

К. ф. -м. н. О. І. КОНДРИК¹, д. ф. -м. н. Г. П. КОВТУН^{1, 2}

Україна, ¹ІНЦ «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України,

²Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

E-mail: kondrik@kipt.kharkov.ua

ВПЛИВ ДОМІШОК І ДЕФЕКТІВ СТРУКТУРИ НА ВЛАСТИВОСТІ ДЕТЕКТОРІВ НА ОСНОВІ CdTe та CdZnTe

Методом комп'ютерного моделювання досліджено вплив легувальних та фонових домішок на прикладі Cl, Fe, Pb, Cr, Co, Ti, V, Ni, Ge, Sn на електрофізичні та детекторні властивості CdTe та Cd_{0,9}Zn_{0,1}Te. З'ясовано вплив вакансій кадмію, донорних домішок, скупчень домішок на деградацію питомого опору та ефективності збору зарядів детекторів іонізуючих випромінювань на основі досліджених матеріалів. Встановлено вплив рівня Фермі та рівнів енергії дефектів на зміну та деградацію властивостей досліджуваних матеріалів.

Ключові слова: телурид кадмію, CdZnTe, детекторні властивості, моделювання, глибокі рівні.

Телурид кадмію та потрійна сполука CdZnTe на сьогодні є одними з напівпровідникових матеріалів, що широко досліджуються та використовуються в неохолоджуваних детекторах для реєстрації рентгенівського та гамма-випромінювання [1–3]. Широке застосування ці матеріали отримали у неруйнівному аналізі, ядерній медицині [4, 5], атомній енергетиці та ядерній дозиметрії [6, 7]. Тонкоплівковий CdTe також розглядається як перспективний матеріал для сонячної енергетики [8]. Ці матеріали дозволяють отримувати датчики з активною областю великого розміру (50–100 мм³), високим питомим опором ρ (10^9 – 10^{11} Ом·см) при низьких струмах витоку, високою електронною рухливістю μ_n (1100–1200 см²/(В·с)), прийнятним часом життя нерівноважних електронів τ_n і дірок τ_p ($\approx 10^{-6}$ с).

У процесі отримання CdTe та CdZnTe детекторної якості до їхньої матриці потрапляють забруднювальні домішки, а в кристалічній структурі виникають дефекти, енергетичні рівні яких розташовуються в забороненій зоні, вони змінюють ступінь компенсації, зменшуючи ρ , та виступають як пастки нерівноважних носіїв. Щоб компенсувати електрично активні рівні пасток та збільшити ρ кристала, CdTe часто легують хлором, іноді йодом, а CdZnTe — алюмінієм, індієм або ітрієм. Al, In, Y виступають у ролі домішок заміщення на місці дома кадмію, а Cl — на місці телуру. Такі донорні компенсуювальні домішки додаються до матеріалів CdTe та CdZnTe в кількості 1–2 ppm, або $\approx 10^{16}$ см⁻³ [9, 10].

При використанні детекторів випромінювань на основі CdTe та CdZnTe в агресивному радіаційному середовищі вони піддаються опроміненню різної природи, що викликає радіаційні пошкодження в кристалі з появою радіаційних дефектів, які призводять

до деградації амплітудних спектрів, а також найважливішої характеристики детекторів — ефективності збору зарядів η . Радіаційна стійкість детекторів може залежати не тільки від радіаційних дефектів, а й від вихідного стану матриці: ступеня чистоти та структурної досконалості.

Технологічні прийоми, що дозволяють певною мірою керувати кількістю електрично активних домішок і власних дефектів, вже відомі [11], але для того щоб підібрати режими технологічних процесів глибокого рафінування Cd, Zn, Te і визначити оптимальні умови вирощування детекторного матеріалу, необхідно встановити вплив домішок, що містяться у вихідних компонентах, та дефектів структури, що виникають у процесі отримання кристалів та їх використання в детекторах, на електрофізичні та детекторні властивості CdTe та CdZnTe.

Матеріали CdTe та CdZnTe мають високий питомий опір, що ускладнює дослідження на мікрорівні механізмів зміни та деградації їхніх електрофізичних і детекторних властивостей під впливом дефектів, які виникають у процесі одержання та експлуатації, ґрунтуючись тільки на експериментальних методиках.

Метою представленої роботи було визначення методом комп'ютерного моделювання характеру впливу фонових домішок та структурних дефектів на електрофізичні та детекторні властивості CdTe та CdZnTe у зразках різного домішкового та дефектного складу.

Використані моделі та матеріали

Експериментальні вимірювання швидкості міжзонної рекомбінації в широкозонних напівпровідниках [12] доводять, що захоплення та рекомбінація нерівноважних електронів і дірок на глибоких рівнях домішок і дефектів мають вирішальний вплив на їхній час життя в CdTe та CdZnTe і, отже, на ефективність збору зарядів η детекторів на основі цих мате-

ріалів. Тому для оцінки часу життя нерівноважних носіїв заряду використовувалася модель рекомбінації Шоклі — Ріда [13]. Основними параметрами i -тих глибоких рівнів дефектів, що визначають детекторні властивості досліджуваних матеріалів, є концентрація N_i , переріз захоплення σ_i та положення у забороненій зоні (енергія активації) E_i [14—16]. Вимірювання струмів носіїв заряду, емітованих з рівнів у широкому інтервалі температур, дозволяють отримати спектри з явно вираженими піками за деяких температур, що відповідають певним положенням рівнів енергії E_i . Висота та ширина піків визначаються, відповідно, концентрацією рівнів N_i та поперечним перерізом захоплення σ_i нерівноважних носіїв заряду. Перекриття цих піків у поєднанні з високим питомим опором ρ може помітно спотворити справжні величини N_i , E_i та σ_i . Проте в [14—17], а також у деяких інших роботах спостерігається прийнятна відтворюваність вимірюваних величин E_i , заснована на добре відпрацьованій технології виготовлення детекторів, що дозволяє застосовувати такі результати для правильної ідентифікації рівнів дефектів. Для отримання значень σ_i можна використовувати результати роботи [18], де одночасно враховувався внесок всіх рівнів у струми, що емітуються у відповідні зони.

Застосовані моделі та їх апробація докладно описані у [19]. Рівняння електронейтральності складалися з урахуванням всіх домішок і дефектів, експериментально зареєстрованих в [15, 17]. Ці рівняння чисельно розв'язувалися відносно рівня Фермі E_F , потім концентрації вільних електронів (n) та дірок (p) визначалися у наближенні параболічних зон. Рухливість електронів μ_n розраховувалася в наближенні часу релаксації імпульсу (тау-наближення) з урахуванням механізмів розсіювання на іонізованих та нейтраль-

них центрах, акустичних та п'єзоелектричних фононах, оптичних фононах, а також розсіювання на скупченнях точкових дефектів. Рухливість дірок μ_p вважалась незмінною й прирівнювалась до $70 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$. Питому провідність розраховували за формулою $e \cdot n \cdot \mu_n + e \cdot p \cdot \mu_p$, а питомий опір — як обернену до неї величину.

