

# Электрические и фотоэлектрические свойства анизотипных гетеропереходов $n\text{-CdO}-p\text{-InSe}$

© В.Н. Катеринчук, З.Р. Кудринский<sup>¶</sup>, В.В. Хомяк\*, И.Г. Орлецкий\*, В.В. Нетяга

Институт проблем материаловедения им. И.Н. Францевича Национальной академии наук Украины, Черновицкое отделение, 58001 Черновцы, Украина

\* Черновицкий национальный университет им. Ю. Федьковича, 58012 Черновцы, Украина

(Получена 11 октября 2012 г. Принята к печати 20 октября 2012 г.)

Впервые изготовлены анизотипные гетеропереходы  $n\text{-CdO}-p\text{-InSe}$  на основе слоистых кристаллов InSe. Исследованы температурные зависимости вольт-амперных характеристик гетеропереходов и определены механизмы токопрохождения через барьер при прямом и обратном смещениях. Установлена область их фоточувствительности.

## 1. Введение

Слоистые полупроводниковые кристаллы, к которым принадлежит моноселенид индия (InSe), обладают анизотропными свойствами, которые обусловлены наличием двух видов связей между атомами в кристалле [1]. Каждый слой слоистых кристаллов содержит четыре атомные плоскости Se–In–In–Se, расположенные перпендикулярно оси симметрии  $C$  гексагонального кристалла. Внутри слоев связь имеет ионно-ковалентный характер, соседние слои связаны слабыми связями типа Ван-дер-Ваальса (ВдВ). Низкая плотность оборванных связей на ВдВ-поверхности позволяет применять их в качестве подложек для выращивания молекулярных [2], металлических [3] наноструктур, а также гетероструктур на основе полупроводниковых материалов с различной симметрией и периодом кристаллической решетки [4,5].

Оксид кадмия (CdO) является одним из наиболее многообещающих прозрачных проводящих оксидов [6]. CdO имеет  $n$ -тип проводимости, а ширина его запрещенной зоны находится в пределах от 2.3 до 2.7 эВ [7,8].

В последнее время особый интерес вызывает практическое использование CdO в качестве широкозонного „окна“ для получения гетеропереходов (ГП) [9–11].

Цель данной работы — создание гетеропереходов  $n\text{-CdO}-p\text{-InSe}$  и исследование их электрических и фотоэлектрических свойств.

## 2. Образцы и методика эксперимента

Для приготовления ГП использовались монокристаллы  $p\text{-InSe}$ . Они выращивались методом Бриджмена и легировались примесью кадмия для получения дырочной проводимости полупроводника. Содержимое кадмия в количестве 0.1% по массе приводило к концентрации нескомпенсированных акцепторов  $p \approx 10^{14} \text{ см}^{-3}$ . При комнатной температуре подвижность основных носителей составляла  $\mu_p \approx 100 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ .

ГП  $n\text{-CdO}-p\text{-InSe}$  изготавливались по методике, описанной в работе [12].

Исследования кристаллической структуры гетеропереходов  $n\text{-CdO}-p\text{-InSe}$  проводились рентгенографическим методом на установке ДРОН-2.0, собранной по схеме Брегг–Брентано, в монохроматическом  $\text{CuK}\alpha$ -излучении. Для обработки полученных дифрактограмм использовали программное обеспечение LATTEK-KARTA.

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) ГП  $n\text{-CdO}-p\text{-InSe}$  исследовались с использованием установки „Schlumberger SI.1255“.

Спектры фоточувствительности изготовленных ГП исследовались при комнатной температуре с помощью монохроматора МДР-3 с разрешающей способностью 2.6 нм/мм. Все спектры нормировались относительно количества падающих фотонов.

## 3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Рентгенограмма гетероструктуры CdO–InSe приведена на рис. 1, где кроме отражений подложки InSe зарегистрированы также 111, 200, 220, 311, 222 отражения соединения CdO.

Из проведенного анализа установлено, что структура подложки InSe имеет параметры  $a = 4.002 \text{ \AA}$ ,  $c = 24.9678 \text{ \AA}$ . Пленка CdO имеет кубическую решетку с параметром  $a = 4.6954 \text{ \AA}$ , что совпадает с литературными значениями [13,14].

