

CHARACTERISTICS OF THE RADIATION SPECTRA OF INITIAL AND ELECTRON-IRADIATED UV INGAN LEDs

*Roman Vernydub^{1,2}, Tetiana Mosiuk^{1,3}, Ihor V. Petrenko^{4,5},
Oleksandr Radkevich^{4,6}, Dmytro Stratilat^{4,7}, Volodymyr Tartachnik^{4,8}*

ОСОБЛИВОСТІ СПЕКТРІВ ВИПРОМІНЮВАННЯ ВИХІДНИХ ТА ОПРОМІНЕНИХ ЕЛЕКТРОНАМИ УФ СД INGAN

*Роман Вернидуб, Тетяна Мосюк, Ігор Петренко,
Олександр Радкевич, Дмитро Стратілат, Володимир Тартачник*

Abstract. Light-emitting diodes (LEDs) grown on the basis of $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ solid solutions ($x \leq 0.1$) were investigated. It was found that the radiation spectrum of the studied samples at 300K consists of three bands with $\lambda_{1 \max} = 370 \text{ nm}$ (UV), $\lambda_{2 \max} = 550 \text{ nm}$ (yellow) and $\lambda_{3 \max} = 770 \text{ nm}$ (red). The first of them arises as a result of recombination transitions in quantum wells (QWs); the other two are of defective origin.

The result of the temperature assessment of the pn-junction in the mode of the nominal operating current of the diode ($I = 20 \text{ mA}$) is close to 252°C . The drop in the efficiency of the LED radiation as a result of the increase in the current may be due to the increase in the relative contribution of non-radiative transitions when the quasi-Fermi level enters the region of the increased density of the tails of the zones.

The doublet structure of the maximum of UV radiation — the band at 77K — is a consequence of the phonon repetition of the main emission line.

Irradiation with electrons is accompanied by a drop in the intensity of the luminescence of all three bands; the occurrence of the maximum at $\lambda_{\max}=420 \text{ nm}$ is obviously related to the introduction of radiation defects into the QW region.

Keywords: InGaN, LED, current-voltage characteristics, electron irradiation

¹ Dragomanov Ukrainian State University, Kyiv, Ukraine

² <https://orcid.org/0000-0002-1783-965X>

³ <https://orcid.org/0009-0007-0759-3469>

⁴ Institute of Nuclear Research of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

⁵ <https://orcid.org/0009-0006-4111-1489>

⁶ radkevich@imd.gov.ua

⁷ <https://orcid.org/0000-0003-4682-4569>

⁸ <https://orcid.org/0000-0002-6550-458X>

Анотація. Досліджувались світлодіоди (СД), вирощені на основі твердих розчинів $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($x \leq 0,1$). Виявлено, що спектр випромінювання досліджуваних зразків при 300К складається з трьох смуг з $\lambda_{1\text{max}} = 370$ нм (УФ), $\lambda_{2\text{max}} = 550$ нм (жовтої) та $\lambda_{3\text{max}} = 770$ нм (червоної). Перша з них виникає внаслідок рекомбінаційних переходів у квантових ямах (КЯ); дві інші — дефектного походження.

Результат оцінки температури р-п-переходу у режимі номінального робочого струму діода ($I = 20$ мА) близький до 252°C . Падіння ефективності випромінювання СД у результаті зростання струму може бути зумовленим збільшенням відносного внеску безвипромінювальних переходів при входженні квазірівня Фермі в область підвищеної щільності хвостів зон. Дуплетна структура максимуму випромінювання УФ — смуги при 77К — наслідок фононного повторення основної лінії випромінювання.

Опромінення електронами супроводжується падінням інтенсивності свічення всіх трьох смуг; виникнення максимуму $\lambda_{\text{max}} = 420$ нм очевидно пов'язане із введенням радіаційних дефектів в область КЯ.

Ключові слова: InGaN, світлодіод, вольт-амперні характеристики, опромінення електронами

Вступ

Новітні напівпровідникові джерела світла — світлодіоди, володіючи рядом незаперечних переваг перед традиційними — мініатюрністю, високою ефективністю, швидкодією, можливістю одержання з робочими довжинами хвиль у широкому діапазоні — від ІЧ до УФ, повністю витіснили теплові та газосвітні аналоги зі сфери мікро- та оптоелектронної техніки. Процес заміщення у значній мірі також торкнувся виробництва товарів широкого вжитку і побутових пристроїв.

СД стали безальтернативними джерелами випромінювання при створенні моніторів різних видів для систем відображення, зберігання та обробки інформаційних масивів, виготовлення повнокольорових великомасштабних екранів [1–12].

Наразі особливо інтенсивно розвиваються технології одержання, дослідження та застосування СД мікронних розмірів та приладів гібридного типу. У роботі [11] повідомляється про роботу нової неорганічної гібридної наноструктури, яка використовує принцип ефективного непроменевого перенесення енергії між «синіми» множинними мікроямами та «жовтим» полімером. Використання масивів нанодротів InGaN/GaN забезпечує високі оптичні характеристики випромінювання синього кольору, при цьому ефективність непроменевого перенесення енергії сягає 73%.

Подібним СД властивий високий коефіцієнт конверсії, стабільність, добра емісія та можливість виготовлення гнучких дисплеїв.

У роботі [12] повідомляється про одержання точкового джерела RGB тандемного типу, що базується на активних шарах $\text{In}_{0,15}\text{Ga}_{0,85}\text{N}$ (голубе свічення), $\text{In}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{N}$ (зелене) та $\text{In}_{0,5}\text{Ga}_{0,5}\text{N}$ (червоне), перспективного для виготовлення моніторів з підвищеною роздільною здатністю.

Висока енергія УФ-квантів зумовлює їхнє іноді дещо специфічне використання, а саме, наприклад, з метою дезактивації вірусу Sars Covid 2. [13]; у роботі [14] наголошується, що СД здатні поліпшувати якість продуктів, впливаючи на активність захисних сил фруктів та овочів, інактивуючи

харчові патогени, зменшуючи вміст фенолів і флавоноїдів, стимулювати утворення протиканцерогенів [14]. Вже традиційними стали застосування УФ СД для очищення води, дезінфекції медичних інструментів і ліків, фототерапії, діагностики, полімеризації, у криміналістиці та ін. [15, 16].

