ФІЗИКА І ХІМІЯ ТВЕРДОГО ТІЛА
Т. 5, № 2 (2004) С. 292-297

PHYSICS AND CHEMISTRY OF SOLID STATE
V. 5, № 2 (2004) P. 292-297

УДК 621.315.592

ISSN 1729-4428

С.І. Драпак, З.Д. Ковалюк

Особливості електричних властивостей ізотипних гетеропереходів p-GaSe-p-InSe

Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України, Чернівецьке відділення, вул. І. Вільде, 5, м. Чернівці, 58001, Україна, тел: 8(+03722) 2-00-50, E-mail: chimsp@unicom.cv.ua

В роботі представлено результати перших досліджень ізотопного гетеропереходу p-GaSe-p-InSe. Аналіз експериментальних результатів дозволив визначити основні механізми струмопереносу, пояснити перевищення величини фото-е.р.с. над контактною різницею потенціалів та інші особливості гетероструктури.

Ключові слова: GaSe, InSe, гетероперехід, вольт-амперні характеристики, емісія Шотткі.

Стаття поступила до редакції 30.03.2004; прийнята до друку 19.05.2004.

I. Вступ

Анізотипний гетероперехід (ГП) p-GaSe-n-InSe становить собою першу і найбільш досліджену фоточутливу структуру, виготовлену методом посадки на оптичний контакт, тобто приведенням в безпосередній контакт поверхонь двох напівпровідників, отриманих шляхом сколу в повітряній атмосфері [1]. Результати дослідження електричних, фотоелектричних, люмінесцентних та інших властивостей таких структур наведено в роботах [1-5]. В ряді робіт, в тому числі і в [6], запропоновано використання даного ГП в якості фотодіода, здатного замінити традиційні аналоги на основі кремнію для роботи в умовах підвищеної радіації. Результати досліджень ізотипних ГП GaSe-InSe в літературі відсутні за виключенням дослідження діапазону фоточутливості каскадної структури p-InSe-p-GaSe-n-Ga_2O_3 [7].

Метою даної роботи було створення і проведення перших досліджень електричних властивостей ізотопного подвійного гетероконтакту p-GaSe-p-InSe.

II. Експериментальні результати та їх обговорення

Для виготовлення ГП було використано монокристали p-InSe, вирощені методом Бріджмена, легованих Zn, з концентрацією дірок, визначеною із холівських вимірювань, $p \sim 10^{14}$ см$^{-3}$ при 300 К. В якості контактуючого матеріалу використовувався моноселенід галію GaSe:Dy з концентрацією вільних носіїв $p \sim 10^{16}$ см$^{-3}$ при тій же температурі. ГП виготовлялися методом оптичного контакту [1]. Струмовивідні контакти до GaSe та InSe створювалися за допомогою вплавлення індію при температурі ~ 150°С із сторони моноселеніду галію та срібла зі сторони моноселеніду індію і зберігали омічність в усьому інтервалі досліджуваних густин струмів.

Виготовлені у такий спосіб структури, володіють яскраво вираженими діодними властивостями в широкому діапазоні температур – за напруги 1,5-2 В прямий струм перевищує обернений більш ніж у 10^3 раз. В області прямих зміщень V > 2 В вольт-амперні характеристики (ВАХ) описуються співвідношенням

$$V = V_0 + R_0 \cdot J, \qquad (1)$$

де залишковий опір $R_0 \approx 10^4$ Ом. Екстраполяція прямої вітки ВАХ, виміряної при T = 289 К, в області лінійності до перетину з віссю абсцис дає величину $V_0 \approx 1{,}2$ В (рис. 1), яку, зазвичай, пов'язують із висотою бар'єру. Відмітимо, що більший струм в ГП p-InSe-p-GaSe протікає при підключенні від'ємного потенціалу зовнішнього джерела живлення до моноселеніду індію. Так як питомий опір p-InSe більш ніж на два порядки перевищує аналогічну величину для p-GaSe і, як наслідок, уся напруга падає саме на цьому напівпровіднику (приймаючи до уваги значення концентрацій і діелектричних проникливостей [10] в обох напівпровідниках на GaSe приходиться лише 1/105 частина повної контактної різниці потенціалів), це означає, що p-InSe веде себе в гетероконтакті, як матеріал n-типу провідності, тобто

