

В.М. Склярчук, З.І. Захарук, М.Г. Колісник, Г.І. Раренко,
О.Ф. Склярчук, П.М. Фочук

Вплив ступеню компенсації на детектуючі властивості кристалів $Cd_{0.9}Zn_{0.1}Te$, легованих індієм

Чернівецький національний університет ім. Юрія Федьковича, м. Чернівці, 58012, Україна
e-mail: skliarchuk@chnu.edu.ua

Досліджено електричні характеристики кристалів $Cd_{0.9}Zn_{0.1}Te$, легованих індієм (CZT:In) з концентрацією $C_o=3,5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, які застосовуються у детекторах X/γ-випромінювання. Кристали CZT:In володіли слабо вираженим n-типом провідності та мали питомий опір $(1 \div 2) \cdot 10^9 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ при 293 К. На їх основі створено структури з омичними контактами In/CZT:In/In та структури Cr/CZT:In/In з діодом Шотткі.

Проаналізовано та пояснено температурні залежності питомого опору в досліджуваному матеріалі. Визначено енергетичне положення глибокого рівня, відповідального за темнову електропровідність матеріалу. На основі досліджень температурних залежностей струмів обмежених просторовим зарядом і струмів омичної ділянки вольт-амперної характеристики, визначено ступінь компенсації кристалів CZT:In. Встановлено, що кращими детектуючими властивостями володіли структури Cr/CZT:In/In з діодом Шотткі, виготовлені на кристалах з меншим ступенем компенсації, ніж аналогічні структури, виготовлені на кристалах з більшим ступенем компенсації.

Ключові слова: $Cd_{0.9}Zn_{0.1}Te:In$, омичний контакт, контакт Шотткі, СОПЗ, ступінь компенсації, детектор γ-випромінювання.

Стаття поступила до редакції 27.06.2019; прийнята до друку 15.09.2019.

Вступ

Детектори рентгенівського і радіоактивного випромінювання на основі $Cd_{0.9}Zn_{0.1}Te:In$ (CZT:In) знаходять практичне застосування в промисловості і медицині, дозиметрії й радіології, у космічних дослідженнях і радіоастрономії та інших областях [1, 2]. Для виготовлення даних приладів необхідні високі показники питомого опору, які спостерігаються в кристалах CZT:In [3]. Не дивлячись на велику увагу, яку дослідники приділяють технології і фізичним властивостям твердого розчину CZT [4-8], технологічні проблеми разом із деякими фізичними обмеженнями стримують широке впровадження таких детекторів. Звідси – низький вихід придатних виробів, а, значить, висока вартість приладів.

В даній роботі представлені результати дослідження технології, електрофізичних параметрів CZT:In, пов'язаних з механізмами проходження темного струму в структурах з омичними

контактами та контактом Шотткі типу Cr/CZT:In/In. Розглянуто зв'язок між цими параметрами та детектуючими властивостями структур Cr/CZT:In/In, виготовлених на цих кристалах.

I. Методика експерименту

Останнім часом найбільш популярним методом вирощування легованих кристалів CdTe і $Cd_{1-x}Zn_xTe$ для виробництва детекторів та спектрометрів є метод вертикальної зонної плавки через розчин-розплав телуру – метод рухомого нагрівника (МРН) [4, 9-14]. Перевагою цього методу є ріст кристалів при багатоглибчій температурі (1020 К) і додаткова очистка матеріалу зоною телуру.

Для досліджень, представлених в даній роботі, проводили вирощування кристалів CZT:In модифікованим МРН (концентрація індію в розплаві $C_o = 3,5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$). В кварцовій ампулі розміщували монолітний полікристал CZT:In і наважку телуру. Вакуумовану ампулу з матеріалом розташовували в установці для вирощування кристалів під кутом $\sim 45^\circ$

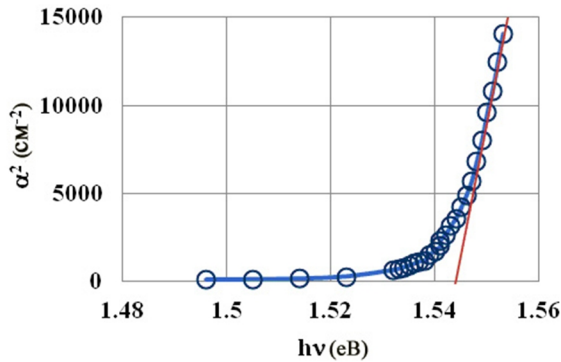


Рис. 1. Залежність коефіцієнту поглинання α від енергії фотона в кристалах n-CZT:In товщиною $20 \div 25$ мкм при температурі 300 К.

