

Т. І. Мосюк<sup>1,\*</sup>, Р. М. Вернидуб<sup>1</sup>, П. Г. Литовченко<sup>2</sup>,  
М. Б. Пінковська<sup>2</sup>, Д. П. Стратілат<sup>2</sup>, В. П. Тартачник<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Український державний університет імені Михайла Драгоманова, Київ, Україна

<sup>2</sup> Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

\*Відповідальний автор: t.i.mosiuk@npu.edu.ua

**НЕГАТИВНИЙ ДИФЕРЕНЦІАЛЬНИЙ ОПІР І СПЕКТРАЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВИХІДНИХ ТА ОПРОМІНЕНИХ ЕЛЕКТРОНАМИ (З  $E = 2 \text{ MeV}$ ) СВІТЛОДІОДІВ  $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ <sup>a</sup>**

Досліджено електрофізичні та випромінювальні характеристики вихідних і опромінених електронами з енергією  $E = 2 \text{ MeV}$  світлодіодів  $\text{GaAsP}$ . Наведено результати вимірювань вольт-амперних характеристик в інтервалі 77 - 300 К. У межах 180 - 77 К виявлено ділянку від’ємного диференціального опору. Визначено основні характеристичні параметри випромінювання світлодіодів. Обговорюються наслідки впливу радіаційних дефектів на випромінювальну здатність та квантовий вихід досліджуваних структур.

*Ключові слова:* GaAsP, світлодіод, від’ємний диференціальний опір, вольт-амперні характеристики.

**1. Вступ**

Виникнення від’ємного диференціального опору у схемі можливе в умовах наявності позитивного оберненого зв’язку між виходом і входом чотириполосника, коли частина потужності вихідного сигналу подається на вхід пристрою. У разі збігу фаз обох сигналів обернений зв’язок одержав назву позитивного.

За формою вольт-амперні характеристики (ВАХ) поділяють на N- та S-подібні (рис. 1 і 2). У другому випадку величина від’ємного нахилу кривої  $I(U)$  дає змогу визначити від’ємну диференціальну провідність (ВДП). Початок переходу на ВАХ у стан від’ємного диференціального опору (ВДО), чи ВДП, зазвичай називають «точкою зриву» (див. рис. 1 і 2).

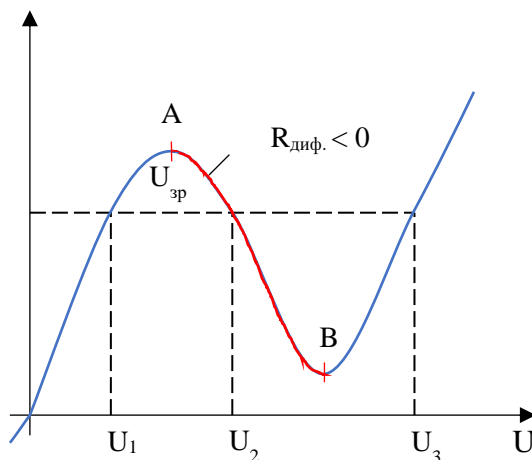


Рис. 1. ВАХ світлодіодів (СД) N-типу. (Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

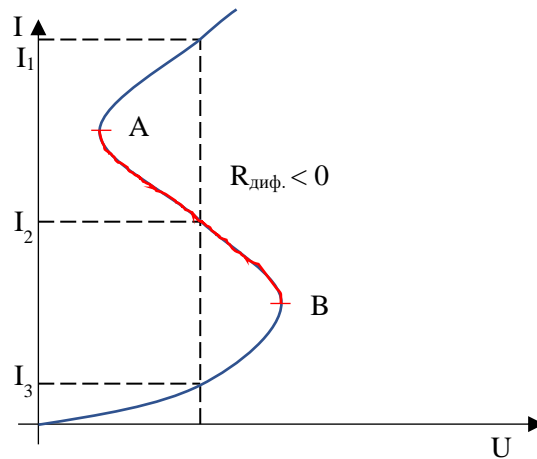


Рис. 2. ВАХ СД S-типу. В – точка зриву. (Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

Якщо у радіотехнічних схемах лінії оберненого позитивного зв’язку розраховуються окремо і вони зовнішні, то у напівпровідникових діодах обернений зв’язок виникає у результаті впливу внутрішньокристалічних факторів.

Зростання інтенсивності сигналу на ділянці ВДО у S-діодах відбувається за рахунок дії струмової компоненти, переданої по лінії оберненого зв’язку. Тому такий прилад називають «пристроєм,

керованим струмом». Відповідно N-діод одержав назву приладу, керованого напругою [1, 2].

Діод S-типу можна використовувати, як високочастотне і контрольоване джерело світла, а також у ролі малогабаритного вимикача струму, чи низьковольтного ( $U = 0,5 \text{ В}$ ) приладу з надвисоким відношенням пікового та мінімального струмів [3]

© Т. І. Мосюк, Р. М. Вернидуб, П. Г. Литовченко, М. Б. Пінковська, Д. П. Стратілат, В. П. Тартачник, 2024

<sup>a</sup> Представлено на XXX Щорічній науковій конференції Інституту ядерних досліджень НАН України, Київ, 25 - 29 вересня 2023 р.

Ефект виникнення ВДО автори [4] використали для вирощування квантових приладів – потужних низьковольтних органічних елементів пам'яті та логіки. Одержані полімерні тунельні діоди, у яких ВДО ділянки – результат тунелювання через оксидні центри у шарах  $\text{TiO}_2$ .

Автори [5] пропонують прилад з ВДО, що формується на контактах.

У роботі [6] наголошується на широкому використанні діодів із ВДО у ролі мікрохвильових підсилювачів, високошвидкісних перемикачів, елементів пам'яті, а також у ЗВЧ-схемах.

Природа ефекту виникнення ВДО розглядається в оглядовому повідомленні [7], де основна увага зосереджується на його застосуванні – конструюванні швидкісних перемикачів, елементів пам'яті у напівпровідникових тонких плівках, транзисторах зі змінним бар'єром метал – оксид – нітрид – напівпровідник.

У роботі [8] повідомляється про результати дослідження надлінійної інжекції носіїв.

