – n-CdSb<In>; 3, 3', 4, 4' – залежності, які описуються (2).

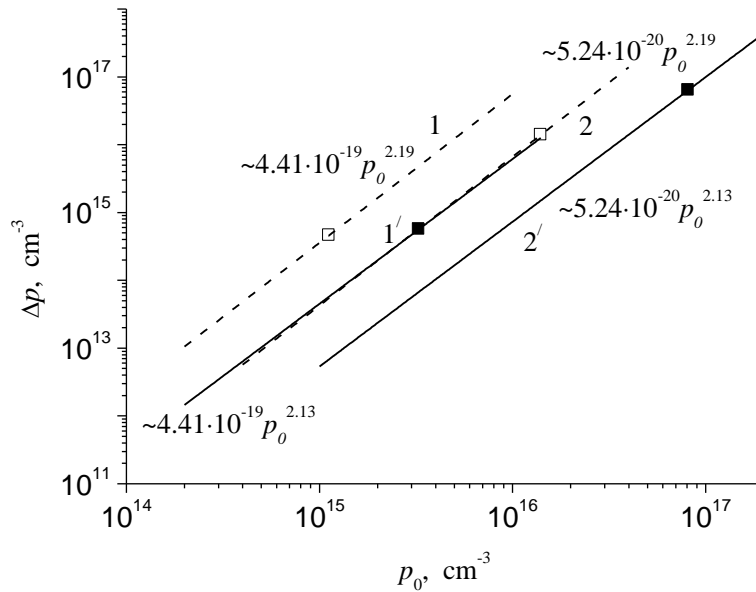


Рис. 6. Залежності зміни концентрації носіїв струму $\Delta p = f(p_0)$ від концентрації домішки після γ -опромінення р-CdSb при температурах $T \approx 77$ (1, 2) та 295 К (1', 2'):
1, 1' – $\Phi = 1,9 \times 10^{18} \text{ см}^{-2}$; 2, 2' – $\Phi = 10^{19} \text{ см}^{-2}$.

$n_0 \approx 6,4 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$, $\Delta n/n_0 \approx 15,8 \%$ (залежності 1'-2' рис. 5). При $T = 77 \text{ К}$ ці величини дорівнюють відповідно: 41,2 %, 99,9 %, 99,3 % (залежності 1-2 рис. 5).

Вважаючи, що зміна концентрації носіїв струму у спеціально нелегованому р-CdSb описується (1), встановлено залежність $\Delta p = f(p_0)$ при опроміненні γ -квантами ^{60}Co ($\Phi = 1,9 \times 10^{18} \text{ см}^{-2}$ та 10^{19} см^{-2}), розв'язавши систему рівнянь:

$$\begin{cases} \Delta p_1^{77} = K_1 (p_{01}^{77})^{m_{77}} \\ \Delta p_1^{295} = K_1 (p_{01}^{295})^{m_{295}} \\ \Delta p_2^{77} = K_2 (p_{02}^{77})^{m_{77}} \\ \Delta p_2^{295} = K_2 (p_{02}^{295})^{m_{295}} \end{cases}, \quad (2)$$

де $\Delta p = p - p_0$ – зміна концентрації до (p_0) та після γ -опромінення (p) при $T = 77$ і 295 К (індекси відповідних величин «77» і «295»); індекси «1» та «2» відповідають р-CdSb з різними p_0 ; K_1, K_2 – коефіцієнти, що залежать від величини дози опромінення Φ . Розв'язками (2) є значення:

$$m_{77} = 2,19; \quad m_{295} = 2,13; \quad K_1 = 4,41 \times 10^{-19}; \\ K_2 = 5,24 \times 10^{-20}.$$

Зв'язок між Δp та p_0 при температурах $T \approx 77$ та 295 К описується:

$$\Delta p^{77} = K (p_0^{77})^{2,19} \text{ і } \Delta p^{295} = K (p_0^{295})^{2,13}.$$

На рис. 6. представлені залежності $\Delta p = f(p_0)$ від концентрації домішки при $T = 77$ (криві 1, 2) і 295 К (криві 1', 2') та дозах опромінення $\Phi = 1,9 \times 10^{18} \text{ см}^{-2}$ (криві 1, 1'; $K_1 = 4,41 \times 10^{-19}$) та

10^{19} см^{-2} (криві 2, 2'; $K_2 = 5,24 \times 10^{-20}$).

Висновки

При гамма-опроміненні антимоніду кадмію відбувається «очищення» матеріалу. Причиною видалення носіїв струму (електронів із зони провідності і дірок із валентної зони) є утворення радіаційних дефектів з глибокими енергетичними рівнями в забороненій зоні. Виявлені зміни електрофізичних параметрів для кристалів р-CdSb<In> можна пояснити переважним утворенням в матеріалі радіаційних дефектів акцепторного типу, енергетичні рівні яких знаходяться в нижній половині забороненої зони, тоді як для кристалів р-CdSb – введенням більшої кількості радіаційних дефектів донорного типу в порівнянні з кількістю радіаційних акцепторів та зміщенням рівня Фермі під дією опромінення в область дозволених енергій.

