

Р. М. Вернидуб¹, О. І. Кириленко¹, О. В. Конорева^{2,*}, П. Г. Литовченко²,
Д. П. Стратілат², В. П. Тартачник², М. М. Філоненко¹

¹ Національний педагогічний університет імені М. П. Драгоманова, Київ, Україна

² Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

*Відповідальний автор: konoreva@nas.gov.ua

ВПЛИВ ОПРОМІНЕННЯ НА ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ ПАРАМЕТРИ СВІТЛОДІОДІВ GaAsP

Розглянуто особливості вольт-амперних характеристик світлодіодів, одержаних на основі твердих розчинів GaP-GaAsP. Наведено результати досліджень впливу електронного опромінення ($E = 2 \text{ MeV}$, $\Phi = 3 \cdot 10^{14} \div 2,6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$) на основні електрофізичні параметри діодів GaAs_{1-x}P_x ($x = 0,85$ – жовті, $x = 0,45$ – помаранчеві). Виявлено зростання диференційного опору, послідовного опору бази та бар'єрного потенціалу. Проаналізовано процеси відновлення досліджуваних величин при ізохронному відпалі, обговорюються механізми деградаційно-відновних явищ.

Ключові слова: GaAsP, світлодіод, від'ємний диференційний опір, вольт-амперні характеристики.

1. Вступ

Використання проникної радіації дає змогу вирішувати актуальні задачі фізики твердого тіла, зокрема: діагностику структурних неоднорідностей, одержання інформації про особливості будови матеріалів, деталей, про їхню електронну структуру та міжатомні зв'язки.

В останні десятиліття сформувався напрям радіаційної технології напівпровідників, де роль основного інструмента впливу відіграють потоки швидких частинок [1 - 6]. Комплекс методів радіаційної обробки здатен забезпечити однорідність легування, створення *i*-шарів та надграток, підвищення швидкодії височастотних приладів, зниження механічних напруг у гетероструктурах та ін.

Водночас швидкий розвиток ядерної енергетики та космічної галузі потребує радіаційно-стійких матеріалів, радіоелектронних схем з підвищеним експлуатаційним ресурсом та радіаційно-чутливих сенсорів. Про можливість використання світлодіодів у подібній ролі GaP йшлося в роботі [7].

Сучасні прискорювачі дають можливість моделювати вплив змішаного ядерного випромінювання, близького за складом до космічного, на характеристики базових елементів пристроїв керування та зв'язку.

Прогнозування їхньої поведінки в екстремальних умовах ґрунтується на використанні констант радіаційної стійкості. Особливо важливою задачею стає для твердотільних джерел світла –

світлодіодів чи напівпровідникових лазерів, які працюють при великих рівнях збудження, коли деградаційні процеси прискорюються.

Тому головною метою виконаної роботи стало виявлення наслідків, якими супроводжується введення радіаційних дефектів у світлодіодні структури, вирощені на основі твердих розчинів GaAsP, та встановлення можливих механізмів їхнього впливу на електричні характеристики досліджуваних об'єктів.

2. Експериментальні вимірювання

Досліджувались серійні світлодіоди в корпусі, вирощені на основі твердих розчинів GaAs_{1-x}P_x (жовті $x = 0,85$, помаранчеві $x = 0,45$) за стандартною технологією епітаксії з парової фази [8]. Підкладкою слугувала пластина GaP.

Опромінення електронами з $E = 2 \text{ MeV}$, при флюенсах $\Phi = 3 \cdot 10^{14} \div 2,6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$, відбувалось в імпульсному режимі на прискорювачі ПП-6 зі струмом пучка електронів $I = 4 \text{ mA}$ при кімнатній температурі.

Перед опроміненням на зразках знімалось захисне покриття; епоксидна лінза зашліфовувалась до мінімально можливої товщини, що дозволяло нехтувати втратами енергії електронів.

Вимірювання ВАХ (вольт-амперна характеристика) проводилось автоматизованою системою в режимах генератора струму та генератора напруги з інтервалом температур 77 - 300 K в умовах імпульсного живлення діода.

