

УДК 538.9; PACS: 72.20.FR, 72.80.EY, 78.20.CI

$\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ ЯК МАТЕРІАЛ ДЛЯ ДЕТЕКТОРІВ Х- І γ -ВИПРОМІНЮВАННЯ

***Л. А. Косяченко*, І. М. Раренко, В. М. Склярчук, Н. С. Юрценюк,
О. Л. Маслянчук, О. Ф. Склярчук, З. І. Захарук, Є. В. Грушко***

Чернівецький національний університет,
вул. Коцюбинського 2, 58012 Чернівці, Україна
Тел. +38 03722 44221, e-mail*: lakos@chv.ukrpack.net

$\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ ЯК МАТЕРІАЛ ДЛЯ ДЕТЕКТОРІВ Х- І γ -ВИПРОМІНЮВАННЯ

***Л. А. Косяченко, І. М. Раренко, В. М. Склярчук, Н. С. Юрценюк,
О. Л. Маслянчук, О. Ф. Склярчук, З. І. Захарук, Є. В. Грушко***

Анотація. Досліджено монокристали $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ р-типу провідності зі вмістом марганцю 40 % ($x = 0.4$) на предмет їх застосування в детекторах Х- і γ -випромінювання. Зі спектрів оптичного пропускання знайдено ширину забороненої зони напівпровідника, значення якої зіставлено з узагальненими літературними даними для такого вмісту Mn. Створені омичні контакти й досліджено температурну залежність питомого опору матеріалу ($\sim 10^8$ Ом·см при 300 К). Виходячи із статистики носіїв заряду в компенсованому напівпровіднику, знайдено енергію іонізації й ступінь компенсації акцептора, відповідального за електропровідність $\text{Cd}_{0.6}\text{Mn}_{0.4}\text{Te}$. Сформульовано рекомендації щодо покращення параметрів $\text{Cd}_{0.6}\text{Mn}_{0.4}\text{Te}$ як матеріалу для детекторів Х- і γ -випромінювання.

Ключові слова: детектори Х- і γ -випромінювання, $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$, оптичні й транспортні властивості

$\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ AS A MATERIAL FOR X- AND γ -RAY DETECTORS

***L. A. Kosyachenko, I. M. Rarenko, V. M. Sklyarchuk, N. S. Yurtsenyuk,
O. L. Maslyanchuk, O. F. Sklyarchuk, Z. I. Zakharuk, E. V. Grushko***

Abstract. $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ crystals of p-type conductivity with 40 % manganese content ($x = 0.4$) are investigated for their use in detectors of X-and γ -radiation. From optical transmission spectra, the band gap of semiconductor has been found whose value compared with the generalized literature data for such Mn content. Ohmic contacts have been created and the temperature dependence of resistivity of the material has been investigated ($\sim 10^8$ Ω ·cm at 300 K). Based on the statistics of charge carriers in a compensated semiconductor, the ionization energy and the compensation degree of acceptor responsible for resistivity of $\text{Cd}_{0.6}\text{Mn}_{0.4}\text{Te}$ have been obtained. Recommendations for improvement of parameters of $\text{Cd}_{0.6}\text{Mn}_{0.4}\text{Te}$ as detector material for X-and γ -radiation are formulated.

Key words: X- і γ -ray detectors, $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$, optical and transport properties

Cd_{1-x}Mn_xTe КАК МАТЕРИАЛ ДЛЯ ДЕТЕКТОРОВ X- И γ-ИЗЛУЧЕНИЯ

*Л. А. Косяченко, И. М. Раренко, В. М. Склярчук, Н. С. Юрценюк,
О. Л. Масляничук, О. Ф. Склярчук, З. И. Захарук, Е. В. Грушко*

Аннотация. Исследованы монокристаллы Cd_{1-x}Mn_xTe p-типа проводимости с содержанием марганца 40 % ($x = 0.4$) на предмет их применения в детекторах X- и γ-излучения. Из спектров оптического пропускания найдена ширина запрещенной зоны полупроводника, значение которой сопоставлено с обобщенными литературными данными для такого содержания Mn. Созданы омические контакты и исследована температурная зависимость удельного сопротивления материала ($\sim 10^8$ Ом·см при 300 К). Исходя из статистики носителей заряда в компенсированном полупроводнике, найдена энергия ионизации и степень компенсации акцептора, ответственного за электропроводность Cd_{0.6}Mn_{0.4}Te. Сформулированы рекомендации для улучшения параметров Cd_{0.6}Mn_{0.4}Te как материала для детекторов X- и γ-излучения.

