

О.І. Власенко, В.П. Велещук, М.П. Киселюк, З.К. Власенко, І.О. Ляшенко¹, О.В. Ляшенко¹

АКУСТИЧНА ЕМІСІЯ СВІТЛОВИПРОМІНЮЮЧИХ СТРУКТУР ТА СВІТЛОДІОДІВ (ОГЛЯД)

Узагальнено матеріал з дослідження явища акустичної емісії (АЕ) у світловипромінюючих структурах та світлодіодах на основі сполук GaN, GaP при струмовому навантаженні. Запропоновано використання комбінованого методу АЕ та мікроскопії видимого діапазону для виявлення люмінесцентних флуктуацій та деградації квантового виходу в режимі реального часу. Стаття є продовженням огляду, опублікованого у журналі «Оптоелектроника и полупроводниковая техника», 2014 р.

Ключові слова: акустична емісія, світлодіод, люмінесцентні флуктуації, квантовий вихід, деградація.

1. ДЖЕРЕЛА АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ У СВІТЛОВИПРОМІНЮЮЧИХ СТРУКТУРАХ

Для напівпровідникових структур, що працюють в сильних електричних чи теплових полях та при високих густинах струму, характерно небажане значне зростання рухливості лінійних дефектів та їх генерація (рис. 1) [1-35].

Проблемою методики акустичної емісії (АЕ) лишається зіставлення актів АЕ з елементарними процесами дефектоутворення, тобто виявлення та ідентифікація джерел АЕ. Акт АЕ – це одинична дія (спрацювання) джерела АЕ. При цьому слід відрізнити акт АЕ від хвильового пакета, під яким розуміють механічний сигнал, що був породжений одиничним актом АЕ [2].

У роботі [3] було зареєстровано АЕ світловипромінюючої структури (СВС) на основі сполуки GaP в умовах впливу прямого постійного струму та ідентифіковано джерела АЕ. Джерелами АЕ були згенеровані та розмножені дислокації, які виникли внаслідок релаксації термонапружень, причому їх кількість корелювала з кількістю імпульсів АЕ. Було виявлено дискретну та неперервну (під час руху дислокацій) компоненти АЕ та немонотонне зменшення квантового виходу. Проте дані дослідження проводили при одному режимі струмового навантаження (20 А/см^2) та при одному значенні температури (в умовах саморозігріву, $150 \text{ }^\circ\text{C}$).

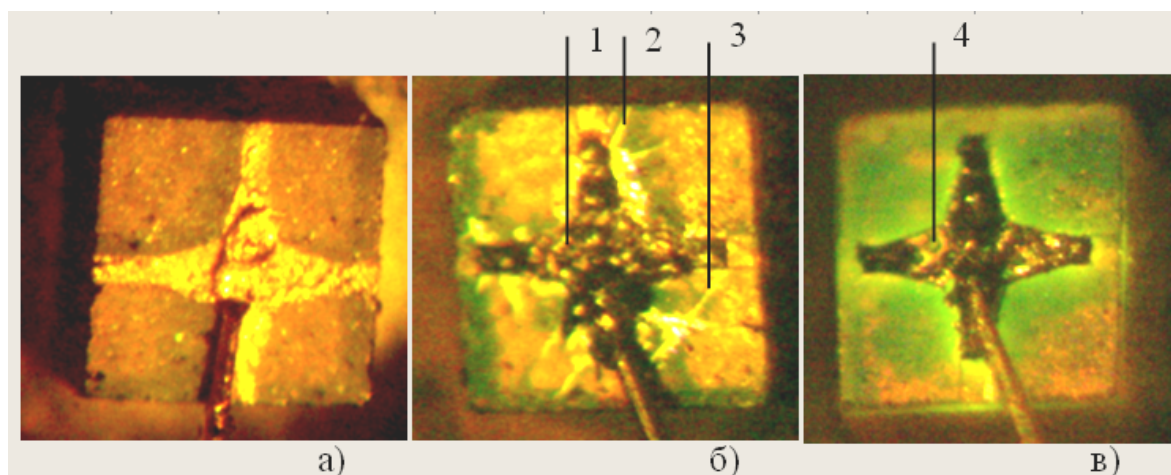


Рис. 1. Деградація GaP світловипромінюючої структури. Вказівники: 1, 4 – оплавлення контакту, 2, 3 – утворення мікротріщин.

Автори [4-8] запропонували механізм виникнення емісії: при протіканні струму дислокації, що мають заряд і ефективну масу, захоплюються полем або електронним (чи дірковим) потоком, тобто взаємодіють з електричним полем. Електричне поле генерує механічне напруження, і у випадку перевищення напруження Пайерлса σ_n дислокація долає потенціальний бар'єр в кристалі, тобто переходить в інший метастабільний стан. Якщо температура відмінна від нуля, відбувається хаотичний тепловий рух атомів, який приводить до розмиття потенціального рельєфу і як наслідок – зменшення σ_n . Даний механізм підтверджує теорія дислокаційних згинів – подолання дислокацією періодичного потенціального поля кристалічної ґратки у площині ковзання. Максимуми потенціального поля відповідають бар'єрам Пайерлса. У дислокацій, не орієнтованих відносно напрямку площини ковзання, виникають згини шириною порядку 10–50 атомних відстаней. Переміщення дислокації на одну міжатомну відстань (без урахування теплових флуктуацій) відбувається у випадку виникнення напруження σ_n . Вплив електричного струму, термо-напружень та теплового руху атомів сприяють тому, що дислокація, утворюючи згини, буде періодично переходити з однієї потенціальної ями в іншу [4-8].

Частоту переходу дислокації з одного стану в інший можна оцінити за формулою [4]:

$$v = (1 - f)v_l e^{-\frac{E_d}{kT}}, \quad (1)$$

де f – частка дислокацій, що здійснюють перехід, E_d – енергія активації відриву, v_l – ефективна частота переходу (її величина визначає максимум в спектрі сигналів АЕ).

Рух дислокацій у напівпровідниках описується моделлю різких згинів [9], які утворюються при закріпленні плеча дислокації на новому дефектному центрі. Дані нові згини долають потенціали Пайерлса другого роду і поширюються перпендикулярно лінії дислокації. Дрейфова швидкість даного переміщення описується рівнянням [4, 9]:

$$v = Df_0 \left(e^{-\frac{E_p^k - \frac{\tau b D d}{2}}{kT}} - e^{-\frac{E_p^k + \frac{\tau b D d}{2}}{kT}} \right), \quad (2)$$

де E_p^k – потенціал Пайерлса другого роду, D – його період, τ – механічне напруження, b – довжина вектора Бюргерса, d – довжина дислокації, f_0 – характерна частота коливань згинів. Дислокація, як показано в роботах [4-8], відгукується на дію електричного поля, захоплюється ним та електронним вітром. Оцінено енергію активації зриву та руху дислокації при протіканні постійного струму $J = 2,8 \cdot 10^5$ А/м² в кремнії: $E_d = 0,53 \pm 0,05$ еВ [4].