3. Результати та обговорення

У світлодіодах, вирощених на основі твердих розчинів GaP-GaAsP, залежність струму від напруги ВАХ може бути подана у вигляді модифікованої формули Шоклі [9]

$$I = I_s \left(e^{\frac{q(U-IR_b)}{nKT}} - 1 \right), \quad (1)$$

де I_s – струм насичення діода; U – напруга, прикладена до p - n -переходу; R_b – опір бази; n – коефіцієнт неідеальності p - n -структури ($n = 1$ у разі переважання дифузійної складової повного струму, $n = 2$, коли струм рекомбінаційного походження).

З рівняння (1) можна одержати величину диференційного опору діода

$$R_{dif} = \frac{dU}{dI} = \frac{nKT}{I + I_s} \cdot \frac{1}{e} + R_b. \quad (2)$$

На рис. 1 показано розраховану залежність $R_{dif}(I)$ для вихідного та опроміненого світлодіода GaAsP, яка задає межі його застосування. Видно, що вентильні властивості зразка проявляються принаймні до $I = 5 \cdot 10^{-2}$ А. Опір бази визначається з області ВАХ, де контактна різниця потенціалів компенсується частиною прикладеної до діода напруги і він стає лінійним елементом; чисельно R_b дорівнює величині, оберненій тангенсу кута нахилу ВАХ на ділянці лінійності.

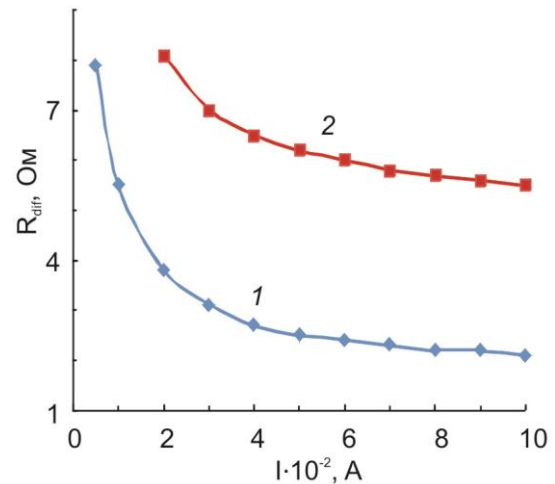


Рис. 1. Залежність диференційного опору помаранчевого діода GaAsP від струму: 1 – вихідний зразок; 2 – опромінений електронами з $E = 2$ МеВ, $\Phi = 2,64 \cdot 10^{16}$ см⁻².

На рис. 2 наведено експериментальні ВАХ вихідного та опроміненого електронами ($E = 2$ МеВ, $\Phi = 2,64 \cdot 10^{16}$ см⁻²) помаранчевого діода GaAsP, зняті при різних температурах у режимах генератора струму в лінійних та напівлогарифмічних координатах. При низьких температурах ($T \leq 90$ К) у GaAsP, як і в діодах GaP завдяки формуванню внутрішнього оберненого зв'язку за струмом, виникає область від'ємного диференційного опору (ВДО) S -типу, природа якої встановлена в роботі [10]. Характерний вигляд цієї ділянки можна наглядно відтворити, використовуючи режим генератора струму.

