

О. В. Новосад – завідувач лабораторіями кафедри фізики твердого тіла та інформаційно-вимірювальних технологій Волинського національного університету імені Лесі Українки;

В. В. Божко – кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри фізики твердого тіла та інформаційно-вимірювальних технологій Волинського національного університету імені Лесі Українки;

Г. Є. Давидюк – доктор фізико-математичних наук, професор кафедри фізики твердого тіла та інформаційно-вимірювальних технологій Волинського національного університету імені Лесі Українки;

О. В. Парасюк – кандидат хімічних наук, доцент кафедри неорганічної та фізичної хімії Волинського національного університету імені Лесі Українки;

О. Р. Герасимик – аспірант кафедри фізики твердого тіла та інформаційно-вимірювальних технологій Волинського національного університету імені Лесі Українки.

Електричні, оптичні та фотоелектричні властивості монокристалів $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($x=0,04$)

Роботу виконано на кафедрі фізики твердого тіла та інформаційно-вимірювальних технологій ВНУ ім. Лесі Українки

Досліджено електричні, оптичні та фотоелектричні властивості монокристалів $Cd_{0,96}Zn_{0,04}Te$ р-типу провідності, отримані методом Бріджмена в парах Cd та Zn. Темновий питомий опір монокристалів при $T \approx 300$ К становив $\rho \approx 10^6 - 10^7$ Ом·см, коефіцієнт термо-ЕРС – $\alpha \approx 700$ мкВ/К. За результатами досліджень магнітоопору оцінено концентрацію та рухливість дірок. За положенням краю смуги власного оптичного поглинання, який описується правилом Урбаха, оцінено ширину забороненої зони ($E_g \approx 1,53$ eV). Температурна залежність електропровідності досліджувалась в інтервалі температур 300–700 К і має активаційний характер.

Ключові слова: монокристали, дефекти, електропровідність, магнітоопір, оптичне поглинання, фотопровідність.

Божко В. В., Новосад А. В., Давидюк Г. Е., Парасюк О. В., Герасимик О. Р. Электрические, оптические и фотоэлектрические свойства монокристаллов $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($x=0,04$) Исследованы электрические, оптические и фотоэлектрические свойства монокристаллов $Cd_{1-x}Zn_xTe$ р-типа проводимости, получены методом Бриджмена в парах Cd и Zn. Темновое удельное сопротивление монокристаллов при $T \approx 300$ К составляло $\rho \approx 10^6 - 10^7$ Ом·см, коэффициент термо-ЭДС – $\alpha \approx 700$ мкВ/К. По результатам исследований магнитосопротивления оценено концентрацию и подвижность дырок. По положению края полосы собственного оптического поглощения, который описывается правилом Урбаха, оценено ширину запрещенной зоны ($E_g \approx 1,53$ эВ). Температурная зависимость электропроводности исследовалась в интервале температур $T \approx 300 - 700$ К и имеет активационный характер.

Ключевые слова: монокристаллы, дефекты, электропроводимость, магнитосопротивление, оптическое поглощение, фотопроводимость.

Bozhko V. V., Novosad O. V., Davidyuk H. Ye., Kozar V. R., Parasvuk O. V., Gerasymyk O. R. Electrical, Optical and Photoelectrical Properties of $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($x=0,04$) Single Crystals Electrical, optical and photoelectrical properties of p-type single crystals $Cd_{1-x}Zn_xTe$ grown by Bridgman method under Cd and Zn vapour pressure have been investigated. The resistivity of single crystals at $T \approx 300$ K is $\rho \approx 10^6 - 10^7$ Ohm·cm, the thermoelectric power factor - $\alpha \approx 700$ μ V/K. According to studies of the magnetoresistance concentration and mobility of holes have been estimated. On the position of the edge of intrinsic optical transitions, which is well described by the Urbach rule, the optical width of the forbidden zone of the compound was evaluated ($E_g \approx 1,53$ eV at $T \approx 300$ K). Temperature dependence of electrical conductivity was investigated in the temperature region from 300 K to 700 K and is shown to have activation character.