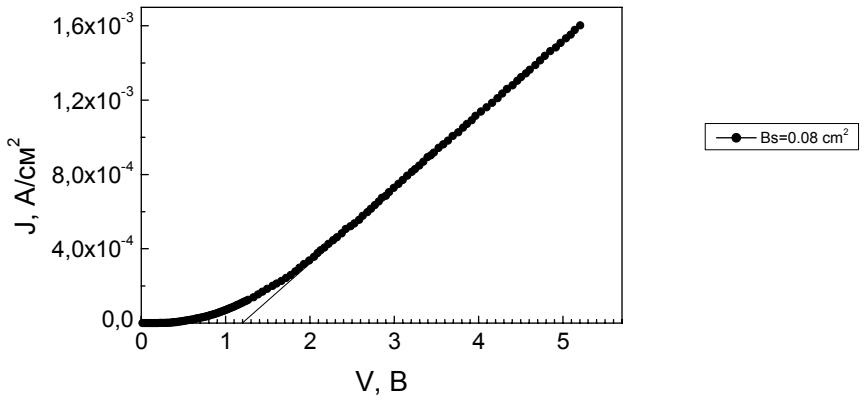

Рис. 1. Пряма вітка вольт-амперної характеристики структури p-InSe-p-GaSe в області великих струмів при T = 289 K.

електрони із селеніду індію при прямому зміщенні переходять в селенід галію. У принципі це можливо, оскільки робота виходу p-GaSe значно перевищує аналогічну величину для p-InSe [9,10]. У цьому випадку у InSe повинен був би утворитися шар, збагачений основними носіями заряду (дірками), з омічними електричними характеристиками, що виключає реалізацію випрямляння в ГП p-InSe-p-GaSe. Таким чином випрямляючий характер вольт-амперної характеристики (ВАХ) структури не може бути пояснений із тих міркувань, що в p-InSe існують лише акцепторні домішки. Нелеговані кристали моноселеніду індію є завжди n типу з концентрацією електронів $\sim 10^{14}$ см$^{-3}$. Причому даний тип провідності обумовлюється наявністю мілкого власного донора з енергією іонізації ~ 18 меВ, природа якого пов'язана, як із вакансіями селена, так і з міжвузловими атомами індію [11]. Домішки другої групи (Zn, Cd і As) утворюють акцепторні рівні в InSe з енергією іонізації ~ 0,25 еВ [11]. Згідно [9], в InSe реалізується механізм самокомпенсації (одночасне впровадження легуючої домішки в шари та випадання її у міжшаровий прошарок), який призводить до появи глибокого донорного рівня (приблизно по середині забороненої зони). Наслідком існування механізму самокомпенсації домішок є стабільне положення рівня Фермі в цьому напівпровіднику, яке не залежить від концентрації носіїв заряду, визначеної із холівських вимірювань. Причому концентрація носіїв заряду N_t на глибокому донорному рівні може значно перевищувати концентрацію акцепторів. І дійсно, N_t, знайдена із нахилу вольт-фарадних характеристик (ВФХ) ГП p-InSe-p-GaSe, які описуються класичним для різких бар'єрів виразом

$$C^{-2}(V) = (V-\varphi_0)/e\varepsilon\varepsilon_0 N_t, \qquad (2)$$

становить $\sim 2\cdot10^{15}$ см$^{-3}$, що більш ніж на порядок перевищує аналогічну величину в глибині напівпровідника, знайдену із холівських вимірювань ($6 \div 8\cdot10^{13}$ см$^{-3}$). Це свідчить, що поле в ОПЗ призводить до іонізації глибокого донорного рівня і, як наслідок, до утворення бар'єру в ізотопному ГП InSe-GaSe. Величина контактної різниці потенціалів φ_0, визначена із ВФХ за методикою [12], становить 0,4 В, що в три рази менше величини бар'єру V_0, визначеної із ВАХ. Така ситуація є типовою, для структур, що містять на границі розділу тонкий діелектричний прошарок [13], оскільки для таких структур висота бар'єру і дифузійний потенціал є різними поняттями. Слід зазначити, що попри розповсюджену думку, що склалася в літературі, стосовно інертності поверхні шаруватих напівпровідників до сорбції сторонніх атомів із атмосфери [1-5,8], жоден із оптичних контактів на основі InSe і GaSe (як із шаруватими напівпровідниками, наприклад [1,14], так і з традиційними для промисловості Si, Ge та ін., наприклад [15]) не може бути описаний в рамках моделі Андерсена для ідеальних ГП. В той же час, останні дослідження оптичних контактів свідчать про те, що нехтувати впливом проміжного прошарку є, по меншій мірі, недоцільним [16], так як в ряді конкретних випадків електричні властивості оптичних контактів визначаються саме його властивостями [17]. Наявність проміжного діелектричного прошарку, роль якого може відігравати шар адсорбованих поверхнями атомів кисню [16], або прості та складні власні оксиди контактуючих напівпровідників [17] підтверджується і дослідженням ВФХ ГП p-InSe-p-GaSe в тому випадку, коли концентрації основних носіїв заряду в моноселенідах індію та галію є однаковими (результати досліджень готуються до друку), а також дає змогу пояснити значне перевищення фото-ерс насичення V_{oc} ($V_{oc} \approx 07 \div 0{,}8$ В) над величиною контактної різниці потенціалів [18,19].

