

**В.П. Велешук, О.І. Власенко, З.К. Власенко, Д.М. Хміль,
О.М. Камуз, В.В. Борщ¹**

НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ ТА ДІАГНОСТИКА СВІТЛОДІОДНИХ СТРУКТУР НА ОСНОВІ GaN ЗА МІКРОПЛАЗМАМИ (ОГЛЯД)

Узагальнено матеріал з дослідження мікроплазмового контрольованого пробою в InGaN/GaN гетероструктурах світлодіодів та в різноманітних GaN, GaAs, GaP, SiC, Si, ZnO структурах. Установлено, що характеристики мікроплазм світлодіодних структур прямо пов'язані з їх функціональними параметрами. Показано, що за люмінесцентними та електричними характеристиками мікроплазм можливі експресний неруйнівний контроль та діагностика InGaN/GaN потужних світлодіодів. Досліджено спектри електролюмінесценції мікроплазм та встановлено джерела мікроплазм в InGaN/GaN гетероструктурах.

Ключові слова: світлодіод, InGaN/GaN, мікроплазми, діагностика.

1. ВСТУП

Розвиток енергозберігаючих технологій вимагає пошуку ефективних експресних методів неруйнної діагностики та контролю критичних дефектів. Самими ефективними джерелами випромінювання у видимому діапазоні та освітлення є гетероструктури InGaN/GaN.

На сьогодні домінує тенденція виготовлення світлодіодних гетероструктур на основі GaN з великою площею. При цьому гостро постає проблема оперативного виявлення і контролю електрично активних протяжних дефектів у таких гетероструктурах, які погіршують функціональні параметри світлодіодів. Зі збільшенням площі при епітаксійному вирощуванні відбувається більш неоднорідний розподіл внутрішніх механічних напружень, дислокацій різного типу, легуючих домішок та компонент індію чи алюмінію в шарах InGaN та AlGaN. Негативним є те, що густина дислокацій у GaN структурах, особливо вирощених на сапфіровій підкладці, мало змінюється при збільшенні товщини шару і слабо залежить від технологічних методів їх вирощування та досягає $\sim 10^{10}$ см⁻². Дислокації (більшість яких перетинають активну область GaN гетероструктури) та неоднорідності складу і легування створюють систему енергетичних станів, флуктуації зонних параметрів. Це веде до зниження значень квантової ефективності через посилення неоднорідності протікання та концентрування струму, призводить до виникнення областей локального перегріву. Ці ефекти є причинами неоднозначного розвитку подальшого деградаційного процесу, що утруднює, зокрема, прогнозування терміну служби GaN світлодіодів та їх надійності [1, 2].

Тому неруйнівний контроль таких дефектів у випромінюючих GaN структурах великої площі є практично важливим. Дислокації та неоднорідності виявляються різноманітними методами структурного та елементного аналізу. Електрофізичні методи контролю якості, діагностики та прогнозування надійності, а також відбракування *p-n* структур світлодіодів базуються на вимірюванні вольт-амперних (ВАХ), вольт-фарадних (ВФХ) характеристик та електролюмінесценції (ЕЛ) тощо, які є одними з базових функціональних характеристик. Так само, як і методи термостимульованої провідності (та ємності), релаксаційної спектроскопії глибоких рівнів та шумових характеристик.

Також ефективними неруйнівними методами для дослідження та діагностики GaN (InGaN, AlGaN) структур є оптичні методи на основі фото-, катодо- та електролюмінесценції (ФЛ, КЛ, ЕЛ), а також еліпсометрії [3].

Проте основним недоліком вищенаведених методів є те, що зазвичай вони відображають інтегральну по площі p - n переходу характеристику. А «локальні», тобто високороздільні по площі, методи на основі ФЛ, КЛ, ЕЛ, ІЧ-випромінювання не є експресними; при цьому не завжди можна виявити критичні електрично активні протяжні дефекти (області), вплив яких є домінуючим на електричні та люмінесцентні функціональні характеристики GaN структур. Також для застосування даних методів потрібне габаритне дороге обладнання.

У той же час при прикладанні зворотної напруги на GaN структури спостерігається мікроплазмовий пробій, що відбувається переважно в областях протяжних дефектів із найнижчим значенням критичного електричного поля іонізації. Мікроплазми (МП) – це локалізовані області з високою густиною струму лавинної іонізації, які утворюються завдяки малим структурним неоднорідностям (дефектам) в області просторового заряду, де створюється сильне електричне поле в локальних областях зворотно зміщеного p - n переходу та зазвичай супроводжуються електролюмінесценцією при рекомбінації носіїв після іонізації [4].

За характеристиками мікроплазмового пробію здійснюється контроль якості та прогнозування надійності багатьох приладових напівпровідникових структур різного призначення, особливо критичним це є для лавино-пробійних діодів (ЛПД) [5, 6]. Останнім часом мікроплазми вивчаються у AlGaIn/GaN структурах [7, 8], AlGaIn/GaN транзисторах [9, 10], лавинних GaN фотодетекторах (APD) [1, 2], а також в індикаторних [11-22] та потужних [23-27] InGaIn/GaN світлодіодах. Характеристики МП досліджено у світловипромінюючих структурах GaP [28-30], GaAsP [31, 32], GaAs [33], GaN_{1-x}P_x [34] та ZnO/GaN структурах [35-37]. Досліджено джерела МП та розроблено діагностику за МП для Si сонячних елементів [38-44] та Si діодів [45-53], SiC діодів та лавинних фотодетекторів [54-58]. Вивчаються також теорія та фізичні властивості мікроплазм у вищенаведених структурах [49-53].

2. ХАРАКТЕРИСТИКИ МІКРОПЛАЗМ У InGaIn/GaN СВІТЛОДІОДАХ

Інформативною характеристикою мікроплазм є спектр електролюмінесценції. У [23, 24] досліджено спектри МП In_xGa_{1-x}N/GaN структур потужних світлодіодів ($P_{\text{ел}} = 1$ Вт, $I_{\text{ном}} = 350$ мА, площа 1 мм^2) з різним вмістом індію у квантовій ямі: $x = 0,05; 0,15; 0,2$ і $0,3$ на підкладці SiC. Досліджувалася також структура на підкладці Al₂O₃ та структура, вирощена на сапфіровій підкладці та перенесена після лазерного відділення (Laser Lift Off процес) на Si підкладку за допомогою AuSn (евтектика) контакту ($x = 0,2$). Спектри ЕЛ при зворотній напрузі мали дуже малу інтенсивність у порівнянні зі спектрами при прямій напрузі.

На рис. 1 наведено спектри ЕЛ структур на SiC підкладці при зворотній напрузі з різним вмістом індію x у квантовій ямі. Зворотна напруга становила $U_{\text{звор}} = -40$ В, а для структури з $x = 0,05$ ($\lambda_{\text{пик}} = 400$ нм) $U_{\text{звор}} = -23$ В, оскільки вже при $U_{\text{звор}} = -26$ В може відбуватися пробій при витримці до 15 хв.

