

К. ф.-м. н. О. І. КОНДРИК

Україна, м. Харків, ННЦ «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України

E-mail: kondrik@kipt.kharkov.ua, alex.kondrik2012@gmail.com

ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ CdTeSe ДЛЯ ДЕТЕКТОРІВ ІОНІЗУЮЧИХ ВИПРОМІНЮВАНЬ

Представлено результати кількісних досліджень впливу вмісту домішок та структурних дефектів на електрофізичні та детекторні властивості CdTe_{0,9}Se_{0,1} і CdTe_{0,95}Se_{0,05}, зокрема з додаванням Mn, Mg, Zn. Досліджено вплив дефектів на питомий опір, концентрацію вільних носіїв заряду, рівень Фермі, час життя нерівноважних носіїв заряду та ефективність збору зарядів у детекторах випромінювань на основі CdTeSe:In при температурі 25°C. Встановлено залежності властивостей від вмісту домішок та вакансій кадмію та телуру. Розглянуто спосіб досягнення високоомного стану, характерного для матеріалу детекторної якості.

Ключові слова: CdTeSe, моделювання, детекторні властивості, електрофізичні властивості, дефекти структури, глибокі рівні.

Кристали на основі CdTe з добавками Zn, Mn, Mg, Se розглядаються нині як матеріали для рентгенівських і гамма-детекторів при кімнатній температурі [1–6]. Коефіцієнт розподілу цинку в телуриді кадмію більший за одиницю (1,35), і CdZnTe характеризується відсутністю композиційної однорідності як у мікро-, так і у макромасштабі, а також наявністю високих концентрацій субзеренних границь (дислокаційних стінок) та вторинних фаз (домішки, збагачені телуром). Коефіцієнт сегрегації елементів Mn і Mg в CdTe близький до 1, що робить ці два елементи більш рівномірно розподіленими у злитку [7, 8]. Телурид кадмію і його сплав із селеном CdTeSe мають високий потенціал для використання в оптоелектронних пристроях, зокрема й в детекторах радіації [1, 9]. Додавання Se до CdTe покращує такі електронні властивості матеріалу, як час життя нерівноважних носіїв заряду, електронна рухливість, а також дозволяє регулювати заборонену зону, що також робить його перспективним кандидатом для застосування в детекторах і високоефективних сонячних елементах [10, 11].

На робочі характеристики електронних приладів значно впливає наявність структурних дефектів, які можуть визначати електрофізичні та детекторні властивості матеріалу. Одними з найпоширеніших дефектів структури в CdTe є вакансії кадмію V_{Cd} [12], телуру на місці кадмію Te_{Cd} [13], вакансії телуру V_{Te} [14], селен на місці кадмію Se_{Cd} [15]. Найбільш шкідливими структурними дефектами для транспортних характеристик матеріалів на основі CdTe і CdTeSe можуть бути вакансії кадмію V_{Cd}^2- [12, 16], які значно зменшують час життя нерівноважних носіїв заряду τ та ефективність збору зарядів η . Для компенсації цих двократно заряджених акцепторних дефектів вводять

легувальні домішки мілких донорів, наприклад In [6]. Будь-який напівпровідниковий матеріал детекторної якості повинен мати високий питомий опір, а саме $\rho \approx 10^{10}$ Ом·см. Це значно ускладнює експериментальне дослідження впливу i -х енергетичних рівнів E_i в забороненій зоні, перерізу захоплення нерівноважних носіїв заряду σ_i та концентрацій дефектів N_i на час життя нерівноважних електронів τ_n та дірок τ_p , електронну рухливість μ_n , а також на ефективність збору зарядів детектора η та його питомий опір ρ . Експериментальні зразки матеріалів зазвичай містять домішки та дефекти у фіксованих концентраціях, що не дає можливості визначити їх місце в загальній картині зміни електрофізичних та детекторних властивостей. Кількісні дослідження параметрів ρ , μ_n , τ_n , τ_p та η за допомогою експериментально визначених величин E_i , σ_i , N_i дозволяють зрозуміти механізми зміни електрофізичних та детекторних властивостей матеріалів на основі CdTeSe залежно від параметрів домішок і дефектів, а також з'ясувати інтервали змін їхньої концентрації, в межах яких можна одержати напівпровідник детекторної якості. Додавання селену в CdTe [16], CdZnTe [17, 18], CdMnTe [3], CdMgTe [1] покращують властивості переносу вільних носіїв заряду. Для з'ясування механізмів впливу селену на електрофізичні та детекторні властивості цих матеріалів модельні дослідження слід починати з найпростішого з них — CdTeSe з відомим вмістом дефектів та їхніх характеристик.

Метою цієї роботи було визначення методом комп'ютерного моделювання оптимального вмісту домішок і структурних дефектів, а також характеру їх впливу на електрофізичні та детекторні властивості CdTe(Mn, Mg, Zn)Se, виходячи з властивостей мате-

ріалів CdTe_{0,9}Se_{0,1} та CdTe_{0,95}Se_{0,05}, легованих індієм та експериментально досліджених у [16].

Використані моделі та матеріали

Для дослідження електрофізичних та детекторних властивостей матеріалів CdTeSe:In потрібно знати початковий склад його дефектів та домішок. Автори [16] ідентифікували точкові дефекти у вигляді рівнів енергії в межах забороненої зони кристала в двох типах детекторів на основі CdTeSe, вирощених у різних умовах. Ці рівні енергії, отримані експериментально, представлено в **таблиці**. Наведені там величини перерізу захоплення σ_i нерівноважних носіїв заряду рівнями дефектів визначалися у [16] за допомогою методики DLTS (*deep level transient spectroscopy*) і при моделюванні використовувалися для всіх рівнів, за винятком електронної пастки $E_C - 0,87$ еВ. Для неї була прийнята величина σ_p , отримана за результатами експериментальної методики TSC (*thermally stimulated current*), опублікованими, наприклад, у [19]. Дані для енергетичних рівнів, в тому числі розміщених всередині забороненої зони, одержані за цією методикою для прямозонних напівпровідників, добре узгоджуються з відомою моделлю рекомбінації Шоклі – Ріда, яка була застосована для обчислення часу життя нерівноважних електронів та дірок. Одержані величини τ_n та τ_p використовувались для визначення ефективності збору зарядів детекторів η . Слід зауважити, що величини перерізу захоплення, визначені за допомогою DLTS, зазвичай на три-чотири порядки більші виміряних за методикою TSC, тому обчислені з використанням цих даних значення часу життя нерівноважних носіїв заряду, а також ефективність збору зарядів η виходять значно менші. Представлені нижче залежності η від вмісту In, V_{Cd} і V_{Te} розраховувалися з використанням значень σ_i , одержаних за методикою DLTS для цих дефектів, що накладає додаткові обмеження на величину збору зарядів.

Застосовані фізичні моделі та їх апробація докладно описані в [20]. Рівняння електронейтральності складалося з урахуванням всіх домішок і дефектів,

зарєстрованих експериментально у [16]. Це рівняння чисельно розв'язувалося відносно рівня Фермі F , потім концентрації вільних електронів n та дірок p визначалися у наближенні параболічних зон. Ширина забороненої зони E_G в CdTe_{1-x}Se_x залежно від вмісту Se досліджувалася у [9, 21], а в цій роботі розраховувалася згідно з результатами роботи [9] за формулою $E_G = 1,511 - 0,539x$, де x — вміст селену.

