

І.В. Коляденко¹, П.Г. Литовченко¹, В.Я. Опилат², І.В. Петренко¹,
В.П. Тартачник¹, В.І. Хіврич¹

Деградація фосфідо-галієвих світлодіодів, обумовлена радіаційними дефектами

¹Науковий центр Інститут ядерних досліджень АН України;

² НПУ імені М.П. Драгоманова; Інститут ядерних досліджень НАН України, пр. Науки 47,
м.Київ, 03028, Україна, e-mail: opylat@ua.fm

Досліджувалась природа деградації свідчення GaP світлодіодів. Виявлено зростання тунельної складової ВАХ при опроміненні γ -квантами та при тривалому пострадіаційному зберіганні. Встановлено, що особливу роль у деградації свідчення відіграє міжрівневе тунелювання носіїв.

Ключові слова: фосфід галію, світлодіод, деградація, опромінення, дефект, ВАХ, інжекція, тунелювання.

Стаття постуила до редакції 16.05.2005; прийнята до друку 15.01.2006.

Вступ

Світлодіодні структури, вирощені на основі монокристалів GaP, продовжують залишатися базовими комірками оптронів, активних у видимій області, пристроїв для керування інформаційними потоками в лініях волоконно-оптичного зв'язку, в навігаційних системах, у системах збору та обробки інформації, можуть використовуватися як складові елементи великомасштабних екранів та інше [1-3]. Широкому застосуванню цих виробів сприяють також відносна простота технології та невисока вартість [4].

Важливою особливістю випромінюючих GaP-структур є непрямозонність базового матеріалу, яка зменшує самопоглинання генерованих квантів на виході з кристалу.

Однією з нерозв'язаних проблем інжекційної люмінісценції є деградація свідчення у процесі тривалого пропускання струму через р-n-реперехід, обумовлена недосконалістю кристалічної будови бази приладу, міграційними ефектами в області збідненого шару р-n-переходу та поверхневими ефектами [5-7].

Визначальну роль у механізмах деградації відіграють як найпростіші порушення структури, так і масштабні утворення типу скупчень точкових пошкоджень, або дислокаційні сітки - джерела темних ліній (ДТЛ) та темних плям (ДТП) [8].

Застосування проникаючої радіації - один із способів контрольованого введення у зразок дефектів певного виду в необхідній концентрації.

Відомо, що основні інжекційно-рекомбінаційні процеси, які супроводжуються випромінюванням світла у GaP, відбуваються у шарі обмеженої товщини - $d \approx 10$ мкм, локалізованому поблизу збідненої області р-n-переходу [9].

Тому для встановлення причин, що зумовлюють швидку деградацію свідчення, доцільно використовувати електричні методи досліджень, чутливі до змін в області просторового заряду (ОПЗ) і з допомогою яких можна виявити роль неінжекційної складової струму.

Необхідність формулювання задачі в такому вигляді обумовлювалася також відсутністю у літературі однозначної інформації щодо локалізації центрів, відповідальних за гасіння електролюмінісценції. У роботі [10], де вивчались зелені діоди GaP, опромінені γ -квантами Co^{60} , падіння інтенсивності свідчення пояснювалося зменшенням часу життя неосновних носіїв у квазінейтральній частині зразка. При цьому відмічалася незмінність генераційно-рекомбінаційних темнових струмів через область просторового заряду. Висновки, приведені у [10] щодо природи зменшення квантового виходу якісно співпадають із даними [11]. Але коли прийняти точку зору висловлену в [10,11], вплив рівнів дефектів, введених в ОПЗ опроміненням, залишається незрозумілим, оскільки при такому способі обробки порушення структури вводяться по об'єму зразка рівномірно.

Остаточно невиясненим залишалось також питання стосовно механізму деградації: який із двох

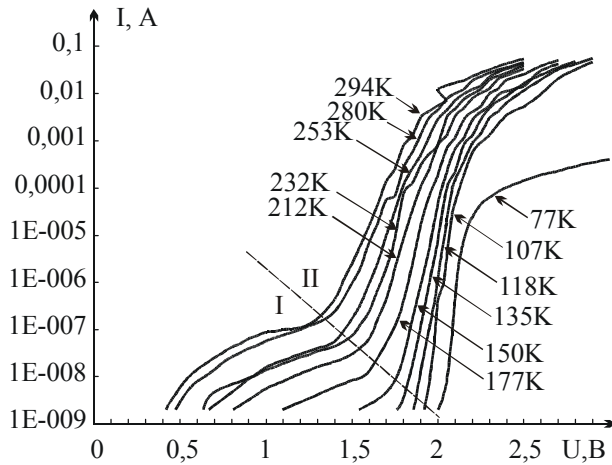


Рис. 1. Температурна залежність вольт-амперних характеристик вихідного світлодіода GaP:N.