Ключевые слова: детекторы X- и γ- излучения, Cd_{1-x}Mn_xTe, оптические и транспортные свойства

Вступ

Упродовж останніх десятиріч стрімко зросла необхідність у напівпровідникових детекторах X- і γ-випромінювання для їх застосування в науці, техніці, медицині, для моніторингу довкілля та інших галузях. Серцевина таких детекторів — кристал напівпровідника, в якому під дією прикладеної напруги створюється електричне поле. У результаті взаємодії з речовиною високоенергетичний квант (фотон) породжує електрон з кінетичною енергією, достатньою для збудження цілого каскаду електронно-діркових пар. У детекторі спектрометричного типу, коли необхідна висока енергетична роздільна здатність, кожен квант повинен породжувати заряд пропорційний енергії поглинутого кванту. Для запобігання рекомбінації (захоплення) електронів і дірок потрібна висока напруженість електричного поля в кристалі. В той же час, струм у колі детектора при відсутності сигналу (темновий) має бути незначним, що досягається застосуванням матеріалу з високим питомим опором ($\geq 10^9$ Ом·см). Інший спосіб зменшення темнового струму — створення в кристалі p-n переходу або діода Шотткі, але це супроводжується звуженням активної області і, отже, зменшенням чутливості детектора на ділянці високих енергій квантів.

Як перспективний матеріал для напівпровідникових детекторів X- і γ-випромінювання, ще в 1960-і роки був запропонований телурид кадмію (CdTe) [1]. Результати подальших досліджень висунули CdTe на перший план серед інших напівпровідникових матеріалів [2,3]. Їх

головна перевага порівняно з уже застосовуваними кремнієвими детекторами — можливість роботи без криогенного охолодження й розширення чутливості в область більших енергій квантів завдяки вищим атомним номерам Cd і Te. До монокристала CdTe висуваються жорсткі вимоги щодо його чистоти й досконалості, які на сучасному рівні технології досягти складно. На початку 1990-х років було доведено, що дефектність кристала зменшується при переході від CdTe до твердого розчину Cd_{1-x}Zn_xTe ($x \approx 0.05—0.2$) [4]. Проте надії на подолання зазначених проблем повною мірою не виправдались. Пошук матеріалів для детекторів X- і γ-випромінювання продовжується, серед яких особливої уваги заслуговує Cd_{1-x}Mn_xTe.

Як відомо, серйозна проблема в технології Cd_{1-x}Zn_xTe пов'язана з явищем сегрегації, яка призводить до неоднорідності складу монокристалу. Твердий розчин Cd_{1-x}Mn_xTe позбавлений цього недоліку, оскільки коефіцієнт сегрегації Mn в CdTe дещо менший 1, а не значно більший 1, як у разі Zn [5,6]. Більше того, для розширення забороненої зони CdTe до оптимального для детектора X- і γ-випромінювання значення необхідно ввести марганцю приблизно вдвічі менше, ніж цинку в разі Cd_{1-x}Zn_xTe [7,8]. Зменшення вмісту марганцю, як і відсутність сегрегації, значно спрощує технологію виготовлення напівізолюючого й однорідного матеріалу.

У даній роботі наведено результати дослідження оптичних і електричних характеристик кристалів Cd_{1-x}Mn_xTe при $x = 0.4$ з метою

з'ясування можливостей їх застосування в детекторах X- і γ -випромінювання як з омичними контактами, так і з діодом Шотткі.

1. Експериментальні результати та їх обговорення

Монокристали $p\text{-Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ вирощені методом модифікованої зонної плавки в кварцевих контейнерах з графітизованою внутрішньою поверхнею при неперервному перемішуванні сплаву для кращої його однорідності. Фракція MnTe в системі CdTe-MnTe при синтезі становила 40 %, що було продиктовано результатами аналізу залежності енергетичної роздільної здатності детектора X- і γ -випромінювання від ширини забороненої зони E_g . Така залежність багатофакторна, оскільки при зміні E_g змінюється також середня енергія іонізації атомів високоенергетичним електроном, ефективна маса й рухливість електронів і дірок в процесі збирання фотогенерованого заряду, нарешті, темновий струм, якому належить ключова роль у формуванні шумових характеристик детектора. Грунтовне дослідження залежності енергетичної роздільної здатності детектора на основі твердого розчину $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ від його ширини забороненої зони показали, що оптимальним значенням E_g для роботи при кімнатних температурах є приблизно 2 еВ, для чого вміст Zn в $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ має становити 70–80 % [9]. Не вносячи значної помилки, можна припустити, що оптимальною шириною забороненої зони й для $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ є величина близька до 2 еВ, але вміст Mn при цьому приблизно вдвічі менший.

