ORCID: 0009-0009-5255-8042

М. Б. Пінковська
Старший науковий співробітник відділу радіаційної фізики,
Інститут ядерних досліджень НАН України, м.Київ, Україна,
M.Pinkovska@nas.gov.ua

ORCID: 0000-0003-4682-4569

Д. П. Стратілат
Аспірант, провідний інженер групи управління реакторами дослідницького ядерного реактора Інституту ядерних досліджень НАН України, м.Київ, Україна,
reactor_104@ukr.net

ORCID: 0000-0002-6550-458X

В. П. Тартачник
Доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник відділу радіаційної фізики Інституту ядерних досліджень НАН України, м.Київ, Україна,
tartachnyk@gmail.com

ORCID: 0000-0002-9956-9429

М. Є. Чумак
Доктор педагогічних наук, професор кафедри інформаційних технологій та програмування факультету математики, інформатики та фізики Українського державного університету імені Михайла Драгоманова, м.Київ, Україна,
chumak.m.e@gmail.com

DOI: 10.31651/2076-5851-2023-37-48 PACS 85.60.Jb

СПЕКТРАЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ S – ДІОДІВ, ВИРОЩЕНИХ НА ОСНОВІ ФОСФІДУ ГАЛІЮ

Досліджувались фосфідо-галієві гомоперехідні світлодіоди (СД), вирощені епітаксійним методом на монокристалічній підкладинці GaP, одержаній із кристала, вирощеного методом Чохральського; n- область легувалась Te та N; p – область – Zn. У спектрі електролюмінесценції при 77 К виявлено лінії екситона, зв'язаного на ізоелектронній домішці N та на парах сусідніх атомів NN_1 із фононними повтореннями; досліджена їхня температурна стабільність та залежність від величини струму інжекції. Визначена температурна стабільність та енергія активності обох смуг. Проведені оцінки коефіцієнта пошкодження часу життя неосновних носіїв струму. Проаналізовано можливі варіанти механізмів формування області від'ємного диференціального опору (ВДО) на вольт-амперних характеристиках (ВАХ) досліджуваних зразків. Висловлюється припущення, що найімовірнішими причинами виникнення ВДО у СД GaP можна вважати міждолинне перенесення носіїв та супутній йому інжекційно-рекомбінаційний механізм посилення струму.

Мета виконаної нами роботи полягає в уточнені природи спектральних закономірностей, властивих гомоперехідним СД GaP, визначенні констант радіаційної стійкості, а також в установленні можливого механізму виникнення ділянки від'ємної диференційної провідності на ВАХ СД GaP.

Встановлено, що спектр свічення досліджуваних СД GaP(N) при 77 К складається із двох смуг λ_{max1}=546 нм та λ_{max2}=575 нм; енергія активації кожної відповідно становить E_{a1}=37 меВ та E_{a2}=26 меВ. Природа випромінювання обох відповідає рекомбінації зв'заного екситона на ізоелектронній домішці N. Зростання струму інжекції супроводжується збільшенням інтенсивності свічення, причому інтенсивність смуги зумовленої рекомбінацією екситона на ізольованому атомі N, зростає у межах всього інтервалу температур вимірювання 77÷300 К; інтенсивність смуги, пов'язаної з рекомбінацією екситона на парах NN_1 зростає лише до температури 190 К, після чого починає зменшуватись.

Виявлено, що у СД GaP в області низьких температур 90÷77 К на ВАХ виникає ділянка ВДО. Її виникнення може бути зумовлене спільним впливом двох механізмів – міждолинного розсіяння носіїв струму та різким зростанням електропровідності бази діода внаслідок дії світлового потоку, що створює умови для формування оберненого позитивного зв'язку за струмом.

Ключові слова: світлодіод, опромінення, GaP, спектральна характеристика, від'ємний диференціальний опір, вольт-амперна характеристика, електролюмінесценція

1. Вступ

Важлива перевага гомоперехідних світлодіодів (СД), вирощених на базі фосфіду галію порівняно з гетероперехідними InGaN, AlGaN та ін. – простота технології одержання, яка забезпечує їм широту області застосування. Окрім типових випадків, наразі розвинулась значна кількість напрямків використання як самого матеріалу – монокристалів GaP для виготовлення приладів нового типу, так і для створення нових мікроелектронних модулів із розширеними функціями на основі традиційних СД.

Автори робіт [1, 2] зазначають, що структура GaP на ізоляторі (GaP –on insulator) може служити платформою для нелінійної оптики при використанні прямого сполучення пластин інтегрованих хвилеводів у телекомунікаційному діапазоні. Ефективна генерація другої гармоніки у нанофотонних конструкціях на основі діелектричних наноструктур вимагає матеріалів із великим значенням квадратової нелінійної сприятливості, низькими втратами та значним показником заломлення. Фосфід галію якраз і належить до кристалів, які задовольняють необхідні вимоги.

Автори [2] запропонували метод підвищення кристалічної якості поверхонь GaP, яка пов'язана з нелінійністю другого порядку. Пряме зростання шару GaP на сапфірі поліпшує оптичний контакт між резонансними наночастинками та підкладинкою.

У роботі [3] наведені результати вирощування шару розчину GaPAsN на підкладинці GaP, у результаті чого одержано «білий» СД із ультраширокім спектром випромінювання 350 ÷ 1050 нм, який перекриває всю видиму область та частину ближнього ІЧ – діапазону. Відмічається, що світловий потік, проходячи через підкладинку GaP, втрачає свою коротко-хвильову частину.

Фосфід галію може також служити основою для виготовлення лазерів комбінаційного розсіювання. Пропонується [4] модель лазера Рамана, який працює у видимому діапазоні з наноциліндричним GaP резонатором; розмір прилада – менший довжини робочої хвилі.

Нанодроти GaPAs/GaP- основний елемент легких повнокольорових дисплеїв, які використовуються у переносних біомедичних та транспортних пристроях [5]. Результати досліжень, виконаних у роботах[6-8], показали, що високоякісні дроти мають великий потенціал для фононних та оптоелектронних досліджень.

Вплив структурних пошкоджень та дефектів радіаційного походження на характеристики СД GaP вивчено недостатньо. У переважній більшості публікацій автори зосереджуються на дослідженні деградаційних явищ, які стосуються змін люмінесценції та деградації часу життя неосновних носіїв заряду[9-15].

