

УДК 541.451

О.М. Генкін, В.К. Генкіна, М.Д. Гераймчук,
Л.П. Гермаш, П.В. Неволовський

ШИРОКОСМУГОВІ ЕТАЛОННІ ВИПРОМІНЮВАЧІ ДЛЯ УФ-ОБЛАСТІ НА ОСНОВІ КАРБІДУ КРЕМНІЮ

Вступ

Світлодіоди на основі карбіду кремнію, які працюють у режимі електричного пробою (пробійні світлодіоди – ПС), максимально відповідають вимогам, які ставляться до зразкових джерел оптичного випромінювання, призначених для градування спектральної апаратури за чутливістю [1]. Основні переваги ПС порівняно з іншими напівпровідниковими випромінювачами (зокрема, Seoul Optodevice стала першою і поки що єдиною у світі компанією, яка в 2007 р. розпочала промисловий випуск ультрафіолетових світлодіодів на 255–240 нм): широкий спектр, близький до спектра абсолютно чорного тіла при температурі 6000–8000 К, який практично не залежить від величини живильного струму; унікально висока температурна стабільність, що виключає необхідність термостатування і вплив ефектів “виходу на режим”, пов’язаних із нагріванням структури живильним струмом; лінійна залежність потужності випромінювання від живильного струму; субнаносекундна швидкодія; стійкість до струмових перевантажень, високої температури, радіаційного та хімічного впливів. Недоліком же ПС є порівняно малий квантовий вихід випромінювання (порядку 10^{-6} фот./ел.·еВ). Але потужність випромінювання ПС порядку 10^{-7} Вт (10^{12} фот./с) у багатьох випадках є оптимальною для калібрування апаратури, що вміщує фотоелектронні помножувачі.

Дослідження УФ-компоненти випромінювання ПС проводилися в недостатньому обсязі, зокрема, не було даних про квантовий вихід і температурну нестабільність спектрального розподілу випромінювання. Технологія виготовлення і конструкція приладів була не повністю пристосована для найефективнішого і найстабільнішого виведення УФ-випромінювання ПС, яке припадає на область власного поглинання карбіду кремнію, у зв’язку з чим сильно поглинається в дуже тонких шарах матеріалу. Недостатньою була й інформація про фізичні процеси, які визначають характеристики ПС. Зокрема, відкритим за-

лишалось питання про типи випромінювальних переходів високоенергетичних носіїв заряду, що відповідають основним компонентам випромінювання ПС.

Постановка задачі

У даній статті досліджено вплив мікроплазмової структури, робочої напруги, температури на ультрафіолетову компоненту спектрального розподілу квантового виходу світлодіодів на основі SiC-6H і SiC-15R, що працюють у режимі електричного пробою, з метою розширення діапазону роботи еталонних випромінювачів в УФ-область.

Методика експерименту

Використовувались кристали SiC-6H і SiC-15R, виготовлені за методом Лелі на Подільському хіміко-металургійному комбінаті в Росії. Концентрація некомпенсованих донорів становила величину порядку 10^{18} – 10^{19} см $^{-3}$.

p-n-структури створювались вплавленням каліброваних за масою дисків із силуміну при температурі 1700–1900 °С. Вплавлення здійснювалось у природні грані кристалів, перпендикулярні до кристалографічної осі С. Особливу групу становили зразки, в яких *p-n*-переходи наносились на грань кристалів, що є рівнобіжною до кристалографічної осі С. Ця грань формувалась різанням і поліруванням об’ємних кристалів. Омичні контакти до базового кристала створювались напильником Ti + Ni.

Пробій у досліджуваних структурах локалізувався в мікроплазмах, розташування і характеристики яких залежали від ступеня легування, способу обробки поверхні вихідних кристалів, термочасового режиму сплавлення, маси силумінових дисків та інших факторів. Відбиралася структура, в якій мікроплазми однорідно заповнювали всю площу чи локалізувалися в межах кільця, що займає значну частину площини *p-n*-переходу. Такі зразки отримувались ретельним відпрацюванням технологічних режимів за умови штучного внесення дефектів у приповерхневий шар вихідних пластин карбіду кремнію. В оптимальному варіанті напруги вмикання мікроплазм мало відрізнялися одна від одної. На вольт-амперній характеристиці появи мікроплазм відповідає перегин перед ділянкою різкого зростання струму. Висока стабільність інтегральної за спектром потужності випромінювання при постійному струмі в процесі тривалої роботи забезпечувалася для таких зразків на ді-

лянці “різкого” пробою, достатньо віддаленої вгору по струму від перегину [2, 3].

Ширина забороненої зони SiC-6H становить близько 3eВ. Випромінювання, що супроводжує електричний пробій, вміщує фотони з енергією, яка перевищує ширину забороненої зони SiC і досягає 6eВ. Такі фотони ефективно поглинаються в товщі SiC. Вихід їх за межі кристала є можливим тільки крізь дуже тонку p -область.

