

## Видима люмінесценція InGaN/GaN світлодіодів ультрафіолетового випромінювання 365 нм

В.П. Велешук<sup>1,\*</sup>, О.І. Власенко<sup>1</sup>, З.К. Власенко<sup>1</sup>, Д.М. Хміль<sup>1</sup>, О.М. Камуз<sup>1</sup>, І.В. Петренко<sup>2</sup>,  
В.П. Таргачник<sup>2</sup>, О.В. Шульга<sup>3</sup>, В.В. Борщ<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАНУ, пр. Науки, 41, 03680 Київ, Україна

<sup>2</sup> Інститут ядерних досліджень НАНУ, пр. Науки, 47, 03680 Київ, Україна

<sup>3</sup> Полтавський національний технічний університет ім. Ю. Кондратюка, пр. Першотравневий, 24, 36011 Полтава, Україна

(Одержано 23.07.2017, опубліковано online 16.10.2017)

У роботі вивчена видима електро- та фотолюмінесценція у світлодіодах ультрафіолетового випромінювання ( $\lambda = 365$  нм). Встановлено, що при температурі 77 К жовта електролюмінесценція відсутня і виникає при зростанні струму або температури. Виміряно потужність і ефективність (Лм/Вт) випромінювання жовтої електролюмінесценції у діапазоні довжин хвиль 450 – 740 нм. При зниженні температури спостерігається ріст інтенсивності люмінесценції в області спектру 393 – 460...490 нм.

**Ключові слова:** УФ світлодіод 365 нм, InGaN/GaN, Електролюмінесценція.

DOI: 10.21272/jnep.9(5).05031

PACS numbers: 85.60.Jb, 70.60.Fi, 81.70.Fy,  
61.72.Ji

### 1. ВСТУП

Ультрафіолетове (УФ) випромінювання на довжині хвилі 365 нм використовується для полімеризації, флуоресцентної мікроскопії в медицині і біології та особливо для люмінесцентного аналізу, тощо. Тенденцією розвитку УФ світлодіодів (СД) на основі нітриду галію і сполук AlInGaN є ріст інтенсивності випромінювання, збільшення ККД і освоєння усе більш короткохвильового діапазону - від 365 нм до 210 нм [1-5]. Однак AlInGaN гетероструктури ультрафіолетових світлодіодів мають ряд недоліків, пов'язаних зі струмопереносом. Наприклад, небажані тунельні ефекти, що є причиною жовтої електролюмінесценції (ЕЛ) від дефектів в УФ СД [5-7], що спостерігалося раніше і для синіх СД [8]. Також УФ випромінювання збуджує фотолюмінесценцію (ФЛ) у самих AlInGaN структурах в усьому видимому діапазоні. Видима ЕЛ (і ФЛ) від УФ СД створює проблеми, складаючись із фотолюмінесценцією матеріалів і структур, що випромінюють у тому ж спектральному діапазоні [7]. УФ-випромінювання також впливає на електричні і спектральні характеристики AlInGaN СД [9]. З одного боку, люмінесценція у вигляді жовто-білого світла корисна тим, що дає можливість контролювати деградацію УФ світлодіоду та стан (включений або виключений). З іншого боку, відбувається втрата корисного УФ-випромінювання за рахунок каналу рекомбінації жовтої ЕЛ та за рахунок збудження ФЛ усередині гетероструктури (перевипромінювання). Очевидно, що зміна температури веде до перерозподілу інтенсивності УФ і жовтої смуги. Змінюючи струм і температуру, можна зменшити інтенсивність видимої люмінесценції. Проте спектри видимої, паразитної люмінесценції в УФ світлодіодах при низьких температурах вивчені недостатньо.

Тому метою роботи є дослідження видимої електро- та фотолюмінесценції в InGaN/GaN світлодіодах ультрафіолетового випромінювання ( $\lambda = 365$  нм) при температурах від 77 К до 300 К.