На рис. 1 наведено спектр оптичного пропускання $T(\lambda)$ пластини $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ товщиною 0.54 мм. Як видно, на ділянці спектру $\lambda > 650\text{--}700$ нм матеріал є доволі прозорим: при $\lambda = 1000$ нм оптичне пропускання становить 0.55–0.56. Згідно з даними, наведеними в роботі [10], коефіцієнт відбивання R для $\text{Cd}_{0.8}\text{Mn}_{0.2}\text{Te}$ на довжині хвилі 700 нм становить 0.12 з тенденцією зменшення при збільшенні λ . Ігноруючи поглинанням в області “прозорості” кристалу, для пропускання з урахуванням багаторазових відбивань всередині зразка можна записати [11]:

$$T = \frac{(1-R)^2 \exp(-\alpha d)}{1 - R^2 \exp(-2\alpha d)}, \quad (1)$$

де α — коефіцієнт поглинання, d — товщина пластини.

Ігноруючи поглинання всередині кристалу, з формули (1) при $\alpha = 0$ і $R = 0.12$ маємо $T = 0.79$, що значно перевищує вимірне пропускання пластини $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ $T = 0.45$ на довжині хвилі 700 нм (рис. 1(a)). Отже, пропускання досліджуваного кристалу на ділянці його “прозорості” суттєво обмежена неконтрольованими домішками й дефектами, які, окрім усього, зменшують час життя носіїв заряду й отже, детектуючі властивості матеріалу.

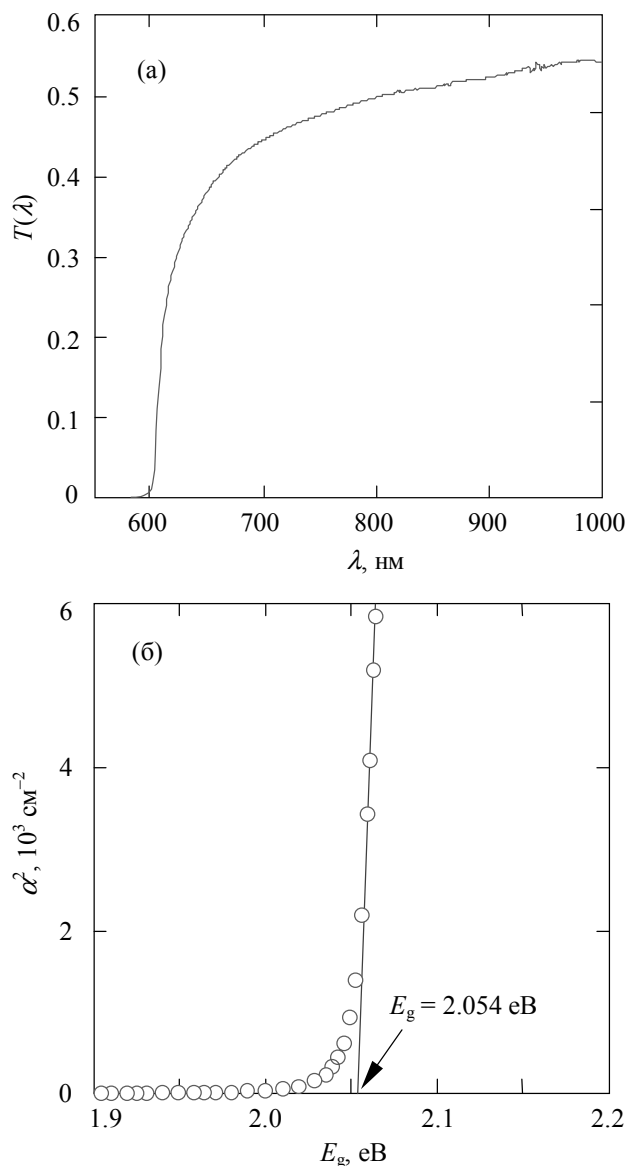


Рис. 1. (a) — Оптичне пропускання монокристалу $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$, (б) — зіставлення кривої поглинання з формулою (2).