Схематичне зображення сплавного p - n -переходу і способу виведення випромінювання показано на рис. 1, а. З цього рисунка видно, що у випадку рівномірного розподілу мікроплазм по площині p - n -переходу повністю втрачається випромінювання мікроплазм, які розташовані під краплею емітерного сплаву. Це приблизно 1/5 частина випромінювання p - n -переходу. Крапля емітерного сплаву дає можливість здійснити надійний, стабільний контакт з p -областю. Струм до краплі підводився за допомогою тонкого алюмінієвого проводу, під'єднаного термокомпресійним зварюванням. Опір такого контакту не перевищував одиниць Ом. Контакт спроможний протягом тривалого часу (більш ніж за 1000 год) пропускати імпульсні струми з амплітудою, більшою за 10 А, без помітної зміни опору. Ми вважаємо, що проста можливість одержання “прозорого” стабільного контакту з p -областю є значною перевагою сплавної технології виготовлення p - n -переходів.

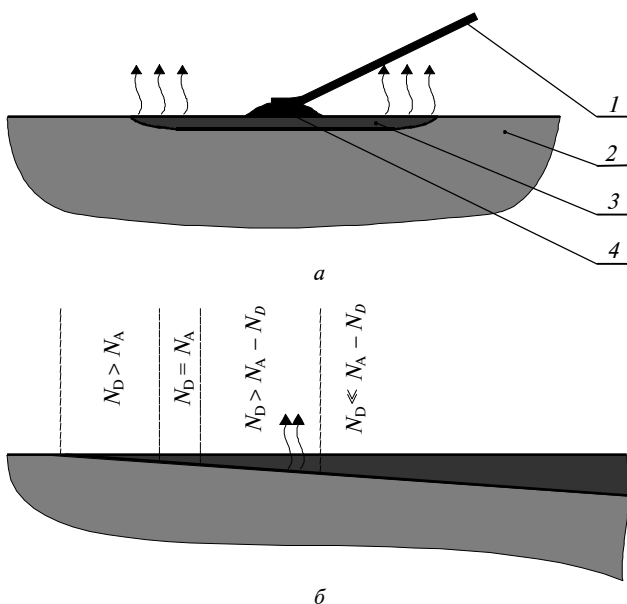


Рис. 1. Схематичне зображення p - n -переходу і способу виведення випромінювання (а), структури p - n -переходу на ділянці периферії (б): 1 – емітерний вивід; 2 – кристал SiC n -типу; 3 – рекристалізаційний прошарок; 4 – крапля емітерного сплаву (Al + Si)

Припускаємо, що структура сплавного p - n -переходу на ділянці периферії має вигляд, схематично показаний на рис. 1, б. На самій межі p - n -структури в процесі вплавлення в тонкому шарі алюмінію розчиняється лише невелика кількість карбід кремнію, при цьому частина алюмінію випаровується. В результаті створюється тонкий рекристалізаційний шар, в якому кількість донорів перевищує кількість акцепторів і p - n -перехід не утворюється. Ближче до центра краплі кількість донорів і акцепторів збігається. Завдяки компенсації провідність такого шару близька до нуля і він надійно ізолює периферію p - n -переходу від межі розділу SiC–повітря. Далі чергуються ділянки p - n -переходу, в яких n -шар (базовий кристал) вміщує в собі більшу концентрацію донорів, ніж p -шар некомпенсованих акцепторів; p -шар легований на кілька порядків сильніше за n -шар. Ця ділянка займає основну частину площини p - n -переходу.

При відсутності на поверхні кристала порушеного шару отримувались зразки, що вміщують в собі мікроплазми, які локалізуються вздовж вузького кільця в районі периферії p - n -переходу. Найвірогіднішою ділянкою їх локалізації видається вузька кільцева зона, якій відповідає більш висока концентрація донорів у n -області, ніж некомпенсованих акцепторів у p -області. У p - n -переходах такого типу ударна іонізація починається дірками, які тунелюють крізь потенціальний бар'єр. У гексагональному карбіді кремнію лавинний пробій для дірок здійснюється при меншій напруженості електричного поля, ніж для електронів, у разі орієнтації електричного поля вздовж гексагональної осі С. Така орієнтація має місце у випадках використання найбільш досконалих, природних граней кристалів. Різниця іонізаційної здатності електронів і дірок пов'язана з наявністю розривів в енергетичному спектрі зони провідності, зумовлених існуванням у SiC природних надграт [4]. Ці розриви заважають електрону набирати енергію в електричному полі. У валентній зоні розриви в енергетичному спектрі відсутні. Таким чином, напруги “вмикання” мікроплазм на кільці повинні бути нижчі, ніж на центральних ділянках.