### 2. ЕКСПЕРИМЕНТ

Досліджувалися промислові світлодіоди InGaN/AlGaIn/GaN марки TW-UV365P1WE10, виготовлені методом MOCVD на сапфіровій підкладці, максимум довжини хвилі випромінювання  $\lambda = 365...375$  нм. Номінальний струм  $I_{ном} = 350$  мА, електрична потужність  $P_{ел} = 1$  Вт, площа структури 1 мм<sup>2</sup>. Опис структури УФ СД такого типу наводиться в [1, 10]; *n*-область легована Si, *p*-область Mg, квантова яма – шар In<sub>0.02</sub>Ga<sub>0.98</sub>N товщиною  $\approx 30$  Å. ФЛ збуджувалася УФ-випромінюванням від іншого СД (ідентичного першому СД), для виділення тільки корисної УФ-смуги використовувались фільтри УФС-1. Спектри та оптична потужність люмінесценції, світловий потік вимірювались спектродіаметром НААС-2000 (Everfine) з інтегруючим фотометром. Спектри також вимірювались ФЕП-100 та монохроматором МДР-23. Для виключення впливу температури на спектри ЕЛ вимірювання при струмах більше 50 мА проводились при імпульсному струмі.

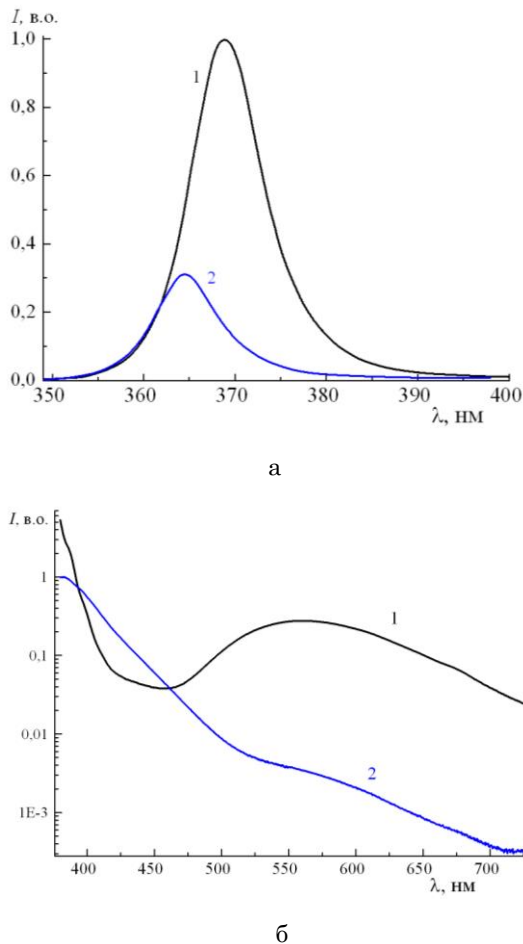
### 3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

На рис. 1а наведено спектри ультрафіолетової смуги випромінювання світлодіоду, і при  $T = 77$  К інтенсивність УФ смуги у максимумі менша у 3,2 рази відносно спектру при 300 К. При температурі 77 К та малому струмі світлодіод випромінює також у синій та зеленій області спектру – це видно по спектру 2 на рис. 1б, що приведений у напівлогарифмічному масштабі. На даному спектрі 2 інтенсивність від 380 нм до 700 нм змінюється більш, ніж на 3 порядки, спостерігається лінійна (у *log* масштабі) ділянка до 510 нм. При  $T = 300$  К лінійна ділянка повністю змінюється, інтенсивність випромінювання у діапазоні 393-460 нм зменшується, також спостерігається жовта смуга (спектр 1 на рис. 1б).