Опромінення швидкими частинками, як контрольований спосіб введення дефектів певного типу, може сприяти одержанню додаткової інформації про роль порушень структури у формуванні жовтої $\lambda_{2\text{max}} = 550\text{ нм}$ та червоної $\lambda_{3\text{max}} = 770\text{ нм}$ смуг спектру випромінювання [12, 17] при оцінці деградаційної константи основної лінії випромінювання $h\nu = 370\text{ нм}$.

Слід також зауважити, що кількість робіт, присвячених вивченню впливу опромінення на характеристики СД InGaN з квантовими ямами — значна. Для прикладу можна назвати лише опубліковані відносно недавно [18-20]. Водночас число статей, де досліджуються опромінені УФ СД InGaN, вкрай обмежене [21].

Експеримент

Досліджувались серійні ультрафіолетові світлодіоди (УФ СД) із КЯ, виготовлені на основі твердого розчину $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($x \leq 0,1$) з епоксидною лінзою, яка в разі потреби — зшліфовувалась.

Спектри електролюмінесценції вимірювались за допомогою автоматизованого комплексу, зібраного на базі монохроматора МДР, та портативним спектрометром StellarNet Inc. в межах температур $77 \div 300\text{ К}$ і струмів $10\text{ мкА} \div 20\text{ мА}$.

Вольт-амперні характеристики (ВАХ) СД знімались сконструйованим для цієї мети пристроєм, керованим комп'ютером. Інтервал вимірювальних струмів становив $10^{-10} \div 10^2\text{ А}$ у межах $77 \div 300\text{ К}$.

Опромінення електронами з $E = 2\text{ МеВ}$ відбувалося при кімнатній температурі завдяки інтенсивному повітряному охолодженню.

Використані нами дози опромінення не спричиняли помітного зменшення оптичного пропускання лінзи, яке потрібно було б урахувати.

Результати

Спектр випромінювання досліджуваних СД при 300 К складається з трьох смуг із максимумами $\lambda_{\text{max}} = 370\text{ нм}$ (УФ), $\lambda_{\text{max}} = 550\text{ нм}$ (жовта) та $\lambda_{\text{max}} = 770\text{ нм}$ (червона). Положення двох останніх на рис. 1 показано стрілками.

Основною слід вважати інтенсивну УФ-смугу з напівшириною $\Delta\lambda = 16\text{ нм}$, зумовлену випромінюванням квантових ям; на рис. 2 вона показана разом із функціями розподілу Лоренца і Гауса, побудованими на основі використання основних параметрів експериментальної кривої — напівширини та інтенсивності у максимумі, згідно:

$$F_{\text{л.}}(\nu) = \frac{\Gamma}{2\pi} \frac{1}{(\nu - \nu_0)^2 + \frac{\Gamma^2}{4}}; \quad \Gamma - \text{напівширина лінії Лоренца};$$

$$F_H(\nu) = \frac{2\sqrt{\ln 2}}{\sqrt{\pi} \cdot \delta\nu} e^{-\frac{(\nu - \nu_0)^2 \ln 2}{(\delta\nu)^2}}; \quad \delta\nu - \text{напівширина лінії Гауса}$$

Видно, що експериментальна крива добре узгоджується з обома розподілами.

Винятком може бути лише деяка відмінність в області «крил», яка існує внаслідок специфіки двох теоретичних розподілів.

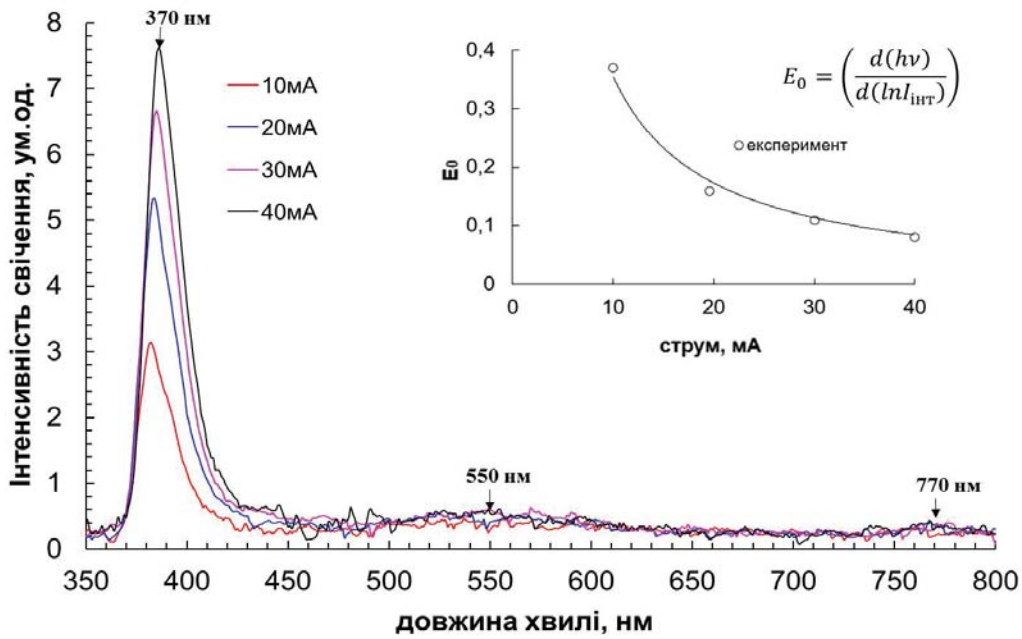


Рис. 1. Спектральний розподіл інтенсивності свічення УФ-діода InGaN ($T = 300\text{K}$, $I = 10, 20, 30, 40\text{mA}$). На вкладці — залежність параметра E_0 від струму