Тоді, відповідно, для CdTe_{0,9}Se_{0,1} отримаємо $E_G = 1,457$ еВ, а для CdTe_{0,95}Se_{0,05} — $E_G = 1,484$ еВ

Рухливість електронів μ_n розраховувалася в наближенні часу релаксації імпульсу (тау-наближення) з урахуванням механізмів розсіювання на іонізованих та нейтральних центрах, оптичних, акустичних та п'єзоелектричних фононах. Рухливість дірок μ_p вважалась незмінною і прирівнювалась до $70 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$. Питому провідність розраховували за формулою $e\mu_n + e\mu_p$ (e — заряд електрона), а питомий опір — як обернену до неї величину. Ефективність збору зарядів η детектора визначали за рівнянням Хехта [22, с. 489]. Автори [9] реєстрували максимальний збір зарядів у плоскому детекторі на основі CdTe_{0,9}Se_{0,1} з відстанню між електродами $d = 1$ мм і напруженістю електричного поля $E = 250$ В/см. У процесі моделювання нами спочатку задавалися такі ж самі параметри, а потім $d = 5$ мм, $E = 1000$ В/см. Всі одержані залежності η від концентрації In були практично однаковими для обох випадків.

Результати моделювання та їх обговорення

Як зазначалося вище, для ефективної реєстрації іонізуючих випромінювань детектором необхідно, щоб величина питомого опору ρ детекторного матеріалу становила не менше 10^{10} Ом·см. В роботі [16] було одержано два напівпровідникових матеріали: CdTe_{0,9}Se_{0,1} з $\rho = (4-5) \cdot 10^8$ Ом·см та CdTe_{0,95}Se_{0,05} з $\rho = (4-5) \cdot 10^9$ Ом·см. Тобто навіть опору останнього недостатньо для матеріалу детекторної якості. На думку авторів, вищий на один порядок питомий опір CdTe_{0,95}Se_{0,05} пояснюється більшою концентрацією в

Склад дефектів та домішок у CdTe_{0,9}Se_{0,1} і CdTe_{0,95}Se_{0,05} [16]

Концентрація $N_i, \text{см}^{-3}$		E_i, eV	$\sigma_i, \text{см}^2$	Природа дефекту
CdTe _{0,9} Se _{0,1}	CdTe _{0,95} Se _{0,05}			
$5 \cdot 10^{12} - 1 \cdot 10^{14}$	$2 \cdot 10^{12} - 2 \cdot 10^{13}$	$E_C - 0,01$	$1,6 \cdot 10^{-22}$	Легувальна домішка In _{Cd}
$2 \cdot 10^{13}$	$1 \cdot 10^{13}$	$E_C - 0,017$	$1,6 \cdot 10^{-19}$	Міжвузловий, спричинений Cl, Al, Ni
$2,5 \cdot 10^{13}$	$1,25 \cdot 10^{13}$	$E_V + 0,14$	$5 \cdot 10^{-17}$	А-центр, комплекс $V_{Cd}^{2-} - Al_{\text{міжвузл}}$
$2,7 \cdot 10^{13}$	$8,5 \cdot 10^{12}$	$E_V + 0,18$	$1 \cdot 10^{-16}$	А-центр, комплекс $V_{Cd}^{2-} - In$
$2 \cdot 10^{13}$	$3 \cdot 10^{12}$	$E_V + 0,35$	$1,6 \cdot 10^{-14}$	Вакансія кадмію V_{Cd}^{2-}
$4 \cdot 10^{13}$	$9 \cdot 10^{12}$	$E_C - 0,87$	$5,6 \cdot 10^{-12}$	Електронна пастка
$7 \cdot 10^{12}$	$2 \cdot 10^{13}$	$E_V + 1,1$	$1 \cdot 10^{-11}$	Вакансія телуру V_{Te}

ньому вакансій телуру, а також нижчою концентрацією А-центрів, V_{Cd} і глибокої електронної пастки 0,87 еВ (див. таблицю). В роботі [16] одержали матеріали з фіксованими концентраціями домішок та дефектів. Становить інтерес всесторонньо дослідити поведінку ρ залежно від вмісту V_{Te} , легувального In, А-центрів, глибокої пастки та V_{Cd} в широкому інтервалі змін їх вмісту. На **рис. 1, 2** продемонстровано поведінку питомого опору залежно від концентрації індію, вакансій телуру та кадмію для обох матеріалів.

З рис. 1 можна побачити, що високоомний стан (10^9 Ом·см) для $CdTe_{0,9}Se_{0,1}$ забезпечується у дуже вузькому діапазоні концентрації домішок індію та структурних дефектів — вакансій Cd і Te, тому оче-

видно, що на практиці технологічно важко “влучити” в нього, щоб отримати відповідний матеріал. Крім того, при моделюванні двовимірних залежностей $\rho(N(In))$ при вмісті дефектів, наведеному в таблиці, максимальна величина питомого опору ρ_{max} для $CdTe_{0,9}Se_{0,1}$ становила $2,3 \cdot 10^9$ Ом·см, чого явно недостатньо для досягнення детекторної якості. Моделювання також показало, що зміна концентрації мілких акцепторів А-центрів призводить лише до зсуву залежностей $\rho[N(In), N(V_{Cd}), N(V_{Te})]$. З іншого боку, збільшення вмісту неконтрольованої електронної пастки 0,87 еВ в $CdTe_{0,9}Se_{0,1}$ призводить не до зменшення питомого опору, як припускали автори [16], а навпаки — до деякого розширення високоом-

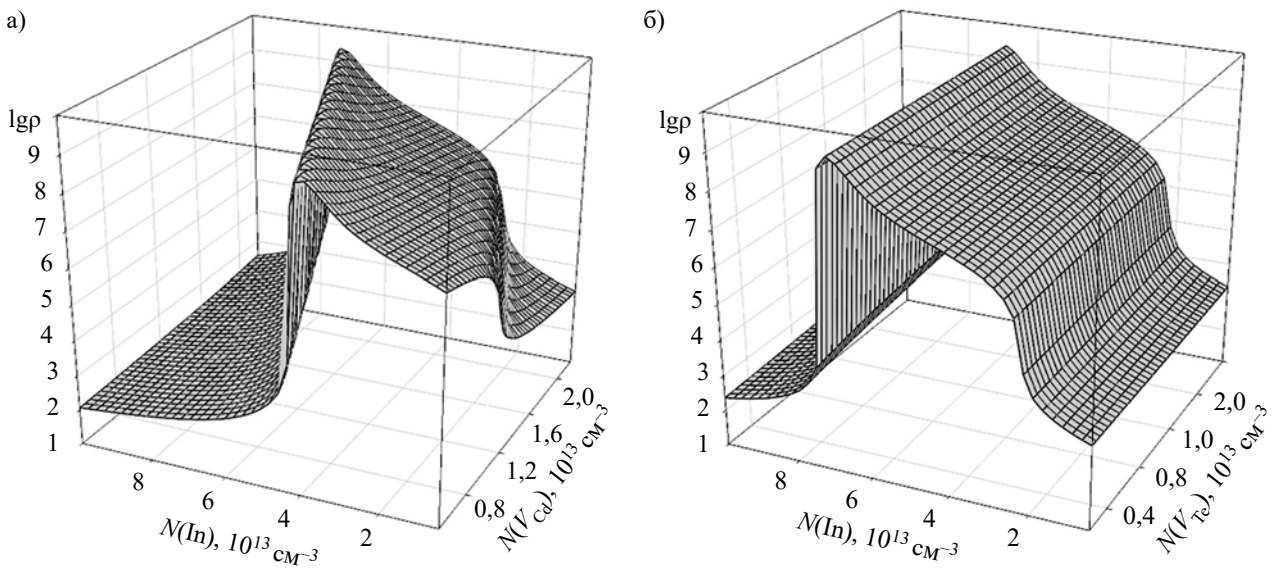


Рис. 1. Залежності десяткового логарифма питомого опору від вмісту індію та вакансій кадмію (а), а також індію та вакансій телуру (б) для $CdTe_{0,9}Se_{0,1}$