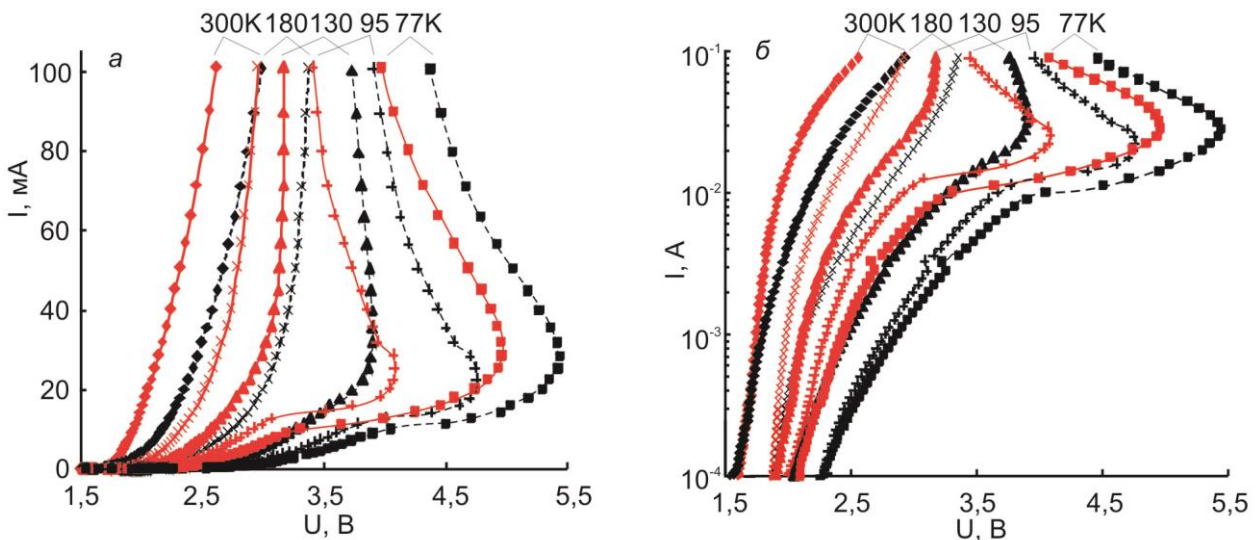


Рис. 2. ВАХ вихідного (суцільна крива) та опроміненого ($E = 2$ МеВ, $\Phi = 2,64 \cdot 10^{16}$ см⁻², пунктирна крива) помаранчевого діода GaAsP, зняті при різних температурах у режимі генератора струму в лінійній (а) та напівлогарифмічній (б) координатах. (Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

На ВАХ діода GaAsP, знятої у режимі генератора напруги, області ВДО відповідає координа-

та $U = U_{зр}$, при досягненні якої струм різко зростає (рис. 3).

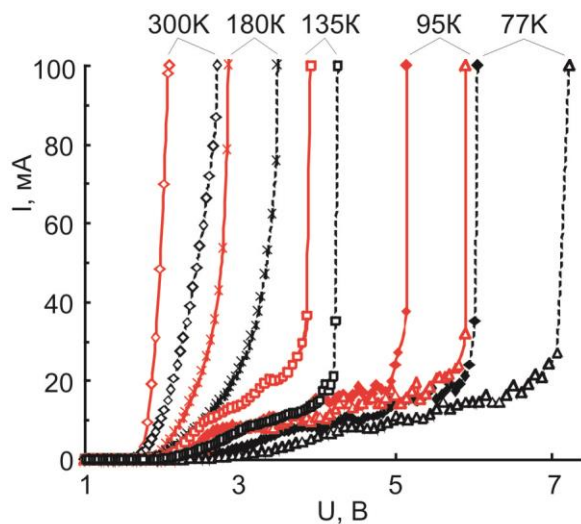


Рис. 3. ВАХ вихідного (суцільна крива) та опроміненого ($E = 2 \text{ MeV}$, $\Phi = 5,7 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$, пунктирна лінія) помаранчевого діода GaAsP, зняті при різних температурах у режимі генератора напруги. (Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

У досліджуваних діодах при кімнатній температурі коефіцієнт неідеальності $n = 1,59$, що свідчить про існування дифузійно-рекомбінаційного струму; при $T = 77 \text{ K}$ $n = 2$ переважає рекомбінаційний процес.