Экспериментальные результаты исследования ВАХ ГП CdO–InSe можно описать с помощью уравнения

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

где  $J_s$  — ток насыщения,  $q$  — заряд электрона,  $U$  — приложенное напряжение,  $n$  — диодный коэффициент ВАХ,  $k$  — постоянная Больцмана,  $T$  — температура. Для разных механизмов протекания тока величина  $n$  разная. Для ее определения, как следует из формулы (1), необходимо провести температурные измерения прямых

<sup>¶</sup> E-mail: kudrynskyi@gmail.com

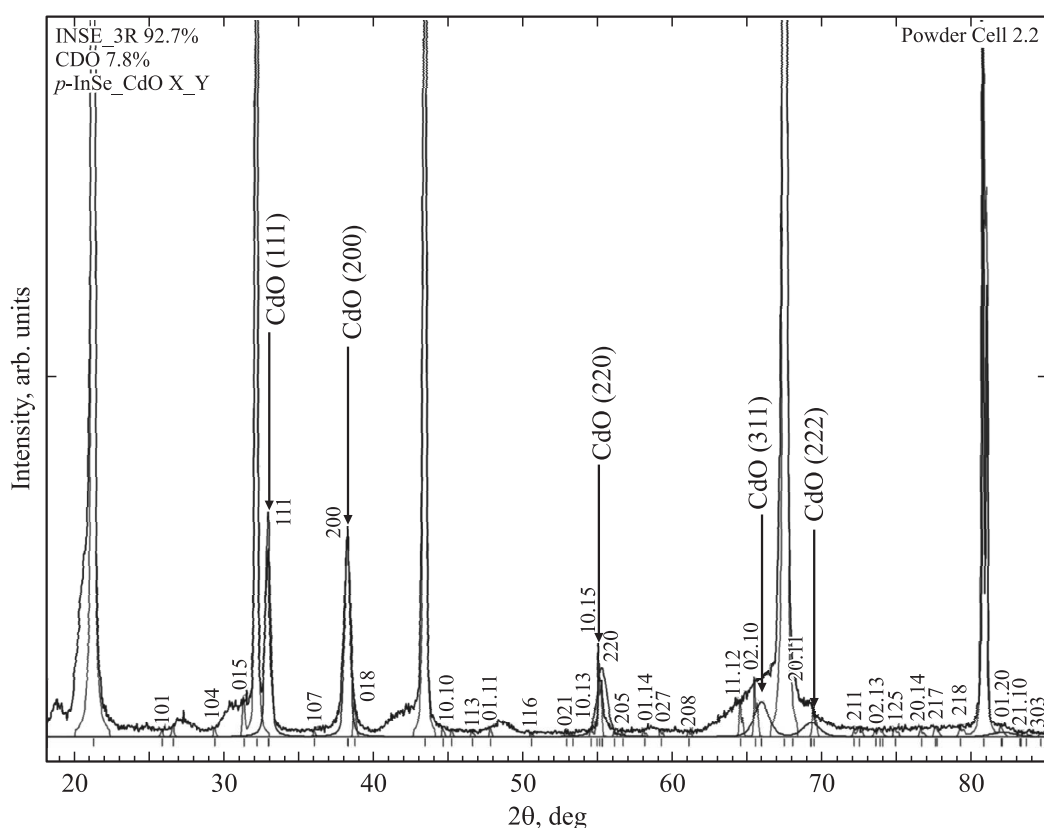


Рис. 1. Рентгенограмма гетероструктуры CdO-InSe.

ветвей ВАХ. Такие зависимости для ГП на основе InSe показаны на рис. 2. Они исследовались в интервале от 332 до 254 К.

В полулогарифмических координатах все кривые характеризуются линейными участками в интервале напряжений 0–0.4 В, по наклону которых можно определить диодный коэффициент  $n$  прямой ветки ВАХ при каждой из исследуемых температур. Параллельное смещение характеристик при снижении температуры свидетельствует о независимости прямого тока от температуры, которая имеет место в случае туннелирования. Однако туннелирование носителей через  $p$ – $n$  переход при малых прямых смещениях маловероятно, поскольку толщина обедненной области еще достаточна, чтобы препятствовать туннелированию. Альтернативное к туннелированию объяснение наблюдаемой закономерности в протекании прямого тока может быть в случае, когда ток имеет туннельно-рекомбинационный характер. Определяющими для этого механизма являются дефекты гетерограницы, а не области пространственного заряда (ОПЗ). Эти дефекты могут быть следствием несогласованности параметров кристаллических решеток CdO и InSe. Величина  $n$  при низких плотностях тока превышает 2 и составляет  $n = 2.45$  при комнатной температуре.

Из рис. 2 видно также, что при больших токах характеристики выходят почти на насыщение, что соответствует ситуации, когда перенос заряда происходит

в основном через последовательное сопротивление и не отражает истинный механизм токопрохождения через выпрямляющий барьер.