Зниження вартості електроенергії сонячного елемента можна досягнути поєднанням сполуки $A^{III}B^{V}$ та кремнієвої підкладинки, вирощеної за відносно дешевою технологією. Фосфід галію – зручний для цієї мети матеріал внаслідок близькості параметрів граток обох напівпровідників [16, 17].

Приведений вище короткий огляд опублікованих раніше результатів досліджень монокристалічного GaP і структурних композицій на його основі свідчить про актуальність та перспективність пошуку, спрямованого на розширення області знань про механізми рекомбінаційних процесів у досліджуваних об’єктах.

Мета виконаної нами роботи полягає в уточнені природи спектральних закономірностей, властивих гомоперехідним СД GaP, визначенні констант радіаційної стійкості, а також в установленні можливого механізму виникнення ділянки від’ємної диференційної провідності на ВАХ СД GaP.

2. Експеримент

Досліджувались світлодіоди GaP λ_{max1}= 546 нм та λ_{max2}=553 нм; Спектри електролюмінесценції знімалися за допомогою спектрометра Green-Wave (350-1150 нм) в інтервалі температур 77°-290°K у межах струмів I=1÷20 mA. Величина квантового виходу η вимірювалася при кімнатній температурі.

Вольт-амперні характеристики (ВАХ) СД знімались у межах 77°÷300°K за допомогою автоматичного пристрою у режимах генератора струму та генератора напруги. Опромінювання електронами з E=2 МеВ відбувалося у імпульсному режимі на прискорювачі ИЛУ-6 зі струмом пучка I=4 мА; температура опромінювання підтримувалась близькою до 300 К завдяки інтенсивному повітряному охолодженню. Густина електронних потоків змінювалась від 10^{14}см$^{-2}$ до 10^{16}см$^{-2}$.

3. Результати

На рис.1-5 показані спектральні характеристики СД GaP, зняті при температурах 77 К, 125 К, 175 К, 190 К та 300 К. Високоенергетичний дублет λ_{max1}= 546 нм та λ_{max2}=553 нм виникає внаслідок рекомбінації зв’язаного на атомі азоту екситона з випромінюванням поперечних акустичних фононів; низькоенергетична смуга – результат рекомбінації екситона, зв’язаного на парі найближчих атомів NN_1, яка також супроводжується фононною емісією[14].

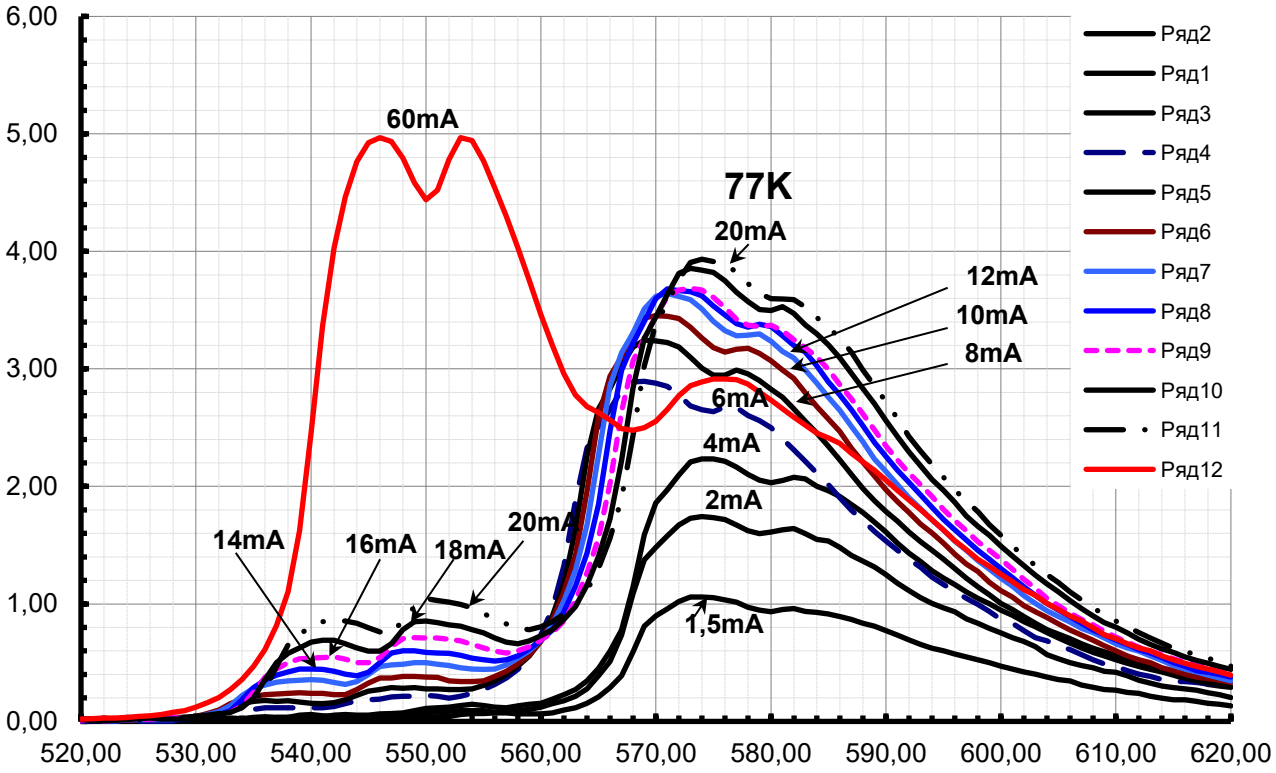


Рис. 1 спектральні характеристики СД GaP T=77K
Fig. 1 spectral characteristics of GaP LEDs T=77K