У спектрах МП спостерігається основний пік квантової ями InGaIn, максимум якого відповідає енергії забороненої зони E_g InGaIn, та плече при 400 нм (рис. 1б, 1в) або пік (рис. 1г, 1д) прилеглих до квантової ями шарів GaN. Плече в області 390–430 нм відповідає рекомбінації на донорах і(або) акцепторах в шарах p - і n -GaIn, при цьому для In_{0,3}Ga_{0,7}N/GaN структури (рис. 1г) і для структури на сапфіровій підкладці (рис. 1д) замість плеча присутній пік при 400 нм, інтенсивність якого перевищує пік від квантової ями. Це вказує на більшу концентрацію донорних та акцепторних станів, пов'язаних також і з дефектами на гетерограницях, оскільки високий вміст індію ($x = 0,3$) так само, як і сапфірова підкладка, призводять до великого неузгодження сталих ґраток і відповідно до більшої концентрації дефектів.

На рис. 1 також наведено спектри ЕЛ МП In_{0,2}Ga_{0,8}N/GaN структур на сапфіровій (д) та на AuSn/Si підкладках (е). Тут зворотна напруга становить -40 В (б) та -24 В (д), оскільки для світлодіодів на Al₂O₃ підкладці при зростанні зворотної напруги вище за -30 В відбувається пробій через вищу концентрацію протяжних і точкових дефектів. Зсув $\Delta\lambda_{\text{МП}}$ між

максимумами спектрів ЕЛ при прямій та зворотній напругах на рис. 1е та 1ε зумовлено квантово-розмірним ефектом Штарка та спостерігається для всіх InGaN/GaN структур [24].

При зворотній напрузі маємо три області в спектрах МП, і з них дві пов'язані з дефектами. Зокрема, при азотній температурі у типових In_{0,2}Ga_{0,8}N/GaN світлодіодах у спектрах ЕЛ МП виявлено два піки, зумовлені рекомбінацією в різних частинах структури – квантовій ямі InGaN та у шарі p-GaN на донорно-акцепторній парі Mg_{Ga} (акцептор) – Mg_N (донор) [25].

На сьогодні є дискусійним питання природи джерел МП в епітаксійних структурах на основі GaN та твердих розчинів InGaN, AlGaN. Джерелами МП вважаються проростаючі дислокації [18-21], кластери дислокацій [2], так звані V-дефекти [19], області, деформовані омичним контактом [13-17].

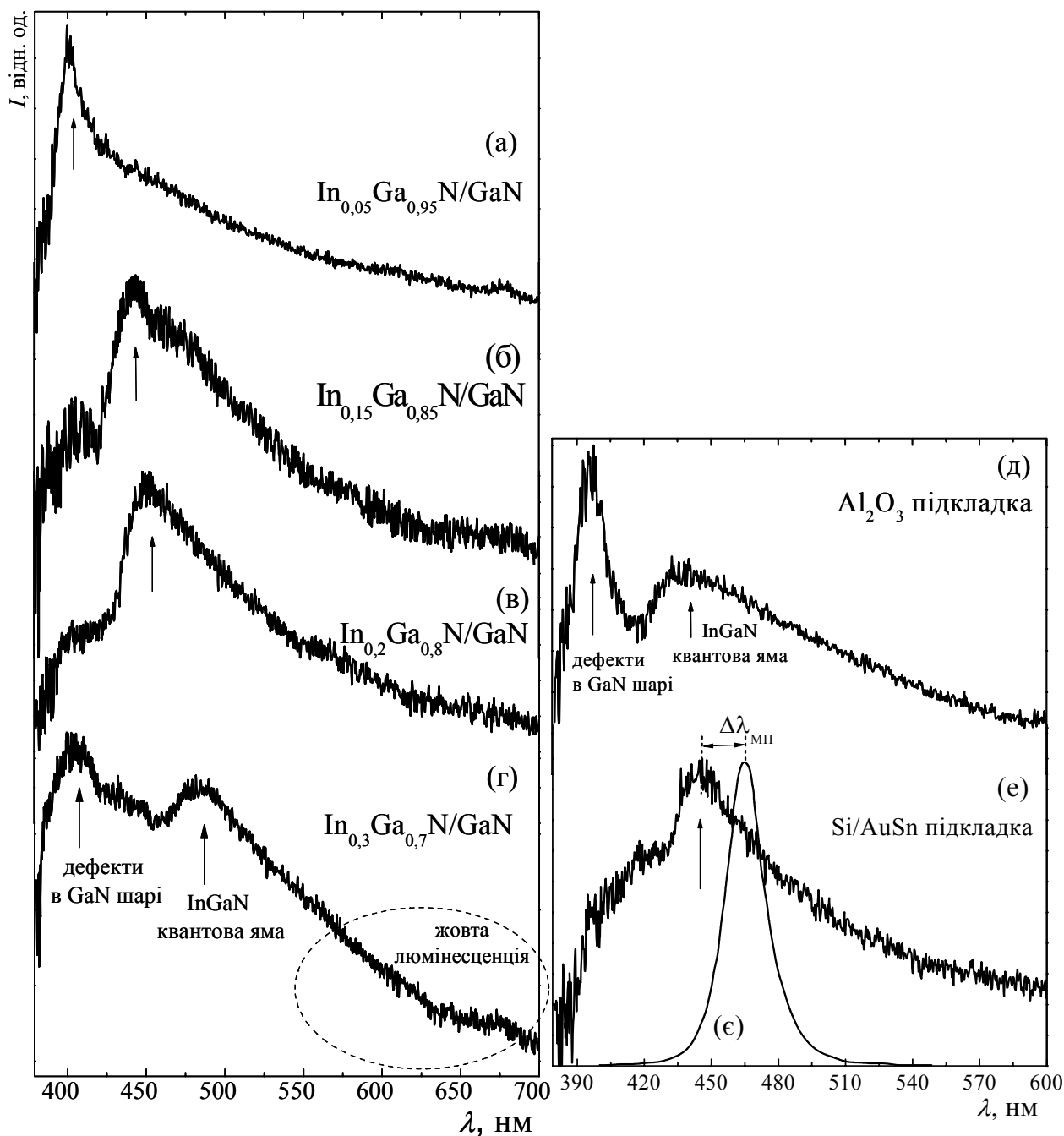


Рис. 1. Спектри електролюмінесценції мікроплазм In_xGa_{1-x}N/GaN структур на SiC підкладці з різним вмістом індію: $x = 0,05$ (а), $0,15$ (б), $0,2$ (в), $0,3$ (г). $U_{\text{звор}} = -23$ В (а) та -40 В (б-г). д) сапфірова підкладка, $U_{\text{звор}} = -24$ В. е, ε) Si/AuSn підкладка, $U_{\text{звор}} = -40$ В. Спектр при прямій напрузі $3,2$ В (ε).

Нами виявлено [26], що МП чітко виявляються на гранях кристалітів GaN, а грані кристалітів, як відомо, характеризуються підвищеною густиною дислокацій. На рис. 2а наведено зображення мікроплазм InGaN/GaN структури на сапфіровій підкладці. Виокремлено кристаліт розміром 180 мкм. Також виокремлено два кристаліти з меншими розмірами (вгорі). У цілому, частина МП на рис. 2а утворюють лінії, що відповідають гексагональним структурам кристалітів по всій поверхні. Відомо, що при епітаксії GaN плівок методом MOCVD на сапфіровій підкладці формуються кристаліти гексагональної структури з різноманітною орієнтацією в площині підкладки з розмірами одиниці-десятки мікрометрів, плівка має мозаїчну структуру [1].