З експериментально знайденого спектру пропускання $T(\lambda)$ можна знайти криву поглинання $\alpha(h\nu)$ ($h\nu$ — енергія фотона), скориставшись формулою

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

яка є розв'язком рівняння (1) при врахуванні багаторазових відбивань.

На рис. 1(б) зіставлено знайдену криву поглинання $\alpha(h\nu)$ з формулою, яка описує край пропускання для міжзонних оптичних переходів у прямозонному напівпровіднику, яким є $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ [11,12]:

$$\alpha = \alpha_0 (h\nu - E_g)^{1/2}, \quad (3)$$

де α_0 — коефіцієнт, який можна вважати незалежним від $h\nu$.

У відповідності з формулою (3), крива $\alpha(h\nu)$ для отримання лінійної залежності побудована на рис. 1(б) в координатах α^2 від $h\nu$. Як видно, екстраполяція лінійної залежності, яскраво вираженої в околі енергії фотонів $h\nu \approx E_g$, до перетину з віссю абсцис дозволяє доволі точно визначити ширину забороненої зони матеріалу $E_g = 2.054$ еВ.

Залежність ширини забороненої зони $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ від x досліджена в кількох роботах. На рис. 2 наведено такі залежності при 300 К, взяті з робіт [13–16]. Штриховою лінією там же показана усереднена залежність $E_g(x)$, аналітичний вираз якої має вигляд

$$E_g = 1.49 + 1.39 x. \quad (4)$$

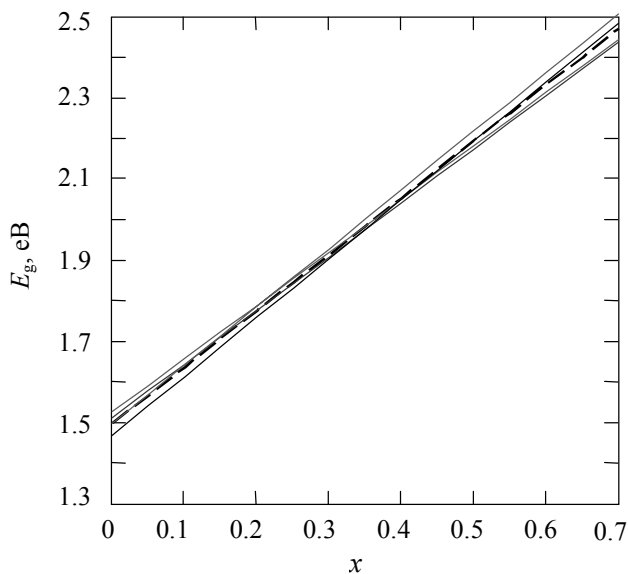


Рис. 2. Залежності ширини забороненої зони $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ від вмісту марганцю (x) при 300 К [13–16]. Штриховою лінією показана усереднена залежність $E_g(x)$, яка описується формулою (4).

Згідно (4), знайдене з кривої на рис. 1(б) значення $E_g = 2.054$ еВ відповідає $x = 0.406$, тобто вмісту марганцю доволі близькому до 40 % в досліджуваних кристалах (далі використовуються позначення $\text{Cd}_{0.6}\text{Mn}_{0.4}\text{Te}$).

Електричні характеристики монокристалів $\text{Cd}_{0.6}\text{Mn}_{0.4}\text{Te}$ наведені на рис. 3. Омічні контакти наносились методом вакуумного напилення нікелю на попередньо підготовлену поверхню зразка. Як видно з рис. 3(а), контакти забезпечували лінійність вольт-амперної характеристики в широкому інтервалі напруг. Слід підкреслити, що при зміні полярності прикладеної напруги результати вимірювань практично збігались.

Як видно з рис. 3(б), питомий опір матеріалу ρ набагато поступається його значенню для зразка з власною провідністю. Цей факт узгоджується з результатами дослідження $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ з різним вмістом марганцю ($x = 0.15$ і 0.45) в роботі [16], в якій була виявлена практична незалежність E_g від x . Температурна залежність питомого опору $\text{Cd}_{0.6}\text{Mn}_{0.4}\text{Te}$ описується експонентою з енергією активації 0.59 еВ (рис. 3(б)), яка набагато менша енергії активації власного напівпровідника з шириною забороненої зони 2.05 еВ.

