

## Теорія і практика радіовимірювань

УДК 621.372.061

### АНАЛІЗ МЕТОДІВ КОНТРОЛЮ ТА ОЦІНКИ РАДІАЦІЙНОЇ СТІЙКОСТІ НА ПРИКЛАДІ МОДЕЛЬНИХ (Zn-O)-GaP СВІТЛОДІОДІВ

*Абдуллаєв О. Р.<sup>1</sup>, к.т.н.; Рижиков І. В.<sup>2</sup>, д.т.н., проф.;  
Руденко Н. М.<sup>3</sup>, к.т.н., доц.; Адаменко Ю. Ф.<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> ВАТ «Оптрон», Москва, Росія

<sup>2</sup> Московський державний університет

приладобудування та інформатики, Москва, Росія

<sup>3</sup> Національний технічний університет України «КПІ», Київ, Україна

### ANALYSIS OF RADIATION RESISTANCE CONTROL AND EVALUATION METHODS IN TERMS OF MODEL (Zn-O)-GaP LEDs

*Abdullaiev O., "Optron", Moscow, Russia*

*Ryzhikov I., Moscow State University of*

*Instrument Engineering and Computer Science, Moscow, Russia*

*Rudenko N., NTUU "KPI", Kyiv, Ukraine*

*Adamenko Yu., NTUU "KPI", Kyiv, Ukraine*

#### Вступ і постановка задачі

Сьогодні світлодіоди широко застосовуються не тільки в цивільній апаратурі. Збільшення попиту серед споживачів світлодіодних пристроїв демонструє те, що існує все більша потреба у потужних яскравих світлодіодах для бортової, військової та ядерної радіоелектроніки. Саме тому необхідною умовою використання пристроїв на основі світлодіодів, є інформація стосовно проникаючої радіації, вплив якої відображається на електричних та світлотехнічних характеристиках пристроїв. Одним з найважливіших параметрів для цих областей застосування є стійкість до дії проникаючої радіації. Згідно з вище зазначеним, метою даної роботи являється дослідження в області радіаційної деградації та радіаційної стійкості світловипромінюючих структур. Хоча світлодіоди з червоним кольором світіння в даний час виготовляються на основі різних матеріалів ( $GaAs_{0,6}P_{0,4}$ ,  $Al_xGa_{1-x}Al$  і  $(Al_xGa_{1-x})_{0,5}(InP)_{0,5}$ ), прилади на основі фосфіду галію зберігають своє значення внаслідок підвищеної радіаційної стійкості. Тому дослідження в області радіаційної деградації та радіаційної стійкості світловипромінюючих структур і пристроїв відображення інформації на їх основі є актуальним.

Світловипромінюючі структури на основі фосфіду галію з червоним і зеленим кольором світіння дозволили створити узагальнену модель світлодіода, що істотно прискорило розвиток оптоелектроніки. Дослідження ра-

діаційної деградації дозволило уточнити фізичну модель *GaP (Zn-O)* світлодіода.

Разом з тим, потрібно відмітити обмежений обсяг довідкової інформації з зазначених питань. З одного боку це обумовлено складністю та трудомісткістю виконання таких робіт, а з другого — високою вартістю відповідних наукових досліджень, наявності спеціального оснащення та участі фахівців різних спеціальностей.

### **1. Зразки та методика експерименту**

Світловипромінюючі структури були отримані послідовною епітаксією двох шарів фосфіду галію на підкладці вирощеній за методом Чохральського. Перший шар *n*-типу був легований телуrom до рівня  $(3-7) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ , а другий-цинком до рівня  $(2-5) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  і киснем до концентрації  $(1-10) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ . Досліджувався вплив нейтронного опромінення як на серійні світлодіоди в корпусі, так і на ці ж світлодіоди, але без металево-скляного ковпачка. Величина сили світла у них відрізнялася, в той час як відносне зниження ( $I_V/I_{V0}$ ) при опроміненні було практично однаковим. За силою світла світлодіоди були розділені на дві групи: порівняно ефективні з силою світла 1,0 – 1,5 мкд в корпусі (0,6 – 0,8 мкд без корпусу) при струмі 10 мА були віднесені до першої групи, а менш ефективні, з силою світла 0,3 – 0,4 мкд в корпусі (0,2 – 0,3 мкд без корпусу) — до другої групи. В якості джерел нейтронів з енергією більше 0,1 МеВ використовували імпульсний реактор БАРС-4.