Було встановлено, що більшість мікроплазм, що знаходяться на гранях кристалітів, з'являються (вмикаються) уже при $U_{звор} = -18...-20$ В, тобто є низьковольтними. Такі джерела МП, що мають саму низьку напругу вмикання, можна вважати критичними дефектами. МП зумовлюють лінійну зворотну ВАХ та значно збільшують струми витоку (рис. 2б), і при збільшенні кількості МП на порядок крутизна нахилу лінійної ділянки ВАХ зростає [23].

У роботах [13-17, 21] показано, що чим більший зворотний струм InGaN/GaN світлодіодів, тим більша інтенсивність люмінесценції МП, при цьому тунельний (паразитний) струм на прямій ВАХ (від 0 до 2 В) також більший, а інтенсивність ЕЛ при прямій напрузі менша. При цьому відбувається більш інтенсивна деградація ЕЛ при тривалому функціонуванні [18, 22]. Струм МП протікає по критичних дефектах гетероструктури, або ж, як показано у [13-17], в області омичного контакту у випадку його неякісного формування (деформації); відповідно стає можливою локалізація і контроль таких критичних дефектних областей. Три випадки дефектів, які виявлено за МП, наведено на рис. 3.

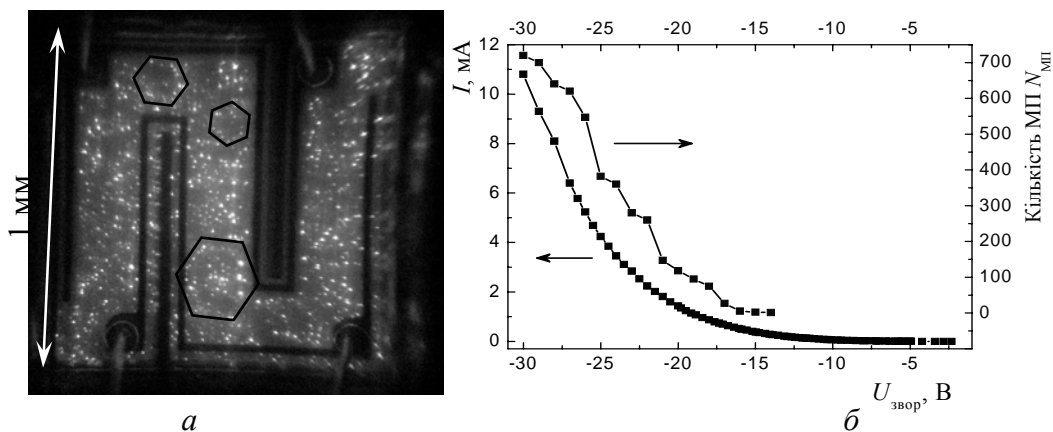


Рис. 2. Мікроплазми InGaN/GaN структури на сапфіровій підкладці при $U_{звор} = -30$ В, $I_{звор} = 10,8$ мА (а) та зворотна ВАХ і кількість МП (б).

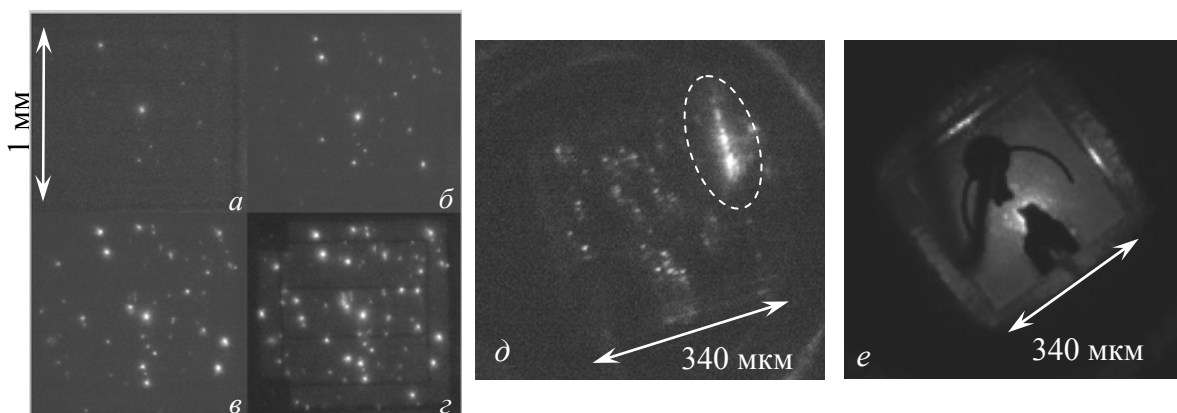


Рис. 3. Мікроплазми InGaN/GaN світловипромінюючої структури на SiC підкладці при $U_{звор} = -35$ В (а), -40 В (б), -45 В (в), -50 В (г), на Al_2O_3 підкладці при -40 В, овалом виокремлено МП на боковій грані (д). МП в області контакту [13-17] (е).

На рис. 3а-г показано, що кількість МП в об'ємі структури зростає зі збільшенням зворотної напруги, на рис. 3д овалом виокремлено область МП на грані, яка зумовлює великий струм витoku [27], а на рис. 3е видно МП в області контакту.

Показано [23, 26, 27, 59-62], що в InGaN/GaN гетероструктурах потужних світлодіодів люмінесцентні та електричні характеристики МП пов'язані з їх функціональними параметрами (пряма та зворотна ВАХ, інтенсивність та спектри ЕЛ, густина дислокацій). Установлено, що серед досліджених трьох структур на різних підкладках (SiC, AuSn/Si, Al₂O₃) гетероструктура на SiC підкладці має найкращу якість та функціональні параметри, а гетероструктура на сапфіровій підкладці має найбільшу кількість критичних дефектів та гірші функціональні параметри. Зокрема, час роботи до рівня 70% та 50% інтенсивності ЕЛ для потужних світлодіодів XPE Cree (SiC) є найбільшим, для світлодіодів FYLP Forgard (Al₂O₃) – найменшим. Тестування проведено згідно зі стандартом LM-80 Testing.

У роботі [26] показано, що можливими є неруйнівний експрес-контроль і діагностика InGaN/GaN гетероструктур потужних світлодіодів за такими параметрами мікроплазм: 1) напруга першої мікроплазми $U_{1МП}$, 2) струм першої мікроплазми $J_{1МП}$, 3) кількість мікроплазм $N_{МП}$, 4) інтегральна інтенсивність люмінесценції мікроплазм $I_{МП}$, 5) співвідношення інтенсивностей синьої і жовтої смуг люмінесценції МП I_{450}/I_{580} , 6) величина зсуву між максимумами ЕЛ при прямій і зворотній напрузі $\Delta\lambda_{МП}$.

Зсув $\Delta\lambda_{МП}$ між максимумами спектрів ЕЛ In_xGa_{1-x}N/GaN світлодіодних структур при прямій і зворотній напрузі, зумовлений квантово-розмірним ефектом Штарка, залежить як від вмісту індію x у квантовій ямі, так і від матеріалу підкладки.

В InGaN/GaN структурах на однакових підкладках (SiC) зсув між максимумами спектрів ЕЛ при прямій і зворотній напрузі зростає з величиною концентрації In і з величиною напруг у квантовій ямі. В InGaN/GaN структурах на різних підкладках (SiC, AuSn/Si, Al₂O₃) при незмінному вмісті In у квантовій ямі зростають як ширина забороненої зони InGaN, так і зсув між максимумами спектрів ЕЛ при прямій і зворотній напругах за рахунок збільшення деформації на межі підкладка/буферний шар [24].

