

МОЖЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ТВЕРДОГО РОЗЧИНУ ТЕЛУРИДУ РТУТІ-КАДМІЮ З ШИРОКОЮ ЗАБОРОНЕНОЮ ЗОНОЮ У ФОТОЕЛЕКТРОНІЦІ

Досліджено можливість застосування твердого розчину телуриду кадмію-ртуті з широкою забороненою зоною для детекторів для волоконно-оптичних ліній зв'язку та детекторів X- і γ -випромінювання. Показано можливість застосування матеріалу для виготовлення детекторів електромагнітного випромінювання.

Usability of solid solutions of mercury-cadmium telluride with wide bandgap as material for optical telecommunication detector and X- and gamma-rays detector is investigated. Critical parameters such devices were determined.

Твердий розчин CdTe–HgTe з вмістом HgTe близько 80% добре досліджений з огляду на використання в детекторах інфрачервоного випромінювання в діапазоні 8–14 мкм. Матеріал із малим вмістом HgTe, потенційно придатний для застосування в детекторах різного роду електромагнітного випромінювання, практично не вивчений. У даній роботі наведені результати дослідження фотодіодів для волоконно-оптичних ліній зв'язку і детекторів γ -випромінювання на основі цього матеріалу.

Детектори для волоконно-оптичних ліній зв'язку на основі телуриду ртуті-кадмію

Хоча волоконно-оптичні лінії зв'язку вже набули широкого впровадження, ще й досі ведеться інтенсивний пошук нових фотоприймачів для таких ліній зв'язку, особливо для ділянки спектра $\lambda=1,3\text{--}1,55$ мкм, де оптичні втрати у кварці найменші. Тверді розчини Cd_{1-x}Hg_xTe можна застосовувати для детектування у вказаному діапазоні довжин хвиль. Змінюючи співвідношення Cd і Te, можна в широких межах регулювати спектр fotocутливості приладу. Зокрема, так, щоб максимум припадав на довжини хвиль 1,3 або 1,55 мкм ($x=0,6\text{--}0,7$), що відповідають "вікнам" прозорості кварцових волоконно-оптичних ліній зв'язку. Нижче наводяться результати досліджень фотоелектричних та електричних властивостей поверхнево-бар'єрних діодів на Hg_{0,29}Cd_{0,71}Te та Hg_{0,36}Cd_{0,64}Te. Фотодіодні структури виготовленні вакуумним напиленням Al. Напиленню металів передувала хімічна обробка поверхні монокристала та її бомбардування іонами аргону.

Ширина забороненої зони матеріалу E_g визначалася зі спектрів оптичного пропускання плоскопаралельних пластин із дзеркальними поверхнями. Вимірний коефіцієнт пропускання T використаний для обчислення коефіцієнта поглинання α за формулою, що враховує багаторазове відбиття в зразку

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

де d – товщина пластини, R – коефіцієнт відбиття, що змінюється в межах краю власного поглинання незначно й при розрахунках вважався таким, що дорівнює рівним 0,22.

Оскільки міжзонні переходи в Cd_{1-x}Hg_xTe є прямими, то для визначення E_g криві поглинання $\alpha(h\nu)$ будувалися в координатах α^2 від енергії фотона $h\nu$. Із відсічки прямолінійної ділянки на рис. 1. знаходимо ширину забороненої зони, яка виявилась 0,77 і 0,89 еВ відповідно. Емпірична залежність ширини забороненої зони Cd_{1-x}Hg_xTe від вмісту ртуті й температури така: $E_g(x,T) = 0,303 + 1,93x + 5,35 \cdot 10^{-4}T(1-2x) - 0,81x^2 + 0,832x^3$, що добре виконується в області малих x [1]. Для досліджуваних зразків визначеній ширині забороненої зони відповідає вміст ртуті 0,36 та 0,29 відповідно.

На рис. 2 вольт-амперні характеристики діодів зіставлені з передбачуваною теорією, а саме з моделлю генерації-рекомбінації в області просторового заряду Саа-Нойса-Шоклі [2], адаптованою до поверхнево-бар'єрних структур [3], яка добре виправдовується для обох фотодіодів.