Жовта смуга ЕЛ з'являється при напрузі  $U = 2,55-$

\* vvvit@ukr.net

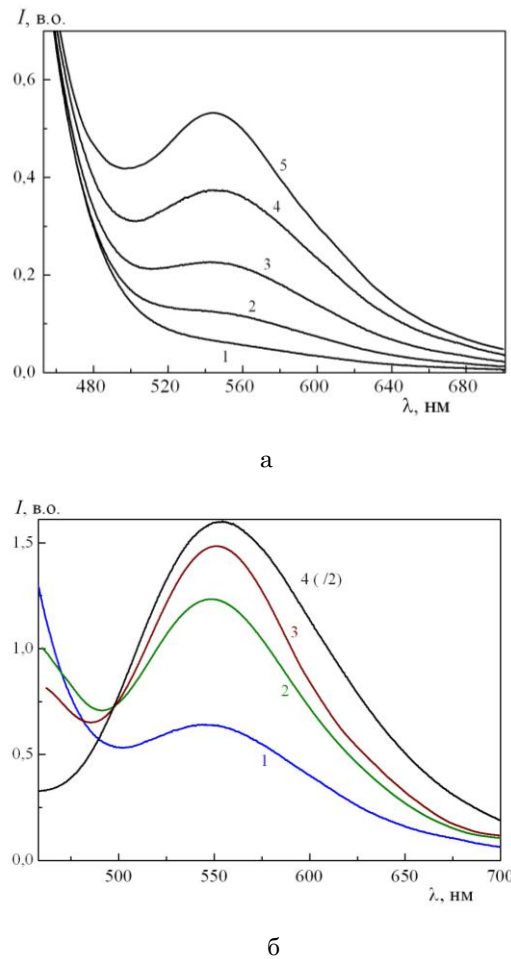
2,6 В (струм 1-5 мкА), тобто до напруги включення УФ-смуги ( $U = 2,9$  В). До 2,9 В спостерігалася жовта смуга без УФ-смуги, як і в [7]. Жовта ЕЛ у досліджуваних УФ СД при температурі рідкого азоту при малих струмах (1 мА) відсутня (спектр 1 на рис. 2а). Але зі збільшенням струму при температурі 77 К спостерігалась поява жовтої смуги з максимумом 545 нм (спектри 2-5 на рис. 2а).



**Рис. 1** – Спектри електролюмінесценції УФ-світлодіода при струмі 1 мА: (а) – УФ смуга, (б) – спектр у діапазоні 380-725 нм.  $T = 300$  К (1) та 77 К (2)

Також з рис. 2б видно, що з підвищенням температури інтенсивність жовтої смуги ЕЛ росте, а крило в області спектру 450 – 480 нм спадає. Зсув піку на 15 нм від 545 до 560 нм (спектри 1 та 4 на рис. 2б) пояснюється залежністю ширини забороненої зони InGaN та GaN від температури. Спектр 4 на рис. 2б зменшений у 2 рази. Таким чином, у видимому діапазоні спектру спостерігається фактично дві області випромінювання – у жовтій та синій частині, залежність інтенсивності від температури яких протилежна. Слід зазначити, що в цілому УФ-світлодіоди мають майже неперервний спектр ЕЛ в усьому видимому діапазоні, при цьому інтенсивність у синій області спектру зазвичай росте зі зменшенням довжини хвилі [4-6], як і на рис. 1б.

Інтенсивність, спектр і положення максимумів ФЛ InGaN/AlGaIn/GaN структур залежать від довжини хвилі та інтенсивності збудження [11, 12]. Тому для спроби розділу ЕЛ і ФЛ була виміряна ФЛ



**Рис. 2** – Спектри жовтої електролюмінесценції УФ-світлодіода (а) – при підвищенні струму при  $T = 77$  К,  $I = 1$  (1), 4 (2), 12 (3), 30 (4), 50 мА (5); (б) – при підвищенні температури при струмі 30 мА,  $T = 77$  (1), 130 (2), 190 (3), 300 К (4)

від УФ-випромінювання іншого СД (рис. 3) при струмі 350 мА. Видно, що спектри ЕЛ (на рис. 2) і ФЛ (рис. 3) різні. При  $T = 300$  К спостерігається невелике плече при 600 нм (спектр 1 рис. 3). При  $T = 77$  К виражена жовта смуга ФЛ при збудженні УФ-випромінюванням від іншого СД також відсутня. У нашому випадку інтенсивність ФЛ від 450 до 540 нм при  $T = 77$  К більша, ніж при 300 К, а інтенсивність довгохвильової частини ФЛ більша при 300 К. Аналогічні результати отримані в [11] на світлодіодних структурах, де інтенсивність ФЛ у області спектру синього кольору випромінювання росте, а інтенсивність ФЛ у області спектру жовтого та червоного випромінювання навпаки падає при зниженні температури. Також схожі спектри ФЛ при  $T = 5$  К та 300 К в області 500 – 700 нм спостерігалися у світлодіодах синього випромінювання [13]. При температурі 77 К ЕЛ і ФЛ досліджуваних УФ СД має характерний синьо-блакитний колір, ФЛ при кімнатній температурі має білий колір з жовтуватим відтінком. На жаль, пропускання оптичним склом УФС в області 380-450 нм паразитного випромінювання від збуджуючого СД не дало можливості отримати спектр ФЛ у даному діапазоні.