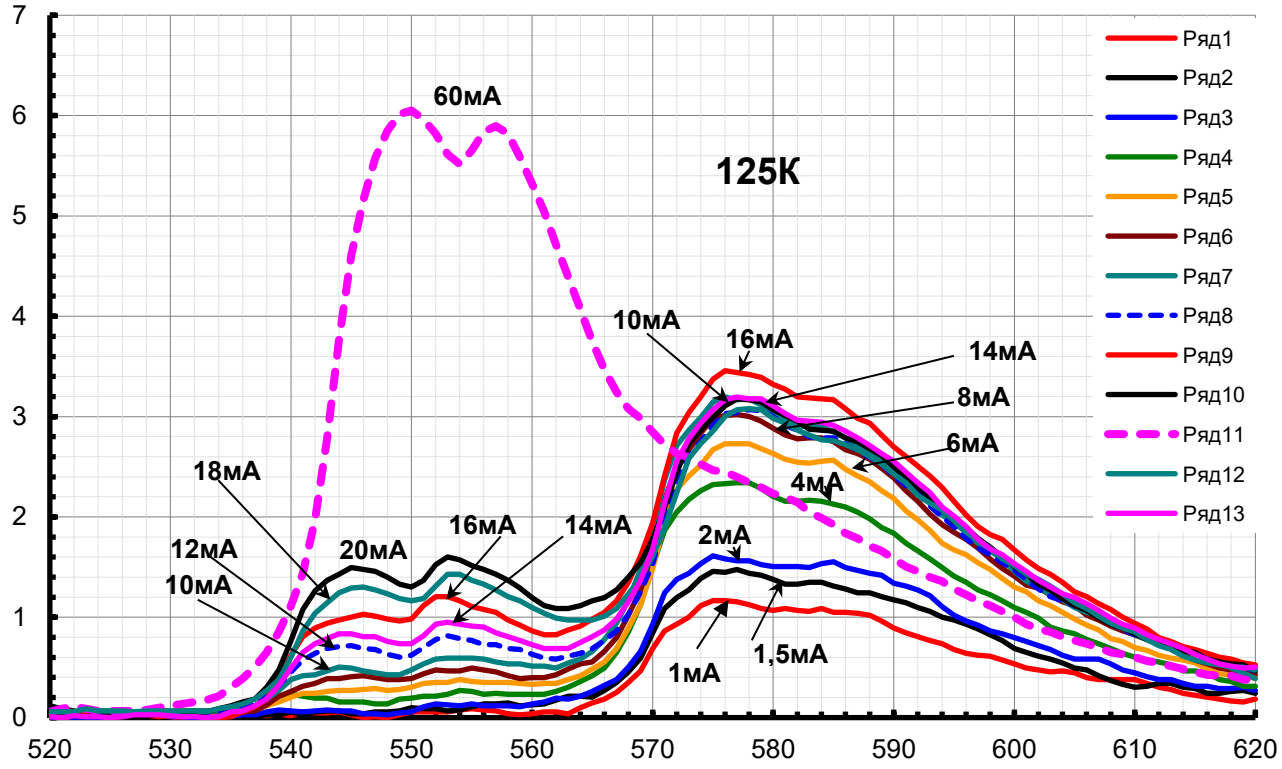


Рис. 2 спектральні характеристики СД GaP T=125K
Fig. 2 spectral characteristics of GaP LEDs T=125K

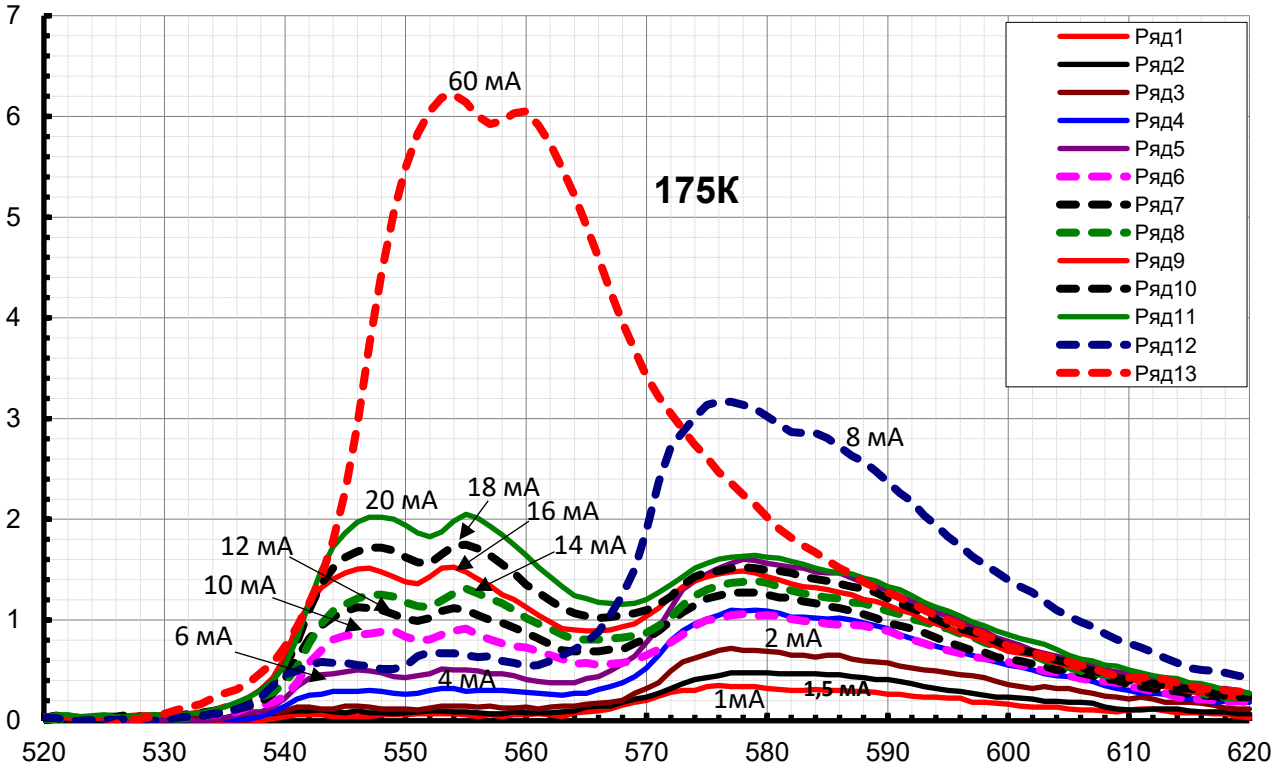


Рис. 3 спектральні характеристики СД GaP T=175K
Fig. 3 spectral characteristics of GaP LEDs T=175K