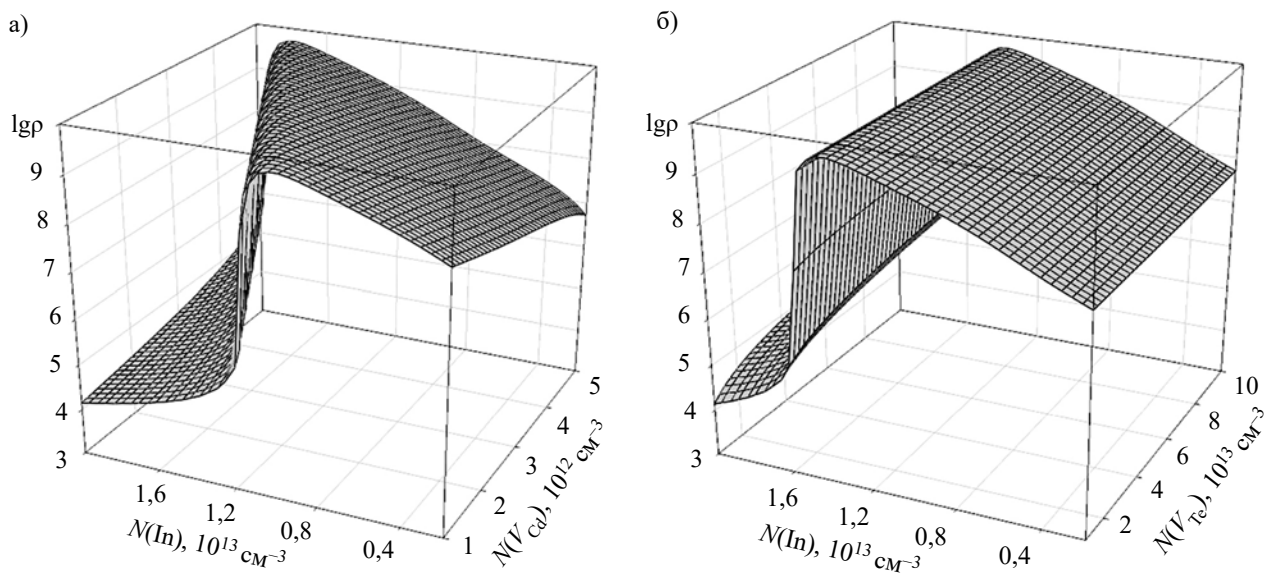


Рис. 2. Залежності десяткового логарифма питомого опору від вмісту індію та вакансій кадмію (а), а також індію та вакансій телуру (б) для $CdTe_{0,95}Se_{0,05}$

ної області. Аналогічна поведінка спостерігається й для матеріалу $\text{CdTe}_{0,95}\text{Se}_{0,05}$, в якому, однак, концентраційні діапазони високого питомого опору дещо ширші (рис. 2) попри те, що вміст згаданої електронної пастки менший. Максимальна величина ρ_{max} для $\text{CdTe}_{0,95}\text{Se}_{0,05}$ досягає $5,3 \cdot 10^9$ Ом·см. У використовуваній моделі приймалося, що розподіл дефектів ідеально однорідний, а струми витоку відсутні, що є недостатньо високими значеннями ρ . Для $\text{CdTe}_{0,95}\text{Se}_{0,05}$ розміри високоомної області значно більші й величина ρ_{max} вища, тому його вимірний питомий опір був на порядок більший, ніж $\text{CdTe}_{0,9}\text{Se}_{0,1}$. Такий результат розходиться з думкою авторів [16], які стверджували, що значення $\rho \approx 10^{10}$ Ом·см не вдалося досягти через недостатню компенсацію А-центрів і вакансій кадмію. З рис. 1 і рис. 2 можна побачити, що в обох матеріалах ця компенсація домішкою In є повною й охоплює області високоомного стану між низькоомними областями з електронними та дірковими типами провідності. З рис. 1, б та рис. 2, б також видно, що збільшення вмісту вакансій телуру не впливає на високоомний стан обох матеріалів.

Порівнюючи залежності на рис. 1 і рис. 2, можна зробити висновок, що більш придатним матеріалом для виготовлення детекторів є $\text{CdTe}_{0,95}\text{Se}_{0,05}$. Розглянемо його детекторні властивості.

На рис. 3 показані графіки ефективності збору зарядів η залежно від вмісту легувального індію для різних концентрацій вакансій телуру при концентраціях решти домішок та дефектів, наведених у таблиці. З рисунка можна побачити, що при початкових концентраціях дефектів, представлених у таблиці, ефективність збору зарядів досягає досить високого зна-

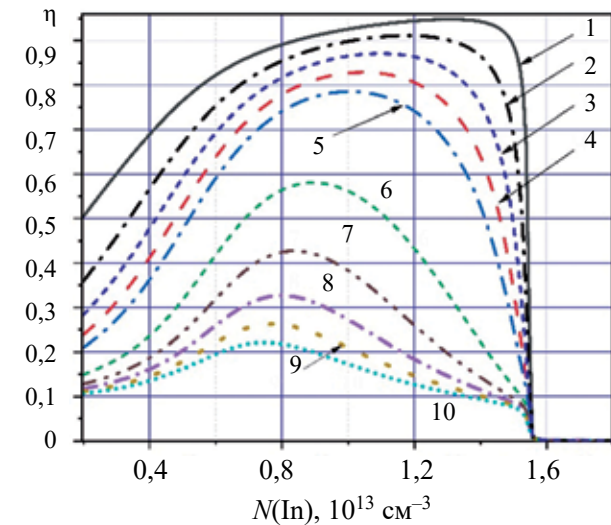


Рис. 3. Залежність ефективності збору зарядів у детекторі на основі $\text{CdTe}_{0,95}\text{Se}_{0,05}$ від рівня легування індієм за різної концентрації вакансій телуру (см^{-3}):

1 — $2 \cdot 10^{13}$; 2 — $4 \cdot 10^{13}$; 3 — $6 \cdot 10^{13}$; 4 — $8 \cdot 10^{13}$; 5 — $1 \cdot 10^{14}$; 6 — $2 \cdot 10^{14}$; 7 — $3 \cdot 10^{14}$; 8 — $4 \cdot 10^{14}$; 9 — $5 \cdot 10^{14}$; 10 — $6 \cdot 10^{14}$

чення — 0,95. Зменшення максимального значення ефективності збору зарядів у рази (з 0,95 до 0,2) має місце лише після збільшення вмісту V_{Te} на півтора порядки (з $2 \cdot 10^{13}$ до $6 \cdot 10^{14}$). Зазначимо, що великі значення η для вихідного матеріалу одержані попри те, що переріз захоплення для рівня V_{Te} визначався за методикою DLTS. Це свідчить про високий рівень транспортних характеристик у $\text{CdTe}_{0,95}\text{Se}_{0,05}$.