Опромінення електронами з $E = 2 \text{ MeV}$, $\Phi = 3 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ практично не впливає на механізм струмоутворення – коефіцієнт n залишається попереднім, проте вже при $\Phi = 8,2 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ він збільшується, демонструючи переважання рекомбінаційної компоненти, що особливо стає відчутним для низьких температур. Збільшення флюенсу ($\Phi = 2,64 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$) посилює тенденцію до зростання ролі рекомбінаційної складової повного струму внаслідок активної участі в рекомбінаційному процесі дефектів радіаційного походження (рис. 4). Водночас, як показано в роботах [11, 12], опромінення світлодіодів GaAsP супроводжується падінням інтенсивності випромінювання. Отже, в GaAsP, як і в GaP, рівні радіаційних дефектів – безвипромінювальні.

Перевищення зовнішньою напругою величин $U = 2 \text{ V}$ (див. рис. 3) супроводжується поступовою компенсацією бар'єрного потенціалу U_{dif} ($E_g = 2 \text{ eV}$), після завершення якої повний опір діода стає рівним лише послідовному омичному опору бази U_b . Його зростання внаслідок опромінення зумовлюється насамперед експоненційним падінням концентрації вільних носіїв і проявляється у вигляді збільшення диференційного опору бази.

На рис. 5 показано залежність опору бази R_b та напруги зриву U_{sp} на ВАХ (при $I = 0^{-9} \text{ A}$) від температури відпалу. Основною стадією для обох параметрів є область $T \geq 120 \text{ }^\circ\text{C}$; незначне відновлення можна спостерігати також у межах $20 \div 80 \text{ }^\circ\text{C}$.

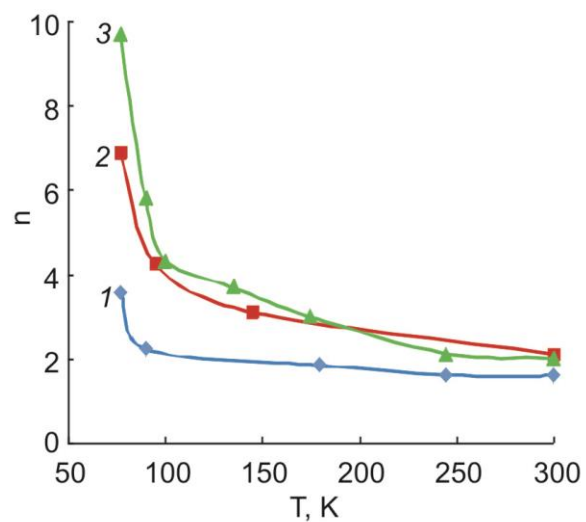


Рис. 4. Залежність коефіцієнта неідеальності n від температури діода GaAsP, опроміненого електронами з $E = 2 \text{ MeV}$ при різних флюенсах Φ , cm^{-2} : 1 – $3 \cdot 10^{14}$; 2 – $8,2 \cdot 10^{14}$; 3 – $2,64 \cdot 10^{16}$. (Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

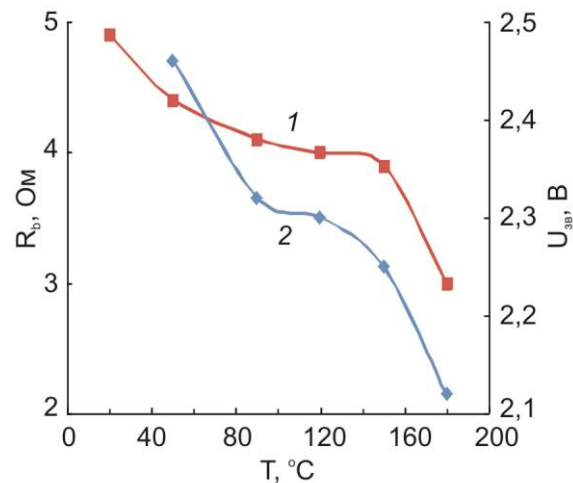


Рис. 5. Залежність опору бази (1) та напруги зриву (2) від температури відпалу опроміненого помаранчевого діода GaAsP ($E = 2 \text{ MeV}$, $\Phi = 5,7 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$).

