

О. І. Кириленко<sup>1,\*</sup>, П. Г. Литовченко<sup>2</sup>, О. В. Мельниченко<sup>3</sup>,  
Ю. Б. Мирошніченко<sup>1</sup>, Д. П. Стратілат<sup>2</sup>, В. П. Таргачник<sup>2</sup>

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

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

<sup>3</sup> *Інститут фізичної хімії ім. Л. В. Писаржевського НАН України, Київ, Україна*

\*Відповідальний автор: [o.i.kyrylenko@udu.edu.ua](mailto:o.i.kyrylenko@udu.edu.ua)

## ОСОБЛИВОСТІ ЕЛЕКТРОФІЗИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СВІТЛОДІОДІВ GaAsP. ЯВИЩЕ ГІСТЕРЕЗИСУ

Наведено результати досліджень електрофізичних характеристик світлодіодів (СД) GaAsP в інтервалі 77 ÷ 300 К. Обговорюються механізми протікання струму на різних ділянках вольт-амперної характеристики (ВАХ), а також роль фактора екранування внутрішніх полів кристала вільними носіями. Виявлено формування гістерезисної петлі на ВАХ діода у межах області від'ємного диференційного опору (ВДО), проаналізовано можливі причини виникнення кожної ділянки. Визначено величину енергії активації процесу переходу СД у стан ВДО. Встановлено, що під час опромінення електронами з енергією 2 МеВ при температурі, що не перевищує кімнатну, у СД GaAsP спостерігається зростання коефіцієнта неідеальності.

*Ключові слова:* GaAsP, світлодіод, від'ємний диференційний опір, електрофізичні характеристики, явище гістерезису.

### 1. Вступ

Прості, дешеві та ефективні світлодіоди (СД) GaAsP широко використовуються у мікроелектронній галузі промисловості, системах зв'язку, біології, медицині для обробки інформаційних пакетів, а також у різноманітних побутових приладах [1–13]. Властивий цим випромінювачам високий квантовий вихід, значний порівняно з джерелами іншої природи експлуатаційний ресурс, мініатюрність, а також можливість корекції пікової довжини хвилі простою зміною співвідношення між вмістом миш'яку і фосфору, забезпечують їм стабільність запиту та конкурентну ринкову спроможність.

Використання СД GaAsP в екстремальних умовах – різкі коливання температурного режиму, чи дія проникного випромінювання потребує нагромадження обсягу даних про вплив негативних чинників подібного виду на основні параметри цих елементів. Деякі з них можуть входити до складу космічних апаратів, де добові коливання температури сягають сотень градусів, а радіаційні навантаження багаторазово перевищують природний фон на поверхні Землі.

Для екстремальних факторів, особливо проникної радіації, на основні характеристики СД GaAsP наразі досліджена недостатньо. Опубліковано обмежену кількість робіт [14–20], у яких проаналізовано наслідки впливу електронного, протон-

ного та нейтронного опромінення на час життя носіїв струму, величини теплових і порогових струмів, а також струмів обтікання; наведено результати досліджень деградаційно-відновних явищ, характерних для опромінених зразків.

Головною метою виконаної нами роботи стало виявлення особливостей електрофізичних характеристик вихідних і опромінених СД GaAsP: формування ВАХ на різних їхніх ділянках, умов виникнення ВДО, а також встановлення послідовності етапів формування петлі гістерезису, спричиненої довготривалими релаксаційними процесами у зразку.

### 2. Експеримент

У даній роботі досліджували електрофізичні та електролюмінісентні характеристики СД GaAs<sub>1-x</sub>P<sub>x</sub> із вмістом фосфору  $x = 0,85$  («жовті» діоди).

Вимірювалися температурні та релаксаційні залежності ВАХ.

Радіаційні дефекти вводились електронами з  $E = 2$  МеВ при температурі, не вищій кімнатної, максимальні дози опромінювання становили  $\Phi = 2,64 \cdot 10^{16}$  см<sup>-2</sup>. Температурна стабільність процесу опромінення підтримувалася завдяки потужному повітряному охолодженню. Імпульсне живлення зразка у режимі генератора струму запобігало його перегріванню.