Загальновідомо (див., наприклад, [12, 20]), що вакансії кадмію, які слугують пастками для нерівноважних носіїв заряду в CdTe, помітно знижують збір зарядів через рекомбінацію носіїв на енергетичному рівні V_{Cd} . На рис. 4 представлено графіки ефективності збору зарядів залежно від вмісту легувального індію для різних концентрацій вакансій кадмію при

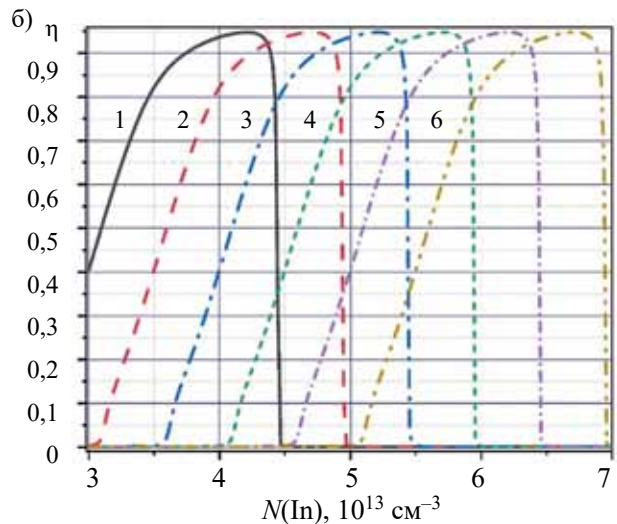
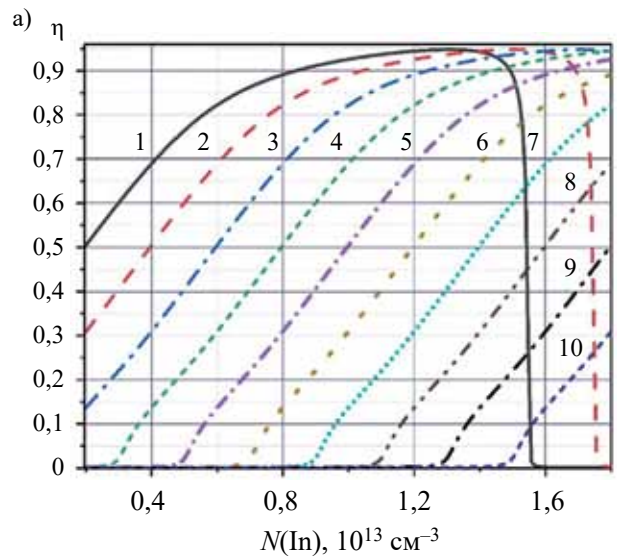


Рис. 4. Залежність ефективності збору зарядів у детекторі на основі $\text{CdTe}_{0,95}\text{Se}_{0,05}$ від рівня легування індієм за різної концентрації вакансій кадмію (см^{-3}):

а): 1 — $3 \cdot 10^{12}$; 2 — $4 \cdot 10^{12}$; 3 — $5 \cdot 10^{12}$; 4 — $6 \cdot 10^{12}$; 5 — $7 \cdot 10^{12}$; 6 — $8 \cdot 10^{12}$; 7 — $9 \cdot 10^{12}$; 8 — $1 \cdot 10^{13}$; 9 — $1,1 \cdot 10^{13}$; 10 — $1,2 \cdot 10^{13}$
 б): 1 — $1,75 \cdot 10^{13}$; 2 — $2 \cdot 10^{13}$; 3 — $2,25 \cdot 10^{13}$; 4 — $2,5 \cdot 10^{13}$; 5 — $2,75 \cdot 10^{13}$; 6 — $3 \cdot 10^{13}$

концентраціях решти домішок та дефектів, наведені у таблиці.

З рис. 4, а видно, що у $\text{CdTe}_{0,95}\text{Se}_{0,05}$ збільшення вмісту вакансій кадмію не впливає на максимальну величину збору зарядів, а призводить лише до зсуву залежностей $\eta(N(\text{In}))$ в бік вищих концентрацій індію. На рис. 4, б наведено такі ж залежності, що і на рис. 4, а, тільки у діапазоні більш високих концентрацій індію та для більших концентрацій вакансій кадмію. З порівняння цих рисунків бачимо, що навіть суттєве збільшення вмісту V_{Cd} не призводить до зменшення ефективності збору зарядів. Присутній лише такий самий зсув залежностей η у бік більших значень вмісту індію, причому ширина графіка залежності $\eta(N(\text{In}))$ залишається незмінною, і на висоті $\eta=0,5$ складає приблизно $1,4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Тому при збільшенні концентрації вакансій кадмію завжди зберегти високий рівень η детектора, збільшуючи приблизно так само вміст легувального індію.

Таким чином, введення в матрицю CdTe невеликої кількості Se розв'язує відому проблему деградації детекторних властивостей цього матеріалу через рекомбінацію нерівноважних носіїв заряду на енергетичних рівнях V_{Cd} . Щодо наявності вакансій телуру в CdTeSe , то з рис. 3 бачимо, що при концентрації $N(V_{\text{Te}}) = 2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, зафіксованій в експерименті [16], збір зарядів знаходиться на високому рівні.

Єдиним недоліком досліджуваного матеріалу $\text{CdTe}_{0,95}\text{Se}_{0,05}$ є невелике зменшення ширини забороненої зони E_G порівняно з CdTe , а особливо з CdZnTe , що призводить до зменшення питомого опору і, як наслідок, до збільшення струмів витоку й електронних шумів у амплітудних спектрах детекторів. Для усунення цієї проблеми необхідно вводити в матрицю $\text{CdTe}_{0,95}\text{Se}_{0,05}$ легувальні елементи, які збільшу-

ють E_G в напівпровідникових сполуках на основі CdTe . Такими елементами можуть слугувати Mn [2, 3], Mg [1, 5], Zn [23, 24]. CdMgTe має високий ступінь кристалічності завдяки близьким параметрам решітки CdTe (0,648 нм) і MgTe (0,642 нм). Коефіцієнт сегрегації Mn і Mg у CdTe становить 1,0 порівняно з 1,35 для Zn в CdTe , що є важливою перевагою перед CdZnTe для забезпечення однорідного розподілу Mn і Mg у CdTe по всьому об'єму злитка.

Для коректного вивчення поведінки питомого опору після введення цих добавок у матрицю $\text{Cd}_{0,95}\text{Te}_{0,95}\text{Se}_{0,05}$ необхідно мати експериментально отримані значення вмісту домішок та дефектів у такому матеріалі. Оскільки в роботі [16] не досліджувались $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}_{0,95}\text{Se}_{0,05}$, $\text{Cd}_{1-x}\text{Mg}_x\text{Te}_{0,95}\text{Se}_{0,05}$ та $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}_{0,95}\text{Se}_{0,05}$, для приблизної оцінки електрофізичних властивостей таких детекторних матеріалів просто збільшимо ширину забороненої зони E_G на 0,116 еВ порівняно з $\text{Cd}_{0,95}\text{Te}_{0,95}\text{Se}_{0,05}$, тобто до 1,6 еВ при кімнатній температурі, що відповідає введенню, наприклад, марганцю та цинку у кількості, відповідно, 8,90 ат.% та 16,6 ат.% [25], а магнію приблизно 6,44 ат.% [8]. При цьому дно зони провідності E_C зміщується відносно енергетичних рівнів домішок і дефектів, а край валентної зони E_V залишається незмінним відносно них [26]. Таку сполуку позначимо через $\text{Cd}_{1-x}\text{Me}_x\text{Te}_{0,95}\text{Se}_{0,05}$, де замість Me може бути Mn , Mg , Zn .