Важливим є питання критерію неруйнівного експрес-методу контролю та діагностики GaN світлодіодів за МП. Граничними критичними характеристиками є величини напруги, зворотного струму та час спостереження – «теплі» електрони можуть призвести до іонізації атомів, активації та/чи до утворення точкових дефектів та відповідно погіршити електричні та випромінювальні характеристики GaN світлодіодів. Тому нами було визначено граничну зворотну напругу (до -40 В) та час спостереження (30...60 с), при яких реєстрація МП не призводить до зміни прямої та зворотної ВАХ та спектрів ЕЛ.

3. НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ ТА ДІАГНОСТИКА InGaN/GaN СВІТЛОДІОДНИХ СТРУКТУР ЗА МІКРОПЛАЗМАМИ

Локалізація критичних дефектів необхідна для прогнозування надійності, оскільки від місцезнаходження такого дефекту може залежати сценарій (розвиток) деградаційного процесу при тестуванні чи експлуатації, а також для контролю технологічних процесів. Очевидно, що за наявності протяжних дефектів в самій структурі буде деградувати область просторового заряду. За наявності дефекту біля контакту буде деградувати область контакту за рахунок надлишку джоулевого тепла через підвищений опір. МП біля контакту вказує на недосконале формування контакту, наприклад пластична деформація. За наявності дефекту на грані буде значним некорисний струм витoku, МП на грані може вказувати на дифузію металу з контакту чи недолік технології різки, травлення.

Відомий «Способ отбраковки полупроводниковых изделий», патент RU № 2357263 [63], в якому для дослідження, сортування та відокремлення браку напівпровідникових структур проводиться діагностика ВАХ та інших характеристик. Діагностика проводиться двічі – до та відразу після дії височастотного електромагнітного поля. Час штучного

старіння для більшості подібних процесів триває до 1-3 діб. Порівнюючи вплив електромагнітного імпульсу на ВАХ, за зміною вигляду ВАХ робиться висновок про надійність виробу. Перевагою способу є більш об'єктивна інформація про стан виробу. Недоліком цього способу відокремлення браку є негативний вплив високочастотного електромагнітного поля, яке призводить до старіння структури, необхідність захисту апаратури для вимірювань та велика тривалість процесу (метод не експресний) [63-65].

Більш вільним від цих недоліків є «Способ неразрушающего контроля качества и отбраковки ненадежных полупроводниковых приборов со скрытыми производственными дефектами», патент RU № 93030298 [66]. Тут на виробі подається електрична напруга у режимі, що полягає у почерговій подачі на $p-n$ перехід імпульсів прямої полярності високого та низького рівнів струмів і напруг, при цьому імпульсом високого рівня струму здійснюють одночасно підігрів напівпровідникової структури та електричне зміщення, що дозволяє виявляти дефекти неякісної структури контактних областей і омичних контактів, неоднорідності розподілу домішки в базовій області, що призводять до значного послідовного опору в структурі $p-n$ переходу, а також дефекти монтажу кристала у корпус. Наступним імпульсом низького рівня напруги здійснюється електричний зсув $p-n$ переходу, що не перевищує напругу перегину ВАХ, і це дозволяє виявляти дефекти типу каналів витоку через забруднення поверхні кристала, замикання металізації з областю $p-n$ переходу крізь пори в окисній плівці, що призводить до часткового шунтування $p-n$ переходу та майже лінійному наростанню струму на початковій ділянці ВАХ. Про дефектність виробів судять, контролюючи прямий струм крізь прилад у момент проходження імпульсу напруги низького рівня. Цей струм буде інтегральною функцією впливу прихованих виробничих дефектів, тому що всі зазначені дефекти дають збільшення струму приладу.

Як видно, в даному патенті основна характеристика дефектів – струм – є інтегральною по площі діючою функцією дефектів, що є недоліком (мала інформативність), тобто неможливість встановлення місцезнаходження дефектів, які, зокрема, відповідальні за зміни ВАХ, як і в патентах [63-65].

Постає проблема виявлення місцезнаходження критичних дефектів (дефектних областей), що виникають при виготовленні на різних технологічних етапах, при спрощенні способу та підвищенні його експресності. Проблема вирішується таким чином, що до світлодіодної структури прикладають постійну зворотну напругу ($U_{звор}$) і її величину збільшують до моменту світіння першої мікроплазми (1 МП) та фіксують величину напруги ($U_{1МП}$), величину струму ($J_{1МП}$) та місцезнаходження і відповідно за цим контролюють критичні дефекти GaN структури.

Такий спосіб дає можливість не тільки виявляти критичні технологічні дефекти, але й визначати їх місцезнаходження та оцінювати їх кількість. Чим меншою є напруга появи першої мікроплазми у видимому оптичному діапазоні, а також чим більший зворотний струм при появі першої МП, тим структура є потенційно більш ненадійною та неякісною. У випадку ненадійного (погано сформованого) контакту МП можуть виникати в області контакту [13-17]. Спосіб є неруйнівний та позбавлений недоліку, який описано у патентах [63-66], – інтегральності інформативної характеристики (струму). Перевагою такого способу є локалізація протікання струму по електрично активних критичних дефектах.

Розглянемо спосіб діагностики GaN структур за електролюмінесценцією МП. «Локальні», тобто високороздільні по площі, методи на основі ФЛ, КЛ та ЕЛ не є експресними; при цьому не завжди за допомогою цих методів можна виявити критичні електрично активні протяжні дефекти.

Відомий «Способ контроля дефектности пленок кремния на диэлектрических подложках», патент RU № 2185684 [67], де для контролю дефектності шарів інтегральних схем чи дискретних приладів, виготовлених за типом «кремній на сапфірі» (та на діелектричних підкладках), використовують еліпсометричні вимірювання показника

заломлення плівок, при цьому вимірювання виконують до та після опромінення структур рентгенівським випромінюванням з енергією 60–150 кеВ та дозою $(2,5-4,0) \cdot 10^{-4}$ Кл/кг, а про ступінь дефектності плівок судять за зміною показника заломлення після опромінення. Технічним результатом є підвищення чутливості еліпсометричного контролю дефектності плівок кремнію на діелектричних підкладках. Винахід є способом діагностики структурної досконалості шарів кремнію, проте інтегральним по площі – розмір скануючого пучка у фокусі не менший за 1 мм, при цьому потребує рентгенівське опромінення для трансформації структурних дефектів за рахунок зміни зарядового стану та впливу власних електричних та механічних напружень. Тобто можлива перебудова дефектів (дислокацій, кластерів, комплексів власних точкових дефектів та домішок).

У патенті RU № 2436076 [68] «Способ контроля дефектности и упругой деформации в слоях полупроводниковых гетероструктур» та аналогічно в [69] використовують рентгенівську дифрактометрію для визначення деформації та дефектності в епітаксійних шарах, зокрема, за зміною відстані між інтерференційними максимумами від епітаксійного шару та підкладки, в тому числі для контролю гетероструктур AlGaIn/GaN з нано- та мікронними шарами. Проте даний спосіб є трудомістким та тривалим. Перевагою патенту [67] є більш достовірне визначення дефектності напівпровідника. Перевагою неруйнівного методу діагностики ФЛ [3] є більш об'єктивна інформація про стан виробу.

Проте недоліками даних способів є негативний вплив рентгенівського випромінювання та відповідно використання громіздкого (дорогого) устаткування або ж неспроможність локалізувати критичні протяжні дефекти.