Жовту смугу електро- і фото- люмінесценції в шарах

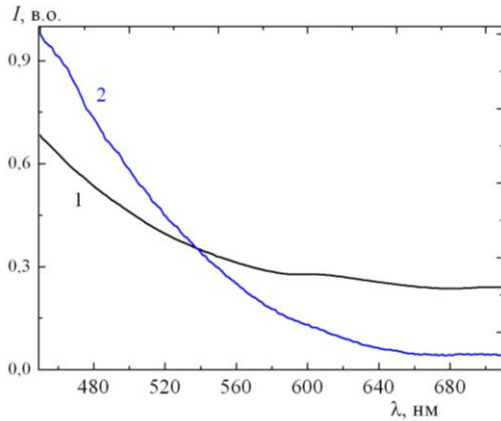


Рис. 3 – Спектри фотолюмінесценції УФ-світлодіоду від УФ-випромінювання іншого СД з фільтром УФС-1 при  $T = 300$  К (1) та 77 К (2)

GaN пов'язують із точковими дефектами – вакансії азоту, дивакансії азоту і вакансії галію [12, 14]. Вважається, що джерелом жовтої люмінесценції у GaN є власні дефекти та їх комплекси, а також домішки. Відповідно до однієї загальноприйнятої моделі, жовта люмінесценція обумовлена випромінювальною рекомбінацією з мілкого донора на глибокий акцептор. Було показано, що вакансія галію є глибоким акцептором, і вона може утворити стійкий комплекс із домішкою заміщення кисню на місці азоту. Цей комплекс  $V_{Ga} - O_N$  діє як глибокий акцептор з енергією переходу близько 1,1 eV і також відповідальний за жовту люмінесценцію. Як мілкий донор виступає домішка кисню або кремнію [14]. Так звана синя люмінесценція у GaN зазвичай пояснюється донорно-акцепторною рекомбінацією за участю власних дефектів (комплексів) та легуючої домішки магнію (акцептор) [14].

Інтенсивність випромінювання жовтої смуги ЕЛ у випадку домінуючого механізму мономолекулярної рекомбінації за участю електронів (із концентрацією  $n$ ) та іонізованих глибоких центрів випромінювальної рекомбінації (із концентрацією  $N$ ) можна описати співвідношенням  $I_{YB} = B_N n N \propto G \propto I$ , де  $B_N$  та  $G$  – коефіцієнт та швидкість рекомбінації, відповідно. Струм  $I = G/V_{activ} e$ ,  $e$  – заряд електрону,  $V_{activ} = S d$  – об'єм активної області гетероструктури. Якщо ж домінує бімолекулярна рекомбінація ультрафіолетової смуги, то  $I_{YB} = B_N n N \propto \sqrt{G} \propto \sqrt{I}$  [5]. Для УФ смуги відповідно  $I_{UV} = B n p \propto I^2$  коли домінує моно- або ж  $I_{UV} \propto I$  коли домінує бімолекулярна рекомбінація,  $p$  – концентрація дірок [5]. З Рис. 4 (обидві осі у логарифмічному масштабі) видно, що залежність інтенсивності від струму для жовтої смуги має нахил 0,72, для УФ смуги нахил 1,35, тобто має місце як моно- так і бімолекулярна рекомбінація. На це вказує і коефіцієнт неідеальності ВАХ (Рис. 5), який при  $T = 300$  К в області напруг  $U = 2,84-3,1$  В приймає значення  $m = 3/2 \dots 2$ .