На рис. 2 (криві 1÷4) представлено прямі вітки ВАХ ГП p-InSe-p-GaSe, виміряні в діапазоні температур T = 230 ÷ 304 K. Із врахуванням наявності тонкого діелектричного прошарку на границі розділу слідує, що при невеликих прямих зміщеннях ($V < \varphi_0/e$), тобто, коли опір діелектрика є значно меншим опору ОПЗ, електричні властивості структури визначаються властивостями останньої (перша ділянка на кривих 1÷4, рис. 2). Аналіз цих експериментальних даних приводить до висновку, що механізм струмопереносу в досліджуваному температурному інтервалі не є однаковим. Значення діодного коефіцієнту $n_1 > 2$

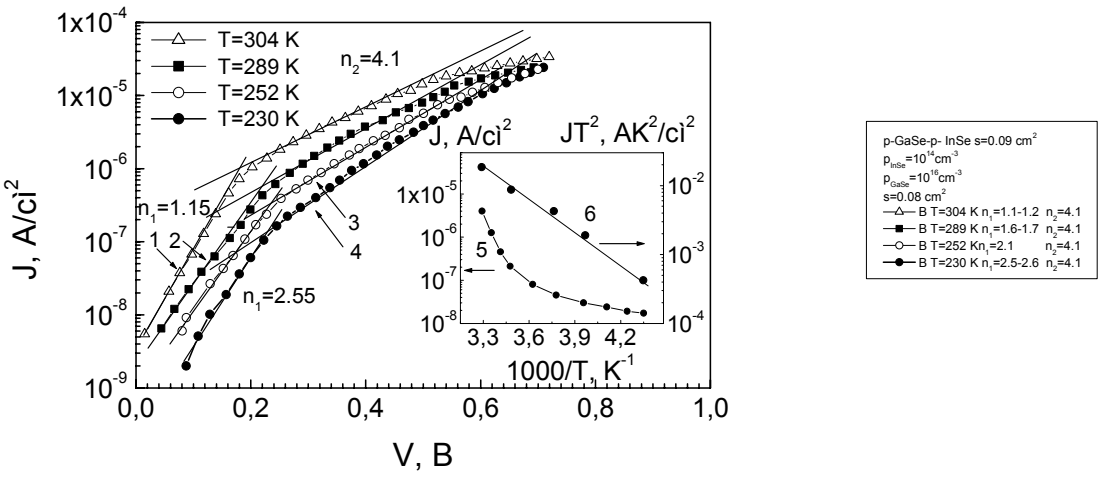

Рис. 2. Прямі вітки вольт-амперної характеристики структури p-InSe–p-GaSe (криві 1-4), виміряні при різних температурах, а також температурні залежності густини прямого струму на першій ділянці при фіксованій напрузі V = 1,5 В (крива 5) і густини струму насичення на другій ділянці.

(рис. 2, криві 3, 4), де до того ж спостерігається слабка зміна струму з температурою (рис. 2, крива 5), свідчать про домінуючий внесок тунелювання. Оскільки жоден із контактуючих напівпровідників не є виродженим, то пряме міжзонне тунелювання неможливе. В той же час можливе непряме тунелювання, а саме, коли електрони тунелюють із зони провідності InSe через ОПЗ і діелектричний прошарок на локальний рівень E_1, а вже звідти переходять в валентну зону GaSe. В цьому випадку

$$J_{tun} \approx \alpha \cdot N_1 T_t, \qquad (3)$$

де α – постійна, N_1 – густина локальних центрів на рівні E_1, а ймовірність тунелювання