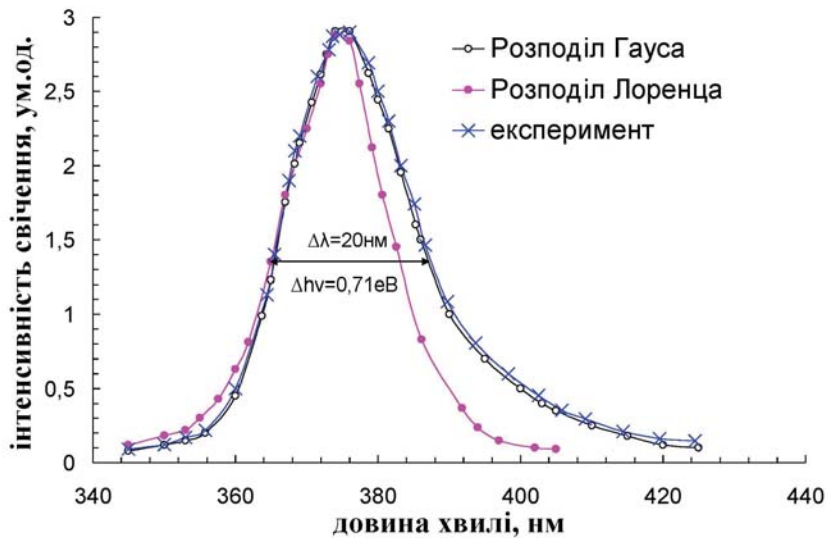


Рис. 2 Розподіл інтенсивності свічення УФ СД InGaN

За нахилом спектральної лінії в області великих енергій квантів можна оцінити верхню межу температури носіїв струму T_e в області р-п-переходу.

$$\frac{d(\ln I_{\text{інт.}})}{d(h\nu)} \sim -\frac{1}{T_e}; \quad K - \text{постійна Больцмана}$$

Для наших зразків при номінальному струмі $I = 20 \text{ мА}$ вона становить 252°С і близька до $T_e = 221^\circ\text{С}$ для голубих СД InGaN.

Значне перевищення обох одержаних величин над кімнатною температурою зумовлене доланням бар'єру р-п-переходу в першу чергу високоенергетичними носіями.

Нахил низькоенергетичної частини профілю лінії — один із основних параметрів двовимірної феноменологічної моделі активної області гетероструктури з комбінованою густиною станів

$$N^{2\text{Д}}(h\omega, E_g^*, E_0) = \frac{N_0^{2\text{Д}}}{1 + \exp\left(-\frac{h\omega - E_g^*}{E_0}\right)},$$

де вплив флуктуацій потенціала враховано введенням експоненційної функції падіння [22].

У нашому випадку зростання інжекційного струму супроводжується зменшенням параметра E_0 (рис. 1), що, в свою чергу, призводить до збільшення $N^{2\text{Д}}$. Отже квазірівні Фермі, рухаючись у бік відповідних зон, потрапляють в область більшої щільності станів у хвостах їхнього розподілу. При цьому, як показано у роботі [23,24], спостерігається падіння ефективності емісії фотонів внаслідок зростання внеску безвипромінювальної рекомбінації через глибокі рівні хвостів зон.

При 77 К на спектрах виникає тонка структура (рис. 3) з головним максимумом при $\lambda_{\text{max}} = 376 \text{ нм}$ та двома бічними з $\lambda_{\text{max}} = 368 \text{ нм}$ і $\lambda_{\text{max}} = 386 \text{ нм}$, відстань між якими близька до енергії оптичного фонуна — 80 meV у GaN.

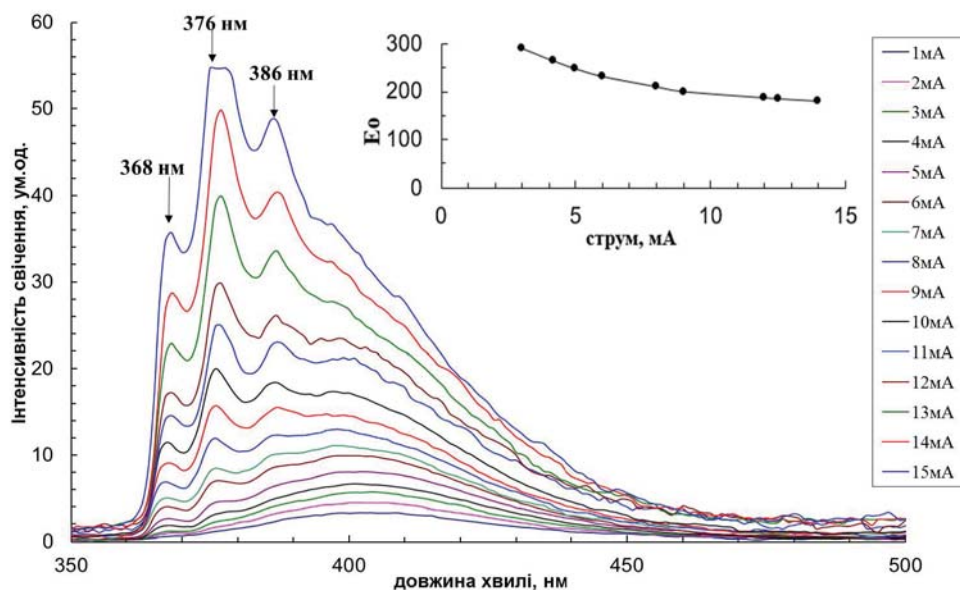


Рис. 3. Основна УФ смуга випромінювання InGaN світлодіода ($T = 77 \text{ К}$, $I = 1 \div 15 \text{ мА}$)

Основний недолік ультрафіолетових СД — присутність у спектрі випромінювання окрім основної з $\lambda = 370$ нм ліній значно меншої інтенсивності — жовтої ($\lambda = 550$ нм) та червоної ($\lambda = 770$ нм), котрі погіршують спектральну «чистоту» свічення діода. Їхнє походження пов'язане зі структурними дефектами матеріалу.

