

С.І. Круковський<sup>2</sup>, А.В. Сукач<sup>1</sup>,  
В.В. Тетьоркін<sup>1</sup>, І.О. Мрихін<sup>2</sup>, Ю.С. Михашук<sup>2</sup>

## ФОТОЕЛЕКТРИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ПОДВІЙНИХ ГЕТЕРОПЕРЕХОДІВ $p^+ \text{-InP}/n \text{-InGaAsP}/n \text{-InP}$

Розглянуто вплив технологічних режимів вирощування подвійних гетеропереходів  $p^+ \text{-InP}/n \text{-InGaAsP}/n \text{-InP}$  методом РФЕ на їх фотоелектричні властивості. Показано, що вирощування додаткового буферного шару  $n \text{-InP}$  на шарі  $n \text{-InGaAsP}$ , а також зменшення часу вирощування емітерного  $p^+ \text{-InP}$  шару, легуваного цинком, призводить до збігу металургійної та електричної гетеромережі, що обумовлює реалізацію ефекту «широкозонного вікна» на спектрах фоточутливості гетеропереходів. Проаналізовано еволюцію спектрів електролюмінесценції гетеропереходів залежно від технологічних режимів їх вирощування і показано можливість їх використання для створення ефективних ІЧ-світлодіодів з  $\lambda_{\text{max}} = 1,06$  мкм.

**Ключові слова:** InP, рідкофазна епітаксія, подвійний гетероперехід, спектральна фоточутливість, ІЧ-світлодіод.

### ВСТУП

Подвійні гетеропереходи (ПГП)  $p^+ \text{-InP}/n \text{-InGaAsP}/n \text{-InP}$  широко застосовуються в інфрачервоній (ІЧ) оптоелектроніці для виготовлення на їх основі інжекційних лазерів, світло- та фотодіодів для спектрального діапазону 1,0—1,7 мкм [1—4]. Найбільш вартими уваги для прикладних розробок є довжини хвиль 1,06; 1,3 та 1,6 мкм, на яких оптичні втрати сигналу у кварцовому волокні найменші, що дає змогу побудувати триканальну лінію зв'язку на основі одного волоконно-оптичного кабелю [4]. Однією з переваг гетеропереходів (ГП) InP/InGaAsP є можливість зміни ширини забороненої зони твердого розчину  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$  від 0,73 до 1,35 еВ при досить доброму узгодженні параметрів кристалічних ґраток контактуючих матеріалів ( $\Delta a/a \leq 0,1$  %) [5]. Цікавість до ПГП  $p^+ \text{-InP}/n \text{-InGaAsP}/n \text{-InP}$  є також у розробників елементної бази ІЧ-оптоелектроніки, а саме сенсорів фізичних величин на основі волоконно-оптичних датчиків [4].

Незважаючи на суттєвий прогрес у технології вирощування ПГП  $p^+ \text{-InP}/n \text{-InGaAsP}/n \text{-InP}$  і у розробці приладів на їх базі, актуальними проблемами залишаються відтворюваність складу і електрофізичних параметрів активної InGaAsP області, зменшення впливу фонових домішок на концентрацію основних носіїв заряду в ній, з'ясування механізмів деградації та природи надлишкових струмів [6—10].

Важливою технологічною проблемою при вирощуванні структур InP/InGaAsP є взаємне легування гетеромережі, особливо сполуки  $n \text{-InGaAsP}$  цинком при вирощуванні верхнього  $p^+ \text{-InP}$  емітерного шару методом рідинно-фазної епітаксії (РФЕ). Ефект взаємного легування спричиняє формування  $p$ — $n$ -переходу в активній InGaAsP-області, обумовлює додаткові оптичні втрати ІЧ-випромінювання в  $p$ -шарі, зсув максимуму спектра електролюмінесценції у більш довгохвильову область з  $\lambda_{\text{max}} = 1,08$  мкм, замість очікуваного  $\lambda_{\text{max}} = 1,06$  мкм, яка відповідала б ширині забороненої зони сполуки InGaAsP  $E_g = 1,17$  еВ за  $T = 300$  К. Крім того, ефект легування гетеромережі InP/InGaAsP цинком зумовив формування на межі  $p$ — $n$ -переходу в InGaAsP компенсованої області, внаслідок чого зросло значення послідовного опору ПГП майже на порядок

порівняно з очікуваним розрахунковим [11]. У зв'язку з зазначеним, мета дослідження — вдосконалення технологічних режимів вирощування ПГП  $p^+ \text{-InP}/n\text{-InGaAsP}/n\text{-InP}$  методом РФЕ, призначених для виготовлення на їх основі ІЧ-світлодіодів з  $\lambda_{\text{max}} = 1,06$  мкм, у яких металургійна гетерогема збігалася б з електричною, і для встановлення їх основних фотоелектричних параметрів і характеристик.

