

**МОЖЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ТВЕРДИХ РОЗЧИНІВ  $Cd_{1-x}Mn_xTe$   
ЯК МАТЕРІАЛУ ДЛЯ ФОТОПРИЙМАЧІВ**

Повідомляється про фотоелектричні властивості монокристалів  $Cd_{1-x}Mn_xTe$  різного складу ( $x=0\div 0,3$ ) і діодних структур на їхній основі. Значення ширини забороненої зони  $E_g$ , знайдене з кривих оптичного поглинання  $Cd_{1-x}Mn_xTe$ , добре корелюють із вмістом Mn, що задається у процесі виготовлення матеріалу. Поверхнево-бар'єрні структури, отримані вакуумним напилюванням Al, мають чітко виражені діодні властивості. Спектри fotocутливості діодів, як і фотопровідність  $Cd_{1-x}Mn_xTe$  монокристалів, у довгохвильовій області обмежені енергією фотонів  $h\nu=E_g=1,5-1,87$  eV (для різних  $x$ ), а у короткохвильовій - заходять в область  $h\nu < 3$  eV.

The photoelectric properties of  $Cd_{1-x}Mn_xTe$  single crystals and Al- $Cd_{1-x}Mn_xTe$  diode structures for different contents of Mn in alloys reported. The bandgap values obtained from the optical absorption curves are in agreement with Mn content predetermined by material preparation process. The surface-barrier structures fabricated by vacuum evaporation of Al have well-defined diode properties. Diode responsivity spectra as well as photoconductivity of  $Cd_{1-x}Mn_xTe$  single crystals are restricted by photon energy  $h\nu=E_g=1,5-1,87$  eV in the long-wavelength region and beyond the  $h\nu > 3$  eV photon energy in the-wavelength region.

Телурид кадмію – одне з найбільше вивчених напівпровідникових сполучень елементів II і VI груп періодичної системи, яке знаходить застосування в оптичних фільтрах, електрооптичних елементах різних пристроїв, детекторах рентгенівського і  $\gamma$ -випромінювання [1-3]. При заміщенні у ґратці CdTe атомів Cd атомами Mn утворюються безперервні тверді розчини  $Cd_{1-x}Mn_xTe$  із досконалою кристалічною структурою (принаймні до  $x=0,3-0,4$ ), що привертають увагу дослідників перш за все цікавими магнітооптичними ефектами й можливістю створення квантових структур [4]. Тим часом уведення Mn у CdTe помітно змінює ширину забороненої зони, концентрацію власних носіїв і інші параметри напівпровідника, які визначають характеристики фотонапівпровідника подібно до того, як це відбувається при заміщенні атомів Ga у GaAs або атомів As атомами P у системах  $Al_xGa_{1-x}As$  і  $GaAs_xP_{1-x}$ . Останні десятиріччя цим питанням не приділялося достатньої уваги.

У даному повідомленні подані результати дослідження оптичного поглинання і fotocутливості монокристалів  $Cd_{1-x}Mn_xTe$  в інтервалі зміни  $x$  від 0 до 0,3, а також електричних і фото-

електричних властивостей поверхнево-бар'єрних діодів на цьому матеріалі.

**Монокристали та їх оптичні характеристики**

Монокристали  $Cd_{1-x}Mn_xTe$  із різним вмістом  $x$  (у межах від 0 до 0,3) отримані методом Бріджмена з наступним відпалюванням злитків при температурі 600° C на протязі 72 годин. Кристали, які не були леговані спеціально, мають  $p$ -тип провідності. Питомий опір, рухливість і концентрація дірок, знайдені з вимірів ефекту Хола, для трьох складів  $Cd_{1-x}Mn_xTe$ , а також CdTe, наведені у таблиці 1.

Оптичні виміри проводилися на старанно відполірованих плоскопаралельних пластинах різної товщини в межах від 70-80 мкм до 1-1,5 мм (для різних інтервалів коефіцієнта поглинання  $\alpha$ ). Спектральні залежності  $\alpha$  знаходилися за стандартною методикою з кривих оптичного поглинання з урахуванням багатократних відбивань від границь поділу [5].