Таким чином, при опроміненні CdSb у ґратку матеріалу вводяться радіаційні дефекти, як донорного, так і акцепторного типів, а ефективність їх впливу на властивості залежить від початкової концентрації домішки, рівня легування та типу провідності вихідного матеріалу.

Федосов С.А. - професор, д.ф.-м.н., доцент, завідувач кафедри експериментальної фізики та інформаційно-вимірювальних технологій;
Захарчук Д.А. - к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедри фундаментальних наук;
Коваль Ю.В. - к.ф.-м.н., доцент, завідувач кафедри фундаментальних наук;
Яшинський Л.В. - к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедри фундаментальних наук.
Урбан О.А. - к.е.н., доцент.

- [1] V.P. Veleschuk, O.I. Vlasenko, Z.K. Vlasenko, S.N. Levytskyi, D.V. Gnatyuk, A.V. Shefer, V.V. Borshch, and O.B. Borshch, *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics* 23(1), 102 (2020) (<https://doi.org/10.15407/spqeo23.01.102>).
- [2] R. Sahin, I. Kabacelik, *Radiation Physics and Chemistry* 150, 90 (2018) (<https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2018.04.033>).
- [3] R. Gupta, R.P. Chauhan, R. Kumar, *Optical Materials* 99, 109538 (2020) (<https://doi.org/10.1016/j.optmat.2019.109538>).
- [4] S. K. Sen, M. S. Manir, S. Dutta, M. H. Ali, M. N. I. Khan, M. A. Matin, M. A. Hakim, *Thin Solid Films* 693, 137700 (2020) (<https://doi.org/10.1016/j.tsf.2019.137700>).
- [5] S. K. Sen, M. Noor, M. A. Al Mamun, M. S Manir, M. A. Matin, M. A. Hakim, S. Dutta, *Optical and Quantum Electronics* 51(3), 82 (2019) (doi: [10.1007/s11082-019-1797-9](https://doi.org/10.1007/s11082-019-1797-9)).
- [6] M. J. Gadlage, D. I. Bruce, J. D. Ingalls, D. P. Bossev, M. Mckinney, M. J. Kay, *IEEE Transactions on Nuclear Science* 66(1), 148 (2019) (doi: [10.1109/tns.2018.2879685](https://doi.org/10.1109/tns.2018.2879685)).
- [7] K. Ali, S.A. Khan, M.Z. Matjafri, *International Journal of Electrochemical Science* 8, 7831 (2013) (<http://www.electrochemsci.org/papers/vol8/80607831.pdf>).
- [8] Г.В. Ракин, В.И. Устьянов, Труды совещания «Радиационная физика неметаллических кристаллов» (Наук. думка, Киев, 1967).
- [9] А.К. Семенюк, Радиційні ефекти в багатодолінних напівпровідниках (Надстир'я, Луцьк, 2001).
- [10] S.A. Fedosov, G.E. Davidyuk, V.V. Bozhko, A.I. Rarenko, V.P. Doskoch, N.S. Bogdanyuk, *Inorg. Mater.* 32(11), 1166 (1996) (https://www.pleiades.online/contents/inorgmat/inorgmat11_96v32cont.htm).
- [11] Yu.V. Koval, *Functional Materials* 13(3), 397 (2006) (<http://functmaterials.org.ua/contents/13-3/>).
- [12] В.Б. Лазарев, В.Я. Шевченко, Я.Х. Гринберг, В.В. Соболев, Полупроводниковые соединения А²В⁵ (Наука, Москва, 1978).
- [13] A.V. Fedosov, Y.V. Koval, L.V. Jashchinskij, O.V. Kovalchuk, *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics* 10(3), 17 (2007) (<https://doi.org/10.15407/spqeo10.03.017>).
- [14] Yu.V. Koval, D.A. Zakharchuk, L.V. Yashchynskyy, L.I. Panasyuk, S.A. Fedosov, *Physics and Chemistry of Solid State* 18(3), 321 (2017) (<https://doi.org/10.15330/pcss.18.3.321-323>).

S.A. Fedosov¹, D.A. Zakharchuk^{2,*}, Yu.V. Koval², L.V. Yashchynskiy², O.A. Urban²

Kinetic Effects in Cadmium Antimonide Crystals Before and After Gamma-Irradiation

¹*Lesya Ukrainka East European National University, Lutsk, Ukraine, fedosov.Serhiy@eenu.edu.ua*

²*Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine, dima.zakharchuk@gmail.com*

The influence of large doses of ⁶⁰Co gamma-rays on the electrical properties of cadmium antimonide crystals with different electrical conductivity has been investigated. It is revealed that radiation defects of both donor and acceptor types are introduced into the lattice of the material with gamma-irradiation. Their influence depends on the level of doping and the type of conductivity of the starting material. The effectiveness of removal of carriers is a consequence of the involvement of impurity atoms in the formation of corresponding radiation defects with deep levels.

Keywords: cadmium antimonide, gamma-irradiation, radiation dose, radiation defects, carrier concentration.