### ЗРАЗКИ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ МЕТОДИКИ

Епітаксійні шари InP та InGaAsP складу, що відповідає  $E_g = 1,17$  еВ ( $T = 300$  К), вирощували методом РФЕ у графітовій слайдерній касеті з розплаву індію чистотою 99,9999 на підкладках  $n^+ \text{-InP}$  з концентрацією електронів  $n^+ = 2 \cdot 10^{18}$  см<sup>-3</sup> і кристалографічною орієнтацією робочої поверхні (100). Кінцева товщина підкладки після відповідних передепітаксійних обробок становила 350—380 мкм. Температура початку епітаксії для шарів InP дорівнювала 680, а для шарів InGaAsP — 650 °С. Кристалізація шарів здійснювалась із переохолодженого розчину-розплаву за швидкості охолодження 0,8 °С/хв. Необхідні для очищення шарів від фонових домішок елементи — алюміній та ітербій — додавались у шихту перед завантаженням у касету згідно з методикою, запропонованою у праці [7]. Для насичення розплавів щодо фосфору (Р) використовували порівняно чистий полікристалічний InP з концентрацією електронів  $(5\text{--}7) \cdot 10^{15}$  см<sup>-3</sup> ( $T = 300$  К). Гомогенізація розчину-розплаву відбувалась упродовж 1,5—2,0 год в атмосфері очищеного паладієвими фільтрами водню з точкою роси -70 °С. Безпосередньо перед початком нарощування шару  $n\text{-InP}$  поверхня підкладки підрозчинялась у недонасиченому розплаві індію. Товщина автоепітаксійних шарів становила 5—7 мкм, концентрація електронів  $5 \cdot 10^{17}$  см<sup>-3</sup>, їх рухливість  $\sim 1500$  см<sup>2</sup>/(В·с) за  $T = 300$  К. За буферним автоепітаксійним InP-шаром вирощувався шар сполуки  $n\text{-InGaAsP}$  ( $E_g = 1,17$  еВ) з концентрацією електронів  $(1\text{--}2) \cdot 10^{17}$  см<sup>-3</sup> і товщиною 3—4 мкм. На відміну від технологічних режимів (далі — TP1) виготовлення ПГП  $p^+ \text{-InP}/n\text{-InGaAsP}/n\text{-InP}$ , які використовувались раніше [11], з метою зменшення впливу легування цинком  $n\text{-InGaAsP}$  області з шару  $p^+ \text{-InP}:\text{Zn}$  додатково формувався буферний шар  $n\text{-InP}$  товщиною  $\sim 1,5$  мкм з концентрацією електронів  $\sim 2 \cdot 10^{17}$  см<sup>-3</sup>. Крім того, час вирощування емітерного  $p^+ \text{-InP}$  шару було зменшено з 25 хв до 10 хв, при цьому його товщина становила 1,5 мкм, а концентрація дірок  $(2\text{--}3) \cdot 10^{18}$  см<sup>-3</sup>. Змінені режими позначимо як TP2. Як омичний контакт до  $p^+ \text{-InP}$  використовувався сплав In-Zn з об'ємною часткою цинку 3 %, а для  $n\text{-InP}$  — чистий індій. Контактні площадки наносились термовакуумним методом з наступною термообробкою в атмосфері очищеного водню за температури  $\sim 400$  °С упродовж 3—5 хв. Технологічні режими виготовлення омичного контакту до InP відпрацьовувались попередньо на зразках  $n$ - та  $p$ -типу провідності. Для виготовлення мезаструктур використовувався травильник: соляна кислота + оцтова кислота + пероксид водню у співвідношенні 1:2:1. Середня активна площа досліджуваних зразків становила  $4,1 \cdot 10^{-3}$  см<sup>2</sup>, діаметр верхнього контакту дорівнював 0,2 мм, нижній контакт був суцільним. ІЧ випромінювання виводилось з активної області структур крізь шар  $p^+ \text{-InP}$ .