Температурные зависимости ВАХ при обратных смещениях напряжения, которые отображают перенос тока

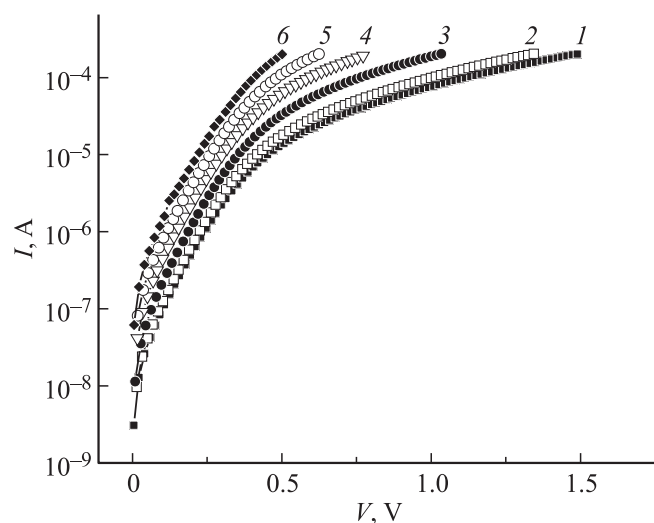
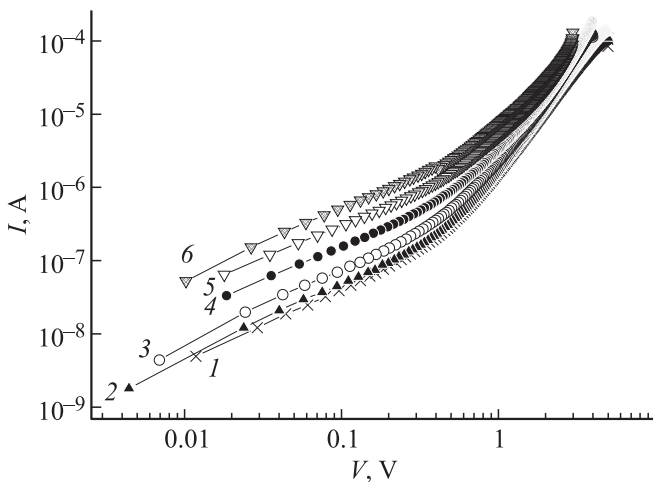
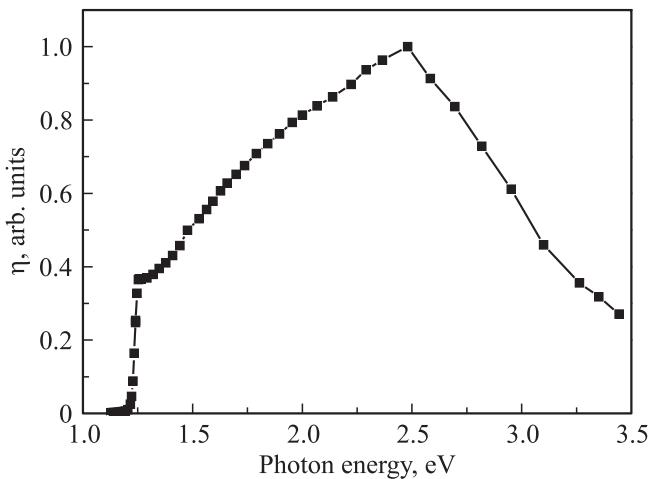


Рис. 2. Прямые ветви вольт-амперных характеристик гетероперехода  $n$ -CdO– $p$ -InSe при температуре  $T$ , К: 1 — 254, 2 — 260, 3 — 277, 4 — 296, 5 — 313, 6 — 332 К.



**Рис. 3.** Обратные ветви вольт-амперных характеристик гетероперехода  $n\text{-CdO-p-InSe}$  при температуре  $T, \text{K}$ : 1 — 254, 2 — 260, 3 — 277, 4 — 296, 5 — 313, 6 — 332 К.



**Рис. 4.** Спектральная зависимость относительной квантовой эффективности фототока  $\eta$  для гетероперехода  $n\text{-CdO-p-InSe}$ .

через ОПЗ, построены в двойном логарифмическом масштабе и представлены на рис. 3.

Из рис. 3 видно, что зависимости тока от напряжения имеют линейный характер с разными наклонами, что свидетельствует о том, что их можно описать степенной функцией  $I \propto U^m$ . В случае зависимости ВАХ, которая соответствует комнатной температуре, характеристика имеет три наклона с  $m = 1, 2, 3$ . Такое поведение ВАХ ОПЗ характерно для токов, ограниченных пространственным зарядом.