Як уже зазначалось, досліджувані монокристали властива значна кількість неконтрольованих домішок і дефектів, тому природно припустити, що $\text{Cd}_{0.6}\text{Mn}_{0.4}\text{Te}$ є компенсованим напівпровідником.

Для оцінки прийемо, що положення рівня Фермі й електропровідність матеріалу визначається акцептором з енергією іонізації E_a і концентрацією N_a , а концентрацію компенсуючих донорів позначимо через N_d [17]. Для напівпровідника з такими домішками рівняння електро нейтральності має вигляд

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

де n і p — концентрації електронів і дірок в зоні провідності і валентній зоні, N_a^- і N_d^+ — концентрації заряджених акцепторів і донорів, відповідно.

Для обговорюваного широкозонного високоомного напівпровідника, коли рівень Фермі розташований далеко від валентної зони, а концентрації домішок значні, в рівнянні (5) можна знехтувати концентраціями вільних носіїв n і p . Якщо, далі, рівень компенсуючих донорів достатньо мілкий, їх можна вважати повністю іонізованими, тобто можна прийняти $N_d^+ \approx N_d$.

З такими спрощеннями рівняння (5) зводиться до виразу:

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

аналітичний розв'язок якого має вигляд

$$\Delta\mu = E_a - kT \ln\left(\frac{1 - \xi}{\xi}\right), \quad (7)$$

де $\xi = N_d/N_a$ — ступінь компенсації акцепторів донорами.

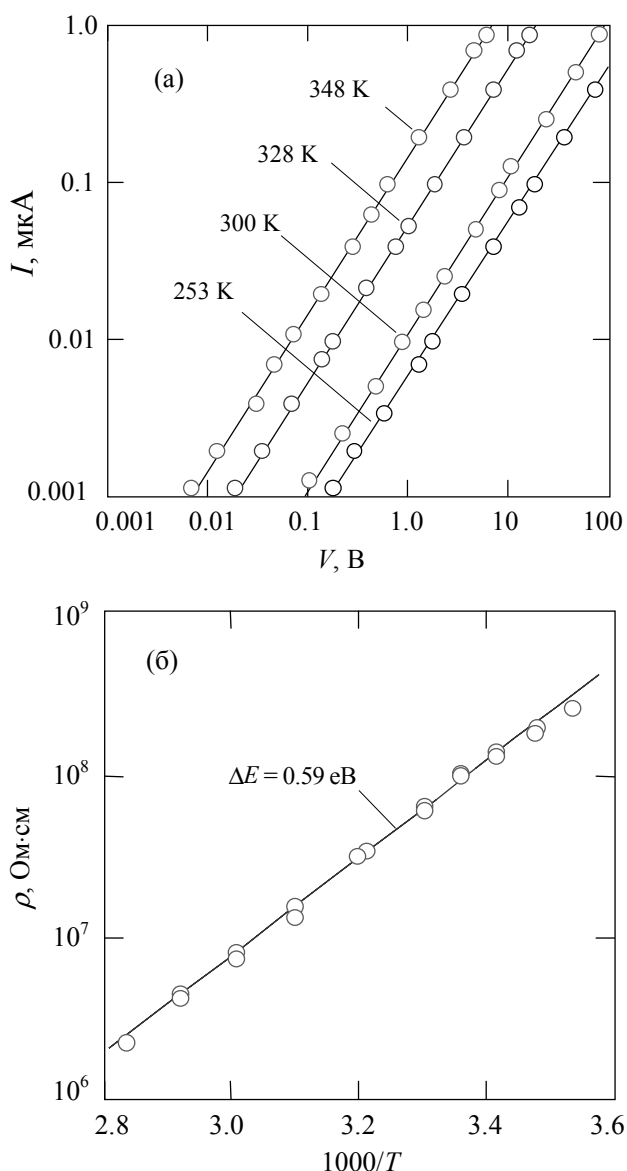


Рис. 3. (а) — Типові вольт-амперні характеристики монокристала $\text{Cd}_{0.6}\text{Mn}_{0.4}\text{Te}$ з омичними контактами при різних температурах. Прямі лінії — лінійна екстраполяція залежностей $I(V)$. (б) — Температурна залежність питомого опору монокристала $\text{Cd}_{0.6}\text{Mn}_{0.4}\text{Te}$ з енергією активації електропровідності $\Delta E = 0.59$ eV.