© Автор(и), 2026

Стаття опублікована ІЯД НАН України за умовами відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC 4.0

### 3. Результати

На рис. 1 і 2 проведені ВАХ вихідних СД, одержаних у режимі генератора струму при різних температурах. До  $T > 160$  К залежності  $I(U)$  добре узгоджуються зі співвідношенням Шоклі:

$$I = I_s \left( e^{\frac{q(U-IR)}{nkT}} - 1 \right),$$

де  $I_s$  – зворотний (тепловий) струм насичення;  $R$  – опір бази діода;  $n$  – коефіцієнт неідеальності.

Однак, як видно з рис. 1, вже після  $T = 145$  К в інтервалі струмів  $0 \div 0,02$  А виникають відхилення від експоненційності у вигляді двох відрізків ВАХ з різними нахилами (ab і bc) та ділянки від'ємного диференційного опору (ВДО).

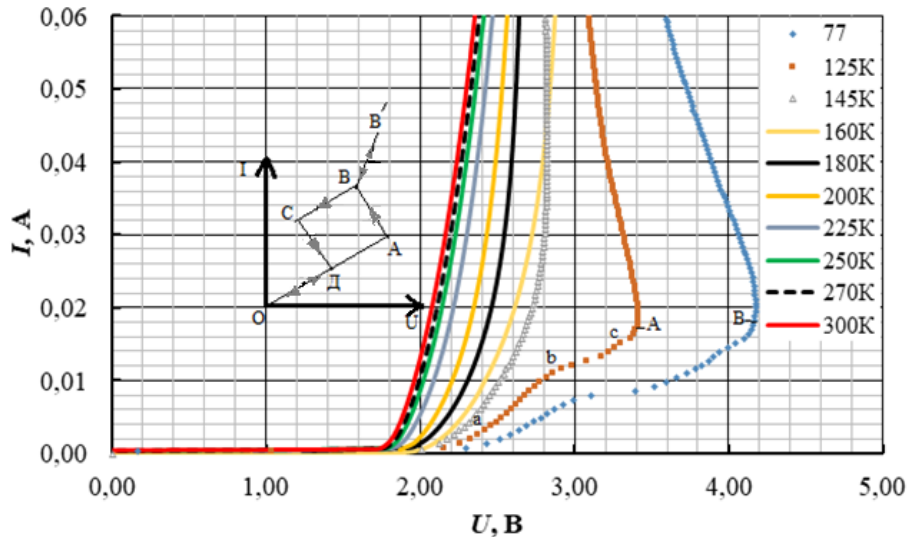


Рис. 1. Температурні залежності ВАХ СД GaAsP. На вкладці – схема виникнення області ВДО. (Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