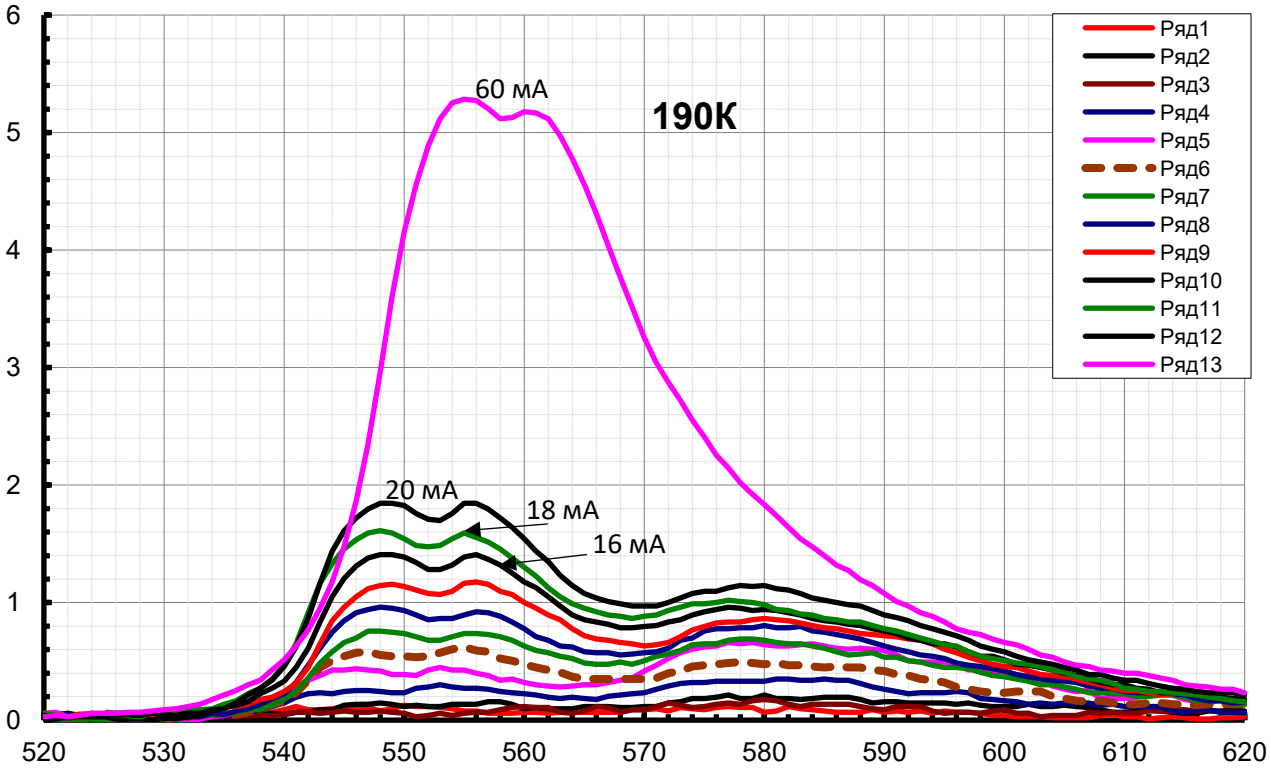


Рис. 4 спектральні характеристики СД GaP T=190K
Fig. 4 spectral characteristics of GaP LEDs T=190K

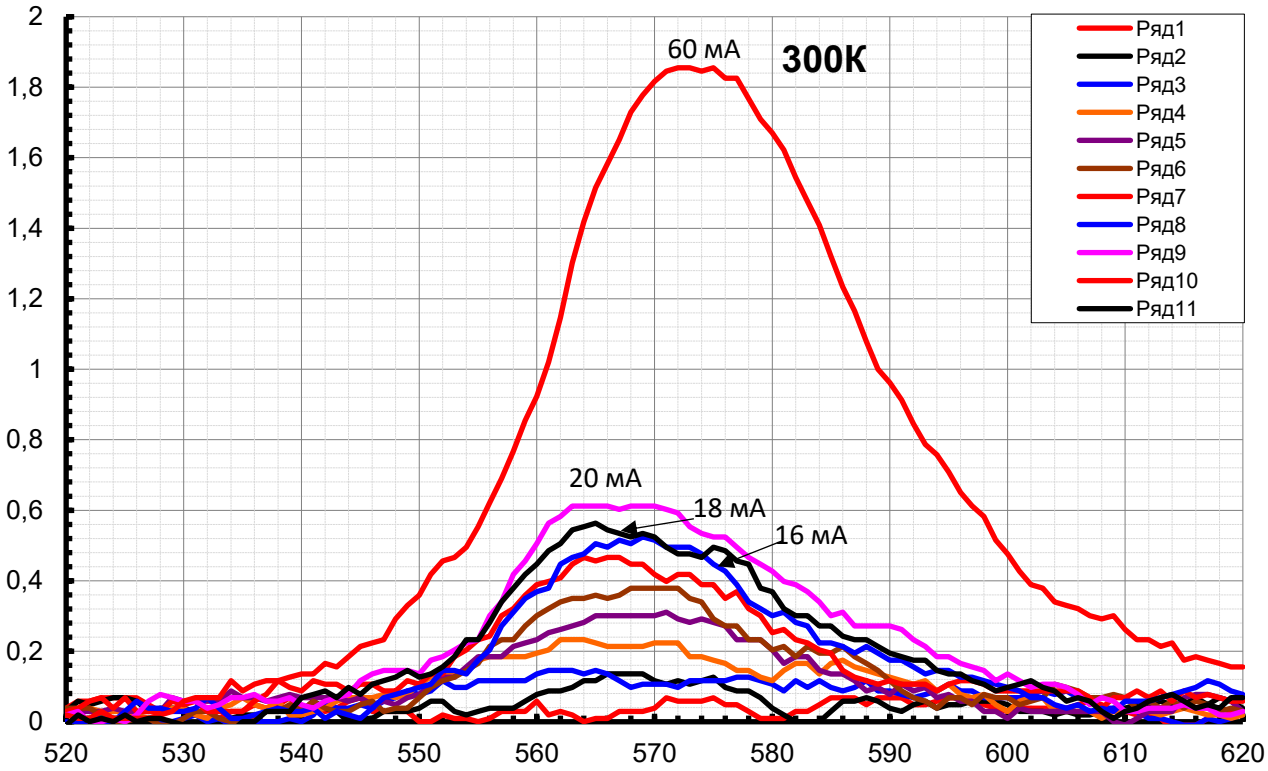


Рис. 5 спектральні характеристики СД GaP T=300K
Fig. 5 spectral characteristics of GaP LEDs T=300K

За формулою Мотта

$$I_{\text{інт.}} = \frac{I_{\text{інт.0}}}{1+\alpha \exp\left(-\frac{E_A}{KT}\right)} \quad (1)$$

можна оцінити енергію активації смуг λ_{max}=546 нм та λ_{max}=575 нм (E_{a1}=37 меВ; E_{a2}=26 меВ – відповідно). Лініям N – 2 ТА, N – 3ТА властиве зростання інтенсивності зі збільшенням інжекційного струму в інтервалі 77 ÷ 300 К; інтенсивність рекомбінації на сусідніх атомах азоту NN_1 зростає лише до температури 190 К, після чого починає зменшуватись і стає непомітною вже при T=225 К (рис. 3-5).

