

## РАДИАЦИОННАЯ ДЕГРАДАЦИЯ СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИХ ДИОДОВ С ПЕРЕИЗЛУЧЕНИЕМ ФОТОНОВ

*Ирха В.И.*

*Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова,  
65029, Украина, г. Одесса, ул. Кузнечная, 1.  
[phys@onat.edu.ua](mailto:phys@onat.edu.ua)*

## РАДІАЦІЙНА ДЕГРАДАЦІЯ СВІТЛОВИПРОМІНЮЮЧИХ ДІОДІВ ІЗ ПЕРЕВИПРОМІНЮВАННЯМ ФОТОНІВ

*Ирха В.И.*

*Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова,  
65029, Україна, м. Одеса, вул. Кузнечна, 1.  
[phys@onat.edu.ua](mailto:phys@onat.edu.ua)*

## RADIATION DEGRADATION OF LIGHT-EMISSION DIODES WITH RERADIATION OF PHOTONS

*Irkha V.I.*

*O.S. Popov Odessa national academy of telecommunications,  
1 Kuznechna St., Odessa, 65029, Ukraine.  
[phys@onat.edu.ua](mailto:phys@onat.edu.ua)*

**Аннотация.** Проведено исследование радиационной деградации светоизлучающих диодов с переизлучением фотонов на основе GaAlAs под действием  $\gamma$ -излучения  $Co^{60}$ . Особенности механизма генерации фотонов в исследованных светодиодах приводят к особенностям радиационной деградации данных структур. Облучение относительно небольшими дозами  $\gamma$ -излучения  $Co^{60}$  позволяет контролируемо вводить безызлучательные центры рекомбинации в активную область светодиодов и в другие слои, участвующие в процессах генерации и вывода фотонов. Исследование характеристик в таких светодиодах при радиационной деградации необходимо для прогнозирования изменений их параметров при неконтролируемых вариациях концентрации указанных центров в процессе изготовления данных структур. Изучены зависимости интенсивности коротковолновой и длинноволновой полос оптических спектров излучения от интегрального потока  $\gamma$ -квантов. Обнаружено, что интенсивность коротковолновой полосы оптических спектров таких диодов от потока  $\gamma$ -квантов соответствует уменьшению безызлучательного времени жизни электронов. Показано, что скорость уменьшения длинноволновой полосы под действием  $\gamma$ -облучения существенно выше, чем коротковолновой. Получено, что изменением оптических потерь под действием радиации в светодиодах с переизлучением фотонов можно пренебречь. Использование таких диодов позволяет разделить деградационные процессы.

**Ключевые слова:** радиационная деградация, многослойные гетероструктуры,  $\gamma$ -излучения, спектр излучения, электролюминесценция, квантовая эффективность, фотоны, переизлучение, светодиоды.

**Анотація.** Проведено дослідження радіаційної деградації світловипромінюючих діодів із перевипромінюванням фотонів на основі GaAlAs під дією  $\gamma$ -випромінювання  $Co^{60}$ . Особливості механізму генерації фотонів у даних світлодіодах приводять до особливостей радіаційної деградації даних структур. Опромінювання відносно невеликими дозами  $\gamma$ -випромінювання  $Co^{60}$  дає можливість неконтрольовано вводити безвипромінювальні центри рекомбінації в активну область світлодіодів та інші шари, що беруть участь в процесах генерації та виводу фотонів. Дослідження характеристик в таких світлодіодах при радіаційній деградації необхідно для прогнозування зміни їх параметрів при

неконтрольованих варіаціях концентрації указаних центрів у процесі виготовлення даних структур. Вивчені залежності інтенсивності короткохвильової та довгохвильової смуг оптичних спектрів випромінювання від інтегрального потоку  $\gamma$ -квантів. Виявлено, що інтенсивність короткохвильової смуги оптичних спектрів таких діодів від потоку  $\gamma$ -квантів відповідає зменшенню безвипромінювального часу життя електронів. Показано, що швидкість зменшення довгохвильової смуги під дією  $\gamma$ -випромінювання значно вища, ніж короткохвильової. Отримано, що зміною оптичних втрат під дією радіації у світлодіодах із перевипромінюванням фотонів можна знехтувати. Використання таких діодів дозволяє розділити деградаційні процеси.