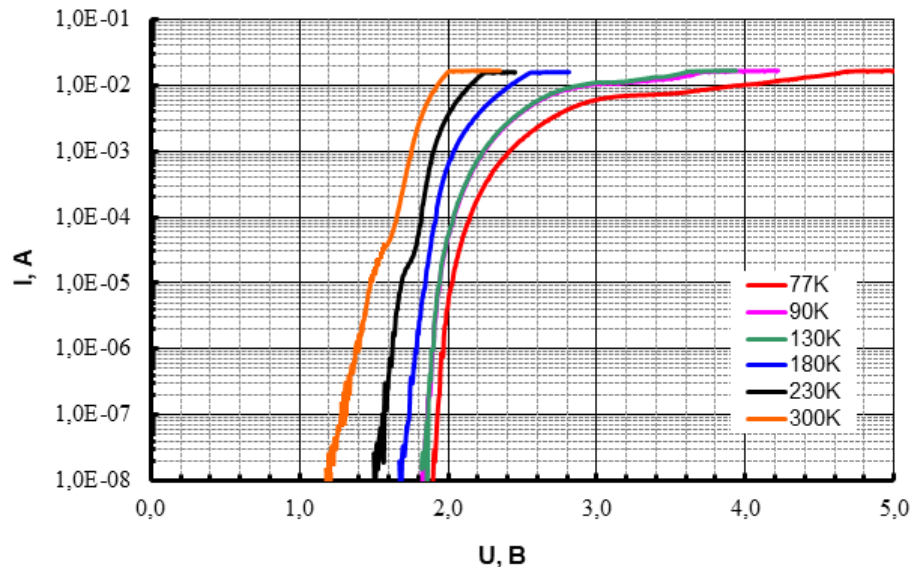


Рис. 2. Температурні залежності ВАХ GaAsP, зняті в області малих струмів. (Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

Середнє значення величин коефіцієнтів неідеальності для групи з п'яти СД GaAsP, одержані з нахилу ВАХ (див. рис. 2), становить  $\bar{n} = 1,79$  і близьке до  $n = 2$ , наведеного у [21], свідчить про переважання дифузійно-рекомбінаційної компоненти загального струму у межах  $10^{-8} \div 10^{-4}$  А, при  $T = 300$  К величина  $n > 2$  відповідає тунельній складовій.

Зниження температури діода призводить до зростання коефіцієнта неідеальності. На рис. 3 наведено його температурна залежність для вихідного «помаранчевого» СД GaAsP, опроміненого електронами з  $E = 2$  МеВ,  $\Phi = 5,7 \cdot 10^{15}$  см $^{-2}$ , та результат апроксимації  $n(T)$  для обох випадків експоненційною кривою  $n = n_0 e^{-\beta T}$ ,  $n_0 = 15$ ;  $\beta = -8,23 \cdot 10^{-10}$  град $^{-1}$ .

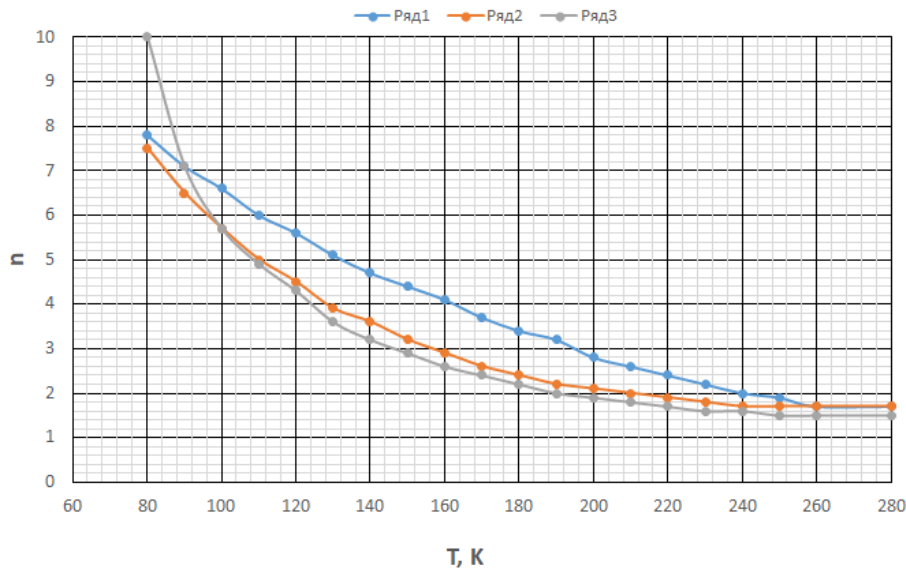


Рис. 3. Залежність коефіцієнта неідеальності  $n$  від температури СД GaAsP (ряд 1 – вихідний СД, ряд 2 – опромінений електронами, ряд 3 – апроксимація). (Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

Відомо, що ймовірність непрямого тунелювання носіїв  $T_e$  визначається, як [22]:

$$T_e \cong \exp \left[ \frac{-4\sqrt{2m_{2x}^*} (E_g - E_p)^{3/2}}{3q\hbar\varepsilon} \right], \quad (1)$$

Де  $m_{2x}^*$  – приведена маса носія у напрямку тунелювання;  $E_p$  – енергія фонона;  $\varepsilon$  – напруженість електричного поля.