З огляду на експериментально виміряні коефіцієнти міжзонної рекомбінації [12] встановлено, що темп міжзонної рекомбінації за кімнатної температури в досліджуваних матеріалах приблизно на десять порядків величини менший, ніж темп рекомбінації на глибоких рівнях домішок і дефектів, що описується статистикою Шоклі — Ріда — Холла, яка й була взята за основу в розрахунках часу життя нерівноважних носіїв заряду τ_n , τ_p . Ефективність збору зарядів детектора визначалася рівнянням Хехта [20, с. 489]. Припускалось, що відстань між електродами дорівнює 5 мм, напруженість електричного поля — 1000 V/cm .

Спектральні характеристики CdTe:Cl були взяті з [17] для вихідного, неопроміненого матеріалу, склад якого представлено у **табл. 1** з позначеннями, прийнятими в цій роботі. Склад $\text{Cd}_{0,9}\text{Zn}_{0,1}\text{Te}$ та характеристики рівнів були визначені експериментально в [15], вони відображені у **табл. 2**. В обох таблицях зазначено також зарядовий стан дефектів: «+» для донорів, енергія яких відраховується від дна зони провідності E_C , «-» для акцепторів, рівні яких відраховуються від стелі валентної зони E_V .

У CdTe також присутня домішка хлору, яка вводиться в матрицю у вигляді сполуки CdCl_2 . Вона діє як домішка заміщення на місці телуру Cl_{Te} , виступаючи в ролі донора, призначеного для компенсації акцепторів (AX , $A0$, A , $A1$, X) і досягнення високоомно-

Таблиця 1

Рівні дефектів у CdTe:Cl з питомим опором $\rho = 2 \cdot 10^9 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ [17]

Дефект	AX^-	$A0^-$	A^-	$A1^-$	X^-	$\frac{DX}{(V_{Cd}^{2-})}$	Z^+	Y^-	W^-	H^-	$\frac{H1}{(Te_{Cd}^+)}$	$\frac{I}{(V_{Te}^+)}$
E_i , eV	0,11	0,12	0,14	0,16	0,29	0,41	0,47	0,67	0,70	0,77	0,82	1,0
σ_i , cm^2	10^{-19}	10^{-19}	10^{-19}	$2 \cdot 10^{-19}$	10^{-18}	10^{-17}	10^{-16}	10^{-18}	10^{-18}	10^{-18}	10^{-18}	10^{-16}
N_i , cm^{-3}	$2 \cdot 10^{15}$	$5 \cdot 10^{15}$	$5 \cdot 10^{15}$	$5 \cdot 10^{14}$	$5 \cdot 10^{14}$	$5 \cdot 10^{15}$	$1 \cdot 10^{15}$	$3 \cdot 10^{15}$	$3 \cdot 10^{15}$	$5 \cdot 10^{15}$	$7 \cdot 10^{15}$	$1 \cdot 10^{16}$

Таблиця 2

Рівні дефектів у $\text{Cd}_{0,9}\text{Zn}_{0,1}\text{Te:Al}$ з питомим опором $\rho = 7,5 \cdot 10^9 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ [15]

Дефект	Al_{Cd}^+	E_1^+ (Ag,Au)	$E_2^-(V_{Cd})$	$E_3^-(A)$	$E_4^+(Cd_{Te})$	$E_5(C)$	$E_6^-(Cu)$	$E_7^{2+}(Te_{Cd})$	$E_8^{2-}(V_{Cd})$	$E_9^-(V_{Zn})$	E_{DD}^+
E_i , eV	0,014	0,047	0,094	0,127	0,185	0,236	0,291	0,371	0,507	0,620	0,778
σ_i , cm^2	$1 \cdot 10^{-21}$	$1 \cdot 10^{-14}$	$3,6 \cdot 10^{-19}$	$1,1 \cdot 10^{-18}$	$4,1 \cdot 10^{-18}$	$2,2 \cdot 10^{-18}$	$1,7 \cdot 10^{-18}$	$6,66 \cdot 10^{-18}$	$2,8 \cdot 10^{-18}$	$6,8 \cdot 10^{-17}$	$6,0 \cdot 10^{-18}$
N_i , cm^{-3}	$1,7 \cdot 10^{16}$	$3 \cdot 10^{14}$	$3,6 \cdot 10^{14}$	$1,5 \cdot 10^{14}$	$8,1 \cdot 10^{13}$	$4,2 \cdot 10^{13}$	$4,1 \cdot 10^{14}$	$4,6 \cdot 10^{14}$	$7,2 \cdot 10^{14}$	$1,1 \cdot 10^{14}$	$2,5 \cdot 10^{15}$

го стану. Дефекти AX , $A0$, A , $A1$, X , на думку авторів [14, 21—23], а також більшості інших дослідників, є комплексами вакансій кадмію з різними фоновими домішками. Двократно заряджені вакансії кадмію відповідають дефекту DX . У [17] Te_{Cd} та V_{Te} позначені, відповідно, як дефекти $H1$ та I . Дефект Z , імовірно телур міжвузловий, з'являється тільки в момент повної деградації реєструвальних властивостей детектора після його тривалої роботи в агресивному радіаційному середовищі. Енергія активації Cl_{Te} відносно краю зони провідності E_C становить 0,014 еВ за низьких, близько 10 К, температур. За кімнатної (робочої) температури детектора рівень енергії Cl_{Te} переходить у зону провідності.

Крім [17] подібний склад $CdTe$ описаний також, наприклад, у [10, 14, 15, 24]. Концентрації дефектів у $CdTe:Cl$ відповідають складу, описаному в [24], і підібрані такими, щоб при концентрації хлору $1,1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ досягався питомий опір телуриду кадмію, вимірюваний у [17] — $2 \cdot 10^9 \text{ Ом} \cdot \text{см}$.

Обчислені електрофізичні властивості неопроміненних $CdTe$ та $CdZnTe$ відповідали відомим експериментальним значенням: $\mu_n \approx 1200 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, час життя нерівноважних електронів τ_n та дірок τ_p був близьким до 10^{-6} с для обох матеріалів.