Темнові ВАХ вимірювались на постійному струмі за температури 295 К. Розподіл основних носіїв заряду на гетерогеми досліджувався із вимірювань вольт-фарадних характеристик (ВФХ) на частоті 1 МГц. Вимірювання спектрального розподілу ампер-ватної чутливості зразків здійснювалось у режимі струму короткого замикання, а ват-амперних харак-

теристик ІЧ-світлодіодів — на постійному струмі живлення, причому як приймач ІЧ-випромінювання використовувався калібрований германієвий фотодіод.

### ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Розподіл основних носіїв заряду на межі потенціального бар'єра ПГП з'ясовувався вимірюванням високочастотних ( $f = 1$  МГц) ВФХ за  $T = 295$  К (рис.1). Експериментальні результати лінеаризувались в координатах  $C^{-2}-U$  для зворотних напруг зміщення  $0 < U \leq 1,5$  В, причому ємнісна напруга відсічки становила  $U_C = 1,3-1,8$  В, що перевищує ширину забороненої зони сполуки InGaAsP ( $E_g = 1,17$  еВ) за  $T = 300$  К [12]. Великі значення  $U_C$  можуть зумовлюватись впливом як послідовного опору, так і глибоких центрів, локалізованих в області просторового заряду (ОПЗ) гетероструктури [12,13]. Послідовний опір у досліджених структурах зростає внаслідок формування коменсованого шару на межі ПГП, на що вказують результати вимірювань ВФХ гетеропереходів. По-перше, у разі прямих зміщень  $U \geq 1,0$  В спостерігається тенденція до виходу залежності  $C^{-2} = f(U)$  на насичення. Крім того, за нахилом лінійної ділянки ВФХ, побудованої в координатах  $C^{-2}-U$ , оцінено значення ефективної концентрації основних носіїв заряду в квазінейтральній області  $N_{\text{еф}} = (2-3) \cdot 10^{16}$  см<sup>-3</sup>, яке виявилось на порядок величини меншим від концентрації  $(2-3) \cdot 10^{17}$  см<sup>-3</sup> у шарі  $n$ -InGaAsP.

Типову ВАХ ПГП наведено на рис.2. Як бачимо, експериментальні результати прямої гілки задовільно лінеаризуються в координатах  $\lg I-U$  у діапазоні напруг  $0,25 \leq U \leq 1,0$  В, причому спостерігаються два нахили, які свідчать про можливу реалізацію різних механізмів проходження струму. За більш високих напруг прямого зміщення ВАХ визначається послідовним опором  $R_s$ , який у досліджених ПГП становив  $\sim 7$  Ом. Експериментальні ВАХ задовільно апроксимуються виразом

$$I = I_{01} \exp(eU / E_0) + I_{02} \left( \frac{e(U - IR_s)}{\beta k T} \right), \quad (1)$$

де  $I_{01} = 8 \cdot 10^{-10}$  А;  $I_{02} = 5 \cdot 10^{-12}$  А; характеристична енергія  $E_0 = 73$  меВ; коефіцієнт неідеальності  $\beta = 2,0$ . Перша складова у виразі (1) описує тунельний струм, а друга — генераційно-рекомбінаційний. Максимальні значення коефіцієнта випрямлення структур —  $(0,5-1,0) \cdot 10^6$  при  $U = 1,5$  В, а шунтувальний опір, який визначався за диференціальним опором на зворотній гілці ВАХ за напруги зміщення  $-2$ В, змінювався у межах  $(0,7-1,5) \cdot 10^7$  Ом.

На рис. 3 наведені результати вимірювання спектрального розподілу фоточутливості (ФЧ) ПГП, виготовлених за ТР1 (крива 1) та ТР2 (крива 2), а також InP  $p-n$ -переходу, виготовленого за ТР2 (крива 3). Досліджувані структури освітлювались із боку  $p^+$ -InP шару. Важливо зазначити, що в усіх структурах на шарі  $p^+$ -InP генерувався позитивний сигнал фотовідгуку. Цей факт, а також відсутність зміни полярності фотовідгуку у ПГП свідчать про формування сигналу виключно одним потенціальним бар'єром у всіх досліджених структурах. У ПГП, виготовлених за ТР2, цей бар'єр виникає на гетеромежі  $p^+$ -InP/ $n$ -InGaAsP, причому спектральна залежність фотовідгуку є характерною для гетеропереходів, у яких спостерігається ефект «широкозонного вікна» [14,15]. Водночас, у ПГП, виготовленого за ТР1, фотовідгук зумовлює  $p-n$ -перехід у шарі  $n$ -InGaAsP, що пояснює його більш селективний характер порівняно з ПГП, виготовлених за ТР2. Збіг довгохвильової межі спектрів ФЧ у