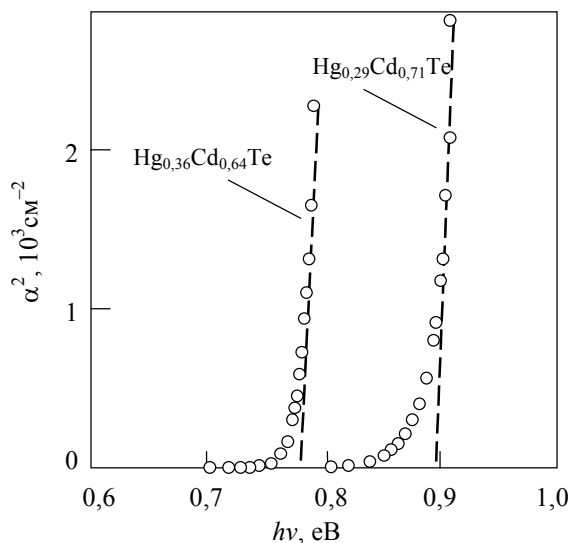
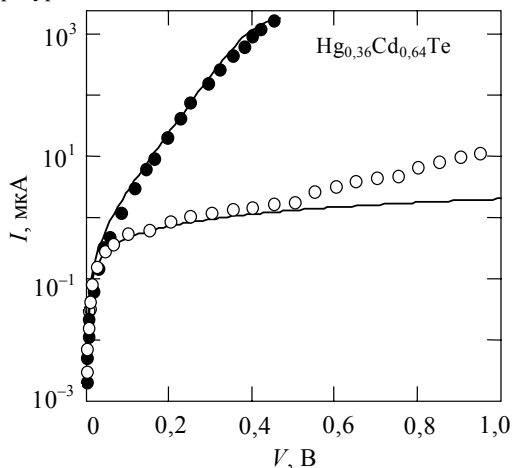


Рис. 1. Криві оптичного поглинання кристалів $\text{Hg}_{0,36}\text{Cd}_{0,64}\text{Te}$ і $\text{Hg}_{0,29}\text{Cd}_{0,71}\text{Te}$ при кімнатній температурі



Результати комп'ютерного моделювання дозволяють визначити енергетичну глибину центрів у забороненій зоні, які відповідальні за генерацію-рекомбінацію носіїв, а також їх час життя (останнє визначає, серед іншого, швидкість фотоприймача). Розраховані значення енергії активації виявились 0,08 еВ та 0,03 еВ, а час життя – $9 \cdot 10^{-10}$ та $9 \cdot 10^{-11}$ с для $\text{Hg}_{0,36}\text{Cd}_{0,64}\text{Te}$ і $\text{Hg}_{0,29}\text{Cd}_{0,71}\text{Te}$ відповідно.

Спектри fotocутливості діодів (рис. 3), виміряні в широкому спектральному інтервалі 0,6–1,8 мкм, задовільно описуються теорією, виходячи з рівняння неперервності з урахуванням поверхневої рекомбінації [3].

Як видно на рис. 3, вікна прозорості кварцового волокна не збігаються із максимумами на кривих fotocутливості діодів, а припадають на довжини хвиль, які передують різкому зменшенню чутливості при збільшенні λ і наближенні до

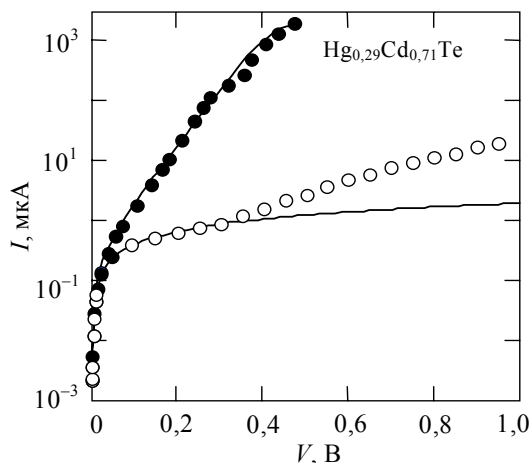


Рис. 2. Вольт-амперні характеристики діодів, побудовані з урахуванням падіння напруги на опорі підкладки (300 К). Суцільні лінії – розраховані за теорією Саа-Нойса-Шоклі