Більш вільним від вищеописаних недоліків є «Спосіб контролю критичних технологічних дефектів у світлодіодних структурах на основі GaN» [60]. Спосіб позбавлений недоліку інтегральності характеристики (струму), і можна визначити місцезнаходження критичних дефектів. Проте в даному патенті основні характеристики – зворотна напруга та струм – практично не містять інформації про стан дефектів, а особливо випромінювальну рекомбінацію за участі дефектів; і це є недоліком.

У корисній моделі [59] проблема вирішується таким чином, що до світлодіодної структури прикладають постійну зворотну напругу, величину якої збільшують до максимально можливого неруйнівного значення і вимірюють спектр електролюмінесценції всіх мікроплазм; за величиною інтенсивності електролюмінесценції $I_{МП}$ та величиною відношення інтенсивностей максимумів синьої та жовтої смуг спектра електролюмінесценції $I_{\text{синя смуга}}/I_{\text{жовта смуга}}$ діагностують світлодіодні GaN структури та оцінюють їх надійність.

Спосіб, що заявлено, дає можливість не тільки візуалізувати критичні протяжні дефекти GaN структури, але й аналізувати їх за спектрами ЕЛ. Діагностика базується на таких параметрах: 1) інтенсивність ЕЛ мікроплазм $I_{МП}$, 2) спектр ЕЛ МП, за яким розраховується співвідношення $I_{\text{синя смуга}}/I_{\text{жовта смуга}}$ – інтенсивності піків люмінесценції основної (синьої) та жовтої (дефектної, $E = 2,1 \dots 2,3$ еВ) смуг. Чим більша інтенсивність ЕЛ $I_{МП}$ при заданій напрузі, чим менше співвідношення $I_{\text{синя смуга}}/I_{\text{жовта смуга}}$, тим GaN структура є більш ненадійною та неякісною.

Зазвичай, типовими методами характеристизації та діагностики GaN плівок та InGaIn/AlGaIn/GaN гетероструктур на різноманітних підкладках є методи на основі фотолюмінесценції при кімнатній і низьких (азот, гелій) температурах та електролюмінесценції. Проте температури азоту та гелію не придатні, оскільки призводять до деградації функціональних параметрів та виходять за межі температурного інтервалу експлуатації ($-40 \dots +60$ °С) гетероструктур. Спектри ФЛ типових InGaIn/GaN світлодіодів містять основну синю смугу квантової ями InGaIn та GaIn шару і так звану жовту смугу. Їх інтенсивність залежить від концентрації дефектів (у першу чергу, точкових), при цьому з ростом концентрації дефектів інтенсивність синьої смуги знижується, жовтої – зростає. Тому, окрім напівширини смуг, розглядають співвідношення $I_{\text{синя смуга}}/I_{\text{жовта смуга}}$ –

інтенсивності піків ФЛ, яке ще називають оптичним «критерієм якості» [1, 3]. Також запропоновано метод сумісної локальної фотолюмінесценції зі скануючим зондовим мікроскопом для діагностики випромінюючих гетероструктур, зокрема неоднорідності оптичних властивостей InGaAs (InGaP)/GaAs [70].

Запропонований метод діагностики та характеристики GaN структур за спектрами ЕЛ МП є більш інформативним та достовірним у порівнянні з патентом [60], оскільки спектри ЕЛ МП прямо, а не опосередковано містять інформацію про критичні протяжні дефекти. При цьому спектри ЕЛ МП містять як мінімум три інформативні області, яким відповідають люмінесценція від шарів GaN, квантової ями InGaN (синя смуга), випромінювальні переходи за участю глибоких рівнів дефектів та їх комплексів (жовта смуга).

Важливим є виявлення якомога більшої кількості критичних дефектів неруйнівним способом. Поширеним типовим методом контролю дефектності напівпровідникових структур є селективне травлення та подальший підрахунок ямок травлення [71, 72]. У патенті RU № 2403648 «Способ выявления эпитаксиальных дефектов дислокаций» [71] для виявлення дислокацій проводиться травлення поверхні кремнієвих пластин у селективному спеціально підібраному протравлювачі при температурі 293 К та часу травлення 145 ± 5 хв. Винахід забезпечує зменшення тривалості процесу виявлення дислокацій. Перевагами даного методу є проведення контролю дефектності при кімнатній температурі та чітка візуалізація місцезнаходження практично всіх дислокацій.

Відомий «Способ исследования люминесцентных свойств материала с пространственным микро- или наномасштабным разрешением», патент RU № 2435157 [73], де для встановлення люмінесцентних властивостей матеріалу із високою просторовою роздільною здатністю (мікро- та наномасштабною) ділянку матеріалу опромінують скануючим електронним пучком та лазерним випромінюванням стимулюють люмінесценцію. Причому лазерне опромінювання досліджуваної області матеріалу проводять після опромінення цієї області матеріалу електронним пучком на час затримки згідно із $\tau_{\text{затр}} \geq 10 \tau_{\text{затухання}}$, де $\tau_{\text{затр}}$ – час затримки між впливом електронного пучка та лазерного випромінювання, $\tau_{\text{затухання}}$ – це час затухання катодолюмінесценції досліджуваної області матеріалу в межах від 1 до 10^9 нс. Результат – підвищення точності ототожнення люмінесценції з конкретною областю зразка, експресність дослідження, розширення можливості дослідження люмінесценції в матеріалах, зокрема у GaP. Недоліком такого способу є використання складного спеціалізованого устаткування.

Перевагою способу [71, 72] є більш достовірне визначення густини дислокацій у напівпровіднику. Перевагою способу [73] є більш об'єктивна та емна інформація про люмінесцентні властивості та стан дефектів і їх розподіл. Проте основним їх недоліком є те, що вони є руйнівними [71, 72] та неекспресними – їх важко використати на промислових лініях тестування світлодіодів через необхідність використання спеціального устаткування, тривалий час вимірювання.

Слід відмітити, що метод на основі катодолюмінесценції застосовується як безконтактний і відносно неруйнівний метод мікроаналізу оптичних і електронних властивостей GaN та гетероструктур InGaN/AlGaIn/GaN [74, 75]. Інтенсивність та спектри КЛ містять інформацію про фізичні властивості матеріалу, природу дефектів. Просторова роздільна здатність, що досягається в класичних системах КЛ аналізу, є порядку 1 мкм [74].

Більш вільним від вищеповисаних недоліків є «Спосіб діагностики та характеристики світлодіодних GaN структур по електролюмінесценції мікроплазм», патент України № 85050 [59]. Проте, в даному патенті необхідною є доволі чутлива CCD камера та спектрометр, і через низьку інтенсивність світіння МП потрібна витримка при записі спектра (5–10 хв). Останнє знижує швидкість (оперативність) тестування і це є недоліком.

Тому потрібно підвищити експресність способу (швидкості тестування) і його спрощення при контролі критичних дефектів у світловипромінюючих GaN структурах за умову

збереження інформативності. Проблема вирішується таким чином, що до світлодіодної структури прикладають максимально можливу неруйнівну постійну зворотну напругу і вимірюють кількість точок світіння мікроплазм $N_{МП}$ при даній напрузі, і за значенням $N_{МП}$ контролюють критичні дефекти у світлодіодних GaN структурах та оцінюють їх надійність.