Повідомляється також у [9] про розробку нового класу приладів з N-подібними ділянками на ВАХ, головна особливість яких – можливість застосування для попередження теплового пробою, захист від стрибків струму і напруги вхідних і вихідних кіл.

В останні роки крім робіт загального характеру [10 - 13] опубліковано статті, в яких розглянуто використання базового матеріалу – твердого розчину GaAsP для вирощування наноструктур та компонентів сучасної мікроелектронної техніки [14], нанодротів та сонячних елементів [15 - 18].

Із вищенаведеного огляду робіт, виконаних за останні півтора десятиліття, видно, що основна зацікавленість авторів стосується переважно використання приладів, одержаних на основі твердого розчину GaAsP. Число публікацій та різноманітність напрямків досліджень свідчать про актуальність тематики, пов'язаної з вивченням властивостей простих і дешевих гомоперехідних p-n-структур.

Очевидним і нагальним наразі слід вважати важливе питання радіаційної стійкості досліджуваних об'єктів, враховуючи можливість їхнього застосування в умовах підвищених рівнів радіаційної небезпеки, створених джерелами як наземного, так і космічного походження.

Стійкість СД до опромінення визначається переважно коефіцієнтом пошкодження часу життя неосновних носіїв заряду  $K_\tau$ ; саме для СД GaAsP число робіт, присвячених визначенню цього параметра, доволі скромне [19 - 24].

Автори [19], порівнюючи результати електронного опромінення ( $E_{\text{ел}} = 30 \text{ MeV}$ ) СД GaP та

GaAsP, одержали  $K_\tau^{\text{GaP}} = 2 \cdot 10^{-13} \text{ см}^2 \text{с}^{-1}$ ,  $K_\tau^{\text{GaAsP}} = 3 \cdot 10^{-14} \text{ см}^2 \text{с}^{-1}$  ( $x = 0,3 \div 0,9$ ). У роботі [20], виконаній пізніше, підтверджено факт вищої радіаційної стійкості СД GaAsP порівняно з СД GaP. Прикметно також, що зістарені попередньо зразки не зменшують своєї чутливості до радіації [21], останнє слід враховувати при проектуванні засобів обробки та передачі інформації колами оптоволоконного зв'язку.

Аномально високими виявляються коефіцієнти пошкодження часу життя при нейтронному опроміненні навіть після не надто великих доз ( $\Phi = 10^{13} \div 10^{14} \text{ см}^{-2}$ ,  $K_\tau^{\text{GaAsP}} = 10^{-5} \div 10^{-6} \text{ см}^{-1}$ ) [22].

Очевидно, що причина малої радіаційної стійкості СД InGaN – введення нейтронами областей розупорядкування.

У роботі [23] наведено результати досліджень впливу  $\gamma$ -квантів, x-променів та нейтронів на елементи оптоелектронної техніки. Виявлено падіння потужності, зростання порогових струмів і водночас виникнення позитивного ефекту – падіння струмів обтікання. Для підвищення радіаційної стійкості СД автори рекомендують мінімізувати вихідні значення  $\tau_0$  і використовувати СД у режимі великих струмів.

Застосування електронних пучків у ролі технологічного інструмента здійснюється у більшості випадків, коли  $E_{\text{ел}} = 1 \div 2 \text{ MeV}$ . Наслідки такого опромінення наведено у [24]; одержано також значення  $K_\tau$ , необхідне для планування циклу радіаційно-термічної обробки ( $K_\tau^{\text{GaAsP}} = 10^{-9} \text{ см}^2 \text{с}^{-1}$  – для помаранчевих СД;  $K_\tau^{\text{GaAsP}} = 10^{-9} \text{ см}^2 \text{с}^{-1}$  – для жовтих СД).

Вплив радіаційних дефектів на електрофізичні та оптичні характеристики СД GaAsP наразі вивчено недостатньо. Тому головними задачами виконаної роботи були проведення оцінок їхніх радіаційно-деградаційних змін, одержання спектральних параметрів ліній випромінювання та величин, які визначають експлуатаційні характеристики вихідних і опромінених діодів.

## 2. Експеримент

Досліджувалися вихідні та опромінені електронами з  $E = 2 \text{ MeV}$  жовті та помаранчеві СД  $\text{GaAs}_{0,7}\text{P}_{0,3}$ , леговані N. Залежність інтенсивності свічення СД від струму у межах  $I = 5 \div 70 \text{ mA}$  вимірювалася за допомогою спектрометра Green-Wave (350 - 1150 нм). Величина квантового виходу  $\eta$  визначалася за кімнатної температури.

Завдяки потужному повітряному охолодженню, температура зразків не перевищувала кімнатну; опромінення електронами з  $E = 2 \text{ MeV}$  здійснювалося в імпульсному режимі. ВАХ СД знімалися у межах 77 - 300 K за допомогою автоматичного пристрою у режимах генератора струму та генератора напруги.

### 3. Результати

На рис. 3 і 4 показано ВАХ жовтого діода, побудовані у режимі генератора струму, лінійному (рис. 3) та напівлогарифмічному масштабі (рис. 4); ВАХ рис. 5 зняті у режимі генератора напруги

(лінійний масштаб). Видно (див. рис. 3 і 4), що починаючи з  $T = 180\text{ K}$  на залежності  $I(U)$  вихідного та опроміненних зразків виникає ділянка ВДО, яка особливо виразно проявляється при зниженні температури до  $77\text{ K}$ .