$$T_t = \exp[(-8\pi 2^{1/2} m^{*1/2} E^{*1/2})/3ehE). \qquad (4)$$

В (4) E^* – енергія тунелювання і E – електричне поле. Підстановка (4) в (3) із відомим значенням електричного поля в різкому переході і E^* в функції висоти бар'єру призводить до виразу для тунельного струму:

$$J_{tun} \cong \alpha \cdot N_1 \exp[-\alpha(E_g - eV)], \qquad (5)$$

який і визначає поведінку прямого струму при низьких T. При температурах близьких до кімнатної n_1 набуває значення ~ 2 (рис. 2, крива 2), що характерно для протікання генераційно-рекомбінаційних процесів в ОПЗ:

$$J_{g\text{-}r} \approx \exp[e(2E_t - E_g + V)/2kT], \qquad (6)$$

де E_t – глибина рекомбінаційного рівня. При подальшому підвищенні температури значення n_1 наближається до 1 (рис. 2, крива 1), що свідчить про домінування надбар'єрного струму, який в рамках узагальненої термоелектронно-дифузійної теорії Кроуела і Зі [13], описується виразом:

$$J_b = A^{**} T^2 \exp(-e\varphi_0/kT)[\exp(eV/kT) - 1] \qquad (7)$$

і зростає з температурою значно скоріше (~ T^2), ніж тунельні і рекомбінаційні струми. В (3) A^{**} – ефективна постійна Річардсона. Таким чином загальний струм при прямих зміщеннях $V < \varphi_0/e$ можна представити у вигляді суми:

$$J = J_b + J_{g\text{-}r} + J_{tun}. \qquad (8)$$

Збільшення прямого зміщення призводить до зменшення ширини ОПЗ і, як наслідок, до зменшення її опору. В цьому випадку електричні властивості досліджуваного ГП будуть визначатися в основному опором діелектричного прошарку. При $V \geq \varphi_0/e$ значення діодного коефіцієнту зростає до $n_2 = 4{,}1$ (рис. 2, криві 1-4), однак залишається постійним у всьому інтервалі досліджуваних температур. Такий характер залежності струму від напруги виключає тунелювання, струми, обмежені просторовим зарядом, та іонну провідність із можливих механізмів струмопереносу через ізолюючий прошарок. А лінійність ВАХ на ділянці V = 0,2÷0,9 В в координатах $V = f(V^{1/2})$ (рис. 3, криві 1-4) а також добутку JT^2 як функції від оберненої температури (рис. 1, крива 6) свідчить, що основним механізмом переносу в даній області прямих зміщень є емісія Шоткі [13], яка описується виразом:

$$J = A^* T^2 \exp[-e(\varphi_B - (eV/4\pi d\varepsilon_0\varepsilon_i)^{1/2})/kT], \qquad (9)$$

де A^* – постійна Річардсона, φ_B – висота бар'єру, d – товщина діелектрика, ε_i – його діелектрична проникливість, ε_0 – діелектрична проникливість вакууму. Однак нахил ВАХ на ділянці прямих зміщень V = 0,2÷0,9 В є спотвореним із-за впливу послідовного опору структури. Тому для оцінки φ_B і d вимірювалася фотоелектрична модифікація прямої вітки (залежність напруги холостого ходу від струму короткого замикання), яка представлена на рис. 3 (крива 5). Знайдена із нахилу ділянки з n = 2 ВАХ, перебудованої в координатах $\lg I = f(V^{1/2})$, за формулою [20]:

$$\mathrm{tg}\beta = 0{,}43(e^3/4\pi\varepsilon_0\varepsilon_i d)^{1/2}/kT, \qquad (10)$$

в припущенні, що діелектричним прошарком є шар, адсорбованих поверхнями контактуючих напівпровідників, атомів кисню [16], товщина d становить $4 \div 6 \cdot 10^{-10}$ м, що добре узгоджується із результатами роботи [17]. А знайдена із (9) величина φ_B знаходиться в межах 1,12 ÷ 1,16 еВ при кімнатній температурі для різних зразків, що добре