Джерелом нейтронів з енергією більше 1 МеВ був експериментальний горизонтальний канал реактора ІРТ-2000 Московського державного інженерно-фізичного інституту з пристроєм, що дозволяє варіювати спектр нейтронів. Опромінення проводили в пучках моноенергетичних нейтронів з середньою енергією 2,65 МеВ. Спектр нейтронів вимірювали активаційним методом, а густину потоку — за допомогою серійних порогових детекторів [1]. Для перерахунку флюенса з енергією 2,65 МеВ під флюенс з енергією більше 0,1 МеВ, використовували співвідношення  $\Phi_{>0,1} = g_{0,1} \cdot \Phi_{>2,65}$ , где фактор  $g_{0,1} = 4,7$  [1],  $\Phi$  — величина флюенса.

У всіх експериментах пучок нейтронів направляли перпендикулярно площині *p-n*-переходу. Вивчався вплив нейтронного опромінення на основну характеристику (силу світла) при заданому струмі й напрузі.

При інтерпретації експериментальних результатів використовувалася, запропонована Барнсом [2] і уточнена нами [3] модель (*Zn-O*) – світлодіода. Відповідно до цієї моделі випромінювальна компонента струму пов'я-

зана з інжекцією електронів в оптично активну р-область. Випромінювальна рекомбінація екситонів відбувається на  $(Zn-O)$  –комплексах, концентрація яких є лінійною функцією координати.

Згідно Барнсу [2] струм через світлодіод визначається безвипромінювальною рекомбінацією в області просторового заряду. Нами, на підставі вивчення вольт-амперних характеристик (ВАХ) була запропонована інша модель [3], згідно з якою безвипромінювальна рекомбінація переважає в високоомному компенсованому шарі, що розділяє  $p-i-n$ -області, в якій має місце режим високого рівня інжекції. Більш і менш ефективні світлодіоди, відповідно до цієї моделі, відрізняються величиною безвипромінювального часу життя. У ефективних світлодіодів першої групи до опромінення дифузійна довжина електронів більше, а у менш ефективних другої групи — менше ширини компенсованого шару. Надалі перші будемо називати «короткими», а другі «довгими». Після високих флюенсів нейтронного опромінення короткі світлодіоди також ставали довгими. ВАХ світлодіодів першої та другої групи до і після опромінення описуються на основі моделі Холла [4], уточненої авторами [3], і наведені в роботі [3].

#### **Експериментальне дослідження залежності сили світла від флюенса та знаходження константи пошкоджуваності**

Залежності сили світла ( $I_V$ ) від напруги світлодіодів першої і другої групи в інтервалі флюенсів  $5,6 \cdot 10^{10} \pm 1,2 \cdot 10^{15}$  н/см<sup>2</sup> практично ідентичні, хоча струм коротких світлодіодів змінюється з флюенсом значно швидше, ніж довгих. Як до, так і після опромінення інтегральним потоком менш  $10^{15}$  н/см<sup>2</sup>, ці залежності мали наступний вигляд:

$$I_V = I_{V0} \exp(eU / kT) \quad (1)$$

Сила світла обох типів світлодіодів знижувалася приблизно на порядок при  $\Phi \approx 10^{14}$  н/см<sup>2</sup>. Випромінювальна компонента струму пов'язана з інжекцією електронів з компенсованої області в оптично активний  $p^+$  – шар. Вважаючи слідом за автором [2], що концентрація центрів випромінювальної рекомбінації ( $(Zn-O)$  – комплексів) змінюється з координатою по лінійному закону, вираз (1) можна переписати наступним чином [3]:

$$I_V = A\tau_e \exp(eU / kT), \quad (2)$$

де  $A$  — константа, не залежна від опромінення, а  $\tau_e$  — безвипромінювальний час життя електронів в  $p^+$  – області.