Результати та обговорення

У [17] величина вимірюваного питомого опору вихідного $CdTe:Cl$, склад якого представлено у табл. 1, дорівнювала $2 \cdot 10^9 \text{ Ом} \cdot \text{см}$. Для високочистого $Cd_{0,9}Zn_{0,1}Te$, склад якого представлено у табл. 2, автори [15] виміряли дещо більшу величину — $\rho = 7,5 \cdot 10^9 \text{ Ом} \cdot \text{см}$. Такі високоомні стани забезпечували низькі струми витоку та прийнятну детекторну якість цих матеріалів. Як відомо, у процесі вирощування телуриду кадмію в його кристалічній структурі виникають акцепторні точкові дефекти — двохзаряджені вакансії кадмію V_{Cd}^{2-} [12]. Вони були зареєстровані в [17], а в табл. 1 позначені як дефект DX , що сприяє рекомбінації нерівноважних носіїв заряду [25]. Це може значно знизити збір заряду в детекторі. До об'єму $CdTe$ та $CdZnTe$ в процесі їх отримання можуть вноситися фонові та технологічні домішки, зокрема елементи IV групи та перехідні метали [24], які здатні суттєво вплинути на величини ρ , τ_n , τ_p , η . Імовірно, також існує взаємозв'язок між чистотою та структурною досконалістю вихідних матеріалів і радіаційною стійкістю детекторів на їх основі. Представляє інтерес дослідження впливу дефектів структури та технологічних домішок на зміну та деградацію електрофізичних та детекторних властивостей $CdTe$ та $CdZnTe$.

Детектори на основі $CdTe:Cl$

Як вже зазначалося, вакансії кадмію можуть негативно впливати на спектроскопічні характеристики детекторів на основі телуриду кадмію. Графіки на **рис. 1** демонструють поведінку питомого опору $CdTe:Cl$

та рівня Фермі в широкому діапазоні вмісту легувального хлору для різних значень концентрації вакансій кадмію $N(V_{Cd})$. Збільшення вмісту вакансій кадмію до величини 10^{15} см^{-3} призводить до помітного зниження ρ (рис. 1, а), що, відповідно, збільшує струми витоку в матеріалі, а разом з ними й шуми у спектрах детектора. Рівень Фермі E_F при збільшенні $N(V_{Cd})$ по-

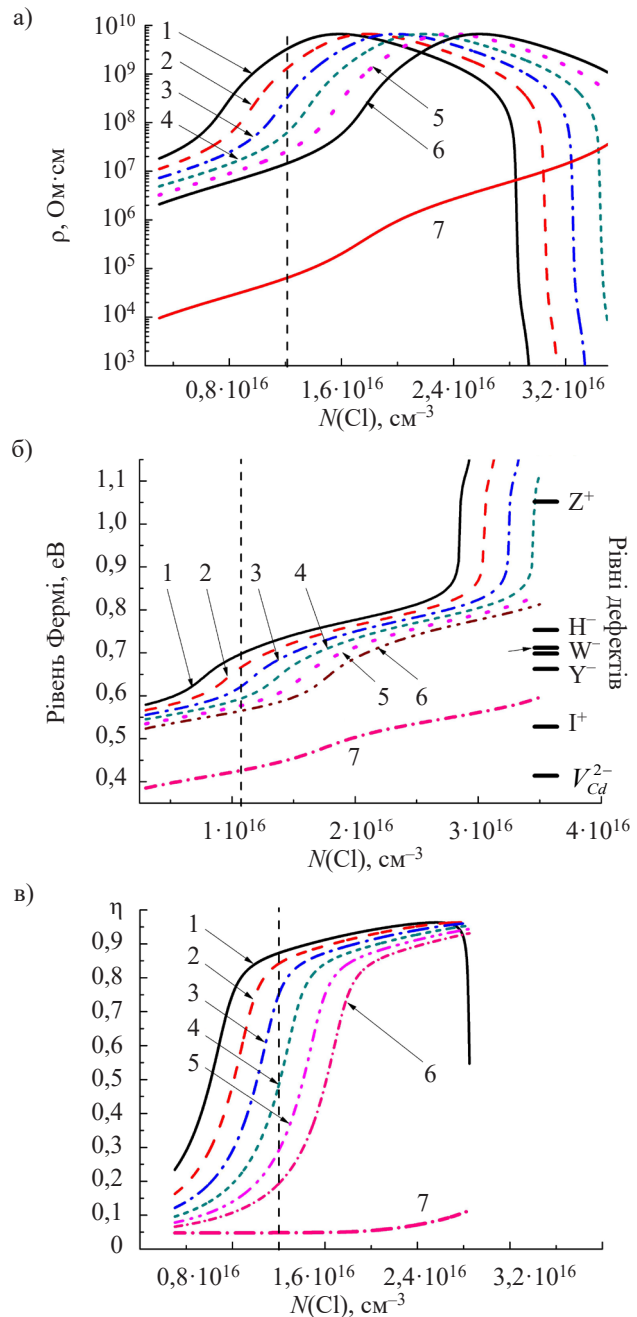


Рис. 1. Залежності питомого опору $CdTe:Cl$ (а), рівня Фермі (б) та ефективності збору зарядів (в) від вмісту легувального хлору для різних значень концентрації вакансій кадмію (у см^{-3}):

1 — $5 \cdot 10^{15}$; 2 — $6 \cdot 10^{15}$; 3 — $7 \cdot 10^{15}$; 4 — $8 \cdot 10^{15}$; 5 — $9 \cdot 10^{15}$; 6 — $1 \cdot 10^{16}$; 7 — $2 \cdot 10^{16}$

(вертикальні пунктирні лінії відповідають досліджуваному зразку [17])

ступово переміщується в напрямку валентної зони (див. рис. 1, б, де також показані положення рівнів дефектів, представлених у табл. 1). Поступове переміщення рівня E_F при зростанні концентрації $N(V_{Cd})$ до $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ змінюється стрибком до рівня V_{Cd}^{2-} при $N(V_{Cd}) = 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Такий стрибок відбувається тоді, коли концентрація іонізованих мілких акцепторів разом з концентрацією іонізованих вакансій кадмію з рівнем V_{Cd}^{2-} перевищує сумарну концентрацію іонізованих донорів. З рис. 1, б видно, що при концентрації вакансій кадмію $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ рівень Фермі E_F досліджуваного зразка знаходиться на краю рівня вакансії кадмію, а це своєю чергою має значно збільшувати темп захоплення та рекомбінації нерівноважних носіїв заряду на рівні V_{Cd}^{2-} з різким зменшенням збору зарядів.

На рис. 1, в зображено залежності ефективності збору зарядів η від вмісту легувального хлору для різних концентрацій V_{Cd} . Тут видно, що вже при $N(V_{Cd}) \approx (7-8) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, тобто на початку переміщення E_F у напрямку до валентної зони та рівня V_{Cd}^{2-} (див. рис. 1, б), збір зарядів помітно зменшується, а при $N(V_{Cd}) \approx 10^{16} \text{ см}^{-3}$ відбувається практично повна деградація детекторних властивостей і, отже, спектрів детектора. Крім того, з порівняння рис. 1, в з рис. 1, а видно, що чим більше ρ , тим більше η , і навпаки. Тобто, завдяки кореляції між поведінкою цих характеристик можна якісно оцінювати збір зарядів детектора, контролюючи особливості зміни ρ із врахуванням складу матеріалу.