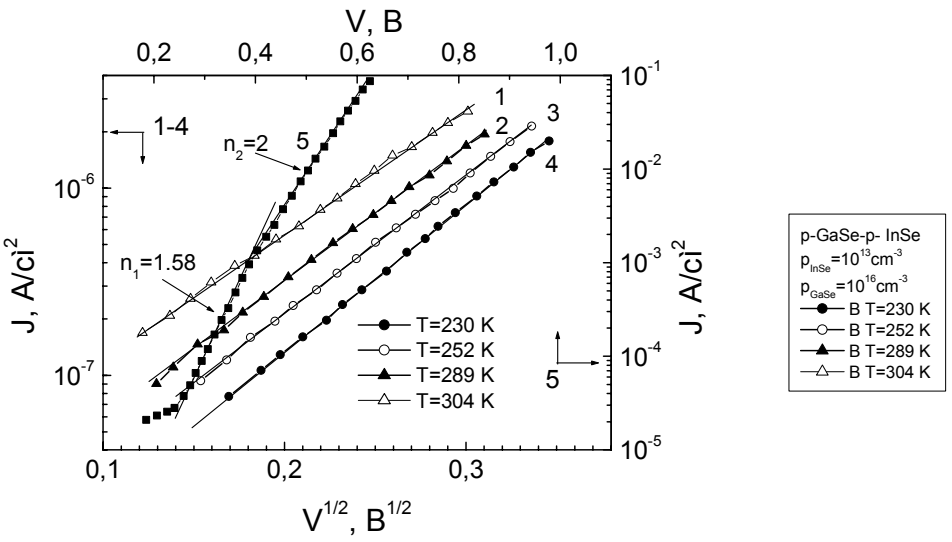

Рис. 3. Прямі вітки вольт-амперної характеристики структури p-InSe–p-GaSe (криві 1-4), виміряні при різних темпера температурах в діапазоні напруг V = 0,2÷0,65 В в координатах J = f($V^{1/2}$), а також фотоелектрична модифікація прямої вітки структури при T = 290 К.

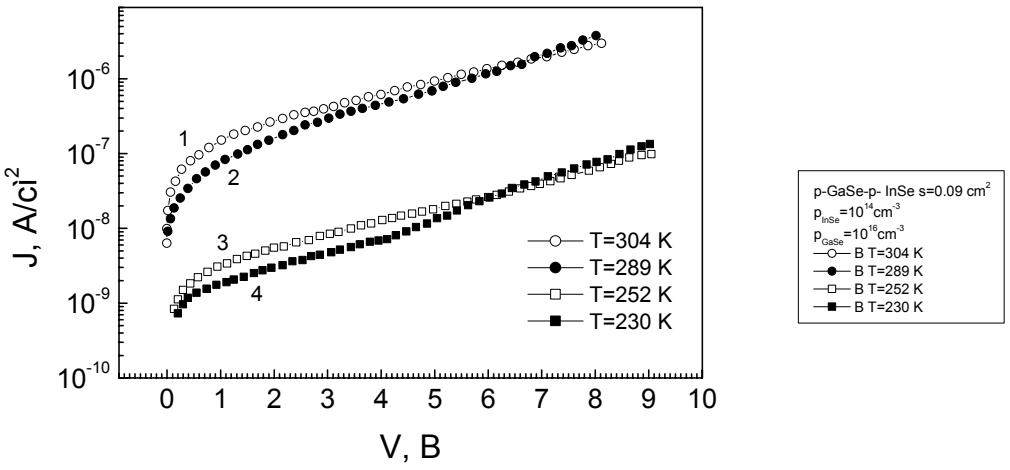

Рис. 4. Обернені вітки вольт-амперної характеристики структури p-InSe–p-GaSe, виміряні при різних температурах.

співпадає із значенням V_0, знайденим із ВАХ (рис. 1).

Обернені вітки ВАХ (рис. 4, криві 1-4) при $V \le 0{,}4$ В є близькими до лінійних, що скоріше за все пов'язано або ж із струмами втрат, або ж з шунтуючою дією неконтрольованих включень в площину ГП таких як, наприклад, мікроскопічні пилинки, які потрапили в структуру при її виготовленні. В діапазоні обернених зміщень $0{,}4 < V < 4 \div 5$ В описується виразом