Key words: single crystals, defects, electrical conductivity, magnetoresistance, optical absorption, photoconductivity.

Постановка наукової проблеми та її значення. Детектори іонізуючого випромінювання на основі CdTe знайшли широке використання в різних галузях науки і техніки [17]. Останнім часом зріс інтерес до кристалів $Cd_{1-x}Zn_xTe$, які мають більш широку заборонену зону (E_g), що дає змогу значно збільшити величину напруженості електричного поля в детекторах і, відповідно, покращити характеристики цих приладів. В оптоелектроніці сполуки $Cd_{1-x}Zn_xTe$ використовують як матеріал підложки при створенні приймачів інфрачервоного випромінювання [18]. Усе частіше з'являються повідомлення про використання $Cd_{1-x}Zn_xTe$ як базового матеріалу при створенні фотоелектропелетворювачів [16]. Область використання цих сполук залежить від їхніх фізичних властивостей, які значною мірою визначаються дефектами кристалічної решітки.

Незважаючи на значну кількість робіт, у яких досліджували структуру дефектів у CdTe та $Cd_{1-x}Zn_xTe$ [2; 3; 6; 7; 10; 11; 14], залишається нерозв'язаним питання про домінуючі типи та параметри дефектів у цих кристалах. Пряме експериментальне дослідження дефектів кристалічної решітки пов'язане з певними труднощами, так як значна частина інформації, отримана з експерименту, є непрямом і неоднозначною. Проте наявність такої інформації має велике практичне значення, оскільки шляхом моделювання дефектної структури кристалів можна прогнозувати властивості матеріалу залежно від умов його отримання та обробки. Тому відсутність єдиної думки щодо параметрів і домінуючих типів точкових дефектів ставить завдання вивчення фізичних властивостей $Cd_{1-x}Zn_xTe$ до багатьох актуальних проблем напівпровідникового матеріалознавства.

Мета статті – дослідити електричні, оптичні й фотоелектричні властивості монокристалів $Cd_{0,96}Zn_{0,04}Te$.

Завдання – на основі даних експериментальних досліджень установити основні електричні, оптичні й фотоелектричні параметри монокристалів $Cd_{0,96}Zn_{0,04}Te$ та зробити розподіл енергетичних станів дефектів структури в забороненій зоні досліджуваного матеріалу.

Виклад основного матеріалу та обґрунтування отриманих результатів дослідження. *Електричні властивості монокристалів $Cd_{0,96}Zn_{0,04}Te$.* Термоелектричними та гальваноманітними методами встановлено, що монокристали $Cd_{0,96}Zn_{0,04}Te$ є напівпровідниками *p*-типу провідності. Темнове значення питомого опору при $T \approx 300$ К становило $\rho \approx 10^6 - 10^7$ Ом·см, коефіцієнт термо-ЕРС – $\alpha \approx 700$ мкВ/К.

На рис. 1 наведено температурну залежність темної питомої електропровідності $\sigma(T)$ монокристалів $Cd_{0,96}Zn_{0,04}Te$, побудовану в напівлогарифмічному масштабі. Як видно із рисунка, у різних температурних інтервалах $\sigma(T)$ можна представити експоненціальною залежністю:

$$\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{E_A}{kT}} \quad (1)$$

Визначена із (1) енергія активації електропровідності в інтервалі температур $T \sim 300 - 400$ К становить $E_{A1} \approx 0,41$ еВ. На високотемпературній ділянці $T \sim 550 - 700$ К енергія активації електропровідності $E_{A2} \approx 0,62$ еВ (рис. 1).

У роботі [11] повідомлялося про наявність глибоких ($E_A \sim 0,4 - 0,8$ еВ) дефектних центрів у високочистих сполуках CdTe, які характеризуються сильною локалізацією електронних станів та виконують роль акцепторів. Відповідальними за дані центри можуть бути й ізольовані точкові дефекти, й сильно локалізовані стани в околі протяжних дефектів.