Як було показано вище, питомий опір практично не залежить від концентрації вакансій телуру, тому була розрахована його залежність від концентрацій легувального індію та вакансій кадмію. На рис. 5, а видно, що тепер можна досягти необхідної для одержання матеріалу детекторної якості величини $\rho > 10^{10} \text{ Ом}\cdot\text{см}$. Для зменшення шумів в амплітуд-

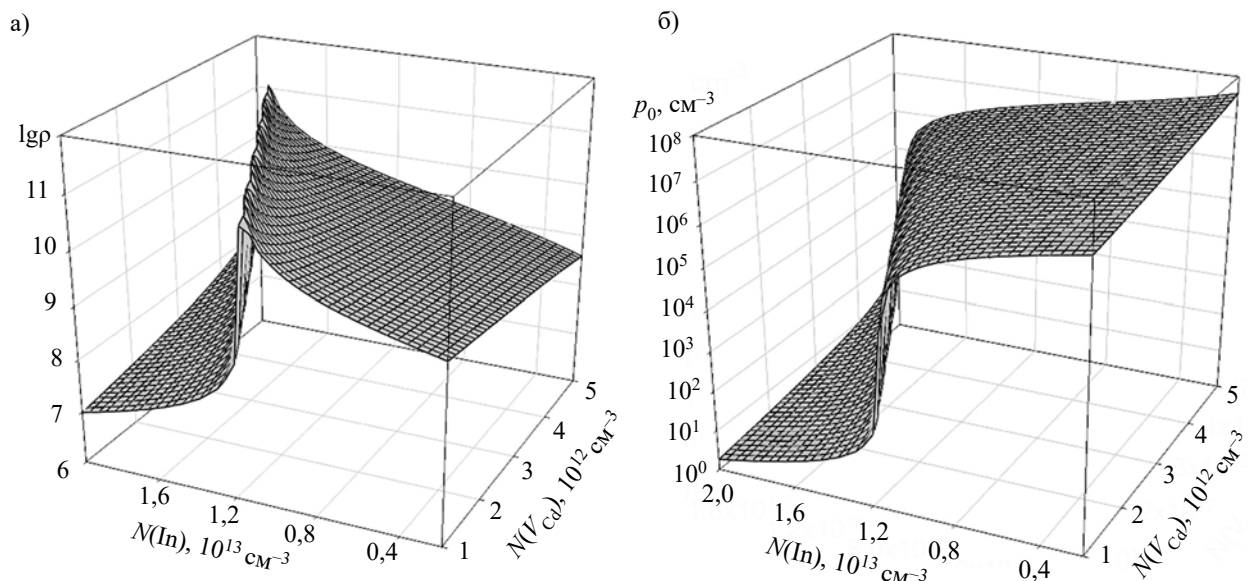


Рис. 5. Залежності логарифма питомого опору (а) і концентрації вільних дірок p_0 (б) від концентрацій індію та вакансій кадмію в діапазоні $2 \cdot 10^{12} \leq N(\text{In}) \leq 2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$; $1 \cdot 10^{12} \leq N(V_{\text{Cd}}) \leq 5 \cdot 10^{12}$

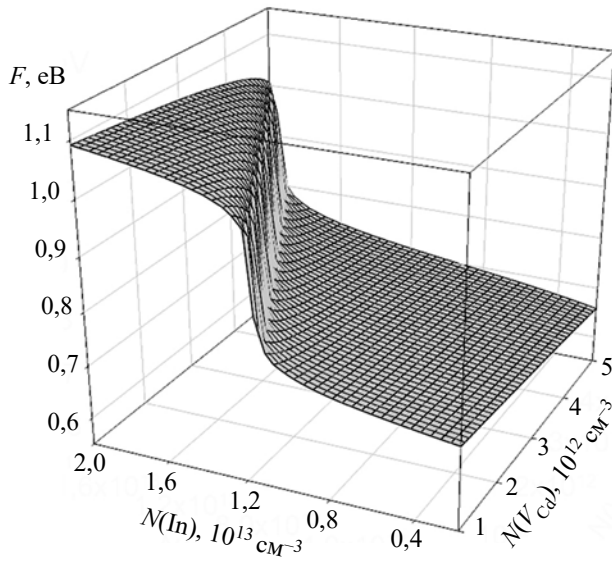


Рис. 6. Залежність рівня Фермі $Cd_{1-x}Me_xTe_{0,95}Se_{0,05}$ від концентрації індію та вакансій кадмію

них спектрах звичайно застосовується детекторний матеріал з дірковою провідністю. На рис. 5, б показана залежність концентрації вільних дірок від вмісту індію та вакансій кадмію. Після різкого стрибка концентрації дірок провідність стає дірковою. Таким чином, область з $\rho \geq 10^{10}$ Ом·см має необхідну для детектора діркову провідність.

На рис. 6 продемонстровано поведінку рівня Фермі в таких же діапазонах зміни концентрацій In і V_{Cd} . Пологе плато в правій частині рисунка демонструє проходження рівня Фермі через середину забороненої зони, тобто його відносно невелику стабілізацію в безпосередній близькості від рівня електронної пастки $E_C - 0,87$ (= -0,116) eВ (див. таблицю), що відповідає високоомній області. Положення рівня цієї пастки не змінилося відносно краю валентної зони при розширенні E_G , а збільшилась відстань до дна зони провідності.

Якщо порівнювати залежності питомого опору (рис. 5, а), концентрації вільних носіїв заряду, зокрема дірок p_0 (рис. 5, б), і рівня Фермі (рис. 6) в одному діапазоні змін концентрації акцепторних структурних дефектів V_{Cd} та легувальної донорної домішки In, то можна побачити, що навіть невеликі зміни рівня Фермі ($F \approx 0,5$ eВ) призводять до зміни величини p_0 та ρ у кілька разів. Моделювання показало також, що збільшення вмісту всіх домішок та дефектів на один-два порядки, тобто зменшення чистоти матеріалу, призводить до набагато більшої залежності положення рівня Фермі від співвідношення іонізованих акцепторних і донорних центрів, тобто ступеня компенсації матеріалу. Таким чином, при одержанні високочистих напівпровідникових сполук, виготовлених з високочистих компонентів, у нашому випадку Cd, Te, Se, Mn тощо, набагато легше стабілізувати

рівень Фермі всередині забороненої зони й досягти необхідного високоомного стану.

Роль Se в сполуках на основі CdTe полягає у зниженні концентрації іонізованих глибоких рівнів, що було показано, наприклад, у [23, 27, 28]. З іншого боку, зменшення вмісту глибоких рівнів значно звужує область високоомного стану [20]. Певно саме тому поведінка питомого опору на рис. 2 та рис. 5, а та рівня Фермі на рис. 6 демонструє помітний нахил залежностей величини ρ і F від концентрації легувального індію, що знижує ймовірність одержання необхідного високоомного стану. В [29] було показано, що для вирівнювання такого нахилу та розширення високоомної області необхідно вводити донорну домішку з глибоким рівнем, розміщеним приблизно на 0,08 eВ вище середини забороненої зони. При цьому ефективність збору зарядів знаходилась у межах 0,7–0,8 навіть попри те, що концентрація домішок та дефектів у $Cd_{0,92}Mg_{0,08}Te$ були значно вищими: приблизно 10^{16} см⁻³. Тобто потрібні подальші дослідження та розроблення технологій одержання матеріалів $Cd_{1-x}Me_xTe_{1-y}Se_y$ з додаванням донорних домішок, які вносять різні глибокі рівні у заборонену зону.