$$J \sim (\varphi_0 - eV)^{1/2}, \qquad (11)$$

характерним для рекомбінації в ОПЗ [21]. Оскільки генераційно-рекомбінаційні струми є чутливими до E_t, наявність двох груп кривих при різних температурах вимірювання (рис. 4) свідчить про те, що генераційно-рекомбінаційні процеси при різних температурах протікають за участю рівнів з різною глибиною залягання. Причому оцінка різниці в положенні глибини залягання цих двох рівнів є досить суттєвою, і по попереднім оцінкам (без врахування температурної залежності ширини забороненої зони базового напівпровідника) становить ~ 0,4 еВ, що добре узгоджується із енергетичною моделлю p-InSe, запропонованою в [11]. При подальшому збільшенні оберненої напруги сублінійна залежність J = f(V) змінюється надлінійною і свідчить про те, що домінуючу роль у проходженні струму через ОПЗ починає відігравати тунелювання. Причому при зменшенні T (для кожної групи кривих) домінування тунелювання наступає при менших напругах. Цей факт добре узгоджується із теорією і спостерігається для цілого ряду структур, наприклад, для діодів Шоткі на основі CdTe [22].

Ще однією особливістю обернених віток ВАХ ізотопних ГП p-InSe-p-GaSe є поява ділянок з від'ємною диференційною провідністю в області $8{,}5 < V < 12$ В при кімнатній і вищих T. Аналіз причин такої поведінки ВАХ становить собою

предмет окремого дослідження. Відмітимо тільки деякі із можливих причин появи такого типу ділянок. 1. Надлінійне зростання струму, як функції від оберненої напруги, в порівнянні із сублінійною ділянкою може бути пов'язане також із надбар'єрними струмами. В цьому випадку, згідно моделі, запропонованої в [23], захоплення носіїв заряду глибокими пастками в діелектричному шарі може спричинити збільшення висоти бар'єру і зменшення оберненого струму. 2. Причиною виникнення ділянок з від'ємною диференційною провідністю може бути і різниця в швидкості генераційно-рекомбінаційних процесів в тій частині ОПЗ де напруженості поля достатньо для іонізації глибоких донорних рівнів (в пограничному шарі p-InSe, який веде себе, як напівпровідник n-типу провідності) і на деякій віддалі X від границі розділу і в об'ємі базового напівпровідника, де p-InSe залишається матеріалом p-типу провідності.

III. Висновки

Таким чином електричні властивості ізотопних ГП p-InSe-p-GaSe, які, по суті справи, становлять собою "віртуальний" транзистор з некерованою базою, володіють цілим рядом особливостей в порівнянні з анізотипними, що зумовлено складною енергетичною будовою базового моноселеніду індію.

В завершення відмітимо, що отримані дані по особливостям електричних властивостей структур слід враховувати при реалізації можливих прикладних використань, в тому числі і в якості радіаційно стійких фотодетекторів для видимої та ближньої ІЧ ділянки спектрального діапазонну.

[1] В.Л. Бакуменко, В.Ф. Чишко. Способ изготовления p-n- и гетеропереходов // А.с. 631014 СССР, МКИЗ Н 0I. – Опубликовано 15.05.82, Бюл. N 18.

[2] В.Л. Бакуменко, З.Д. Ковалюк, Л.Н. Курбатов, В.Г. Тагаев, В.Ф. Чишко. Исследование гетеропереходов InSe-GaSe, приготовленных посадкой на оптический контакт. I. Электрические характеристики неосвещенных переходов // *ФТП*, **14**(6), сс. 1115-1119 (1980).

[3] Т.В. Аверьянова, В.Л. Бакуменко, Л.Н. Курбатов, В.Г. Тагаев, В.Ф. Чишко. Исследование гетеропереходов InSe-GaSe, приготовленных посадкой на оптический контакт. II. Характеристики переходов с овещенным слоем // *ФТП*, **14**(8), сс. 1573-1577 (1980).

[4] В.Л. Бакуменко, В.Г. Тагаев. Инжекция основных носителей через гетеропереход InSe-GaSe // *ФТП*, **16**(10), сс. 1825-1827 (1982).

[5] В.Н. Катеринчук, З.Д. Ковалюк, В.А. Манассон, К.Д. Товстюк. О механизме протекания тока в гетеропереходе GaSe-InSe // *ФТП*, **21**(2), сс. 380-381 (1987).

[6] Г.Б. Абдуллаєва. Влияние гамма-нейтронного и электронного облучения на фоточувствительные структуры из GaSe // *ФТП*, **15**(4), сс. 799-801 (1981).

[7] V.P. Savchyn, J.M. Stakhira, Ya.M. Fiyala, V.B. Furtak. Photoelectric properties of nGa_2O_3-pGaSe-p-InSe cascade heterostructures // *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*, **5**(2), pp. 176-179 (2002).