Зразки з кільцевою топографією випромінювання мають такі корисні (з погляду на створення УФ-випромінювачів) властивості:

- товщина p -шару над периферійними мікроплазмами нижча, ніж на центральних ділянках p - n -переходу з однорідним полем мікроплазм; через це власне поглинання, особливо в корот-

кохвильовій області спектра, менше впливає на квантовий вихід випромінювання;

- процеси випромінювання в p - n -переходах з сильніше легованим n -шаром здійснюються переважно в p -області, ближче до поверхні зразка, що також зменшує вплив власного поглинання.

Виготовлення зразків з кільцевою топографією випромінювання потребує більш скрупульозного відпрацювання технологічних режимів створення p - n -переходу, воно сильніше залежить від факторів, що погано контролюються та викликають появу мікроплазм на центральних ділянках p - n -переходу. Вихід придатних зразків не перевищував одиниць процентів.

В дослідженні використовувались макетні зразки еталонних випромінювачів, в яких p - n -структури розміщувались в нестандартних металевих корпусах. Як правило, у температурному інтервалі 300–400 К залежності інтенсивності випромінювання від температури були лінійними, що дає можливість характеризувати їх величиною відносного температурного коефіцієнта γ , що виражається в %/К.

Для одержання спектральної залежності $\gamma(h\nu)$ послідовно вимірювався спектр зразка $I(h\nu)$ при кімнатній температурі T_1 і температурі T_2 , що перевищує кімнатну на 100 К. При цьому контролювалась сталість фоточутливості реєструючої системи. Величина γ визначалась для кожної енергії фотона з кроком $\Delta(h\nu) = 0,05$ еВ за формулою

$$\gamma = 100\% [I(T_2) - I(T_1)] / [I(T_1) (T_2 - T_1)].$$

Для спільного аналізу залучався спектр зразка $I(h\nu)$, виражений в одиницях, пропорційних до кількості фотонів, що випромінюються в одиничному інтервалі енергії, а також спектральний розподіл відносної крутості спектра $\xi(h\nu) = (1/I)\Delta I/\Delta(h\nu)$. Спільний розгляд цих залежностей є корисним для визначення природи випромінювання [5].

Вимірювання спектрів випромінювання здійснювалося в діапазоні енергій фотона 3,8–5 еВ з кроком 0,05 еВ за допомогою монохроматора ЗМР-3. Використовувався лічильник фотонів на основі ретельно відібраного, суперстабільного зразка фотоелектронного помножувача ФЭУ-142, не чутливого до видимого світла. Вимірювальні зразки розміщувались у спеціальному утримувачі безпосередньо перед вхідною щільною монохроматора. Утримувач забезпечував можливість регулювання і стабілізації температури зразка в межах від кімнатної температури до 400 К.

Величини сигналу від вимірювального зразка в межах усього спектрального діапазону протягом часу вимірювання двох спектрів, що відповідають кімнатній і високій температурі зразка (близько двох годин), відтворювалися з похибкою, яка не перевищувала 0,5%.

Перехід до абсолютних одиниць квантового виходу здійснювався розрахунковим способом за сигналом фотометра ФПЧ, призначеним для вимірювання яскравості джерел випромінювання. Повна похибка абсолютних вимірювань спектральної густини квантового виходу ПС оцінювалась у 50–100%.

Результати вимірювань характеристик УФ-випромінювачів

На рис. 2 подано дані про вплив типу зразків і робочої напруги на квантовий вихід η випромінювання для двох енергій фотона – 3,8 і 4,6 еВ, які відповідають межах спектра. З рисунка видно, що зразки з напругами, меншими за 15 В (таким зразкам відповідає тунельна форма пробою [2]), при 3,8 еВ мають істотно менший квантовий вихід. Цей ефект практично не виявляється на короткохвильовій межі при 4,6 еВ. Квантовий вихід зразків з кільцевою топографією випромінювання істотно перевищує квантовий вихід зразків з однорідним полем мікроплазм, і це сильніше проявляється при 4,6 еВ. Квантовий вихід зразків на основі SiC-15R виявився істотно вищим, ніж для SiC-6H. Залежність відношення величин квантового виходу при 4,6 і 3,8 еВ, наведених на рис. 2, в, помітно знижується при підвищенні робочої напруги. Зазначені закономірності, напевно, пов'язані із впливом власного поглинання, що зростає в короткохвильовій області спектра. Мінімальне власне поглинання можна очікувати в зразках із кільцевою топографією випромінювання і мінімальною робочою напругою (товщина p -області зменшується при підвищенні рівня легування кристалів).