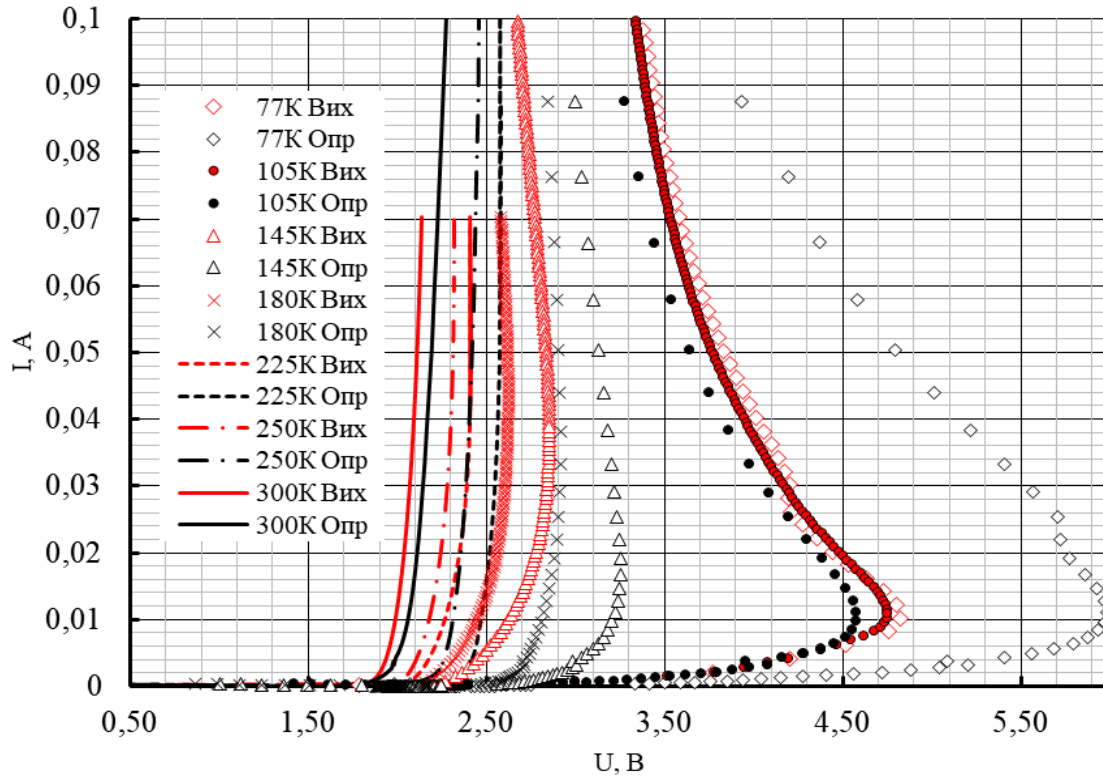


Рис. 3. ВАХ жовтого вихідного та опроміненого ( $\Phi = 1,23 \cdot 10^{15} \text{ e/cm}^2$ ) СД GaAsP у лінійному масштабі. (Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

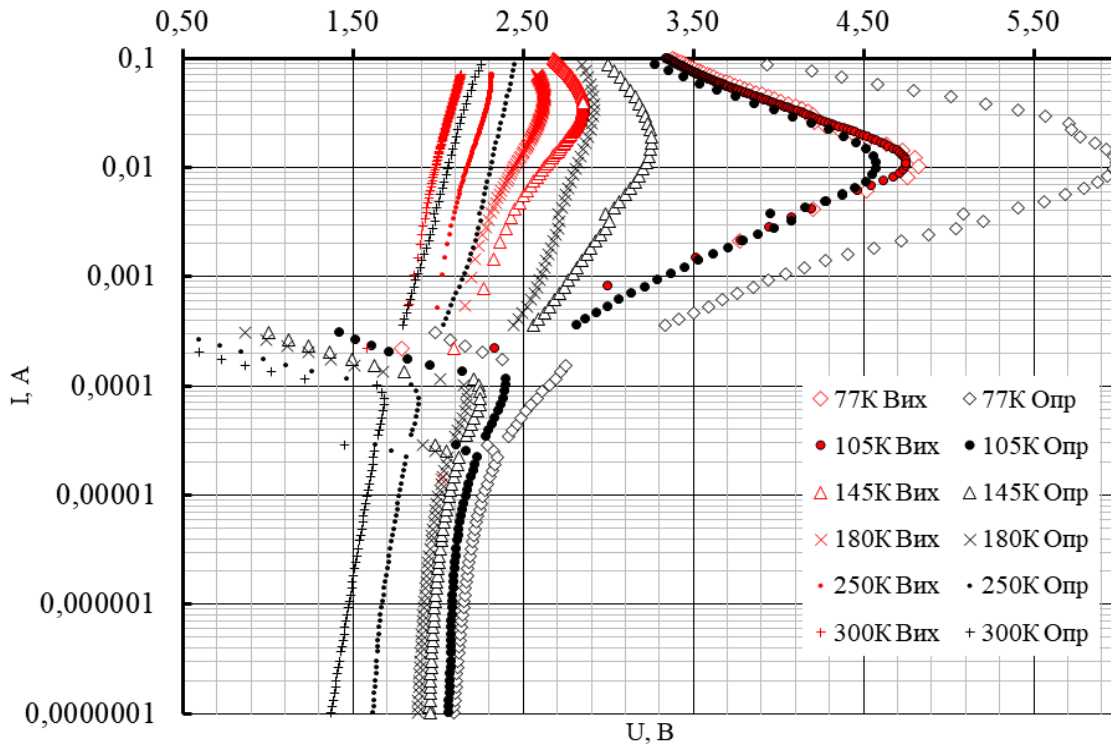


Рис. 4. ВАХ жовтого вихідного та опроміненого ( $\Phi = 1,23 \cdot 10^{15} \text{ e/cm}^2$ ) СД GaAsP у напівлогарифмічному масштабі. (Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

До входження у режим ВДО величини додатного диференціального опору вихідного та опроміненого зразків при 77 К становлять  $(dU/dI)_{\text{вих}} = 300 \text{ Ом}$  і  $(dU/dI)_{\text{опр}} = 1000 \text{ Ом}$  відповідно. На ділянці, що відповідає режиму ВДО, нахил кривої  $I(U)$  вихідного зразка плавно зменшується і подальше зниження температури діода до 77 К супроводжується падінням величин  $(dU/dI) = R_{\text{диф}}^- = 3,26 \text{ Ом}$ , зумовленим компенсацією позитивного диференціального опору  $(dU/dI)^+$  від'ємною складовою  $(dU/dI)^-$ , яка переважає першу. Наразі зробити однозначний висновок про механізм формування позитивного внутрішнього зв'язку саме у діодах GaAsP складно через відсутність докладної для цього інформації. Враховуючи значний відсотковий внесок GaP у розчин GaAsP, можна припустити, що як і в СД, одержаних на основі GaP, важлива роль при формуванні області ВДО належить міждолинному перенесенню носіїв, можливості впливу якого обґрунтовано у роботі [25].

