

В.П. Велешук<sup>1</sup>, О.І. Власенко<sup>1</sup>, О.В. Ляшенко<sup>2</sup>, А. Байдулаєва<sup>1</sup>, Б.К. Даулетмуратов<sup>1</sup>  
**Акустична емісія та зміни люмінесцентних і електричних характеристик гетероструктур InGaN/GaN при струмовому навантаженні**

<sup>1</sup>Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України  
03028, м.Київ, пр. Науки 45

<sup>2</sup>Київський національний університет імені Тараса Шевченка  
03680, м. Київ, пр. Акад. Глушкова 2/1  
E-mail: [yvvit@ukr.net](mailto:yvvit@ukr.net)

В роботі виявлено кореляцію виникнення акустичної емісії та змін люмінесцентних і електричних характеристик гетероструктур InGaN/GaN при навантаженні постійним прямим струмом, що вказує на їх загальний механізм походження. Показано, що кількість джерел акустичної емісії в гетероструктурах при протіканні критичних густин постійного прямого струму залежить від температури та значно збільшується з ростом температури.

**Ключові слова:** акустична емісія, гетероструктура, InGaN/GaN, дефект.

*Стаття постуила до редакції 15.04.2007; прийнята до друку 15.12.2007.*

## Вступ

Тенденції зростання вимог до надійності напівпровідникових функціональних елементів та структур при їх експлуатації в екстремальних умовах та критичних режимах зумовлені широким їх застосуванням в енергозберігаючих та інформаційних технологіях [1-5]. Крім того в зв'язку з пошуком альтернативних надійних та ефективних джерел освітлення та інтенсивного короткохвильового випромінювання значно зріс практичний та науковий інтерес до люмінесцентних гетероструктур на основі сполук InGaN, AlGaN та GaN [1-10].

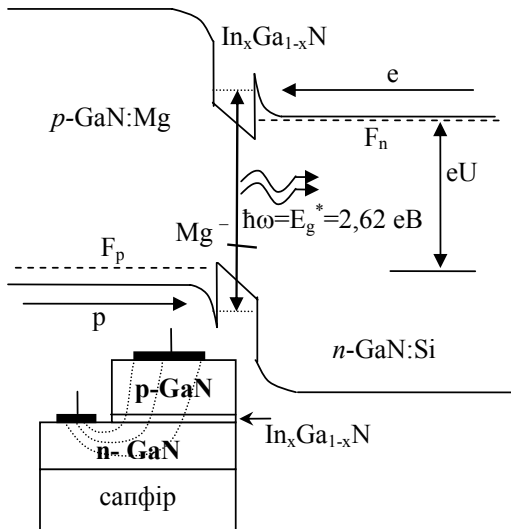
Проте однією з суттєвих проблем виготовлення та експлуатації при критичних режимах лазерних та діодних гетероструктур на основі сполук InGaN, AlGaN, GaN є неоднорідність провідності в об'ємі [3-6], різниця модулів пружних сталих, коефіцієнтів термічного розширення та сталих ґраток на границях гетеропереходів [5,6], теплового опору активного середовища та тепловідводу [7], що призводить до значного градієнту температур (1000°C/см-7000°C/см) і відповідно до значних термомеханічних напруг (до 10<sup>7</sup> Па) при протіканні струму [11]. Це значно прискорює деградацію їх люмінесцентних та електричних характеристик, знижує коефіцієнт корисної дії, ефективність та тривалість функціонування [1-9,11]. Явище

нерівномірного розподілу густини струму в мезаструктурі відоме як "current crowding" [3,4] і призводить разом з вищеперечисленими причинами до значних термонапруг та небажаної локальної мікропластичності матеріалу при критичних густинах струму в умовах джоулевого саморозігріву. Дані локальні ділянки структури, де відбувається релаксація механічних напруг при протіканні струму є джерелами акустичної емісії (АЕ) – явища випромінювання пружних акустичних хвиль при динамічній перебудові структури матеріалу, що супроводжується зривом механічних напруг в локальних об'ємах, зокрема при виникненні та нерівномірному русі дислокацій в напівпровідниках [12] та напівпровідникових структурах [13-18].