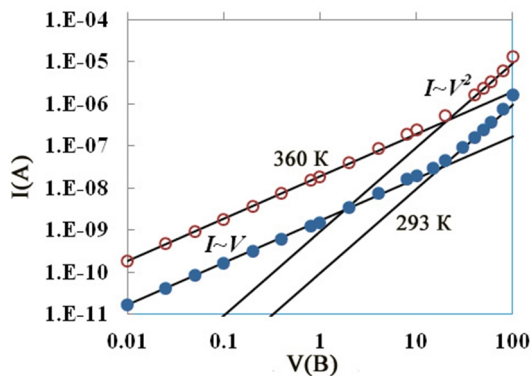


Рис. 2. ВАХ структури In/CZT:In/In (кристал типу 1) при температурі 293 К (заповнені кружки) та при температурі 360 К (незаповнені кружки). Суцільними лініями показано ділянки ВАХ $I \sim V$ та $I \sim V^2$.

до вертикалі. Вирощування кристалу відбувалося в результаті переміщення ампули через зонний нагрівник зі швидкістю 5 мм за добу з одночасним обертанням навколо осі зі швидкістю $5 \div 6$ обертів за хвилину для перемішування розплаву з метою досягнення однорідності складу [15].

Для визначення ширини забороненої зони, досліджували область краю оптичного поглинання зразків CZT:In. Для покращення точності оптичних вимірів, пластини CZT:In потоншувались до товщини $60 \div 75$ мкм методами механічного шліфування і полірування. Механічна обробка призводить до утворення порушеного шару на поверхні монокристалу, що може вплинути на результати оптичних вимірів [16]. Цей шар знімали поетапним хімічним травленням у розчині броду в метанолі до товщини $20 \div 25$ мкм.

Дослідження проводили на кристалічних пластинках правильної форми, які були вирізані з різних частин злитка. Оскільки, індій вздовж злитка розподілявся нерівномірно, пластини відрізнялися між собою за своїми електрофізичними властивостями і умовно були названі так: кристали типу 1 (кінець злитка) та кристали типу 2 (середина злитка). Однорідність розподілу цинку в кристалах встановлювали, визначаючи ширину забороненої зони монокристалічних зразків з різних частин

злитку. Для цього використовували лінійну залежність ширини забороненої зони $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ від вмісту цинку x [17]:

$$E_g = E_{go} + ax, \quad (1)$$

де E_g – ширина забороненої зони $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$, E_{go} – ширина забороненої зони телуриду кадмію (E_{go} рівна 1,496 еВ при температурі 300 К), a – коефіцієнт пропорційності.

Ширину забороненої зони $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ визначали зі спектрів оптичного поглинання з урахуванням багаторазового відбивання. Оскільки, для прямозонного напівпровідника існує наступне співвідношення між коефіцієнтом поглинання α і шириною забороненої зони E_g :

$$a(h\nu) = \text{const}(h\nu - E_g)^{1/2}, \quad (2)$$

де $h\nu$ - енергії фотона, то ширину забороненої зони E_g можна визначити з графіка функції $a^2(h\nu)$, побудованого на основі експериментальних даних.

Коефіцієнт поглинання α розраховувався за формулою:

$$a = \frac{1}{d} \ln \left\{ \frac{(1-R)^2}{2T} + \left[\frac{(1-R)^4}{4T^2} + R^2 \right]^{1/2} \right\}, \quad (3)$$

де d - товщина зразка, T – коефіцієнт оптичного пропускання, R - коефіцієнт відбивання від межі

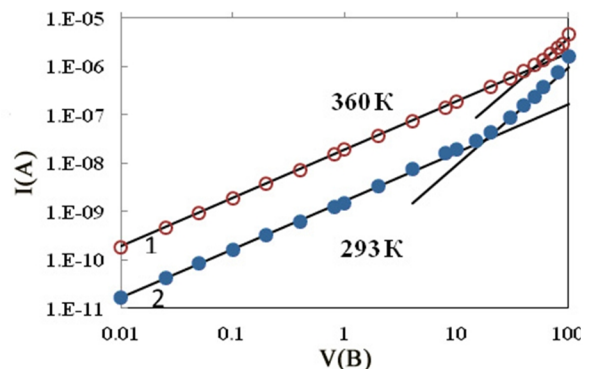


Рис. 3. ВАХ структури In/CZT:In/In з омичними контактами (кристал типу 2) при температурі 293 К (заповнені кружки) та при температурі 360 К (незаповнені кружки). Суцільні лінії показано ділянки ВАХ $I \sim V$ та $I \sim V^2$.

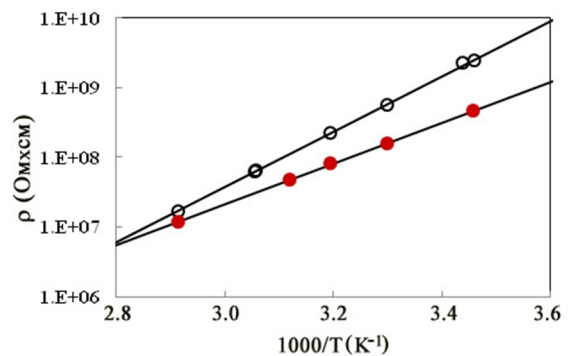


Рис. 4. Залежність питомого опору від температури для кристалів CZT:In з різних частин злитку: незаповнені кружки - тип 1, заповнені кружки - тип 2.