Для підтвердження експериментальних даних з ідентифікації джерел АЕ авторами [5] було проведено селективне травлення Si та виявлено ямки травлення при переміщенні дислокацій. Для зразків кремнію з попередньо виявленими дислокаційними ямками здійснювались струмові напрацювання (густина струму $J = 2,9 \cdot 10^5$ А/м² протягом 72 годин при 350 К). Було повторно виявлено дислокації (джерела АЕ) за новими ямками травлення, що свідчить про рух дислокацій під впливом постійного струму. Спостерігалось їх зміщення у бік додатного електрода, що вказує на від'ємний ефективний заряд дислокацій.

Отже, виникнення АЕ в дислокаційних пластинах кремнію та CdS зумовлено зривом та подоланням нейтральними та зарядженими дислокаціями, що захоплюються електронним вітром, енергетичних бар'єрів при наявності теплового поля ($T = 400$ К) та електричного струму ($J = (1-7) \cdot 10^5$ А/м²).

Причини зменшення інтенсивності електролюмінесценції (ЕЛ) радіаційно опромінених GaP СВС при ультразвуковому (УЗ) навантаженні вивчено у [10]. При ввімкненні УЗ навантаження спостерігалось миттєве падіння яскравості світіння на 5-10% з одночасним

зростанням струму крізь *p-n*-перехід. За характером зміни зроблено висновок про руйнівну дію УЗ хвилі на екситонні поля в кристалі (розпад зв'язаних екситонів внаслідок коливання дислокацій, що особливо яскраво проявляється в момент увімкнення УЗ). Подальший вплив УЗ проявляється у монотонному зменшенні інтенсивності випромінювання при незмінній величині сили струму. Автори [10] пов'язують це з руйнуючою дією дислокацій, приведених в рух УЗ хвилею. Використання циклів УЗ обробки до світлодіодів (СД), які містять радіаційні порушення структури (10^9 рад), приводить лише до часткового відновлення початкового світлового потоку. Також УЗ вплив приводить до зменшення інтенсивності світіння мікроплазм при зворотному зміщенні. Причиною цього є гетеруюча дія дислокацій під час їх руху. Зареєстровано низькочастотні флуктуації світіння при низьких температурах внаслідок повільного руху скупчень дислокацій.

Основним принципом, на якому ґрунтується проведення АЕ досліджень, є закон Кайзера, виконання якого спостерігається у всіх (окрім композиційних) матеріалах: металах, сплавах, склі, кераміці, напівпровідниках, діелектриках та пристроях на їх основі. Вказаний ефект свідчить про те, що АЕ досліджуваної структури не буде спостерігатися, якщо в наступному циклі навантаження не буде перевищено поріг виникнення АЕ у попередніх циклах.

Для композиційних матеріалів характерним є ефект Фелісіті, за яким при “зашвидких” циклічних навантаженнях (період циклів менший за усереднений час релаксації системи дефектів) у випадку досягнення попереднього навантаження спостерігається АЕ, але меншої інтенсивності. Питання існування вказаного ефекту в низькорозмірних та нановимірних структурах, у тому числі і СД з квантовою ямою, залишається відкритим.

На сьогодні, використовуючи закон Кайзера при АЕ контролі напівпровідникових виробів, можна виявляти більш надійні та стійкі до зовнішніх впливів СД (у тому числі окремо для кожного зразка), відбракувати такі, що не відповідають мінімальним вимогам.

Одночасно на основі аналізу розподілу інтенсивності сигналів АЕ в часі може бути проведена оцінка максимально допустимих струмів навантаження та початку процесу швидкої, незворотної деградації СД. Зокрема, про критичність навантаження свідчить кореляція найбільшої кількості сигналів з початком виходу на встановлене навантаження. Руйнація супроводжується новим сплеском, який може бути пов'язаний не тільки з пошкодженням самої структури та контактів, а й корпусу приладу, що спостерігається для напівпровідникових структур, розміщених у полімерному корпусі.

Слід відмітити, що використання методу АЕ для встановлення надійності СВС дозволяє виявити саме індивідуальні характеристики їх добротності чи межі застосування з подальшим узагальненням та усередненням (за необхідністю). Іншим важливим аргументом застосування АЕ контролю є його сумісність у реальному часі з абсолютною більшістю відомих фізичних методів, тобто принципово-можливим є зіставлення змін будь-яких, зокрема оптичних або електрофізичних характеристик, з динамікою АЕ.

Так, одним з найважливіших параметрів, які характеризують СД, є його інтегральний світловий потік, сила світла та пряма напруга при робочій величині прямого струму. На сучасному виробництві ці параметри вимірюються для кожного готового виробу за допомогою автоматизованих пристроїв (як, наприклад, вимірювальний комплекс FT-17 або як більш спеціалізований – тестер СД FT-17 LED), які сортують СД за групами, що мають певні типові значення вказаних параметрів у межах від їх мінімальних до максимальних значень. Тестер можна інтегрувати з пристроями для сортування готових СД та приладами-зондами, за допомогою яких проводять тестування СВС на кристалі [11, 12].

У найпростішому випадку вимірюється лише пряма напруга та осьова сила світла, що пов'язано з технічними складностями дослідження інших величин та значним збільшенням тривалості та трудомісткості випробувань [12].

Широке використання методів АЕ не є свідченням універсальності та не може задовольнити всю сукупність вимог для вивчення і тестування СВС. Для визначення параметрів та вивчення дефектів використовуються різні методи контролю. Їх можна класифікувати за характером взаємодії фізичного поля або речовини з об'єктом, за первинними інформаційними параметрами, способом отримання первинної інформації тощо.