Метою роботи було встановлення зв'язку між виникненням АЕ та змінами основних люмінесцентних та електричних характеристик в світловипромінюючих InGaN/GaN гетероструктурах при протіканні постійного прямого струму.

## І. Експеримент

Об'єктом дослідження були InGaN/GaN світловипромінюючі мезаструктури з In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N – квантовою ямою шириною 30 Å, в яких *n*-область структури була легована Si а *p*-область – Mg. Кристали мали площу гетеропереходу 400×400 мкм<sup>2</sup> та розміщувались на сапфіровій підкладці (рис. 1).



**Рис. 1.** Енергетична діаграма та схема InGaN/GaN гетероструктури.

Для порівняння досліджувались також світлодіодні GaAs<sub>0,15</sub>P<sub>0,85</sub>N, Zn-O/GaP структури. Структури були залиті компаундом – поліметилметакрилатом, вклад якого в виникнення АЕ при напруженностях електричного поля до 300 В/см та до температур 500 К як і в [16], виключався.

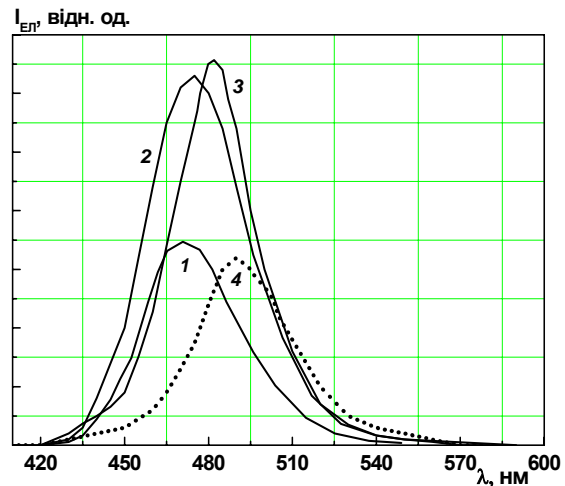
Сигнали АЕ реєструвались п'єзодатчиком та спеціалізованим акустоємисійним приладом АФ-15 у смузі частот 200-500 кГц при загальному підсиленні 69-73 дБ, надходили на комп'ютер та оброблялись.

Через зразки пропускався постійний електричний струм густиною  $J_i = (2 \div 300) \text{ А/см}^2$ ; при тому що їх номінальні постійні струми  $I_n$  у прямому напрямку становлять 10÷20 мА ( $J_n \sim 6 \div 12 \text{ А/см}^2$ ). Вольтамперні характеристики (ВАХ) вимірювались при постійному струмі з швидкістю  $\sim 40 \text{ мВ/хв}$ . Вольт – фарадні характеристики (ВФХ) вимірювались на частоті 1 МГц. Спектри електролюмінесценції (ЕЛ) реєструвались ФЕУ-62 та оброблялись комп'ютером.