Стосовно жовтої — більшість авторів схиляється до висновку, що у всіх зразках GaN n-типу вона виникає у результаті переходів із С-зони, чи мілких донорних рівнів на глибокі акцептори з енергіями іонізації 0,8-0,9 еВ, які найімовірніше багатократно заряджені і містять комплекси з V_{Ga} [16, 17]. Висловлюється думка, що відповідальність за неї можна покласти на комплекси V_{Ga} з атомом заміщення; до її формування можуть бути причетними також комплекси з вуглецем, або ж окремі атоми С.

Незважаючи на значне число робіт, присвячених цій темі, досі не існує єдиного погляду на локалізацію дефектів, що спричинюють жовте свічення — у об'ємі, чи на поверхні.

У наших зразках жовта смуга в межах $I = 0,2$ – 2 мА має вигляд симетричної кривої Гаусового профілю з напівшириною $\Gamma = 96$ нм. і максимумом $h\nu_{max} = 550$ нм (рис. 4). Залежність інтенсивності випромінювання від величини струму — майже лінійна (рис. 4 вставка).

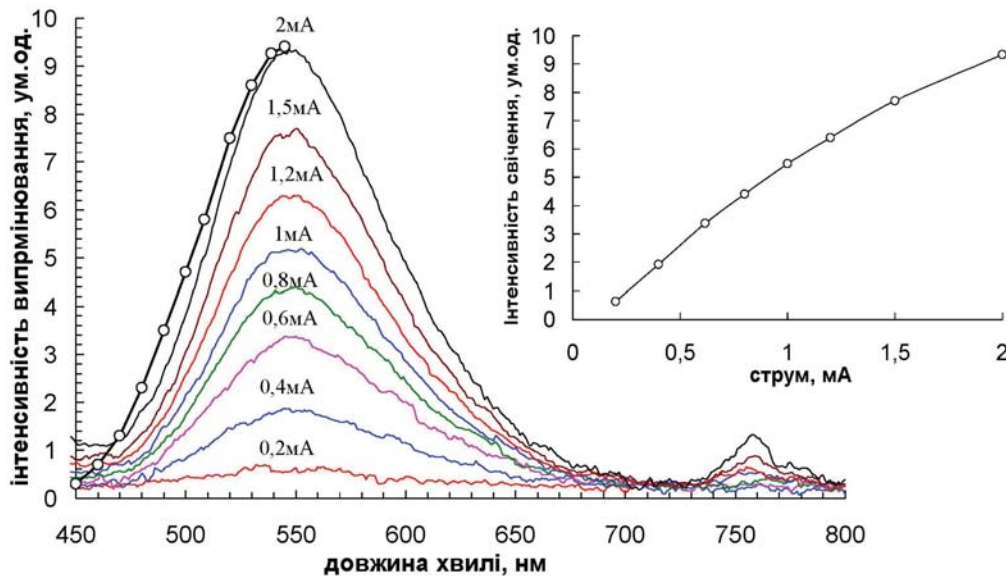


Рис. 4 Жовта смуга випромінювання УФ світлодіода 300К. Γ — розподіл Гауса (-o-)

Параметр E_0 , визначений з нахилу низькоенергетичної частини смуги, як і для основної УФ-смуги, зі збільшенням струму через діод також зменшується, (рис. 3), що еквівалентно зростанню комбінованої густини станів N^{2D} , зумовленому переміщенням квазірівнів Фермі [23,24].

Червона смуга ($\lambda_{max} = 770$ нм) при $I = 2$ мА за інтенсивністю в 7,1 раз слабкіша жовтої; профіль — близький до Гаусового. Коли величина струму сягає $I = 40$ мА, вона стає різко асиметричною з напівшириною $\Gamma = 35$ нм і значно відрізняється від розподілу Гауса, що однозначно можна трактувати, як наслідок впливу дефектів на її форму; порівняно з основною УФ-лінією він проявляється доволі істотно, рис. 5 а).

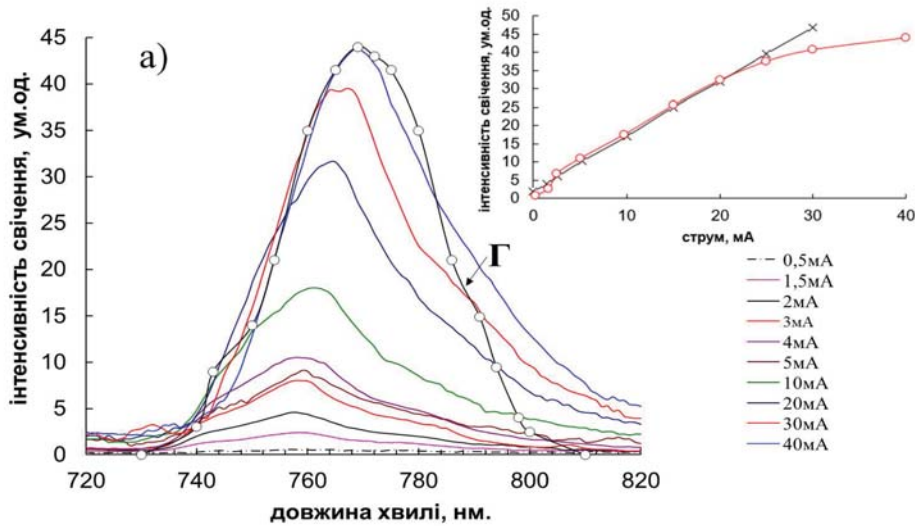


Рис. 5 (а) Червона смуга випромінювання УФ світлодіода $T = 300\text{ K}$, Γ — розподіл Гауса (-o-). На вставці показана залежність інтенсивності випромінювання від струму (x- розрахунок, -o- експеримент)

Не виключено, що причина відмінності — у походженні випромінювання. Якщо УФ-лінія — результат свічення квантових ям, то у формуванні червоної смуги можуть приймати участь дефекти різного виду, в тому числі і локалізовані у бар'єрах GaN вище V-зони на 1, 2÷1, 3 eV [17].

При великих струмах ($I = 40\text{ mA}$) стає помітним «червоний зсув» ($\Delta\lambda = 10\text{ nm}$), зумовлений зміною E_g кристала внаслідок його нагрівання.