Струм УФ СД при  $T = 77$  К при однакових напругах менший на 4 порядки, аніж при 300 К (рис. 5), характерна випуклість на ВАХ в області напруги 3,5 В (крива 2) пояснюється тунельним механізмом

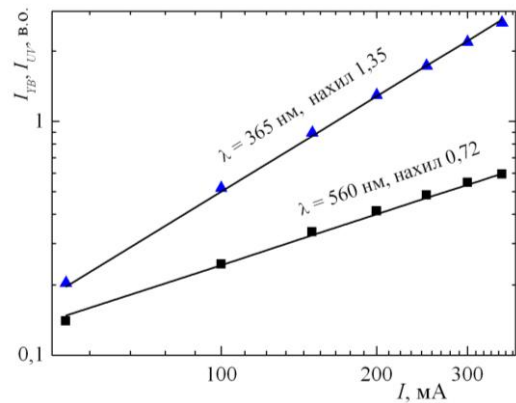


Рис. 4 – Залежність інтенсивності УФ та жовтої смуги від струму УФ-світлодіоду

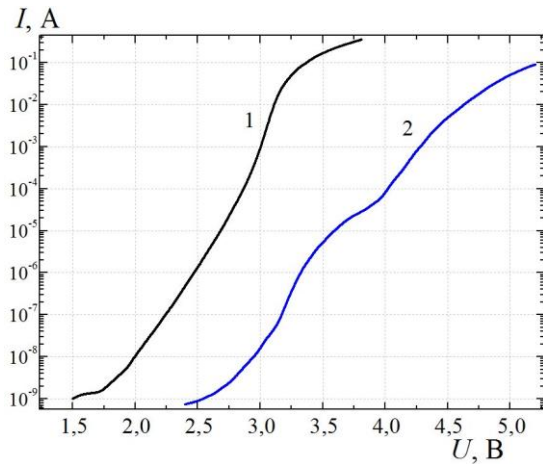


Рис. 5 – Вольт-амперна характеристика УФ-світлодіоду при  $T = 300$  К (1) та 77 К (2)

струмопроходження по енергетичних станах дефектів, зокрема проростаючих дислокацій [15, 16].

Прямий струм через УФ світлодіод такого типу має дифузійну, рекомбінаційну та тунельну компоненти. Дифузійний струм [4, 10]:

$$I_{diff} = e \sqrt{\frac{D_n}{\tau_n}} \frac{n_i^2}{N_A} \exp\left(\frac{eU}{kT}\right) \quad (1)$$

(при  $N_D > N_A$ ), а рекомбінаційний струм (УФ-смуги)

$$I_{rec} = \frac{e V_{activ} n_i}{2 \tau_n} \exp\left(\frac{eU}{2kT}\right). \quad (2)$$

Тут  $D_n$  та  $\tau_n$  коефіцієнт дифузії та час життя електронів,  $n_i$  концентрація власних носіїв,  $N_D$ ,  $N_A$  концентрація акцепторів та донорів, час життя електронів та дірок у квантовій ямі (тобто в  $i$ - області  $p$ - $i$ - $n$  структури)  $\tau_n \approx \tau_p$ . Дані параметри в свою чергу залежать від температури, зокрема, сильну залежність від  $T$  має концентрація вільних носіїв. Для InGaN/GaN СД такого типу також справедливий механізм тунельно-рекомбінаційного безвипромінювального струму за рахунок тунелювання електронів крізь потенційний бар'єр у  $n$ -GaN і термічну активацію дірок над бар'єром у  $p$ -GaN на гетерограниці [16].

Проте для жовтої смуги ЕЛ аналітичний вираз

залежності рекомбінаційного струму та інтенсивності від напруги та температури не відомий. Хоча показано, що жовта смуга ЕЛ в СД такого типу при струмах до 0,2 мА обумовлена тунельною випромінювальною рекомбінацією електронів та дірок у активному шарі InGaN [8]. Також відомо, що в такій гетероструктурі при температурі 77 К до напруги появи біполярної інжекції електронна компонента струму інжекції домінує над дірковою за рахунок того, що  $\sigma_p \gg \sigma_n$  ( $\sigma_p$ ,  $\sigma_n$  – перерізи захвату дірок та електронів на центри рекомбінації) [15, 17, 18], що знижує імовірність випромінювальної рекомбінації. Відповідно при  $T = 77$  К до певної напруги час життя електронів  $\tau_n = 1/p_R v_{thn} \sigma_n$  набагато більше часу життя дірок  $\tau_p = 1/n_R v_{thp} \sigma_p$ . Тут  $n_R$  та  $p_R$  – концентрація

електронів та дірок на центрах рекомбінації,  $v_{thn(p)}$  теплова швидкість електронів чи дірок [18]. Область  $p$ - $n$ -переходу InGaN/AlGaIn/GaN СД містить хвіст густини дефектних станів, які відповідальні за жовту смугу ЕЛ та тунельну компоненту струму [7, 8, 16].