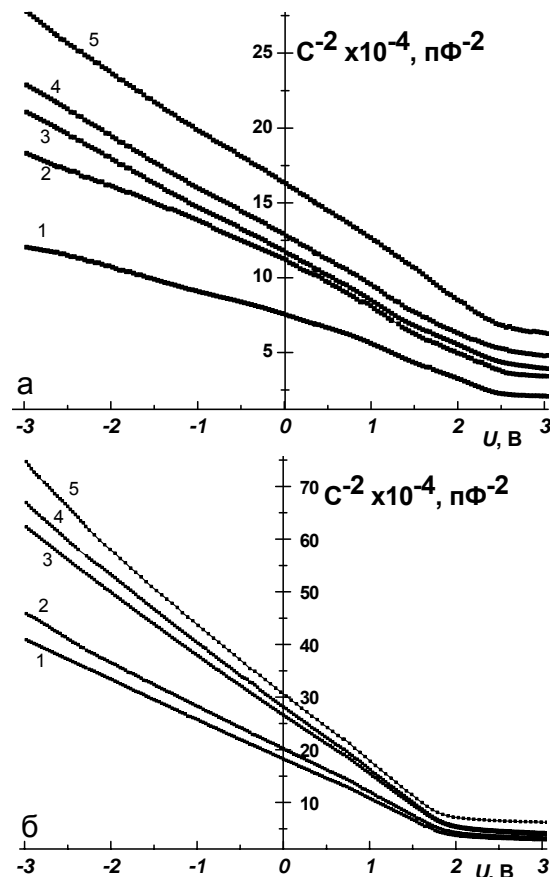
## II. Результати

На рис. 2 дано послідовно записані спектри електролюмінесценції гетероструктури при номінальній густині струму (кр. 1) та при значно більших густинах струмів (кр. 2-4), причому спектр 4 записувався одразу після АЕ. Видно, що після акустичної емісії інтенсивність спектру ЕЛ зменшилась вдвічі, що пояснюється в основному зростанням тунельної безвипромінювальної компоненти струму. Значний зсув максимуму спектру з 471 нм (2,62 еВ) до 491 нм (2,51 еВ) зумовлений розігрівом кристалу структури, а також змінами в профілі енергетичних рівнів за рахунок створених та частково релаксованих значних локальних механічних напруг [17,26].

На рис. 3 наведено вольт – фарадні характеристики InGaN/GaN гетероструктур (а) та GaAs<sub>0,15</sub>P<sub>0,85</sub>N, Zn-O/GaP структур (б). Дані



**Рис. 2.** Спектри ЕЛ InGaN/GaN гетероструктури до (1, 2, 3) та одразу після АЕ (4). 1 –  $J = 12 \text{ А/см}^2$ , 2 –  $J = 31 \text{ А/см}^2$ , 3 –  $J = 56 \text{ А/см}^2$ , 4 – густина струму знизилась до  $44 \text{ А/см}^2$ , напруга  $U$  зростає з 5,2 В до 5,4 В при незмінній зовнішній напрузі.

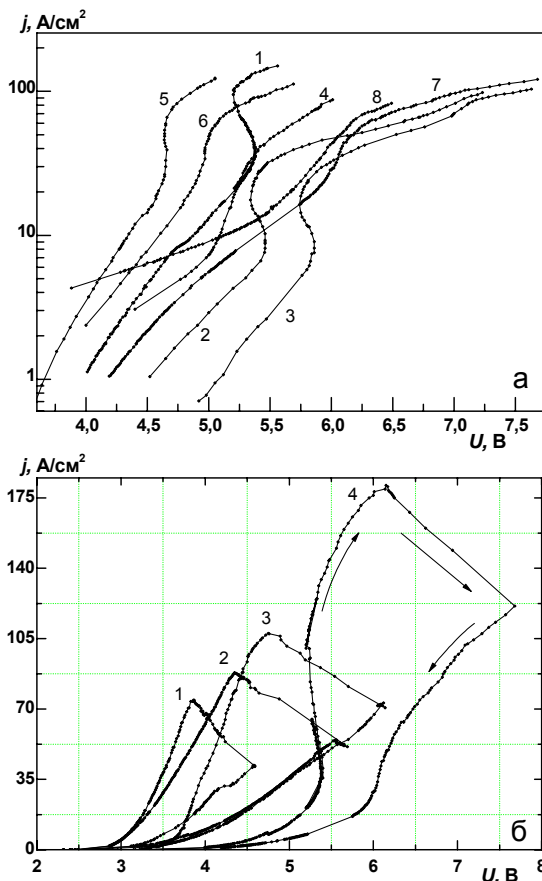


**Рис. 3.** ВФХ структур після струмового навантаження: а) – InGaN/GaN, б) – GaAs<sub>0,15</sub>P<sub>0,85</sub>N/GaP. 1 – без навантаження, 2 –  $50 \text{ А/см}^2$ , 3 –  $75 \text{ А/см}^2$ , 4 –  $100 \text{ А/см}^2$ , 5 –  $125 \text{ А/см}^2$ .

