

В.М. Катеринчук¹, З.Р. Кудринський¹, В.В. Хомяк²,
І.Г. Орлецький², В.В. Нетяга¹

Властивості анізотипних гетеропереходів *n*-CdO–*p*-InSe

¹Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича Національної академії наук України,
Чернівецьке відділення, вул. І. Вільде 5, Чернівці, Україна 58001; e-mail: kudrynskyi@gmail.com

²Чернівецький національний університет ім. Ю. Федьковича, вул. Коцюбинського 2, Чернівці, Україна, 58012

Вперше виготовлені анізотипні гетеропереходи *n*-CdO–*p*-InSe на основі шаруватих кристалів InSe. Досліджені температурні залежності вольт-амперних характеристик гетеропереходів і визначені механізми струмопроходження через бар'єр при прямому і зворотному зміщеннях. Встановлена область їх фоточутливості.

Ключові слова: гетеропереходи, шаруваті кристали, CdO, InSe.

Стаття поступила до редакції 21.07.2012 ; прийнята до друку 15.12.2012.

Вступ

Шаруваті напівпровідникові кристали, до яких належить моноселенід індію (InSe), володіють анізотропними властивостями, які обумовлені наявністю двох видів зв'язків між атомами в кристалі [1]. Кожен шар шаруватих кристалів містить чотири атомні площини Se – In – In – Se, розташовані перпендикулярно вісі симетрії *C* гексагонального кристала. Всередині шарів зв'язок має іонно-ковалентний характер, сусідні шари зв'язані слабкими зв'язками типу Ван-дер-Ваальса (ВдВ). Низька щільність обірваних зв'язків на ВдВ-поверхні дозволяє використовувати їх як підкладки для вирощування молекулярних [2], металевих [3] наноструктур, а також гетеропереходів (ГП) на основі напівпровідникових матеріалів з різною симетрією і періодом кристалічної решітки [4, 5].

Оксид кадмію (CdO) є одним з найбільш багатообіцяючих прозорих провідних оксидів [6]. CdO має *n*-тип провідності, а ширина його забороненої зони знаходиться в межах від 2,3 до 2,7 еВ [7, 8].

Останнім часом особливий інтерес викликає практичне використання CdO як широкозонного “вікна” для отримання ГП [9-11].

Метою цієї роботи є створення ГП *n*-CdO–*p*-InSe і дослідження їх електричних і фотоелектричних властивостей.

I. Зразки та методика експерименту

Для виготовлення ГП використовувалися

монокристали *p*-InSe. Вони вирощувалися методом Бріджмена і легувалися домішкою кадмію для отримання діркової провідності напівпровідника. Вміст кадмію у кількості 0,1 % по масі призводив до концентрації некомпенсованих акцепторів $p \approx 10^{14} \text{ см}^{-3}$. При кімнатній температурі рухливість основних носіїв складала $m_T \approx 100 \text{ см}^2 / \text{В} \cdot \text{с}$.

Гетеропереходи *n*-CdO–*p*-InSe виготовлялися за методикою описаною в роботі [12].

Дослідження кристалічної структури гетеропереходів *n*-CdO–*p*-InSe проводилися рентгенографічним методом на установці ДРОН-2.0, зібраній за схемою Брегг-Брентано, в монохроматичному CuK_α -випромінюванні. Для обробки отриманих дифрактограм використовували програмне забезпечення LATTEK-KARTA.

Вольт-амперні характеристики (ВАХ) ГП *n*-CdO–*p*-InSe досліджувалися з використанням установки “Schlumberger SI.1255”.

Спектри фоточутливості виготовлених ГП досліджувалися при кімнатній температурі за допомогою монохроматора МДР-3 з роздільною здатністю 2,6 нм/мм. Усі спектри нормувалися відносно кількості падаючих фотонів.