При низьких температурах (77 K) широкий максимум $\lambda = 750\text{ nm}$ (300 K) розщеплюється на три $\lambda_{\text{max}1} = 736\text{ nm}$, $\lambda_{\text{max}2} = 753\text{ nm}$ та $\lambda_{\text{max}3} = 774\text{ nm}$. (Їхнє положення оцінено за спектром, знятим при $I = 20\text{ mA}$, рис. 5 б).

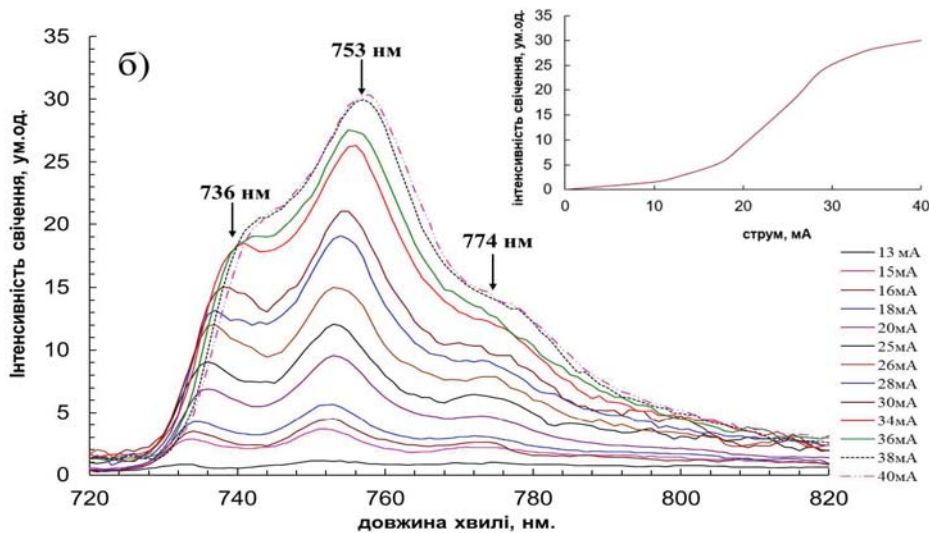


Рис. 5 (б) Червона смуга УФ світлодіода $T = 77\text{ K}$. На вставці показана залежність інтенсивності випромінювання від струму

Основним очевидно слід вважати випромінювання з $\lambda = 753$ нм; два інших максимуми зміщені відносно головного на $\Delta E_1 = 38,2$ меВ та $\Delta E_2 = 41,9$ меВ, їх можна трактувати, як фононні репліки основного [26].

Залежність інтенсивності свічення від величини струму через діод в інтервалі від нульового до номінального ($I=20$ мА) майже лінійна

$$I = BI^{0,9}, \quad \text{де } B = 2,2$$

для кімнатної температури і значно складніша — при 77К, де про лінійність можна говорити лише $I = 20 \div 35$ мА (рис. 5 б, вставка).

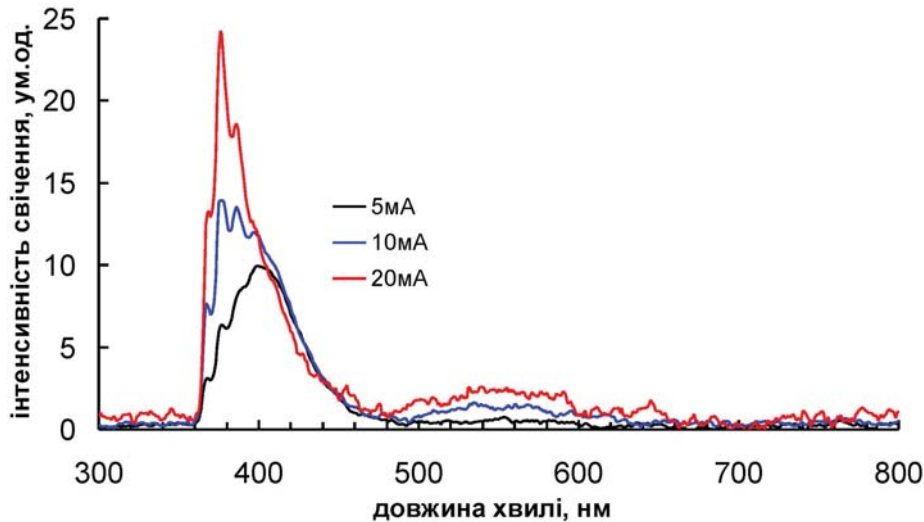


Рис. 6 (а) Спектр вихідного уф світлодіода InGaN при $T = 77$ К, струм 5, 10, 20 мА

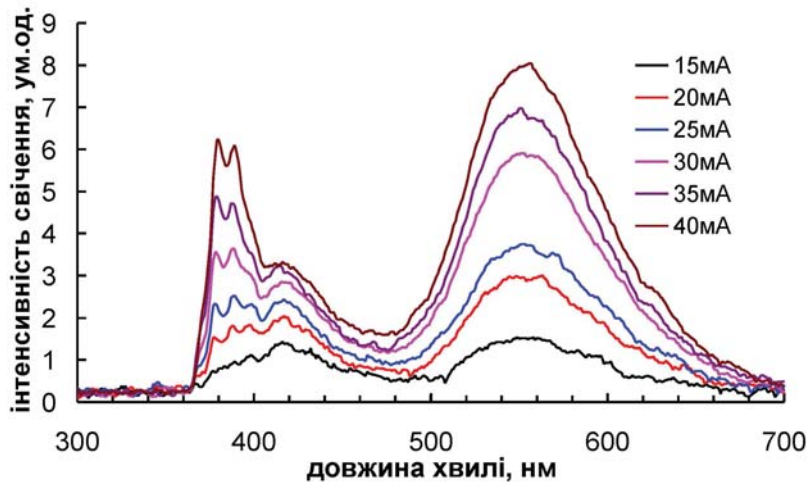


Рис. 6 (б) Спектр свічення опроміненого електронами ($\Phi = 5,74 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$) УФ світлодіода InGaN при $T = 77$ К, струм 15, 20, 25, 30, 35, 40 мА

Опромінення електронами з $E = 2$ МеВ супроводжується падінням інтенсивності свічення всіх трьох смуг, що свідчить про введення безвипромінювальних рівнів як у бар'єри GaN, так і в активні області КЯ — тверді розчини InGaN. На рис 6а,б показані спектри вихідного та опроміненого ($\Phi = 5,74 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$) діода, зняті при 77 К та різних струмах.