Щодо їхнього походження поки що остаточні висновки зробити складно, проте спираючись на аналогію з відпалом опромінених кристалів GaP та GaAs, можна висловити певні припущення. У монокристалічних зразках GaP n -типу, опромінених електронами з $E = 1 \div 2 \text{ MeV}$, в інтервалі температур $120 \div 180 \text{ }^\circ\text{C}$ відбувається міграція вакансій фосфору до стоків [12]. При нижчих температурах ($20 \div 80 \text{ }^\circ\text{C}$) протікає відпал простих дефектів, що перебувають у станах з ослабленими зв'язками переважно на периферії великомасштабних порушень структури – дислокацій, скупчень міжвузлових атомів чи вакансійних пустот. В опроміненому GaAs відпал радіаційних дефектів розпочинається лише після $T \approx 200 \text{ }^\circ\text{C}$ [13]. Загальний характер відновлення опроміненого світлодіода GaAsP, як результат сумарних

радіаційних змін *n*- та *p*-областей структури, може бути використаний для прогнозування їхньої стійкості в умовах підвищення радіаційно-термічних навантажень. Його можна одержати з кривих ВАХ, фіксуючи струм або напругу.

На рис. 6 наведено залежності напруги *U* від температури ізохронного відпалу $T_{відп}$ при фіксованому струмі $I = 0,08$ А (режим генератора струму) та $I = 0,05$ А (режим генератора напруги). Обидві криві добре узгоджуються; у межах 20÷180 °С спостерігається монотонний відпал без поділу на окремі стадії.

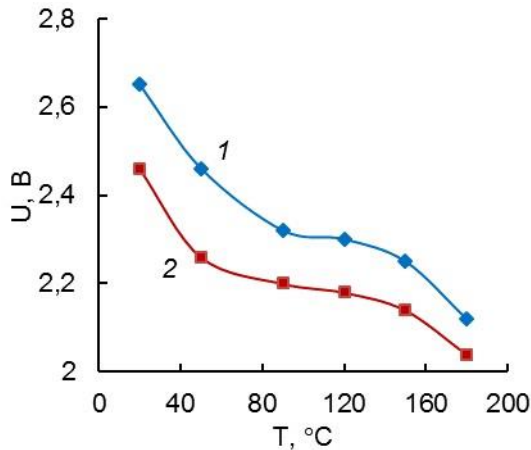


Рис. 6. Залежність напруги зриву ВАХ, виміряних при $T = 300$ К, від температури відпалу опроміненого ($E = 2$ МеВ, $\Phi = 5,7 \cdot 10^{15}$ см⁻²) помаранчевого діода GaAsP: 1 – режим генератора струму; 2 – режим генератора напруги.

Отже, виходячи зі згаданих вище особливостей відпалу опромінених кристалів GaP та GaAs можна попередньо припустити, що спостережувані зміни у світлодіодах GaAsP зумовлені відпалом радіаційних дефектів, зосереджених переважно в підратці GaP.

Продовження лінійної ділянки ВАХ до перетину з віссю напруг дозволяє встановити величину дифузійного бар'єра *p-n*-переходу U_{dif} , у загальному випадку близьку до контактної різниці потенціалів U_k , яка є сумою зовнішньої U_{k1} та внутрішньої U_{k2} :

$$U_k = U_{k1} + U_{k2} = \frac{\chi_1 - \chi_2}{e} + KT \ln \frac{n_1}{n_2}, \quad (3)$$

де $\chi_{1,2}$ – роботи виходу електронів.

У досліджуваних нами діодах GaAsP основну роль у виникненні U_k відіграє друга складова.

Для більшості видів світлодіодів задовільно виконується правило [9]: $U_{dif} \approx E_g/q$, проте виміряна величина часто суттєво відрізняється від передбачуваної. Причиною незбігу може бути флуктуація ширини забороненої зони, наявність

буферних шарів [9], виникнення діелектричного шару адсорбованих атомів у вигляді діелектричного проміжку [13] та ін.