Вважаємо, що основною причиною зміни сили світла при опроміненні є зниження безвипромінювального часу життя електронів в  $p$  – області [2]:

$$I / \tau_e = 1 / \tau_{0e} + K_\tau \Phi, \quad (3)$$

де  $\tau_{0e}$  — час життя до опромінення,  $K_\tau$  — константа пошкоджуваності часу життя,  $\Phi$  — величина флюенса. Підставляючи (3) в (2), отримуємо:

$$(I_{V0} / I_V) - 1 = \tau_{0e} K_\tau \Phi. \quad (4)$$

На графіках рис. 1 наведені залежності  $(I_{V0}/I_V)$  від флюенса нейтронів з енергією  $\geq 0,1$  МеВ при фіксованій напрузі 1,65 В. Певні з них константи  $(\tau_{0e} K_\tau) = (6 \pm 2) \cdot 10^{-14}$  см<sup>2</sup>/н у ефективних світлодіодів. В тому випадку коли енергія нейтронів становила 2,65 МеВ величина  $(\tau_{0e} K_\tau) = (2,8 \pm 0,9) \cdot 10^{-13}$  см<sup>2</sup>/н. В роботі [2] була знайдена величина добутку  $(\tau_{0e} K_\tau)$  при енергії пучка 10 кеВ. Вона становила  $(2,4 \pm 0,4) \cdot 10^{-14}$  см<sup>2</sup>/н. Таким чином, величина  $(\tau_{0e} K_\tau)$  залежить не тільки від флюенса, але і від енергії нейтронів. З наведених вище даних випливає, що  $(\tau_{0e} K_\tau) \sim E^{1/2}$ .

У реальних умовах світлодіоди працюють при фіксованому струмі, а не напрузі, і при більш високих значеннях струму і напруги, в порівнянні з тими, які звичайно використовуються для визначення константи пошкоджуваності. Залежності сили світла від флюенса в режимі генератора струму відрізняються від аналогічних залежностей при фіксованій напрузі. Тому знання величини добутку ще не дозволяють оцінити зміну сили світла при опроміненні при нормальних умовах роботи світлодіода. Аналітичні залежності зниження сили світла з флюенсом при фіксованому струмі в літературі відсутні. Нами вперше теоретично й експериментально досліджено залежність сили світла від флюенса нейтронного опромінення при заданому струмі.

Експериментальні криві зниження сили світла при фіксованому струмі 1 мА, наведені на рис. 2 для світлодіодів першої та другої групи.

З наведених кривих видно, що при заданому струмі зниження сили світла при опроміненні відбувається значно швидше, ніж при фіксованій напрузі, і у коротких світлодіодів першої групи (крива 4), і в більшій мірі, ніж у довгих світлодіодів (крива 1).

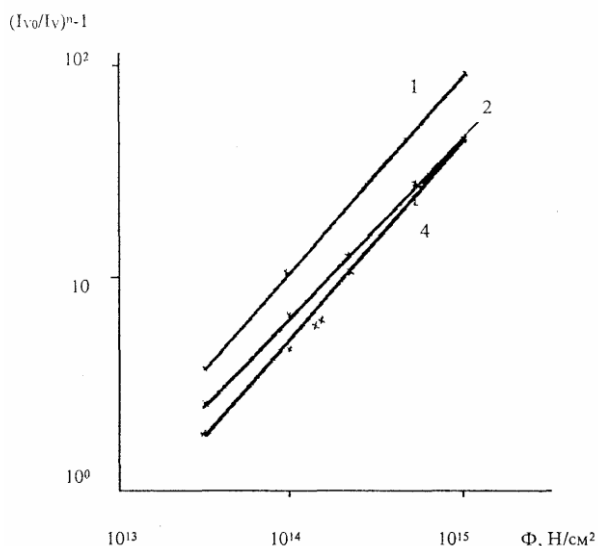


Рис. 1. Залежність сили світла від флюенса нейтронного опромінення при фіксованій напрузі 1,65 В

