

В.В. Брус<sup>1</sup>, З.Д. Ковалюк<sup>1</sup>, В.В. Хом'як<sup>2</sup>, В.М. Камінський

## Електричні властивості гетеропереходів ZnO/InSe та ZnO/GaSe

<sup>1</sup>Чернівецьке відділення Інституту проблем матеріалознавства НАН України,  
вул. І. Вільде, 5, Чернівці, Україна 58001, e-mail: [victorbrus@mail.ru](mailto:victorbrus@mail.ru)

<sup>2</sup>Чернівецький національний університет ім. Ю. Федьковича, вул. Коцюбинсько 2, Чернівці, Україна 58012

Досліджено основні електричні властивості гетеропереходів n-ZnO/n-InSe та n-ZnO/p-GaSe виготовлених нанесенням тонкої плівки оксиду цинку методом спреї-піролізу на свіжо сколоті поверхні монокристалічних підкладок шаруватих напівпровідників InSe та GaSe. Встановлено домінуючі механізми струмопереносу у досліджуваних гетеропереходах при зворотному зміщенні.

**Ключові слова:** ZnO, тонка плівка, InSe, GaSe

Стаття постуила до редакції 21.09.2011; прийнята до друку 15.06.2012.

### Вступ

Моноселеніди індію (InSe) та галію (GaSe) належать широкому класу шаруватих сполук  $A_3B_5$ . Характерною ознакою цих матеріалів є можливість отримання шляхом сколення в атмосфері повітря підкладок з атомарно-дзеркальною поверхнею і малою кількістю обірваних зв'язків ( $\leq 1010 \text{ см}^{-2}$ ) без використання механічної чи хімічної обробки поверхні. Ця обставина, а також підвищена радіаційна стійкість роблять InSe і GaSe, цікавими матеріалами для використання в якості підкладок при виготовленні різного роду фоточутливих діодних структур (бар'єрів Шоткі, структур метал-діелектрик-напівпровідник, напівпровідник-діелектрик-напівпровідник, гетеропереходів) [1 - 3].

В даній роботі досліджуються електричні властивості гетеропереходів n-ZnO/n-InSe і n-ZnO/p-GaSe, які виготовлені нанесенням тонкої плівки оксиду цинку на монокристалічні підкладки відповідних шаруватих кристалів.

### I. Методика експерименту

Моноселеніди індію та галію були вирощені методом Бріджмена. Монокристали InSe володіли n-типом провідності з концентрацією основних носіїв заряду  $n = 10^{14} \text{ см}^{-3}$  і рухливістю перпендикулярно осі симетрії  $\mu = 700 - 800 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ . Основними носіями заряду для GaSe були дірки, значення концентрації основних носіїв заряду і їхньої рухливості складала  $p = 10^{13} \text{ см}^{-3}$  і  $\mu = 30 - 35 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ , відповідно.

Підкладки шаруватих кристалів типорозміром  $5 \times 5 \times 0,3 \text{ мм}$  з дзеркальною поверхнею були отримані шляхом сколювання у атмосфері повітря без додаткової механічної чи хімічної обробки.

Напилення плівок ZnO проводилося методом ВЧ магнетронного розпилення зі спресованих керамічних мішеней. Температура поверхні підкладок визначалася за допомогою лазерного пірометра. Для забезпечення стабільної температури підкладок був підібраний циклічний режим напилення: 5 с – розпилення, 20 с – перерва для відновлення температури підкладок.

Товщина отриманих плівок оксиду цинку (0,5 мкм) визначалася з використанням інтерферометра МІІІ – 4 за стандартною методикою.

Для формування фронтального і тилового струмових контактів до досліджуваних гетероструктур, проводилося осадження індію методом термічного випаровування у вакуумі.

Контроль кристалічної структури компонент гетеропереходу ZnO/GaSe проводили рентгенографічним методом на установці ДРОН-2.0, зібрані по схемі Брег-Брентано в монохроматизованому  $\text{CuK}\alpha$  - випромінюванні. Для обробки одержаних дифрактограм використовували програмне забезпечення LATTEK-KARTA.

Вимірювання вольт – амперних та вольт – фарадних характеристик гетероструктур n-ZnO/n-InSe і n-ZnO/p-GaSe проводилося за допомогою вимірювального комплексу SOLARTRON SI 1286, SI 1255.