У процесі отримання монокристалів CdTe та $\text{Cd}_{0,9}\text{Zn}_{0,1}\text{Te}$ в їхній об'єм разом із вихідними компонентами можуть потрапляти фонові домішки, наприклад домішки проникнення чи перехідні метали, які проявляють себе як глибокі донори [24]. При досягненні певної їх концентрації настає межа розчинності та стає можливим утворення скупчень домішок і дефектів, здатних істотно вплинути на електронну рухливість детекторних матеріалів [19, 26], це підтверджується графіками, представленими у [26, рис. 4, 5]. Як випливає з [26, рис. 4], у разі рівномірного розподілення домішок або дефектів по об'єму електронна рухливість μ_n змінюється незначно ($\approx 1,5\%$). Якщо ж в об'ємі присутні скупчення домішок та/або дефектів, величина μ_n може зменшуватися в рази ([26], рис. 5). Аналогічна картина спостерігається і для CdZnTe.

Щодо граничної розчинності в широкозонних напівпровідниках взагалі, то автори [27] показали, що розчинність домішок може залежати від рівня легування та ширини забороненої зони, й отримали вираз для рівноважної концентрації N_D електрично активної донорної домішки для невідродженого стану, коли $E_C - E_D \ll E_C - E_F$:

$$\ln N_D \approx \frac{3}{4} \frac{m_h}{m_e} + \ln(N_i N_c) - \frac{E_G}{2k_B T_0} \quad (1)$$

де m_e, m_h — ефективна маса електронів і дірок відповідно;
 N_i — концентрація домішок в розплаві;
 N_c — ефективна густина станів у зоні провідності;
 T_0 — температура “заморожування” домішок, за якої дифузія домішок фактично припиняється;
 E_G — ширина забороненої зони;
 k_B — постійна Больцмана.

В результаті розрахунків граничної розчинності домішок CdTe для концентрації $N_i = 4 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ та $T_0 = 1000 \text{ K}$ було отримано $N_D \approx 4 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ за кімнатної температури (300 K). Тобто якщо вміст точкових дефектів і домішок в телуриді кадмію не перевищує $1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, то можна добитися рівномірного їх розподілу в об'ємі кристала без утворення скупчень, через які деградують електрофізичні та детекторні властивості. Тому при модельному дослідженні впливу точкових дефектів на властивості детекторів цілком достатньо обмежитися діапазоном зміни їх концентрації до 10^{17} см^{-3} .

Вплив домішок деяких перехідних металів і елементів IV групи, що неавтоматично вносяться до матриці телуриду кадмію, на ефективність збору зарядів детектора демонструє рис. 2.

З рис. 2 бачимо, що для спектроскопічних характеристик детектора найбільш шкідливими домішками є олово, нікель, германій, ванадій, які вже в кількості $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ помітно знижують збір зарядів. Стосовно питомого опору, моделювання показало, що Fe, Ti, V, Ge, Sn аж до концентрацій $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ помітно не впливають на його величину, а домішки Cr та Ni при їх вмісті $(2-3) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ зменшують ρ детекторного матеріалу приблизно на два порядки через зміщення рівня Фермі E_F в околицю рівня Ni^+ ($E_V + 0,92 \text{ eV}$) та Cr^+ ($E_V + 1,34 \text{ eV}$). Іншими словами, підвищений вміст донорних домішок Ni та Cr з рів-

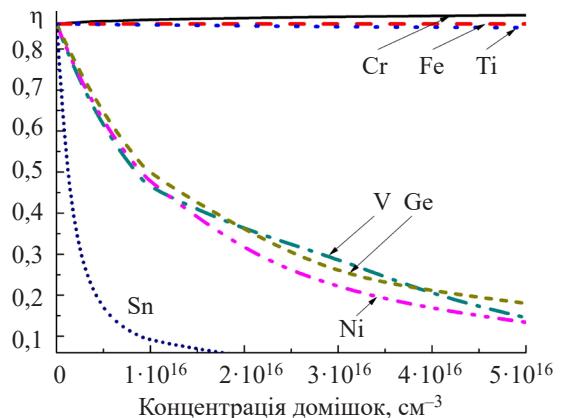


Рис. 2. Залежність ефективності збору зарядів детектора на основі CdTe:Cl від вмісту технологічних домішок Cr, Fe, Ti, V, Ge, Ni, Sn

нями енергії у верхній половині забороненої зони не лише зменшують збір зарядів, а й збільшують струми витоку та шуми у спектрах детектора. Деградувальна дія домішок Sn, Ge, V, Ni щодо величини η полягає у захопленні нерівноважних носіїв заряду на іонізовані рівні енергії цих домішок. Особливо шкідливою домішкою є Sn, рівень енергії якої $E_V + 0,77$ eV знаходиться близько до середини забороненої зони. Що ж до Fe ($E_V + 0,35$ eV) та Ti ($E_V + 0,50$ eV), то донорні рівні цих домішок розташовуються дуже глибоко у забороненій зоні, тобто у розглянутих умовах високоомного стану виявляються нижче рівня Фермі, тому є нейтральними й практично не впливають на електрофізичні та детекторні властивості телуриду кадмію. Рівень енергії $E_V + 1,34$ eV домішки Cr не впливає на η , тому що не захоплює нерівноважні носії заряду, оскільки в цих умовах він є повністю іонізованим і знаходиться занадто далеко від рівня Фермі. Справді, в цьому випадку E_F змінюється від $E_V + 0,70$ eV при $N(\text{Cr}) = 1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ до $E_V + 0,72$ eV при $N(\text{Cr}) = 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

Детектори на основі високочистого $\text{Cd}_{0,9}\text{Zn}_{0,1}\text{Te:Al}$

Детекторний матеріал $\text{Cd}_{0,9}\text{Zn}_{0,1}\text{Te}$, який також досліджувався у [17], має невеликі відмінності за складом від розглянутого CdTe:Cl , тому електрофізичні та детекторні властивості цих двох матеріалів теж якісно не відрізняються, у останнього більша лише величина питомого опору через дещо більшу (на кілька сотих eV) ширину забороненої зони E_G . З цієї причини було вирішено навести тут результати дослідження високочистого $\text{Cd}_{0,9}\text{Zn}_{0,1}\text{Te:Al}$, описаного у [15]. Склад такого детекторного матеріалу представлено у табл. 2.

З порівняння даних, наведених у табл. 1 і 2, видно, що концентрація фонових дефектів у $\text{Cd}_{0,9}\text{Zn}_{0,1}\text{Te:Al}$ приблизно на порядок нижча ніж у CdTe:Cl . Графіки

на рис. 3 демонструють зміни ефективності збору зарядів у детекторі на основі $\text{Cd}_{0,9}\text{Zn}_{0,1}\text{Te:Al}$ залежно від вмісту різних домішок деяких перехідних металів, описаних у [24].