Чим більша кількість МП $N_{МП}$ при заданій напрузі, тим GaN структура є більш ненадійною та неякісною. Величина $N_{МП}$ значно впливає на ВАХ, особливо на тунельний та зворотний струми. Зокрема, бажаною умовою світлодіодних структур у різноманітних матрицях є однаковість їх прямих (та зворотних) ВАХ. Такий метод більш експресний у порівнянні з патентом [59], при цьому кількість точок МП пропорційна густині проростаючих дислокацій в області просторового заряду GaN структури [20, 21].

Загалом, запропонований нами метод [59-61] є інформативним, більш простим та експресним.

4. ВИСНОВКИ

Показано, що характеристики мікроплазм світлодіодних InGaN/GaN структур прямо пов'язані з їх функціональними параметрами. Запропоновано неруйнівний експрес-контроль та діагностика InGaN/GaN гетероструктур потужних світлодіодів за люмінесцентними та електричними характеристиками мікроплазм. Контроль здійснюється за такими параметрами МП: 1) напруга $U_{1МП}$ та 2) струм $J_{1МП}$ першої мікроплазми, 3) кількість мікроплазм $N_{МП}$, 4) інтегральна інтенсивність люмінесценції мікроплазм $I_{МП}$, 5) співвідношення інтенсивностей синьої і жовтої смуг люмінесценції МП I_{450}/I_{580} , 6) величина зсуву між максимумами електролюмінесценції при прямій і зворотній напругах $\Delta\lambda_{МП}$.

Установлено, що джерелами мікроплазм в InGaN/GaN гетероструктурах світлодіодів є протяжні дефекти (дислокації) на гранях кристалітів плівки GaN.

Публікація містить результати досліджень, проведених при грантовій підтримці Державного фонду фундаментальних досліджень за конкурсним проектом Ф 64/16 – 2016, № держреєстрації 0116U003954.

A.I. Vlasenko, V.P. Veleschuk, Z.K. Vlasenko, D.N. Khmil', O.M. Kamuz, V.V. Borshch

NON-DESTRUCTIVE CONTROL AND DIAGNOSTICS OF LED GaN STRUCTURES BY USING MICROPLASMAS (REVIEW)

Results of researching the controlled microplasma breakdown in the LED InGaN/GaN heterostructures and various GaN, GaAs, GaP, SiC, Si, ZnO structures have been generalized. It has been ascertained that parameters of the microplasmas in LEDs are directly related with their functional parameters. It has been shown that non-destructive express control and diagnostics of power InGaN/GaN LEDs are possible when being based on the luminescent and electric parameters of microplasmas. The electroluminescence spectra of the microplasmas have been researched and the sources of microplasmas in the InGaN/GaN heterostructures have been determined.

Keywords: LED, InGaN/GaN, microplasma, diagnostics.

1. *III-Nitride Devices and Nanoengineering*. Editor Zhe Chuan Feng. National Taiwan University. Publ. by Imperial College Press, 2008.
2. Morkoc H. *Handbook of Nitride Semiconductors and Devices: GaN-based Optical and Electronic Devices*. Vol. 3. Wiley-VCH, 2009.
3. Reshchikov M.A., Morkoc H. Luminescence properties of defects in GaN (Review). *J. Appl. Phys.* 2005. **97**. P. 061301(95).
4. Грехов И.В., Сержкин Ю.Н. *Лавинный пробой p-n перехода в полупроводниках*. Л.: Энергия, 1980.
5. Конакова Р.В., Кордош П., Тхорик Ю.А., Файнберг В.И., Штофаник Ф. *Прогнозирование надежности полупроводниковых лавинных диодов*. Киев, Наукова думка, 1986.

6. Патент на корисну модель № 47386, Україна, МПК G01R 31/26, G01R 19/28, G01R 27/04. Апарат для діагностики надійності напівпровідникових надпотужних імпульсних лавинопрольотних діодів (ЛПД). О.Є. Беляєв, М.С. Болтовець, Р.В. Конакова, Я.Я. Кудрик, В.В. Шинкаренко. № u2009094934; заявл. 15.09.2009; опубл. 25.01.2010.
7. Zhang S.K., Wang W.B., Dabiran A.M. et al. Avalanche breakdown and breakdown luminescence of AlGaIn multiquantum wells. *Appl. Phys. Lett.* 2005. **87**, No. 26. P. 262113(3).
8. Osinsky A., Shur M.S., Gaska R., Chen Q. Avalanche breakdown and breakdown luminescence in *p*- π -*n* GaN diodes. *Electron. Lett.* 1998. **34**, No. 7. P. 691–692.
9. Zannoni E., Danesin F., Meneghini M. et al. Localized damage in AlGaIn/GaN HEMTs induced by reverse-bias testing. *IEEE Electron. Device Lett.* 2009. **30**, No. 5. P. 427–429.
10. Gradinaru G., Kao N.C., Gaska R. et al. Bulk breakdown in AlGaIn/GaN HFETs. *MRS Spring Meeting*. 1998. **512**. P. 309–314.
11. Ковалев А.Н., Маняхин Ф.И., Кудряшов В.Э. и др. Люминесценция *p*-*n*-гетероструктур InGaIn/AlGaIn/GaN при ударной ионизации. *ФТП*. 1998. **32**, № 1. С. 63–67.
12. Ковалев А.Н., Маняхин Ф.И., Кудряшов В.Е. и др. Изменения люминесцентных электрических свойств светодиодов из гетероструктур InGaIn/AlGaIn/GaN при длительной работе. *ФТП*. 1999. **33**, № 2. С. 224–232.
13. Chen H. Hot carrier-induced emission from the InGaIn/GaN light-emitting diode by characterizing reverse-bias electroluminescence. *Appl. Phys. Lett.* 2013. **102**, No. 16. P. 162106.
14. Chen H., Kao C.-H., Lu T.-C., Shei S.-C. Optical and electrical characterization of reverse bias luminescence in InGaIn light emitting diodes. *Optica Applicata*. 2011. XLI, № 1. P. 195–205.
15. Chen H., Yeh Y.-M., Liao C.H. et al. Optical characterizations and reverse-bias electroluminescence observation for reliability investigations of the InGaIn light emitting diode. *Microelectron. Eng.* 2013. **101**. P.42–46.
16. Chen H. and Lu T.-C. Reverse-bias electroluminescence observation for reliability investigations of the InGaIn LED. *ECS Transactions*. 2010. **27**, No. 1. P. 237–242.
17. Chen H., Kao C.-H., Lu T.-C. Characterizing Reverse-bias Electroluminescence of InGaIn/GaN LEDs. *CS MANTECH (Compound Semiconductor Manufacturing Technology) Conference*. May 16-19, 2011. Palm Springs, California, USA, 4 p.
18. Chen N.C., Wang Y.N., Wang Y.S. et al. Damage of light-emitting diodes induced by high reverse-bias stress. *J. Cryst. Growth*. 2009. **311**, No. 3. P. 994–997.
19. Meneghini M., Trivellini N., Pavesi M. et al. Leakage current and reverse-bias luminescence in InGaIn-based light-emitting diodes. *Appl. Phys. Lett.* 2009. **95**, No. 17. P. 173507(3).
20. Meneghini M., Vaccari S., Trivellini N. et al. Analysis of defect-related localized emission processes in InGaIn/GaN-based LEDs *IEEE Trans. Electron. Devices*. 2012. **59**, No. 5. P. 1416–1422.
21. Cao X.A., LeBoeuf S.F., Kim K.H. et al. Investigation of radiative tunneling in GaIn/InGaIn single quantum well light-emitting diodes. *Solid-State Electron*. 2002. **46**, No. 12. P. 2291–2294.
22. Tharian J. Degradation- and Failure Mode Analysis of III-V Nitride Devices. *Proc. 14th IPFA, IEEE*. Bangalore, India. 2007. P. 284–287.
23. Велешчук В.П., Власенко О.І., Киселюк М.П., Ляшенко О.В. Микроплазменный пробой InGaIn/GaN-гетероструктур мощных светодиодов. *Журнал прикладной спектроскопии*. 2013. **80**, № 1. С. 121–127.
24. Велешчук В.П., Власенко А.И., Киселюк М.П., Власенко З.К., Хмилъ Д.Н., Борщ В.В. Смещение спектров электролюминесценции In_xGa_{1-x}N/GaN структур с различным составом индия и материалом подложки, обусловленное эффектом Штарка и механическими напряжениями. *ФТП*. 2015. **49**, № 8. С. 1031–1035.
25. Veleshchuk V.P., Vlasenko A.I., Kiselyuk M.P., Vlasenko Z.K., Khmil' D.N., Borshch V.V. Electroluminescence of InGaIn/GaN heterostructures at the reverse bias and nitrogen temperature. *Optica Applicata*. 2015. **45**, № 4. P. 535–543.
26. Veleschuk V.P., Vlasenko A.I., Vlasenko Z.K., Kisselyuk M.P. and Borshch V.V. Non-destructive control of critical defects and diagnostics of InGaIn/GaN heterostructures in power LEDs by using their microplasma characteristics. *Mater. Res. Exp.* 2015. № 2. P. 055902(6).
27. Veleschuk V.P., Vlasenko A.I., Kisselyuk M.P., Lyashenko O.V. Microplasmas avalanche breakdown as a diagnostic tool and reliability appreciating of the InGaIn/GaN high-power LEDs. *Proc. 22nd Intern. Conf. on Noise and Fluctuations (ICNF)*. June 24-28, 2013. Montpellier, France. IEEE Xplore. P. 1–3.
28. Булярский С.В., Сережкин Ю.Н., Ионычев В.К. Статистическая задержка пробоя микроплазмы в фосфидгаллиевых *p*-*n*-переходах. *ФТП*. 1999. **33**, №11. С. 1345–1349.
29. Булярский С.В., Сережкин Ю.Н., Ионычев В.К. Влияние ловушек на запуск лавины при пробое фосфидгаллиевых *p*-*n*-переходов. *Письма в ЖТФ*. 1999. **25**, №5. С. 9–13.
30. Гонтарук А.Н., Корбутяк Д.В., Корбут Е.В. и др. Деградиционно-релаксационные явления в светоизлучающих *p*-*n*-структурах на основе фосфида галлия, стимулированные ультразвуком. *Письма в ЖТФ*. 1998. **24**, № 15. С. 64–68.