У напівпровідників групи А<sup>III</sup>В<sup>V</sup>, до яких належать GaP та GaAs, зниження температури супроводжується зростанням ширини забороненої зони  $E_g$ , що призводить до зменшення  $T_e$ .

З іншого боку, нами на досліді виявлено зростання  $n$  внаслідок охолодження, еквівалентне збільшенню  $T_e$  (див. рис. 3). Причиною невідповідності, очевидно, є вплив іншого чинника, що перевищує дію теплового ефекту; таким чинником може бути зменшення рівня екранування внутрішніх полів вільними носіями при низьких температурах унаслідок їхнього виморожування.

Підсумовуючи, можна зазначити, що основна роль у низькотемпературному збільшенні коефіцієнта  $n$ , відповідно і  $T_e$ , належить зростанню внутрішніх полів  $\varepsilon$  (1), спричиненому послабленням їхнього екранування вільними носіями струму.

Вимірювання СД GaAsP, опромінених електронами ( $E = 2 \text{ MeV}$ ,  $\Phi = 3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ ), свідчать, що додаткова компенсація їхньої електропровідності радіаційними дефектами з одночасним зростанням імовірності тунелювання носіїв призводить до збільшення коефіцієнта неідеальності в 1,16 раза.

Невелике зростання  $n$  є підтвердженням результату, одержаного авторами [23] щодо підвищеної радіаційної стійкості СД GaAsP порівняно з бінарними СД GaP.

З рис. 1 видно, що починаючи з  $T = 125 \text{ K}$  у межах струмів ( $0 \div 0,02 \text{ A}$ ) на ВАХ виникають відхилення від монотонності у вигляді двох ділянок з різними величинами диференціальних опорів  $\left(\frac{dU}{dI}\right)_{ab} = 56 \text{ Ом}$  та  $\left(\frac{dU}{dI}\right)_{bc} = 106 \text{ Ом}$ .

В умовах спільної для обох компонент розчину GaAs та GaP концентрації носіїв можна зробити припущення, що диференціальний опір ділянки “ab” може бути зумовленим впливом компоненти GaAs, на ділянці “bc” – впливом GaP внаслідок значно більшої величини рухливості  $\mu_{GaAs}$  порівняно з  $\mu_{GaP}$  ( $\mu_{GaAs} = 395 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ ;  $\mu_{GaP} = 105 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ ) [24]).

Подальше зниження температури призводить до виникнення області ВДО S-типу, контрольованої струмом, у якій його величина є багатозначною функцією напруги; у зразку, формується струмовий шнур високої щільності. Подібні ділянки властиві багатьом електронним пристроям, в тому числі і напівпровідниковим діодним структурам, де існують передумови для виникнення внутрішнього позитивного зв'язку. Головними з них у нашому випадку для СД GaAsP, як видно з рис. 1, є: температура вимірювання не повинна перевищувати 125 K, величина струму  $I \geq 0,02 \text{ A}$ . Точка, що розділяє область додатного опору та ВДО, одержала назву точки зриву (А, В – на рис. 1). Зниження температури до 77 K супроводжується збільшенням ВДО від 8 до 18 Ом.