[8] Landolt-Bornstein. *Numerical data and functional relatioships in science and technology new ser. group III: Crystal and solid state physics.* **17**, sv. F / Ed. by Madelung O. Berlin: Springer, (1983).

[9] J. Martinez-Pastor, A. Segura, J.L. Valdes, A. Chevy. Electrical and photovoltaic properties of indium-tin-oxide/p-InSe/Au // *J. Appl. Phys*, **62**(4), pp. 1477-1483 (1987).

[10] R.R. Daniels, G. Margaritondo, C. Quaresima, P. Perfetti, F. Levy. Summary Abstract: GaSe-Ge and GaSe-Si: Two possible examples of Scottky-like behavior of heterojunctuon interfaces // *J. Vac. Sci. Technol*, **A3**(3), pp. 979-980 (1985).

[11] A. Segura, M.C. Martines-Tomas, B. Mari, A. Casanovas, A. Chevy. Acceptor levels in indium selenide. An investigation by means of the Hall effect, deep-level-transient spectroscopy and photoluminhescence // *J. Appl. Phys*, **A 44**(3), pp. 249-260 (1987).

[12] 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**(8), сс. 1472-1475 (1984).

[13] С. Зи. *Физика полупроводниковых приборов*. В 2-х Т. Т. 2. Мир, М. 456 с. (1982).

[14] В.Н. Катеринчук, З.Д. Ковалюк, В.В. Нетяга, Т.В. Беца. Гетеропереходы n-SnSSe-p-InSe // *Письма в ЖТФ*, **26**(17), сс. 6-10 (2000).

[15] О. Ярчук. Гетеропереходи InSe-ZnSe // *Вісник львівського у-ту. Сер. Фізична,* В друці.

[16] С.И. Драпак, В.Б. Орлецкий, З.Д. Ковалюк. Изменение контактной разности потенциалов фотодиода на основе гетероперехода n-InSe-p-GaSe в процессе "старения" // *ФТП*, **38**(5), сс. 566-569 (2004).

[17] С.И. Драпак, В.А. Манассон, В.В. Нетяга, З.Д. Ковалюк. Электрические свойства изотипной гетероструктуры p^+-Bi_2Te_3-p-GaSe // *ФТП*, **37**(2), сс. 180-186 (2003).

[18] S.I. Drapak, V.N. Katerinchuk, Z.D. Kovalyuk, V.A. Manasson. The Injection Peculiarities of Minority Charge Carriers in the Anisotype SIS Structure // *Phys. Stat. Sol.*, **A 115**, pp. K35-K37 (1989).

[19] А.Я. Вуль, А.В. Савченко. Фотоэлектрические свойства структур металл-диэлектрик-полупроводник с туннельно-прозрачным слоем диэлектрика // *ФТП*, **17**(8), сс. 1361-1376 (1983).
[20] П.Т. Орешкин. *Физика полупроводников и диэлектриков*. Высшая школа, М., 448 с. (1977).
[21] В.И. Стриха. *Контактные явления в полупроводниках*. Высшая школа, К., 223 с. (1982).
[22] Л.А. Косяченко, С.Ю. Паранчич, Ю.В. Танасюк, В.М. Склярчук, Е.Ф. Склярчук, Е.Л. Маслянчук, В.В. Мотущук. Генерационно-рекомбинационные центры в CdTe:V // *ФТП*, **37**(4), сс. 469-472 (2003).
[23] С.И. Драпак, В.А. Манассон, В.В. Нетяга, З.Д. Ковалюк. Возникновение отрицательной дифференциальной проводимости в изотипной гетероструктуре p^+-Bi_2Te_3-p-GaSe // *Письма в ЖТФ*, **28**(15), сс. 86-94 (2002).

S.I. Drapak, Z.D. Kovalyuk

The Electrical Properties Peculiarities of the Isotype p-GaSe-p-InSe Heterojunction

Frantsevich Institute of Material Sciences Problems,
National Academy of Sciences of the Ukraine, Chernivtsi Department,
5, I. Vilde Str., Chernivtsi, 58001, Ukraine
tel: 8(+03722) 2-00-50, E-mail: chimsp@unicom.cv.ua

The first studies of isotype heterojunction p-GaSe-p-InSe are presented. Analysis of experimental results have made possible to determine the main transport mechanisms governed rectifying properties of the structure; to explain how can be the open cirquit voltage higher than barrier height and other peculiarities of the heterostructure.