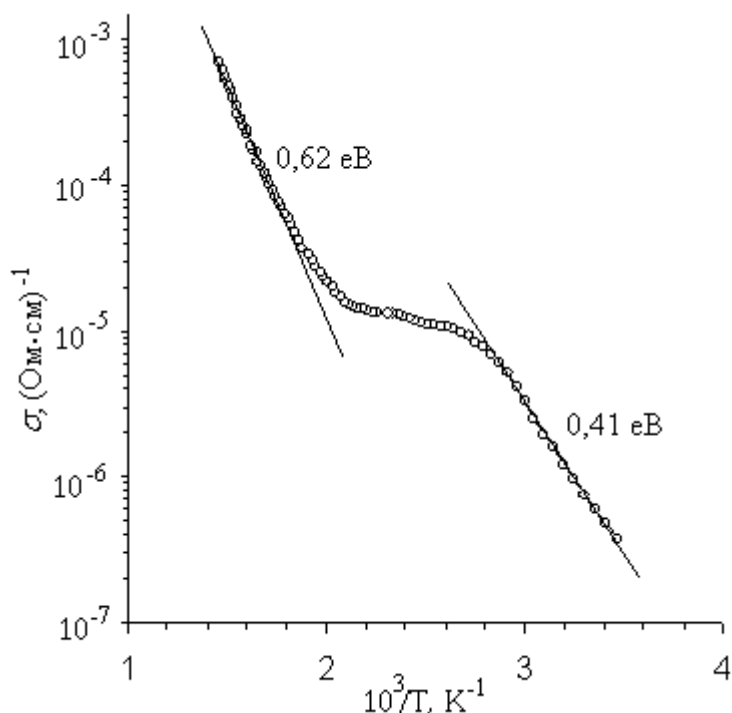


Рис. 1. Температурна залежність питомої електропровідності монокристалів $Cd_{0,96}Zn_{0,04}Te$

Енергія активації 0,62 еВ (рис. 1) добре узгоджується з літературними даними [6], згідно з якими отримане нами значення відповідає енергетичному положенню акцепторного центра, зумовленого двозарядною вакансією кадмію (V_{Cd}^{-2}).

При температурах, близьких до кімнатної, $\sigma(T)$ досліджуваних сполук визначається центрами з енергією активації $E_A \approx 0,41$ еВ. Результати, близькі до наших ($\sim 0,34-0,36$ еВ), зустрічаються в роботах [2; 4; 12]. Проте природа та механізм виникнення дефектів, які зумовлюють дані рівні в забороненій зоні монокристалів CdTe та $Cd_{1-x}Zn_xTe$, остаточно не з'ясовані.

На рис. 2 подано залежність поперечного магнітоопору від індукції магнітного поля кристалів $Cd_{0,96}Zn_{0,04}Te$ при $T \approx 300$ К. Дослідження поперечного магнітоопору проводили шестизондовим методом у магнітному полі індукцією $B=0-0,72$ Тл. Відносна зміна магнітоопору, як видно з рис. 3, описується квадратичною залежністю [9]:

$$\frac{\Delta R}{R} = \mu^2 B^2 C A^2 \quad (2)$$

Для узгодження експериментальних результатів із формулою (2), як і в роботах [1; 15], уважали: $C \cdot A^2 \approx 6$, яке близьке до характерного значення при розсіюванні вільних носіїв заряду на іонізованих домішках [8]. Оцінене за нахилом прямої (рис. 3) значення рухливості дірок становило $\mu \approx 100$ $cm^2/V \cdot s$, відповідно, концентрація дірок – $p \approx 10^9-10^{10}$ cm^{-3} . Отримані таким методом результати добре узгоджуються з літературними даними [5].