2. ЛОКАЛІЗАЦІЯ ДЖЕРЕЛ АЕ В ЕПІТАКСІАЛЬНІЙ СТРУКТУРІ

Розподіл інтенсивності ЕЛ по поверхні активної області СВС InGaN/GaN при прямому постійному струмі є неоднорідним (рис. 2) [13-26]. При цьому відмічено, що в момент виникнення АЕ цей розподіл різко змінюється (рис. 3) [13, 17]. Спостерігаються яскраво виражені локальні області флуктуацій квантового виходу та монотонно стабільної деградації (рис. 2, 3). Так, на рис. 3б наведено графік інтенсивності розподілу ЕЛ по поверхні СВС для почергових кадрів мікрофотозйомки, зроблених у проміжку 0,04 с (крива 1 – $t = 0$, крива 2 – $t = 0,04$ с та 3 – $t = 0,08$ с). Помітно, що в точці А відбувається яскраво виражений деградаційний процес, у той час як у точці В – флуктуаційний.

Отже, можна зробити висновок, що використання комбінованого методу АЕ та мікроскопії видимого діапазону з покадровим аналізом дозволило вперше отримати інформацію про можливу просторову локалізацію джерел АЕ (точки А, В на рис. 3), їх розвиток та критичність (центрів утворення дефектів) у напівпровідниковій епітаксильній плівці та підкладці, що принципово неможливо реалізувати в режимі реального часу за допомогою інших методів, наприклад триангуляції.

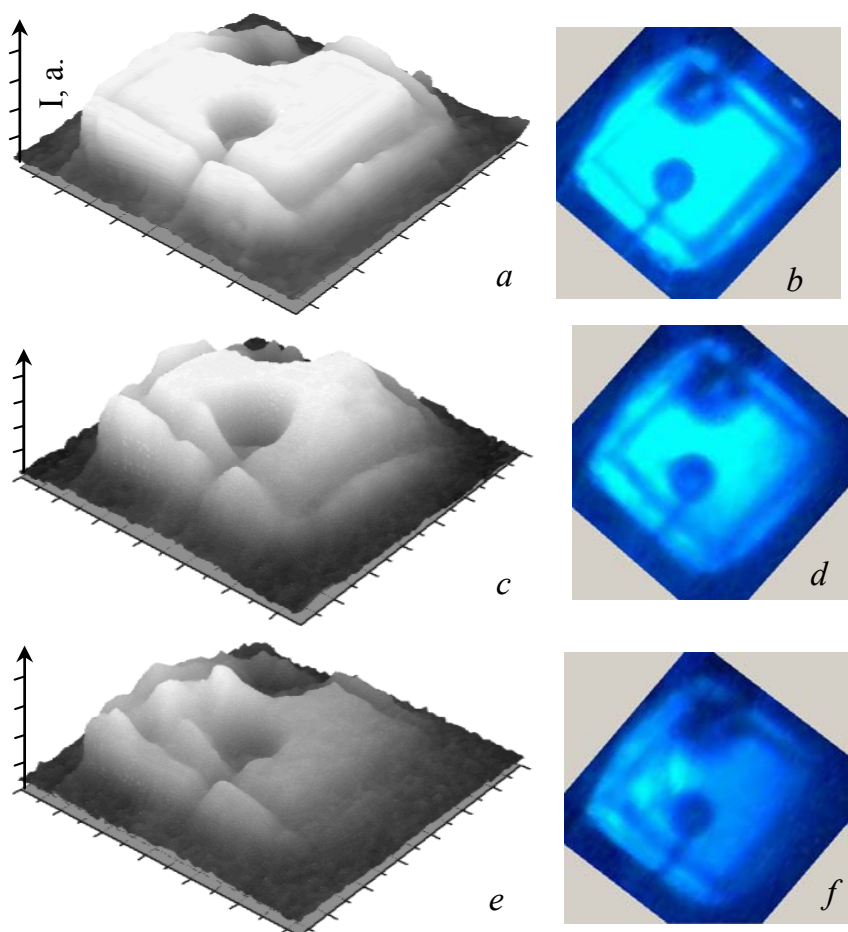


Рис. 2. Розподіли інтенсивності ЕЛ по поверхні InGaN/GaN структури, отримані через проміжки часу 0,04 с (a, c, e), та відповідні мікрофотографії (b, d, f).

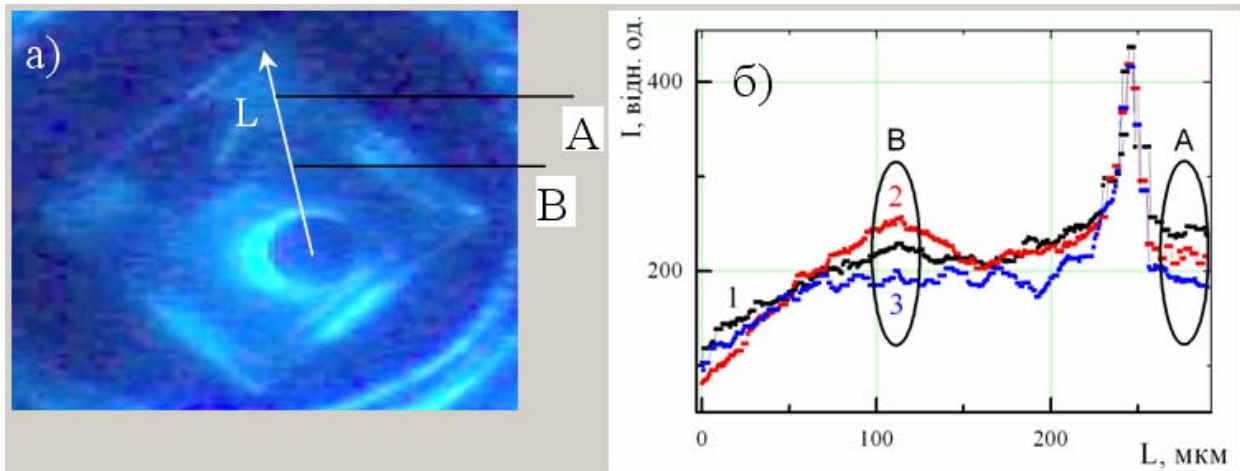


Рис. 3. Розподіл інтенсивності ЕЛ по поверхні світловипромінюючої структури InGaN/GaN (а) та вздовж лінії L в різні моменти часу (б).

Водночас відомо, що більша частина світла залишає активну область крізь бічні грані, тому відносно вдалою на даний час є конструкція СВС у вигляді перевернутої піраміди, яка дозволяє отримати максимальний квантовий вихід якраз за рахунок випромінювання, що поширюється у площинах, ортогональних активній області. З огляду на цей факт та те, що джерела АЕ можуть бути не тільки в самому напівпровідниковому матеріалі, а й у підкладці та буферному шарі, є доцільним спостерігати розподіл і флуктуації інтенсивності світіння по поверхні саме бічної грані СВС з паралельним використанням методів АЕ для зіставлення цих процесів з процесами утворення дефектів.