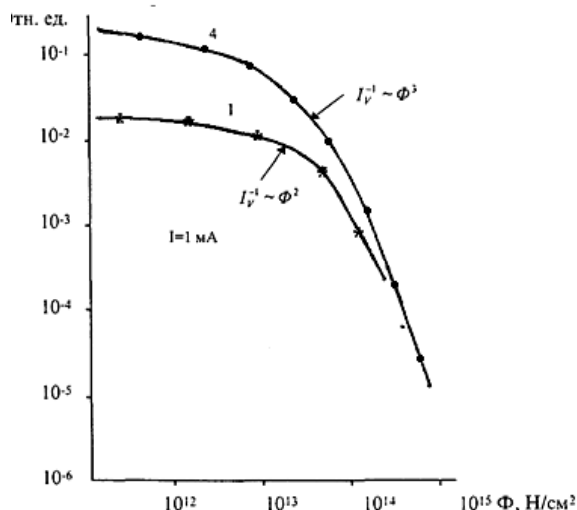


Рис. 2. Залежність відносної сили світла від флюенса нейтронного випромінювання при заданому струмі 1 мА

Використовуючи розрахункові співвідношення роботи [5], вирази (1) і (7) роботи [3] і формулу (2) цієї статті, отримуємо:

$$I_V = C' \cdot \tau_p^2 \cdot \tau_e \cdot j^2; \quad I_V = C'' \cdot \tau_p \cdot \tau_e \cdot j^2 \quad (5)$$

де  $\tau_e$  — безвипромінювальний час життя електронів,  $\tau_p$  — безвипромінювальний час життя дірок.

Використовуючи (3) і вважаючи, що  $\tau_p$  змінюється з опроміненням так само, як і  $\tau_e$ , маємо:

$$(I_{V0} / I_V) = (1 + \tau_{0e} K_\tau \Phi)^n, \quad (6)$$

де  $n = 3$  для короткого і  $n = 2$  для довгого світлодіода.

Виникає природне запитання: наскільки константи пошкоджуваності, розраховані при відносно малих струмах на експоненціальних ділянках  $I(U)$  і  $I_V(I)$  — характеристики, придатні для прогнозування сили світла при номінальному струмі 10 мА. З графіків, представлених на рис. 3 видно, що при зміні струму і опромінення змінюються залежності сили світла від струму і вираз (5) може бути не коректним. У ефективних світлодіодів першої групи (крива 4) при малих струмах  $I_V \sim I^{3/2}$ , у світлодіодів другої групи  $I_V \sim I^2$ , а при великих струмах  $I_V \sim I$ . При великих флюенсах  $I_V(I)$  — характеристики знову стають надлінійними в області робочих струмів.

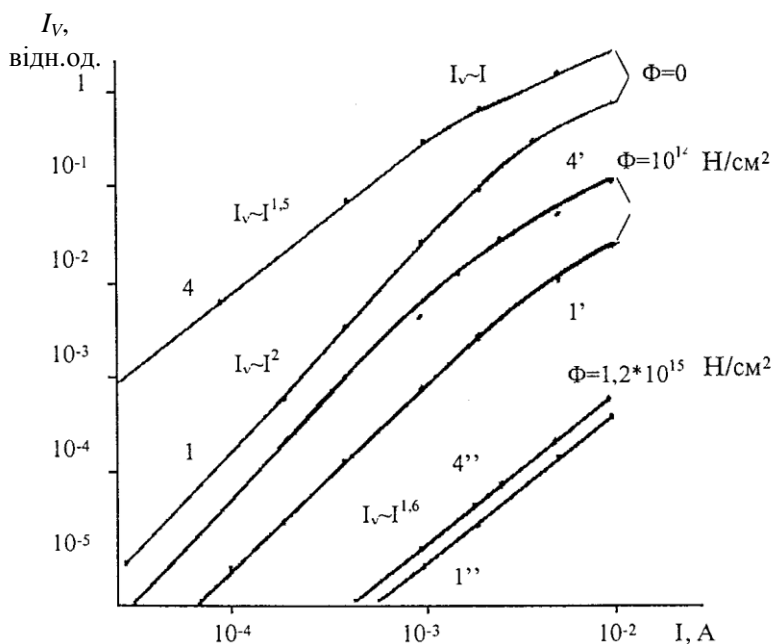


Рис. 3. Залежність відносної сили світла від струму і флюенса нейтронного опромінення

групи після опромінення нейтронами з флюенсом  $4,7 \cdot 10^{13}$  н/см<sup>2</sup>. З неї видно, що середня величина відношення ( $I_{V0}/I_V$ ) у партії світлодіодів першої та другої групи слабо залежить від струму.