поділу напівпровідник-повітря, прийнятий у досліджуваній спектральній області рівним 0.25 [18].

Для визначення T була використана формула:

$$T = I/I_0 \quad (4)$$

де I - інтенсивність світла, яке пройшло через кристал, I_0 - повна інтенсивність.

Для дослідження електрофізичних властивостей, до кристалічних зразків, вирізаних з різних частин злитку, виготовляли омичні контакти. Зразки мали розмір 5×5 мм² і товщину $0,8 \div 2,0$ мм. Поверхню зразків після якісної механічної обробки травили в розчині бром у метанолі та промивали в метанолі. Перед нанесенням металу, поверхню зразків протягом $10 \div 15$ хвилин обробляли в аргоновій плазмі при напрузі $300 \div 350$ В та струмі $35 \div 50$ мА. Омичні контакти до напівізольюючих кристалів CZT:In n-типу провідності створювали методом термічного напилювання індію в вакуумі. Розмір контактів 4×4 мм² задавали молібденовими масками. Таким чином створювались структури In/CZT:In/In.

II. Результати та їх обговорення

Результати оптичних вимірювань наведено на рис. 1.

Як видно з рис. 1, відносно повільна зміна α в області прозорості кристалу змінюється його різким зростанням при $h\nu > 1,53$ еВ. В області $\alpha > 100$ см⁻¹ спостерігається прямолінійна ділянка, що відтисає на осі енергій фотонів значення $1,543$ еВ. Ширина забороненої зони для зразків, вирізаних з різних частин кристалу, знаходилася в межах $1,540 \div 1,543$ еВ. Таким чином, використовуючи співвідношення (1), можна стверджувати, що вміст цинку в кристалах CZT:In типу 1 та типу 2 практично однаковий.

Проведено виміри темнових вольт-амперних характеристик (ВАХ) при різних температурах. ВАХ структур In/CZT:In/In для кристалу типу 1 наведено на рис. 2. Аналогічна ВАХ для кристалу типу 2 приведена на рис. 3.

У ВАХ кристалів типу 1 та типу 2 є спільні риси, але спостерігаються і суттєві відмінності.

Спільним у поведінці ВАХ кристалів типу 1 та типу 2 є те, що омична ділянка $I \sim V$ при напрузі V_0 змінюється квадратичною залежністю струму від напруги $I \sim V^2$. Напруга V_0 визначається точкою перетину при екстраполяції прямих $I \sim V$ та $I \sim V^2$. Така поведінка ВАХ пояснюється в рамках моделі струмів обмежених просторовим зарядом (СОПЗ) [19]. Важливою відмінністю ВАХ є різна температурна залежність напруги V_0 : для кристалів типу 1 така залежність слабка, а для кристалів типу 2 - сильніша. Важливо відмітити, що питомий опір r досліджуваних кристалів, який визначали з лінійних ділянок ВАХ, був досить близьким: при температурі 293 К $r \sim 2 \cdot 10^9$ Ом-см - для кристалів типу 1 і $r \sim 10^9$ Ом-см - для кристалів типу 2.

Окремо досліджувалась залежність питомого опору $r(T)$ кристалів CZT:In з різних частин злитку

від температури. Отримані результати приведено на рис. 4.

З температурних залежностей питомого опору визначено енергії активації провідності DE для зразків з різних частин злитку, які рівні $(0,78 \div 0,81)$ еВ - для кристалів типу 1 та $(0,55 \div 0,6)$ еВ - для кристалів типу 2.

Досліджувані кристали CZT:In з n-типом провідності є компенсованими напівпровідниками, у яких є неконтрольовані домішки й дефекти, концентрація яких може бути істотною. Температурна залежність питомого опору кристалу CZT:In описується експоненціальною залежністю з енергією активації DE . Аналізуючи темнову залежність питомого опору CZT:In від температури, можна отримати важливу інформацію про температурну залежність положення рівня Фермі в забороненій зоні, а також про природу домішки, що визначає електропровідність [20]. Для оцінки ступеня компенсації енергетичного рівня, що визначає темнову провідність, припустимо, що положення рівня Фермі й електропровідність матеріалу визначаються донором з енергією E_d і концентрацією N_d , а концентрацію акцепторів, що компенсують, позначимо N_a . Для напівпровідника з такими домішками рівняння електронейтральності має вигляд:

$$p + N_d^+ = n + N_a^-, \quad (5)$$

де n і p - концентрації електронів і дірок у зоні провідності й валентній зоні, а N_d^+ і N_a^- - концентрації іонізованих донорів і акцепторів, відповідно.