З порівняння рис. 2 і 3 видно, що крім впливу шкідливих домішок V, Ge, Ni, Sn, присутніх у CdTe:Cl , у високочистому $\text{Cd}_{0,9}\text{Zn}_{0,1}\text{Te:Al}$ проявляється деградуєючий вплив титану з донорним рівнем енергії $E = E_V + 0,50$ eV, причому це відбувається вже за концентрації $N(\text{Ti}) = 1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Цей вплив можна пояснити тим, що з підвищенням чистоти та зменшенням вмісту фонових домішок знижується їх стабілізуючий вплив на рівень Фермі. У цьому випадку для зміни положення E_F в забороненій зоні високочистого матеріалу потрібна і менша концентрація фонові або легувальної домішки. Наприклад, менша сумарна концентрація фонових домішок потребує меншої кількості легувальної домішки для досягнення високоомного стану з розташуванням E_F поблизу середини E_G . Так, концентрація легувального алюмінію в $\text{Cd}_{0,9}\text{Zn}_{0,1}\text{Te:Al}$, необхідна для досягнення питомого опору $\rho = 7,5 \cdot 10^9 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ [15], дорівнювала $5,5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, тоді як вміст легувального хлору в CdTe:Cl для досягнення $\rho = 2 \cdot 10^9 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ становив $1,1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Крім того, донорний рівень Ti розташовується нижче E_F приблизно на 0,2 eV в телуриді кадмію і виявляється здебільшого нейтральним, отже зміна його концентрації слабо впливає на рівень Фермі та властивості детекторного матеріалу. З цієї причини зміна вмісту Ti в діапазоні концентрацій до 10^{16} см^{-3} у CdTe:Cl не призводить до зміни η . З іншого боку, в $\text{Cd}_{0,9}\text{Zn}_{0,1}\text{Te:Al}$ рівень E_F розміщується ближче до рівня Ti ніж в CdTe:Cl , тому на детекторні властивості високочистого CdZnTe титан впливає сильніше, ніж на властивості телуриду кадмію.

Серед домішок у CdTe:Cl , вплив яких не розглядався, залишилися донорні Co ($E_V + 1,25$ eV) та

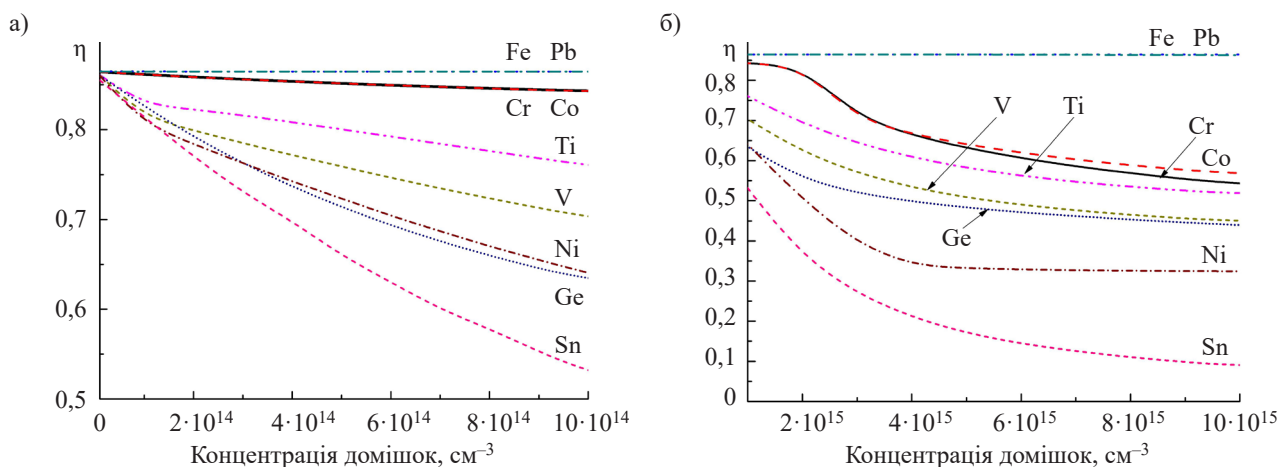


Рис. 3. Залежність ефективності збору зарядів детектора на основі $\text{Cd}_{0,9}\text{Zn}_{0,1}\text{Te:Al}$ від концентрації технологічних домішок деяких перехідних металів та елементів IV групи (на а та б — в різних інтервалах концентрації)

Pb ($E_V + 0,32$ eV). Кобальт проявляє себе аналогічно хрому, тобто його рівень повністю іонізований і розташовується в забороненій зоні дуже далеко від рівня E_F , тому впливає тільки на компенсацію та питомий опір, але не на збір зарядів у детекторі на основі $\text{Cd}_{0,9}\text{Zn}_{0,1}\text{Te:Al}$. Що стосується свинцю, то він поводить себе аналогічно залізу і не впливає на збір зарядів детекторного матеріалу, оскільки в умовах, що розглядаються, його донорний рівень завжди нейтральний, оскільки розташовується помітно нижче E_F .

Вище описувався негативний вплив на електрофізичні та детекторні властивості телуриду кадмію з боку акцепторних вакансій кадмію та донорних домішок із рівнями енергії, розташованими у верхній половині забороненої зони. Приблизно таким же чином ці дефекти впливають і на властивості $\text{Cd}_{0,9}\text{Zn}_{0,1}\text{Te:Al}$. Це демонструє **рис. 4** на прикладі залежності питомого опору від вмісту нікелю і вакансій кадмію — тут видно, що підвищений вміст Ni та V_{Cd} помітно знижує ρ .

Моделювання показало, що подібна поведінка спостерігається і для ефективності збору зарядів, яка для досліджуваного матеріалу корелює з питомим опором: чим вище ρ , тим більше η , і навпаки. Крім того, виявилось, що вакансії цинку впливають на властивості $\text{Cd}_{0,9}\text{Zn}_{0,1}\text{Te}$ приблизно так само, як і вакансії кадмію.

Все сказане вказує на те, що на основі структурно досконалих монокристалів $\text{Cd}_{0,9}\text{Zn}_{0,1}\text{Te:Al}$, в матриці яких вакансії кадмію та цинку присутні у відносно малій кількості, можна отримати датчики високої детекторної якості. Збільшення вмісту точкових домішок і дефектів вище величини порядку 10^{16} см^{-3} здатне призвести до утворення їх скупчень, на яких розсіюються електрони провідності зі зменшенням їх рухливості і, отже, з деградацією

збору зарядів у детекторах. Забруднення домішками Sn, Ge, Ni, V, Ti у кількості 10^{15} — 10^{16} см^{-3} може помітно погіршити детекторні властивості телуриду кадмію та $\text{Cd}_{0,9}\text{Zn}_{0,1}\text{Te}$ із зменшенням збору зарядів. Домішки Cr, Ni, Co у зазначених концентраціях можуть істотно зменшити питомий опір цих матеріалів, що супроводжується збільшенням шумів у детекторних спектрах.