Таким чином, якісно пояснення наступне: окрім очевидної залежності від струму (який значно зменшується при зниженні температури), інтенсивність ЕЛ жовтої смуги залежить від концентрації іонізованих мілких донорів та глибоких акцепторів (центрів рекомбінації). А концентрація іонізованих глибоких акцепторів при  $T = 77$  К є дуже малою (виморожування). Тому інтенсивність жовтої смуги ЕЛ (мономолекулярна рекомбінація) різко падає зі зниженням температури і зникає при  $T = 77$  К та малих струмах (до 1-4 мА). Підвищення напруги при  $T = 77$  К призводить до переміщення квазірівнів Фермі, збільшення концентрації вільних електронів та густини дірок на дефектних станах і відповідно до виникнення та росту інтенсивності жовтої смуги ЕЛ.

Відзначимо, що причина зростання інтенсивності люмінесценції в області 393-460...490 нм при зниженні температури (рис. 16 та 26) не є очевидною; імовірно, в даній області спектру домінуючим механізмом випромінювання є фотолюмінесценція, оскільки інтенсивність ФЛ зростає при зниженні температури, а інтенсивність ЕЛ навпаки спадає для даних СД. Зокрема, у роботі [6] показано, що паразитне випромінювання в області 380-450 нм ультрафіолетового світлодіоду ( $\lambda = 353$  нм) зумовлене збудженням саме ФЛ у шарі  $p$ -GaIn.

Для практичних застосувань важливо знати оптичну потужність і ефективність (Лм/Вт) жовтої смуги ЕЛ. Залежність оптичної потужності  $P_{opt}$  смуги ЕЛ у діапазоні 450 – 740 нм від електричної потужності  $P_{el}$  СД сублінійна, і при номінальному струмі 350 мА складає 4,17 мВт для даного зразка (крива 1 рис. 6). Оскільки оптична потужність УФ-смуги складає  $\approx 20$  мВт при струмі 350 мА, частка внеску видимої смуги ЕЛ складає 17 % від інтегральної (за

гальної) люмінесценції. Ефективність  $\eta$  видимої смуги ЕЛ знижується з величиною струму (крива 2 рис. 6). Світловий потік жовтої смуги дорівнює 0,42 Лм при 50 мА та 1,59 Лм при 350 мА.

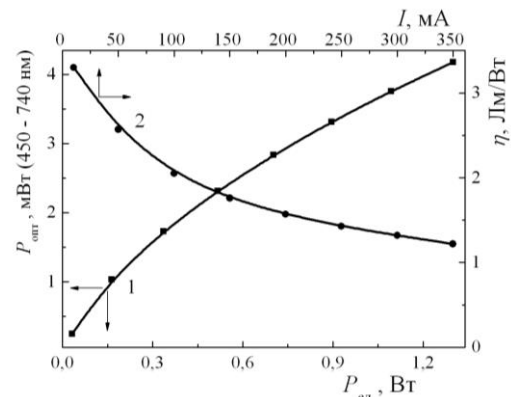


Рис. 6 – Залежність оптичної потужності (1) та ефективності  $\eta$  від струму (2) жовтої смуги ЕЛ УФ-світлодіоду в діапазоні  $\lambda = 450$ -740 нм

Таким чином, залежності інтенсивності УФ смуги і жовтої смуги ЕЛ від струму різні (див. рис. 4), що дає можливість збільшити відносний внесок УФ-смуги в загальне випромінювання.

#### 4. ВИСНОВКИ

Встановлено, що в InGaIn/GaN світлодіодах ультрафіолетового випромінювання ( $\lambda = 365$  нм) при температурі 77 К жовта смуга електролюмінесценції відсутня і виникає при зростанні струму або температури. В активній області УФ світлодіоду в однаковій мірі має місце як моно- так і бімолекулярний механізм випромінювальної рекомбінації.