На рис. 7 вони зображені в однаковому масштабі. З рис. 6 б) видно, що у спектрі опроміненого діода на фоні загального падіння інтенсивності свічення квантової ями $\lambda_{\max} = 375$ нм виникає додатковий максимум $\lambda_{\max} = 420$ нм., зумовлений введенням радіаційних порушень структури, найімовірніше у шар InGaN. Отже, водночас із введенням при опроміненні переважного числа безвипромінювальних рівнів у матеріал квантової ями, виникає певна кількість дефектів, які служать центрами випромінювання з $\lambda_{\max} = 420$ нм.

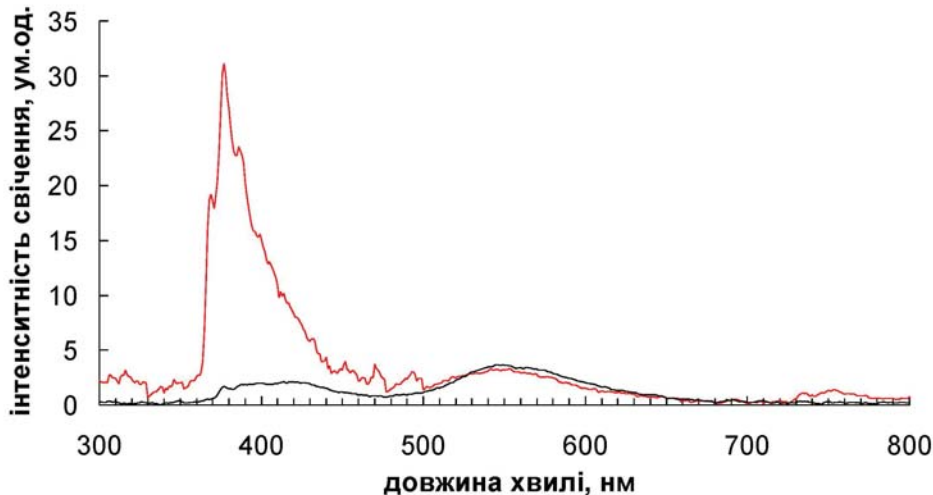


Рис. 7 Спектри випромінювання вихідного — (1), та опроміненого електронами ($\Phi = 5,74 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$) — (2) УФ світлодіода InGaN при $T = 77 \text{ К}$, ($I = 20 \text{ мА}$)

Дозна залежність найчутливішої до радіації УФ-смуги — близька до експоненційної. Вища порівняно з іншими двома смугами радіаційна стійкість жовтої очевидно свідчить, що її джерелом можуть бути комплекси з вуглецем.

Висновки

Спектр випромінювання досліджуваних УФ СД, вирощених на основі розчину $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($x = 0, 1$), складається з трьох ділянок $\lambda_{1\max} = 370$ нм, $\lambda_{2\max} = 550$ нм, $\lambda_{3\max} = 770$ нм; — перша з них, найінтенсивніша УФ — смуга, дві останні — жовта та червона майже на порядок слабкіші.

УФ — свічення зумовлене міжрівневими переходами в області КЯ; дві інші лінії — дефектного походження; Профіль їхньої високоенергетичної частини добре узгоджуються з класичними розподілами Лоренца і Гауса. За нахилом високоенергетичного крила УФ — випромінювання зроблена оцінка верхньої межі температури носіїв струму T_e у межах р-п-переходу. При номінальному робочому струмі $I = 20 \text{ мА}$ вона становить приблизно 252 С ; її велике значення порівняно з кімнатною пов'язано з доланням бар'єрного поля першочергово високоенергетичними носіями.

Зменшення параметра E_0 моделі активної області гетероструктури при зростанні рівня інжекції зумовлене входженням квазірівня Фермі в область більшої щільності хвостів густини станів і, відповідно, зменшенням інтенсивності випромінювальної рекомбінації.

Розщеплення максимума УФ випромінювання при 77К виникає як наслідок повторення основної лінії 370 нм за участю фонона з $E_\phi = 80$ меВ; подібна особливість стосується також червоної смуги $E_\phi = 38,2$ меВ та 41,9 меВ.

Опромінення електронами з $E = 2$ МеВ СД InGaN/GaN приводить до падіння інтенсивності всіх трьох ліній у результаті введення безвипромінювальних рівнів як у активні області InGaN, так і у бар'єри GaN. На фоні загального зменшення інтенсивності рекомбінації виникає додатковий максимум з $\lambda_{\max} = 470$ нм, спричинений присутністю у зразку дефектів радіаційного походження.