Висновки

Дослідження показали, що утворення скупчень домішок і дефектів, які значно знижують електронну рухливість та детекторні характеристики CdTe та $\text{Cd}_{0,9}\text{Zn}_{0,1}\text{Te}$, в принципі, можна уникнути, якщо забезпечити концентрацію домішок і дефектів не вище ніж $1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ за умови рівномірного їх розподілу по об'єму детектора.

Вакансії кадмію здатні значно зменшити збір зарядів та питомий опір детекторів на основі CdTe та $\text{Cd}_{0,9}\text{Zn}_{0,1}\text{Te}$, якщо вміст V_{Cd} перевищує середню концентрацію фонових домішок у детекторних матеріалах. Донорні забруднювальні домішки, рівні яких розташовуються в нижній частині забороненої зони (Fe, Pb) не можуть значно погіршити детекторні властивості телуриду кадмію та його потрійної сполуки з цинком, тому що у високоомному стані ці донорні домішки залишаються електрично нейтральними. Зі збільшенням вмісту — у процесі експлуатації або у вихідному стані — забруднювальні домішки донорного типу можуть утворювати негативно заряджені комплекси з вакансіями кадмію (А-центри), зміщуючи E_F до валентної зони, що призводить до зменшення ρ та, відповідно, збільшення шумів у спектрах.

Домішки перехідних металів Ti, V, Ni та елементів IV групи Ge, Sn у вихідних CdTe:Cl та $\text{Cd}_{0,9}\text{Zn}_{0,1}\text{Te}$ з низьким рівнем інших фонових домішок можуть помітно погіршити ефективність збору зарядів у детекторах на основі цих напівпровідників. Домішки перехідних металів із зарядженими донорними рівнями, розташованими у верхній половині забороненої зони E_G , наприклад Ni, Cr, Co, можуть помітно зменшити питомий опір детекторних матеріалів, що супроводжується деградацією детекторних властивостей.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. *Radiation Detection Systems. Sensor Materials, Systems Technology and Characterization Measurements. 2nd edition.* Edited by: Iwanczyk J. S., Iniewski K. CRC Press Taylor & Francis Group, 2021, 323 p.
2. Caroli E., Moita M., Rui M. Curado da Silva et al. Hard X-ray and soft gamma ray polarimetry with CdTe/CZT spectro-imager. Review. *Galaxies*, 2018, vol. 6, iss. 3, pp. 69–85. <https://doi.org/10.3390/galaxies6030069>
3. Gazizov I. M., Smirnov A. A. Spectral analysis of the photoconductivity for characterization of CdTe і CdZnTe detectors. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2021, vol. 2127, id. 012041, 12 p. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2127/1/012041>
4. Chan Rok Park, Seong-Hyeon Kang, Youngjin Lee. Similarity analysis of pixelated CdTe semiconductor gamma camera image using a quadrant bar phantom for nuclear medicine: Monte Carlo simulation

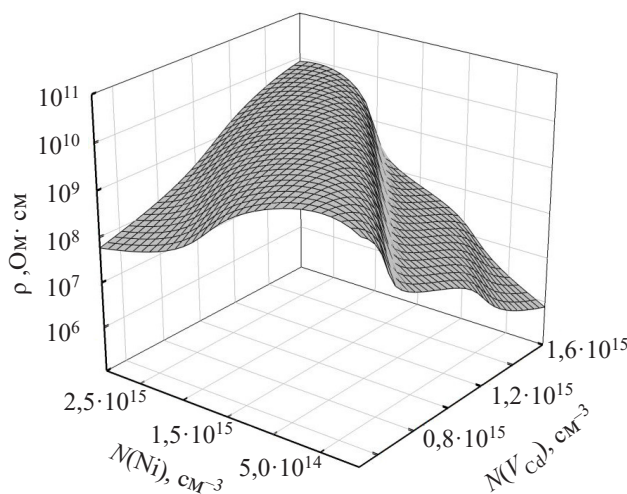


Рис. 4. Залежність питомого опору $\text{Cd}_{0,9}\text{Zn}_{0,1}\text{Te:Al}$, дослідженого в [15], від концентрації вакансій кадмію ($E_V + 0,5$ eV) та домішки нікелю ($E_V + 0,92$ eV)

study. *Nucl. Eng. and Tech.*, 2021, vol. 53, iss. 6, pp. 1947–1954. <https://doi.org/10.1016/j.net.2020.12.010>

5. Abbaspour S., Mahmoudian B., Islamian J. P. Cadmium telluride semiconductor detector for improved spatial and energy resolution radioisotopic imaging. *World J. Nucl. Med.*, 2017, vol. 16, iss. 2, pp. 101–107. <https://doi.org/10.4103/1450-1147.203079>

6. Dubos S., Lemaire H., Schanne S. et al. ORIGAMIX, a CdTe-based spectro-imager development for nuclear applications. *Nucl. Instrum. Meth. A*, 2015, vol. 787, pp. 302–307. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2014.12.111>

7. Johns P. M., Nino J. C. Room temperature semiconductor detectors for nuclear security. *J. Appl. Phys.* 2019, vol. 126, iss. 4, pp. 040902-1—040902-20. <https://doi.org/doi:10.1063/1.5091805>

8. Okamoto T., Igari T., Fukui T. et al. Gamma-ray irradiation effects on CdTe solar cell dosimeter. *Jpn. J. Appl. Phys.* 2021, vol. 60, pp. SBBF02-1—SBBF02-5. <https://doi.org/10.35848/1347-4065/abd6d8>

9. McCoy J. J., Kakkireni S., Gilvey Z. H. et al. Overcoming Mobility Lifetime Product Limitations in Vertical Bridgman Production of Cadmium Zinc Telluride Detectors. *J. Electron. Mater.* 2019, vol. 48, iss. 7, pp. 4226–4234. <https://doi.org/10.1007/s11664-019-07196-5>

10. Nan R., Wang T., Xu G. et al. Compensation processes in high-resistivity CdZnTe crystals doped with In/Al. *J. Cryst. Growth*, 2016, vol. 451, pp. 150–154. <https://doi.org/doi:10.1016/j.jcrysgro.2016.07.032>

11. Колобов Г.А., Карпенко А.В. Рафинирование легких редких, редкоземельных и радиоактивных металлов. *Вопросы атомной науки и техники*, 2016, т. 101, № 1, с. 3–9.