Тоді рівняння електронейтральності можна записати наступним чином:

$$p + \frac{N_d}{1 + \exp\left(\frac{\Delta m - E_d}{kT}\right)} = n + \frac{N_a}{1 + \exp\left(\frac{E_a - \Delta m}{kT}\right)}, \quad (6)$$

при цьому:

$$n = \frac{N_c}{1 + \exp\left(\frac{E_g - \Delta m}{kT}\right)}, \quad (7)$$

$$p = N_v \frac{N_v}{1 + \exp\left(\frac{\Delta m}{kT}\right)}, \quad (8)$$

де Δm , E_d , E_a - глибини залягання рівня Фермі, донорного й акцепторного рівнів відповідно, які відраховуються від краю валентної зони; $N_c = 2(m_n k / 2\pi\hbar)^{3/2}$ і $N_v = 2(m_p k / 2\pi\hbar)^{3/2}$ - густини станів у відповідних зонах; ефективні маси електронів m_n і дірок m_p у CZT з малим вмістом цинку рівні, відповідно, $0,11m_0$ і $0,63m_0$ [21,22], де m_0 - маса електрона в вакуумі. Температурну залежність ширини забороненої зони $E_g(T)$ можна представити у вигляді:

$$E_g(T) = E_{g0} - \gamma \mathcal{A}, \quad (9)$$

де $E_{g0} = 1,68$ еВ, температурний коефіцієнт $\gamma = 4,0 \cdot 10^{-4}$ еВ К⁻¹.

Величину Δm можна визначити, використовуючи вираз для питомого опору:

$$r = \frac{1}{q(n\mu_n + p\mu_p)}, \quad (10)$$

де q – заряд електрона, n і p – концентрації електронів і дірок, μ_n і μ_p – рухливості, відповідно, електронів і дірок.

$$\Delta m = E_g + kT \ln \left(\frac{1 \pm \sqrt{1 - 4q^2 r^2 \mu_n \mu_p N_v N_c \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right)}}{2qr\mu_n N_c} \right) \quad (11)$$

де знак « \pm » означає «+» для напівпровідника p-типу провідності й «-» для напівпровідника r-типу провідності. Величини рухливостей електронів μ_n і дірок μ_p приймали рівними, відповідно, $700 \text{ cm}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ і $70 \text{ cm}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ при 293 К. Вирази для температурних залежностей рухливостей, згідно [23] мають вигляд:

$$\mu_n = 3.54 \times 10^6 T^{-3/2} \text{ cm}^2/(\text{В}\cdot\text{с}), \quad (12)$$

$$\mu_p = 3.54 \times 10^5 T^{-3/2} \text{ cm}^2/(\text{В}\cdot\text{с}). \quad (13)$$

На рис. 5 представлені криві, отримані методами, зазначеними вище. У рівняння (10) підставлено дані експериментальної температурної залежності питомого опору.

Рівняння (6) вирішено числовим методом відносно Δm . Концентрація і глибина залягання донорного й акцепторного рівнів (або N_a/N_d) підібрані таким чином, щоб отримані експериментальні залежності $\Delta m(T)$ збіглися з розрахунковими.

Варто відзначити, що температурну залежність $\Delta m(T)$, знайдену за допомогою експериментальної температурної залежності $r(T)$, можна одержати тільки при єдиній комбінації E_d і N_a/N_d . Збіг розрахунку й експерименту отримано при $E_d \sim 1,0 \text{ eV}$ і $N_a/N_d = 0,93 \div 0,96$ - для кристала типу 2 та $E_d \sim 0,8 \div 0,82 \text{ eV}$ і $N_a/N_d = 0,03 \div 0,05$ для кристала типу 1. Таким чином, темнову провідність в зразках із середини та кінця злитку визначає глибокий донорний рівень, в одному випадку сильно, а в іншому випадку слабо компенсований. Те, що наші висновки вірні, підтверджує аналіз температурної залежності СОПЗ. Якщо напруга V_0 не залежить, або слабо залежить від температури, тоді кристал слабо компенсований, якщо сильно залежить, то кристал - сильно компенсований [24, 25]. Згідно результатів досліджень, приведених на рис. 2 та рис. 3, можна зробити однозначний висновок, що кристали типу 1 слабо компенсовані, а кристали типу 2 – сильно компенсовані.

Таким чином, кристали типу 1 і типу 2 мають досить близький питомий опір ($\sim 2 \cdot 10^9 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ та $\sim 10^9 \text{ Ом}\cdot\text{см}$), але сильно відрізняються ступенем компенсації. З точки зору виготовлення детекторів іонізуючого випромінювання кристали типу 1 та типу 2 мають непогані електрофізичні параметри. Оскільки кристали відрізняються ступенем компенсації досить помітно, ми вважаємо доцільним і важливим дослідити зв'язок між цим параметром та детектуючими властивостями структур,