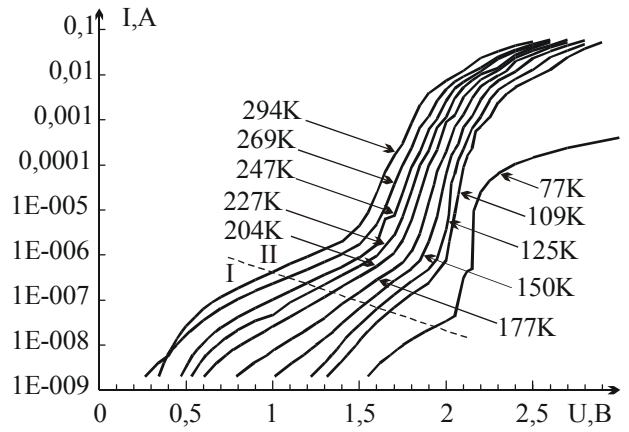


Рис. 2. Температурна залежність вольт-амперних характеристик GaP:N, опроміненого γ -квантами CO^{60} дозою $D=5 \times 10^6$ рад.

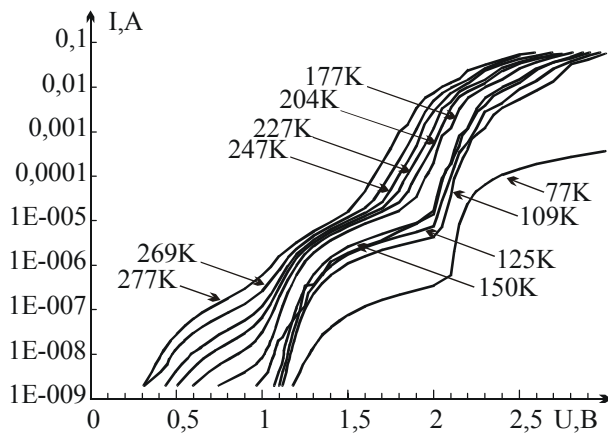


Рис. 3. Температурна залежність вольт-амперних характеристик світлодіода GaP:N, знята через 8,5 місяців після опромінення.

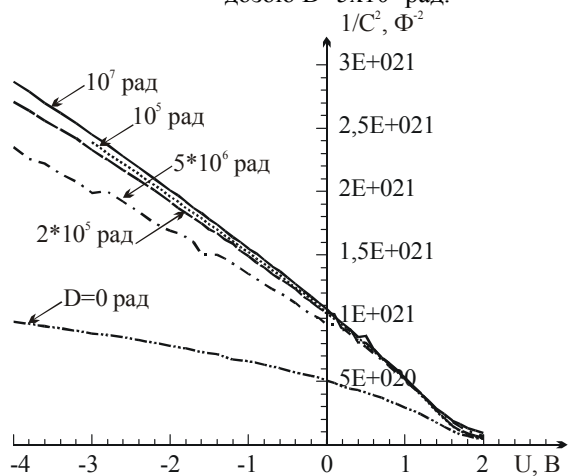


Рис. 4. Дозова залежність вольт-фарадних характеристик, виміряних при кімнатній температурі ($T=294\text{K}$).

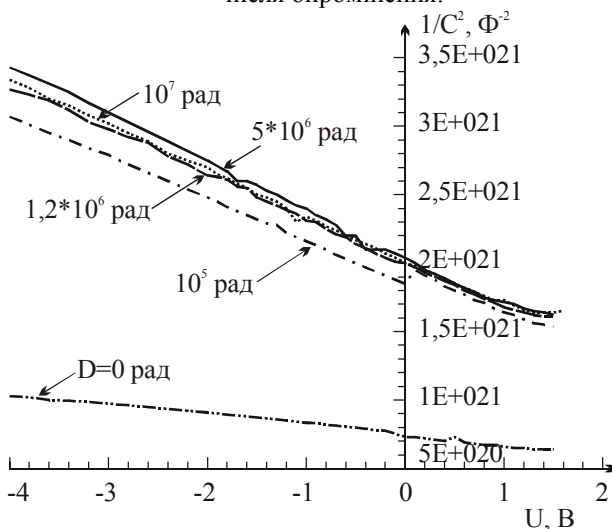


Рис. 5. Дозова залежність вольт-фарадних характеристик, виміряних при азотній температурі ($T=77\text{K}$).