**Ключові слова:** радіаційна деградація, багат шарові гетероструктури,  $\gamma$ -випромінювання, спектр випромінювання, електролюмінесценція, квантова ефективність, фотони, перевипромінювання, світлодіоди.

**Abstract.** Research radiation degradation of light-emitting diodes with the reradiation photons that based on the GaAlAs under the action of  $\text{Co}^{60}$   $\gamma$ -radiation was made. Features of the mechanism of photon generation in these LEDs lead to the peculiarities of radiation degradation of these structures. Irradiation with relatively small doses  $\gamma$ -radiation  $\text{Co}^{60}$  make it possible to introduce nonradiative recombination centers into the active region of light-emitting diodes and other layers that participating in the processes of generation and emission of photons. Investigation of characteristics in such LEDs during radiation degradation is necessary to predict the change in their parameters for uncontrolled variations concentration of these centers during the manufacture of these structures. The dependences of the intensity of the short-wave and long-wave bands of the optical emission spectra whis integral flux of  $\gamma$ -quanta are studied. Intensity of the short-wave band of the optical spectra of such diodes from the flux of  $\gamma$ -quanta satisfys decreasing the nonradiative lifetime of electrons is founded. It is shown that the rate of reduction of the long-wavelength band under the action of  $\gamma$ -irradiation is much higher than that of the short-wave band. Change the optical losses due to radiation in LEDs with reemission of photons can be neglected is founded. The use of such diodes makes it possible to separate the degradation processes.

**Key words:** radiation degradation, multilayer heterostructures,  $\gamma$ -radiation; radiation spectrum, electroluminescence, quantum efficiency, photons, reradiation, light-emitting diodes.

Среди процессов взаимодействия излучения с полупроводниками особую роль играют те, при которых возникают дефекты кристаллической решетки – вакансии, атомы основного вещества, расположенные вне узлов, а также более сложные дефекты. Появление таких дефектов существенно изменяет основные физические свойства полупроводников, а следовательно и приборов, изготовленных на их основе; вследствие их высокой чувствительности к введению дефектов изменения происходят уже при небольших дозах облучения и сохраняются обычно на длительное время после прекращения облучения.

Поэтому обсуждаемая проблема представляет интерес для широкого круга людей, использующих или исследующих полупроводники и полупроводниковые приборы, особенно в атомной технике, космических исследованиях, связи, приборостроении и т.п. В связи с быстрым прогрессом в указанных областях круг вопросов, входящих в рассматриваемую проблему, непрерывно растет. Увеличивается также число работ, посвященных различным аспектам радиационных исследований полупроводников и приборов на их основе. Однако большая часть из них охватывает относительно узкий круг вопросов [1 – 3].

Наличие указанных выше дефектов, возникающих при радиационном воздействии, приводит к качественно новым закономерностям изменения свойств облученных материалов и приборов на их основе. Например, полностью изменяется характер описания электропроводности полупроводников. Изменяется также смысл понятия времени жизни неравновесных носителей тока, возникают специфические особенности неравновесной проводимости – эффекты памяти, переключения и т.п. Точечные дефекты, возникающие при облучении полупроводников, – вакансии, избыточные атомы основного вещества и их ассоциации с примесными атомами и друг с другом – играют ту же роль, что и дорадиационные дефекты. Они могут быть эффективными центрами рекомбинации и прилипания электронов и дырок, а также рассеивающими центрами для подвижных зарядов; донорными или акцепторными дефектами, изменяющими положение уровня Ферми, центрами поглощения света и люминесценции, парамагнитными центрами и т.д. [1,2].