залежності вимірювались для різних зразків після їх витримки при різних величинах густин струмів протягом 10 – 15 хв. хвилин до виникнення сигналів акустичної емісії; вихідні ВФХ були однакові. Величина оберненого квадрата ємності ( $1/C^2$ ) лінійно залежить від напруги  $U$ , що дає змогу оцінити

ефективну концентрацію носіїв в області просторового заряду  $N_{\text{эф}} = \frac{n_n p_p}{(n_n + p_p)}$  та її зміну при

збільшенні величини густини струму, при якій витримується гетероструктура до виникнення сигналів АЕ. Зміна ефективної концентрації носіїв структур після їх витримки при  $125 \text{ A/cm}^2$  становить  $\Delta N_{\text{эф}} = N_{\text{эф}} - N_{\text{эф}125} = 6,7 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3} - 3,74 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3} = 2,96 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$  для  $\text{GaAs}_{0,15}\text{P}_{0,85}/\text{GaP}$  структури та  $\Delta N_{\text{эф}} = N_{\text{эф}} - N_{\text{эф}125} = 1,19 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3} - 5,24 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3} = 6,65 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  для  $\text{InGaN}/\text{GaN}$  структури. Відмітимо, що в  $p-n$ -переходах  $\text{GaP}$  з вищою густиною дислокацій на інерідній підкладці  $\text{Si}$  ефективна концентрація носіїв по вимірах ВФХ нижча, ніж в структурах на підкладці  $\text{GaP}$ , в 3-5 раз [21], що є також результатом, подібним до нашого за умови дислокаційного механізму деградації [11,18-20]. Аналогічні зміни величини ємності та ефективного заряду по вимірах ВФХ зареєстровано в  $\text{GaP}$ : N структурах після їх опромінення  $\gamma$ -квантами  $\text{Co}^{60}$  [24].



**Рис. 4.** ВАХ гетероструктур  $\text{InGaN}/\text{GaN}$  а) після струмового навантаження протягом 10-15 хв. при 300 К до виникнення АЕ: 1 – без навантаження, 2 –  $44 \text{ A/cm}^2$ , 3 –  $63 \text{ A/cm}^2$ , 4 –  $94 \text{ A/cm}^2$ , 5 –  $100 \text{ A/cm}^2$ , 6 –  $112 \text{ A/cm}^2$ , 7 –  $125 \text{ A/cm}^2$ , 8 –  $137 \text{ A/cm}^2$ .  $T = 77 \text{ K}$ ; б) при різних температурах тепловідводу: 1 – 300-310 К, 2 – 280 – 290 К, 3 – 180-200 К, 4 – 77 К.

На рис. 4 а наведено S-подібні вольт-амперні характеристики досліджуваних гетероструктур  $\text{InGaN}/\text{GaN}$  при 77 К. Аналогічно попереднім вимірюванням, характеристики вимірювались для різних зразків після їх витримки при різних струмах протягом 10-15 хвилин до виникнення сигналів акустичної емісії. Звертає увагу факт зникнення (виродження) S-подібної ділянки після витримки при густині струму в околі  $94 \text{ A/cm}^2$  та більше. Такий вигляд ВАХ при температурах нижчих 100 К є характерним для  $p-i-n$ -структур [27] та зумовлений наявністю глибокого рівня в  $i$ -області [10]. В  $\text{InGaN}/\text{GaN}$  структурах роль  $i$ -області відіграє  $\text{InGaN}$  квантова яма [10].

На рис. 4 б дано ВАХи різних гетероструктур при різних режимах тепловідводу – без тепловідводу -  $T_{\text{зовн}} = 300\text{-}310 \text{ K}$  (1) водяний тепловідвід,  $T_{\text{зовн}} = 280\text{-}290 \text{ K}$  (2), в парах азоту при  $T_{\text{зовн}} = 180\text{-}200 \text{ K}$  та при зануренні в рідкий азот при  $T_{\text{зовн}} = 77 \text{ K}$ . Температура контролювалась термопарою. Всі чотири характеристики мають ділянку спаду струму одночасно з ростом прямої напруги, на якій має місце незворотне зростання послідовного опору  $R_s$ , причому на даних ділянках в перших трьох випадках реєструвалась АЕ. Реєстрація АЕ при  $T = 77 \text{ K}$  через технічні складнощі не проводилась. Видно, що поріг незворотного росту опору, що відповідає порогу виникнення АЕ, є температурно залежним, що вказує на значне зменшення кількості джерел АЕ із зниженням температури.

### III. Обговорення

Виникнення акустичної емісії завжди пов'язано з незворотними структурними змінами в матеріалі та, як показано раніше нами, є певним критерієм необоротності змін електрофізичних характеристик світловопромінюючих напівпровідникових структур [16,17].