виготовлених на основі цих кристалів. Для дослідження детектуючих властивостей структури In/CZT:In/In з омичними контактами виявились малопродатними, оскільки ділянка ВАХ з відносно слабкою залежністю струму від напруги обмежується СОПЗ. Типове значення напруги V_0 для кристалів товщиною $\sim 1 \text{ мм}$ при 293 К рівне $\sim 15 \div 25 \text{ В}$. Напруженість електричного поля, яка відповідає цій напрузі, $E \sim 10^2 \text{ В/см}$ недостатня для ефективної роботи детектора. Використання замість омичного контакту випрямляючого дало можливість суттєвого «подовжити» ділянку ВАХ зі слабкою залежністю струму від напруги. Для виготовлення такого типу контактів в якості металу використовували хром. Індієві омичні контакти видаляли поліруванням. Після хімічної обробки розчином броду в метанолі, на одну поверхню кристалу термічним напилюванням у вакуумі наносили хром, на протилежну сторону – індію. Поверхню перед нанесенням металів обробляли в аргонівій плазмі по різному: при напрузі $300 \div 350 \text{ В}$ та струмі $35 \div 50 \text{ mA}$ перед нанесенням індію та напрузі $500 \div 550 \text{ В}$ і струмі $15 \div 20 \text{ mA}$ перед нанесенням хрому. Розмір контактів становив $4 \times 4 \text{ мм}^2$. Таким чином створювали структури Cr/CZT:In/In . ВАХ таких структур приведено на рис. 6.

Як видно з рис. 6, ділянка слабого наростання

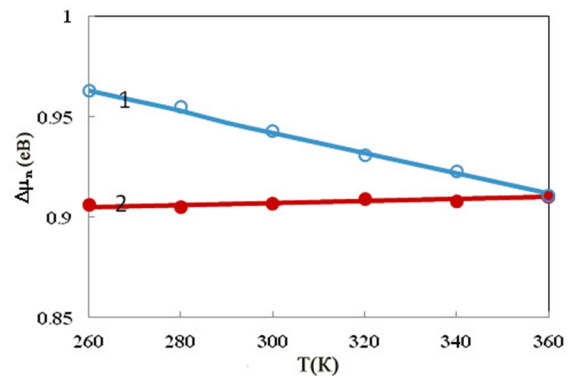


Рис. 5. Залежність положення рівня Фермі від температури: для кристалів типу 1 (заповнені кружки), для кристалів типу 2 (незаповнені кружки). Суцільні лінії – розрахунок.

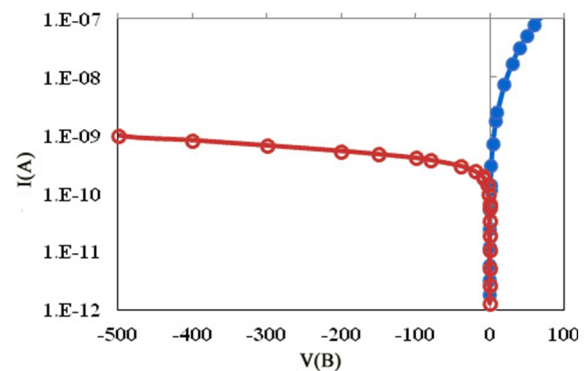


Рис. 6. ВАХ структури Cr/CZT:In/In при температурі 293 К: заповнені кружки – плюс(+) на хромовий контакт, незаповнені кружки – мінус(-) на хромовий контакт.

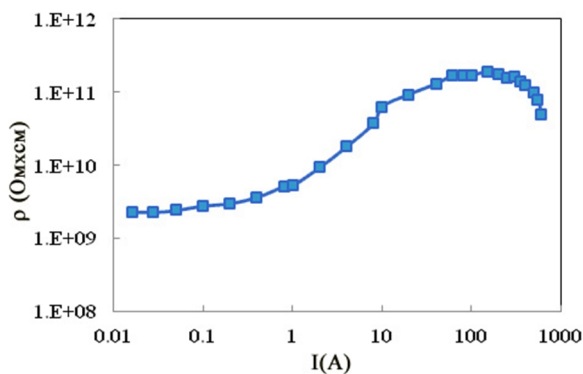


Рис. 7. Залежність диференційного опору структури Cr/CZT:In/In від напруги (мінус на хромовий контакт) при 293 К.

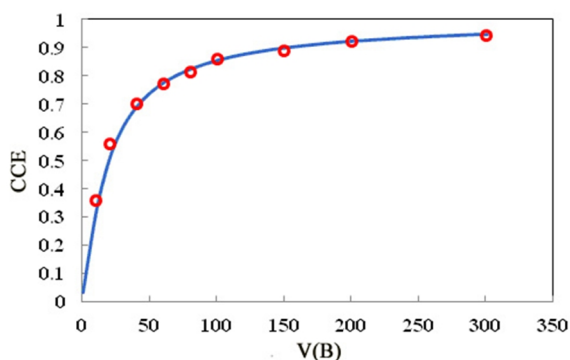


Рис. 8. Залежність фотовідгуку структури Cr/CZT:In/In від прикладеної напруги (мінус джерела живлення на хромовий контакт) при опроміненні неколімованим 59,5 кеВ ^{241}Am джерелом гамма-випромінювання з боку хромового контакту (мінус джерела живлення на хромовий контакт) – незаповнені кружки. Суцільна лінія – теоретична крива CCE для $(mt)_e = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2/\text{В}$. Температура 293 К.