Переходячи до розгляду змін U_{dif} у світлодіодах GaAsP, спровокованих радіацією, слід зауважити, що при наявності в літературі великого числа публікацій, присвячених наслідкам взаємодії прискорених частинок з напівпровідниковими матеріалами та приладами, частково цитованих вище [1 - 7], питанню реакції U_{dif} на опромінення відведено уваги зовсім недостатньо [13, 14]. Автори [14] виявили зростання потенціального бар'єра гетероструктур оксид-InSe до рівня $E_g/2$ під дією X-променів; у роботі [13] наголошується, що основний внесок у радіаційно-стимульовані зміни характеристик поверхнево-бар'єрних структур Bi-Si-Al дають поверхнево-бар'єрні стани на межі поділу.

Реакція світлодіодів GaAsP на введення радіаційних дефектів була подібною до виявленої в [14] – опромінення електронами з $E = 2$ МеВ призводить до зростання дифузійного потенціалу, починаючи від $U_{dif} = 1,88$ еВ і до $U_{dif} = 2,24$ еВ після опромінення флюенсом $\Phi = 5,7 \cdot 10^{15}$ см⁻².

Досліджувані нами об'єкти GaAsP – достатньо прості епітаксійні випромінювачі з будовою, не ускладненою додатковими буферними шарами, які могли б змінити роботу виходу електронів. Отже, зростання величини U_{dif} внаслідок опромінення не могло відбутися саме в результаті радіаційної деградації буферів.

Тому очевидно треба сподіватись, що як і в [13, 15], зростання U_{dif} викликане зміною зарядового стану поверхневих дефектів в умовах високих рівнів іонізації кристала при опроміненні та виникненні пошкоджень радіаційного типу в біляповерхневих шарах *p-n*-структури.

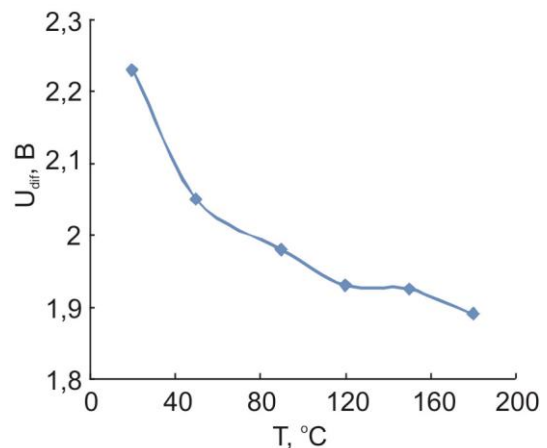


Рис. 7. Залежність дифузійного потенціалу від температури відпалу опроміненого помаранчевого діода GaAsP ($E = 2$ МеВ, $\Phi = 5,7 \cdot 10^{15}$ см⁻²).

Відновлення дифузійного потенціалу у процесі ізохронного відпалу протікає в інтервалі температур $20 \div 180$ °С практично безстадійно (рис. 7) і частково збігається зі стадією відпалу електропровідності монокристалів GaP, опроміненних електронами з $E = 1$ MeV [12], на якій відбувається дифузія вакансій фосфору до стоків. Монотонність характеру кривої $U_{dif}(T_{eion})$ зумовлена складністю структури твердого розчину GaAsP порівняно з бінарною сполукою GaP і відповідно з більшою різноманітністю введених опроміненням радіаційних пошкоджень.

4. Висновки

Виявлено, що у світлодіодах GaAsP при кімнатних температурах електропровідність забезпечується дифузійно-рекомбінаційним механіз-

мом (коефіцієнт неідеальності $n = 1,59$); при 77 K переважає рекомбінаційна компонента.

Опромінення малими флюенсами ($\Phi = 3 \times 10^{14}$ см⁻²) не впливає на механізм струмопротікання, але вже при $\Phi = 8,2 \cdot 10^{14}$ см⁻² коефіцієнт n починає зростати за рахунок участі радіаційних дефектів у процесі випромінювальної рекомбінації.