Згідно зі співвідношенням Шоклі

$$I = I_S \left( e^{\frac{qV}{nKT}} - 1 \right), \quad (1)$$

параметр « $n$ » визначає механізм струмоперенесення у діоді. У нашому випадку  $n_{\text{вих}}^{300} = n_{\text{опр}}^{300} = 1,67$ , (див. рис. 4), що означає переважання дифузійно-рекомбінаційної складової.

Падіння напруги на діоді дорівнює сумі падінь напруг на p-n-переході та базі.

$$U = U_{p-n} + U_{\delta} = U_{p-n} + IR_{\delta}. \quad (2)$$

При  $I \rightarrow 0$ :  $U = U_{p-n}$ , тому екстраполюючи ділянку  $I(U)$  до нульового значення, де струм зростає лінійно з напругою, можна оцінити величину бар'єрного потенціалу  $U_{p-n}$ . Для досліджуваного зразка  $U_{p-n}(\Phi)$  збільшується з дозою і має вигляд, показаний на рис. 5, вкладки.

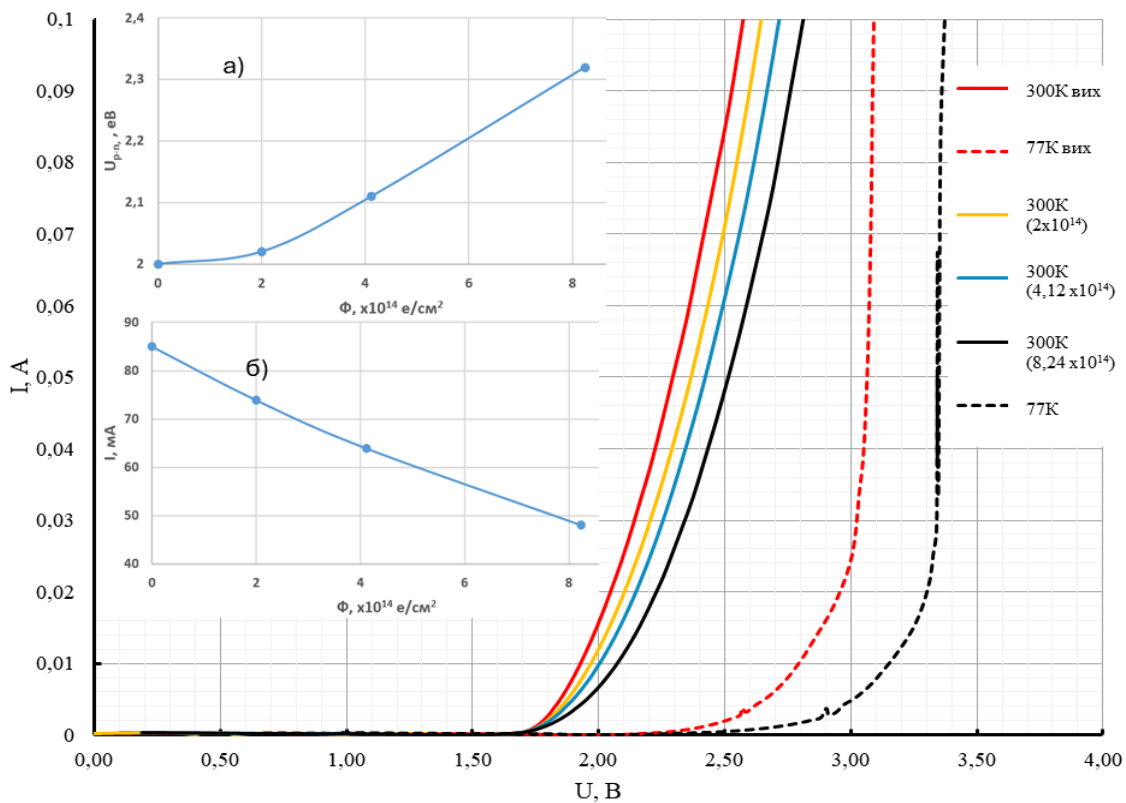


Рис. 5. Помаранчевий СД GaAsP вихідний і при різних дозах опромінення ( $2 \cdot 10^{14}$ ,  $4,12 \cdot 10^{14}$ ,  $8,24 \cdot 10^{14} \text{ e/cm}^2$ ). а – залежність величини бар'єрного потенціалу; б – залежність сили струму від дози опромінення при  $U = 2,5 \text{ В}$ . (Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

Падіння величини струму, що протікає через p-n-перехід при  $U = 2,5 \text{ В}$ , можна подати апроксимаційною функцією  $I = Ae^{-K\Phi}$ , де  $A = 85 \text{ мА}$ ;  $K = 7 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$  (див. рис. 5).

Велика перевага твердорозчинних СД  $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$  порівняно з бінарними GaP полягає у можливості

плавно змінювати ширину забороненої зони через зміну складу; зміна « $x$ » від 0,3 до 1 забезпечує зміну довжини хвилі випромінювання у межах  $680 \div 560 \text{ нм}$ . Перехід до непрямозонності відбувається при  $x \cong 0,46$ ,  $E_g = 1,98 \text{ еВ}$  (4,2 К). Легування ізоелектронною домішкою N підвищує

яскравість свічення майже у 50 разів для  $x = 0,6$  оскільки присутність атома N дає змогу компенсувати втрату чи поглинання імпульсу при непрямому переході.

З метою зменшення щільності дислокацій невідповідності в активних шарах GaAsP до  $x \leq 0,5$  вирощування плівок відбувається на підкладках GaAs; при  $x \geq 0,5$  на основі GaP.

Спектри випромінювання досліджуваних нами помаранчевих СД GaAsP ( $x = 0,65$ ,  $E_g = 1,941$  при 300 К), зняті при різних струмах інжекції, наведено на рис. 6 і 7. Профіль основної лінії при  $I = 70$  мА відповідає розподілу Гаусса  $S = S_0 e^{-(\lambda_0 - \lambda)^2 / K_S}$ , де  $S_0 = 3 \cdot 10^4$ ;  $\lambda_0 = 636$  нм – параметри розподілу;  $K_S = 7 \cdot 10^{-3}$  – коефіцієнт узгодження теоретичної і експериментальної кривих.