Виходячи з того, що в області великих  $\alpha$  домінують міжзонні електронні переходи, які у  $Cd_{1-x}Mn_xTe$  (як і у CdTe) є прямими й дозволенними, тобто  $\alpha=(h\nu-E_g)^{1/2}$  [5], залежність  $\alpha(h\nu)$

Таблиця 1. Характеристики  $Cd_{1-x}Mn_xTe$  при 300 К.

Характеристики зразків	Номера зразків			
	N1	N2	N3	N4
Вміст Mn, x	0	0,06	0,10	0,30
Питомий опір, Ом·см	$3,5 \cdot 10^2$	$1,6 \cdot 10^4$	$6,3 \cdot 10^2$	$3,8 \cdot 10^5$
Концентр. дірок, $см^{-3}$	$2,2 \cdot 10^{14}$	$5,6 \cdot 10^{12}$	$2,0 \cdot 10^{14}$	$2,7 \cdot 10^{11}$
Рухомість дірок, $м^2 \cdot с^{-1} \cdot В^{-1}$	$\sim 80$	$\sim 70$	$\sim 50$	$\sim 60$
Ширина забороненої зони, eВ	1,49	1,58	1,63	1,87
Тривалість життя, с	$7,0 \cdot 10^{-11}$	$0,6 \cdot 10^{-11}$	$1,4 \cdot 10^{-11}$	$3,9 \cdot 10^{-11}$

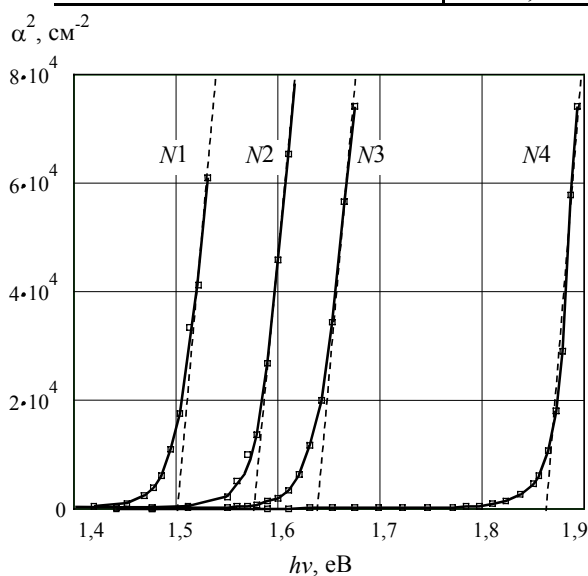


Рис.1. Криві оптичного поглинання монокристалів  $Cd_{1-x}Mn_xTe$  із різним вмістом Mn (див. таблицю 1). Штриховими лініями показана залежність  $\alpha \sim (hv - E_g)^{1/2}$ , стрілками –  $E_g$ .

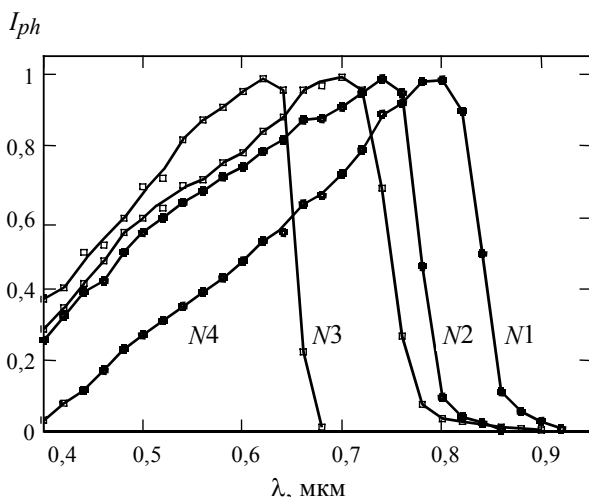


Рис.2. Криві фотопровідності монокристалів  $Cd_{1-x}Mn_xTe$  із різним вмістом Mn (див. таблицю 1).