Додаткове використання мікроскопії оптичного діапазону, як уже зазначалось, пов'язане також з обмеженням, яке не дозволяє визначити координати (область локалізації) джерел АЕ у тілах, розміри яких не перевищують середню довжину хвилі λ акустичних коливань пакета. Цю умову неможливо виконати при типових частотах випромінювання АЕ 200–1000 кГц ($\lambda \sim 5\text{--}25$ мм), оскільки реальні розміри активної області СВС індикаторних СД становлять 260×260 мкм (InGaN/GaN) та 400×400 мкм (GaAsP/GaP). Недостатніми є розміри гетероструктур навіть надпотужних освітлювальних СД.

Відповідно використання комбінованого методу АЕ та мікроскопії видимого діапазону дозволяє одночасно спостерігати оптичні та акустичні флуктуації, а також процеси деградації параметрів квантового виходу.

На основі результатів експерименту в [13, 17] проведено аналіз динаміки локальних процесів деградації та релаксації механічних напружень у СВС гетероструктурах $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ з квантовою ямою, які виникають під дією прямого постійного струму. Порівняння активності АЕ та зміни розподілу інтенсивності ЕЛ (виникнення зон стійких деградацій та флуктуацій) по поверхні активної області структури та її бічним граням вздовж площини, ортогональній квантовій ямі, дозволяє пояснити інтегральні осциляції інтенсивності світіння та струму, визначити локалізацію процесів деградації та релаксації термомеханічних напружень, розміри локальної області.

Наведемо результати, отримані для промислових InGaN/GaN СД з однією квантовою ямою синього ($\text{In}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{N}$) та зеленого ($\text{In}_{0,4}\text{Ga}_{0,6}\text{N}$) кольорів світіння, як найбільш інформативні та актуальні. Зразки відповідним чином підготовлювали згідно з [29, 30]: створювали зріз у площині, ортогональній до активної області, додатково шліфований та полірований до оптичної чистоти поверхні. Дослідження АЕ, флуктуацій ЕЛ та струму проводили за методикою, описаною в [13–19]. Сигнали АЕ реєстрували п'єзоелектричним датчиком приладу АФ-15, інтенсивність ЕЛ – за допомогою фотодіода ФД-7К. Усі сигнали напруги (у випадку сигналів АЕ після попереднього підсилення) опрацьовувались за

допомогою високошвидкісного, чотирьохканального АЦП. Інтенсивність ЕЛ та сили струму реєстрували за допомогою послідовно (у випадку реєстрації сили струму) та паралельно (для фотодіода) ввімкнених прецизійних резисторів або підсилювача струму фотодіода із відповідним перерахунком залежно від номіналу резистора або коефіцієнта підсилення фотоструму.

На рис. 4 зображено вид СД зверху (а) та його переріз вздовж осі В-В (б). Кадр (рис. 4в) отримано за допомогою цифрової камери та проаналізовано для побудови розподілу інтенсивності ЕЛ по бічній грані СВС. Слід відмітити наявність двох максимумів бічної ЕЛ: в активній області (2) та поблизу дна підкладки (3), на границі розділу металевий рефлектор – сапфірова підкладка (4) (рис. 4). При цьому крізь підкладку (4 на рис. 4в), яка знаходиться між двома максимумами випромінювання, проходить лише незначна частина світла (ідеалізовані розрахунки проведено далі), його інтенсивність є неоднорідною та має характер подібний шуму через наявність відносно значного поглинання та неоднорідних включень, які спричиняють релєєвське розсіювання і відхилення від закону відбивання на межі сапфір – металевий тримач.

Слід відмітити, що висота двох максимумів випромінювання, яке виходить крізь підкладку, змінюється непропорційно величині струму – 1 мкА (рис. 5а) та 100 мкА (рис. 5б). Спостерігається тенденція формування одного максимуму бічної ЕЛ для випромінювання, багаторазово відбитого у напівпровідниковій епітаксціальній плівці. Також яскравою ілюстрацією впливу металізації контакту на ЕЛ є зменшення інтенсивності ЕЛ в приконтактній області та під контактом (мінімум інтенсивності ЕЛ пов'язано з поглинанням світла металом внаслідок наявності механічних напружень на межі поділу метал-напівпровідник та неідеальності межі поділу) в області малих густин струмів (до 16 A/cm^2) (рис. 5б).

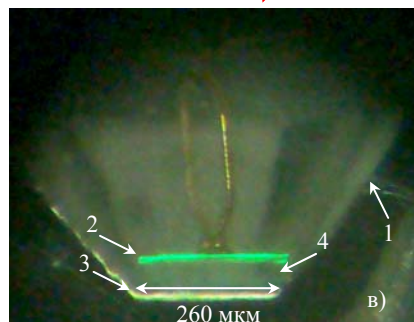
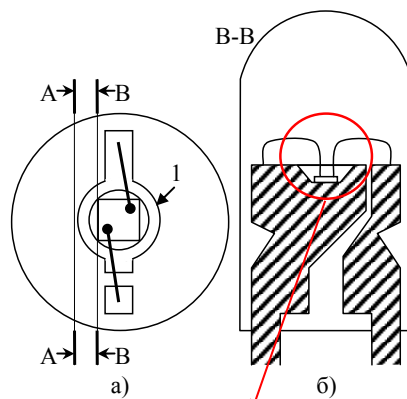


Рис. 4. Електролюмінесценція від бічної грані СВС структури. (а) вид СД зверху; (б) переріз вздовж осі В-В; (в) кадр процесу: 1 – металевий тримач, 2 – активна область, 3 – дно підкладки, 4 – сапфірова підкладка, довжина підкладки 260 мкм.