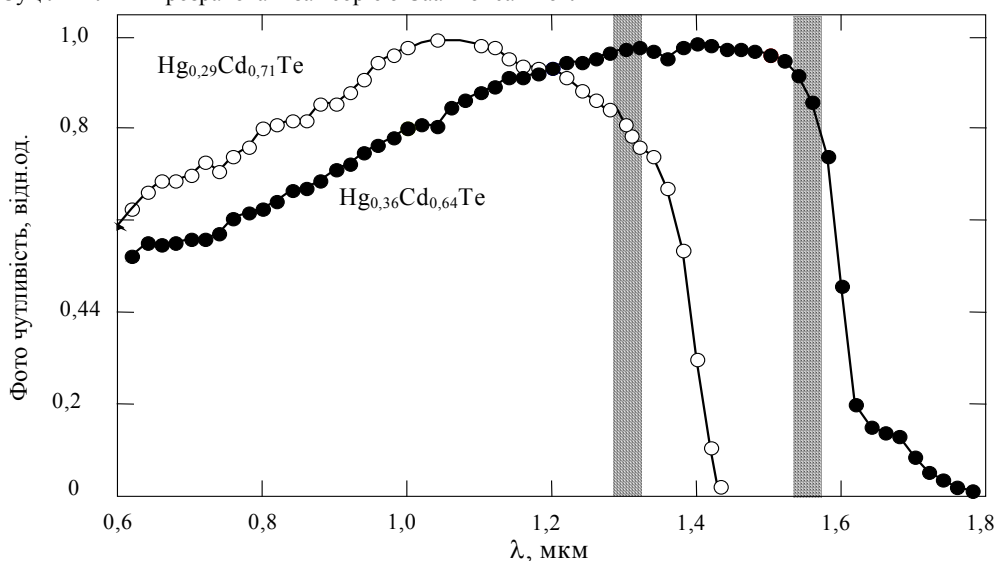


Рис. 3. Спектральний розподіл fotocутливості діодів на основі $\text{Hg}_{0,36}\text{Cd}_{0,64}\text{Te}$ і $\text{Hg}_{0,29}\text{Cd}_{0,71}\text{Te}$ при кімнатній температурі. Показані вікна прозорості кварцового оптичного волокна

довжини хвилі, що відповідає ширині забороненої зони $\lambda_g = hc/E_g$. З точки зору мінімізації темнових струмів бажано, щоб заборонена зона напівпровідника була якомога ширшою. Виходячи з таких міркувань величини E_g досліджуваних монокристалів $Hg_{1-x}Cd_xTe$ ($x=0,64$ і $0,71$) виявились оптимальними, оскільки найменше розширення забороненої зони призведе до різкого зменшення фоточутливості діодів.

Телурид ртуті-кадмію як матеріал для детекторів X- і γ -випромінювання

Телурид кадмію впродовж кількох десятиліть є основою напівпровідникових детекторів X- і γ -випромінювання з розширеним порівняно з кремнієвими детекторами діапазоном енергії квантів аж до ~ 1 МеВ [5-7]. Для виготовлення детектора на основі CdTe електропровідність матеріалу повинна бути близькою до власної. Монокристали CdTe, вирощені сучасними методами, мають значну кількість неконтрольованих домішок і дефектів кристалічної ґратки (аж до $10^{15}-10^{16}$ см⁻³), тому напівізолюючий стан зазвичай досягається шляхом компенсації донорами (наприклад легуванням Cl).

Привабливим матеріалом для застосування в детекторах X- і γ -випромінювання є тверді розчини $Cd_{1-x}Hg_xTe$ з малим вмістом ртуті. Перевага цього матеріалу – звуження забороненої зони E_g порівняно з CdTe при введенні в ґратку Hg приводить до зменшення середньої енергії іонізації атомів високоенергетичним квантом, а отже, – до збільшення кількості носіїв заряду, генерованих високоенергетичним квантом. Зменшення питомого опору, зумовлене звуженням забороненої зони, може бути скомпенсоване використанням як у CdTe, так і в $Cd_{1-x}Zn_xTe$ детекторах термоелектричного охолодження [8].

У результаті оптичних, електричних і фотоелектричних досліджень кристалів $Cd_{1-x}Hg_xTe$ з шириною забороненої зони 1,37 eV ($x=0,05$) знайдені параметри, що визначають питомий опір матеріалу і ефективність збирання носіїв у детекторі X- і γ -випромінювання: глибина рівня домішки (дефектів кристалічної ґратки), ступінь компенсації, час життя та швидкість поверхневої рекомбінації носіїв [9].

Із зображених на рис. 4 типових температурних залежностей питомого опору двох монокристалів $Cd_{0,95}Hg_{0,05}Te$ з різним значенням ρ знайдено величину енергії активації провідності, яка дорівнює для кристалів із питомим опором $9 \cdot 10^4$ і $1 \cdot 10^9$ Ом·см відповідно 0,31 і 0,63 eV (при кімнатній температурі).