31. Koptavý P., Šikula J. Reverse biased p-n junction noise in GaAsP diodes with avalanche breakdown induced microplasmas. *Fluctuation and Noise Letters (FNL)*. 2002. **2**, № 2. P. L65–L70.
32. Koptavý P., Macku R., Paracka P., Krcal O. Microplasma noise as a tool for p-n-junctions diagnostics. *WSEAS Trans. Electron.* 2007. **4**, No. 9. P. 186–191.
33. Lahbabi M., Ahaitouf A., Fliyou M. et al. Analysis of electroluminescence spectra of silicon and gallium arsenide p-n junctions in avalanche breakdown. *J. Appl. Phys.* 2004. **95**. P. 1822.
34. Kikawa J., Yoshida S. and Itoh Y. Electroluminescence studies under forward and reverse bias conditions of a nitride-rich GaN_{1-x}P_x SQW structure LED grown by laser-assisted metal-organic chemical vapor deposition. *Solid-State Electron.* 2003. **47**, No. 3. P. 523–527.
35. Qin Q., Guo L.-W., Zhou Z.-T. et al. Electroluminescence of an n-ZnO/p-GaN heterojunction under forward and reverse biases. *Chinese Phys. Lett.* 2005. **22**, No. 9. P. 2298–2301.
36. Sadaf J.R., Israr M.Q., Kishwar S. et al. Forward- and reverse-biased electroluminescence behavior of chemically fabricated ZnO nanotubes/GaN interface. *Semiconductor Science and Technology*. 2011. **26**, No. 7. P. 075003.
37. Wang X., Cole J., Dabiran A.M., Jacobs H.O. Electroluminescence of ZnO nanowire/p-GaN heterojunction light emitting diodes. *NSTI-Nanotech*. 2007. **4**. P. 526–529.
38. Vanek J., Koptavý P., Dolenský J., Veselý A., Chobola Z., Paracka P. Micro-plasma luminescence and signal noise used to solar cells defects diagnostic. *AIP Conf. Proc., 20th Inter. Conf. on Noise and Fluctuations (ICNF-2009)*. 2009. **1129**. P. 641–644.
39. Breitenstein O., Bauer J., Bothe K. et al. Understanding junction breakdown in multicrystalline solar cells. Review. *J. Appl. Phys.* 2011. **109**, No. 7. P. 071101(10).
40. Breitenstein O., Bauer J., Wagner J.-M. et al. Defect-induced breakdown in multicrystalline silicon solar cells. *IEEE Trans. Electron. Devices*. 2010. **57**, No. 9. P. 2227–2234.
41. Bauer J., Wagner J.-M., Lotnyk A. et al. Hot spots in multicrystalline silicon solar cells: avalanche breakdown due to etch pits. *phys. status solidi RRL*. 2009. **3**, No. 2. P. 40–42.
42. Lausch D., Petter K., von Wenckstern H., Grundmann M. Correlation of pre-breakdown sites and bulk defects in multicrystalline silicon solar cells. *phys. status solidi RRL*. 2009. **3**, No. 2–3. P. 70–72.
43. Bothe K., Ramspeck K., Hinken D. et al. Luminescence emission from forward- and reverse-biased multicrystalline silicon solar cells. *J. Appl. Phys.* 2009. **106**. P. 104510.
44. Breitenstein O., Bauer J., Wagner J.-M. et al. Physical mechanisms of breakdown in multicrystalline silicon solar cells. *IEEE Xplore*. 2009. No. 9. P. 000181–000186.
45. Lesniak M., Holt D.B. Defect microstructure and microplasmas in silicon avalanche photodiodes. *J. Mater. Sci.* 1987. **22**, No. 10. P. 3547–3555.
46. Шмагин В.Б., Ремизов Д.Ю., Красильник З.Ф. и др. Влияние характера пробоя p-n-перехода на интенсивность и эффективность возбуждения электролюминесценции ионов Er³⁺ в эпитаксиальных слоях Si:Er, полученных методом сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии. *ФТП*. 2004. **46**, № 1. С. 110–113.
47. Емельянов А.М., Николаев Ю.А., Соболев Н.А. Природа краевого пика электролюминесценции в режиме пробоя Si:(Er,O)-диодов. *ФТП*. 2002. **36**, № 4. С. 453–456.
48. Ионычев В.К., Ребров А.Н. Исследование глубоких центров в микроплазменных каналах кремниевых лавинных эпитаксиальных диодов. *ФТП*. 2009. **43**, № 7. С. 980–984.
49. Marinov O., Deen M.J., Jimenez Tejada J.A. Theory and physical explanation of the microplasma fluctuation and noise in avalanche breakdown of the silicon diodes. *J. Appl. Phys.* 2007. **101**. P. 064515(21).
50. Мусаев А.М. Механизм выключения микроплазм при лавинном пробое p-n структур кремния. *ФТП*. 2016. **50**, № 10. С. 1370–1373.
51. Выжигин Ю.В., Грессеров Б.Н., Соболев Н.А. Исследование влияния глубоких уровней на микроплазменный пробой p-n переходов. *ФТП*. 1988. **22**, № 3. С. 536–538.
52. Добровольский В.Н., Пальцев И.Е., Романов А.В. Кратковременное включение микроплазм при напряжении ниже порогового. *ФТП*. 1997. **31**, № 4. С. 509–510.
53. Дацко Б.И. Численное моделирование явления нестабильности микроплазмы. *ФТП*. 1997. **31**, № 2. С. 186–190.
54. Soloviev S.I., Sandvik P.M., Vertiatchikh A. et al. Observation of luminescence from defects in 4H-SiC APDs operating in avalanche breakdown. *Mater. Sci. Forum*. 2009. **600-603**. P. 1211–1214.
55. Neudeck P.G., Huang W., Dudley M. Study of bulk and elementary screw dislocation assisted reverse breakdown in low-voltage (250 V) 4H-SiC p-n-junction diodes—Part I: DC properties. *IEEE Trans. Electron. Devices*. 1999. **46**, No. 3. P. 478–484.
56. Neudeck P.G., Huang W., Dudley M. Breakdown degradation associated with elementary screw dislocations in 4H-SiC p⁺n junction rectifiers. *Solid-State Electron*. 1998. **42**, No. 12. P. 2157–2164.
57. Singh R. Reliability and performance limitations in SiC power devices. *Microelectronics Reliability*. 2006. **46**. P. 713–730.