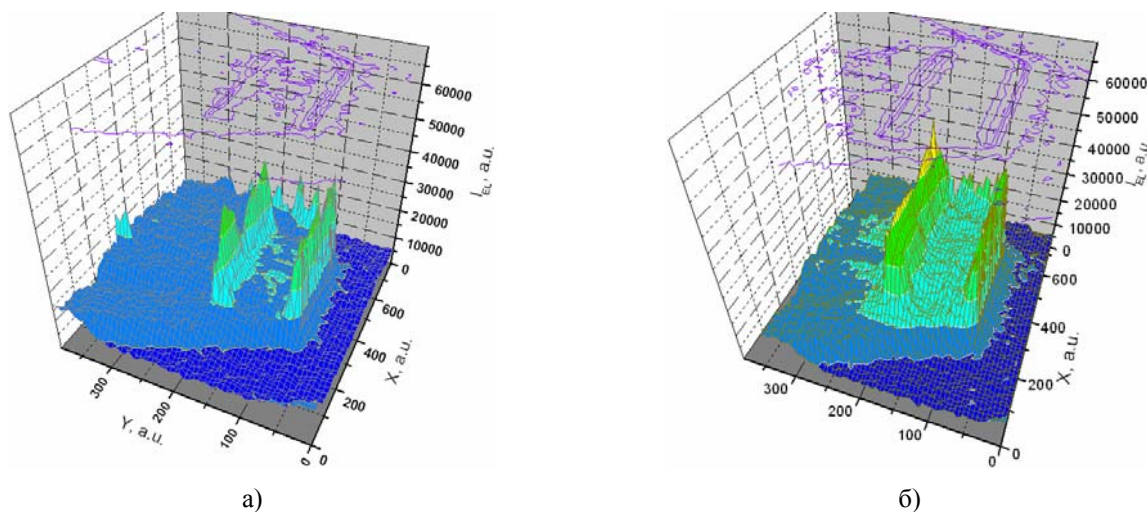


Рис. 5. Розподіл інтенсивності ЕЛ по поверхні бічної грані InGaN/GaN світлодіода при струмі: 1 мкА (а) та 100 мкА (б).

Зі збільшенням струму живлення спостерігається зменшення впливу області контакту на інтенсивність випромінювання безпосередньо під контактною площадкою, так, при малих струмах відношення інтенсивності максимуму інтенсивності світіння до мінімуму в області під контактом дорівнює два до одного (рис. 5б), у той час як вже при номінальному струмі різниця не перевищує 15%. Навіть при малих струмах, як впливає з рис. 5б, спостерігаються зміни розподілу ЕЛ по поверхні в часі.

3. РОЗРАХУНОК ЗОВНІШНЬОГО КВАНТОВОГО ВИХОДУ КРІЗЬ БІЧНІ ГРАНІ ПЛАНАРНОЇ СТРУКТУРИ

Розрахуємо максимальний зовнішній квантовий вихід окремо для поверхні планарної структури, її бічних граней та підкладки. Для спрощення розрахунку вважатимемо, що внутрішній квантовий вихід становить 100%. Закони відбивання та заломлення строго відповідають законам геометричної оптики. Для розрахунку синуса граничного кута виходу випромінювання із середовища з показником заломлення n_{GaN} у матеріал з n_{es} використаємо формулу:

$$\sin \varphi_g = \frac{n_{es}}{n_{GaN}}, \quad (3)$$

де n_{GaN} – показник заломлення світла напівпровідникової структури, n_{es} – показник заломлення корпусу діода із поліметилметакрилату.

Отже, граничний кут виходу світла із GaN у полімер становить $38,2^\circ$, що відповідає квантовій ефективності 10,7%. Внесок випромінювання, яке поширюється крізь сапфірову підкладку та відбивається від дна металевого тримача, такий самий, тобто при застосуванні зазначених матеріалів не може перевищувати 21,4%. Використання flip-chip технології дозволяє теоретично збільшити його до 31,6%, у той час як виготовлення СВС у вигляді зрізаної піраміди дозволяє отримати величину більшу за 55% для СД червоного кольору світіння 650 нм при постійному струмі та 60,9% для імпульсного струму [22] (при струмах нижчих за номінальні).

Наведені міркування та розрахунки дозволяють зробити висновок, що значна частина випромінювання з СВС виходить крізь її бічні грані:

$$KV_{\frac{1}{4}} = \frac{100\% - 10,6\% - 15,8\%}{4} = 18,4\%,$$

що разом із необхідністю локалізації джерел АЕ підтверджує необхідність спостереження розподілу інтенсивності ЕЛ не тільки по поверхні активної області, а і по бічній грані.

4. КОРЕЛЯЦІЯ СИГНАЛІВ АЕ, ФЛУКТУАЦІЙ ЕЛ ТА СТРУМУ ПРИ СТАБІЛІЗОВАНІЙ НАПРУЗІ

Флуктуація інтегральної ЕЛ при її реєстрації по поверхні СВС (рис. 3) є процесом, який носить імовірнісний характер та залежить від локалізації активного в даний момент джерела АЕ (локальної області флуктуації або центра утворення дефектів), діаграми спрямованості випромінювання (яка є в основному ламбертівською), кількості джерел емісії, які спрацьовують одночасно при миттєвій чи довготривалій релаксації динамічних термомеханічних напружень, до того ж інтегральний потік може залишатись незмінним через те, що кожна з окремих флуктуацій може бути у різних фазах (наростання чи зменшення квантового виходу в кожній з локальних точок).

Водночас інтерпретація СВС у вигляді матриці окремих, паралельно ввімкнених мікро-СД із різним вмістом індію в твердому розчині $In_xGa_{1-x}N$ активної області (квантовий

ямі) дозволяє теоретично обґрунтувати та пояснити більшість експериментальних характеристик, а саме: напівширину спектра ЕЛ, зсув максимуму ЕЛ у короткохвильову область спектра при збільшенні величини прямого струму за відсутності нагрівання (живлення струмом з імпульсами малої тривалості), ВФХ, ріст прямої напруги та зміщення спектра випромінювання у високоенергетичну область при деградації внаслідок тривалого напрацювання (більше 2000 годин) [28]. При інтегруванні за всіма локальними областями із властивостями, які змінюються відповідно до складу твердого розчину в квантовій ямі, можна оцінити параметри флуктуації індію в СВС InGaN/GaN, у тому числі визначити площу локальних областей і кількісний склад твердого розчину [28]. При цьому флуктуації індію описуються розподілом Гаусса із максимумом відносно значення $\text{In}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{N}$ для синіх та $\text{In}_{0,4}\text{Ga}_{0,6}\text{N}$ для зелених СВС.

При електричних навантаженнях, вищих за номінальні, особливо легко помітити, що густина струму крізь наногетероперехід є неоднорідною, в першу чергу, через відмінність ВАХ кожного з мікродіодів, що приводить до перегрівання тих із них, в яких активна область збагачена індієм, що приводить до ще більшого перерозподілу густини струму, ЕЛ та перегріву цієї локальної області. Сукупність зазначених факторів призводить до пробою або вигорання окремої ділянки структури і, як наслідок, перерозподілу струму та ЕЛ по решті мікродіодів. Далі цей процес повторюється знову з наступною ділянкою і так далі. При цьому інтегральна сила струму та ЕЛ можуть залишатися незмінними через їх перерозподіл по інших мікро-СД. Наявний градієнт (через відмінність нагрівання кожної з локальних областей) призводить до виникнення термомеханічних напружень, які додатково прискорюють деградацію. Коли термомеханічні напруження досягають критичних значень, спрацьовують джерела АЕ, що приводить до локальних флуктуацій ЕЛ (зміни розподілу інтенсивності по поверхні), а за умови збігу додаткових факторів спостерігається зареєстрована нами раніше в [13-19] кореляція флуктуації інтегральних величин (струму, сигналів АЕ, інтенсивності ЕЛ).