Залежність інтенсивності лінії NN_1 – 2ТА (λ=575 нм) від струму можна простежити лише при низьких температурах, де вона проявляється достатньо виразно. У межах I=1÷15 мА вона швидко зростає; проходячи через широкий максимум – повільно зменшується після I≅20 мА. Очевидно, що число близьких пар NN_1 в одиниці об'єму порівняно з числом окремих атомів азоту – менше. Тому зростання струму приводить до швидкого насичення рекомбінаційних центрів NN_1; повільне зменшення інтенсивності свічення після I=20 мА найімовірніше пов'язане з тепловим руйнуванням екситонів, дія якого стає помітною лише при великих струмах (I=60 мА).

Оцінка впливу опромінення на інтенсивність випромінювальної рекомбінації здійснюється введенням коефіцієнта пошкодження часу життя неосновних носіїв заряду K_τ для доз, де різниця обернених часів життя опроміненого СД та вихідного пропорційна флюенсу

$\frac{1}{\tau_\Phi} - \frac{1}{\tau_0} = K_\tau \Phi$; τ_0 - час життя неосновних носіїв струму у вихідному діоді;

$\frac{\tau_0}{\tau_\Phi} = 1 + \tau_0 K_\tau$; τ_Φ- час життя неосновних носіїв струму в опроміненому діоді.

але $\frac{\tau_0}{\tau_Ф} = \frac{L_0}{L}$; тоді $\frac{L_0}{L} - 1 = \tau_0 К_\tau Ф$ і $К_\tau$ визначається за нахилом дозної залежності функції $\left(\frac{L_0}{L} - 1\right)^m$.

На рис. 6 наведено її вигляд для зеленого СД, коли m=2/3 і m=1/3. Вибір показників залежить від механізму протікання струму через СД: якщо переважає дифузійна компонента (коефіцієнт неідеальності (n=1), m=2/3; коли ж основна компонента струму – рекомбінаційна (n=2), m=1/3[13].

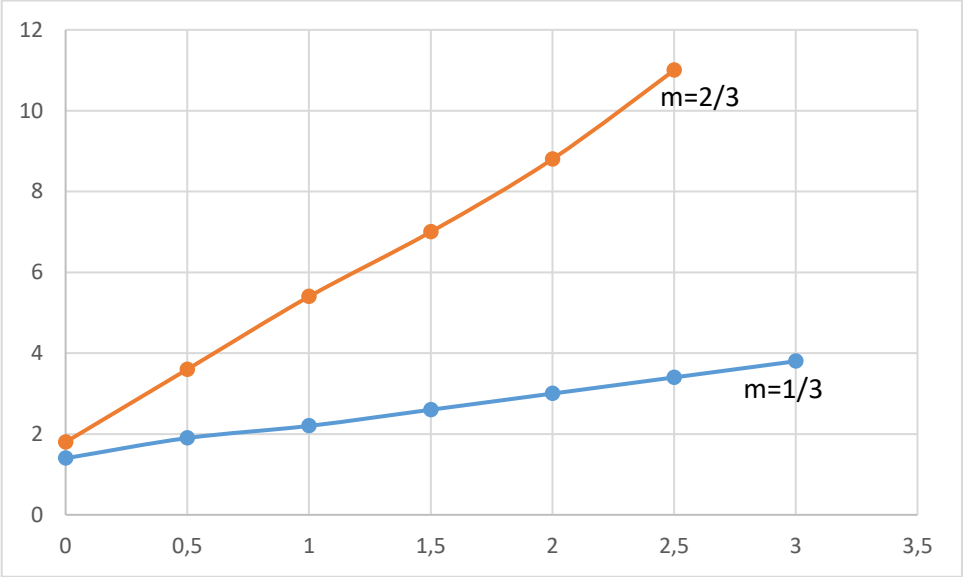


Рис. 6 Дозна залежність величини $\left(\frac{L_0}{L} - 1\right)^m$ ($E_{ел}$=2 МеВ)

Fig. 6 Dose dependence of the value $\left(\frac{L_0}{L} - 1\right)^m$ (E_{el}=2 MeV)

У досліджуваних діодах m=1,6, тому реальні величини коефіцієнта радіаційного пошкодження часу життя неосновних носіїв заряду зеленого СД знаходяться між двома значеннями. $К_\tau^{\frac{1}{3}}$=0,45·10^{-8} см^{2}с$^{-1}$ та $К_\tau^{\frac{2}{3}}$=1,18·10^{-8} см$^{-2}$с$^{-1}$; для розрахунку $К_\tau$ використана величина τ_0^{GaP}=8·10^{-7}с[14].

В основі виникнення від'ємного диференціального опору (ВДО) на ВАХ діодів можуть лежати різні механізми, які здатні забезпечити внутрішній позитивний зв'язок – подвійна інжекція носіїв струму, вплив рекомбінаційного випромінювання, резонансне тунелювання, специфіка зонної структури та ін. Автори [20], розглядаючи різні концепції, схиляються до думки, що низькотемпературна особливість у вигляді ВДО, виявлена на ВАХ СД GaP у межах 90÷77 К, зумовлена структурою С – зони.

При обговоренні механізму існування позитивного зв'язку у СД GaP слід зважати на обставину, що світлодіод – джерело потужного внутрішнього випромінювання, здатного багатократно збільшувати концентрацію вільних носіїв у базі, а відтак і спричиняти подальше наростання струму. Якщо стрімке падіння напруги на СД і збільшення струму після т. А (рис. 7) зумовлене відкриттям безвипромінювального рекомбінаційного каналу, інтенсивність повинна різко зростати.