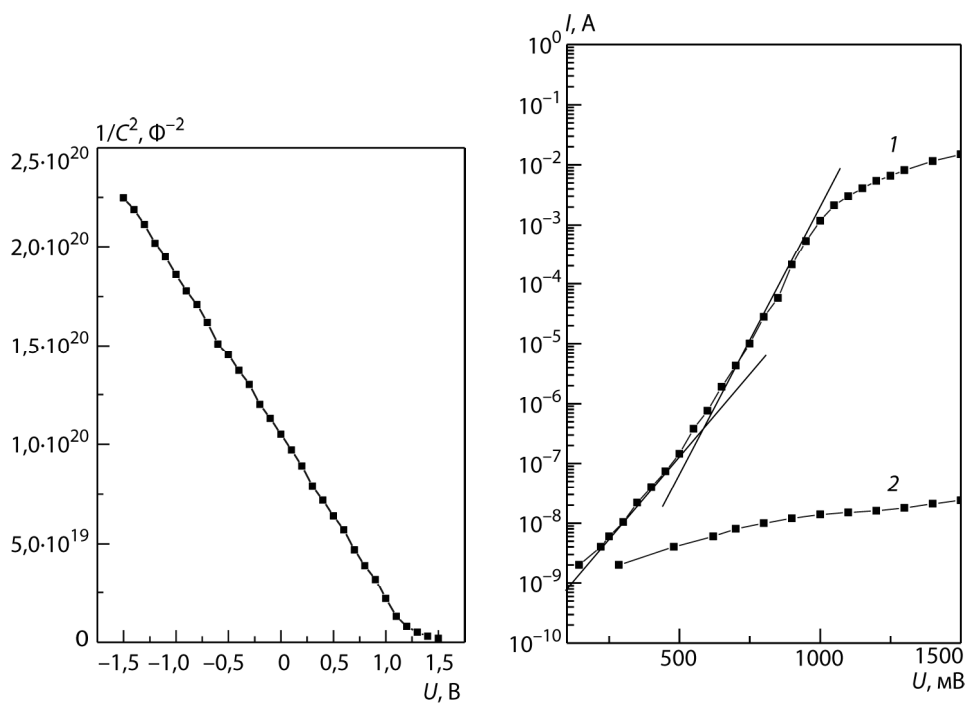


Рис. 1. Вольт-фарадна характеристика виготовленого за ТР2 ПГП  $p^+-InP/n-InGaAsP/n-InP$  за кімнатної температури

Рис. 2. Типова ВАХ виготовленого за ТР2 ПГП  $p^+-InP/n-InGaAsP/n-InP$  за кімнатної температури