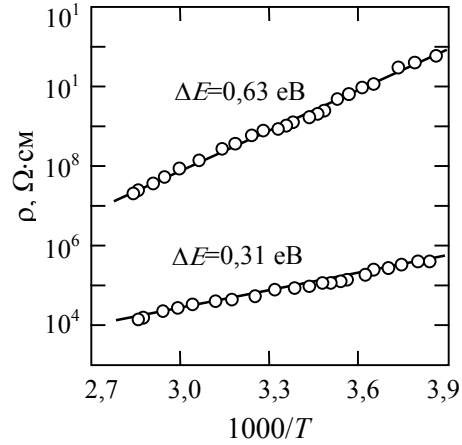


Рис. 4. Температурні залежності питомого опору монокристалів $Cd_{1-x}Hg_xTe$ ($x=0,05$) для $\rho=9 \cdot 10^4$ та $\rho=1 \cdot 10^9$ Ом·см при 300 К

Важливим параметром напівпровідника, використовуваного в детекторі X- і γ -випромінювання, поряд із електропровідністю є час життя носіїв заряду. Мала величина часу життя обмежує ефективність збирання носіїв заряду, генерованих поглиненим квантом, через що до детектора прикладається значна напруга (кілька сотень вольт при товщині кристала кілька міліметрів), а це призводить до небажаного збільшення темнового струму. Час життя носіїв заряду можна визначити зі спектра фотопровідності в області фундаментального поглинання напівпровідника – явища, яке ґрунтується, як і детектування X- і γ -квантів, на внутрішньому фотоелекті. Розв’язок рівняння неперервності відносно коефіцієнта поглинання α із урахуванням поверхневої рекомбінації $\alpha > 100$ приводить до формули [9]

$$\frac{\Delta n(\infty)}{\Delta n(\alpha) - \Delta n(\infty)} = \frac{D_n}{S_n L_n} (1 + \alpha L_n). \quad (2)$$

Вимірявши спектр фотопровідності в широкому спектральному діапазоні, можна за нахилом і відсічкою прямої на графіку $\Delta n(\infty)/[\Delta n(\alpha) - \Delta n(\infty)]$ від α визначити дифузійну довжину неосновних носіїв заряду (а значить, їх час життя) і швидкість поверхневої рекомбінації. Слід звернути увагу на те, що для знаходження цих параметрів матеріалу досить виміряти фотопровідність у відносних одиницях (використати спектральну залежність фотоструму $I_{ph}(h\nu)$).

На рис. 5 зображений спектр фотопровідності монокристала $Cd_{0,95}Hg_{0,05}Te$, виміряний на установці, градуєваній за кількістю фотонів на вихідній щілині спектрального приладу за допомогою паспортизованих кремнієвого та германієвого фотодіодів. Спектральна крива має гострий максимум на ділянці краю власного поглинання (1,37–1,38 eV).

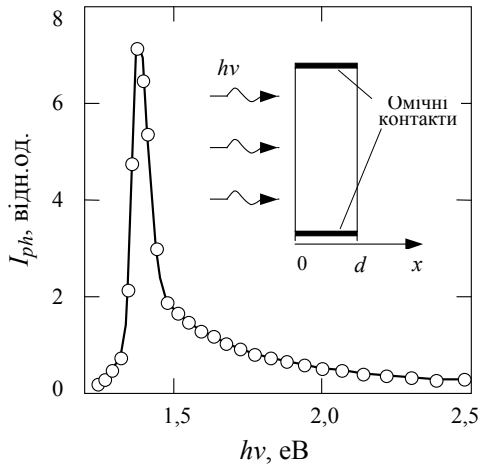


Рис. 5. Спектр фотопровідності Cd_{0,95}Hg_{0,05}Te при 300 К. Зліва – схема експерименту

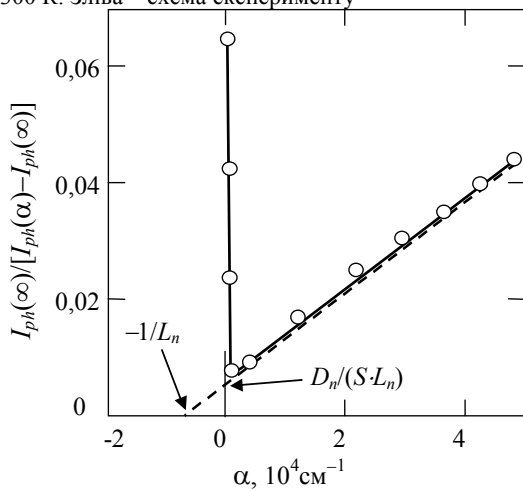


Рис. 6. Зіставлення залежності $I_{ph}(\infty)/[I_{ph}(\alpha)-I_{ph}(\infty)]$ від α з формулою (2)