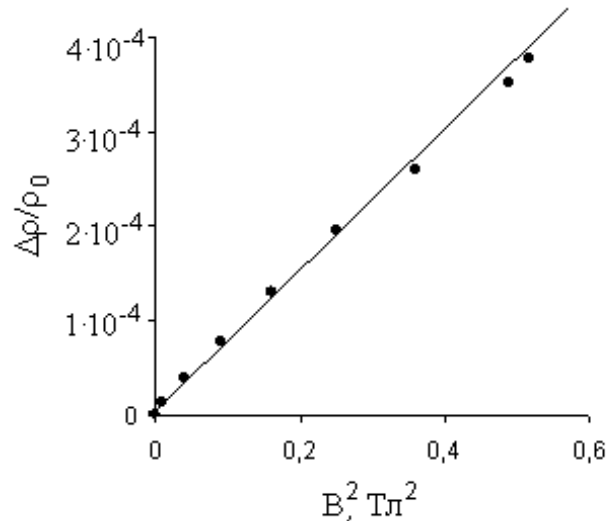


Рис. 2. Залежність поперечного магнітоопору від магнітної індукції

Оптичні та фотоелектричні властивості монокристалів $Cd_{0,96}Zn_{0,04}Te$. На рис. 3 представлено енергетичну залежність коефіцієнта поглинання світла $k(\nu)$ в області краю власних оптичних переходів монокристалів $Cd_{0,96}Zn_{0,04}Te$ при 300 К. Як слідує з рисунка, $k(\nu)$ добре описується правилом Урбаха [13], що свідчить про участь хвостів щільності станів, зумовлених дефектністю кристалічної ґратки, у формуванні оптичних переходів:

$$k(\nu) \propto \exp\left(-\frac{E_{g0} + \Delta}{\Delta}\right) \quad (3)$$

де E_{g0} – константа, пропорційна ширині забороненої зони при 0 К; Δ_0 – характеристична енергія, яка визначає ступінь розмиття краю оптичного поглинання і є мірою розупорядкування кристалічної ґратки сполуки.

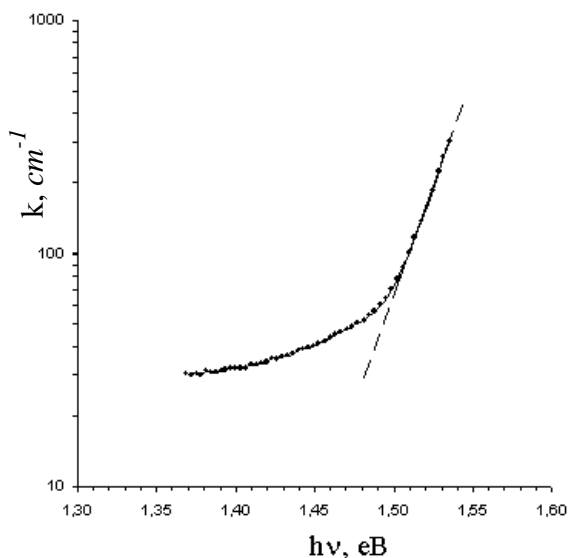


Рис. 3. Енергетичний розподіл коефіцієнта поглинання світла монокристалів $Cd_{0,96}Zn_{0,04}Te$ при 300 К

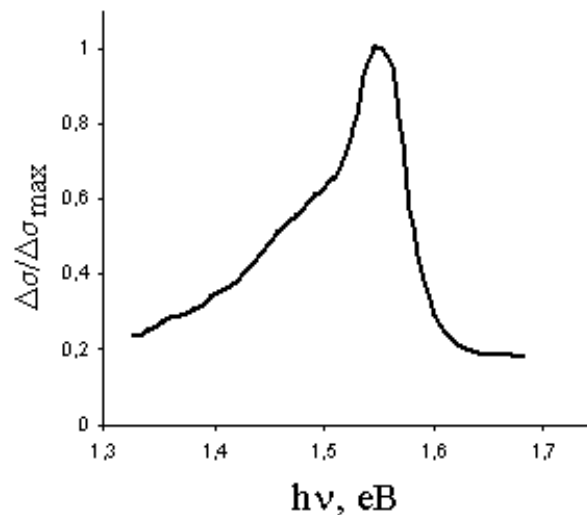


Рис. 4. Спектральний розподіл фотопровідності монокристалів $Cd_{0,96}Zn_{0,04}Te$ при 300 К