У спектрах фотолюмінесценції в діапазоні від 450 нм до 710 нм при збудженні УФ-випромінюванням від іншого аналогічного світлодіоду виражена жовта смуга при  $T = 300$  К та 77 К не спостерігається. При зниженні температури відбувається ріст інтенсивності люмінесценції в області спектру 393-460...490 нм.

В УФ світлодіодах інтенсивність паразитної люмінесценції від  $\lambda = 380$  до 710 нм при  $T = 77$  К змінюється більш ніж на 3 порядки. При збільшенні струму від 10 до 350 мА потужність випромінювання жовтої смуги електролюмінесценції в діапазоні 450-740 нм зростає від 0,25 до 4,18 мВт, тобто при номінальному струмі 350 мА ( $T = 300$  К) потужність випромінювання жовтої ЕЛ у 5 разів менше УФ-смуги.

#### ПОДЯКА

Публікація містить результати досліджень, проведених при грантовій підтримці Державного фонду фундаментальних досліджень України, № заявки 32472 конкурсу Ф76.

**Видимая люминесценция InGaN/GaN светодиодов ультрафиолетового излучения 365 нм**

В.П. Велешчук<sup>1</sup>, А.И. Власенко<sup>1</sup>, З.К. Власенко<sup>1</sup>, Д.Н. Хмиль<sup>1</sup>, А.М. Камуз<sup>1</sup>, И.В. Петренко<sup>2</sup>,  
В.П. Тартачник<sup>2</sup>, А.В. Шульга<sup>3</sup>, В.В. Борщ<sup>3</sup>

<sup>1</sup> *Институт физики полупроводников им. В.Е. Лашкарева НАНУ, пр. Науки, 41, 03680 Киев, Украина*

<sup>2</sup> *Институт ядерных исследований НАНУ, пр. Науки, 47, 03680 Киев, Украина*

<sup>3</sup> *Полтавский национальный технический университет им. Ю. Кондратюка, пр. Первомайский, 24, 36011 Полтава, Украина*

В работе изучена видимая электро- и фотолюминесценция в светодиодах ультрафиолетового излучения ( $\lambda = 365$  нм). Установлено, что при температуре 77 К желтая электролюминесценция отсутствует и возникает при возрастании тока или температуры. Измерены мощность и эффективность (Лм/Вт) излучения желтой электролюминесценции в диапазоне 450-740 нм. При снижении температуры наблюдается рост интенсивности люминесценции в области спектра 393-460...490 нм.

**Ключевые слова:** УФ светодиод 365 нм, InGaN/GaN, Электролюминесценция.

**Visible Luminescence of the InGaN/GaN Ultraviolet Light-emitting Diodes 365 nm**

V.P. Veleschuk<sup>1</sup>, A.I. Vlasenko<sup>1</sup>, Z.K. Vlasenko<sup>1</sup>, D.N. Khmil<sup>1</sup>, O.M. Kamuz<sup>1</sup>, I.V. Petrenko<sup>2</sup>,  
V.P. Tartachnyk<sup>2</sup>, A.V. Shulga<sup>3</sup>, V.V. Borshch<sup>3</sup>

<sup>1</sup> *V.E. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics of NASU, 41, Nauki Ave., 03680 Kyiv, Ukraine*

<sup>2</sup> *Institute for Nuclear Research of NASU, 47, Nauki Ave., 03680 Kyiv, Ukraine*

<sup>3</sup> *Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University, 24, Pershotravnevyi Ave., 36011 Poltava, Ukraine*

Visible electro- and photoluminescence of the ultraviolet LEDs ( $\lambda = 365$  nm) was studied. It is established that at nitrogen temperature yellow electroluminescence is absent and occurs when the current or temperature increases. The light output power and luminous efficiency of the yellow electroluminescence in the 450-740 nm range were measured. At temperature decreasing an increase of the luminescence intensity in the spectrum range 393-460...490 nm is observed.