Вимірний спектр фотопровідності монокристала Cd_{0,95}Hg_{0,05}Te на рис. 6. зіставлено з розрахунком за формулою (2). Надлишкова концентрація електронів, замінена фотострумом $I_{ph}(h\nu)$, через $I_{ph}(\infty)$ позначена його величина у високоенергетичній частині спектра. На отриманій залежності є ділянка, апроксимована прямою лінією. Знайдені з відсічок на осях значення: швидкості поверхневої рекомбінації $S_n=(3-3,5)\times 10^7$ см/с, дифузійної довжини електронів $L_n=1,3-1,7$ мкм, часу життя електронів $\tau_n=(0,7-1,2)\times 10^{-9}$ с ($D_n=25$ см²/с при 300 К). Настільки малі значення τ_n можна пояснити наявністю в забороненій зоні глибоких рівнів, пов'язаних із значним легуванням V, що підтверджується також результатами дослідження поверхнево-бар'єрних структур на подібному матеріалі [9].

Висновки

Досліджено можливості застосування твердого розчину телуриду ртуті-кадмію Cd_{1-x}Hg_xTe

з широкою забороненою зоною з різним вмістом ртуті ($x<0,4$) в детекторах електромагнітного випромінювання.

Показано, що досліджуваний матеріал можна використовувати для виготовлення детекторів для волоконно-оптичних ліній зв'язку, оскільки спектри фоточутливості випрямляючих структур на його основі добре узгоджуються з вікнами прозорості кварцового волокна, а малий час життя носіїв заряду передбачає високу швидкодію таких фотоприймачів.

Напівізолюючий Cd_{0,95}Hg_{0,05}Te, легований V, із забороненою зоною 1,37 eV придатний для використання для детекторів X- і γ-випромінювання.

Як у першому, так і в другому випадку йдеться тільки про можливість використання, оскільки неоднорідність зразків, присутність неконтрольованих домішок та дефектів кристалічної ґратки погіршують характеристики таких приладів. Крім того, залишається відкритим питання технологічної відтворюваності властивостей матеріалу.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Hansen G.L., Schmit J.L., Casselman T.N. Energy gap versus alloy composition and temperature in Hg_{1-x}Cd_xTe // J.Appl. Phys. – 1982. – **53**. – P.7099-7101.
2. Sah C., Noyce R., Shockley W. Carrier generation and recombination in p-n junctions and p-n junction characteristics // Proc. IRE. – 1957. – **45**. – P.1228.
3. Косьяченко Л.А., Махний В.П., Потыкевич И.В. Генерация-рекомбинация в области пространственного заряда контакта металл-CdTe // УФЖ. – 1978. – **23**, №2. – С.279-286.
4. Lavagna M., Pique J.P., Marfaing Y. Theoretical analysis of the quantum photoelectric yield in shottky diodes // Solid-State Electronics. – 1977. – **20**. – P. 235-240.
5. Sakai Eiji Present status of room temperature semiconductor detectors // Nucl. Instr. and Meth. – 1982. – **196**. – P.121-130.
6. Entine G., Waer P., Tiernan T., Squillante M.R. Survey of CdTe nuclear detector applications // Nucl. Instr. and Meth. – 1989. – **A283**. – P. 282-290.
7. Eisen Y. Current state-of-the-art applications utilizing CdTe detectors // Nucl. Instr. and Meth. – 1992. – **A322**. – P. 596-603.
8. Redus R.H., Huber A.C., Pantazis J.A. Improved thermoelectrically cooled X/γ-ray detectors and electronics // Nucl. Instr. and Meth. – 2001. – **A458**. – P. 214-219.
9. Kosyachenko L.A., Kulchynsky V.V., Maslyanchuk O.L., Paranchych S.Yu., Sklyarchuk V.M. Studies of CdHgTe as a material for x- and γ-ray detectors // Semiconductors Physics, Quantum electronics and Optoelectronics. – 2003. – **6**, No.2. –P. 227-232.
10. Kosyachenko L.A., Paranchych S.Yu., Tanasyuk Yu.V., Sklyarchuk V.M. et. al Generation-recombination centers in CdTe:V // Semiconductors.. – 2003. – **37**. – P. 452-455.