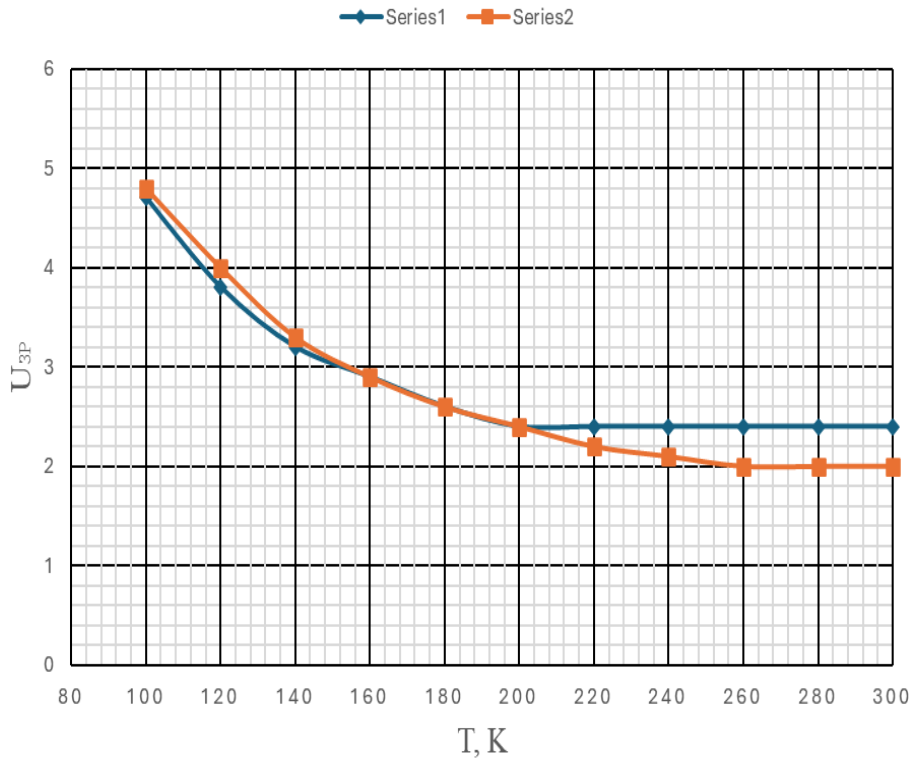


Рис. 4. Залежність напруги зриву  $U_{зр}$  від температури зразка СД GaAsP. (Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

Температурна залежність напруги зриву  $U_{зр}$  (рис. 4) дає можливість визначити енергію активації процесу переходу від стану з додатною провідністю до ВДО; для досліджуваного СД GaAsP вона становить  $E_a = 8,71 \cdot 10^{-3}$  Ев.

Вставка до рис. 1 ілюструє випадок, коли у вимірювальній схемі знято обмеження на наростання струму через діод. Тоді підвищенню напруги на діоді відповідає монотонне зростання струму, яке складається з ділянок ОД та ДА. На ділянці ОА коефіцієнт ідеальності змінюється у межах  $n = 1 \div 2$ , причому на частині ОД він ближчий до одиниці; на ДА – наближається до двох. Тому якщо при малому струмі на відрізку ВАХ ОД переважає його дифузійна складова, то на ДА основна – рекомбінаційна.

Остання, очевидно, результат випромінювальної рекомбінації на ізоелектронній домішці азоту [25] та безвипромінювальної рекомбінації на глибоких домішкових рівнях.

Загальний струм на ділянці ОА – сума дифузійної і рекомбінаційної компонент; він мало відрізняється від залежності  $I(U)$ , одержаної Шоклі.

Зі зростанням напруги та подальшим зниженням температури співвідношення між обома складовими зростає на користь ділянки ДА через насичення першого, випромінювального каналу, що зумовлено невисокою розчинністю азоту в GaAsP.

Тому коли у т. А число інжекттованих електронів зрівнюється з кількістю випромінювальних рекомбінаційних рівнів  $N$  і час життя носіїв на них

$\tau_n > \tau_p$ , концентрація носіїв струму лавино-подібно наростає. Опір з'єднаного шару р-п переходу різко зменшується, діод входить у стан ВДО (ділянка АВ).

Необхідна умова виникнення ВДО – наявність позитивного оберненого зв'язку у системі, виконується цілком очевидно – зростання струму супроводжується виділенням тепла, що призводить до подальшого наростання струму.

Коли ж у колі відсутній опір навантаження, а опір базової частини діода є незначним, струм зростає майже вертикально (див. рис. 1, вставка, ділянка ВВ').