на рис.1 побудована у координатах  $\alpha^2$  від  $h\nu$ . Екстраполяція прямолінійних ділянок до перетину з віссю  $h\nu$  дає у цьому випадку ширину забороненої зони напівпровідника, значення якої, отримані в такий спосіб, занесені у таблицю 1.

Оптичні втрати, які спостерігаються в області  $h\nu < E_g$ , можна пояснити флуктуаціями. Зауважимо, що значення  $E_g$  для CdTe виявилось таким, що дорівнює 1,49 eВ, і добре узгоджується з літературними даними [1,4], і наявністю мікрвоклучень іншого хімічного складу, структурними дефектами різного типу [5,6], причому ці втрати не обов'язково пов'язані з поглинанням, але й розсіянням світла, яке не призводить до генерації фотоносіїв.

Для дослідження фотопровідності на пластини  $Cd_{1-x}Mn_xTe$  наносилися омичні контакти методом хімічного осадження міді з  $CuSO_4$  у присутності In. Потужність світлового потоку, що падає на зразок на виході спектрального приладу, вимірювалася за допомогою радіометра Кварц 01 ("ЦКБ Ритм", Чернівці, Україна). Для зручності порівняння отримані спектри фотопровідності зразків – на рис.2 подані нормованими по максимуму. Як видно, із збільшенням Mn довгохвильовий край чутливості  $Cd_{1-x}Mn_xTe$  зміщується у бік менших довжин хвиль відповідно до збільшення  $E_g$ .

Охоплюючи широкий спектральний діапазон, фоточутливість усіх зразків заходить також в область  $h\nu < E_g$ . Це свідчить про те, що неоднорідність складу й дефектність кристалів приводить до виникнення у забороненій зоні напівпровідника так званих "хвостів" густини станів, у результаті чого міжзонні електронні переходи стають можливими і при енергії квантів значно менших  $E_g$  [5,6].

### Фоточутливі $Cd_{1-x}Mn_xTe$ діоди

Для дослідження фотовольтаїчного ефекту у  $Cd_{1-x}Mn_xTe$  кристалах, на яких проводилися оптичні і фотоелектричні виміри, були виготовлені поверхнево-бар'єрні структури. Випрямляючий контакт створювався вакуумним випаровуванням Al, омичний контакт наносився на протилежному боці пластини. Отримані структури мали гарні випрямляючі властивості (рис.3): при прямому вмиканні струм різко зростає як тільки напруга

перевищить 0,3-0,5 В, при оберненому включенні при тих же напругах струм залишається менше  $10^{-9}$  А (діаметр випрямляючого контакту 0,5 мм). При збільшенні вмісту Mn у  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  і інших рівних умовах (приблизно однаковому питомому опорі матеріалу) обернені струми помітно зменшуються.

Спектральні залежності фотоструму короткого замикання фотодіодів, виготовлених на  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  різного складу, подані на рис.4. Як і у випадку фотопровідності монокристалів, чутливість діодних структур припадає переважно на область міжзонних переходів. Зауважимо, що спектр fotocутливості для  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  із  $x \approx 0,1$  "обривається" на межі між видимою і інфрачервоною областями спектра, тобто для роботи у видимій області такий діод має переваги у порівнянні з CdTe, а тим більше Si фотодіодом. Фотоелектричний квантовий вихід  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  діодів можна порівняти за величиною з таким для CdTe і складає у максимумі біля 0,3 електрон/фотон, чому відповідає чутливість 0,1-0,2 А/Вт (без просвітлюючих покриттів).