II. Експериментальні результати та їх обговорення

Рентгенограма гетероструктури CdO–InSe приведена на рис. 1, де окрім відображень підкладки InSe зареєстровані також 111, 200, 220, 311, 222

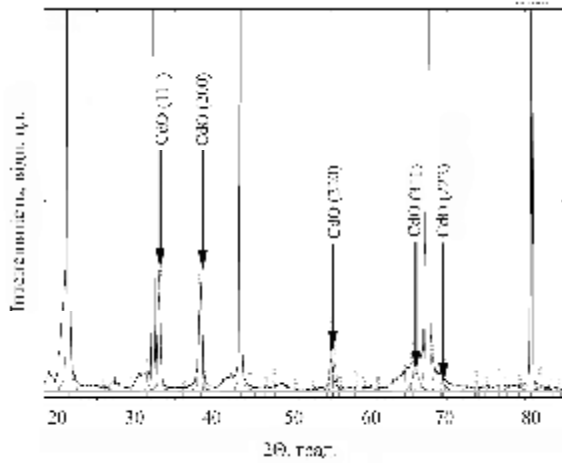


Рис. 1. Рентгенограма гетероструктури CdO-InSe

відображення сполуки CdO.

З проведеного аналізу встановлено, що структура підкладки InSe має параметри $a = 4,002 \text{ \AA}$,

$c = 24,9678 \text{ \AA}$. Плівка CdO має кубічну ґратку з параметром $a = 4,6954 \text{ \AA}$, що співпадає з літературними значеннями [13, 14].

Експериментальні результати дослідження ВАХ ГП CdO-InSe можна описати за допомогою рівняння:

$$J = J_s [\exp(qU / nkT) - 1], \quad (1)$$

де J_s – струм насичення, q – заряд електрона, U – прикладена напруга, n – діодний коефіцієнт ВАХ, k – постійна Больцмана, T – температура. Для різних механізмів протікання струму величина n різна. Для її визначення, як впливає з формули (1), необхідно провести температурні виміри прямих гілок ВАХ. Такі залежності для ГП на основі InSe показані на рис. 2. Вони досліджувалися в інтервалі від 332 до 254 К.

У напівлогарифмічних координатах усі криві характеризуються лінійними ділянками в інтервалі напруги 0 - 0,4 В, по нахилу яких можна визначити діодний коефіцієнт n прямої гілки ВАХ при кожній з

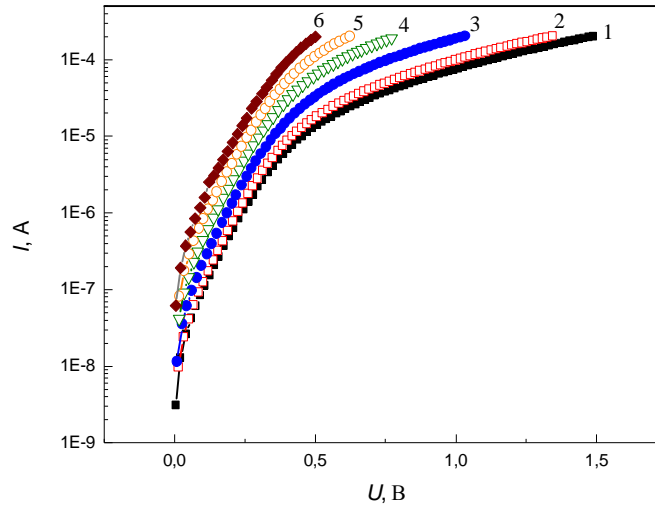


Рис. 2. Прямі гілки ВАХ ГП $n\text{-CdO-p-InSe}$ при температурі T : 1 – 254, 2 – 260, 3 – 277, 4 – 296, 5 – 313, 6 – 332 К.

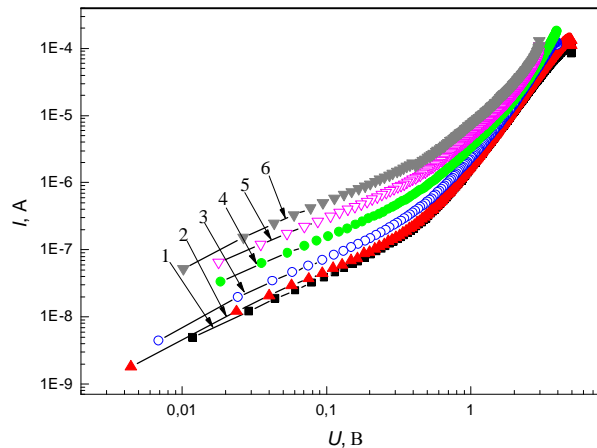


Рис. 3. Зворотні гілки ВАХ ГП $n\text{-CdO-p-InSe}$ при температурі T : 1 – 254, 2 – 260, 3 – 277, 4 – 296, 5 – 313, 6 – 332 К.