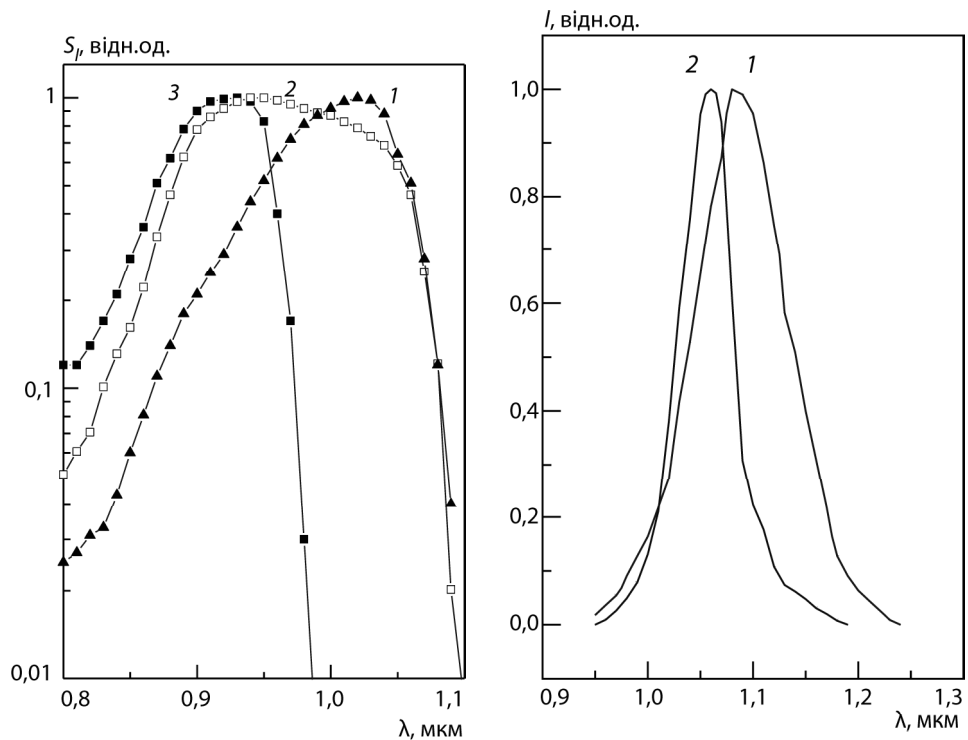


Рис. 3. Спектральний розподіл фоточутливості ПГП  $p^+-InP/n-InGaAsP/n-InP$ , виготовлених за ТР1 (1), ТР2 (2) та  $InP$   $p-n$ -переходу (3)

Рис. 4. Спектри електролюмінесценції ПГП  $p^+-InP/n-InGaAsP/n-InP$ , виготовлених за ТР1 (1) та ТР2 (2) за кімнатної температури

обох ППП свідчить про локалізацію активної області в шарі InGaAsP. Короткохвильова межа у ППП, виготовленого за ТР2, визначається оптичною генерацією носіїв у  $p$ -шарі InP, який утворився внаслідок дифузії цинку із  $p^+$ -шару в буферний шар  $n$ -типу з формуванням структури  $p^+ - p - \text{InP}$ . Цей висновок базується на наступних фактах. По-перше, як показали дослідження, сильно легований шар  $p^+ - \text{InP}$  не є фоточутливим. За відсутності менш легovanого  $p$ -шару, короткохвильова межа ФЧ була зсунута в область більших довжин хвиль ( $\lambda \cong 0,92$  мкм). По-друге, відносно широкий спектр ФЧ у InP  $p - n$ -переходах можна пояснити лише формуванням на межі переходу компенсованої області. Її наявність була підтверджена вимірюванням ВФХ. Ефективна концентрація носіїв у цій області становила  $\sim 1 \cdot 10^{16}$  см $^{-3}$ .

Спектри електролюмінесценції (ЕЛ) ППП, виготовлених по ТР1 та ТР2, наведено на рис. 4. Густина постійного струму живлення дорівнювала 14,1 А/см $^2$ , а потужність випромінювання — 0,37 та 0,85 мВт для структур, виготовлених відповідно за ТР1 та ТР2. Спектр ЕЛ для ППП, виготовленого за ТР2, зсунутий у короткохвильову область ( $\lambda_{\text{max}} = 1,06$  мкм) і характеризується меншою півшириною  $\sim 60$  меВ, має більш симетричний характер порівняно зі спектром ППП, виготовленим за ТР1. Ці результати пояснюються участю в ЕЛ «хвостів» густини станів у компенсованій області. У ППП, виготовлених за ТР1, ступінь компенсації вища, наслідком чого є більша півширина спектра  $\sim 80$  меВ. Зсув максимуму спектра ЕЛ у довгохвильову область зумовлений формуванням  $p - n$ -переходу в шарі InGaAsP і оптичними втратами в цьому шарі.

## ВИСНОВКИ

1. Удосконалено технологічні режими вирощування ППП  $p^+ - \text{InP} / n - \text{InGaAsP} / n - \text{InP}$ , у яких гетерогема збігається з електричною, що досягається вирощуванням додаткового буферного шару  $n - \text{InP}$  та зменшенням часу вирощування емітерного  $p^+ - \text{InP}$  шару сильно легovanого цинком.

2. Спектральна фоточутливість ППП, виготовлених за вдосконаленою технологією, характеризується наявністю ефекту «широкозонного вікна».

3. Спектри електролюмінесценції таких структур мають меншу півширину порівняно зі структурами, в яких формується  $p - n$ -перехід у InGaAsP шарі, і більш високу потужність ІЧ-випромінювання. Виготовлені ППП можуть використовуватись для створення ефективних ІЧ-світлодіодів з  $\lambda_{\text{max}} = 1,06$  мкм.