Література

- [1] Kneissl M. 2016. A brief review of III — Nitride UV emitter technologies and their applications, *Nitride Ultraviolet Emitters, Springer International Publishing, Switzerland*, Chapter 1.
- [2] Den Baars, SP et al. 2013. Development of gallium-nitride-based light-emitting diodes (LEDs) and laser diodes for energy-efficient lighting displays. *Acta Materialia* 61, 945–951. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2012.10.042>
- [3] Nakamura S. 2015. Nobel Lecture. Background story of the invention of efficient InGaN light emitting diodes. *Reviews of Modern Physics* 87, 1139–1151. <https://doi.org/10.1002/andp.201500801>
- [4] Schubert E. F. 2006. Light-Emitting Diodes. *Cambridge University Press*. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511790546>
- [5] Yang G. F., Zhang Q., Wang Y., Gao S. M., Zhang R., Zheng Y. D. 2015. Analysis of 270/290/330-nm AlGaIn-Based Deep Ultraviolet Light-Emitting Diodes With Different Al Content in Quantum Wells and Barriers, *IEEE Photonics Journal* 7 (6), 2200707. <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2015.2491604>
- [6] Tingzhu Wu, Chin-Wei Sher, Yue Lin and al. 2018. Mini-LED and Micro-LED: Promising candidates for the next generation display technology. *Applied Sciences* 8 (9), 1557. <https://doi.org/10.3390/app8091557>
- [7] Matthew S. Wong, Shuji Nakamura and Steven P. 2020. DenBaars, Review — Progress in High Performance III-Nitride Micro-Light-Emitting Diodes. *ECS Journal of Solid State Science and Technology* 9 (1), 015012. <https://doi.org/10.1149/2.0302001JSS>
- [8] Zhaojun Liu, Chun Lin, Byung-Ruool Hyun at al. 2020. Micro-light-emitting diodes with quantum dots in technology, *Sciences and Applications* 9 (83), 1557. <https://doi.org/10.1038/s41377-020-0268-1>
- [9] Konthoujam James Singh, Yu-Ming Huang, Tanveer Ahmed and al. 2020. Micro-LED as a Promising Candidate for High-Speed Visible Light Communication. *Applied Sciences* 10 (20), 7384. <https://doi.org/10.3390/app10207384>
- [10] Sung-Wen, Huang Chen, Chin-Chiang Shen and all. 2019. Full-color monolithic hybrid quantum dot nanoring micro light — emitting diodes with improved efficiency using atomic layers deposition and nonradiative resonant energy transfer. *Photonic Research* 7 (4), 416–422). <https://doi.org/10.1364/PRJ.7.000416>

- [11] Smith R., Liu B., Bai J. and Wang T. Hybrid III-Nitride Organic Semiconductor Nanostructure with High Efficiency Energy Transfer for white Light Emitters. <https://doi.org/10.1021/nl400597d>
- [12] Lizhu Li, Guo Tang, Zhao Shi, He Ding, Changbo Liu, et al. 2021. Transfer-printed tandem microscale light-emitting diodes full-color displays. *Proc Natl Acad Sci USA*. 118(18), e2023436118c 2023436118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2023436118>
- [13] Minamikawa T., Koma T., Suzuki A., Nagamatsu K., Yasui T., Yasutomo K., Nomaguchi M. 2021 Inactivation of SARS-CoV-2 by deep ultraviolet light emitting diodes: A review, *Japanese Journal of Applied Physics* 60(9)7. <https://doi.org/10.35848/1347-4065/ac19d1>
- [14] Finardi Sarah, Hoffmann Tuany Gabriela, Raquel Fernanda. 2021. Comprehensive study of Light-Emitting Diodes (Led's) and Ultraviolet LED-Light Application in Good Quality and Safety. *J Pure Appl Microbiol.* 15(3), 7091, 1125–1135. <https://doi.org/10.22207/JPAM.15.3.54>
- [15] Chen Jin, Loeb Stephanie and Kim Jae-Hong. 2017. LED revolution: fundamentals and prospects for UV disinfection applications, *Environmental Science. Water Research and Technology* 2. <https://doi.org/10.1039/C6EW00241B>
- [16] Kneissl M., Kolbe T., Chua C. 2011. Advances in group III-nitride-based deep UV light-emitting diode technology. *Semicond. Sci. Technology* 26(1), 014036. <https://doi.org/10.1088/0268-1242/26/1/014036>
- [17] Luminescence properties of defects in GaN. 2005. *Journal of Applied Physics* 97, 061301. <https://doi.org/10.1063/1.1868059>
- [18] Qifeng Zhao, Xiangyang Lu, Fajun Yu, Jinglei Xu, Zeping Fang, and Xiaoyong Liu. 2020. Research on Degradation of GaN-Based Blue LED Caused by γ Radiatio under Low Bias, *International journal of optics* 1592695. <https://doi.org/10.1155/2020/1592695>
- [19] Deep traps in InGaN/GaN single quantum well structures group with and without InGaN underlayers. 2020. A. I. Polyakov, C. Haller, R. Butte et al. *Journal Of Alloys And Compounds* 845, 156269. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.156269>.
- [20] Hedsir A. Z., Salehuddin N. N., Saidin N and Hasbullah. 2018. Influence of electron irradiation on the electroluminescence spectra of white InGaN light emitting diodes. *Ukr. Phys Opt.* 19(3), 159–163. <https://doi.org/10.3116/16091833/19/3/159/2018>
- [21] Lee In-Iwan, Polyakov A. Y., Smirnov N. V. et. all Electron irradiation of near-uv (InGaN light emitting diodes), *Phys. Stat. Sol.* <https://doi.org/10.3103/s1068366620040108>
- [22] Батчутдинов М. Л., Юнович А. Э. 2008. Спектры излучения гетероструктур с квантовими ямами типа InGaN/AlGaIn/GaN: модель двумерной плотности состояний, *ФТП* 42(4), 438–446.
- [23] Бочкарева Н. И., Горбунов Р. И., Клочков А. В. 2016. Оптические свойства голубых светодиодов в системе InGaIn/GaN при высокой плотности тока, *ФТП* 42(11), 1384–1390.
- [24] Бочкарева Н. И., Шеремет И. А., Шретер Ю. Г. 2016. Падение эффективности GaIn -светодиодов при высоких уровнях инжекции: роль водорода, *ФТП* 50(10), 1387–1393.
- [25] Reshchnikov M. A., Namara J. D. Mc., Helava H. 2018. Two yellow luminescence bands in undoped GaIn, *Sci.Rep.* 8(1), 8091. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-26354-z>