Поэтому введение радиационных дефектов приводит к изменению времени жизни неравновесных носителей заряда, изменению их концентрации и подвижности, появлению новых или изменению существовавших до облучения полос в оптических спектрах, изменению параметра решетки кристалла, диэлектрических свойств и т.д. [2 – 6].

Важнейшей является также проблема обеспечения радиационной стойкости полупроводников и приборов на их основе, определяющей надежность работы электронных систем в условиях радиационного облучения. Из анализа литературных источников можно сделать вывод о том, что работ по исследованию влияния радиации на характеристики светоизлучающих диодов довольно мало, а описание таких результатов для светодиодов с переизлучением фотонов практически отсутствует. Указанные светодиоды изготавливаются на основе полупроводниковых многослойных излучающих гетероструктур (МГС) [6]. Контролируемое введение радиационных дефектов в указанные структуры и исследование при этом их оптических характеристик в дальнейшем может позволить создать радиационностойкие светодиоды.

**Цель данной статьи** – исследование влияния  $\gamma$ -облучения на изменениях полос в оптических спектрах светоизлучающих диодов с переизлучением фотонов на основе GaAlAs.

Использование многослойных гетероструктур с изменяющейся шириной запрещенной зоны позволяет осуществлять эффективную инжекцию неосновных носителей заряда в область излучательной рекомбинации. Внешнее возбуждение кристалла – инжекция, оптическая генерация приводит к появлению неравновесных носителей в ограниченной области кристалла. Благодаря эффектам самопоглощения и повторного переизлучения фотонов в материале активной области в многопроходных структурах удается в 5-6 раз увеличить внешний квантовый выход излучения по сравнению с обычными однопереходными светодиодами. Эффект переизлучения существенен в материалах с малыми коэффициентами поглощения собственного излучения при расстояниях до  $p$ - $n$ -перехода много больших диффузионной длины неосновных носителей заряда [4 – 6]. Сущность процессов, происходящих при переходе от однопереходных структур к многопереходным, объясняется тем, что за счет коротковолновой части спектра излучения, эффективно поглощающиеся в активной области многопроходной гетероструктуры, происходит пропорциональное усиление интенсивности излучения на всех частотах составляющих спектр. При этом вид спектра не искажается, а его общее усиление определяется внутренним квантовым выходом излучательной рекомбинации в материале активной области. Переизлучение фотонов приводит к нелинейной зависимости внешнего квантового выхода люминесценции  $\eta_{\text{ext}}$  от внутреннего квантового выхода  $\eta_{\text{int}}$ . Это должно приводить к особенностям радиационной деградации светоизлучающих диодов с переизлучением фотонов.

Спектр излучения электролюминесценции исследованных МГС содержит две полосы: коротковолновую (К) и длинноволновую (Д). Д-полоса связана с рекомбинацией в узкозонном слое электронов и дырок, генерированных за счет поглощения К-фотонов.

Наличие в спектре излучения МГС длинноволновых полос, обусловленных рекомбинацией носителей заряда, генерированных в узкозонных областях за счет поглощения фотонов, излученных из более широкозонных областей, позволяет решить несколько вопросов. Во-первых, сравнить кинетику радиационной деградации фото- и электролюминесценции. Во-вторых, оценить роль изменений механизма прохождения тока через  $p$ - $n$ -переход, механизма рекомбинации носителей заряда и оптического поглощения в радиационной деградации СИД. В-третьих, сравнить деградационную стойкость МГС различного состава.

В данной работе изучались особенности радиационной деградации излучающих МГС  $p_0 - \text{GaAs} - p_1\text{Ga}_{1-z}\text{Al}_z\text{As} - p_2\text{GaAlAs} - p_3\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As} - n\text{Ga}_{1-y}\text{Al}_y\text{As}$ , где  $y > x > z$ . Структура образцов описана в работах [5, 6]. Для повышения точности сравнения деградационной

стойкости слоев GaAlAs различного состава в МГС образцы облучались слабо поглощаемым  $\gamma$ -излучением  $Co^{60}$  при 300 К.