Зростання дози опромінення спричиняє збільшення диференційного опору діода R_{dif} та опору бази R_b .

Підвищення дифузійного потенціалу p - n -переходу внаслідок опромінення зумовлене зміною зарядового стану поверхневих дефектів при радіаційній обробці. Основну роль у відновленні електричних параметрів світлодіодів GaAsP може виконувати дифузія вакансій фосфору.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Ф.П. Коршунов, Г.В. Гатальский, Г.М. Иванов. *Радиационные эффекты в полупроводниковых приборах* (Минск: Наука и техника, 1978) 231 с.
2. Ф.П. Коршунов, Ю.В. Богатырев, В.А.Вавилов. *Воздействие радиации на интегральные микросхемы* (Минск: Наука и техника, 1986) 254 с.
3. І.А. Большакова та ін. Радіаційна модифікація як спосіб стабілізації параметрів In-вмісних напівпровідникових матеріалів. *Вісн. Нац. ун-ту «Львівська політехніка», Електроніка* 734 (2012) 28.
4. Т.О. Буско та ін. Радіаційна модифікація центрів рекомбінаційного випромінювання в TiO₂-плівках. *Вопросы атомной науки и техники* 4 (2011) 3.
5. С.В. Луньов та ін. Технологія одержання чутливого елемента для датчика інфрачервоного випромінювання. *Перспективні технології та прилади* 14 (2019) 77.
6. Б.П. Коман. Вплив альфа-опромінення на кремнієві МОН-транзистори. *Сенсорна електроніка і мікросистемні технології* 9 (2012) 88.
7. В.І. Осінський та ін. Аналіз та перспективи застосування лазерних та світлодіодних джерел світла на квантово-розмірних структурах для фотомедицини. *Фотобіологія та фотомедицина* 1 - 2 (2010) 104.
8. А. Берг, П. Дин. *Светодиоды* (Москва: Мир, 1979) 688 с.
9. Ф. Шуберт. *Светодиоды* (Москва: Физматлит, 2008) 496 с.
10. G. Gaydar et al. About bond model of S-type negative differential resistance in GaP LEDs. *Superlattices and Microstructures* 104 (2017) 316.
11. R.M. Vernydub et al. Electrophysical characteristics of GaAs_{1-x}P_x LEDs irradiated by 2 MeV electrons. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics* 23 (2020) 201.
12. Е.Ю. Брайловский, И.Д. Конозенко, В.П. Тартачник. Дефекты в GaP, облученном электронами. *Физика и техника полупроводников* 9 (1975) 769.
13. С.І. Драпак, З.Д. Ковалюк. Особливості електричних властивостей ізотипних гетеропереходів p-GaSe-p-InSe. *Фізика і хімія твердого тіла* 5 (2004) 292.
14. О.А. Політанська. Вплив X-опромінення на фотоелектричні параметри гетероструктур оксид-InSe. *Наук. вісн. Ужгород. ун-у. Сер. «Фізика»* 17 (2005) 38.
15. Б.В. Павлик та ін. Перебудова дефектів в поверхнево-бар'єрних структурах Bi-Si-Al, стимульована дією радіації. *Сенсорна електроніка і мікросистемні технології* 7 (2010) 37.

**R. M. Vernydub¹, O. I. Kyrylenko¹, O. V. Konoreva^{2,*}, P. G. Litovchenko²,
D. P. Stratilat², V. P. Tartachnyk², M. M. Filonenko¹**

¹ National Pedagogical Dragomanov University, Kyiv, Ukraine

² Institute for Nuclear Research, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

*Corresponding author: konoreva@nas.gov.ua

INFLUENCE OF RADIATION ON THE ELECTROPHYSICAL PARAMETERS OF GaAsP LEDs

The features of the current-voltage characteristics of LEDs obtained on the basis of GaP-GaAsP solid solutions are considered. The results of studies of the effect of electron irradiation ($E = 2$ MeV, $F = 3 \cdot 10^{14} \div 2.6 \cdot 10^{16}$ cm⁻²) on the main electrophysical parameters of GaAs_{1-x}P_x diodes ($x = 0.85$ – yellow, $x = 0.45$ – orange) are given. The increase of

differential resistance, the series resistance of the base, and barrier potential are revealed. The processes of recovery of the investigated quantities during isochronous annealing are analyzed, the mechanisms of degradation-recovery phenomena are discussed.