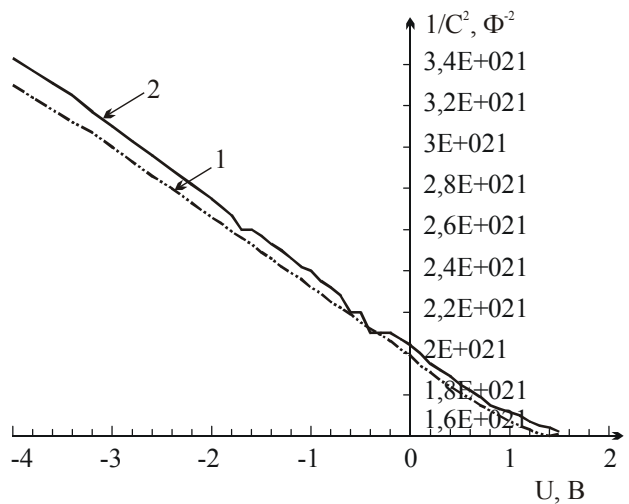


Рис. 6 Вольт-фарадні характеристики зразка GaP:N: 1- одразу після опромінення дозою $D=5 \times 10^6$ рад, 2 - знята через 8,5 місяців після опромінення.

можливих факторів є превалюючим - послаблення випромінюючого каналу рекомбінації внаслідок

зростання числа безвипромінювальних переходів інжекційної складової струму через р-п-перехід, чи зростання тунельної компоненти і відповідного зменшення внаслідок цього інжекційної складової.

I. Експеримент

Вихідні зразки одержувались методом подвійної рідинної епітаксії: р-область легувалась цинком до рівня $p = (1-2) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$; н-область - азотом $(5-7) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ при 300К.

Опромінення γ -квантами Co^{60} здійснювалося при 300К в межах доз 10^5 - 10^7 рад.

Вольт-фарадні характеристики (ВФХ) знімалися на частоті 1МГц. Вольт-амперні (ВАХ)-в межах 10^{-1} - 10^{-9} А - по струму та 0-4 В-по напрузі в інтервалі температур 77-300К.

II. Результати

На рисунку 1 показані прямі ВАХ, зняті в інтервалі температур 77-300К. Видно, що в межах низьких значень струмів та напруг нахил $\ln(I) = f(U)$ не залежить від температури, при більших величинах I та U (область 2) нахил ВАХ з підвищенням температури зростає (області 1 та 2 на рис.1 розділені пунктиром). Залежність $I(U)$ в області (1) задовільно описується виразом, запропонованим у роботах [12,13];

$$I_t = C \exp(\gamma T) \exp(\beta U) \quad (1),$$

$$I_e = b T^p \exp\left(-\frac{qV_D}{nkT}\right) \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) = I_o \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) \quad (2)$$

де: C , β , γ -константи;
в області 2 -

де: b , p -константи, n -коефіцієнт неідеальності р-п-переходу, V_D -величина дифузійного бар'єру.

Рівності (1), в якій нахил ВАХ не залежить від температури, відповідає тунельна складова струму через р-п-перехід; виразу (2) відповідає надбар'єрна емісія носіїв.

Для наших зразків коефіцієнт неідеальності n дорівнював 2, що характерно для генераційно-рекомбінаційних струмів.

Як видно з приведених результатів (рис. 1-3), в області (1) ВАХ діодів GaP переважає тунелювання носіїв через бар'єр.

Згідно з моделлю багатократного міжрівневого тунелювання [12], величина тунельного струму

$$I_t = C \exp\left[\alpha R^{-\frac{1}{2}} (V_D - U)\right] \quad (3),$$

де

$$\alpha = \frac{8}{3h} \left(\frac{m^* \varepsilon}{N_d} \right)^{\frac{1}{2}}$$

У співвідношенні (3) C -константа, R -число міжрівневих переходів.

Множник $\alpha R^{-1/2}$ визначає нахил ВАХ - β в області, де переважає тунелювання.

Для розрахунку концентрації донорних рівнів вимірювались $1/C^2 = f(U)$ характеристики р-п-переходів (рис. 4,5). Величина N_d оцінювалась по нахилу кривої $1/C^2 = f(U)$ і для вихідного зразка становила $N_d(300\text{K}) = 1,88 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

Вважаючи, що для GaP $m^* = 0,35m_0$ і враховуючи значення констант, які входять у вирази для I_t та β одержимо

Оцінки, проведені з використанням останньої рівності, показують, що у вихідному зразку число

$$R = \left(\frac{\alpha}{\beta}\right)^2 = 4,57 \cdot 10^{26} \frac{1}{\beta^2 N_d} \quad (4).$$

міжрівневих переходів близьке до $R \approx 94$; в опромінену - ця цифра значно більша - $R \approx 1096$. Такий результат, очевидно, можна вважати прямим підтвердженням факту, що значна частина рівнів, відповідальних за падіння інтенсивності випромінювальної рекомбінації в опроміненіх діодах, локалізована безпосередньо у збідненій області р-п-переходу, а не лише у квазінейтральній частині структури, як вважають автори [10]. Зменшення інтенсивності свідчення при опроміненні може бути наслідком не лише введення безвипромінювальних рівнів, а й результатом перерозподілу між інжекційно-рекомбінаційною складовою струму та тунельною складовою на користь останньої.