Спектральні розподіли зовнішньої квантової ефективності УФ-випромінювачів для типових зразків, виготовлених на основі SiC-6H, подано на рис. 3. Істотною є значна різниця в квантовому виході зразків з кільцевою топографією випромінювання і з однорідним полем мікроплазм. Різниця в квантовій ефективності зберігається й у видимій області спектра.

З використанням експериментальних даних про спектральну залежність коефіцієнта поглинання кристалів SiC-6H, розраховали спектри пропускання тонких прошарків матеріалу.

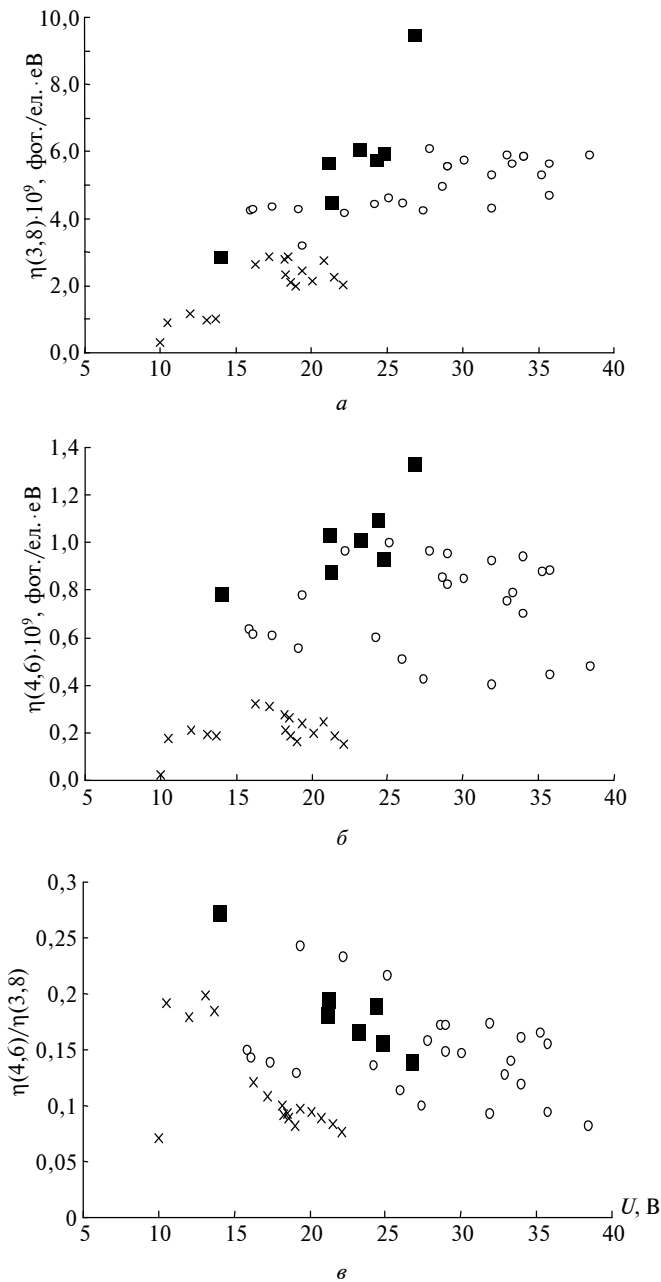


Рис. 2. Залежності зовнішнього квантового виходу випромінювання, що відповідає енергії фотона 3,8 еВ (а), 4,6 еВ (б), від напруги на зразках з однорідним полем мікроплазм (×) і мікроплазмами, локалізованими на вузькому кільці поблизу периферії $p-n$ -переходу для політипу SiC-6H (○) і SiC-15R (◆), а також відношення цих квантових виходів (с)

До цих даних вдавались при оцінці впливу власного поглинання на квантовий вихід випромінювання. На рис. 3 (криві 3, 4) показано вплив проходження випромінювання через тонкі прошарки SiC-6H на спектральний розподіл квантового виходу зразка 15 з кільцевою топографією

випромінювання. З цього рисунка видно, що форма спектра зразка 10 з однорідним полем мікроплазм легко пояснюється впливом власного поглинання випромінювання в прошарку SiC-6H товщиною близько 0,1 мкм. Проте майже триразову різницю квантового виходу зразків власним поглинанням пояснити не вдається.

Таким чином, випромінювачі з кільцевою топографією випромінювання мають переваги порівняно із зразками з однорідним полем мікроплазм – у них більш пологий спектр і у кілька разів більший квантовий вихід.

З'ясовано, що значення інтегрального за спектром температурного коефіцієнта інтенсивності випромінювання, отримане по відношенню до ФЭУ-142, за даними для 40 випромінювачів при струмі 100 мА знаходиться в порівняно малому інтервалі – від $-0,15$ до $-0,06$ %/К. Середнє значення становить $-0,12$ %/К, а середньоквадратичне відхилення – 16%. Виявлено слабкий вплив робочого струму на інтегральний температурний коефіцієнт. Значне його зростання спостерігається в області малих струмів, близької до області перегину на вольт-амперній характеристиці, що передує ділянці різкого зростання струму. Відповідні дані для типового зразка наведено на рис. 4.