**S.I. Krukovskiy, A.V. Sukach,  
V.V. Tetyorkin, I.O. Mryhin, Yu.S. Myhaschuk**

### **PHOTOELECTRICAL PROPERTIES OF $p^+ - \text{InP} / n - \text{InGaAsP} / n - \text{InP}$ DOUBLE HETEROJUNCTIONS**

The effect of technological regimes of growing of double heterojunctions  $p^+ - \text{InP} / n - \text{InGaAsP} / n - \text{InP}$  by LPE on their photovoltaic properties is investigated. It is shown that growing of additional buffer layer of  $n - \text{InP}$  on  $n - \text{InGaAsP}$  and reducing the growth time of emitter  $p^+ - \text{InP}$  layer doped with zinc leads to match metallurgical and electrical heterojunctions, which makes the implementation of «wide-window» effect in the photosensitivity spectra of heterojunctions. The evolution of electroluminescence spectra of heterojunctions is analyzed, depending on the technological regime of growth and possibility of using them to create efficient IR LED with  $\lambda_{\text{max}} = 1,06$  microns is shown.

**Keywords:** InP, liquid phase epitaxy, double heterojunction, spectra photosensitivity, IR LED.

1. Шуберт Ф.Е. Светодиоды. — М.: Физматлит, 2008.— 496 с.
2. Мощные одномодовые лазерные диоды на основе квантово-размерных InGaAsP/InP-гетероструктур ( $\lambda = 1,3-1,6$  мкм) / А.Ю. Лешко, А.В. Лютецкий, Н.А. Пихтин и др. // ФТП. — 2002. — **36**, № 11. — С. 1393—1399.
3. Мощные диодные лазеры ( $\lambda = 1,7-1,8$  мкм) на основе асимметричных квантово-размерных InGaAsP/InP-гетероструктур отдельного ограничения / А.В. Лютецкий, Н.А. Пихтин, Н.В. Фетисова и др. // Там же. — 2009. — **43**, № 12. — С. 1646—1649.
4. Окоси Т., Окамото К., Оцу М. Волоконно-оптические датчики. — Л.: Наука, 1990. — 256 с.
5. Ангина Н.Р., Арбенина В.В., Малинина Т.М. Четырехкомпонентные твердые растворы в системе In—Ga—As—P — новый материал электронной техники // Зарубежная электронная техника. — 1983. — № 8 (266). — С. 3—82.
6. Получение гетероструктур InP/InGaAsP/InP методом жидкофазной эпитаксии и отдельное приготовление растворов—расплавов / Н.Г. Васильев, А.М. Васильев, Д.М. Вилис и др. // Изв. РАН. Неорган. матер. — 2007. — **43**, № 7. — С. 775—780.
7. Круковский С.И. Комплексно-легированные эпитаксиальные структуры InP/InGaAsP для оптоэлектроники // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2006. — № 2. — С. 27—31.
8. Characterization of InP and GaInAsP layers prepared by liquid — phase epitaxy using holmium doping and gettering / O. Prochazkova, J. Oswald, J. Zavadil et al. // Material Science and Engineering. B. — 1997. — **44**, N 2. — P. 160—163.
9. Гореленок А.Т., Каманин А.В., Шмидт Н.М. Редкоземельные элементы в технологии  $A^3V^5$  и приборов на их основе // ФТП. — 2003. — **37**, № 8. — С. 922—940.
10. Карачевцева М.В., Страхов В.А., Яременко Н.Г. Туннельно-рекомбинационные токи в неидеальных гетероструктурах InGaAsP/InP // Там же. — 1994. — **28**, № 6. — С. 1027—1031.
11. Властивості подвійних гетеропереходів  $p^+-InP/n-InGaAsP/n-InP$ , отриманих за різних технологічних режимів / С.І. Круковський, А.В. Сукач, В.В. Тетьоркін та ін. // ОПТ. — Киев: Наук. думка, 2011. — Вып. 46. — С. 71—77.
12. Берман Л.С. Емкостные методы исследования полупроводников. — Л.: Наука, 1972. — 104 с.
13. Константинов О.В., Мезрин О.А. Влияние последовательного сопротивления диода Шоттки на его эффективную емкость // ФТП. — 1983. — **17**, № 2. — С. 305—311.
14. Милнс А., Фойхт Д. Гетеропереходы и переходы металл—полупроводник. — М.: Мир, 1975. — 432 с.
15. Шарма Б.Л., Пурухит Р.К. Полупроводниковые гетеропереходы. — М.: Сов. радио, 1979. — 232 с.

<sup>1</sup> Інститут фізики напівпровідників  
ім. В.Є. Лашкарьова  
НАН України

Отримано 15.04.2012

Проспект Науки, 41  
03028 Київ

<sup>2</sup> НВП «Карат»  
Вул. Стрийська, 202  
79031 Львів