### II. Результати і їх обговорення

Рентгенограма гетероструктури ZnO/GaSe приведена на рис. 1. Результати зйомки аналізували методом Рітвельда. Із проведеного аналізу встановлено, що структура підложки відповідає

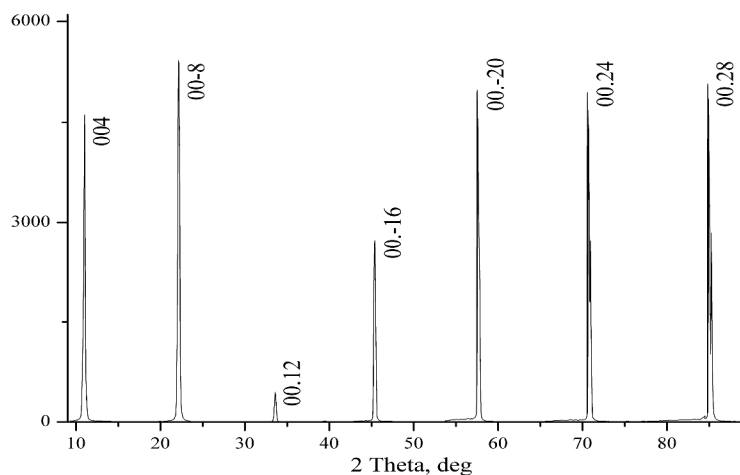


Рис. 1. Рентгенограма гетероструктури ZnO/GaSe

Таблиця 1

H	K	L	2Theta, deg	d/E	I/rel.	F(hkl)	Mu	FWHM
1	0	0	31,847	2,80765	54,50	31,56	6	0,1750
0	0	2	34,550	2,59400	40,74	51,54	2	0,1749
1	0	1	36,354	2,46925	100,00	34,82	12	0,1748
1	0	2	47,694	1,90530	24,16	22,99	12	0,1753
1	1	0	56,745	1,62100	37,37	48,86	6	0,1768
1	0	3	63,087	1,47244	35,34	37,60	12	0,1787
2	0	0	66,558	1,40383	5,49	22,14	6	0,1801
1	1	2	68,161	1,37466	31,21	38,20	12	0,1808
2	0	1	69,284	1,35509	16,26	28,01	12	0,1813
0	0	4	72,870	1,29700	2,79	29,76	2	0,1832
2	0	2	77,205	1,23462	5,33	17,66	12	0,1859
1	0	4	81,720	1,17744	3,07	13,97	12	0,1894
2	0	3	89,942	1,08992	12,40	29,59	12	0,1974
2	1	0	93,084	1,06119	4,22	17,47	12	0,2012
2	1	1	95,618	1,03967	14,59	23,09	24	0,2047

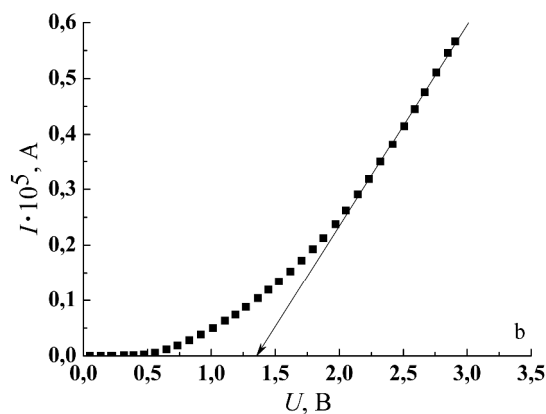
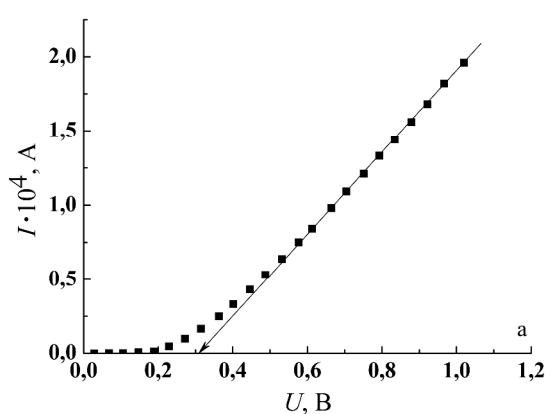


Рис. 2 а, б. Прямі гілки ВАХ гетеропереходів: а – n-ZnO/n-InSe, б – n-ZnO/p-GaSe.