Спостерігається, зазвичай, монотонне збільшення негативної величини температурного коефіцієнта в короткохвильовій області спектра. Дані про зв'язок температурного коефіцієнта інтенсивності випромінювання γ і відносної крутості

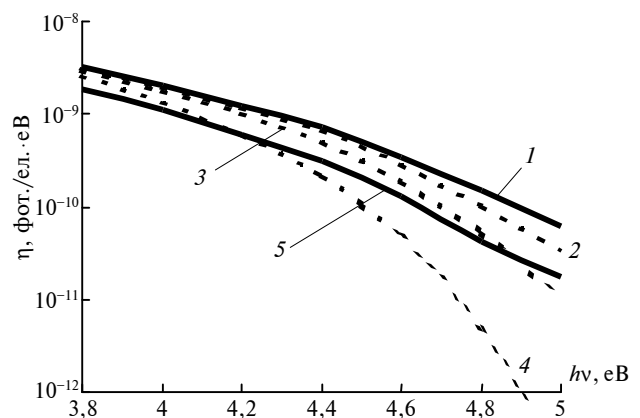


Рис. 3. Спектральні розподіли зовнішньої квантової ефективності еталонних випромінювачів на основі SiC-6H при струмі 100 мА. Зразок 15: 1 – кільцева топограма випромінювання; випромінювання зразка 15, що пройшло крізь прошарок товщиною (розрахунок), мкм: 2 – 0,1; 3 – 0,3; 4 – 1. Зразок 10: 5 – мікроплазми, однорідно розподілені навколо краплі емітерного сплаву

спектра ξ наведено на рис. 5. Для кожного конкретного зразка спостерігається, як правило, подібність форми спектральних залежностей зазначених величин. Кореляцію між цими величинами, подану на рисунку, можна пов'язати із впливом температурного зсуву спектра в довгохвильову область [5] у зв'язку із впливом температури на зонну структуру матеріалу. Вплив цього зсуву на $\gamma(h\nu)$ є пропорційним до $\xi(h\nu)$.

Струм впливає на спектральну залежність $\gamma(h\nu)$ тільки для низьковольтних зразків. Типовий випадок слабого впливу струму продемонстровано на рис. 6. Наростання кривої $\gamma(h\nu)$ на короткохвильовому краї спектра для даного зразка пов'язано із впливом розсіяного в монохроматорі світла.

Дані для зразка на основі SiC-15R з мінімальною кругістю спектра в короткохвильовій об-

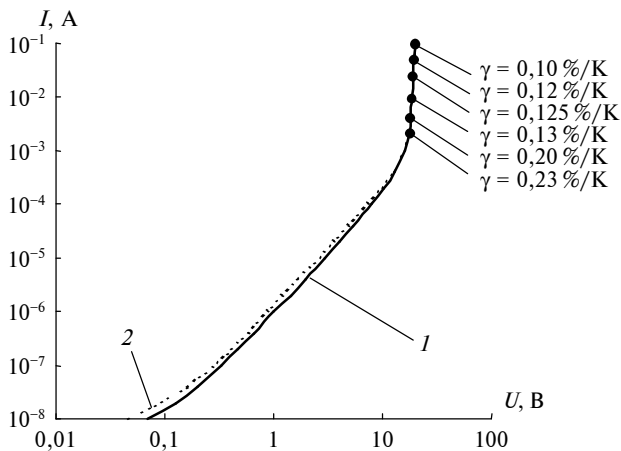


Рис. 4. Вольт-амперна характеристика УФ-випромінювача. Температура, К: 1 – 293; 2 – 393

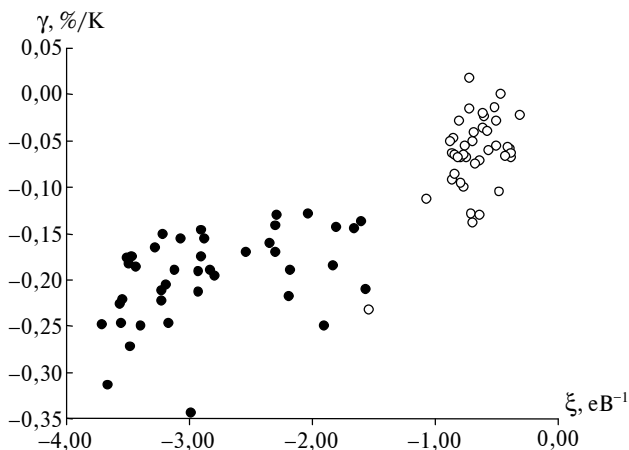


Рис. 5. Залежність температурного коефіцієнта інтенсивності випромінювання від відносної кругісті спектрального розподілу інтенсивності випромінювання. Енергія фотона, eV: ● – 293; ○ – 393

ласті наведено на рис. 7. Залежність $\xi(h\nu)$ для цього зразка показує наявність широкої смуги в області 4,4 eV. Вплив даної смуги не поширюється на криву $\xi(h\nu)$, що дає можливість припустити малість коефіцієнта температурного зсуву даної смуги [5].