На рис. 4 показано зіставлення результатів розрахунку за формулою (7) з температурною залежністю енергії Фермі, знайденої з експериментальної залежності $\rho(T)$ на рис. 3(б), як

$$\Delta\mu = kT \ln\left(\frac{N_v}{p}\right), \quad (8)$$

де $p = 1/(q\mu_p\rho)$ — концентрація дірок у валентній зоні, q — заряд електрона, μ_p — рухливість дірок, яка прийнята такою, що дорівнює $60 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ [18].

Як видно з рис. 4, порівняння розрахованої й експериментальної залежностей $\Delta\mu(T)$ дозволяє доволі точно визначити енергію іонізації $E_a = 0.58$ eV й ступінь компенсації акцептора $\xi = 0.25$, відповідального за електропровідність матеріалу. Слід зазначити, що експериментальні дані збігаються з результатами розрахунку лише при одній комбінації E_a і ξ (варіювання E_a приводить до зміщення вздовж вертикальної осі, а ξ — до зміни нахилу залежності $\Delta\mu(T)$).

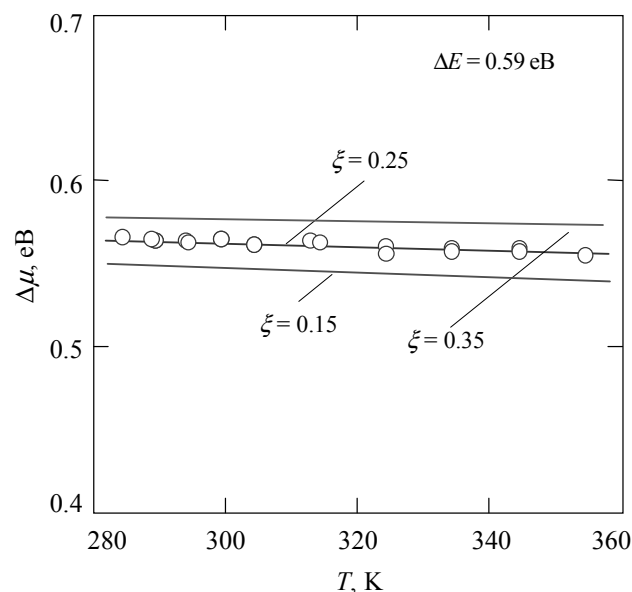


Рис. 4. Температурна залежність енергії рівня Фермі монокристала $\text{Cd}_{0.6}\text{Mn}_{0.4}\text{Te}$. Суцільні лінії — результати розрахунку за формулою (7).

Отримані результати приводять до важливого для технології висновку. Для наближення електропровідності матеріалу до власної, що необхідно для ефективної роботи детектора X- і γ-випромінювання, в $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ необхідно ввести домішку, що створює енергетичний рівень неподалік від середини забороненої зони, причому його концентрація має бути значною, так щоб ця домішка була домінуючою в системі наявних домішок і дефектів.

Як зазначалось у вступі, ефективним способом зменшення темнового струму детектора є створення в кристалі р-n переходу або контакту Шотткі. На рис. 5 наведені результати попереднього дослідження електричних характеристик діодів Шотткі, отриманих вакуумним напиленням нікелю на поверхню $\text{Cd}_{0.6}\text{Mn}_{0.4}\text{Te}$. Як видно з рис. 5(а), вольт-амперна характеристика такого діода нелінійна й асиметрична. На рис. 5(б) показані залежності диференційного опору діода $R_{\text{dif}} = dV/dI$ при прямому й зворотному включенні. При значній прямій напрузі ($V > 30$ В), коли диференційний опір виходить на насичення, контактна різниця потенціалів компенсована зовнішньою напругою, тому R_{dif} практично дорівнює послідовно ввімкненому опору кристалу $R_s = 5 \times 10^8$ Ом. Знаючи R_s , можна побудувати вольт-амперну характеристику як функцію напруги, що діє на самому контакті Шотткі $V - I \cdot R_s$, а не зовнішньої напруги V .

Результат такої побудови показано на рис. 5(а) трикутниками, звідкіля видно, що спад напруги на об'ємній частині діода проявляє себе вже при прямій напрузі $V > 3-4$ В. При менших прямих напругах, а тим більше при зворотних, впливом опору об'ємної частини діода R_s можна знехтувати. При напрузі 7–8 В, якщо враховувати опір R_s , прямий струм перевищує зворотний приблизно на два порядки, тобто випрямляючі властивості $\text{Ni}/\text{Cd}_{0.6}\text{Mn}_{0.4}\text{Te}$ діода Шотткі виявляються яскравіше. При цьому зворотний струм виявляється значно меншим порівняно з кристалом з омичними контактами (при 10 В приблизно на порядок).