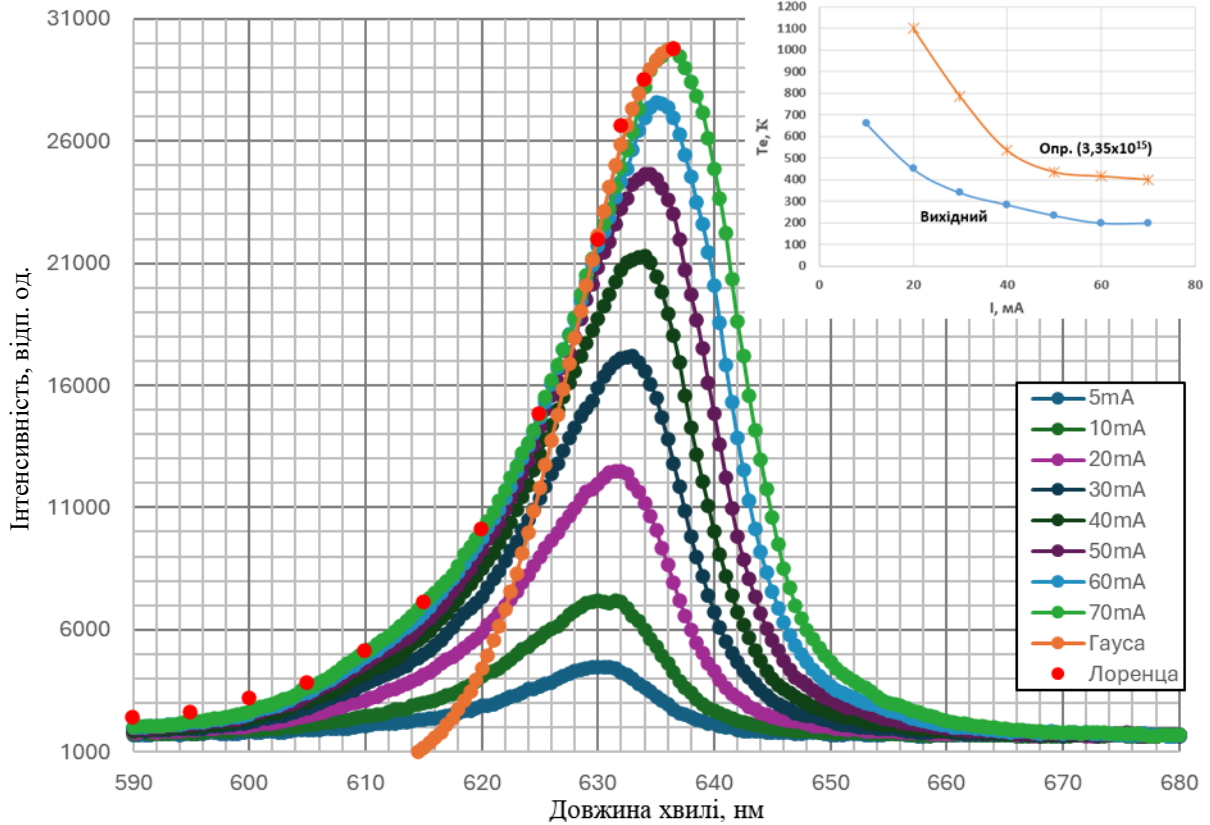


Рис. 6. Спектри свічення вихідного помаранчевого СД GaAsP, зняті при різних струмах ( $I = 5 \div 70$  мА,  $T = 300$  К). Вкладка – залежність електронної температури  $T_e$  від струму, що проходить через діод. (Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

Експериментальні відхилення від класичного розподілу помітні лише в області «хвостів» – для розподілу Гаусса; контур спектральної лінії при  $I = 70$  мА майже повністю збігається з розподілом Лоренца, що свідчить про надійність вимірювань.

Нахил короткохвильової половини спектральної лінії дає можливість визначити середню температуру електронів поблизу р-n-переходу; її залежність від струму наведено на рис. 6, вкладка. Оцінка величини енергії Урбаха може бути здійснена за кутом нахилу довгохвильової частини спектральної лінії (рис. 7, вкладка).

Напівширина спектральних ліній проявляє тенденцію до зростання (рис. 8) при одночасному зсуві максимуму випромінювання у бік довших хвиль ( $\Delta h\nu = 0,0523$  eV) (див. рис. 8). Найімовірніше, що обидва ефекти – наслідок нагрівання зразка великими струмами.

Введення додаткового числа дефектів і часткове розупорядкування кристалів при опроміненні СД супроводжується зменшенням інтенсивності свічення у 3,75 раза при  $\Phi = 2,25 \cdot 10^{15}$  см<sup>-2</sup> та зростанням усіх чотирьох параметрів – ширини лінії, довгохвильового зсуву спектра, середньої температури носіїв та енергії Урбаха (див. рис. 6 - 8, вкладки). Причини виникнення радіаційно-деградаційних змін очевидно спільні – розпад зв'язаних на ізоелектронній домішці N екситонів та послаблення екранування внутрішніх полів вільними носіями кристала у результаті їхнього захвату глибокими рівнями радіаційних дефектів, яке призводить до зростання ролі хвостів густини станів. Розширення спектральних ліній опроміненого СД GaAsP експериментально спостерігалось також у [24].