Розглянемо детальніше питання кореляції сигналів АЕ, величини ЕЛ та струму при стабілізованій напрузі. Описані нами у [29, 30] причини: різниця модулів пружних сталей, коефіцієнтів лінійного термічного розширення та сталей ґраток на межах гетеропереходів, неоднорідність розподілу густини електричного струму по площі гетеропереходу завдяки геометричній конфігурації контактів, а також різниця теплового опору активного середовища та тепловідводу [33, 34], явище нерівномірного розподілу густини струму в планарній мезаструктурі («current crowding» [20-22]), локальні дефекти та флуктуації складу напівпровідникової структури – значно прискорюють деградацію електрофізичних характеристик, при цьому динаміка процесів деградації в кожній локальній області СВС є різною [31, 32]. Підтвердження сказаного є одночасне з АЕ проходження процесів деградації і флуктуації електричних властивостей (у тому числі ЕЛ), а також шуми локально-неоднорідних термонапружених діодних і лазерних гетероструктур на основі напівпровідникових сполук A^3B^5 [25].

Очевидно, що через те, що причини виникнення АЕ носять комплексний та імовірнісний характер, виділити окремі фізичні механізми, які приводять до кореляції [35] між флуктуаціями струму і ЕЛ з АЕ, надзвичайно важко. Ці закономірності не можуть бути виражені у вигляді функцій, оскільки будь-які дві із трьох величин залежать від додаткових факторів, які на сьогодні точно не визначені та детально не вивчені.

Незважаючи на те, що існує суттєва різниця в формі зареєстрованих осциляцій ЕЛ, флуктуацій струму і АЕ [13-19], які не дозволяють коректно отримати числове значення кореляції [35], все ж залишається можливість розрахунку ефективності кореляції для окремих ділянок осцилограм цих сигналів. На рис. 6а і 6б зображено осцилограми АЕ (крива 1) та осциляцій ЕЛ (крива 2). Відповідно на рис. 6с та 6д наведено залежності correlation value (ефективності кореляції) від Lag Index (безрозмірна часова відстань від моменту часу 0).

Відмінність від нуля ефективності кореляції для часу існування цього сигналу (поблизу Lag Index = 0) додатково підтверджує взаємозв'язок АЕ і осциляцій інтенсивності ЕЛ. Аналогічні залежності отримано для флуктуацій струму та АЕ.

Кореляція між сигналами АЕ, осциляціями ЕЛ та струму має певні відмінності, так, кореляція АЕ та осциляції ЕЛ – це декілька коротких імпульсів АЕ та одна інтегральна флуктуація. Це дозволяє запропонувати наступну послідовність процесів. У момент виникнення та перебудови дефектів, що приводить до виникнення сигналів АЕ, можливі не тільки зміни ВАХ [14, 15, 23], а й флуктуації диференціального опору структури і відповідно струму. Оскільки не кожному акту виникнення та перебудови дефектної підсистеми відповідає АЕ, сигнали АЕ розділені проміжками. Значні флуктуації струму на початку і в кінці виникнення та перебудови дефектів пов'язані зі зміною диференціального опору. Будь-який процес виникнення і перебудови дефектної підсистеми супроводжується довготривалою в часі релаксацією, яка в окремих областях відбувається більш повільно, крім того окремо для кожної області, а тому для СВС в цілому цей процес є практично неперервним. Це викликає неперервний струмовий шум під час затухання АЕ, тобто в той момент, коли все ще тривають процеси перебудови, а АЕ є малоймовірною через неодноразність перебудови в різних локальних областях СВС та підкладки. Відомо, що для формування імпульсу АЕ необхідне практично одночасне спрацювання кількох джерел (згідно з дислокаційною моделлю до 10^3 – 10^4 сегментів дислокацій) [15]. Під час АЕ малоймовірним є можливість виникнення значних флуктуацій струму, які пов'язані із зміною диференціального опору структури. У першу чергу – через численні некогерентні у просторі та у часі процеси, які відбуваються за час АЕ в значній частині об'єму гетероструктури.

Фактично осциляції ЕЛ виникають при досить тривалих (неперервних) процесах перебудови, а з урахуванням товщини та ролі квантової ями – безпосередньо в ній або її околі. Тому виконання умов, які є недостатніми для виникнення АЕ, приводить до єдиної, довготривалої осциляції ЕЛ одночасно із кількома актами дискретної АЕ.

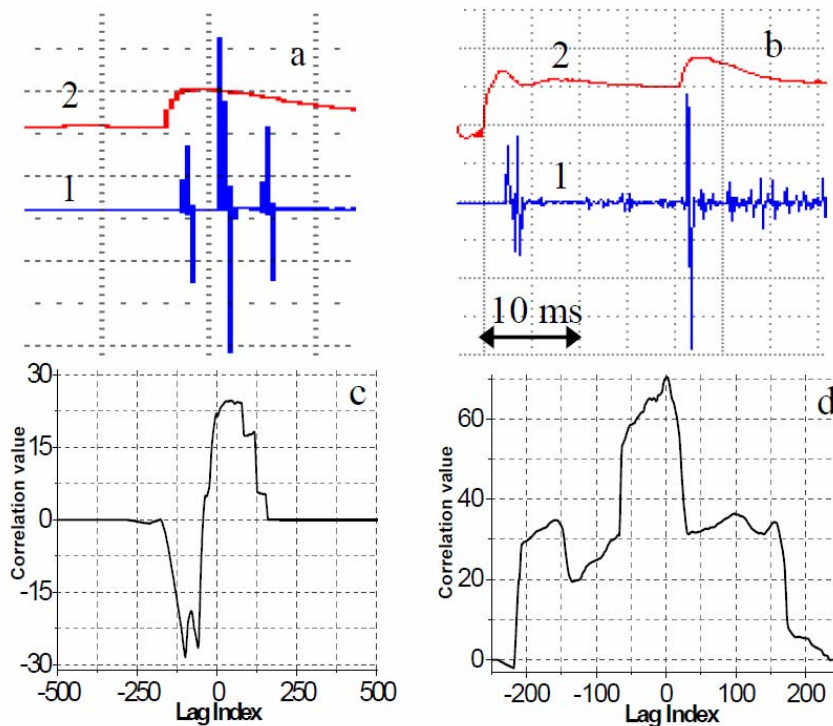


Рис. 6. Кореляція флуктуацій ЕЛ і сигналів АЕ в InGaN/GaN структурі при струмі $I = 100$ мА ($I_{\text{ном}} = 20$ мА). 1 – осцилограми АЕ, 2 – осциляції ЕЛ.