В исследованных структурах излучательная рекомбинация электронов и дырок, соответствующая К-полосе люминесценции, происходит в  $p_3$ -слое, причем его толщина существенно меньше эффективной диффузионной длины электронов. Поэтому можно считать рекомбинацию в  $p_3$ -слое пространственно однородной. Это подтверждается зависимостью тока от напряжения, причем лучистый поток в коротковолновой полосе  $\Phi_k \sim I$ .

Если под действием интегрального потока  $\gamma$ -квантов  $\Phi_\gamma$  вводятся безызлучательные центры, так что время жизни электронов в  $p_3$ -слое [6]

$$\frac{1}{\tau_n} = \frac{1}{\tau_n^0} + B_3 \Phi_\gamma, \quad (1)$$

где  $B_3$  – определенный коэффициент, то доля излучательных переходов электронов в  $p_3$ -слое

$$g_3 = \frac{\tau_n}{\tau_{nu}} = \frac{\tau_n^0}{\tau_{nu}(1 + \tau_n^0 B_3 \Phi_\gamma)}, \quad (2)$$

здесь  $\tau_n^0 = \tau_n(0)$  и  $\tau_{nu}$  – излучательное время жизни электронов. В (2) считаем, что при не слишком больших дозах облучения концентрация излучательных центров не меняется, т.е.  $\tau_{nu} = \text{const}$ . Из (2) следует временная зависимость доли излучательных переходов

$$g_3(t) = g_3^0 \frac{1}{1 + B_3 \tau_n^0 \Phi_\gamma}. \quad (3)$$

Внутренний квантовый выход электролюминесценции в  $p_3$ -слое

$$\eta_{вГ} = \eta_i \cdot g_3, \quad (4)$$

где  $\eta_i$  – эффективность инжекции электронов. Коэффициент  $\eta_i$  может уменьшаться при облучении за счет увеличения безызлучательного тока, обусловленного рекомбинацией носителей заряда в обедненном слое  $p_3$ - $n$ -перехода. Кроме того, даже незначительная компенсация  $p_3$ - и  $n$ -слоев при  $\gamma$ -облучении может приводить к небольшому повышению коэффициента поглощения света  $\alpha$ , что при толщине  $n$ -слоя  $W_n \gg \alpha^{-1}$  может существенно уменьшить величину внешнего квантового выхода электролюминесценции.

Из (4) следует

$$\frac{g_3^0}{g_3} - 1 = B_3 \tau_n^0 \Phi_\gamma. \quad (5)$$

Очевидно, если увеличение безызлучательного тока в области объемного заряда и рост коэффициента поглощения  $\alpha$  незначительны в процессе радиационной деградации, то для лучистого потока в коротковолновой полосе должно выполняться

$$\frac{\Phi_k^0}{\Phi_k} - 1 = B_3 \tau_n^0 \Phi_\gamma, \quad (6)$$

где  $\Phi_k^0 = \Phi_k(0)$ .

На рис. 1 представлена зависимость  $\lg\left(\frac{\Phi_k^0}{\Phi_k} - 1\right)$  от интегрального потока  $\gamma$ -излучения

$\Phi_\gamma$ , полученная при облучении нескольких образцов МГС. Для ряда образцов показаны точки, соответствующие различным дозам  $\gamma$ -квантов при повторном облучении. Из рисунка видно, что зависимость (7) хорошо выполняется для исследованных МГС. Особенно точно она выполняется для значений  $\Phi_k$ , полученных повторным облучением одного и того же образца.