Відомо, що термічна стабільність первинних радіаційних дефектів у GaP є доволі високою: перша стадія відпалу у зразках п-типу розташована в межах 140 - 160°C ; у зразках р-типу - близько 250 - 300°C [14]. У літературних джерелах відсутні повідомлення про відпал дефектів радіаційного походження при температурах, нижчих кімнатної.

Водночас проведені нами вимірювання ВАХ та C-V зразків, опроміненіх γ -квантами Co^{60} $D = 5 \cdot 10^6$

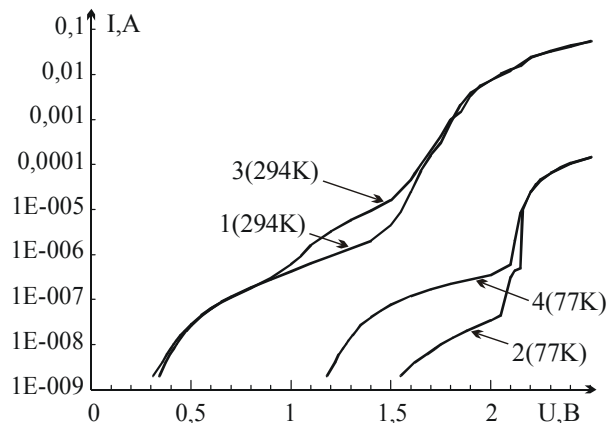


Рис. 7. Вольт-амперні характеристики: 1,2 - після опромінення дозою $D = 5 \cdot 10^6$ рад; 3,4- знята через 8,5 місяців після опромінення.

рад, які тривалий час зберігалися при кімнатній температурі (8,5 місяців), виявили зростання тунельної складової прямого струму на ВАХ та деяке

збільшення ємності діода, котре супроводжується зміною нахилу прямої $1/C^2 = f(U)$ (рис. 6,7).

Подібні зміни опромінених зразків свідчать про існування довготривалих пострадіаційних процесів вже при кімнатних температурах. Ефект може бути до певної міри аналогічним прискореній деградації опроміненого зразка під впливом ультразвуку [15], чи його відпаду після опромінення допороговими електронами, коли в неоднорідному кристалі стадія відпаду розпочинається раніше [16].

Невелика зміна нахилу кривої $1/C^2 = f(U)$ свідчить про деяку розкомпенсацію бази діода, тобто про частковий відпад введених дефектів; помітне зростання тунельної компоненти струму-можлива ознака збільшення концентрації дефектів, захват носіїв на які відбувається шляхом тунелювання.

Іншою причиною збільшення струму на тунельній ділянці ВАХ може бути зниження потенціального бар'єру навколо таких центрів.

Оскільки розкомпенсація провідності у фосфіді галію відбувається за рахунок зменшення концентрації компенсуючих рівнів [17], друга можливість видається нам вірогіднішою.

Висновки

Виявлено зростання тунельної складової ВАХ GaP-діодів. Збільшення тунельних струмів пов'язано із введенням рівнів радіаційних дефектів у збіднену область р-п-переходу. Особлива роль у зростанні безвипромінювальної компоненти належить міжрівневному тунелюванню носіїв.

“Старіння” опроміненого зразка на протязі тривалого зберігання при кімнатній температурі, очевидно обумовлене перебудовою комплексів дефектів, яка супроводжується зниженням потенціальних бар'єрів для носіїв струму.

Коляденко І.В. – інженер відділу Радіаційної фізики;
Литовченко П.Г. – доктор фіз.-мат. наук, професор, завідувач відділом радіаційної фізики;
Опилат В.Я. – кандидат фіз.-мат. наук, доцент;
Петренко І.В. – провідний інженер відділу Радіаційної фізики;
Тартачник В.П. – доктор фіз.-мат. наук, професор, провідний науковий співробітник відділу Радіаційної фізики;
Хіврич В.І. – кандидат фіз.-мат. наук, провідний науковий співробітник відділу Радіаційної фізики.