За результатами електричних вимірів можна визначити час життя носіїв у досліджуваному матеріалі. На рис.5 прями  $I-V$  характеристики діодів подані у напівлогарифмічних координатах. Порівняння експериментальних даних із пунктирними прямими показує, що для кожного з діодів є ділянка, що відповідає залежності  $I \sim \exp(e/2kT)$ . Така залежність характерна для струму, обумовленого рекомбінацією носіїв в області просторового заряду, причому відсічка екстрапольованої до перетину з віссю струмів прямолинійної ділянки дає для бар'єра Шоткі величину  $I_{r0} = S n_i W_1 kT / \tau_0 E_g$  [7]. Тут  $S$  – площа діода,  $n_i$  – власна концентрація носіїв,  $\tau_0$  – ефективний час життя носіїв в області просторового заряду,  $W_1 = (2\epsilon\epsilon_0\phi_0/e^2p)^{1/2}$  – ширина цієї області при  $V=0$ , ( $\epsilon$  – діелектрична проникливість напівпровідника,  $\epsilon_0$  – електрична постійна,  $\phi_0$  – висота бар'єра, яку для оцінювання можна прийняти рівною  $E_g$ ).

Концентрацію дірок можна знайти, знаючи їх питомий опір і рухливість,  $\epsilon$  для CdTe дорівнює 10,2, ефективні маси електронів і дірок дорівнюють відповідно  $m_e = 0,11m_0$  і  $m_h = 0,35m_0$  ( $m_0$  – маса електрона у вакуумі). Отже, визначивши з залежностей, поданих на рис.3, відсічку на осі струму  $I_{r0}$ , можна знайти час життя  $\tau_0$ . Для різ-

них діодів значення  $\tau_0$  наведені у таблиці 1. Як очевидно, тривалість життя, що визначаються концентрацією і перерізом захоплення пасток, це величини одного порядку незалежно від складу  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  ( $\sim 10^{-11}$  с). Ще один важливий параметр фотоприймача, яким є дифузійна довжина неосновних носіїв (тут електронів), може бути оцінений із співвідношення  $L_n = (\tau_0 D_n)^{1/2}$ , де  $D_n$  – коефіцієнт дифузії електронів, який дорівнює у відповідності до співвідношення Ейнштейна  $\mu_n(kT/e)$  ( $\mu_n$  – рухливість електронів). Приймаючи  $\mu_n \approx 10^3$   $\text{cm}^2/(\text{c}\cdot\text{В})$ , одержуємо  $L_n \approx 10^{-5}-10^{-4}$  см.

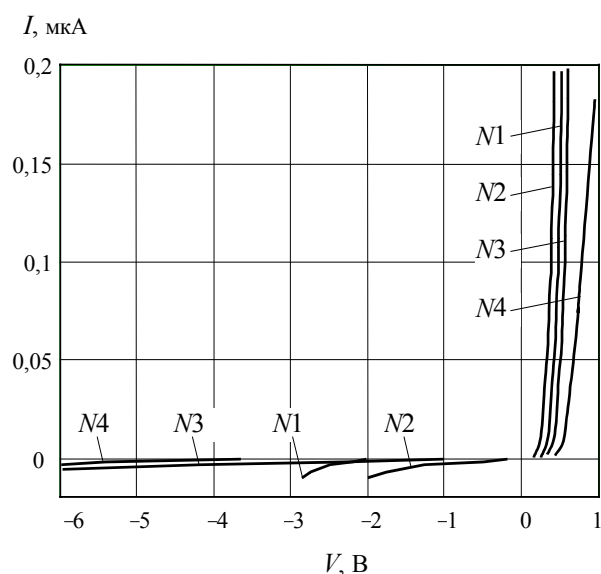


Рис.3. Вольт-амперні характеристики Al-Cd<sub>1-x</sub>Mn<sub>x</sub>Te діодів із тим же вмістом Mn, що й на рис.1.