У той час як у світлодіодів першої групи відношення ( $I_{V0}/I_V$ ) зменшується з ростом струму, у світлодіодів другої групи це співвідношення зростає, що дозволяє сподіватися, що середньостатистично величина ( $\tau_{0e}K_{\tau}$ ) задовільно описує зміну відносної сили світла при опроміненні. Це ілюструються табл. 1, в якій наведено залежності ( $I_{V0}/I_V$ ) від струму чотирьох світлодіодів першої (6.1, 6.3) і другої (6.2, 7.2)

Таблиця 1

Залежність відношення ( $I_{V0}/I_V$ ) від струму після  $\Phi=4,7 \cdot 10^{13}$  н/см<sup>2</sup>.

№ з/п	I, мА	0,2	1	2	5	10
6.1	$I_{V0}/I_V$	19,6	11,6	9,4	7,4	6,2
6.2	-//-	4,3	6,2	7,1	7,1	6,4
6.3	-//-	14,4	10,9	9,2	7,1	5,9
7.2	-//-	4,7	6,7	8,0	8,6	8,0
Середнє	-//-	8,7	8,7	8,4	7,6	6,6

На графіку рис. 4 показана залежність ( $I_{V0}/I_V$ ) від флюенса нейтронів партії з 25 світлодіодів першої та другої груп при номінальному струмі 10 мА.

З графіка видно, що, починаючи з флюенса  $7 \cdot 10^{13}$  н/см<sup>2</sup> величина відношення ( $I_{V0}/I_V$ )  $\sim \Phi^2$ , що принаймні, якісно описується формулою (5). Підставивши в неї отриману раніше константу ( $\tau_{0e}K_{\tau}$ )  $= 6 \cdot 10^{-14}$  см<sup>2</sup>/н, одержуємо розрахункову формулу, наведену на цьому ж малюнку. У межах похибки експерименту і точності визначення константи криві практично збігаються, тобто величина  $K_{\tau}$  середньостатистично дозволяє задовільно описати зниження сили світла при фіксованому робочому струмі 10 мА.

### Висновки

Досліджено вплив нейтронного опромінення з енергією понад 0,1 і 2,65 MeV на силу світла (Zn-O) – світлодіодів з червоним кольором світіння. Випромінювальна компонента струму, пов'язана з інжекцією електро-

нів в оптично активну р – область з лінійним розподілом активаторів люмінесценції, при заданій напрузі була лінійною функцією безвипромінювального часу життя і, отже, флюенса нейтронного опромінення. Величина  $(\tau_{0e}K_{\tau})$ , визначена з експериментальної залежності сили світла від флюенса опромінення, склала  $(6 \pm 2) \cdot 10^{-14} \text{ см}^2/\text{н}$ , що практично не відрізняється від отриманої раніше [3] по залежності струму від флюенса.

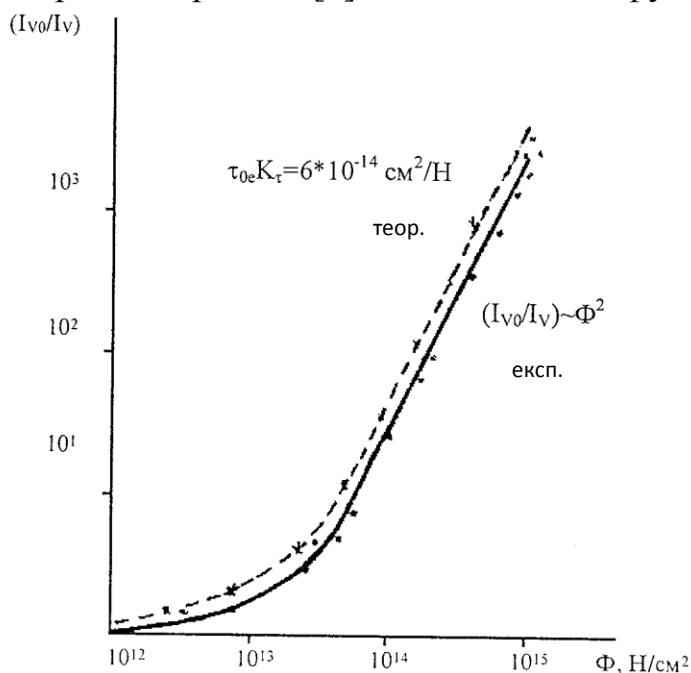


Рис. 4. Теоретична і експериментальна залежності зниження сили світла при опроміненні партії світлодіодів при номінальному струмі 10 мА.