В роботі по вивченню акустичної емісії в світловопромінюючих структурах на основі сполуки  $\text{GaP}$  при їх деградації в умовах впливу прямого постійного струму [18] було вперше ідентифіковано джерела АЕ, в ролі яких виступали дислокації. Проведені раніше у [14,17] дослідження вказують на наявність зв'язку між еволюцією спектрів електролюмінесценції, деградацією вольт-амперних характеристик та виникненням АЕ в світловопромінюючих структурах на основі сполук  $\text{GaAsP}$  та  $\text{GaAlAs}$ .

В умовах саморозігріву протікаючим струмом деградація світловопромінюючих гетероструктур в основному визначається температурою перегріву їх активної області [7,8]. При цьому деградація електрофізичних параметрів при протіканні густин струмів, що більші за номінальні, супроводжується появою одиничних дислокацій, в тому числі паралельних та перпендикулярних до площини гетеропереходу, та сітки дислокацій в активній області  $p-n$ -структури за рахунок релаксації неоднорідних термомеханічних напруг [11,18-20].

Причиною генерації механічних напруг може також бути металізація  $p$ - контакту гетероструктури [6]. Домінуючими при деградації світловипромінюючих структур є порушення типу скупчень точкових дефектів або дислокаційні сітки – джерела темних ліній та темних плям [11,18-20,23,24].

Відомо, що дислокації обумовлюють так звану надлишково-тунельну компоненту прямого струму в невідроджених  $p$ - $n$ -переходах, що виникає при створенні дефектів: при опроміненні електронами [26], нейтронами [23,26], гамма-квантами [24], за рахунок використання неузгодженості решіток гетеропари [21,22]. Дефекти створюють рівні в забороненій зоні і тим самим значно полегшують тунелювання крізь бар'єр [25,26]. В нашому випадку структурні дефекти, зокрема дислокації [18-20] створюються в активній області гетероструктури за рахунок релаксації неоднорідних термонапруг при струмовому навантаженні. Дислокації пронизують область об'ємного заряду структури, полегшують тунелювання носіїв і таким чином обумовлюють надлишково-тунельний струм [21,22]. Тільки дислокація (лінійно-протяжний дефект) може забезпечити неперервну просторову послідовність локалізованих станів на відстані характерної довжини тунелювання (приблизно 0,5-1 нм). Випадковим чином розташовані точкові дефекти повинні були б мати для цього густину  $10^{21} \text{ см}^{-3}$ , тоді як відомо що тунельний струм спостерігається також в слабо легованих та некомпенсованих структурах [21,22].

Згідно роботі [21], величина ємності  $p$ - $n$ - GaP/ $n$ -Si та  $p$ - $n$ - GaP/ $n$ - GaP структур приблизно обернено пропорційна концентрації дислокацій в активній області, а прямий струм переходу має надлишково-тунельну компоненту дислокаційного походження. В даній роботі запропоновано модель дислокаційного шунта – багатострибкового тунелювання по дислокаційній лінії, що пронизує область об'ємного заряду  $p$ - $n$ - переходу. Цим частково можна пояснити спад ємності структури після струмового навантаження. В роботі [24] по вимірах ВФХ зареєстровано спад ємності та величини  $N_{ef}$  електролюмінесцентних структур на основі сполук GaP після їх дозового радіаційного опромінення  $\gamma$ -квантами  $\text{Co}^{60}$ , що відповідає зростанню міжривневих переходів і відповідно до зростання тунельної складової струму за рахунок багатократного міжривневого тунелювання [24].

Крайові дислокації обумовлюють локальні поля пружних напруг в кристалічній решітці, що веде до флуктуацій ширини забороненої зони та енергетичних рівнів [26]. Порушені або ненасичені зв'язки дислокаційних ліній створюють просторові заряди та рівні енергії в забороненій зоні, в гетерополярних кристалах це переважно акцепторні та донорні рівні [26], окрім того дислокацію оточує просторовий заряд у вигляді трубки. В результаті цього зонна структура локально деформована, що поряд з появою нових енергетичних рівнів призводить до змін в механізмах проходження струму гетероструктури і відповідно до змін

люмінесцентних та електричних властивостей, причому дані зміни різко залежать від густини дислокацій за рахунок їх взаємодії. Особливо чутливими до дислокацій є активна зона (в нашому випадку InGaN) та області гетеропереходів структури [6,9,18-22,25,26].