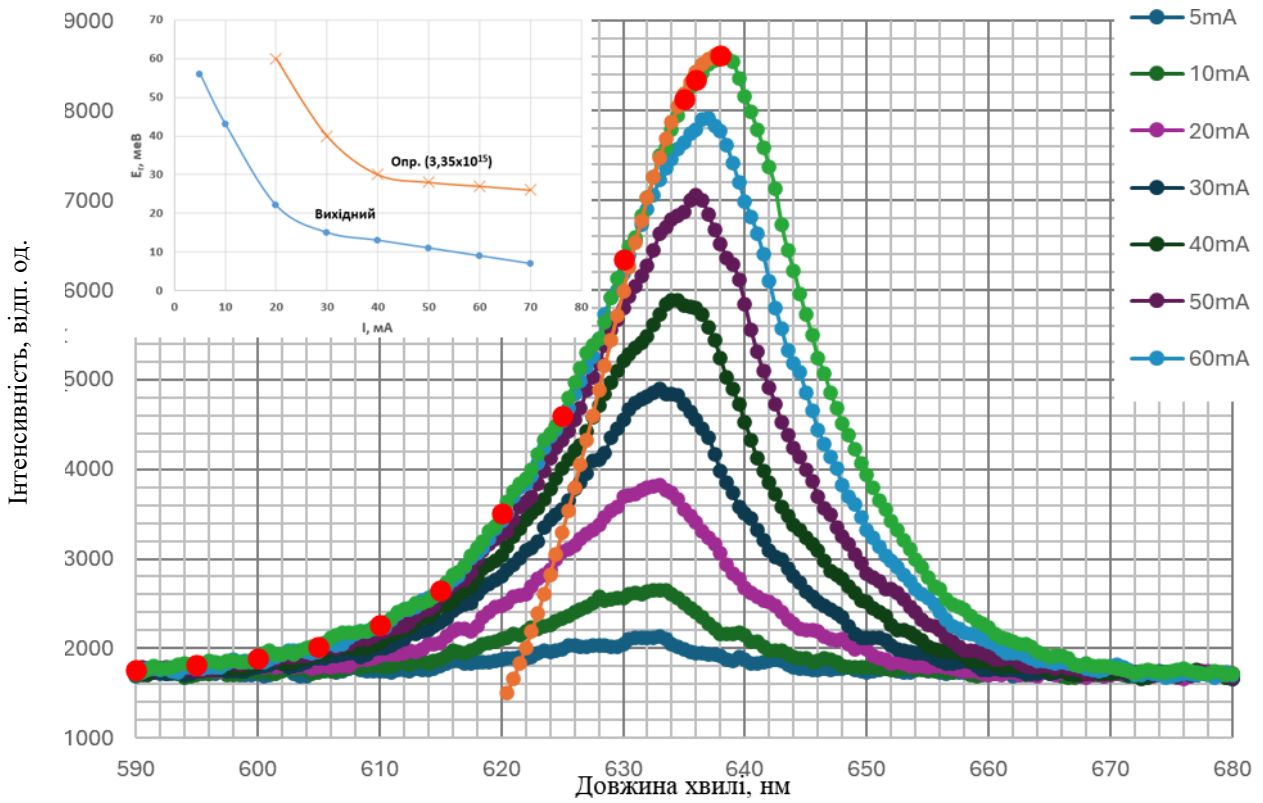


Рис. 7. Спектри свічення опроміненого ( $\Phi = 3,35 \cdot 10^{15} \text{ e/cm}^2$ ) помаранчевого СД GaAsP, зняті при різних струмах ( $I = 5 \div 70 \text{ mA}$ ,  $T = 300 \text{ K}$ ). Вкладка – залежність енергії Урбаха від струму, що проходить через діод. (Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

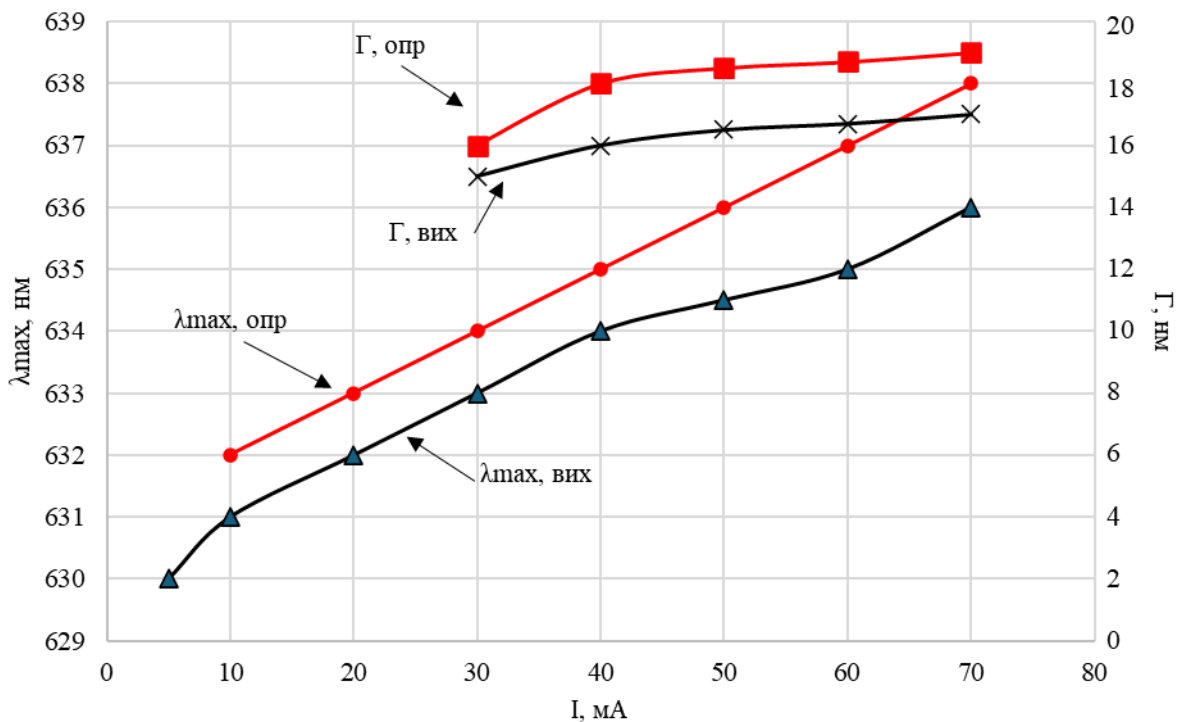


Рис. 8. Залежність положення максимуму свічення  $\lambda_{\text{max}}$  та напівширини спектральної лінії від струму через СД. (Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