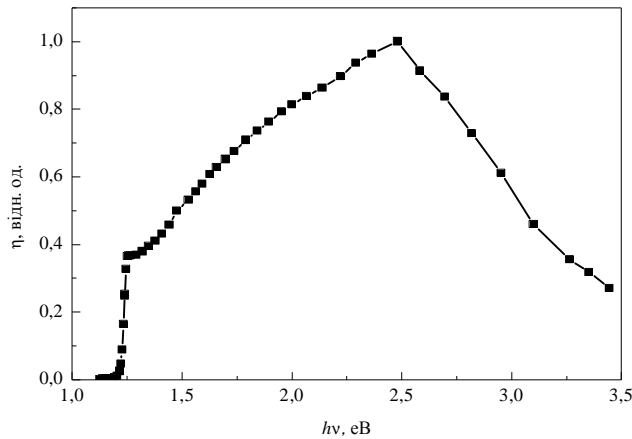


Рис. 4. Спектральна залежність відносної квантової ефективності фотоструму η для ГП $n\text{-CdO-p-InSe}$.

досліджуваних температур. Паралельне зміщення характеристик при зниженні температури свідчить про незалежність прямого струму від температури, яка має місце у випадку тунелювання. Проте тунелювання носіїв через $p\text{-}n$ -перехід при малих прямих зміщеннях малоймовірно, оскільки товщина збідненої області ще достатня, щоб перешкоджати тунелюванню. Альтернативне до тунелювання пояснення спостережуваної закономірності в протіканні прямого струму може бути у випадку, коли струм має тунельно-рекомбінаційний характер. Визначальними для цього механізму є дефекти гетеромежі, а не області просторового заряду (ОПЗ). Ці дефекти можуть бути наслідком неузгодженості параметрів кристалічних ґраток CdO і InSe. Величина n при низькій густині струму перевищує 2 і складає $n = 2,45$ при кімнатній температурі.

З рис. 2 видно також, що при великих струмах характеристики виходять майже на насичення, що відповідає ситуації коли перенесення заряду відбувається в основному через послідовний опір і не відображає істинний механізм струмопроходження через випрямляючий бар'єр.

Температурні залежності ВАХ при зворотних зміщеннях напруги, які відображують перенесення струму через ОПЗ, побудовані в подвійному логарифмічному масштабі і представлені на рис. 3.

З рис. 3 видно, що залежності струму від напруги мають лінійний характер з різними нахилами, що свідчить про те, що їх можна описати степеневу функцією $I \sim U^m$. У випадку залежності ВАХ, яка відповідає кімнатній температурі, характеристика має три нахили з $m = 1, 2, 3$. Така поведінка ВАХ ОПЗ характерна для струмів обмежених просторовим зарядом.

Аналіз спектрів fotocутливості ГП $n\text{-CdO-p-InSe}$ дозволив встановити їх особливості і виявити тонку структуру на довгохвильовому краї. Спектральна fotocутливість ГП має вигляд смуги, різко обмеженої енергетично с двох сторін (рис. 4).

Світло з енергією $h\nu < E_{g1}$ (E_{g1} – ширина забороненої зони фронтального напівпровідника CdO) безпосередньо поглинається в приповерхневій

області базового напівпровідника E_{g2} (InSe), де одночасно зосереджена область $p\text{-}n$ -переходу. Тобто в такому ГП використовується ефект "вікна" – світло певної енергії ($E_{g2} < h\nu < E_{g1}$) безперешкодно проходить фронтальний напівпровідник, а область фотогенерації і ОПЗ співпадають. Фотоносії, що генеруються, розділяються електричним полем і формують довгохвильовий край fotocутливості. На довгохвильовому краї спектру спостерігається гострий максимум, який має екситонне походження.