2. Висновки

Досліджено оптичні й електричні характеристики монокристалів $\text{Cd}_{0.6}\text{Mn}_{0.4}\text{Te}$, вирощених методом модифікованої зонної плавки. Зі спектрів оптичного пропускання знайдено ширину забороненої зони $E_g = 2.054$ еВ (300 К), а з температурної залежності питомого опору знайдено енергію іонізації $E_a = 0.58$ еВ і ступінь компенсації акцептора $\xi = N_d/N_a = 0.25$, відповідального за електропровідність матеріалу. Відносно низький питомий опір матеріалу ($\sim 10^8$ Ом·см при 300 К) пояснюється значним віддаленням частково компенсованого акцепторного рівня від середини

забороненої зони. Отже, є перспектива значного збільшення питомого опору матеріалу, оптимізуючи параметри компенсуючої домішки та/або режим відпалу вирощених монокристалів. Контакти Шотткі, створені вакуумним напиленням нікелю на поверхню $\text{Cd}_{0.6}\text{Mn}_{0.4}\text{Te}$, виявляють випрямляючі властивості, що дозволяє значно знизити темновий струм детектора Х- і γ -випромінювання.

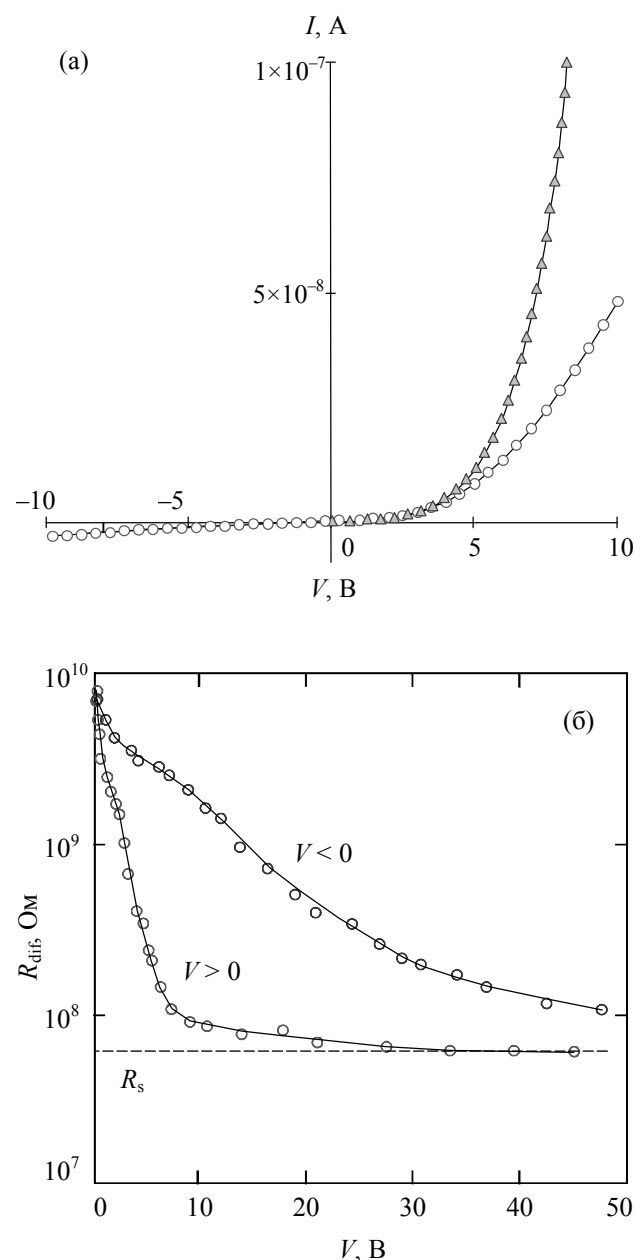


Рис. 5. (а) — Вольт-амперна діода Шотткі $\text{Ni}/\text{Cd}_{0.6}\text{Mn}_{0.4}\text{Te}$. Кругечками й трикутниками показано I - V характеристику відповідно без і з урахуванням спаду напруги на опорі об'ємної частини кристалу. (б) — Залежність диференційного опору діода від напруги.