На рис. 8 наведено дані для зразка, який виготовлений на грані кристала SiC-6H, паралельної кристалографічній осі С. Вперше спостерігалася наявність смуги з максимумом приблизно 4,5 eV, що дуже впливає на форму кривих $\gamma(h\nu)$ і значно покращує температурну стабільність в ультрафіолетовій області. Аналогічні дані було отримано на деяких інших зразках. Великий вплив смуги на форму кривих $\gamma(h\nu)$ вказує [5] на більш високий негативний коефіцієнт її температурного зсуву порівняно з іншими компонентами випромінювання. Це свідчить, згідно з даними зонних розрахунків [6], що ця смуга зумовлена міжзонними переходами. Подібний енергетичний проміжок 4,4 eV для прямого переходу відповідає точці Г зони Бріллю-

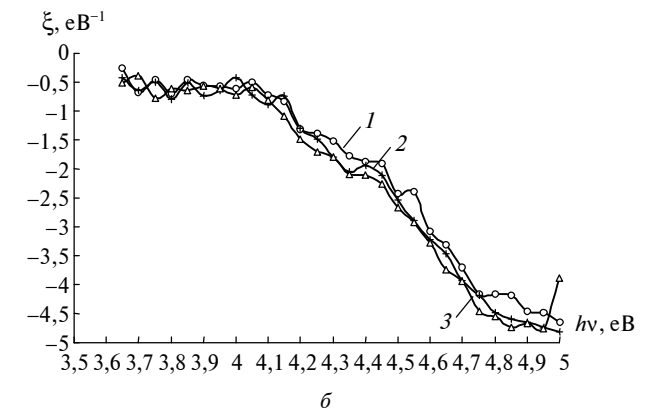
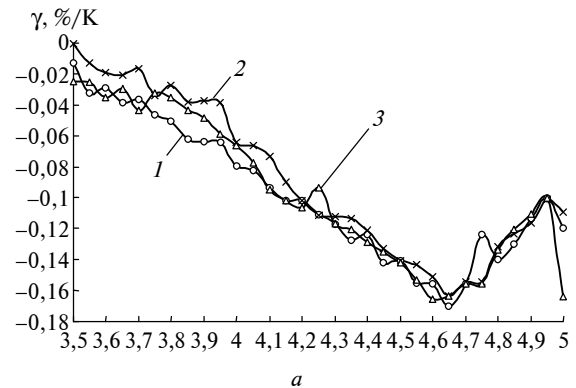


Рис. 6. Спектральні залежності відносного температурного коефіцієнта інтенсивності випромінювання (а) і відносної кругісті спектрального розподілу інтенсивності випромінювання (б) для зразка 310-1 з однорідним полем мікроплазм. Режим живлення зразка: 1 – 20 мА, 16,3 В; 2 – 50 мА, 17,2 В; 3 – 100 мА, 18,2 В

ена. Припущення про зв'язок смуги з переходами електронів (а не дірок) узгоджується з характером перерозподілу компонент випромінювання із зміною режиму живлення. Аналогічне поведення кривих раніше нами було виявлено і досліджено для видимої області на політипі SiC-3C [7]. Спостереження смуги в торцевих зразках можна пояснити більш сприятливими умовами для набору великої енергії електронами (в даному кристалографічному напрямку набирати енергію електронам не заважають мінізонні розриви в зоні провідності [4]).