Reference

- [1] Kneissl M. 2016. A brief review of III — Nitride UV emitter technologies and their applications. *Nitride Ultraviolet Emitters. Springer International Publishing, Switzerland*, Chapter 1.
- [2] Den Baars, SP et al. 2013. Development of gallium — nitride — based light — emitting diodes (LEDs) and laser diodes for energy — efficient lighting displays. *Acta Materialia* 61, 945–951. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2012.10.042>
- [3] Nakamura S. 2015. Nobel Lecture. Background story of the invention of efficient InGaN light emitting diodes. *Reviews of Modern Physics* 87, 1139–1151. <https://doi.org/10.1002/andp.201500801>
- [4] Schubert E. F. 2006. Light — Emitting Diodes. *Cambridge University Press*. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511790546>
- [5] Yang G. F., Zhang Q., Wang Y., Gao S. M., Zhang R., Zheng Y. D. 2015. Analysis of 270/290/330-nm AlGaIn-Based Deep Ultraviolet Light-Emitting Diodes With Different Al Content in Quantum Wells and Barriers. *IEEE Photonics Journal* 7 (6), 2200707. <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2015.2491604>
- [6] Tingzhu Wu, Chin — Wei Sher, Yue Lin and al. Mini-LED and Micro-LED: Promising candidates for the next generation display technology. *Applied Sciences* 8 (9), 1557 (2018); <https://doi.org/10.3390/app8091557>
- [7] Matthew S. Wong, Shuji Nakamura and Steven P. 2020. DenBaars, Review — Progress in High Performance III — Nitride Micro-Light-Emitting Diodes. *ECS Journal of Solid State Science and Technology* 9 (1), 015012. <https://doi.org/10.1149/2.0302001JSS>
- [8] Zhaojun Liu, Chun Lin, Byung-Ruool Hyun at al. 2020. Micro-light-emitting diodes with quantum dots in technology. *Sciences and Applications* 9 (83), 1557. <https://doi.org/10.1038/s41377-020-0268-1>
- [9] Konthoujam James Singh, Yu-Ming Huang, Tanveer Ahmed and al. 2020. Micro-LED as a Promising Candidate for High-Speed Visible Light Communication. *Applied Sciences* 10 (20), 7384. <https://doi.org/10.3390/app10207384>
- [10] Sung-Wen, Huang Chen, Chin-Chiang Shen and all. 2019. Full-color monolithic hybrid quantum dot nanoring micro light-emitting diodes with improved efficiency using atomic layers deposition and nonradiative resonant energy transfer. *Photonic Research* 7 (4), 416–422. <https://doi.org/10.1364/PRJ.7.000416>
- [11] Smith R., Liu B., Bai J. and Wang T. Hybrid III — Nitride Organic Semiconductor Nanostructure with High Efficiency Energy Transfer for white Light Emitters. <https://doi.org/10.1021/nl400597d>
- [12] Lizhu Li, Guo Tang, Zhao Shi, He Ding, Changbo Liu, at all. 2021. Transfer — printed tandem microscale light-emitting diodes full-color displays. *Proc Natl Acad Sci USA*. 118(18), e2023436118c 2023436118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2023436118>
- [13] Minamikawa T., Koma T., Suzuki A., Nagamatsu K., Yasui T., Yasutomu K., Nomaguchi M. 2021 Inactivation of SARS — CoV — 2 by deep ultraviolet light emitting diodes: *A revive, Japanese Journal of Applied Physics* 60(9)7. <https://doi.org/10.35848/1347-4065/ac19d1>

- [14] Finardi Sarah, Hoffmann Tuany Gabriela, Raquel Fernanda. 2021. Comprehensive study of Light — Emitting Diodes (Led's) and Ultraviolet LED — Light Application in Good Quality and Safety. *J Pure Appl Microbiol.* 15(3), 7091, 1125–1135. <https://doi.org/10.22207/JPAM.15.3.54>
- [15] Chen Jin, Loeb Stephanie and Kim Jae-Hong. 2017. LED revolution: fundamentals and prospects for UV disinfection applications, Environmental Science. *Water Research and Technology* 2. <https://doi.org/10.1039/C6EW00241B>
- [16] Kneissl M., Kolbe T., Chua C. 2011. Advances in group III — nitride — based deep UV light — emitting diode technology. *Semicond. Sci. Technology* 26(1), 014036. <https://doi.org/10.1088/0268-1242/26/1/014036>
- [17] Luminescence properties of defects in GaN. 2005. *Journal of Applied Physics* 97, 061301. <https://doi.org/10.1063/1.1868059>
- [18] Qifeng Zhao, Xiangyang Lu, Fajun Yu, Jinglei Xu, Zeping Fang, and Xiao-yong Liu. 2020. Research on Degradation of GaN — Based Blue LED Caused by γ Radiatio under Low Bias, *International journal of optics* 1592695. <https://doi.org/10.1155/2020/1592695>
- [19] Deep traps in InGaN/GaN single quantum well structures group with and without InGaN underlayers. 2020. A. I. Polyakov, C. Haller, R. Butte et al. *Journal Of Alloys And Compounds* 845, 156269. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.156269>
- [20] Hedsir A. Z., Salehuddin N. N., Saidin N and Hasbullah. 2018. Influence of electron irradiation on the electroluminescence spectra of white InGaN light emitting diodes. *Ukr. J. Phys. Opt.* 19(3), 159–163. <https://doi.org/10.3116/16091833/19/3/159/2018>
- [21] Lee In-Iwan, Polyakov A. Y., Smirnov N. V. et. all Electron irradiation of near-uv (InGaN light emitting diodes), *Phys. Stat. Sol.* <https://doi.org/10.3103/s1068366620040108>
- [22] Batchutdinov M. L., Yunovych A. E. 2008. Radiation spectra of heterostructures with quantum wells of the InGaN/AlGaN/GaN type: a two-dimensional density model, *FTP* 42(4), 438–446.
- [23] Bochkareva N. I., Gorbunov R. I., Klochkov A. V. 2016. Optical properties of blue LEDs in the InGaN/GaN system at high current density, *FTP* 42(11), 1384–1390.
- [24] Bochkareva N. I., Sheremet I. A., Schroeter Yu.G. 2016 Efficiency drop of GaN LEDs at high injection levels: the role of hydrogen, *FTP* 50(10), 1387–1393.
- [25] Reshchnikov M. A., Namara J. D Mc., Helava H. 2018. Two yellow luminescence bands in undoped GaN, *Sci.Rep.* 8(1), 8091. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-26354-z>