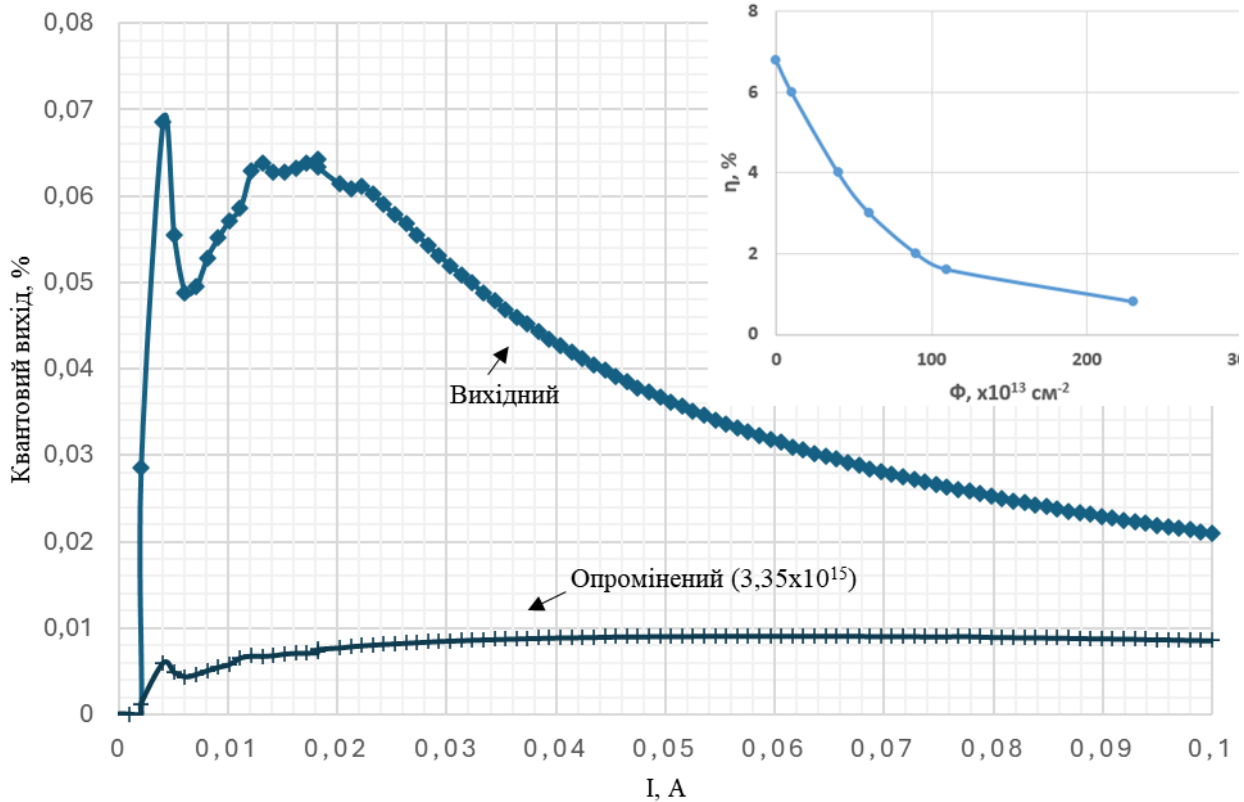


Рис. 9. Квантовий вихід вихідного та опроміненого ( $\Phi = 3,35 \cdot 10^{15} \text{ e/cm}^2$ ) помаранчевого СД GaAsP ( $\lambda_{\text{max}} = 633 \text{ nm}$ ). Вкладка – дозова залежність квантового виходу. (Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

Квантовий вихід  $\eta$  – експлуатаційний параметр СД, який характеризує ефективність перетворення електричної енергії у світлову, що дорівнює числу випромінюваних квантів на одну електронно-діркову пару [26]. Головна проблема для світлодіодних джерел світіння – падіння  $\eta$  при зростанні інжекційного струму; причиною падіння можуть бути струми витоку, делокалізація носіїв, ефект Оже тощо (рис. 9).

#### 4. Висновки

Виявлено, що у СД GaAsP в області низьких температур ( $180 \div 77 \text{ K}$ ) виникає ділянка ВДО, зумовлена існуванням внутрішнього позитивного зв'язку за струмом. До входження у стан ВДО і при  $I \leq 0,1 \text{ mA}$  у вихідних та опроміненних діодах переважає дифузійно-рекомбінаційний механізм протікання струму. Оцінка величини швидкості видалення носіїв, проведена за зміною струму, свідчить про підвищену радіаційну стійкість СД, вирощених на основі твердого розчину GaAsP.

Спектр випромінювання «помаранчевого» СД GaAsP має вигляд окремої спектральної лінії з  $\lambda_{\text{max}} = 636 \text{ nm}$  при  $300 \text{ K}$  і відповідає розподілу Гаусса. Збільшення струму інжекції супроводжується розширенням ліній і зсувом максимуму в бік довгих хвиль, зумовлених нагріванням зразка струмами, вищими номінального ( $I_{\text{ном}} = 20 \text{ mA}$ ).

Опромінення діода призводить до зростання напівширини ліній, середньої температури носіїв струму та енергії Урбаха. Радіаційна деградація згаданих величин – наслідок часткового розупорядкування кристала.

Квантовий вихід  $\eta$ , основний технічний параметр СД, різко зменшується при початковій дозі опромінення ( $\Phi \leq 5 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ ), після якої швидкість радіаційної деградації сповільнюється.

Якщо падіння  $\eta$  зі зростанням рівня інжекції носіїв – очевидний наслідок теплової іонізації екситонів, зв'язаних на домішкових атомах азоту, то вирівнювання залежності  $\eta(\Phi)$  при великих дозах – результат руйнування ізоелектронних центрів світіння  $N_p$ .

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. С.А. Гаряинов, И.Д. Абезгауз. Полупроводниковые приборы с отрицательным сопротивлением (Москва: Энергия, 1970) 320 с. / S.A. Garyainov, I.D. Abezgauz. *Semiconductor Devices with Negative Resistance* (Moskva: Energia, 1970) 320 p. (Rus)
2. И.М. Викулин, В.И. Стафеев. Физика полупроводниковых приборов (Москва: Радио и связь, 1990) 296 с. / I.M. Vikulin, V.I. Stafeev. *Physics of Semiconductor Devices* (Moskva: Radio i Svyaz, 1990) 296 p.