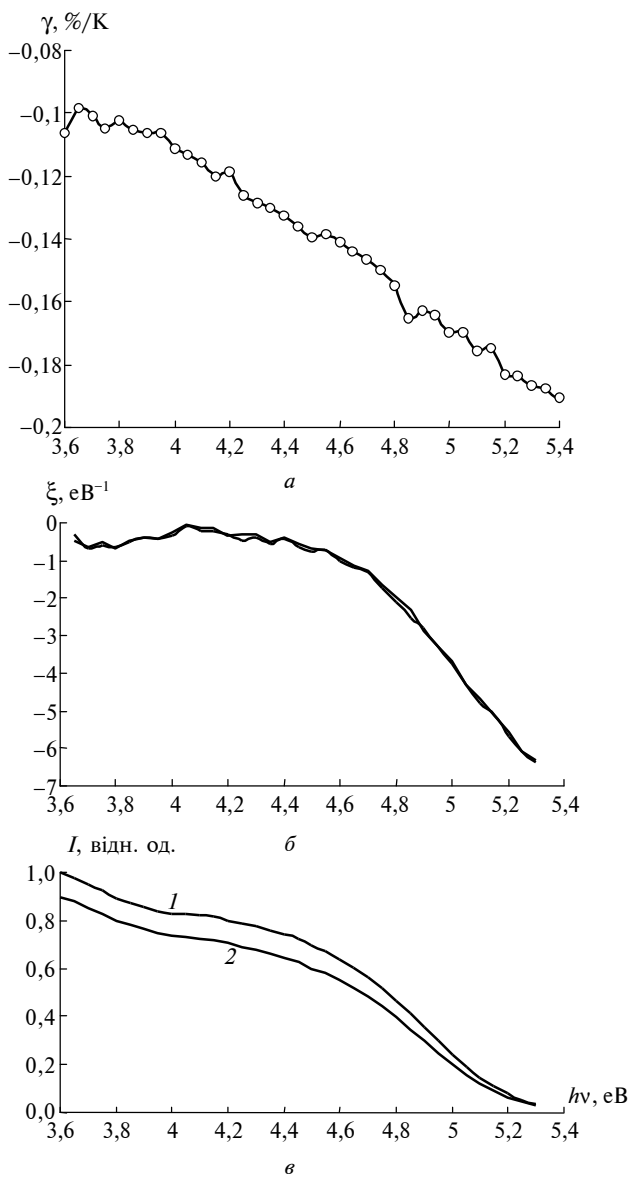


Рис. 7. Спектральні розподіли температурного коефіцієнта інтенсивності випромінювання (а), відносної крутості спектрального розподілу інтенсивності випромінювання (б), інтенсивності випромінювання (в). Зразок: 41-1. Політип SiC-15R. Режим живлення: 100 мА, 13,9 В. Температура, К: 1 – 300; 2 – 400

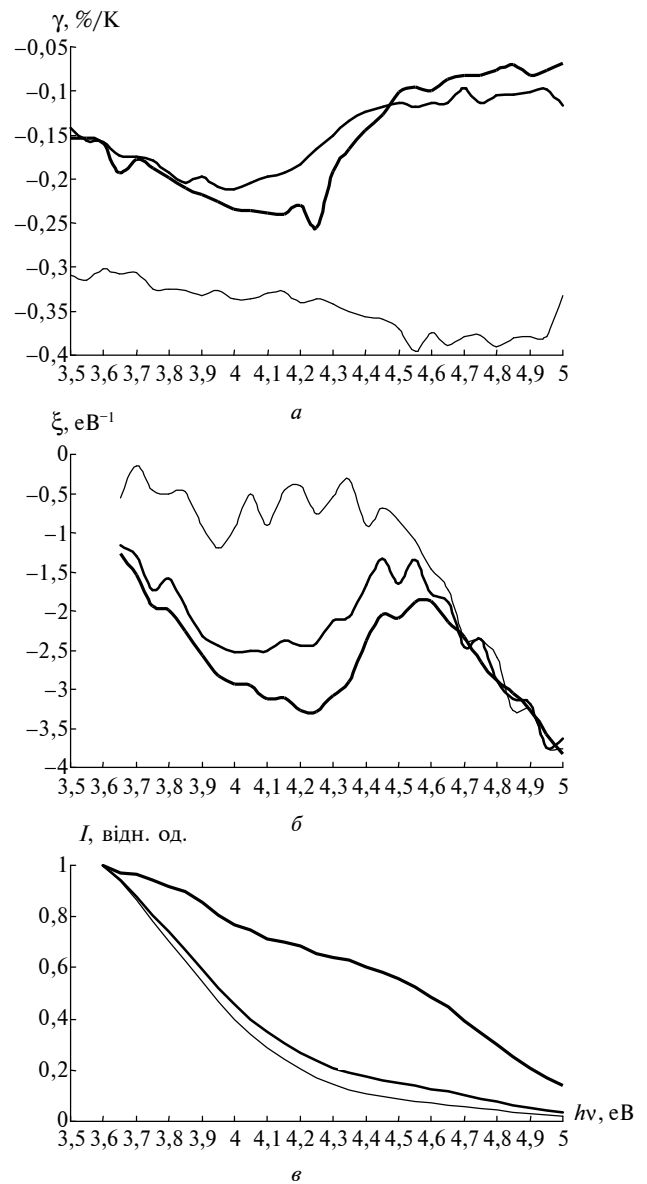


Рис. 8. Спектральні розподіли температурного коефіцієнта інтенсивності випромінювання (а), відносної крутості спектрального розподілу інтенсивності випромінювання (б), інтенсивності випромінювання (в). Зразок: 40-1. Політип SiC-6H. Режим живлення: 1 – 15 мА, 20,5 В; 2 – 50 мА, 23,2 В; 3 – 200 мА, 24,4 В

Висновки

Сплавна технологія при ретельному відпрацюванні технологічних режимів забезпечує достатню відтворюваність характеристик ПС в УФ-області спектра. Зразки, мікроплазми в яких розташовані по вузькому кільцю в районі периферії *p-n*-переходу, мають переваги порівняно із зразками з однорідним полем мікроплазм.