Висновок

Вперше виготовлені ГП $n\text{-CdO-p-InSe}$ і досліджені температурні залежності ВАХ, які дозволили визначити механізми протікання струму через ОПЗ при прямому і зворотному зміщеннях. Виявилось, що визначальним механізмом струмопереносу через потенціальний бар'єр є тунельно-рекомбінаційний. Це є наслідком неузгодженості параметрів кристалічних ґраток CdO і InSe на гетеромежі. При зворотних зміщеннях домінуючими є струми, обмежені просторовим зарядом, які описуються не експоненціальною, а степеневою залежністю.

Виготовлені ГП – fotocутливі. Їх спектр обмежується на шкалі енергій фотонів поглинанням світла в оксиді і базовому напівпровіднику. Характерною особливістю довгохвильового краю спектру є гострий пік при кімнатній температурі, що пояснюється впливом окрім фундаментального і екситонного поглинання світла в кристалі InSe.

Катеринчук В.М. – доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник;

Кудринський З.Р. – аспірант;

Хомяк В.В. – кандидат фізико-математичних наук, доцент;

Орлецький І.Г. – кандидат фізико-математичних наук, доцент;

Нетяга В.В. – кандидат фізико-математичних наук, науковий співробітник.

- [1] I.C.I. Terhell. Progress in Crystal Growth and Characterization 7, 55 (1983).
- [2] K. Ueno, K. Sasaki, K. Saiki, A. Koma. Japanese Journal of Applied Physics 38, 511 (1999).
- [3] W. Jaegermann, C. Pettenkofer, B.A. Parkinson. Phys. Rev. B 42(12), 7487 (1990).
- [4] N. Wisotzki, A. Klein, W. Jaegermann. Thin Solid Films 380, 263 (2000).
- [5] A.P. Bahtinov, V.N. Vodop'janov, E.I. Slyn'ko, Z.D. Kovaljuk, O.S. Litvin. Pis'ma ZhTF 33(2), 80 (2007).
- [6] B.J. Lokhande, P.S. Patil, M.D. Uplane. Materials Chemistry and Physics 84, 238 (2004).
- [7] K. Chopra, S. Das. Tonkoplenochnye solnechnye jelementy (Mir, Moskva, 1986).
- [8] Naoyuki Ueda, Hiroo Maeda, Hideo Hosono, Hiroshi Kawazoe. J. Appl. Phys. 84 (11), 6174 (1998).
- [9] M. Caglar, F. Yakuphanoglu. J. Phys. D: Appl. Phys. 42, 045102 (2009).
- [10] Sukru Karatas, Fahrettin Yakuphanoglu. Journal of Alloys and Compounds 537, 6 (2012).
- [11] C. Sravani, K.T.R. Reddy, O.Md. Hussain, P. Jayarama Reddy. Thin Solid Films 253, 339 (1994).
- [12] V.V. Brus, M.I. Ilashuk, V.V. Homjak, Z.D. Kovaljuk, P.D. Mar'janchuk, K.S. Uljanickij. FTP 46(9), 1175 (2012).
- [13] Landolt-Börnstein. Semiconductors: II-VI and I-VII Compounds; Semimagnetic Compounds, Springer-Verlag (Berlin, Heidelberg, New York. Group III, Vol. 41b, 1999).
- [14] O. Vigil, F. Cruz, A. Morales-Acevedo, G. Contreras-Puente, L. Vaillant, G. Santana. Materials Chemistry and Physics 68, 249 (2001).

V.M. Katerynychuk¹, Z.R. Kudrynskyi¹, V.V. Khomyak²,
I.G. Orletsky², V.V. Netyaga¹

Properties of Anisotype *n*-CdO–*p*-InSe Heterojunctions

¹Frantsevich Institute of Materials Science Problems, National Academy of Sciences of Ukraine,
Chernivtsi Branch, I.Vilde str. 5, Chernivtsi, Ukraine 58001; e-mail: kudrynskyi@gmail.com

²Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, Kotsybynsky str. 2, Chernivtsi, Ukraine 58012

Anisotype *n*-CdO–*p*-InSe heterojunctions were created for the first time on the basis of InSe layered crystals. Temperature dependences of I-V characteristics of the heterojunctions were studied. Mechanisms of charge transport through the barrier under forward and reverse bias were established. Photosensitive region of the heterojunctions was defined.

Keywords: heterojunctions, layered crystals, CdO, InSe.