Из (5) следует, что если эффективность инжекции электронов  $\eta_i$  уменьшается при облучении, то при постоянном коэффициенте поглощения  $\alpha$

$$\frac{\Phi_{\kappa}^0}{\Phi_{\kappa}} - 1 = \left[ 1 - \frac{\eta_i(\Phi_{\gamma})}{\eta_i^0} + B_3 \tau_n^0 \Phi_{\gamma} \right] \frac{\eta_i^0}{\eta_i(\Phi_{\gamma})}, \quad (7)$$

т.е.  $\left( \frac{\Phi_{\kappa}^0}{\Phi_{\kappa}} - 1 \right)$  является нелинейной функцией от  $\Phi_{\gamma}$ . Поэтому линейная зависимость  $\left( \frac{\Phi_{\kappa}^0}{\Phi_{\kappa}} - 1 \right)$  от  $\Phi_{\gamma}$ , представленная на рис. 1, свидетельствует о том, что основным механизмом уменьшения интенсивности коротковолновой полосы излучения  $\Phi_{\kappa}$  при  $\gamma$ -облучении в исследованных МГС является увеличение интенсивности безызлучательной рекомбинации. Из данных рис. 1 можно получить коэффициент радиационного изменения безызлучательного времени жизни в  $p_3$ -слое  $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ :  $B_3 \tau_n^0 = 0,9 \cdot 10^{-17}$  квант/см<sup>2</sup> в сравнении с данными [4, 6] показывает, что при  $\tau_n^0 \cong 10^{-8} \text{ c}^{-1}$  радиационная стойкость времени жизни электронов в  $p_3 \text{ Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$  выше, чем в  $\text{GaAs}$ .

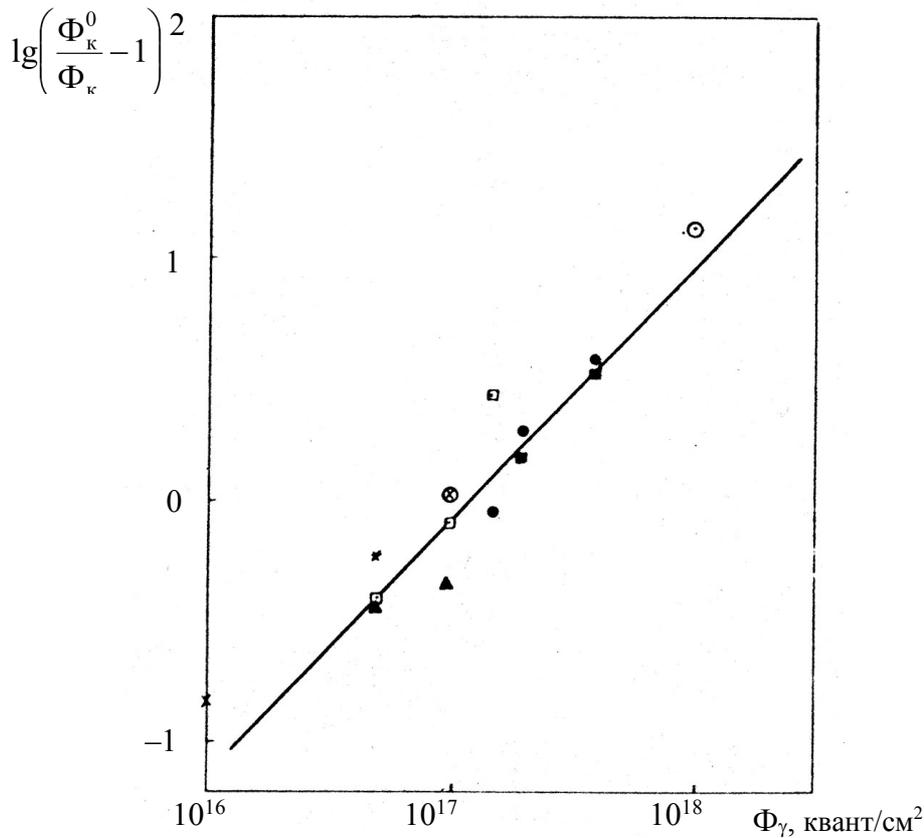


Рисунок 1 – Зависимость относительного изменения интенсивности коротковолновой полосы излучения МГС от интегрального потока  $\gamma$ -квантов  $\text{Co}^{60}$