струму від напруги для структури Cr/CZT:In/In суттєво більша ніж для In/CZT:In/In при однакових розмірах кристалу і однаковій площі контактів. Фактично, пряма вітка ВАХ Cr/CZT:In/In - це ВАХ структури In/CZT:In/In. Таким чином структура Cr/CZT:In/In забезпечує суттєво більшу напруженість електричного поля в кристалі товщиною ~ 1 мм, ніж структура In/CZT:In/In. Досить інформативно для ВАХ таких структур є побудова диференціального опору dI/dV від напруги V (рис. 7).

Як видно з рис. 7, диференційний опір структури Cr/CZT:In/In при напрузі ~ 100 В рівний $\sim 2 \cdot 10^{11}$ Ом·см, що суттєво більше питомого опору кристалу, який при 293 К рівний $\sim 2 \cdot 10^9$ Ом·см. Таким чином, створення випрямляючого контакту привело до суттєвого підвищення напруги структури Cr/CZT:In/In при помірному наростанні темнового струму, який не перевищував 1 нА при напрузі $\sim 300 \div 400$ В і температурі 293 К. Варто відмітити, що структури Cr/CZT:In/In, виготовлені з кристалів типу 1 та типу 2, мали досить схожі ВАХ (на рис. 6 та рис. 7 приведені типові ВАХ).

Важливим параметром, який суттєво впливає на ефективність детектора, є добуток рухливості на час життя носіїв заряду - mt_e . Його можна визначити з дослідження залежності фотовідгуку при гамма-опроміненні від напруженості електричного поля (або прикладеної напруги) при кімнатній температурі. Добуток mt_e фактично визначає ефективність збирання носіїв заряду, яка в науковій літературі позначається як CCE (charge collection efficiency). Величину mt_e можна знайти з рівняння Гехта в наближенні для носіїв заряду одного типу [26, 27]:

$$CCE \approx \frac{m_e t_e E}{d} \left[1 - \exp\left(\frac{-d}{m_e t_e E}\right) \right], \quad (14)$$

де d – товщина кристалу, E – напруженість електричного поля, яка залежить від прикладеної напруги. Для визначення цього важливого параметру проводили виміри залежності фотовідгуку структури Cr/CZT:In/In від прикладеної напруги при опроміненні неколімованим 59,5 кеВ ^{241}Am джерелом гамма-випромінювання, рис. 8.

Оскільки положення фотопіків (канали) для гамма-променевої спектрів пропорційні ефективності збору заряду, значення mt_e можна

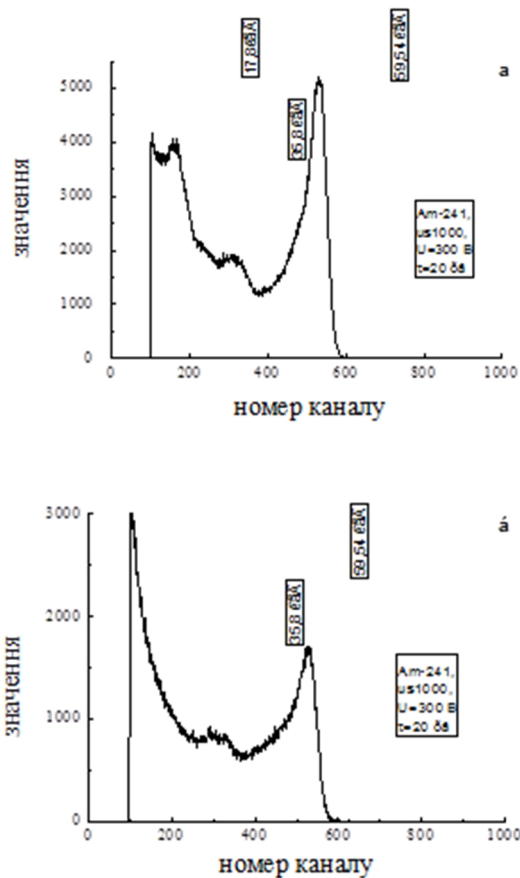


Рис. 9. Спектри випромінювання ізоотопу ^{241}Am виміряні детектором, який виготовлений з кристалів: (а) - типу 1 та (б) - типу 2. Напруга 300 В. Температура 300 К.

визначити побудовою положень фотопиків в залежності від прикладеної напруги.

Визначений за допомогою такої методики добуток $m_e t_e$ рівний $1,5 \cdot 10^{-3}$ см²/В для кристалів типу 1, та $5,0 \cdot 10^{-3}$ см²/В для кристалів типу 2. Для прикладу, на рис. 8 приведено виміри для кристалу типу 1.