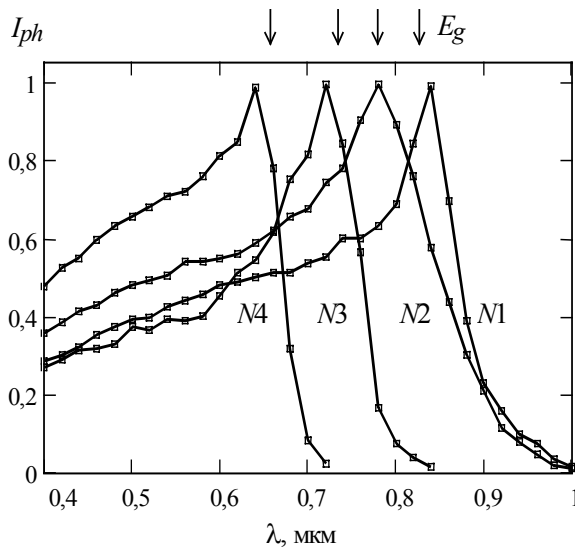


Рис.4. Спектральний розподіл фотоструму короткого замикання Al-Cd<sub>1-x</sub>Mn<sub>x</sub>Te діодів із тим же вмістом Mn, що й на рис.1.

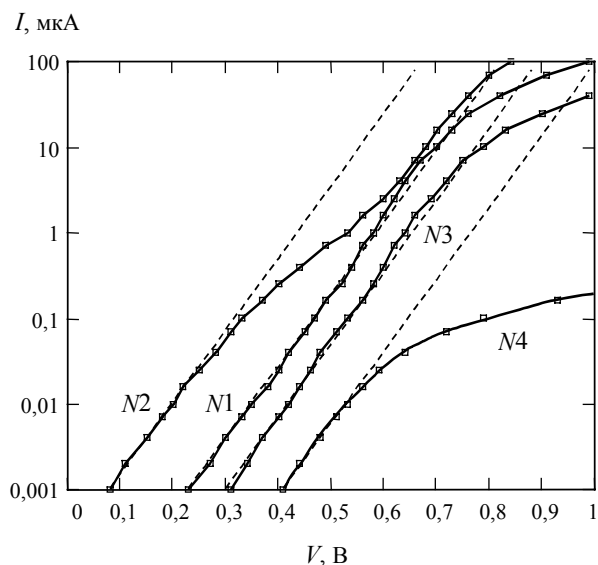


Рис.5. Прямі  $I$ - $V$  характеристики діодів у напівлогарифмічних координатах. Пунктирні лінії відповідають залежностям  $I \sim \exp(e/2kT)$ .

Отже, тверді розчини  $Cd_{1-x}Mn_xTe$  ( $x=0-0,3$ ) є фотопровідними матеріалами, довгохвильовий край чутливості яких зміщений порівняно з  $CdTe$  у бік зменшення довжини хвилі відповідно до збільшення ширини забороненої зони напівпровідника (1,5-1,87 eВ). На контакті Al із  $Cd_{1-x}Mn_xTe$  утворюється бар'єрна структура зі спектром чутливості, подібним до спектра фотопровідності монокристала, що використовується. Тривалість життя носіїв у  $Cd_{1-x}Mn_xTe$  складає величину порядку  $10^{-11}$  с, дифузійна довжина електронів  $10^{-5}$ - $10^{-4}$  см, чутливість діодів при нульовому зсуві 0,1-0,2 А/Вт.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Bell R.O. Review of optical application of CdTe // Rev. Phys. Appl. - 1977. - **12**, No.2. - P.391-399.
2. Entine G., Waer D., Tiernant T., Squilante M.R. Survey of CdTe nuclear detector application // Nucl. Instr. and Meth. - 1989. - **A283**. - P.282-290.
3. Eisen Y. Current state-of-the art applications utilizing CdTe-detectors // Nucl. Instr. and Meth. - **A322**. - P.596-603.
4. Furdyna J.K. Diluted magnetic semiconductors // J.Appl. Phys. - 1988. - **64**, No.4. - P.29-64.
5. Мосс Т., Барелл Г., Эллис Б. Полупроводниковая оптоэлектроника. - М.: Мир, 1976.
6. Власенко А.И., Власенко З.К., Любченко А.В. Спектри фотопровідності кристалів CdHgTe із фотоактивними включеннями // ФТП. - 1999. - **М.33**, №1. - С.47-51.
7. Косяченко Л.А., Махний В.П., Потыкевич И.В. Генерація-рекомбінація в області просторового заряду контакту Метал-CdTe // УФЖ. - 1978. - **23**, №2. - С.279-286.