12. Novikov G. F., Radychev N. A. Experimental determination of the dependence of the free electron-hole recombination rate constant on the band gap in semiconductors of the $A_{II}B_{VI}$ and $A_{II}B_{VII}$ types. *Russ. Chem. Bull.*, 2007, vol. 56, pp. 890–894. <https://doi.org/10.1007/s11172-007-0134-9>

13. Shockley W., Read W. T. Statistics of the recombinations of holes and electrons. *Phys. Rev.*, 1952, vol. 87, iss. 5, pp. 835–842. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.87.835>

14. Fraboni B., Pasquini L., Castaldini A. et al. X-ray irradiation effects on the trapping properties of $Cd_{1-x}Zn_xTe$ detectors. *J. Appl. Phys.*, 2009, vol. 106, iss. 9, pp. 093713-1 – 093713-6. <https://doi.org/10.1063/1.3253748>

15. Nan R., Jie W., Zha G. et al. Irradiation-Induced Defects in $Cd_{0.9}Zn_{0.1}Te:Al$. *J. Electron. Mater.* 2012, vol. 41, iss. 11, pp. 2044–2049. <https://doi.org/doi:10.1007/s11664-012-2204-5>

16. Xu L., Jie W., Zha G. et al. Radiation damage on CdZnTe:In crystals under high dose ^{60}Co γ -rays. *CrystEngComm*, 2013, vol. 15, iss. 47, pp. 10304–10310. <https://doi.org/10.1039/c3ce41734d>

17. Cavallini A., Fraboni B. Defective states induced in CdTe and CdZnTe detectors by high and low energy neutron irradiation. *J. Appl. Phys.* 2003, vol. 94, iss. 5, pp. 3135–3142. <https://dx.doi.org/10.1063/1.1600529>

18. Nan R., Jie W., Zha G. et al. Determination of trap levels in CZT:In by thermally stimulated current spectroscopy. *T. Nonferr. Metal. Soc.*, 2012, vol. 22, pp. s148 – s152. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(12\)61700-2](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(12)61700-2)

19. 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>

20. Glenn F. Knoll. *Radiation Detection and Measurement*, 4th edition. John Wiley & Sons, Inc., 2010, 829 p.

21. Cavallini A., Fraboni B., Auricchio N. et al. Irradiation-induced defects in CdTe and CdZnTe detectors. *Nucl. Instrum. Meth. A*. 2001, vol. 458, iss. 1–2, pp. 392–399. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(00\)00931-1](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(00)00931-1)

22. Cavallini A., Fraboni B., Dusi W. et al. Radiation effects on II–VI compound-based detectors. *Nucl. Instrum. Meth. A*. 2002, vol. 476, iss. 3, pp. 770–778. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(01\)01674-6](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(01)01674-6)

23. Cavallini A., Fraboni B., Dusi W. et al. Deep levels and compensation in γ -irradiated CdZnTe. *Appl. Phys. Lett.* 2000, vol. 77, iss. 20, p. 3212–3216. <https://doi.org/10.1063/1.1324980>

24. Hofmann D. M., Stadler W., Christmann P., Meyer B. K. Defects in CdTe and $Cd_{1-x}Zn_xTe$. *Nucl. Instrum. Meth. A*, 1996, vol. 380, iss. 1–2, pp. 117–120. [https://dx.doi.org/10.1016/S0168-9002\(96\)00287-2](https://dx.doi.org/10.1016/S0168-9002(96)00287-2)

25. Kavanagh S. R., Walsh A., Scanlon D. O. Rapid Recombination by Cadmium Vacancies in CdTe. *ACS Energy Lett.*, 2021, vol. 6, pp. 1392–1398. <https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/acsenerylett.1c00380>

26. Кондрик А. И., Ковтун Г. П. Влияние радиационных дефектов на электрофизические и детекторные свойства CdTe:Cl, облученного нейтронами. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, 2020, № 1–2, с. 22–29. <https://dx.doi.org/10.15222/TKEA2020.1-2.22> [Rus]

27. Neumark G. F. Achievement of well conducting wide band-gap semiconductors: Role of solubility and of nonequilibrium impurity incorporation. *Phys. Rev. Lett.* 1989, vol. 62, iss. 15, pp. 1800–1803. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.62.1800>

Дата надходження рукопису
до редакції 11.02 2022 р.

DOI: 10.15222/TKEA2022.1-3.31
UDC 621.315.592.3

A. I. KONDRUK¹, G. P. KOVTUN^{1, 2}

Ukraine, Kharkiv, ¹NSC «Kharkiv Institute of Physics and Technology»,

²V. N. Karazin Kharkiv National University

E-mail: kondrik@kipt.kharkov.ua

INFLUENCE OF IMPURITIES AND STRUCTURAL DEFECTS ON THE PROPERTIES OF CdTe- AND CdZnTe-BASED DETECTORS

The most researched materials for uncooled semiconductor detectors of ionizing radiation are CdTe:Cl and $Cd_{0.9}Zn_{0.1}Te$, which allow to obtain detectors with high values of resistivity ρ and electron mobility. In the process of producing detector materials, the background impurities and defects can be introduced into their matrix, and as a result the deep levels appear in the bandgap, acting as centers of capture and recombination of nonequilibrium charge carriers and reducing the registration ability of detectors. The aim of this study was to determine by computer simulation method the nature of the effect of background impurities and structural defects on the electrophysical and detector properties of CdTe and CdZnTe. Quantitative studies were conducted using reliability-tested models.

The authors used the examples of Cl, Fe, Pb, Cr, Co, Ti, V, Ni, Ge, Sn to study the effect of doping and background impurities on the resistivity ρ , lifetime of nonequilibrium electrons and holes, the charge collection efficiency η of detectors based on CdTe and $\text{Cd}_{0.9}\text{Zn}_{0.1}\text{Te}$. The influence of cadmium vacancies on the degradation of the ρ and η of the detectors based on the materials under study was clarified. Impurities were found that reduce ρ and η in detectors based on CdTe:Cl and $\text{Cd}_{0.9}\text{Zn}_{0.1}\text{Te}$:Al. The ultimate concentration of donor impurities and defects with their uniform distribution over the crystal volume without the formation of clusters was determined. The effect of the Fermi level and defect levels on the change and degradation of the properties of the materials under study was found. The ratios of the concentrations of background impurities and defects were established, making it possible to obtain semiconductors CdTe:Cl and $\text{Cd}_{0.9}\text{Zn}_{0.1}\text{Te}$ of an acceptable detector quality.

Keywords: cadmium telluride, CdZnTe, detector properties, simulation, deep levels.