Зменшення напруги (зворотний хід ВАХ), починаючи, наприклад, із т. В', повторює прямий хід ВАХ при зростанні напруги, але лише до т. В, після якої зменшення струму і напруги відбувається в іншому напрямку (ВС), забезпечуючи виникнення характерної петлі гістерезису. Її замикає відрізок СД, повертаючи діод у вихідний стан (т. Д).

Відрізок ДА, як і ВС, є ділянками додатного опору: зростанню напруги відповідає зростання струму (ДА), а зменшенню напруги – зменшення струму (ВС). Додатний опір властивий також ділянці ОД.

Два інших відрізки стрибкоподібного наростання і падіння струму характеризують стан ВДО діода, коли зростання струму призводить до падіння напруги АВ і, навпаки, коли його падінню відповідає зростання  $U$  (СД).

#### 4. Висновки

Виявлено, що у СД GaAsP при  $T = 300$  К та струмах  $10^{-8} \div 10^{-4}$  А переважає дифузійно-рекомбінаційна компонента ( $n = 1,5 \div 2$ ); в опроміненому зразку зростає тунельна складова ( $n > 2$ ).

Внаслідок зниження температури спостерігається зростання коефіцієнта неідеальності у результаті падіння рівня екранування внутрішніх полів зразка вільними носіями; введення додатко-

вих полів радіаційними дефектами посилює дію ефекту екранування у бік зростання  $n$ .

Петля гістерезису на ВАХ пов'язана з існуванням у СД GaAsP ВДО S-типу, контрольованого струмом.

Одержано підтвердження підвищеної радіаційної стійкості джерела випромінювання, вирощеного на основі твердого розчину GaAsP, порівняно з бінарною сполукою GaP.