3. S. Shin, I.M. Kang, K.R. Kim. Negative differential resistance devices with ultra-high peak-to-valley current ratio and its multiple switching characteristics. *Journal of Semiconductor Technology and Science* 13(6) (2013) 546.
4. J.J. Guttman et al. Negative differential resistance in polymer tunnel diodes using atomic layer deposited, TiO<sub>2</sub> tunneling barriers at various deposition temperatures. *Organic Electronics* 47 (2017) 228.
5. E.D. Prokhorov, O.V. Botsula. Negative differential conductivity semiconductor diode with resonance-tunnel border. In: *International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves. Kharkiv, Ukraine, June 21 - 26, 2010 (Kharkiv, 2010)* p. 1.
6. D.K. Roy. *Tunnelling and Negative Resistance Phenomena in Semiconductors*. B.R. Pamplin (Ed.) (New York, Pergamon, 1977) p. 1 - 35.
7. B.R. Pamplin Negative differential conductivity effects in semiconductors. *Contemporary Physics* 11 (1970) 1.
8. В.Т. Шамирзаев та др. Отрицательное дифференциальное сопротивление в мощных лазерных InGaN/GaN-диодах. *Автометрия* 52(5) (2016) 31. / V.T. Shamirzaev et al. Negative differential resistance in high-power InGaN/GaN laser diodes. *Avtometriya* 52(5) (2016) 31. (Rus)
9. С.Г. Новиков и др. Полупроводниковые приборы с отрицательным сопротивлением на передаточной вольтамперной характеристике. Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Физика и электроника 15(6) (2013) / S.G. Novikov et al. Semiconductor devices with negative resistance on transfer voltampere characteristic. *Izvestia Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. Fizika i Elektronika* 15(6) (2013). (Rus)
10. O.V. Konoreva et al. The influence of acoustic-dislocation interaction on intensity of the bound exciton recombination in initial and irradiated GaAsP LEDs structures. *Superlattices and Microstructures* 102 (2017) 88.
11. O.V. Konoreva et al. Acoustic-stimulated relaxation of GaAs<sub>1-x</sub>P<sub>x</sub> LEDs electroluminescence intensity. *Semiconductor Physics Quantum Electronics & Optoelectronics* 19(1) (2016) 034.
12. V.P. Veleschuk et al. Acoustic emission and fluctuations of electroluminescence intensity in light-emitting heterostructures. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics* 13(1) (2010) 079.
13. A.I. Vlasenko et al. Fluctuations of current, electroluminescence and acoustic emission in light-emitting A<sup>3</sup>B<sup>5</sup> heterostructures. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics* 11(3) (2008) 230.
14. V. Neplokh et al. Red GaPAs/GaP nanowire-based flexible light-emitting diodes. *Nanomaterials* 11(10) (2021) 2549.
15. P.K. Mohseni et al. Structural and optical analysis of GaAsP/GaP core-shell nanowires. *J. Appl. Phys.* 106 (2009) 124306.
16. O. Arif et al. GaAs/GaP superlattice nanowires: growth, vibrational and optical properties. *Nanoscale* 15 (2023) 1145.
17. M.A. Baboli. *Catalyst-free Heteroepitaxy of III-V Semiconductor Nanowires on Silicon, Graphene, and Molybdenum Disulfide*. Thesis for the degree of PhD in Microsystems Engineering. Rochester Institute of Technology (Rochester, New York, 2020) 190 p.
18. N. Jain, M.K. Hudait. III-V Multijunction Solar Cell Integration with Silicon: Present Status, Challenges and Future Outlook. *Energy Harvesting and Systems* 1(3-4) (2014) 121.
19. K.C. Dimiduk, C.Q. Ness, J.K. Foley. Electron irradiation of GaAsP LEDs. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 32(6) (1985) 4010.
20. A. Ionascut-Nedelcescu et al. Radiation hardness of gallium nitride. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 49(6) (2002) 2733.
21. A.H. Johnston et al. Characterization of proton damage in light-emitting diodes. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 47(6) (2000) 2500.
22. F. Garcia et al. Damage constant and deep-level transient spectroscopy in neutron irradiated GaAsP alloys. *J. Electron. Mater.* 15 (1986) 133.
23. H. Lischka et al. Radiation effects in optoelectronic devices. In: *Optical Fiber Sensing and Systems in Nuclear Environments. Proc. SPIE 2425, 30 December 1994*.
24. Р.М. Вернидуб, та ін. Спектральні характеристики вихідних та опромінених світлодіодів GaAsP. *Ядерна фізика та енергетика* 22(2) (2021) 143. / R.M. Vernydub et al. Spectral characteristics of initial and irradiated GaAsP LEDs. *Nucl. Phys. At. Energy* 22(2) (2021) 143.
25. G. Gaydar et al. About bond model of S-type negative differential resistance in GaP LEDs. *Superlattices and Microstructures* 104 (2017) 316.
26. А. Берг, П. Дин. *Светодиоды*. Пер. с англ. Под ред. А.Э. Юновича (Москва: Мир, 1979) 686 с. / A. Berg, P. Din. *Light-Emitting Diodes*. Transl. from English. A.E. Yunovich (Ed.) (Moskva: Mir, 1979) 686 p. (Rus)



**T. I. Mosiuk<sup>1,\*</sup>, R. M. Vernydub<sup>1</sup>, P. G. Lytovchenko<sup>2</sup>,  
M. B. Pinkovska<sup>2</sup>, D. P. Stratilat<sup>2</sup>, V. P. Tartachnyk<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Drahomanov Ukrainian State University, Kyiv, Ukraine*

<sup>2</sup> *Institute for Nuclear Research, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine*

\*Corresponding author: t.i.mosiuk@npu.edu.ua

**NEGATIVE DIFFERENTIAL RESISTANCE AND SPECTRAL CHARACTERISTICS  
OF ORIGINAL AND ELECTRON-IRRADIATED (with E = 2 MeV) GaAs<sub>1-x</sub>P<sub>x</sub> LEDs**

The electrophysical and radiation characteristics of the original and irradiated electrons with E = 2 MeV GaAsP light emitting diodes were studied. The results of measurements of current-current characteristics in the range of 77 - 300 K are given. In the range of 180 - 77 K, a region of negative differential resistance was detected. The main characteristic parameters of light emitting diodes radiation are determined. The consequences of the effect of radiation defects on the emissivity and quantum yield of the studied structures are discussed.

*Keywords:* GaAsP, light emitting diodes, negative differential resistance, current-current characteristics.

Надійшла / Received 02.01.2024