Таким чином, з проведених досліджень встановлено, що добуток $m_e t_e$ для слабо компенсованих кристалів типу 1 приблизно в три рази більший ніж добуток $m_e t_e$ для сильно компенсованих кристалів типу 2.

Результати, отримані при аналізі вимірів ССЕ, підтверджуються вимірами гамма-променевих спектрів для зразків на планарних структурах Cr/CZT:In/In при опроміненні неколімованим $59,5$ кеВ ^{241}Am джерелом. На рис. 9 приведені гамма-спектри для структур Cr/CZT:In/In, виготовлених на кристалах типу 1 та типу 2.

З рис. 9 видно, що для кристалів типу 1 (з кінця злитку) максимум спектра, який відповідає енергії $59,5$ кеВ - вузький. Для кращих зразків отримано розрізну здатність $7,05\% \div 7,56\%$, що відповідає повній ширині на половині максимуму спектра $\text{FWHM} = 4,2 \div 4,5$ кеВ (рис. 9).

Висновки

На основі сумісного дослідження температурної залежності СОПЗ та струмів омичної ділянки ВАХ кристалів $\text{Cd}_{0,9}\text{Zn}_{0,1}\text{Te}$, легованих індієм, визначена донорна природа глибокого рівня, відповідального за темнову провідність. Показано, що ступінь його компенсації тим більша, чим далі від середини забороненої зони він знаходиться.

Встановлено, що при близьких значеннях питомого опору матеріалу, кращими детектуючими властивостями володіли структури Cr/ $\text{Cd}_{0,9}\text{Zn}_{0,1}\text{Te}$:In/In, виготовлені на кристалах, в яких темнова провідність зумовлена слабо компенсованим (3% - 5%) глибоким донорним рівнем.

Склярчук В.М. – д.ф.-м.н., провідний науковий співробітник;
Захарук З.І. – старший науковий співробітник;
Колісник М.Г. – молодший науковий співробітник;
Раренко Г.І. – к.ф.-м.н., старший науковий співробітник;
Склярчук О.Ф. - к.ф.-м.н.;
Фочук П.М. – професор, д.х.н., проректор з наукової роботи і міжнародних зв'язків.

- [1] Stefano Del Sordo, Leonardo Abbene, Ezio Caroli, Anna Maria Mancini, Andrea Zappettini and Pietro Ubertini, Review, Sensors 9, 3491 (2009) (<https://doi.org/10.3390/s90503491>).
- [2] A. Brambilla, P. Ouvrier-Buffet, G. Gonon, et al., IEEE Trans. Nucl. Sci. 60, 408 (2013) (doi: 10.1109/TNS.2012.2226910).
- [3] Ruihua Nan, Tao Wang, Gang Xu, Man Zhu, Wanqi Jie, J. Cryst. Growth 451, 150 (2016) (<https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2016.07.032>).
- [4] R. Triboulet, P. Siffert, CdTe and related compounds: physics, defects, technology, hetero- and nanostructures and applications: physics, CdTe-based nanostructures, and semimagnetic semiconductors, defects. European Materials Research Society series. (Oxford: Elsevier, 2010) (<https://searchworks.stanford.edu/view/8596311>).
- [5] A.A. Zakharchenko, A.V. Rybka, V. E. Kutny, A.I. Skrypyuk, M.A. Khazhmuradov, P.M. Fochuk, A.E. Bolotnikov, and R.B. James, Proc. SPIE 8507, Hard X-Ray, Gamma-Ray, and Neutron Detector Physics XIV, 85071I (2012) (<https://doi.org/10.1117/12.928567>).
- [6] K.H. Kim, A.E. Bolotnikov, G.S. Camarda, et al., IEEE Trans. Nucl. Sci. 59(4), (2012) (doi: 10.1109/TNS.2012.2202917).
- [7] L. Davydov, P. Fochuk, A. Zakharchenko, A., Kutny, et al., IEEE Trans. Nucl. Sci. 62(4), 17779 (2015) (https://www.researchgate.net/publication/281058785_Improving_and_Characterizing_CdZnTe_Crystals_for_Detecting_Gamma-Ray_Radiation).
- [8] Pengfei Wang, Ruihua Nan and Zengyun Jian, J. of Semicond. 38(6), 062002 (2017) (<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1674-4926/38/6/062002>).
- [9] M. Amman, J.S Lee, P.N. Luke, H. Chen, et al., IEEE Trans. Nucl. Sci. 56(3), 795 (2009) (doi: 10.1109/TNS.2008.2010402).
- [10] U.N. Roy, S. Weiler, J. Stein, M. Groza, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment 652(1), 162 (2011) (doi: 10.1016/j.nima.2011.01.143)
- [11] U.N. Roy, A. Burger, R.B. James, J. Cryst. Growth 379, 57 (2013) (<https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2012.11.047>).
- [12] S.M. Koohpayeh, Single crystal growth by the traveling solvent technique: A review. (PROG CRYST GROWTH CH., 2016).
- [13] P. Fochuk, Z. Zakharchuk, Ye. Nykonyuk, I. Rarenko, M. Kolesnik, A.E. Bolotnikov, G. Yang, and R.B. James, IEEE Trans. Nucl. Sci. 63(3), 1839 (2016) (doi: 10.1109/TNS.2016.2548425).
- [14] B. Zhou, W. Jie, T. Wang, L. Yin, J. Cryst. Growth 483 (2017) (doi: 10.1016/j.jcrysgro.2017.12.003).