Keywords: GaAsP, light-emitting diode (LED), negative differential resistance, current-voltage characteristics.

REFERENCES

1. F.P. Korshunov, G.V. Gatalsky, G.M. Ivanov. *Radiation Effects in Semiconductor Devices* (Minsk: Nauka i Tekhnika, 1978) 232 p. (Rus)
2. F.P. Korshunov, Yu.V. Bogatyrev, V.A. Vavilov. *Impact of radiation on integrated microcircuits* (Minsk: Nauka i Tekhnika, 1986) 254 p. (Rus)
3. I.A. Bolshakova et al. Radiation modification as a method of parameter stabilization for In-containing semiconductor materials. *Visnyk Natsionalnoho Universytetu «Lvivska Politehnika», Elektronika* 734 (2012) 28. (Ukr)
4. T.O. Busko et al. Radiation modification of recombination emission centers in TiO₂-films. *Problems of Atomic Science and Technology* 4 (2011) 3. (Ukr)
5. S.V. Luniov et al. Technology for obtaining a sensitive element for an infrared radiation sensor. *Perspektyvni Tekhnolohiyi ta Prylady (Perspective Technologies and Devices)* 14 (2019) 77. (Ukr)
6. B.P. Koman. The influence of alpha-irradiation on the silicon MOS-transistors. *Sensorna Elektronika i Mikrosystemni Tekhnolohiyi (Sensor Electronics and Microsystem Technologies)* 9 (2012) 88. (Ukr)
7. V.I. Osinskiy et al. Analysis and prospects of application of laser and lightdiod sources of radiation on quantum-sizes structures for photomedicine. *Fotobiolohiya ta Fotomedytyna (Photobiology and Photomedicine)* 1 - 2 (2010) 104. (Ukr)
8. A.A. Bergh, P. Dean. *Light-emitting diodes* (Oxford: Clarendon Press, 1976) 591 p.
9. F. Schubert. *LEDs*. Translated from English by A.E. Yunovich (Moskva: Fizmatlit, 2008) 496 p. (Rus)
10. G. Gaydar et al. About bond model of S-type negative differential resistance in GaP LEDs. *Superlattices and Microstructures* 104 (2017) 316.
11. R.M. Vernydub et al. Electrophysical characteristics of GaAs_{1-x}P_x LEDs irradiated by 2 MeV electrons. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics* 23 (2020) 201.
12. E.Yu. Braulovsky, I.D. Konozenko, V.P. Tartachnyk. Defects in electron-irradiated GaP. *Fizika i Tekhnika Polurovodnikov* 9 (1975) 769. (Rus)
13. S.I. Drapak, Z.D. Kovalyuk. The electrical properties' peculiarities of the isotype p-GaSe-p-InSe heterojunction. *Fizyka i Khimiya Tverdoho Tila (Physics and Chemistry of Solid State)* 5 (2004) 292. (Ukr)
14. O.A. Politanska. X-ray irradiation influence on photoelectrical parameters of oxide-InSe heterostructures. *Naukovyy Visnyk Uzhhorodskoho Universytetu. Seriya "Fizyka"* 17 (2005) 38. (Ukr)
15. B.V. Pavlyk et al. Restructuring defects in Bi-Si-Al surface-barrier structures stimulated by radiation action. *Sensorna Elektronika i Mikrosystemni Tekhnolohiyi (Sensor Electronics and Microsystem Technologies)* 7 (2010) 37. (Ukr)

Надійшла/Received 20.10.2020