**Keywords:** UV LED 365 nm, InGaN/GaN, Electroluminescence.

**СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ**

1. M. Kneissl, *A brief review of III-Nitride UV emitter technologies and their applications* (Chapter 1, in the III-Nitride Ultraviolet Emitters, Springer International Publishing: Switzerland: 2016).
2. G.F. Yang, Q. Zhang, J. Wang, S.M. Gao, R. Zhang, Y.D. Zheng, *IEEE Photonics Journal* **7** No 6, 2200707 (2015).
3. A.V. Solomonov, S.A. Tarasov, E.A. Men'kovich, I.A. Lamkin, S.Yu. Kurin, A.A. Antipov, I.S. Barash, A.D. Roenkov, H. Helava, Yu.N. Makarov, *Semiconductors* **48** No 2, 245 (2014).
4. E.F. Schubert, *Light-Emitting Diodes* (Cambridge University Press, 2 ed: 2006).
5. K.X. Chen, Y.A. Xi, F.W. Mont, J.K. Kim, E.F. Schubert, W. Liu, X. Li, J.A. Smart, *J. Appl. Phys.* **101**, 113102 (2007).
6. J.S. Park, P. Wellenius, J. Muth, R.F. Davis, *Origins of parasitic emissions from 353 nm AlGaIn-based UV LEDs over SiC substrates* (Chapter in MRS Online Proceeding Library Archive. **892** 175, 2006).
7. V.T. Shamirzaev, V.A. Gaisler, T.S. Shamirzaev, *Semiconductors* **50** No 11, 1493 (2016).
8. V.E. Kudryashov, K.G. Zolin, A.N. Turkin, A.E. Yunovich, A.N. Kovalev, F.I. Manyakhin, *Semiconductors* **31** No 11, 1123 (1997).
9. N.I. Bochkareva, A.L. Bogatov, R.I. Gorbunov, F.E. Latyshev, A.S. Zubrilov, A.I. Tsyuk, A.V. Klochkov, Y.S. Lelikov, Y.T. Rebane, Y.G. Shreter, *Semiconductors* **43** No 11, 1499 (2009).
10. M. Henini, M. Razeghi, *Optoelectronic Devices: III Nitrides*. (Elsevier Science: 2004).
11. N.B. Sedrine, T.C. Esteves, J. Rodrigues, L. Rino, M.R. Correia, M.C. Sequeira, A.J. Neves, E. Alves, M. Bockowski, P.R. Edwards, K.P. O'Donnell, K. Lorenz, T. Monteiro, *Scientific Reports* No 5, 13739 (2015).
12. M.A. Reshchikov, H. Morkoc, *J. Appl. Phys.* **97**, 061301 (2005).
13. И.С. Романов, А.А. Мармалюк, А.В. Войцеховский, А.П. Коханенко, *Доклады ТУСУРа* No 2, 151 (2011) (I.S. Romanov, A.A. Marmalyuk, A.V. Voytsekhovskiy, A.P. Kokhanenko, *Doklady TUSURa* No 2, 151 (2011)) [In Russian].
14. В. Заламай, *Оптические свойства тонких слоев и наноструктур на основе GaN и ZnO* (Дисс. докт. физ.-мат. наук: 01.04.10, Институт прикладной физики, Кишинев: 2006) (V. Zalamay, *Opticheskiye svoystva tonkikh slojev i nanostruktur na osnove GaN i ZnO* (Diss. dokt. fiz.-mat. nauk: 01.04.10, Institut prikladnoy fiziki, Kishinev: 2006)) [In Russian].
15. O.I. Vlasenko, V.P. Veleschuk, M.P. Kisseluck, O.V. Lyashenko, *Photoelectronics* No 20, 33 (2011).
16. N.I. Bochkareva, E.A. Zhirnov, A.A. Efremov, Yu.T. Rebane, R.I. Gorbunov, Yu.G. Shreter, *Semiconductors* **39** No 5, 594 (2005).
17. N.I. Kuznetsov, K.G. Irvine, *Semiconductors*. **32** No3, 335 (1998).
18. А. Милнс, *Примеси с глубокими уровнями в полупроводниках* (Москва: Мир: 1977) (A. Milns, *Primesi s glubokimi urovnyami v poluprovodnikakh* (Moskva: Mir: 1977)) [In Russian].