- [15] С.І. Будзуляк, Д.В. Корбутяк, Л.А. Демчина, В.М. Єрмаков, Н.Д. Вахняк, І.М. Раренко, З.І. Захарук, М.Г. Колісник, П.М. Фочук, С.Г. Дремлюженко, І.З. Місевич, Спосіб вирощування монокристалів CdTe та його твердих розчинів $\text{Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{Te}$, $\text{Cd}_x\text{Mn}_{1-x}\text{Te}$, Патент №113185. Україна, Бюл. №24. Под. заявки 07.04.2014; опубл. 26.12.2016.
- [16] С.Г. Дремлюженко, З.І. Захарук, П.М. Фочук, А.Й. Савчук, Фізика і хімія твердого тіла 8(4), 748 (2007).
- [17] T. Toshifumi, S. Adachi, H. Nakanishi, K. Ohtsuka, Jpn. Appl. Phys. 32, 3496 (1993).
- [18] J.K. Tripathi, S.S. Harilal, S.S. Harilal, Materials Research Express 1(3), 035904 (2014) (doi: 10.1088/2053-1591/1/3/035904).
- [19] М. Ламперт и П. Марк, Инжекционные токи в твердых телах (Мир, Москва, 1973).
- [20] X. Yadong, J. Wanqi, P. Sellin, T. Wang, et al, J. of Phys. D: Appl. Phys. 42(3), 03505, 082002 (2009) (<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1674-4926/30/8/082002>).
- [21] L.S. Dang, G. Neu, and R. Romestain, Solid State Commun 44(8), 1187 (1982).
- [22] P. Ravindran, Carrier effective mass calculations (Computational Condensed Matter Physics, Spring, 2015) (<http://folk.uio.no/ravi/CMT15>. <http://folk.uio.no/ravi/cutn/ccmp/9-EffectiveMass1.pdf>).
- [23] B. Segall, M.R. Lorenz, R.E. Halsted, Phys. Rev. 129, 2471 (1963).
- [24] G.G. Roberts, F.W. Smidlin, Phys. Rev. 180, 785 (1969).
- [25] А.В. Маловичко, С.В. Свечников, К.П. Шульга, УФЖ. 20(2), 209 (1975).
- [26] R.H. Nan, W.Q. Jie, G.Q. Zha, J. Nucl. Instrum. Meth. A, 705, 32 (2013) (doi:10.1016/j.nima.2012.12.081).
- [27] M. Zanichelli, A. Santi, M. Pavesi & A. Zappettini, J. Phys. D: J. Appl. Phys. 46(36), 365103 (2013) (<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0022-3727/46/36/365103>).

V.M. Sklyarchuk, Z.I. Zakharuk, M.H. Kolisnyk, A.I. Rarenko,
O.F. Sklyarchuk, P.M. Fochuk

Effect of Compensation Degree on the Detecting Properties of In-doped $\text{Cd}_{0.9}\text{Zn}_{0.1}\text{Te}$ crystals

*Yuriy Fedkovich' Chernivtsi National University, Chernivtsi, 58012, Ukraine.
e-mail: skliarchuk@chnu.edu.ua*

The electrical characteristics of In-doped $\text{Cd}_{0.9}\text{Zn}_{0.1}\text{Te}$ (CZT:In) crystals with concentration of $C_0=3,5 \cdot 10^{17} \text{cm}^{-3}$, which are used in X- and gamma-radiation detectors, were investigated. CZT:In crystals possess a weakly pronounced n-type conductivity and had a resistivity of $(1 \pm 2) \times 10^9 \text{ Ohm} \cdot \text{cm}$ at 293 K. In/CZT:In/In structures with ohmic contacts and Cr/CZT:In/In structures with Schottky barriers were created on their base.

The temperature dependences of the resistivity in investigated material were analyzed and explained. The energy position of the deep level responsible for the material' dark conductivity was found. Due to the study of the temperature dependencies of currents limited by space-charge and of currents of the ohmic section of the volt-ampere characteristics (I - VC), the compensation degree of CZT:In crystals is determined. It was found that Cr/CZT:In/In structures with a Schottky diode, fabricated on crystals with a lower compensation degree, possessed the best detection properties than similar structures fabricated on crystals with a greater compensation degree.

Keywords: $\text{Cd}_{0.9}\text{Zn}_{0.1}\text{Te}$:In, ohmic contact, Schottky contact, CSLCs, compensation degree, gamma-radiation detectors.