- [1] А. Берг, П. Дин. *Светодиоды*. Мир, М., 686 с. (1979).
- [2] В.А. Бржезинський, М.В. Шевченко. *Оптоелектроніка*. ІСДО, Київ. 243 с. (1995).
- [3] Ю.Р. Носов. *Оптоэлектроника*. “Советское радио”, М. 230 с. (1977).
- [4] В.М. Андреев, Л.М. Долчинов, Д.Н. Третьяков. *Жидкостная эпитаксия в технологии полупроводниковых приборов*. “Советское радио”, М. 328 с. (1975).
- [5] A.A. Bergh. Bulk degradation of GaP red LED's // *IEEE Trans. Electron Devices*, ED-18, pp.166-170 (1971).
- [6] H. Chade, C. Neuse, J.J.Jannon. Direct evidence for generation of defect centres during forward bias degradation of GaAs_{1-x}P_x electroluminescent diodes // *J. Appl. Phys.*, 42, pp.5072-5075 (1971).
- [7] R.L. Hartman, B. Schwartz, M. Kuhn. Degradation and passivation of GaP light emitting diodes // *Appl. Phys. Lett.*, 18 pp. 304-307 (1971).
- [8] J.R. Baird, J.E. Pittman, J.F. Leeser. Degradation of quantum efficiency in gallium arsenide light emitters, in gallium arsenide // *Proc. Int. Simp. Reading. England, Sept, 1966*. Inst. Phys. and Phys. Soc., London, England, pp.113-117 (1967).
- [9] B. Rheinleinder, R. Pickenhain, H. Haefner and J. Oclgart. Degradation of LPE-GaP:N LED // *Phys. Stat. Sol. (a)*, 80, pp. 203 (1983).
- [10] A.S. Epstein, S. Share, R.A. Polimadei and A.H. Herzog. Gamma irradiation and annealing effects in nitrogen-doped GaAs_{1-x}P_x green and yellow light-emitting diodes// *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 19(6), pp. 386-390 (1972).
- [11] Е.Ю. Брайловский, Н.Д. Марчук. *Определение параметров радиационных дефектов в кристаллах GaP и твердых растворах GaAs_{1-x}P_x по измерениям термостимулированных токов*. Препринт ИЯИ, Киев. 37с. (1980).
- [12] S. Martinussi and O. Mallem. Dark-Current Conduction Process in CdS-Cu₂S Thin-Films Photocells // *Phys. Stat. Sol. (a)* 16, pp. 339-344 (1973).
- [13] J. Tousekova, D. Kindle, J. Tousek, and E. Klier. Some Electrical Properties of Au_xTe/CdTe Heterojunctions on CdTe Thick Films // *Phys. Stat. Sol. (a)*, 76, pp. 365-374 (1983).
- [14] Е.Ю.Брайловский, И.Д.Конозенко, В.П.Тартачник. Дефекты в GaP, облученном электронами. // *ФТП*, 9(4), сс.769-771 (1975).
- [15] О.М. Гонтарук, Д.В. Корбутяк, Е.В. Корбут, В.П. Тартачник. О влиянии ультразвука на деградационно-релаксационные явления в светоизлучающих диодах GaP // *Письма в ЖТФ*, 24(15), сс. 64-68 (1998).
- [16] А.П. Кудин, В.С. Манжара, А.Н. Матвеев, В.П. Тартачник, И.И. Тычина. Влияние электронного облучения на светоизлучающие диоды из фосфида галлия. // *Электронная техника, сер. “Полупроводниковые приборы”*, №6, сс. 28-32 (1985).
- [17] В.В. Волков, В.Я. Опилат, В.П. Тартачник, И.И. Тычина. Глубокие уровни в исходном и облученном фосфиде галлия // *Высокочистые вещества*, №2, сс. 60-63 (1989).

I.V. Kolyadenko¹, P.G. Lytovchenko¹, V.Ya. Opylat², I.V. Petrenko¹,
V.P. Tartachnyk¹, V.I. Khivrych¹

Degradation of Gallium Phosphide Light-Emitting Diodes, caused by Radiation Defects

¹ *Scientific Centre The Institute of Nuclear Researches NAS of Ukraine*

² *National Pedagogical University named by M.P. Dragomanov; Institute of Nuclear Researches NAS of Ukraine
47, Nauky Av., Kyiv, 03028, Ukraine, E-mail: opylat@ua.fm*

The nature of degradation of luminescence GaP of light-emitting diodes was investigated. Increasing of the VAKH tunneling component is revealed at an irradiation by γ -quantums, and also at long postradiating storage. It is established, that a special role in degradation of a luminescence plays interlevel tunneling of carriers.