В досліджуваних InGaN/GaN структурах після поступової струмової деградації можливе утворення провідних каналів, ймовірно вздовж дефектних трубок, що шунтують  $p$ - $n$ -гетероструктуру світлодіоду [6], крім того при деградації InGaN/GaN структури зростає струм витоку, причому різка нестабільність даного струму пов'язана з перезарядкою граничних станів в ділянках гетеропереходу, що відіграють роль “затвора” каналу [6].

S-подібна ВАХ характерна для  $p$ - $i$ - $n$ -діодів при температурах нижче 100 K та може бути описана теорією Ешлі-Мілнса [27]. В даній моделі розглядається високоомний напівпровідник з домішковою провідністю і з центрами компенсації, що частково заповнені електронами (акцептори). Положення рівня компенсації в забороненій зоні може бути довільним, проте рівень повинен бути достатньо глибоким, щоб концентрація термічно збуджених дірок була набагато менше концентрації самих центрів компенсації. В моделі припускається, що при пропусканні прямого струму центри компенсації в  $i$ - області відіграють роль центрів рекомбінації інжекттованих електронів та дірок. Для того щоб ВАХ мала ділянку з від'ємним диференціальним опором, необхідно щоб переріз захвату дірок  $\sigma_p$  був значно більше перерізу захвату електронів  $\sigma_n$  на центри рекомбінації [10,27].

Напруга початку від'ємного диференційного опору або напруга зриву S-ВАХ відповідає часу народження дірок через  $i$ -область, що приблизно рівний часу їх життя. Як тільки дірки стануть проходити  $i$ -область без рекомбінації, характеристика раптово змінюється, тому що провідність з монополярного режиму інжекції носіїв перемикається в біполярну. Домішкові центри рекомбінації приписуються акцепторним рівням Mg [10].

Експериментально зареєстрований факт виродження та зникнення S – подібної характеристики для InGaN/GaN структур після струмового навантаження з виникненням АЕ при  $\sim 94 \text{ А/см}^2$  і більше (рис. 4,а), що супроводжувалось різкою деградацією квантового виходу можна пояснити наступним чином. Утворені після струмової витримки дислокації та структурні дефекти утворюють в забороненій зоні активної області (InGaN) гетероструктури систему мілких акцепторних рівнів. А оскільки однією з умов наявності S – ВАХ є відсутність даної системи мілких рівнів [10], щоб не було нейтралізації об'ємного заряду акцепторів за рахунок термічно збуджених дірок то при наявності нових акцепторних рівнів в активній області S – подібний хід ВАХ зникає. Крім того, як було відмічено, тунельна складова прямого струму в бар'єрних гомо- та

гетероструктурах обумовлена протяжними дефектами (дислокаціями), що розміщені в області об'ємного заряду та які створюють просторово протяжну систему рівнів в забороненій зоні, і тим самим полегшують тунелювання крізь бар'єр, створений областю об'ємного заряду. Таким чином виродження та зникнення ділянки від'ємного диференційного опору на ВАХ при 77 К після певної величини струмового навантаження є наслідком часткової нейтралізації об'ємного заряду акцепторів та перерозподілу діркового струму між інжекційно-рекомбінаційною складовою та тунельною складовою на користь останньої.

Відмітимо, що значні зсуви по струму та напрузі, тобто відмінності диференційного опору S-подібних ВАХ для різних зразків після їх струмового навантаження пояснюється індивідуальними відмінностями дефектної структури зразків, що є незначними та не проявляються при протіканні номінальних густин струмів, але сильно впливають на розкид електричних параметрів при даних величинах критичного струмового навантаження.

## Висновки

В роботі виявлено кореляцію між процесами виникнення акустичної емісії та змінами люмінесцентних та електричних характеристик гетероструктур InGaN/GaN, а саме змінами інтенсивності електролюмінесценції, величини ємності та ефективного заряду, послідовного опору та змін в системі енергетичних рівнів в області просторового заряду при протіканні критичних густин постійного прямого струму, що вказує на загальний механізм їхнього походження.

Показано, що кількість джерел акустичної емісії в InGaN/GaN гетероструктурах, що може бути активована при протіканні постійного прямого струму, залежить від температури та значно збільшується з ростом температури.