Моделювання ефективності збору зарядів у детекторі на основі $Cd_{1-x}Me_xTe_{0,95}Se_{0,05}$ показала прийнятну для детекторів поведінку η , схожу до наведених на рис. 3 та рис. 4. Час життя нерівноважних носіїв заряду в діапазонах концентрацій In з високим рівнем збору заряду η досягає $7 \cdot 10^{-6}$ с для електронів та $1,5 \cdot 10^{-6}$ с для дірок. Добуток рухливості електронів на час життя дорівнює $5,7 \cdot 10^{-3}$ см²/В, що характеризує високі транспортні характеристики матеріалу. У [9] для порівняння було одержано $CdTe_{0,9}Se_{0,1}:In$, який мав $\mu\tau = 3,5 \cdot 10^{-3}$ см²/В. Досліджуваний в цій нашій роботі та у [16] матеріал одержували з високочистих компонентів: CdSe та CdTe чистотою 6N. Таким чином, необхідний детекторний матеріал $Cd_{1-x}Me_xTe_{0,95}Se_{0,05}$ можна одержати, якщо використовувати вихідний Me чистотою не менше 6N, який не вносить додаткові центри розсіювання та рекомбінації. Для досягнення великих значень η та $\mu\tau$ можна також розглядати добавку цинку в CdTeSe, хоча коефіцієнт сегрегації Zn в CdTe помітно більший за одиницю (1,35), що може спричинити виникнення неоднорідності CdZnTeSe та появу додаткових дефектів. При цьому вже були одержані матеріали детекторної якості з високим розрізненням основного піка в амплітудних спектрах [17] та великими значеннями $\mu\tau$ для електронів — $1,9 \cdot 10^{-3}$ см²/В і для дірок — $1,4 \cdot 10^{-4}$ см²/В [18]. Введення селену в CdZnTe практично зупиняє утворення міжзеренних сіток, регулює сегрегацію цинку у бік більш однорідного складу та різко знижує концентрацію включень телуру [30].

Подальші дослідження за допомогою моделювання слід спрямувати на вивчення закономірностей

зміни електрофізичних та детекторних властивостей $\text{Cd}_{1-x}\text{Me}_x\text{Te}_{1-y}\text{Se}_y$ ($x > 0, y < 0,1$) залежно від концентрації експериментально визначених фонових та легувальних мілких, а також глибоких донорних домішок і дефектів структури.

Висновки

Таким чином, дослідження показали, що додавання кількох атомних процентів селену до високочистого матеріалу CdTe забезпечує високу ефективність збору зарядів (0,9–0,95) у виготовлених на його основі детекторах гамма- та рентгенівських випромінювань. З відомих структурних дефектів у таких детекторних матеріалах спостерігаються вакансії телуру та кадмію. Збільшення вмісту вакансій телуру у п'ять разів викликає невелике зменшення максимальної величини ефективності збору зарядів до $\eta_{\text{max}} \approx 0,8$, а підвищення не менш ніж на порядок не впливає на високоомний стан детекторного матеріалу. Збільшення вмісту вакансій кадмію, шкідливих для досягнення детекторної якості переважної більшості сполук на основі CdTe, не призводить до зменшення η_{max} детектора. У високочистому матеріалі на основі CdTeSe з загальною концентрацією домішок та дефектів не вище 10^{13} см^{-3} можна одержати високоомний стан з рівнем Фермі поблизу середини забороненої зони та питомим опором $\rho \geq 10^{10} \text{ Ом}\cdot\text{см}$ шляхом розширення забороненої зони завдяки введенню в матрицю Zn, Mn, Mg чистотою не нижче 6N у кількості $\leq 10 \text{ ат.}\%$. Для одержання таких напівпровідникових сполук і виробництва детекторів високої якості певні зусилля слід також направляти на розроблення технологій одержання CdMnTeSe, CdMgTeSe, CdZnTeSe, легуваних глибокими донорами з рівнем енергії вище середини забороненої зони.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Mycielski A., Wardak A., Kochanowska D. et al. CdTe-based crystals with Mg, Se, or Mn as materials for X and gamma ray detectors: Selected physical properties. *Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials*. 2021, vol. 67, iss. 4, 100543. <https://doi.org/10.1016/j.pcrysgrow.2021.100543>
2. Jeong A., Seo J., Shin G. et al. Feasibility study of CdMnTeSe based diagnostic X-ray detector. *Nuclear Engineering and Technology*, 2024, vol. 56, iss. 11, pp. 4748–4754. <https://doi.org/10.1016/j.net.2024.06.038>
3. Byun J., Seo J., Park B. Growth and characterization of detector-grade CdMnTeSe. *Nuclear Engineering and Technology*, 2022, vol. 54, iss. 11, pp. 4215–4219. <https://doi.org/10.1016/j.net.2022.06.007>
4. Roy U.N., James, R.B. CdZnTeSe: Recent Advances for Radiation Detector Applications. In book: Abbene L., Iniewski K. (eds) *High-Z Materials for X-ray Detection, Material Properties and Characterization Techniques*. Cham, Springer International Publishing, 2023, pp. 155–170. https://doi.org/10.1007/978-3-031-20955-0_8
5. Yu P., Zhao S., Gao P. et al. Growth and characterization of large-size CdMgTe single crystals doped with different in amounts. *Vacuum*, 2024, vol. 220, 112860. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2023.112860>
6. Wardak A., Kochanowska D.M., Kochański M. et al. Effect of doping and annealing on resistivity, mobility-lifetime product, and detector response of (Cd,Mn)Te. *Journal of Alloys and Compounds*, 2023, vol. 936, p. 168280. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.168280>
7. Luan L., Gao L., Lv H. et al. Analyses of crystal growth, optical, electrical, thermal and mechanical properties of an excellent detector-grade Cd_{0,9}Mn_{0,1}Te:V crystal. *Scientific Reports*, 2020, vol. 10, iss. 1, 2749. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-59612-0>
8. Yu P., Jiang B., Chen Y. et al. Growth and characterization of room temperature radiation detection material Cd_{0,95}Mg_{0,05}Te. *Journal Crystal Growth*, 2020, vol. 543, 125719. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2020.125719>
9. Camarda G. S., Yang G., Bolotnikov A. E. et al. Characterization of detector-grade CdTe_{0,9}Se_{0,1} crystals. *Proceeding of the 2013 Materials Research Society Spring Meeting*, USA, San Francisco, California, 2013.
10. Kuciauskas D., Nardone M., Bothwell A. et al. Why Increased CdSeTe Charge Carrier Lifetimes and Radiative Efficiencies did not Result in Voltage Boost for CdTe Solar Cells. *Advanced Energy Materials*, 2023, vol. 13, 2301784. <https://doi.org/10.1002/aenm.202301784>
11. Kim K., Kim Y., F. Jan, Fochuk P. et al. Enhanced hole mobility-lifetime product in selenium-added CdTe compounds. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2023, vol. 1053, 168363. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2023.168363>
12. Kavanagh S. R., Walsh A., Scanlon D. O. Rapid Recombination by Cadmium Vacancies in CdTe. *ACS Energy Letters*, 2021, vol. 6, iss. 4, pp. 1392–1398. <https://doi.org/10.1021/acsenylett.1c00380>
13. Orellana W., Menéndez-Proupin E., and Flores M. A. Self-compensation in chlorine-doped CdTe. *Sci. Rep.* 2019, vol. 9, 9194. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-45625-x>
14. Menéndez-Proupin E., Casanova-Páez M., Montero-Alejo A. et al. Symmetry and thermodynamics of tellurium vacancies in cadmium telluride. *Phys. B: Condens. Matter*, 2019, vol. 568, pp. 81–87. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2019.01.013>
15. Selvaraj S. C., Gupta S., Caliste D., Pochet P. Passivation mechanism in CdTe solar cells: The hybrid role of Se. *Appl. Phys. Lett.* 2021, vol. 119, iss. 6, 062105. <https://doi.org/10.1063/5.0058290>
16. Gul R., Roy U. N., Egarievwe S. U. et al. Point defects: Their influence on electron trapping, resistivity, and electron mobility-lifetime product in CdTe_xSe_{1-x} detectors. *Journal of Applied Physics*, 2016, vol. 119, iss. 2, 025702. <http://dx.doi.org/10.1063/1.4939647>
17. Drabo M. L., Egarievwe S. U., Roy U. N. et al. Study of CdZnTeSe gamma-ray detector under various bias voltages. *Materials Sciences and Applications*, 2020, vol. 11, iss. 8, p. 553–559. <https://doi.org/10.4236/msa.2020.118036>
18. Pipek J., Betušiak M., Belas E. et al. Charge transport and space-charge formation in Cd_{1-x}Zn_xTe_{1-y}Se_y radiation detectors. *Physical Review Applied*, 2021, vol. 15, iss. 5, 054058 <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.15.054058>
19. Luan L., He Y., Zheng D. et al. Defects, electronic properties, and α particle energy spectrum response of the Cd_{0,9}Mn_{0,1}Te:V single crystal. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2020, vol. 31, iss. 16, pp. 1179–4487. <https://doi.org/10.1007/s10854-020-02996-6>
20. Кондрик А. И., Ковтун Г. П. Влияние примесей и структурных дефектов на электрофизические и детекторные свойства CdTe и CdZnTe. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, 2019, № 5–6, с. 43–50. <https://dx.doi.org/10.15222/TKEA2019.5-6.43>
21. Jingxiu Y., Su-Huai W. First-principles study of the band gap tuning and doping control in CdSe_xTe_{1-x} alloy for high efficiency solar cell. *Chinese Physics B*, 2019, vol. 28, iss. 8, 086106. <https://dx.doi.org/10.1088/1674-1056/28/8/086106>