Анализ спектров fotocувствительности ГП  $n\text{-CdO-p-InSe}$  позволил установить их особенности и обнаружить тонкую структуру на длинноволновом крае. Спектральная fotocувствительность ГП имеет вид полосы, резко ограниченной энергетически с двух сторон (рис. 4).

Свет с энергией  $h\nu < E_{g1}$  ( $E_{g1}$  — ширина запрещенной зоны фронтального полупроводника CdO) непо-

средственно поглощается в приповерхностной области базисного полупроводника  $E_{g2}$  (InSe), где одновременно сосредоточена область  $p-n$ -перехода. Таким образом, в таком ГП используется эффект „окна“ — свет определенной энергии ( $E_{g2} < h\nu < E_{g1}$ ) беспрепятственно проходит фронтальный полупроводник, а область фотогенерации и ОПЗ совпадают. Генерированные фотоносители разделяются электрическим полем и формируют длинноволновой край fotocувствительности. Однако на длинноволновом крае спектра наблюдается острый максимум, который является следствием экситонного поглощения света в InSe.

#### 4. Заключение

Впервые изготовлены ГП  $n\text{-CdO-p-InSe}$  и исследованы температурные зависимости ВАХ, которые позволили определить механизмы протекания тока через ОПЗ при прямом и обратном смещениях. Оказалось, что определяющим механизмом токопереноса через потенциальный барьер является туннельно-рекомбинационный. Это есть следствие несогласованности параметров кристаллических решеток CdO и InSe на гетерогранице. При обратных смещениях доминирующими являются токи, ограниченные пространственным зарядом, которые описываются не экспоненциальной, а степенной зависимостью.

Изготовленные ГП fotocувствительны. Их спектр ограничивается на шкале энергий фотонов поглощением света в оксиде и базисном полупроводнике. Характерной особенностью длинноволнового края спектра является острый пик при комнатной температуре, что объясняется влиянием кроме фундаментального и экситонного поглощения света в кристалле InSe.

#### Список литературы

- [1] I.C.I. Terhell. Prog. Cryst. Growth Charact., **7**, 55 (1983).
- [2] K. Ueno, K. Sasaki, K. Saiki, A. Koma. Jpn. J. Appl. Phys., **38**, 511 (1999).
- [3] W. Jaegermann, C. Pettenkofer, B.A. Parkinson. Phys. Rev. B, **42**, 7487 (1990).
- [4] N. Wisotzki, A. Klein, W. Jaegermann. Thin Sol. Films, **380**, 263 (2000).
- [5] А.П. Бахтинов, В.Н. Водопьянов, Е.И. Слынько, З.Д. Ковалюк, О.С. Литвин. Письма ЖТФ, **33** (2), 80 (2007).
- [6] B.J. Lokhande, P.S. Patil, M.D. Uplane. Mater. Chem. Phys., **84**, 238 (2004).
- [7] К. Чопра, С. Дас. Тонкопленочные солнечные элементы (М., Мир, 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**, 045 102 (2009).
- [10] Sukru Karatas, Fahrettin Yakuphanoglu. J. Alloys Comp., **537**, 6 (2012).
- [11] C. Sravani, K.T.R. Reddy, O.Md. Hussain, P. Jayarama Reddy. Thin Sol. Films, **253**, 339 (1994).

- [12] В.В. Брус, М.И. Илащук, В.В. Хомяк, З.Д. Ковалюк, П.Д. Марьянчук, К.С. Уляницкий. ФТП, **46** (9), 1175 (2012).
- [13] Landolt-Börnstein. *Semiconductors: II-VI and I-VII Compounds; Semimagnetic Compounds*, ed. by O. Madelung (Berlin-Heidelberg, Springer Verlag, 1999) v. 41B.
- [14] O. Vigil, F. Cruz, A. Morales-Acevedo, G. Contreras-Puente, L. Vaillant, G. Santana. *Mater. Chem. Phys.*, **68**, 249 (2001).

Редактор Т.А. Полянская

## Electrical and photoelectrical properties of anisotype $n\text{-CdO-p-InSe}$ heterojunctions

*V.M. Katerynchuk, Z.R. Kudrynskyi, V.V. Khomyak\*, I.G. Orletsky\*, V.V. Netyaga*

Frantsevich Institute of Materials Science Problems,  
National Academy of Sciences of Ukraine,  
Chernivtsi Branch,  
58001 Chernivtsi, Ukraine

\* Fedkovich Chernivtsi National University,  
58012 Chernivtsi, Ukraine

**Abstract** Anisotype  $n\text{-CdO-p-InSe}$  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.