Визначене з експериментальної залежності (3) значення Δ_0 становило 0,023 еВ. Велике значення Δ_0 , яке наближається до такого в неупорядкованих напівпровідниках [8], свідчить про високу дефектність сполуки.

Отримане з енергетичного розподілу коефіцієнта поглинання світла значення $E_g \approx 1,53$ еВ добре узгоджується з положенням максимуму фотопровідності (рис. 4), який формується, на нашу думку, власними оптичними переходами. Значення $E_g \approx 1,53$ еВ визначалося при коефіцієнті поглинання світла $k=300 \text{ см}^{-1}$. Положення максимуму спектрального розподілу фотопровідності відповідає енергії квантів світла $h\nu \approx 1,57$ еВ.

Різкий спад фотопровідності при енергії фотонів $h\nu \geq 1,57$ еВ може зумовлюватися великою швидкістю поверхневої рекомбінації. Висока фоточутливість монокристалів $\text{Cd}_{0,96}\text{Zn}_{0,04}\text{Te}$ в області домішкової фотопровідності ($\sim 1,35\text{--}1,5$ еВ) свідчить про наявність більш мілких рівнів, ніж тих, які визначені нами з температурної залежності електропровідності (рис. 1). За положення рівнів у цьому інтервалі енергій можуть бути відповідальними і ізольовані домішкові центри, і скупчення домішкових центрів біля протяжних дефектів.

Висновки. Отже, термоелектричними та гальваноманітними методами встановлено, що монокристали $\text{Cd}_{0,96}\text{Zn}_{0,04}\text{Te}$ належать до напівпровідників p -типу провідності з концентрацією та рухливістю вільних носіїв заряду $p \approx 10^9\text{--}10^{10} \text{ см}^{-3}$ і $\mu \approx 100 \text{ см}^2/\text{В}$, відповідно. Визначено температурну енергію активації дефектних центрів, які встановлюють електричні властивості кристалів в інтервалі температур $T \sim 300\text{--}700 \text{ К}$.

На основі аналізу спектрів фотопровідності та частотної залежності коефіцієнта поглинання світла монокристалів $\text{Cd}_{0,96}\text{Zn}_{0,04}\text{Te}$ оцінено ширину забороненої зони, яка виявилася рівною $E_g \approx 1,53$ еВ. На основі експериментально встановленого параметра Δ_0 , який характеризує частотну залежність коефіцієнта світла в області фундаментальних переходів, можна зробити висновки про високу дефектність досліджуваної сполуки.