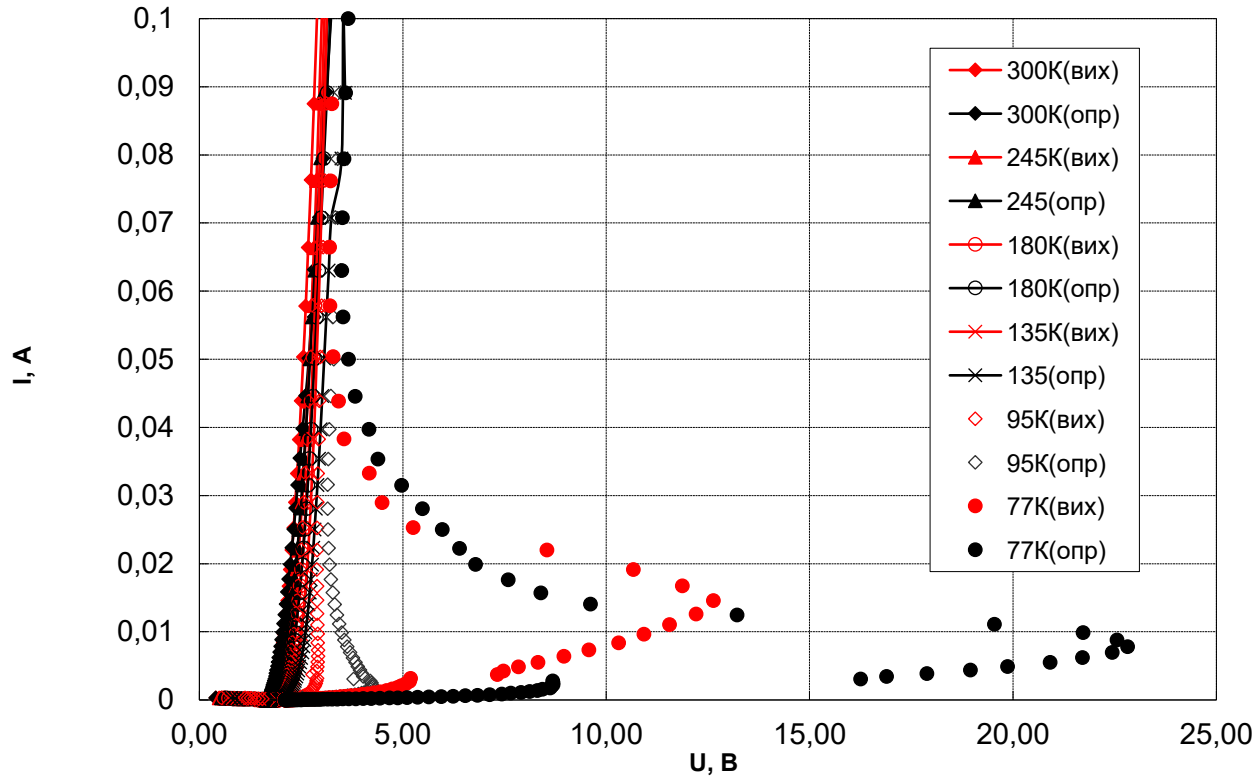


Рис. 7 ВАХ вихідного і опроміненого електронами з E=2 МеВ, Ф=6,5·10^{15} см$^{-2}$
Fig. 7 CVC of the original and irradiated with electrons with E=2 MeV, Ф=6.5·10^{15} cm^{-2}

Коли ж зростання струму після входження діода у режим ВДО (рис. 7) т. А, I= 15 мА, U=13 В) відбувається через той самий, але випромінювальний канал, інтенсивність свічення СД також повинна скачкоподібно зростати; з рис. 1 видно, що у межах 15÷20 мА вона змінюється поступово.

Третій можливий варіант - виникнення ВДО зумовлене формування шнура струму за участі випромінювального каналу, але іншої природи, тоді у спектрі мала б виникнути додаткова смуга.

Проте наслідки висловлених припущень експериментально не спостерігаються (рис. 1-5)

Отже, перехід до стану ВДО у досліджуваних діодах не змінює природи інжекційно-рекомбінаційного каналу струмопротікання.

Позитивний обернений зв'язок за струмом може виконувати як головну функцію при формуванні негативного опору, так і відігравати роль додаткового фактора, що сприяє посиленню ефекта міждолинного розсіяння носіїв, використаного у роботі [20] для обгрунтування механізму виникнення ВДО у СД GaP.

4. Висновки

Встановлено, що спектр свічення досліджуваних СД GaP(N) при 77 К складається із двох смуг λ_{max1}=546 нм та λ_{max2}=575 нм; енергія активації кожної відповідно становить E_{a1}=37 меВ та E_{a2}=26 меВ. Природа випромінювання обох відповідає рекомбінації зв'заного екситона на ізоелектронній домішці N. Зростання струму інжекції супроводжується збільшенням інтенсивності свічення, причому

інтенсивність смуги зумовленої рекомбінацією екситона на ізольованому атомі N, зростає у межах всього інтервалу температур вимірювання 77÷300 К; інтенсивність смуги, пов'язаної з рекомбінацією екситона на парах NN_1 зростає лише до температури 190 К, після чого починає зменшуватись. ЇЇ нижча термостабільність наслідок меншої глибини залягання рівня NN_1. Величина коефіцієнта пошкодження часу життя електронами знаходиться в межах $(0{,}11\div0{,}45)\cdot10^{-8}$ см^{2}с$^{-1}$.

Виявлено, що у СД GaP в області низьких температур 90÷77 К на ВАХ виникає ділянка ВДО. Її виникнення може бути зумовлене спільним впливом двох механізмів – міждолинного розсіяння носіїв струму та різким зростанням електропровідності бази діода внаслідок дії світлового потоку, що створює умови для формування оберненого позитивного зв'язку за струмом.

Список використаної літератури:

1. Wilson, D.J., Schneider, K., Hönl, S. et al. Integrated gallium phosphide nonlinear photonics. Nat. Photonics 14, 57–62 (2020). https://doi.org/10.1038/s41566-019-0537-9

2. Daria Khmelevskaia, Daria Markina, Vladimir Fedorov et al. Directly grown crystalline gallium phosphide on sapphire for nonlinear all-dielectric nanophotonics Appl. Phys. Lett. 118, 201101 (2021) DOI:10.1063/5.0048969

3. Babichev, A.V., Lazarenko, A.A., Nikitina, E.V. et al. Ultra-wide electroluminescence spectrum of LED heterostructures based on GaPAsN semiconductor alloys. Semiconductors 48, 501–504 (2014). https://doi.org/10.1134/S106378261404006X