58. Генкин А.М., Генкина В.К., Гермаш Л.П. Кинетика пробойной электролюминесценции в р-п-структурах на карбиде кремния. *ЖТФ*. 2000. **17**, № 4. С. 52–55.
59. Патент на корисну модель № 85050 Україна, МПК G01R 31/26. Спосіб діагностики та характеристики світлодіодних GaN структур по електролюмінесценції мікроплазм. О.І. Власенко, В.П. Велешук, В.І. Босий М.П. Киселюк, З.К. Власенко, О.В. Ляшенко, В.В. Борщ. № u201305320; заявл. 24.04.2013; опубл. 11.11.2013.
60. Патент на корисну модель № 76641 Україна, МПК G01R 31/26. Спосіб контролю критичних технологічних дефектів у світлодіодних структурах на основі GaN. О.І. Власенко, В.П. Велешук, М.П. Киселюк, О.В. Ляшенко, М.І. Бойко. № u201207821; заявл. 25.06.2012; опубл. 10.01.2013.
61. Патент на корисну модель № 89047 Україна, МПК G01R 31/26. Спосіб експресного контролю критичних дефектів у світлодіодних структурах на основі GaN. О.І. Власенко, В.П. Велешук, М.П. Киселюк, З.К. Власенко. № u201312631; заявл. 28.10.2013; опубл. 10.04.2014.
62. Патент на корисну модель № 87818 Україна, МПК G01R 1/00. Спосіб прихованого маркування об'єкта і його розпізнавання. О.І. Власенко, В.І. Босий, М.П. Киселюк, В.П. Велешук, О.В. Ляшенко. № u201308608; заявл. 08.07.2013; опубл. 25.02.2014.
63. Патент России № 2357263, МПК G01R31/26. Способ отбраковки полупроводниковых изделий. М.И. Горлов, А.П. Жарких. № 2006357263/28; заявл. 28.01.2008; опубл. 27.05.2009.
64. Патент России № 2316013, МПК G01R31/26. Способ разбраковки полупроводниковых изделий на пластине. М.И. Горлов, А.П. Жарких. № 2006114203/28; заявл. 25.04.2006; опубл. 27.01.2008.
65. Патент России № 2234104, МПК G01R31/26. Способ определения потенциально нестабильных полупроводниковых приборов. М.И. Горлов, В.А. Емельянов, А.П. Жарких, Д.Ю. Смирнов. № 2006113858/28; заявл. 24.04.2006; опубл. 27.09.2007.
66. Патент России № 93030298, МПК G01R31/26. Способ неразрушающего контроля качества и отбраковки ненадежных полупроводниковых приборов со скрытыми производственными дефектами. Н.И. Пиняев. № 93030298; заявл. 01.06.1993; опубл. 10.11.1995.
67. Патент России № 2185684, МПК H01L21/66. Способ контроля дефектности пленок кремния на диэлектрических подложках. Н.Д. Латышева, В.Д. Скупов, В.К. Смолин. № 2006185684; заявл. 23.06.2000; опубл. 20.07.2002.
68. Патент России № 2436076, МПК G01N23/20. Способ контроля дефектности и упругой деформации в слоях полупроводниковых гетероструктур. К.Л. Енишерлова-Вельяшева, А.В. Лютцау, Э.М. Темпер, Ю.В. Колковский. № 2006436076; заявл. 28.04.2010; опубл. 28.04.2011.
69. Патент России № 2442145, МПК G01N23/207. Способ структурной диагностики полупроводниковых многослойных структур (варианты). К.Л. Енишерлова-Вельяшева, А.В. Лютцау, Э.М. Темпер, Ю.В. Колковский. № 2006442145; заявл. 30.11.2010; опубл. 30.11.2010.
70. Миронов В.Л. Сканирующая зондовая микроскопия твердотельных наноструктур: дисс. ... д-ра физ.-мат. наук, 01.04.01. Нижний Новгород, 2009.
71. Патент России № 2403648, МПК H01L21/66. Способ выявления эпитаксиальных дефектов дислокаций. Т.А. Исмаилов, Б.А. Шангереева, А.Р. Шахмаева. № 2006403648; заявл. 08.05.2009; опубл. 08.05.2009.
72. Zhuang D., Edgar J.H. Wet etching of GaN, AlN, and SiC: a review. *Mater. Sci. Eng. R*. 2005. **48**. P. 1–46.
73. Патент России № 2435157, МПК G01N21/63. Способ исследования люминесцентных свойств материала с пространственным микро- или наномасштабным разрешением. И.А. Вайнштейн, А.С. Вохминцев. № 2006435157; заявл. 11.05.2010; опубл. 11.05.2010.
74. Заморянская М.В. Католюминесценция широкозонных материалов и нано-гетероструктур на их основе: автореф. дисс. ... докт. физ.-мат. наук, спец. 01.04.07. Санкт-Петербург, 2012.
75. Lei H., Leipner H.S., Schreiber J., Weyher J.L. Raman and cathodoluminescence study of dislocations in GaN. *J. Appl. Phys.* 2002. **92**, No. 11. P. 6666–6670.

¹Інститут фізики напівпровідників
ім. В.Є. Лашкарьова НАН України,
41, проспект Науки
03680 Київ, Україна
E-mail: vvvit@ukr.net

Отримано 24.11.2016

²Полтавський національний технічний університет
ім. Юрія Кондратюка,
24, проспект Першотравневий,
36000 Полтава, Україна