22. Knoll G. F. *Radiation Detection and Measurement*, John Wiley & Sons, Inc., 2010, 829 p.
23. Park B., Kim Y., Seo J. et al. Bandgap engineering of $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}_{1-y}\text{Se}_y$ ($0 < x < 0.27$, $0 < y < 0.026$). *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2022, vol. 1036, iss. 8, 166836. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2022.166836>
24. Roy U. N., Camarda G. S., Cui Y. et al. Role of selenium addition to CdZnTe matrix for room-temperature radiation detector applications. *Scientific Reports*, 2019, vol. 9, iss. 1, 1620. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-38188-w>
25. Mycielski A., Burger A., Sowinska M. et al. Is the (Cd,Mn)Te crystal a prospective material for X-ray and γ -ray detectors? *Phys. Stat. Sol. (c)*. 2005, vol. 2, iss. 5, pp. 1578–1585. <https://doi.org/10.1002/pssc.200460838>
26. Castaldini A., Cavallini A., Fraboni B. Deep levels in CdTe and CdZnTe. *J. Appl. Phys.* 1998, vol. 83, iss. 4, pp. 2121–2126. <https://doi.org/10.1063/1.366946>
27. Fiederle M., Ebling D., Eiche C., Hofmann D. M. et al. Comparison of CdTe, $\text{Cd}_{0.9}\text{Zn}_{0.1}\text{Te}$ and $\text{CdTe}_{0.9}\text{Se}_{0.1}$ crystals: Application for γ - and X-ray detectors. *J. Cryst. Growth*. 1994, vol. 138, iss. 1–2, pp. 529–533. [https://doi.org/10.1016/0022-0248\(94\)90863-X](https://doi.org/10.1016/0022-0248(94)90863-X)
28. Gul R., Roy U. N., Camarda G. S. et al. A comparison of point defects in $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}_{1-y}\text{Se}_y$ crystals grown by bridgman and traveling heater methods. *J. Appl. Phys.* 2017, vol. 121, iss. 12, 125705. <https://doi.org/10.1063/1.4979012>
29. Kondrik O. I., Solopikhin D. A. The composition of impurities and defects in $\text{Cd}_{1-x}\text{Mg}_x\text{Te}:\text{In}$, necessary to ensure stable detector properties. *Problems of Atomic Science and Technology*, 2024, №4(152), pp. 34–39. <https://doi.org/10.46813/2024-152-034>
30. Roy U.N., Camarda G.S., Cui Y. et al. Impact of selenium addition to the cadmium-zinc-telluride matrix for producing high energy resolution X-and gamma-ray detectors. *Sci Rep.* 2021, vol. 11, 10338. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-89795-z>

Дата надходження рукопису
до редакції 12.11 2024 р.

DOI: 10.15222/TKEA2024.3-4.15
UDC 621.315.592.3

O. I. KONDRIK

Ukraine, Kharkiv, NSC “Kharkiv Institute of Physics and Technology”
E-mail: kondrik@kipt.kharkov.ua; alex.kondrik2012@gmail.com

INVESTIGATING THE POSSIBILITY OF USING CdTeSe-BASED MATERIALS FOR IONIZING RADIATION DETECTORS

The article describes the study of the properties of materials based on $\text{CdTe}_{1-x}\text{Se}_x$ suitable for X-ray and gamma radiation detectors. The purpose of the study was to determine by computer modeling the optimal content of impurities and structural defects and the nature of their influence on the electrophysical and detector properties of $\text{CdTe}(\text{Mn}, \text{Mg})\text{Se}$, based on the properties of $\text{CdTe}_{0.9}\text{Se}_{0.1}$ and $\text{CdTe}_{0.05}\text{Se}_{0.95}$ doped with indium. The values of concentrations N_i , activation energies E_i , and capture cross sections of non-equilibrium charge carriers σ_i for i -th defects were used as input data for modeling. The author studied the influence of defects on the change in resistivity ρ , concentration of free electrons n_0 and holes p_0 , Fermi level F , life time of non-equilibrium charge carriers τ and charge collection efficiency η of ionizing radiation detectors based on CdTeSe:In at the temperature of 25°C. The paper also highlights the results of quantitative studies of the influence of the impurities and defects content on the properties of $\text{CdTe}_{0.05}\text{Se}_{0.95}$ with the possible additives of Mn, Mg, and Zn. The regularities of change in ρ , F , η , depending on the content of indium impurities, cadmium and tellurium vacancies were established. The method of achieving a steady high-resistance state was considered. The direction of further research is formulated in order to establish the optimal composition of detector materials based on $\text{CdTe}_{1-x}\text{Se}_x$ with additives of manganese, magnesium, and zinc.

Keywords: CdTeSe, simulation, detector properties, electrophysical properties, structure defects, deep levels.

REFERENCES

1. Mycielski A., Wardak A., Kochanowska D. et al. CdTe-based crystals with Mg, Se, or Mn as materials for X and gamma ray detectors: Selected physical properties. *Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials*. 2021, vol. 67, iss. 4, 100543. <https://doi.org/10.1016/j.pcrysgrow.2021.100543>
2. Jeong A., Seo J., Shin G. et al. Feasibility study of CdMnTeSe based diagnostic X-ray detector. *Nuclear Engineering and Technology*, 2024, vol. 56, iss. 11, pp. 4748–4754. <https://doi.org/10.1016/j.net.2024.06.038>
3. Byun J., Seo J., Park B. Growth and characterization of detector-grade CdMnTeSe. *Nuclear Engineering and Technology*, 2022, vol. 54, iss. 11, pp. 4215–4219. <https://doi.org/10.1016/j.net.2022.06.007>
4. Roy U.N., James, R.B. CdZnTeSe: Recent Advances for Radiation Detector Applications. In book: Abbene L., Iniewski K. (eds) *High-Z Materials for X-ray Detection, Material Properties and Characterization Techniques*. Cham, Springer International Publishing, 2023, pp. 155–170. https://doi.org/10.1007/978-3-031-20955-0_8
5. Yu P., Zhao S., Gao P. et al. Growth and characterization of large-size CdMgTe single crystals doped with different in amounts. *Vacuum*, 2024, vol. 220, 112860. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2023.112860>
6. Wardak A., Kochanowska D.M., Kočański M. et al. Effect of doping and annealing on resistivity, mobility-lifetime product, and detector response of (Cd,Mn)Te. *Journal of Alloys and Compounds*, 2023, vol. 936, p. 168280. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.168280>
7. Luan L., Gao L., Lv H. et al. Analyses of crystal growth, optical, electrical, thermal and mechanical properties of an excellent detector-grade $\text{Cd}_{0.9}\text{Mn}_{0.1}\text{Te}:\text{V}$ crystal. *Scientific Reports*, 2020, vol. 10, iss. 1, 2749. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-59612-0>