Причиною виникнення осциляцій ЕЛ можуть бути кілька механізмів. Дослідження СВС InGaN/GaN з квантовою ямою показали, що під час флуктуацій струму крізь структуру виникають флуктуації інжекції неосновних носіїв в активну область і як наслідок – флуктуації ЕЛ. Із [26, 27] випливає, що при деградації InGaN/GaN СВС зростає струм протікання, при цьому нестабільність даної компоненти струму пов'язана з перезарядкою поверхневих станів на ділянках, які грають роль затвора каналу. В момент виникнення та перебудови структурних дефектів очевидним є зростання нестабільності процесів перезарядки, що збільшує ймовірність як флуктуації ЕЛ, так і її кореляції з АЕ.

Також не слід виключати ряд додаткових механізмів, наприклад, локальне, тимчасове шунтування *p-n*-переходу за рахунок виникнення і розриву провідних каналів [26], при цьому даний процес може бути домінантним у формуванні осциляцій ЕЛ.

Слід відмітити, що нерівномірний розподіл струму крізь *p-n*-перехід та в областях, безпосередньо розташованих поблизу контактних площадок, приводить до локалізації його в окремих каналах, що еквівалентно зменшенню ефективної площі гетеропереходу. При значних густинах струму зростає температура активної області, до того ж розподіл температури є нерівномірним, теплообмін з об'ємом кристала відбувається недостатньо ефективно, а після досягнення критичного струму відбувається локальне теплове пошкодження контактів та самої структури, що супроводжується відповідними флуктуаціями струму та ЕЛ.

ВИСНОВКИ

Узагальнено матеріал з дослідження явища акустичної емісії у світлодіодних структурах на основі GaN і GaP при струмовому навантаженні. Запропоновано використання комбінованого методу АЕ та мікроскопії видимого діапазону для виявлення ділянок люмінесцентних флуктуацій та деградації квантового виходу в режимі реального часу.

Встановлено, що в світловипромінюючих структурах на основі сполук GaN та GaP при густинах струму, що перевищують поріг виникнення АЕ, одночасно відбуваються деградація ВАХ та інтенсивності ЕЛ, флуктуації ЕЛ та струму, що вказує на спільний механізм їхнього походження – виникнення та зміни енергетичного стану довготривалих дефектів. Це дає змогу зафіксувати самий початок швидких деградаційних процесів у таких структурах при тестуванні.

Публікація містить результати досліджень, проведених при грантовій підтримці Державного фонду фундаментальних досліджень за конкурсним проектом Ф64/49-2015.

**A.I. Vlasenko, V.P. Veleschuk, M.P. Kisselyuk, Z.K. Vlasenko,
I.O. Lyashenko, O.V. Lyashenko**

ACOUSTIC EMISSION OF THE LIGHT EMITTING DIODES (REVIEW)

Material on research of the acoustic emission (AE) phenomenon in light-emitting structures and LEDs based on the GaN, GaP compounds has been generalized. The use of the combined method of AE and visible microscopy to detect luminescent fluctuations and quantum yield degradation processes in real time has been offered. This article has continued the review published in the journal “Оптоэлектроника и полупроводниковая техника”, 2014.

Keywords: acoustic emission, light-emitting diode, luminescent fluctuations, quantum yield, degradation.