Негативний температурний коефіцієнт інтенсивності випромінювання зростає в короткохвильовій області. Вперше нами виявлено компоненту випромінювання з максимумом 4,5 еВ. Наявність цієї смуги істотно покращує температурну стабільність на відповідній ділянці спектра.

В цілому, незважаючи на деяке погіршення основних характеристик випромінювачів в УФ-області, розроблені зразки приладів можна ефективно використовувати як еталони для

градуювання за чутливістю спектральної апаратури в діапазоні довжини хвилі 250–700 нм.

У подальшому вважаємо за доцільне провести більш детальне дослідження природи та умов виникнення короткохвильової смуги 4,5 еВ, характеристик зразків із кільцевим розташуванням мікроплазм, а також провести дослідження тривалої роботи на спектральний розподіл зовнішнього квантового виходу випромінювачів.

А.М. Генкин, В.К. Генкина, М.Д. Гераимчук,
Л.П. Гермаш, П.В. Неводовский

ШИРОКОПОЛОСНЫЕ ЭТАЛОННЫЕ ИЗЛУЧАТЕЛИ ДЛЯ УФ-ОБЛАСТИ НА ОСНОВЕ КАРБИДА КРЕМНИЯ

Исследовано влияние микроплазменной структуры, рабочего напряжения и температуры на ультрафиолетовую компоненту спектрального распределения квантового выхода светодиодов на основе SiC-6H и SiC-15R, работающих в режиме электрического пробоя. Выявлена закономерная связь характеристик образцов со свойствами исходных кристаллов и микроплазменной структурой пробоя. Полученные результаты свидетельствуют о возможности расширения диапазона стабильной работы приборов в ультрафиолетовую область до 250 нм.

O.M. Genkin, V.K. Genkina, M.D. Gerayimchuk,
L.P. Germash, P.V. Nevedovsky

SILICON CARBIDE BASED BROADBAND ETALON EMITTERS FOR THE UV-REGION

In this paper, we studied the influence of the microplasma structure, operating voltage and temperature on the ultraviolet component of the spectrum distribution of quantum output of SiC-6H and SiC-15R based light emitting diodes, working in the electrical breakdown regime. Moreover, revealed was the well-formed connection of samples parameters with the initial crystallites properties and microplasma structure of the breakdown. The obtained results proved the probability of the range extension of the devices' stable work in the ultraviolet region to 250 nm.

1. Генкин А.М., Генкина В.К., Гермаш Л.П. Влияние длительной работы и температуры на спектры карбид-кремниевых светодиодов, работающих в режиме электрического пробоя // Журн. техн. физики. – 1999. – 69, вып. 10. – С. 69–76.
2. Алтайский Ю.М., Генкин А.М., Генкина В.К., Огнева Л.Г. Пробойная электролюминесценция светодиодов на базе карбида кремния // Электронная техника. Сер. 2. – 1987. – Вып. 4 (190). – С.76–78.
3. Белоус М.В., Генкин А.М., Генкина В.К., Станкевич С.А. Влияние длительной работы при максимальной токовой нагрузке на характеристики карбид-кремниевых светодиодов, работающих в режиме электрического пробоя // Журн. техн. физики. – 1999. – 67, вып. 1. – С. 130–132.
4. Санкин В.И. Ванье-штарковская локализация в естественной сверхрешетке политипов карбида кремния. Обзор // Физика и техника полупроводников. – 2002. – 36, вып. 7. – С. 769–793.
5. Белоус М.В., Генкин А.М., Генкина В.К. Влияние температуры на спектральный состав пробойной электролюминесценции *p-n*-структур на основе карбида кремния // Физика и техника полупроводников. – 1999. – 33, вып. 6. – С. 727–732.
6. Зубкова С.М., Русина Л.Н., Смелянская Е.В. Температурная зависимость зонной структуры политипов 3С, 2Н, 4Н и 6Н карбида кремния // Там же. – 2003. – 37, вып. 3. – С. 257–265.
7. Genkin A.M., Genkina V.K., Germash L.P., Zubkova S.M. Oscillatory structure in radiation spectra of individual microplasmas in silicon carbide *p-n*-junctions // European Physical Journal. Applied Physics. – 2006. – 33. – P. 161–167.