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. T.J. Grassman et al. Characterization of metamorphic GaAsP/Si materials and devices for photovoltaic applications. *IEEE Trans. Electron Devices* 57(12) (2010) 3361.
2. M. Asadolahi Baboli. Catalyst-free Heteroepitaxy of III-V Semiconductor Nanowires on Silicon, Graphene, and Molybdenum Disulfide. Thesis (Rochester Institute of Technology, 2020) 190 p.
3. C.-Y. Hong et al. Photon recycling characteristics of InGaAs/GaAsP multiple quantum well solar cells incorporating a spectrally selective filter and distributed Bragg reflector. *Opt. Express* 27(25) (2019) 36046.
4. O. Arif et al. GaAs/GaP superlattice nanowires: growth, vibrational and optical properties. *Nanoscale* 15 (2023) 1145.
5. S. John. Different types of in light emitting diodes (LED) materials and challenges - A Brief Review. *Int. J. Res. Appl. Sci. Eng. Technol.* 6(4) (2018) 4418.
6. B.K. Tariyal, A.H. Cherin. Optical Fiber Communications. In: *Encyclopedia of Physical Science and Technology*. 3rd ed. Vol. A (San Diego, CA: Academic Press, 2001) p. 271.
7. B. Kim et al. GaAsP/Si tandem solar cells: Realistic prediction of efficiency gain by applying strain-balanced multiple quantum wells. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 180 (2018) 303.
8. B.L. Sopori, W.S.C. Chang. Propagation characteristics of GaAsP heterostructure waveguides for 1.06  $\mu\text{m}$  and 0.905  $\mu\text{m}$  wavelengths: an evaluation. *Appl. Opt.* 15(3) (1976) 789.
9. R. Buß et al. 8×8 GaAsP/GaP led arrays fully integrated with 64 channel Si-driver circuits. In: G.A. Lampropoulos, R.A. Lessard (Eds.) *Applications of Photonic Technology 2* (Boston, MA., Springer, 1997).
10. N. Li et al. Monolithic III-V on silicon plasmonic nanolaser structure for optical interconnects. *Sci. Rep.* 5 (2015) 14067.
11. Z. Zhou, B. Yin, J. Michel. On-chip light sources for silicon photonics. *Light: Sci. Appl.* 4 (2015) 358.
12. M.A. Tran et al. Extending the spectrum of fully integrated photonics to submicrometre wavelengths. *Nature* 610 (2022) 54.
13. M. Loi et al. Challenges and opportunities of light-emitting diode (LED) as key to modulate antioxidant compounds in plants. A Review. *Antioxidants* 10(1) (2021) 42.
14. F. Garsia et al. Damage constant and deep-level transient spectroscopy in neutron irradiated GaAsP alloys. *J. Electron. Mater.* 15 (1986) 133.
15. A.H. Johnston, T.F. Miyahira. Characterization of proton damage in light-emitting diodes. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 47(6) (2000) 2500.
16. І.М. Кучерук, І.Т. Горбачук. *Загальний курс фізики*. Т. 3. Оптика. Квантова фізика (Київ: Техніка, 2006) 518 с. / І.М. Кучерук, І.Т. Горбачук. *General Course of Physics. Vol. 3. Optics. Quantum Physics* (Kyiv: Tekhnika, 2006) 518 p. (Ukr)
17. S.I. Rybchenko et al. Polarization properties of Raman scattering by surface phonon polaritons in GaAsP nanowires. *J. Phys. D* 54(47) (2021) 475109.
18. P.K. Mohseni et al. Structural and optical analysis of GaAsP/GaP core-shell nanowires. *J. Appl. Phys.* 106 (2009) 124306.
19. J.I. Pankove. *Optical Processes in Semiconductors* (New York: Courier Corporation, 1975) 422 p.
20. O. Konoreva et al. Peculiarities of optical absorption near-edge in irradiated GaP:Te. *Funct. Mater.* 17(1) (2010) 80.
21. E.F. Schubert. *Light-Emitting Diodes*. 3rd ed. (Cambridge: Cambridge University Press, 2018) 672 p.
22. S.M. Sze, Y. Li, K. K. Ng. *Physics of Semiconductor Devices*. 4th ed. (Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2021) 944 p.
23. 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. (Ukr)
24. П.І. Баранський, В.П. Клочков, І.В. Потыкевич. *Полупроводниковая электроника*. Справочник (Київ: Наук. думка, 1975) 704 с. / P.I. Baransky, V.P. Klochkov, I.V. Potykevich. *Semiconductor Electronics*. Handbook (Kyiv: Naukova Dumka, 1975) 704 p. (Rus)
25. A.A. Bergh, P.J. Dean. *Light-Emitting Diodes* (Oxford: Clarendon Press, 1976) 591 p.

**O. Kyrylenko<sup>1,\*</sup>, P. Lytovchenko<sup>2</sup>, O. Melnychenko<sup>3</sup>,  
Yu. Myroshnichenko<sup>1</sup>, D. Stratilat<sup>2</sup>, V. 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*

<sup>3</sup> *L. V. Pisarzhevskii Institute of Physical Chemistry, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine*

\*Corresponding author: [o.i.kyrylenko@udu.edu.ua](mailto:o.i.kyrylenko@udu.edu.ua)

### **FEATURES OF THE ELECTROPHYSICAL CHARACTERISTICS OF GaAsP LIGHT-EMITTING DIODES. HYSTERESIS PHENOMENON**

The results of studies of the electro-physical characteristics of GaAsP light-emitting diodes (LEDs) in the temperature range of 77–300 K are presented. The mechanisms of current flow in different regions of the I–V characteristic and the role of screening of internal crystal fields by free carriers are discussed. The formation of a hysteresis loop in the I–V characteristic of the diode within the region of negative differential resistance is revealed, and possible causes for each section are analyzed. The activation energy of the transition process of the LED to the VDO state is determined. It is established that irradiation of GaAsP LEDs is accompanied by an increase in the non-ideality coefficient.

*Keywords:* GaAsP, LED, negative differential resistance, electro-physical characteristics, hysteresis phenomenon.

Надійшла / Received 27.10.2025