Отримані результати можуть бути використані для індивідуального попереднього відбору світловипромінюючих гетероструктур InGaN/GaN та при контролі процесів їх катастрофічно-швидкої деградації при експлуатації в екстремальних та критичних режимах.

- [1] A. V. Kamanin, A. G. Kolmakov, P. S. Kop'ev, G. A. Onushkin, A. V. Sakharov, N. M. Shmidt, D. S. Sizov, A. A. Sitnikova, A. L. Zakgeim, R. V. Zolotareva, A. S. Usikov Degradation of blue LEDs related to structural disorder // *Physica Status Solidi (c)*, **3**(6), pp. 2129-2132 (2006).
- [2] T. Yanagisawa, T. Kojima. Degradation of InGaN blue light-emitting diodes under continuous and low-speed pulse operations // *Microelectronics Reliability*, **43**(6), pp. 977-980 (2003).
- [3] M. Shatalov, G. Simin, V. Adivarahan, A. Chitnis. Lateral current crowding in deep UV light emitting diodes over sapphire substrates // *Jpn. J. Appl. Phys.*, **41**(8), pp. 5083-5087 (2002).
- [4] X. Guo, E.F. Schubert. Current crowding in GaN/InGaN light emitting diodes on insulating substrates // *J. Appl. Phys.*, **90**(8), pp. 4191-4195 (2001).
- [5] Д.С. Сизов, В.С. Сизов, Е.Е. Заварин, В.В. Лундин, А.В. Фомин, А.Ф. Цацульников, Н.Н. Леденцов. Кинетика и неоднородная инжекция носителей в нанослоях InGaN // *ФТП*, **39**(2), сс. 264-268 (2005).
- [6] Н.И. Бочкарева, А.А. Ефремов, Ю.Т. Ребане, Р.И. Горбунов, А.В. Клочков, Ю.Г. Шретер. Неоднородность инжекции носителей заряда и деградация голубых светодиодов // *ФТП*, **40**(1), сс. 122-127 (2006).
- [7] А.А. Ефремов, Н.И. Бочкарьова, Р.И. Горбунов, Д.А. Лавринович, Ю.Т. Ребане, Д.В. Тархин, Ю.Г. Шретер. Влияние джоулевого разогрева на квантовую эффективность и выбор теплового режима мощных голубых InGaN/GaN светодиодов // *ФТП*, **40**(5), сс. 621-627 (2006).
- [8] Г.А. Сукач, П.С. Смертенко, П.Ф. Олексенко, Suji Nakamura. Анализ температуры перегрева активной области зеленых СИД на основе нитридов III группы // *ЖТФ*, **71**(4), сс. 76-79 (2001).
- [9] А.Н. Ковалев, Ф.И. Маняхин, В.Е. Кудряшов, А.Н. Туркин, А.Э. Юнович. Изменения люминесцентных электрических свойств светодиодов из гетероструктур InGaN/AlGaIn/GaN при длительной работе // *ФТП*, **33**(2), сс. 224-232 (1999).
- [10] Н.И. Кузнецов, K.G. Irvine. Вольт-амперные характеристики GaN и AlGaIn p-i-n-диодов // *ФТП*, **32**(3), сс. 369-372 (1998).
- [11] А. Берг, П. Дин. *Светодиоды*. Мир, М. 686 с. (1979).
- [12] А.А. Скворцов, А.М. Орлов, В.А. Фролов, А.А. Соловьев. Электростимулированное движение краевых дислокаций в кремнии при комнатных температурах // *ФТП*, **42**(11), сс. 1998-2003 (2000).
- [13] G. Harman. Semiconductor measurement technology: nondestructive tests used to insure the integrity of semiconductor devices with emphasis on acoustic emission techniques // *International Advances in Nondestructive Testing*. New York, Vol.7, pp. 105-179 (1981).
- [14] O.V. Lyashenko, V.M. Perga. Acoustic emission for the diagnostic of semiconductor structures // *Diagnostic Techniques for Semiconductor Materials Processing*, MRS Proc., Boston, **406** pp. 449-456 (1996).