структурі політипу ε – GaSe, виміряні періоди решітки  $a = 3,755 \text{ \AA}$ ,  $c = 15,9 \text{ \AA}$ .

Зареєстровані також лінії слабкої інтенсивності структури ZnO. Індеси дифракційних ліній ZnO, перераховані на 100% інтенсивності ліній (I/rel), їх структурні амплітуди ( $|F(hkl)|$ ) множин повторюваності еквівалентних площин (Mu) та

півширина дифракційного профілю (FWHM, рад.) приведені в табл. 1. Із проведених вимірів встановлено, що плівка ZnO має гексагональну структуру, прост. група  $R\bar{6}_3mc$  (№ 186), періоди гратки  $a = 3,242$ ,  $c = 5,188 \text{ \AA}$ .

На рис. 2 а, б зображено прямі гілки ВАХ гетероструктур n-ZnO/n-InSe та n-ZnO/p-GaSe при 300 К. Шляхом екстраполяції лінійних ділянок ВАХ

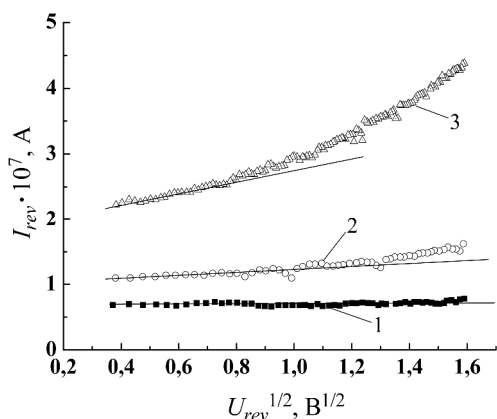


Рис. 3. Основні механізми струмопереносу у гетероструктурі n-ZnO/n-InSe при різних температурах: 1 – 273 К, 2 – 303 К, 3 – 333 К.

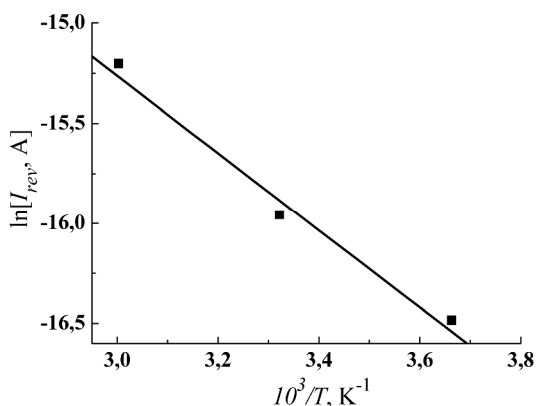


Рис. 4. Визначення глибини залягання генераційного рівня.

до перетину з віссю напруг визначені значення висоти потенціальних бар'єрів досліджуваних гетеропереходів, які складають 0,32 eV та 1,37 В для гетеропереходів n-ZnO/n-InSe і n-ZnO/p-GaSe, відповідно.

При аналізі зворотних струмів через гетероперехід n-ZnO/n-InSe було встановлено, що на початковій ділянці, в області зворотних напруг  $3kT < |U| < 2,5$  В, спостерігається лінійна залежність зворотного струму від напруги у координатах  $I_{rev} - U^{1/2}$  (рис. 3). Це свідчить про те, що основним механізмом струмопереносу, у даному випадку, є теплова генерація вільних носіїв заряду в області просторового заряду гетеропереходу [4].

Глибина залягання генераційно рівня (0,35 eV) була знайдена із залежності зворотного струму від оберненої температури при заданій напрузі  $U = 0,5$  В (рис. 4)