Список використаної літератури

1. Виготовлення, електричні та оптичні властивості твердих розчинів $\text{Cu}_{1-x}\text{Zn}_x\text{InSe}_2$ ($x=0,05\text{--}0,2$) / В. В. Божко, Г. Є. Давидюк, О. В. Парасюк [та ін.] // Укр. фіз. журн. – 2010. – Т. 55, № 3. – С. 313–317.
2. Горічок І. В. Антиструктурні дефекти у кристалах $\text{CdTe}:\text{Te}$ / І. В. Горічок // Фізика і хімія твердого тіла. – 2009. – Т. 10, № 1. – С. 129–133.
3. Динамика перезарядки дефектов в крупноблочных пленках $p\text{-CdTe}$ / Х. Х. Исмаилов, Ж. Жанабергенов, Ш. А. Мирсагатов, С. Ж. Каражанов // Фізика і техніка напівпровідників. – 2006. – Т. 40, № 2. – С. 185–187.
4. Электрические и фотоэлектрические свойства текстуррированных поликристаллов CdTe / Ю. В. Клевков, С. А. Колосов, С. А. Медведев, А. Ф. Плотников // Фізика і техніка напівпровідників. – 2001. – Т. 35, № 10. – С. 1192–1196.
5. Электронная теория неупорядоченных полупроводников / В. Л. Бонч-Бруевич, И. П. Звягин, Р. Кайпер [и др.]. – М. : Наука, 1981. – 384 с.
6. Изменение структуры дефектов в монокристаллах $p\text{-CdTe}$ при прохождении лазерной ударной волны / А. Байдуллаева, А. И. Власенко, Б. Л. Горковенко [и др.] // Фізика і техніка напівпровідників. – 2000. – Т. 34, № 4. – С. 443–446.
7. Изучение локальной дефектной структуры кристаллов CdTe-Ge методом микроиндентирования / Л. С. Фоменко, С. В. Лубенец, П. И. Фейчук, Л. П. Щербак // Фізика твердого тела. – 1998. – Т. 40, № 2. – С. 264–268.
8. Исследование компенсации проводимости в кристаллах $\text{CdZnTe}:\text{Cl}$ с разным содержанием цинка / О. А. Матвеев, Н. К. Зеленина, А. И. Терентьев [и др.] // Письма в ЖТФ. – 2007. – Т. 33, № 8. – С. 88–94.
9. Киреев П. С. Фізика напівпровідників : учеб. пособие для вузов / П. С. Киреев. – М. : Высш. шк., 1975. – 584 с.
10. Матвеев О. А. Антиструктурные дефекты Te_{Cd} в кристаллах CdTe / О. А. Матвеев, А. И. Терентьев // Письма в ЖТФ. – 1997. – Т. 23, № 4. – С. 30–34.
11. Оптические и электрофизические свойства дефектов в высокочистом CdTe / В. С. Багаев, Ю. В. Клевков, С. А. Колосов [и др.] // Фізика твердого тела. – 2010. – Т. 52, № 1. – С. 37–42.
12. Пляцко С. В. Лазерностимулированная компенсация объемных дефектов в $p\text{-CdZnTe}$ / С. В. Пляцко, Л. В. Рашковецкий // Фізика і техніка напівпровідників. – 2006. – Т. 40, № 3. – С. 287–295.
13. Правило Урбаха в стеклах PbO-SiO_2 / И. А. Вайнштейн, А. Ф. Зацепин, В. С. Коротов, Ю. В. Щапова // Фізика твердого тела. – 2000. – Т. 42, № 2. – С. 224–229.

14. Прокопів В. В. Собственные точечные дефекты в теллуре кадмия с избытком кадмия / В. В. Прокопів, И. В. Горичок, У. М. Писклинец // Неорганические материалы. – 2009. – Т. 45, № 10. – С. 1177–1181.
15. Фотоелектричні властивості та магнітоопір твердих розчинів $\text{CuInSe}_2\text{-ZnIn}_2\text{Se}_4$ та $\text{CuInS}_2\text{-ZnIn}_2\text{S}_4$ / Г. Є. Давидюк, В. В. Божко, О. В. Новосад [та ін.] // Наук. вісн. Волин. нац. ун-ту ім. Лесі Українки. Фіз. науки. – 2009. – № 18. – С. 19–25.
16. Фотопреобразование в гетероструктурах CdTe и его аналогов с белком / Ю. В. Рудь, В. Ю. Рудь, И. В. Бондарь [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 1999. – Т. 33, № 10. – С. 1201–1204.
17. Christian Scheiber Medical applications of CdTe and CdZnTe detectors / Christian Scheiber, George C. Giakos // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. – 2001. – V. A458. – P. 12–25.
18. Rogalski A. Infrared Photon Detectors / A. Rogalski. – Bellingham. WA : SPIE Optical Engineering Pres, 2002. – 568 p.

Стаття надійшла до редколегії
16.10.2012 р.