- [15] О.В. Ляшенко, В.М. Перга, В.А. Тхорик. Связь электрических шумов с акустической эмиссией в элементах оптоэлектроники // *Тез. Докл. Координ. Совещ. Соц. стран по физ. пробл. оптоэлектроники*. Баку, с. 89 (1989).
- [16] В.П. Велешук, О.В. Ляшенко. Акустична емісія світловипромінювальних структур на основі сполук  $A^3B^5$  обумовлена постійним прямим струмом // *УФЖ*, **48**(9), сс. 941-945 (2003).
- [17] В.П. Велешук, О.В. Ляшенко, Ю.О. Мягченко, Р.Г. Чуприна. Эволюция спектров электролюминесценции и акустическая эмиссия эпитаксиальных структур GaAsP // *Журнал Прикладной Спектроскопии*, **71**(4), сс. 508-511 (2004).
- [18] T. Ikoma, M. Ogura, Y Adachi. Acoustic-emission study of defects in GaP light-emitting diodes // *Appl. Phys. Lett.*, **33**(5), pp. 414-415 (1978).
- [19] S. Noriyuki. The effects of thermal stress on the temperature dependence of degradation in  $GaAs_{0.9}P_{0.1}$  operating at high current densities // *J. Appl. Phys.*, **51**(3), pp. 1818-1824 (1980).
- [20] O. Ueda, H. Imai, T. Fujiwara S. Yamakoshi. Abrupt degradation of three types of semiconductor light emitting diodes at high temperature // *J. Appl. Phys.*, **51**(10), pp. 5316-5325 (1980).
- [21] В.В. Евстропов, М. Джумаева, Ю.В. Жилиев, Н. Назаров, А.А. Ситникова, Л.М. Федоров. Дислокационное происхождение и модель избыточно – туннельного тока в  $p-n$ - структурах на основе GaP // *ФТП*, **34**(11), сс. 1357-1362 (2000).
- [22] В.В. Евстропов, Ю.В. Жилиев, М. Джумаева Н. Назаров. Тунельно-избыточный ток в невырожденных барьерных  $p-n$ - и  $m-s$ - структурах  $A^3B^5$  на Si // *ФТП*, **31**(2), сс. 152-157 (1997).
- [23] В.К. Дубовий, В.І. Кочкін, В.Я. Опилат, І.В. Петренко, В.П. Тартачник. Вплив нейтронного опромінення на зворотні струми фосфідо-галієвих світлодіодів // *УФЖ*, **52**(2), сс. 175-179 (2007).
- [24] І.В. Коляденко, П.Г. Литовченко, В.Я. Опилат І.В. Петренко, В.П. Тартачник, В.І. Хіврич. Деградація фосфідо-галієвих світлодіодів, обумовлена радіаційними дефектами // *Фізика і хімія твердого тіла*, **7**(1), сс. 184-188 (2006).
- [25] [С.М. Зи. *Фізика напівпровідникових приборів*. Мир, М. 456 с. (1984).
- [26] Г.Ф. Матаре. *Електроніка дефектів в напівпровідниках*. Мир, М. 463 с. (1974).
- [27] K.I. Ashley, A.G. Milnes Double injection in deep-lying impurity semiconductors // *J. Appl. Phys.*, **35**(2), сс. 369-374 (1964).

V.P. Veleschuk<sup>1</sup>, O.I. Vlasenko<sup>1</sup>, O.V. Lyashenko<sup>2</sup>, A. Baidullaeva<sup>1</sup>, B.K. Dauletmuratov<sup>1</sup>

## Acoustic Emission and Changes of Luminescent and Electrical Characteristics of InGaN/GaN Heterostructures at the Current Loading

<sup>1</sup>V. Lashkaryov Institute of semiconductor physics, NAS of Ukraine, 03028, Kyiv, prosp Nauky 41

<sup>2</sup>Taras Shevchenko Kyiv National University, 03680, Kyiv, prosp. Glushkova, 2/1

E-mail: [vvvit@ukr.net](mailto:vvvit@ukr.net)

In the paper correlation of acoustic emission occurrence and changes of luminescent and electrical characteristics of InGaN/GaN heterostructures have been revealed at loading a forward direct current that indicates their common mechanism of an origin. It is shown, that the amount of acoustic emission sources in InGaN/GaN heterostructures at flowing of critical density of a direct current depends on temperature and considerably increases with growth of temperature.