4. Daniil Riabov, Ruslan Gladkov, Olesia Pashina, Andrey Bogdanov, Sergey Makarov Subwavelength Raman Laser Driven by Quasi Bound State in the Continuum 20 Jul 2023 arXiv:2307.10850 [physics.optics] (or arXiv:2307.10850v1 [physics.optics] for this version) https://doi.org/10.48550/arXiv.2307.10850

5. V. Neplokh, V. Fedorov, A. Mozharov, F. Kochetkov, K. Shugurov, E. Moiseev, I. Mukhin, Red GaPAs/GaP Nanowire-Based Flexible Light-Emitting Diodes, Nanomaterials 11(10), 2549 (2021); https://doi.org/10.3390/nano11102549

6. Parsian Katal Mohseni, A. D. Rodrigues, J. C. Galzerani, Yu. A. Pusep Structural and optical analysis of GaAsP/GaP core-shell nanowires Journal of Applied Physics 106(12):124306 - 124306-7 DOI:10.1063/1.3269724

7. Omer Arif et al. GaAs/GaP superlattice nanowires: growth, vibrational and optical properties Nanoscale, 2023,15, 1145-1153 https://doi.org/10.1039/D2NR02350D

8. A. Dobrovolsky et al. Optical Studies and defect properties of GaP/GaNP core/shell nanowires. Nanoscale Research Letters 8 (2013) 239. http://dx.doi.org/10.1186/1556-276X-8-239

9. Cher Ming Tan, Chao-Sung Lai Systematic Root Cause Analysis for GaP Green Light LED Degradation IEEE Transactions on Device and Materials Reliability 13(1):156-160 DOI:10.1109/TDMR.2012.2225106

10. Kathryn Conway Dimiduk; Christian Quarles Ness; James Kevin Foley Electron Irradiation of GaAsP LEDs IEEE Transactions on Nuclear Science (Volume: 32, Issue: 6, December 1985) pp. 4010 – 4015 DOI: 10.1109/TNS.1985.4334060

11. Коршунов Ф.П., Гатальский Г.В., Иванов Г.М. Радиационные эффекты в полупроводниковых приборах. Минск: Наука и техника, 1978. 231 с.

12. О. В. Конорева, Є. В. Малий, І. В. Петренко, М. Б. Пінковська, В. П. Тартачник, В. В. Шлапацька Electrical and optical characteristics of GaP diodes, irradiated with 2 MeV electrons Nuclear Physics and Atomic Energy 15(4):349-352

13. Конорова О.В., Радкевич О.І., Слісенко В.І., Тартачник В.П. Вплив дефектів структури на фізичні властивості окремих напівпровідникових сполуках $A^{III}B^{V}$. 2021, «Наукова думка», с. 198

14. О.П. Будник, Р.М. Вернидуб, О.І. Кириленко, П.Г. Литовченко, О.І. Радкевич, Д.П.Стратілат, В.П. Тартачник Деградаційно відновні особливості опромінених світлодіодів Ядерна фізика та енергетика, 2022, V23, N2, p 116-121

15. M. Vernydub, O.I. Kyrylenko, O.V.Konoreva, O.I. Radkevych, V.P.Tartachnyk, D.P.Stratilat. R.M. Vernydub et al. Degradation-Reduction Features of Electrophysical Characteristics of Irradiated Gallium Phosphide Light-Emitting Diodes. Acta Physica Polonica A 140 (2021) 141. http://doi.org/10.12693/APhysPolA.140.141

16. Martin Diaz, DESIGN, FABRICATION, CHARACTERIZATION, AND ANALYSIS OF WIDE BAND GAP GALLIUM PHOSPHIDE SOLAR CELLS AND GALLIUM PHOSPHIDE ON SILICON University of Delaware 2011, pp. 1-51

17. A. S. Gudovskikh, K. S. Zelentsov, Artem Baranov et al. Study of GaP/Si Heterojunction Solar Cells Energy Procedia 102:56-63 DOI:10.1016/j.egypro.2016.11.318

18. B. H. Rose, C. Barnes Proton damage effects on light emitting diodes J. Appl. Phys. 53, 1772–1780 (1982) https://doi.org/10.1063/1.331649

19. Берг А. Дин П. Светодиоды М., Мир, 1979, с. 686

20. G.Gaydar, O. V.Konoreva, Ye.Maliy, Ya.M.Olikh, O.I.Radkevych, V.P.Tartachnyk,About bond model of S-type negative differential resistance in GaP LEDs// Superlattices and Microstructures. V.104-P.316- 320, 2017

References:

1. Wilson, DJ, Schneider, K., Hönl, S. et al. Integrated gallium phosphide nonlinear photonics. Nat. Photonics 14, 57–62 (2020). https://doi.org/10.1038/s41566-019-0537-9

2. Daria Khmelevskaia, Daria Markina, Vladimir Fedorov et al. Directly grown crystalline gallium phosphide on sapphire for nonlinear all-dielectric nanophotonics Appl. Phys. Lett. 118, 201101 (2021) DOI:10.1063/5.0048969

3. Babichev, AV, Lazarenko, AA, Nikitina, EV et al. Ultra-wide electroluminescence spectrum of LED heterostructures based on GaPAsN semiconductor alloys. Semiconductors 48, 501–504 (2014). https://doi.org/10.1134/S106378261404006X

4. Daniil Riabov, Ruslan Gladkov, Olesia Pashina, Andrey Bogdanov, Sergey Makarov Subwavelength Raman Laser Driven by Quasi Bound State in the Continuum 20 Jul 2023 arXiv:2307.10850 [physics.optics] (or arXiv:2307.10850v1 [physics.optics] for this version) https://doi.org/10.48550/arXiv.2307.10850

5. V. Neplokh, V. Fedorov, A. Mozharov, F. Kochetkov, K. Shugurov, E. Moiseev, I. Mukhin, Red GaPAs/GaP Nanowire-Based Flexible Light-Emitting Diodes, Nanomaterials 11(10), 2549 (2021); https://doi.org/10.3390/nano11102549

6. Parsian Katal Mohseni, AD Rodrigues, JC Galzerani, Yu. A. Pusep Structural and optical analysis of GaAsP/GaP core-shell nanowires Journal of Applied Physics 106(12):124306 - 124306-7 DOI:10.1063/1.3269724

7. Omer Arif et al. GaAs/GaP superlattice nanowires: growth, vibrational and optical properties Nanoscale, 2023,15, 1145-1153 https://doi.org/10.1039/D2NR02350D