1. *Акустична емісія напівпровідників та діодних структур (огляд) / О.І. Власенко, М.П. Киселюк, В.П. Велешук та ін. // Оптикоелектроника и полупроводниковая техника. – 2014. – Вып. 49. – С. 5-20.*
2. *Грешиников В.А., Дробот Ю.Б. Акустическая эмиссия. Применение для испытаний материалов и изделий – М.: Изд-во Стантартов, 1976.*
3. *Ikoma T., Ogura M., Adachi Y. Acoustic-emission study of defects in GaP light-emitting diodes // Appl. Phys. Lett. – 1978. – **33**, № 5. – P. 414-415.*
4. *Орлов А.М., Скворцов А.А., Фролов В.А. Акустическая эмиссия в дислокационном кремнии при токовых и тепловых воздействиях // Письма в ЖТФ. – 1999. – **25**, № 3. – С. 28-32.*
5. *Орлов А.М., Скворцов А.А., Фролов В.А. Изменение спектра акустической эмиссии дислокационного кремния при токовых и тепловых воздействиях // Письма в ЖТФ. – 1999. – **25**, № 21. – С. 51-58.*
6. *Орлов А.М., Скворцов А.А., Соловьев А.А. Акустоэмиссионное зондирование линейных дефектов в кремнии // ФТТ. – 2001. – **43**, №4. – С. 616-618.*
7. *Электростимулированное движение краевых дислокаций в кремнии при комнатных температурах / А.А. Скворцов, А.М. Орлов, В.А. Фролов и др. // ФТТ. – 2000. – **42**, № 11. – С. 1998-2003.*
8. *Акустическая эмиссия в сульфиде кадмия при токовых и тепловых воздействиях / А.А. Скворцов, А.М. Орлов, А.С. Насибов и др. // Письма в ЖТФ. – 2000. – **26**, № 22. – С. 36-43.*
9. *Динамика дислокаций и пластичность / Т. Судзуки, Х. Ёсинага, С. Такеути; пер. с япон. А.В. Хачояна. – М.: Мир. – 1989.*
10. *Деградационно-релаксационные явления в светоизлучающих р-п-структурах на основе фосфида галлия, стимулированные ультразвуком / А.Н. Гонтарук, Д.В. Корбутяк, Е.В. Корбут и др. // Письма в ЖТФ. – 1998. – **24**, №15. – С. 64-66.*
11. *Мальшев Р.А. Комплексное решение для контроля и калибровки параметров светодиодов (LED) на производстве и в сертификационных центрах // Производство Электроники. – №5. – 2010.*
12. *Патент. Спосіб відбракування напівпровідникових світлодіодів. Корисна модель. № 56827, Україна. 25.01.2011. Автори Власенко О.І., Босий В.І., Ляшенко О.В., Киселюк М.П., Велешук В.П.*
13. *Acoustic emission and fluctuations of electroluminescence intensity in light-emitting heterostructures / V.P. Veleschuk, O.V. Lyashenko, Z.K. Vlasenko, M.P. Kyselyuk // Semiconductor Physics, Quantum Electronics and Optoelectronics. – 2010. – **13**, №1. – P. 79-83.*
14. *Acoustic-emission method of control of defects-formation process in light-emitting structures / O.V. Lyashenko, A.I. Vlasenko, V.P. Veleschuk, M.P. Kisseluk // Semiconductor Physics, Quantum Electronics and Optoelectronics. – 2010. – **13**, №3. – P. 310-314.*
15. *Fluctuations of current, electroluminescence and acoustic emission in light-emitting A³B⁵ heterostructures / A.I. Vlasenko, O.V. Lyashenko, P.F. Oleksenko, V.P. Veleschuk // Semiconductor Physics, Quantum Electronics and Optoelectronics. – 2008. – **11**, №3. – P. 230-235.*
16. *Dynamics of acoustic emission in light-emitting A³B⁵ structures / A.I. Vlasenko, O.V. Lyashenko, V.P. Veleschuk, M.P. Kisseluk // Semiconductor Physics, Quantum Electronics and Optoelectronics. – 2008. – **11**, №4. – P. 385-391.*
17. *Acoustic emission, electroluminescence intensity surface distribution and light fluctuations correlation in GaAsP/GaP and InGaN/GaN structures / V.P. Veleschuk, O.I. Vlasenko, O.V. Lyashenko, M.P. Kyselyuk // AIP Conf. Proc. – 2009. – **1129**. – P. 395-398.*
18. *Dynamics and Time Correlation of Acoustic Emission, Electrical Noises and Quantum Yield Fluctuations in Optoelectronic Devices / O.V. Lyashenko, V.P. Veleschuk, O.I. Vlasenko, R.G. Chuprina // Noise and fluctuations: AIP Conf. Proc. – 2007. – **922**. – P. 216-222.*
19. *Acoustic Emission, Electrical and Light Fluctuations in Optoelectronic Devices / O.I. Vlasenko, V.P. Veleschuk, O.V. Lyashenko // Noise and fluctuations: AIP Conf. Proc. – 2005. – **780**, Issue 1. – P. 389-392.*
20. *Lateral current crowding in deep UV light emitting diodes over sapphire substrates / M. Shatalov, G. Simin, V. Adivarahan et al. // Jpn. J. Appl. Phys. – 2002. – **41**, N8. – P. 5083-5087.*
21. *Guo X., Schubert E.F. Current crowding in GaN/InGaN light emitting diodes on insulating substrates // J. Appl. Phys. – 2001. – **90**, N8. – P. 4191-4195.*
22. *Шуберт Ф. Светодиоды / Пер. с англ. А.Э. Юновича. – М.: Физмалит. – 2008.*
23. *Деградаційно-релаксаційні процеси у зелених фосфід-галієвих світлодіодах, зумовлені дефектами структури / О.В. Конорева, П.Г. Литовченко, В.Я. Опилат та ін. // УФЖ. – 2006. – **51**, №11-12. – С. 1120-1125.*
24. *Witzigmann B. Microscopic analysis of optical gain in InGaN/GaN quantum wells // Appl. Phys. Lett. – 2006. – **88**. – P. 021104 1–3.*
25. *Optical and Current Noise of GaN Based Light Emitting Diodes / S. Sawyer, S.L. Romyantsev N. Pala, M.S. Shur et al. // Semiconductor Device Research Symposium, Dec. 7-9, 2005, P. 89-90.*
26. *Неоднородность инжекции носителей заряда и деградация голубых светодиодов / Н.И. Бочкарева, А.А. Ефремов, Ю.Т. Ребане и др. // ФТП. – 2006. – **40**, № 1. – С. 122-127.*

27. *Изменения люминесцентных электрических свойств светодиодов из гетероструктур InGaN/AlGaIn/GaN при длительной работе* / А.Н. Ковалев, Ф.И. Маняхин, В.Е. Кудряшов и др. // ФТП. – 1999. – **33**, № 2. – С. 224-232.
28. *Свойства зеленых и синих InGaN светодиодов* / В.С. Абрамов, С.Г. Никифоров, П.А. Соболев, В.П. Сушков // Светодиоды и лазеры. – №1–2. – 2002. – С. 30-33.
29. *Ляшенко О.В., Велещук В.П.* Акустична емісія світловипромінювальних структур на основі сполук A^3B^5 , зумовлена постійним прямим струмом // УФЖ. – 2003. – **48**, № 9. – С. 981-985.
30. *Акустична емісія при релаксації локальних термомеханічних напруг в процесі деградації світловипромінюючих гетероструктур на основі InGaN та GaAsP* / В.П. Велещук, О.І. Власенко, О.В. Ляшенко та ін. // УФЖ. – 2008. – **53**, № 3. – С. 240-246.
31. *Degradation of blue LEDs related to structural disorder* / A.V. Kamanin, A.G. Kolmakov, P.S. Kor'ev et al. // phys. status solidi (c). – 2006. – **3**, № 6. – P. 2129-2132.
32. *Yanagisawa T., Kojima T.* Degradation of InGaN blue light-emitting diodes under continuous and low-speed pulse operations // Microelectronics Reliability. – 2003. – **43**, № 6. – P. 977-980.
33. *Анализ температуры перегрева активной области зеленых СИД на основе нитридов III группы* / Г.А. Сукач, П.С. Смертенко, П.Ф. Олексенко, Suji Nakamura // ЖТФ. – 2001. – **71**, №4. – С. 76-79.
34. *Дослідження інжекційно-термічних процесів у світлодіодах на основі GaN* / С.В. Свечніков, П.Ф. Олексенко, Г.О. Сукач та ін. // УФЖ. – 1998. – **43**, №10. – С. 1290-1294.
35. *Физическая энциклопедия*, ред. А.М. Прохоров. – М.: Советская энциклопедия в 5-ти томах. – т. 2. – 1990. – С. 700.

Інститут фізики напівпровідників
ім. В.Є. Лашкарьова НАН України,
проспект Науки, 41,
03680 Київ, Україна
e-mail: vvvit@ukr.net

Отримано 12.05.2015

¹Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
проспект Глушкова, 4,
03680 Київ, Україна