REFERENCES

1. *Radiation Detection Systems. Sensor Materials, Systems Technology and Characterization Measurements. 2nd edition.* Edited by: Iwanczyk J. S., Iniewski K. CRC Press Taylor & Francis Group, 2021, 323 p.
2. Caroli E., Moita M., Rui M. Curado da Silva et al. Hard X-ray and soft gamma ray polarimetry with CdTe/CZT spectro-imager. Review. *Galaxies*, 2018, vol. 6, iss. 3, pp. 69–85. <https://doi.org/10.3390/galaxies6030069>
3. Gazizov I. M., Smirnov A. A. Spectral analysis of the photoconductivity for characterization of CdTe и CdZnTe detectors. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2021, vol. 2127, id. 012041, 12 p. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2127/1/012041>
4. Chan Rok Park, Seong-Hyeon Kang, Youngjin Lee. Similarity analysis of pixelated CdTe semiconductor gamma camera image using a quadrant bar phantom for nuclear medicine: Monte Carlo simulation study. *Nucl. Eng. and Tech.*, 2021, vol. 53, iss. 6, pp. 1947–1954. <https://doi.org/10.1016/j.net.2020.12.010>
5. Abbaspour S., Mahmoudian B., Islamian J. P. Cadmium telluride semiconductor detector for improved spatial and energy resolution radioisotopic imaging. *World J. Nucl. Med.*, 2017, vol. 16, iss. 2, pp. 101–107. <https://doi.org/10.4103/1450-1147.203079>
6. Dubos S., Lemaire H., Schanne S. et al. ORIGAMIX, a CdTe-based spectro-imager development for nuclear applications. *Nucl. Instrum. Meth. A*, 2015, vol. 787, pp. 302–307. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2014.12.111>
7. Johns P. M., Nino J. C. Room temperature semiconductor detectors for nuclear security. *J. Appl. Phys.* 2019, vol. 126, iss. 4, pp. 040902-1—040902-20. <https://doi.org/doi:10.1063/1.5091805>
8. Okamoto T., Igari T., Fukui T. et al. Gamma-ray irradiation effects on CdTe solar cell dosimeter. *Jpn. J. Appl. Phys.* 2021, vol. 60, pp. SBBF02-1–SBBF02-5. <https://doi.org/10.35848/1347-4065/abd6d8>
9. McCoy J. J., Kakkireni S., Gilvey Z. H. et al. Overcoming Mobility Lifetime Product Limitations in Vertical Bridgman Production of Cadmium Zinc Telluride Detectors. *J. Electron. Mater.* 2019, vol. 48, iss. 7, pp. 4226–4234. <https://doi.org/10.1007/s11664-019-07196-5>
10. Nan R., Wang T., Xu G. et al. Compensation processes in high-resistivity CdZnTe crystals doped with In/Al. *J. Cryst. Growth*, 2016, vol. 451, pp. 150–154. <https://doi.org/doi:10.1016/j.jcrysgro.2016.07.032>
11. Kolobov G. A., Karpenko A. V. Refining of light rare, rare earth and radioactive metals. *Probl. Atom. Sci. Tech.* 2016, iss. 1, vol. 101, p. 3-9. [Rus]
12. Novikov G. F., Radychev N. A. Experimental determination of the dependence of the free electron-hole recombination rate constant on the band gap in semiconductors of the $\text{A}_{II}\text{B}_{VI}$ and A_IB_{VII} types. *Russ. Chem. Bull.*, 2007, vol. 56, pp. 890–894. <https://doi.org/10.1007/s11172-007-0134-9>
13. Shockley W., Read W. T. Statistics of the recombinations of holes and electrons. *Phys. Rev.*, 1952, vol. 87, iss. 5, pp. 835–842. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.87.835>
14. Fraboni B., Pasquini L., Castaldini A. et al. X-ray irradiation effects on the trapping properties of $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ detectors. *J. Appl. Phys.*, 2009, vol. 106, iss. 9, pp. 093713-1 – 093713-6. <https://doi.org/10.1063/1.3253748>
15. Nan R., Jie W., Zha G. et al. Irradiation-Induced Defects in $\text{Cd}_{0.9}\text{Zn}_{0.1}\text{Te}$:Al. *J. Electron. Mater.* 2012, vol. 41, iss. 11, pp. 2044–2049. <https://doi.org/doi:10.1007/s11664-012-2204-5>
16. Xu L., Jie W., Zha G. et al. Radiation damage on CdZnTe:In crystals under high dose 60Co γ -rays. *CrystEngComm*, 2013, vol. 15, iss. 47, pp. 10304–10310. <https://doi.org/10.1039/c3ce41734d>
17. Cavallini A., Fraboni B. Defective states induced in CdTe and CdZnTe detectors by high and low energy neutron irradiation. *J. Appl. Phys.* 2003, vol. 94, iss. 5, pp. 3135–3142. <https://dx.doi.org/10.1063/1.1600529>
18. Nan R., Jie W., Zha G. et al. Determination of trap levels in CZT:In by thermally stimulated current spectroscopy. *T. Nonferr. Metal. Soc.*, 2012, vol. 22, pp. s148 – s152. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(12\)61700-2](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(12)61700-2)
19. 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 Elektronnoi Apparature*. 2019, no. 5–6, pp. 43–50. <https://dx.doi.org/10.15222/TKEA2019.5-6.43> [Rus]
20. Glenn F. Knoll. *Radiation Detection and Measurement, 4th edition.* John Wiley & Sons, Inc., 2010, 829 p.
21. Cavallini A., Fraboni B., Auricchio N. et al. Irradiation-induced defects in CdTe and CdZnTe detectors. *Nucl. Instrum. Meth. A*. 2001, vol. 458, iss. 1–2, pp. 392–399. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(00\)00931-1](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(00)00931-1)
22. Cavallini A., Fraboni B., Dusi W. et al. Radiation effects on II–VI compound-based detectors. *Nucl. Instrum. Meth. A*. 2002, vol. 476, iss. 3, pp. 770–778. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(01\)01674-6](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(01)01674-6)
23. Cavallini A., Fraboni B., Dusi W. et al. Deep levels and compensation in γ -irradiated CdZnTe. *Appl. Phys. Lett.* 2000, vol. 77, iss. 20, p. 3212–3216. <https://doi.org/10.1063/1.1324980>
24. Hofmann D. M., Stadler W., Christmann P., Meyer B. K. Defects in CdTe and $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$. *Nucl. Instrum. Meth. A*, 1996, vol. 380, iss. 1–2, pp. 117–120. [https://dx.doi.org/10.1016/S0168-9002\(96\)00287-2](https://dx.doi.org/10.1016/S0168-9002(96)00287-2)
25. Kavanagh S. R., Walsh A., Scanlon D. O. Rapid Recombination by Cadmium Vacancies in CdTe. *ACS Energy Lett.*, 2021, vol. 6, pp. 1392–1398. <https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/acsenenergylett.1c00380>
26. Kondrik A. I., Kovtun G. P. Influence of radiation defects on the electrophysical and detector properties of CdTe:Cl irradiated by neutrons. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*. 2020, no. 1–2, pp. 22–29. <https://dx.doi.org/10.15222/TKEA2020.1-2.22> [Rus]
27. Neumark G. F. Achievement of well conducting wide band-gap semiconductors: Role of solubility and of nonequilibrium impurity incorporation. *Phys. Rev. Lett.* 1989, vol. 62, iss. 15, pp. 1800–1803. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.62.1800>

Опис статті для цитування:

Кондрік О. І., Ковтун Г. П. Вплив домішок і дефектів структури на властивості детекторів на основі CdTe та CdZnTe. Технологія і конструювання в електронній апаратурі, 2022, №1–3, с. 31–38. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2022.1-3.31>

Cite the article as:

Kondrik A. I., Kovtun G. P. Influence of impurities and structural defects on the properties of CdTe- and CdZnTe-based detectors. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2022, no. 1–3, pp. 31–38. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2022.1-3.31>