Сравнение интенсивностей коротковолновой полосы  $\Phi_{\kappa}$  и длинноволновой  $\Phi_{\text{д}}$  полосы излучения МГС в процессе радиационной деградации показывает, что  $\Phi_{\text{д}}$  уменьшается под действием  $\gamma$ -облучения существенно быстрее, чем  $\Phi_{\kappa}$ . Это можно объяснить с учетом того, что длинноволновые фотоны рождаются за счет повторного излучения. Если доля излучательных переходов в  $p_1$ -слое

$$g_1 = g_1^0 \frac{1}{1 + B_1 \tau_{nl}^0 \Phi_{\gamma}}, \quad (8)$$

где обозначения такие же, как и в выражении (4), то при постоянстве величин  $\eta_i$  и  $\alpha$  с учетом

$$\Phi_{\text{д}} = A \cdot \Phi_{\kappa} \cdot g_1 \quad (9)$$

получим

$$\frac{\Phi_D^0}{\Phi_D} = (1 + B_3 \tau_{n3}^0 \Phi_\gamma) (1 - B_1 \tau_{n1}^0 \Phi_\gamma). \quad (10)$$

Если  $B_3 \tau_{n3}^0 = B_1 \tau_{n1}^0$ , то из (11) и (7) следует

$$\frac{\Phi_D^0}{\Phi_D} = \left( \frac{\Phi_K^0}{\Phi_K} \right)^2. \quad (11)$$

На рис. 2 представлена зависимость  $\left( \frac{\Phi_D}{\Phi_D^0} \right)^{1/2}$  от  $\frac{\Phi_K}{\Phi_K^0}$  для исследованных образцов.

Линейность полученной зависимости свидетельствует о применимости выражений (10) и (11) для описания радиационной деградации МГС с повторным излучением, а также о том, что  $B_3 \tau_{n3}^0 = B_1 \tau_{n1}^0$ .

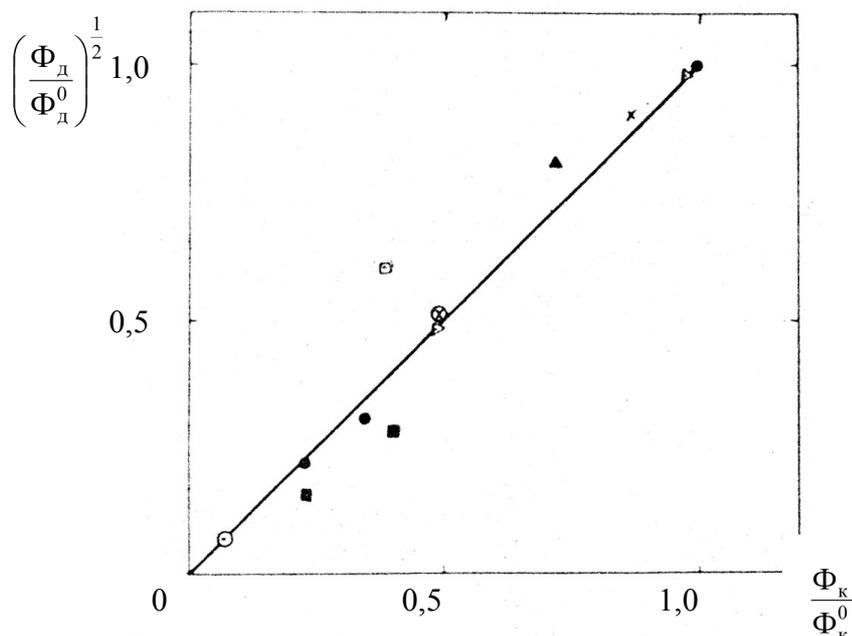


Рисунок 2 – Зависимость относительных изменений интенсивности длинноволновой полосы излучения МГС от изменений коротковолновой полосы в процессе радиационной деградации