ли світла від флюенса при заданому струмі  $(I_{V0}/I_V) = (1 + \tau_{0e}K_{\tau}\Phi)^2$ , яка добре узгоджується з експериментом при  $(\tau_{0e}K_{\tau}) = 6 \cdot 10^{-14} \text{ см}^2/\text{н}$ . Згідно [3] дана залежність пояснюється як генерацією центрів безвипромінювальної рекомбінації, так і розпадом активаторів люмінесценції (комплексів Zn-O). Однак, описані в [3] і наведені в цій роботі зміни ВАХ і  $I_V(U, I)$  — характеристики при опроміненні повністю описуються в рамках припущення про зниження безвипромінювального часу життя, і гіпотеза про розпад Zn-O — комплексів представляється зайвою.

#### Література

1. Активационные методы спектроскопии нейтронов / [Крамер-Агеев Е. А., Трошин В. С., Тихонов Е. Г., Званцев А. А. ]. — М. : Атомиздат, 1976. — 232 с.
2. Barnes С. Е. Neutron damage in GaP Light-emitting diodes / С. Е. Barnes // Appl.Phis.Lett. — 1972. — V.22. — N3. — P. 110–112.
3. Званцев А. А. Радиационные изменения характеристик светоизлучающих р-п-переходов из фосфида галлия / А. А. Званцев, К. А. Крамер-Агеев, И. В. Рыжиков. — М. : МИФИ, 1988. — 13 с. — (Препринт / МИФИ. 080-88.)

При енергії нейтронів 2,65 MeV величина добутку склала  $(2,8 \pm 0,9) \cdot 10^{-13} \text{ см}^2/\text{н}$ . Згідно [2], при енергії 10 кеВ вона дорівнює  $(2,4 \pm 0,4) \cdot 10^{-14} \text{ см}^2/\text{н}$ . Таким чином, залежність  $K_{\tau}$  від енергії має вигляд  $K_{\tau} \sim \sqrt{E}$ , або константа пошкоджуваності пропорційна імпульсу нейтронів. Аналогічна залежність має місце при електронному та протонному опроміненні.

Була отримана розрахункова залежність си-

4. Hall R. N. Power rectifiers and transistors / R. N. Hall // Proc.IRE. — 1952. — P. 1512–1518.

5. Карагеоргий-Алкалаев П. М. Глубокие примесные уровни в широкозонных полупроводниках / П. М. Карагеоргий-Алкалаев, Л. Ю. Лейдерман — Ташкент, Уз.ССР: ФАН, 1971. — 204 с.

#### References

1. Aktivatsionnye metody spektroskopii neytronov / [Kramer-Ageev E. A., Troshin V. S., Tikhonov E. G., Zvantsev A. A. ]. — M. : Atomizdat, 1976. — 232 с.

2. Barnes C. E. Neutron damage in GaP Light-emitting diodes / C. E. Barnes // Appl.Phys.Lett. — 1972. — V.22. — N3. — P. 110–112.

3. Zvantsev A. A. Radiatsionnye izmeneniya kharakteristik svetoizluchayushchikh r-n-perekhodov iz fosfida galliya / A. A. Zvantsev, K. A. Kramer-Ageev, I. V. Ryzhikov. — M. : MIFI, 1988. — 13 s. — (Preprint / MIFI. 080-88.)

4. Hall R. N. Power rectifiers and transistors / R. N. Hall // Proc.IRE. — 1952. — P. 1512–1518.

5. Karageorgiy-Alkalaev P. M. Glubokie primesnye urovni v shirokozonnnykh poluprovodnikakh / P. M. Karageorgiy-Alkalaev, L. Yu. Leyderman — Tashkent, Uz.SSR: FAN, 1971. — 204 s.