8. Yu P., Jiang B., Chen Y. et al. Growth and characterization of room temperature radiation detection material $\text{Cd}_{0.95}\text{Mg}_{0.05}\text{Te}$. *Journal Crystal Growth*, 2020, vol. 543, 125719. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2020.125719>
9. Camarda G. S., Yang G., Bolotnikov A. E. et al. Characterization of detector-grade $\text{CdTe}_{0.9}\text{Se}_{0.1}$ crystals. *Proceeding of the 2013 Materials Research Society Spring Meeting*, USA, San Francisco, California, 2013.
10. Kuciauskas D., Nardone M., Bothwell A. et al. Why Increased CdSeTe Charge Carrier Lifetimes and Radiative Efficiencies did not Result in Voltage Boost for CdTe Solar Cells. *Advanced Energy Materials*, 2023, vol. 13, 2301784. <https://doi.org/10.1002/aenm.202301784>
11. Kim K., Kim Y., F. Jan, Fochuk P. et al. Enhanced hole mobility-lifetime product in selenium-added CdTe compounds. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2023, vol. 1053, 168363. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2023.168363>
12. Kavanagh S. R., Walsh A., Scanlon D. O. Rapid Recombination by Cadmium Vacancies in CdTe. *ACS Energy Letters*, 2021, vol. 6, iss. 4, pp. 1392–1398. <https://doi.org/10.1021/acsenenergylett.1c00380>
13. Orellana W., Menéndez-Proupin E., and Flores M. A. Self-compensation in chlorine-doped CdTe. *Sci. Rep.* 2019, vol. 9, 9194. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-45625-x>
14. Menéndez-Proupin E., Casanova-Páez M., Montero-Alejo A. et al. Symmetry and thermodynamics of tellurium vacancies in cadmium telluride. *Phys. B: Condens. Matter*, 2019, vol. 568, pp. 81–87. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2019.01.013>
15. Selvaraj S. C., Gupta S., Caliste D., Pochet P. Passivation mechanism in CdTe solar cells: The hybrid role of Se. *Appl. Phys. Lett.* 2021, vol. 119, iss. 6, 062105. <https://doi.org/10.1063/5.0058290>
16. Gul R., Roy U. N., Egarievwe S. U. et al. Point defects: Their influence on electron trapping, resistivity, and electron mobility-lifetime product in $\text{CdTe}_x\text{Se}_{1-x}$ detectors, *Journal of Applied Physics*, 2016, vol. 119, iss. 2, 025702. <http://dx.doi.org/10.1063/1.4939647>
17. Drabo M. L., Egarievwe S. U., Roy U. N. et al. Study of CdZnTeSe gamma-ray detector under various bias voltages. *Materials Sciences and Applications*, 2020, vol. 11, iss. 8, p. 553–559. <https://doi.org/10.4236/msa.2020.118036>
18. Pipek J., Betušiak M., Belas E. et al. Charge transport and space-charge formation in $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}_{1-y}\text{Se}_y$ radiation detectors. *Physical Review Applied*, 2021, vol. 15, iss. 5, 054058 <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.15.054058>
19. Luan L., He Y., Zheng D. et al. Defects, electronic properties, and α particle energy spectrum response of the $\text{Cd}_{0.9}\text{Mn}_{0.1}\text{Te}:\text{V}$ single crystal. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2020, vol. 31, iss. 16, pp. 1179–4487. <https://doi.org/10.1007/s10854-020-02996-6>
20. Kondrik A.I., Kovtun G.P. Influence of impurities and structural defects on electrophysical and detector properties of CdTe and CdZnTe. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoy Apparature*, 2019, no. 5–6, pp. 43–50. <https://dx.doi.org/10.15222/TKEA2019.5-6.43> (Rus)
21. Jingxiu Y., Su-Huai W. First-principles study of the band gap tuning and doping control in $\text{CdSe}_x\text{Te}_{1-x}$ alloy for high efficiency solar cell. *Chinese Physics B*, 2019, vol. 28, iss. 8, 086106, <https://dx.doi.org/10.1088/1674-1056/28/8/086106>
22. Knoll G. F. *Radiation Detection and Measurement*, John Wiley & Sons, Inc., 2010, 829 p.
23. Park B., Kim Y., Seo J. et al. Bandgap engineering of $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}_{1-y}\text{Se}_y$ ($0 < x < 0.27, 0 < y < 0.026$). *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2022, vol. 1036, iss. 8, 166836. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2022.166836>
24. Roy U. N., Camarda G. S., Cui Y. et al. Role of selenium addition to CdZnTe matrix for room-temperature radiation detector applications. *Scientific Reports*, 2019, vol. 9, iss. 1, 1620. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-38188-w>
25. Mycielski A., Burger A., Sowinska M. et al. Is the (Cd,Mn)Te crystal a prospective material for X-ray and γ -ray detectors? *Phys. Stat. Sol. (c)*. 2005, vol. 2, iss. 5, pp. 1578–1585. <https://doi.org/10.1002/pssc.200460838>
26. Castaldini A., Cavallini A., Fraboni B. Deep levels in CdTe and CdZnTe. *J. Appl. Phys.* 1998, vol. 83, iss. 4, pp. 2121–2126. <https://doi.org/10.1063/1.366946>
27. Fiederle M., Ebling D., Eiche C., Hofmann D. M. et al. Comparison of CdTe, $\text{Cd}_{0.9}\text{Zn}_{0.1}\text{Te}$ and $\text{CdTe}_{0.9}\text{Se}_{0.1}$ crystals: Application for γ - and X-ray detectors. *J. Cryst. Growth*. 1994, vol. 138, iss. 1–2, pp. 529–533. [https://doi.org/10.1016/0022-0248\(94\)90863-X](https://doi.org/10.1016/0022-0248(94)90863-X)
28. Gul R., Roy U. N., Camarda G. S. et al. A comparison of point defects in $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}_{1-y}\text{Se}_y$ crystals grown by bridgman and traveling heater methods. *J. Appl. Phys.* 2017, vol. 121, iss. 12, 125705. <https://doi.org/10.1063/1.4979012>
29. Kondrik O. I., Solopikhin D. A. The composition of impurities and defects in $\text{Cd}_{1-x}\text{Mg}_x\text{Te}:\text{In}$, necessary to ensure stable detector properties. *Problems of Atomic Science and Technology*, 2024, №4(152), pp. 34–39. <https://doi.org/10.46813/2024-152-034>
30. Roy U.N., Camarda G.S., Cui Y. et al. Impact of selenium addition to the cadmium-zinc-telluride matrix for producing high energy resolution X-and gamma-ray detectors. *Sci Rep.* 2021, vol. 11, 10338. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-89795-z>

Опис статті для цитування:

Кондрік О. І. Дослідження можливості використання матеріалів на основі CdTeSe для детекторів іонізуючих випромінювань. *Технологія та конструювання в електронній апаратурі*, 2024, № 3–4, с. 15–23. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2024.3-4.15>

Cite the article as:

Kondrik O. I. Investigating the possibility of using CdTeSe-based materials for ionizing radiation detectors. *Technology and design in electronic equipment*, 2024, no. 3–4, pp. 15–23. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2024.3-4.15>