8. A. Dobrovolsky et al. Optical studies and defect properties of GaP/GaNP core/shell nanowires. Nanoscale Research Letters 8 (2013) 239. http://dx.doi.org/10.1186/1556-276X-8-239

9. Cher Ming Tan, Chao-Sung Lai Systematic Root Cause Analysis for GaP Green Light LED Degradation IEEE Transactions on Device and Materials Reliability 13(1):156-160 DOI:10.1109/TDMR.2012.2225106

10. Kathryn Conway Dimiduk; Christian Quarles Ness; James Kevin Foley Electron Irradiation of GaAsP LEDs IEEE Transactions on Nuclear Science (Volume: 32, Issue: 6, December 1985) pp. 4010 – 4015 DOI: 10.1109/TNS.1985.4334060

11. Korshunov F.P., Gatalskyi G.V., Ivanov H.M. Radiation effects in semiconductor devices. Minsk: Science and Technology, 1978. 231 p.
12. O. V. Konoreva, E. V. Maly, I. V. Petrenko, M. B. Pinkovska, V. P. Tartachnyk, V. V. Shlapatska Electrical and optical characteristics of GaP diodes, irradiated with 2 MeV electrons Nuclear Physics and Atomic Energy 15(4):349-352
13. Konorova O.V., Radkevich O.I., Slisenko V.I., Tartachnyk V.P. The influence of structure defects on the physical properties of certain semiconductor compounds $A^{III}B^{V}$. 2021, "Scientific opinion", p. 198
14. O.P. Budnyk, R.M. Vernydub, O.I. Kyrylenko, P.G. Lytovchenko, O.I. Radkevich, D.P. Stratilat, V.P. Tartachnyk Degradation-restorative features of irradiated LEDs Nuclear physics and energy, 2022, V23, N2, p 116-121
15. M. Vernydub, OI Kyrylenko, OVKonoreva, OI Radkevych, VPTartachnyk, DPStratilat. RM Vernydub et al. Degradation-Reduction Features of Electrophysical Characteristics of Irradiated Gallium Phosphide Light-Emitting Diodes. Acta Physica Polonica A 140 (2021) 141. http://doi.org/10.12693/APhysPolA.140.141
16. Martin Diaz, DESIGN, FABRICATION, CHARACTERIZATION, AND ANALYSIS OF WIDE BAND GAP GALLIUM PHOSPHIDE SOLAR CELLS AND GALLIUM PHOSPHIDE ON SILICON University of Delaware 2011, pp. 1-51
17. AS Gudovskikh, KS Zelentsov, Artem Baranov et al. Study of GaP/Si Heterojunction Solar Cells Energy Procedia 102:56-63 DOI:10.1016/j.egypro.2016.11.318
18. BH Rose, C. Barnes Proton damage effects on light emitting diodes J. Appl. Phys. 53, 1772–1780 (1982) https://doi.org/10.1063/1.331649
19. Berg A. Dyn P. Svetodiody M., Mir, 1979, p. 686
20. G.Gaydar, OVKonoreva, Ye.Maliy, Ya.M.Olikh, OIRadkevych, VPTartachnyk, About bond model of S-type negative differential resistance in GaP LEDs// Superlattices and Microstructures. V.104-P.316-320, 2017

Myroslava Pinkovska
Senior Researcher at the Department of Radiation Physics, Institute for Nuclear Research, NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine,
M.Pinkovska@nas.gov.ua

Dmytro Stratilat
Postgraduate student, Lead Engineer in the Reactor control group at nuclear research reactor, Institute for Nuclear Research, NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine,
reactor_104@ukr.net

Volodymyr Tartachnyk
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher at the Department of Radiation Physics, Institute for Nuclear Research, NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine,
tartachnyk@gmail.com

Mykola Chumak
Doctor of Pedagogical Sciences , Professor of the Department of Information Technologies and Programming of the Faculty of Mathematics, Informatics and Physics, Dragomanov Ukrainian State University, Kyiv, Ukraine,
chumak.m.e@gmail.com

SPECTRAL CHARACTERISTICS OF S - DIODES GROWN ON THE BASIS OF GALLIUM PHOSPHIDE

Phosphido-gallium homojunction a light-emitting diode (LEDs) grown by the epitaxial method on a single-crystal GaP substrate obtained from a crystal grown by the Czochralsky method were investigated; n- region doped with Te and N; p – region – Zn. In the electroluminescence spectrum at 77 ℃K, exciton lines bound on the isoelectronic impurity N and on pairs of neighboring NN1 atoms with phonon repetitions were detected; their temperature stability and dependence on the value of the injection current were investigated. The temperature stability and activity energy of both bands were determined. Evaluations of the damage coefficient of the life time of non-main current carriers have been carried out. Possible variants of the formation mechanisms of the region of negative differential resistance (NDR) on the current- voltage characteristics (CVC) of the studied samples were analyzed. It is suggested that intervalley transfer of carriers and the accompanying injection-recombination mechanism of current enhancement can be considered the most probable causes of the occurrence of NDR in GaP diodes.

The purpose of our work is to clarify the nature of the spectral regularities characteristic of homotransition GaP LEDs, to determine the radiation resistance constants, as well as to establish a possible mechanism for the occurrence of a region of negative differential conductivity on the CVC of GaP LEDs.

It was established that the luminescence spectrum of the investigated GaP(N) LEDs at 77 ℃K consists of two bands λ_{max1}=546 nm and λ_{max2}=575 nm; the activation energy of each is E_{a1}=37 meV and E_{a2}=26 meV, respectively. The nature of the radiation of both corresponds to the recombination of the bound exciton on the isoelectronic impurity N. The increase in the injection current is accompanied by an increase in the intensity of the glow, and the intensity of the band caused by the recombination of the exciton on the isolated N atom increases within the entire measurement temperature interval of 77÷300 ℃K; the intensity of the band associated with exciton recombination on NN_1 pairs increases only up to a temperature of 190 ℃K, after which it begins to decrease.

It was found that in the GaP LED in the region of low temperatures of 90÷77 ℃K on the CVC curve, a section of the NDR occurs. Its occurrence can be caused by the joint effect of two mechanisms - intervalley scattering of current carriers and a sharp increase in the electrical conductivity of the diode base due to the action of the light flux, which creates conditions for the formation of an inverse positive current connection.

Keywords: LEDs, irradiation, GaP, spectral characteristic, negative differential resistance, current-voltage characteristic, electroluminescence

Одержано редакцією 18.07.2023
Прийнято до друку 23.09.2023