Збільшення зворотної напруги призводить до більш різкого зростання зворотного струму, що виходить за рамки моделі термічної генерації. Таку поведінку можна пояснити вкладом тунельної складової зворотного струму, яка добре описується наступним виразом [5]:

$$I_{rev}^t = a_0 \exp\left(-\frac{b_0}{\sqrt{j_0 - eU}}\right) \quad (1)$$

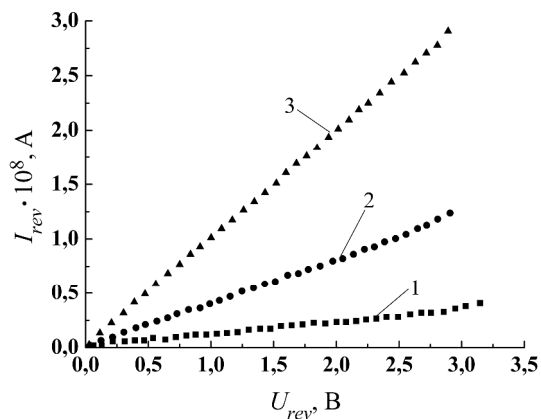


Рис. 5. Зворотні гілки ВАХ гетероструктури n-ZnO/p-GaSe при різних температурах: 1 – 273 К, 2 – 303 К, 3 – 333 К.

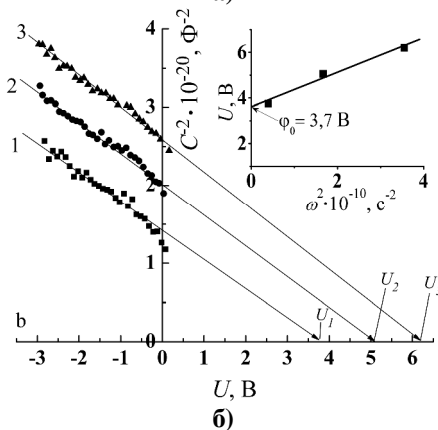
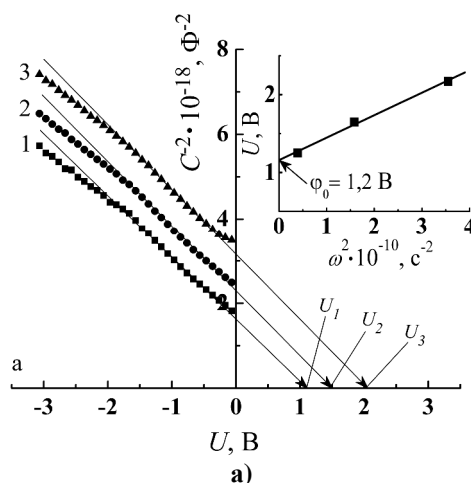


Рис. 6,а, б. ВФХ характеристики гетеропереходів (а – n-ZnO/n-InSe, б – n-ZnO/p-GaSe) виміряні при різних частотах сигналу: 1 – 10 кГц, 2 – 20 кГц, 3 – 30 кГц.

де  $a_0$  – це параметр який визначає ймовірність заповнення енергетичних рівнів з яких відбувається тунелювання,  $b_0$  – визначає швидкість зміни струму з напругою,  $\phi_0$  – висота потенціального бар'єру.

Варто відмітити, що з зростанням температури спостерігається зменшення мінімальної напруги при якій починається домінування тунельного механізму формування зворотного струму.

У випадку анізотипного гетеропереходу n-ZnO/p-GaSe має місце лінійна залежність зворотного струму від напруги для усього діапазону зворотних зміщень (рис. 5). Така залежність може бути викликана протіканням поверхневих струмів внаслідок високого питомого електричного опору базового матеріалу [6].

Результати дослідження ємнісних властивостей гетеропереходів n-ZnO/n-InSe і n-ZnO/p-GaSe представлені на рис. 6,а, б), відповідно.

Вольт-фарадні характеристики обох гетероструктур є лінійними в координатах  $C^{-2} - U$ , що характерно для різких гетеропереходів і може свідчити про різку границю між контактуючими фазами. Крім цього, залежність ємності досліджуваних структур від напруги залежать від частоти на якій проводиться вимірювання і представляють собою сімейство паралельних прямих, що характерно для структур з великим послідовним опором [7]. В данному випадку величина контактної різниці потенціалів  $\varphi_0$  визначається шляхом апроксимації напруг відсічки  $U_{1-3}$  до нульової частоти [7] і складає 1,2 та 2,27 В для n-ZnO/n-InSe і n-ZnO/p-GaSe, відповідно (вставки рис. 5,а, б). Варто відмітити, відхилення значень висоти потенціальних бар'єрів визначених з ємнісних вимірювань від тих значень які були отримані з прямих гілок ВАХ може бути обумовленим впливом неомічного тилового електричного контакту або формуванням високоомного прошарку на межі поділу двох напівпровідників.