*Абдуллаев О. Р.; Рижиков И. В., Руденко Н. М., Адаменко Ю. Ф. Аналіз методів контролю та оцінки радіаційної стійкості на прикладі модельних (Zn-O)-GaP світлодіодів. В роботі досліджено вплив нейтронного опромінення з енергією понад 0,1 і 2,65 MeV на силу світла (Zn-O)-світлодіодів з червоним кольором світіння. Показано, що випромінювальна компонента струму, пов'язана з інжекцією електронів в оптично активну р-область з лінійним розподілом активаторів люмінесценції, при заданій напрузі була лінійною функцією безвипромінювального часу життя і, отже, флюенса нейтронного опромінення. На підставі вивчення вольт-амперних характеристик запропонована модель, згідно з якою безвипромінювальна рекомбінація переважає в високоомному компенсованому шарі, що розділяє р-і-п-області, в якій має місце режим високого рівня інжекції. Зроблено висновок, що константа пошкоджуваності світлодіодів пропорційна імпульсу нейтронів.*

**Ключові слова:** (Zn-O)-GaP світлодіод, константа пошкоджуваності, радіаційна стійкість, нейтронне опромінення, силу світла.

*Абдуллаев О. Р.; Рижиков И. В., Руденко Н. М., Адаменко Ю. Ф. Анализ методов контроля и оценки радиационной стойкости на примере модельных (Zn-O)-GaP светодиодов. В работе исследовано влияние нейтронного облучения с энергией свыше 0,1 и 2,65 МэВ на силу света (Zn-O)-светодиодов с красным цветом свечения. Показано, что излучательная компонента тока, связана с инжекцией электронов в оптически активную р-область с линейным распределением активаторов люминесценции, при заданном напряжении была линейной функцией безызлучательного времени жизни и, следовательно, флуенса нейтронного облучения. На основании изучения вольт-амперных характеристик предложена модель, согласно которой безызлучательная рекомбинация преобладает в высокоомном компенсированном слое, который разделяет р-и п-области, где имеет место режим высокого уровня инжекции. Сделан вывод, что константа повреждаемости светодиодов пропорциональна импульсу нейтронов.*

**Ключевые слова:** (Zn-O)-GaP светодиод, константа повреждаемости, радиационная стойкость, нейтронное облучение, сила света.



Abdullaiev O., Ryzhykov I., Rudenko N., Adamenko Yu. *Analysis of radiation resistance control and evaluation methods in terms of model (Zn-O)-GaP LEDs*

Introduction and problem statement. Research relevance of most important parameters of LEDs — resistance to ionizing radiation — for their use in civilian hardware, aerospace, nuclear and radioelectronics onboard equipment is shown.

Samples and experimental technique. Samples obtaining method for studying of neutron irradiation influence on the LEDs is indicated. The neutron irradiation influence on the basic characteristics (light intensity) given current and voltage is investigated. Experimental results interpretation shows that for this model current radiative component associated with electrons injection in the optically active p-region. Radiative excitons recombination occurs at the (Zn-O)-complexes, the concentration of which is a linear function.

An experimental study light intensity dependences of fluens and damage constant finding. Theoretically and experimentally investigated the light intensity dependence of neutron irradiation fluens at given current. The  $(I_{V0}/I_V)$  dependencies from fluens neutrons with energy  $\geq 0,1$  MeV and fixed voltage of 1,65 V is presented. It shown that light intensity reduction while irradiation at the fixed current is much faster than at the fixed voltage. The calculation formula and  $(I_{V0}/I_V)$  dependence from neutrons fluens for set of 25 LEDs at nominal current 10 mA are received.

Conclusions. The neutron irradiation influence with energy above 0,1 and 2,65 MeV on the light intensity red glow (Zn-O)-LEDs is indicated. It shown that damage constant is proportional to the neutrons momentum. The calculated light intensity dependence from fluens at given current is received.

**Keywords:** (Zn-O)-GaP LED, damage constant, радиационная стойкость, neutron irradiation, light intensity.