Література

1. Е. Н. Аркадьева, О. А. Матвеев, С. М. Рывкин, Ю. В. Рудь, Использование теллурида кадмия для создания п-р счетчиков гамма-квантов // Журнал технической физики. — 1966. — Vol.36. — С. 1146—1148.
2. E. Sakai, Present status of room temperature semiconductor detectors // Nucl. Instr. and Meth. — 1982. — Vol.196. — P.121—130.
3. G. Entine, P. Waer, T. Tiernan, M. R. Squillante, Survey of CdTe nuclear detector application // Nucl. Instr. and Meth. A. — Vol.283. — P. 282—290.
4. J. F. Butler, C. L. Lingren, F. P. Doty, Cd_{1-x}Zn_xTe gamma ray detectors // IEEE Transactions on Nuclear Science. — 1992. — Vol.39, № 4. — P. 605—609.
5. A. Tanaka, Y. Masa, S. Seto, T. Kawasaki, Zinc and selenium co-doped CdTe substrates lattice matched to HgCdTe // J. Crystal Growth. — 1989. — Vol.94. — P. 166—170.
6. W. Jie, T. Wang, D. Zeng, Y. Hao, K. He, Vertical Bridgman growth and characterization of Cd-MnTe substrates for HgCdTe epitaxy // J. Crystal Growth. — 2008. Vol.310, № 13. — P. 3203—3207.
7. J. K. Furdyna, Diluted magnetic semiconductors: an interface of semiconductor physics and magnetism // J. Appl. Phys. — 1982. — Vol.53, № 11. — С. 7637—7643.
8. J. K. Furdyna, Diluted magnetic semiconductors // J. Appl. Phys. — 1988. — Vol.64, № 4. — P. R29-R64.
9. J. E. Toney, T. E. Schlesinger, R. B. James, Optimal bandgap variants of Cd_{1-x}Zn_xTe for high-resolution X-ray and gamma-ray spectroscopy // Nucl. Instr. and Meth., A. — 1999. -Vol.428, № 1. — P. 14—24.
10. L. Safonova, R. Brazis, R. Narkowicz, Optical Properties of CdMnTe Crystals Near Fundamental Absorption Edge in Transverse Magnetic Fields // J. Alloys and Compounds. — 2004. — Vol.371, № 1—2. — P. 177—179 (2004).
11. Ж. Панков, Оптические процессы в полупроводниках. -М.: Мир, 1973. -456 с.
12. S. Adachi, Optical Properties of Crystalline and Amorphous Semiconductors: Materials and Fundamental Principles. -Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1999.
13. N. Bottka, J. Stankiewicz, W. Giriat, Electroreflectance studies in Cd_{1-x}Mn_xTe solid solutions // J. Appl. Phys. — 1981. — Vol.52, № 6. — P. 41—89.
14. M. El Amrani, J. P. Lascaray, J. Diouri, Fundamental absorption of Cd_{1-x}Mn_xTe crystals // Solid State Communications. — 1983. — Vol.45. — P. 351—353.
15. R. Bucker, H.-E. Gumlich, M. Krause, The influence of the temperature and the composition on reflectivity of Cd_{1-x}Mn_xTe within the spectral range $1.5 \leq E \leq 4$ eV // J. Phys. C: Solid State Phys. — 1985. — Vol.18. — P. 661—667.
16. A. Burger, K. Chattopadhyay, H. Chen, J.-O. Nday, X. Ma, S. Trivedi, S.-W. Kutcher, R. Chen, R.-D. Rosemeier, Crystal growth, fabrication and evaluation of cadmium manganese telluride gamma ray detectors // J. Crystal Growth. — 1999. — Vol. 198/199. — P. 872—876 (1999).
17. Л. А. Косяченко, Т. Аоки, О. Л. Масляничук, С. В. Мельничук, В. М. Склярчук, О. В. Склярчук, Особенности механизма электропроводности полупроводниковых монокристаллов CdTe // ФТП. — 2010. — Vol.44, № 6. — С. 729—734 (2010).
18. J. Zhang, W. Jie, Y. Hao, X. Wang, Investigation on gold and aluminum contacts to Cd_{0.8}Zn_{0.2}Te crystals // Semicond. Sc. Technol. — 2008. — Vol. 23. — P. 075010(5pp).