## Висновок

Отримано гетеропереходи n-ZnO/n-InSe та n-ZnO/p-GaSe шляхом нанесення тонких плівок оксиду цинку методом пульверизації з наступним піролізом на сколоті монокристалічні підкладки InSe та GaSe з атомарно-дзеркальною поверхнею.

Структурні дослідження гетеропереходу ZnO/GaSe показали, що структура підложки відповідає структурі політипу  $\epsilon - \text{GaSe}$ , вимірні періоди решітки  $a = 3,755 \text{ \AA}$ ,  $c = 15,9 \text{ \AA}$ , а плівка ZnO має гексагональну структуру, прост. група  $R\bar{6}_3mc$  (№ 186), періоди ґратки  $a = 3,242$ ,  $c = 5,188 \text{ \AA}$ .

Основним механізмом формування зворотного струму через гетероструктуру n-ZnO/n-InSe в області напруг  $3kT < |U| < 2,5 \text{ В}$  є термічна генерація в області просторового заряду за участю енергетичного рівня з глибиною залягання у забороненій зоні моноселеніда індія. При збільшенні зворотної напруги суттєво зростає вклад тунельного механізму струмопереносу.

У випадку гетеропереходу n-ZnO/p-GaSe внаслідок великого питомого електричного опору спостерігається домінування поверхневих струмів при зворотному зміщенні.

Електрична ємність досліджуваних гетеропереходів є частотно залежною, що характерно для структур з великим послідовним опором. Різниця між визначеними значеннями висоти потенціальних бар'єрів гетероструктур n-ZnO/n-InSe та n-ZnO/p-GaSe з ВАХ і ВФХ обумовлено впливом тилих електричних контактів.

- [1] С.И. Драпак, В.Б. Орлецкий, З.Д. Ковалюк, В.В. Нетяга, В.Д. Фотий. Зонная диаграмма фоточувствительной структуры Sn-p-InSe // *Письма в ЖТФ*, **29**(11), сс. 86-94 (2003).
- [2] С.И. Драпак, В.Б. Орлецкий, З.Д. Ковалюк, В.В. Нетяга. Формирование барьера в гетероструктуре (собственный окисел)-p-InSe // *ФТП*, **37**(2), сс. 196-202 (2003).
- [3] С.И. Драпак, З.Д. Ковалюк. Влияние буферного слоя собственного окисла селенида галлия нанометровых размеров на электрические, фотоэлектрические и излучательные свойства гетероструктур ПГО-GaSe // *ФТП*, **41**(3), сс. 312-317 (2007).
- [4] Л.А. Косяченко, В.П. Махний, И.В. Потыкевич. Генерация-рекомбинация в области пространственного заряда контакта метал-CdTe // *УФЖ*, **23**, сс. 279-286 (1978).
- [5] Б.Л. Шарма, Р.К. Пурохит. *Полупроводниковые гетеропереходы*. Сов. Радио, М. 227 с. (1979).
- [6] С. Зи. *Физика полупроводниковых приборов*. Кн.1, Мир, М. 456 с. (1984).
- [7] Ю.А. Гольдберг, О.В. Иванова, Т.В. Львова, Б.В. Царенков. К вопросу об определении контактной разности потенциалов структуры с потенциальным барьером // *ФТП*, **18**, сс. 1472-1475 (1984).

V.V. Brus, Z.D. Kovalyk, V.V. Khomyak, V.M. Kaminskiy

## Electrical Properties of the ZnO/InSe and ZnO/GaSe Heterojunctions

<sup>1</sup>Frantsevich Institute for Problems of Materials Science, NAS of Ukraine, Chernivtsi Department, 58001 Chernivtsi, Ukraine,

<sup>2</sup>Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, 58012 Chernivtsi, Ukraine

The main electrical properties of the n-ZnO/n-InSe and n-ZnO/p-GaSe heterojunctions prepared by spray pyrolysis deposition of a ZnO thin film onto freshly cleaved InSe and GaSe single crystal substrates were investigated. The dominant current transport mechanisms in the heterojunctions at reverse bias were established.

**Key words:** ZnO, thin film, InSe, GaSe.