В заключение можно сказать следующее. Зависимость интенсивности К-полосы электролюминесценции от интегрального потока  $\gamma$ -квантов соответствует уменьшению безызлучательного времени жизни электронов. Скорость уменьшения Д-полосы под действием  $\gamma$ -облучения существенно больше, чем для К-полосы. Полученная взаимосвязь относительных изменений Д- и К-полос электролюминесценции свидетельствует, что увеличением оптических потерь и изменением коэффициента инжекции электронов в  $p$ - $n$ -переходе при расчете радиационной стойкости данных СИД с переизлучением фотонов можно пренебречь, а при расчете изменений параметров МГС в процессе их радиационной деградации емкость  $p$ - $n$ -переходов и величину последовательного сопротивления диодов можно считать постоянными, так как они практически не меняются.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Коршунов Ф.П. Радиационные эффекты в полупроводниковых приборах / Коршунов Ф.П., Гатальский Г.В., Иванов Г.И. – Минск: Наука и техника, 1978. – 236 с.
2. Винецкий В.Л. Радиационная физика полупроводников /В.Л. Винецкий, Г.А. Холодарь. – К.: Наук. думка, 1979. – 336 с.

3. Действие проникающей радиации на изделия электронной техники / [Кулаков В.М., Ладыгин Е.А. и др.]; под ред. Е.А. Ладыгина. – М.: Сов. радио, 1980. – 224 с.
4. Irkha V. Degradation of Light – Emitting Diodes on the Basis of Semiconductors of A3B5 by Influence  $\gamma$ -Irradiation // V. Irkha, P.Markolenko /// Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science. Thesis of the X<sup>th</sup> International Conf. TCSET'2010, (23-27 February 2010). – Lviv – Slavske. – 2010. – P. 366.
5. Ирха В.И. Деградація оптичних излучателів на основі GaAlAs – структур /В.И. Ирха, П.Ю. Марколенко // 72 науч.- техн. конф. ОНАС им. А.С.Попова, 13-15 декабря 2017: тезисы докл. – Одесса, 2017. – Ч. I. – С. 10-11.
6. Ирха В.И. Деградація електролюмінесценції многослойних гетероструктур под действием ионизирующего излучения / В.И.Ирха // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2017. – № 2. – С. 5-11.

REFERENCES:

1. Korshunov F.P. Radiation effects in semiconductor devices / Korshunov F.P., Gatalsky G.V., Ivanov G.I.. - Minsk: Science and Technology, 1978. - 236 p.
2. Vinetsky V.L. Radiation Physics of Semiconductors./ V.L.Vinetsky, G.A. Cholodar. – K.: Science. Dumka, 1979. - 336 p.
3. Effect of penetrating radiation on electronic products / [Kulakov V.M., Ladygin E.A. and others]; Ed. E.A. Ladygin. –Moscow: Sov. radio, 1980. – 224 p.
4. Irkha V. Degradation of Light – Emitting Diodes on the Basis of Semiconductors of A3B5 by Influence  $\gamma$  - Irradiation // V. Irkha, P.Markolenko /// Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science. Thesis of the X<sup>th</sup> International Conf. TCSET'2010, (23-27 February 2010). – Lviv – Slavske. – 2010. – P. 366.
5. Irkha V. I. Degradation of optical radiators based on GaAlAs structures / V. I. Irkha, P.Y. Markolenko // Proceedings of 72 scientific – techn. conf. ONAZ named by O. S. Popova, 13-15 Decem. 2017:Thesis. – Odessa, 2017. – V. I. – P.10-11.
6. Irkha V. I. Electroluminescence of multilayer heterostructures degradation by the influence of ionizing radiation / V. I. Irkha // Naukovi pratsi ONAZ im O. S. Popova. – 2017. – № 2. – P. 5 -11.