

SECTION 13.

ELECTRONICS AND TELECOMMUNICATIONS

DOI 10.36074/logos-14.02.2025.037

ДЖЕРЕЛО СУБНАНОСЕКУНДНИХ ІМПУЛЬСІВ ОПТИЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

Генкін Олексій Михайлович¹

1. кандидат технічних наук,
старший викладач кафедри загальної фізики та моделювання фізичних процесів
*Національний технічний університет «Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського», УКРАЇНА*

Умовою для достовірного використання фотоелектронних помножувачів чи інших фотоприймачів при проведенні кінетичних досліджень швидких оптичних процесів є детальна інформація про їх часові характеристики, такі як: параметри імпульсної характеристики; розкид часу проходження сигналу через фотоприймач; часовий розподіл корельованих з сигналом імпульсних перешкод.

Для визначення цих характеристик необхідно використовувати калібрувальне джерело коротких світлових імпульсів, що забезпечує: тривалість імпульсів не більше однієї третини від очікуваної тривалості імпульсної характеристики; спектральний діапазон випромінювання, що перекриває область спектральної чутливості фотоприймача; зовнішню синхронізацію запуску та стабільність часового положення імпульсів. При визначенні часових розподілів корельованих перешкод фотоприймачів параметри форми калібрувальних світлових імпульсів повинні бути встановлені та зберігатися у широкому динамічному діапазоні (декілька порядків).

Відомі джерела коротких світлових імпульсів на основі напівпровідникових інжекційних лазерів здатні формувати імпульси субнаносекундної тривалості з точним часовим положенням. Тривалість фронтів швидкодіючих інжекційних світлодіодів перевищує 1 нс. Випромінювання же цих джерел має вузький спектр та занадто велику потужність.

Більш високу швидкість та широкий спектр мають так звані пробійні світлодіоди (ПС) на основі карбіду кремнію, здатні працювати у режимі електричного пробою, аналогічно кремнієвим стабілітронам.

Метою роботи було створення калібрувального джерела субнаносекундних імпульсів на основі ПС з карбіду кремнію.

Конструкція та характеристики імпульсних пробійних світлодіодів

Використовували кристали SiC-6H, леговані азотом у процесі росту до концентрацій порядку 10^{18} см⁻³. Товщина пластин складала 0,5 мм. Для зменшення бар'єрної ємності (до 10–20 пФ при нульовому зміщенні) виготовляли р-n-переходи з малою площиною. Їх діаметр складав 30–50 мкм. Р-n-переходи отримували за допомогою сплавлення з напиленого шару силуміну (Al+Si) у поглибленнях відповідного діаметра на поверхні кристалів, перпендикулярної до кристалографічної осі С. Ці поглиблення створювали шляхом хімічного травлення SiC. У подальшому залишки емітерного сплаву витравлювали, напилювали ізолюючий шар SiO та омічні контакти (Ti+Ni) до ділянок р-n-структури, які розміщували на одному боці кристала. Випромінювання виводили через прозору товщу SiC (рис. 1,a).

Відбирали зразки з густим, однорідним полем мікроплазм, що мали малий розкид напруг вмикання. З'ясувалося, що саме такі зразки мали максимальну стабільність та стійкість до струмових перевантажень. Проводили відбір зразків та визначення їх характеристик при живленні у стаціонарному режимі. Для цього структури, шляхом припаювання, розміщували у корпусах коаксіальної конструкції (рис. 1,b).

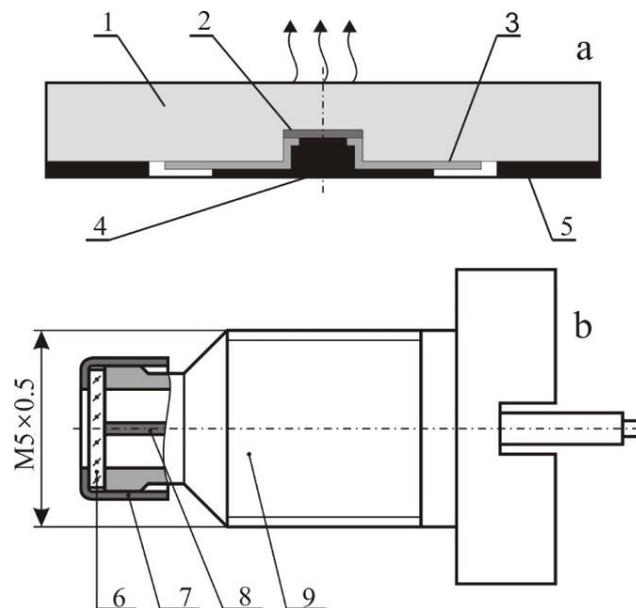


Рис. 1. Структура р-n-переходу (a) та корпус світлодіода (b)

**1, 6 – кристал SiC-6H; 2 - ділянка р-n-переходу; 3 - ізолюючий шар SiO;
4 – емітерний контакт; 5 – базовий контакт; 7 – ковпачок;
8 – емітерний вивід; 9 – корпус (базовий вивід)**



SECTION 13.
ELECTRONICS AND TELECOMMUNICATIONS

Досліджували часову нестабільність характеристик ПС при живленні їх струмом максимально дозволеної густини у стаціонарному режимі. З'ясовано, що при струмі через ПС, що становить 0,1 А (ефективна, усереднена по площині, густина струму порядку 10^5 А/см²), імовірність його виходу з ладу у результаті незворотного теплового пробую р-п-переходу становила 0,3–0,8. Максимальна яскравість зони випромінювання ПС при цьому досягала 10^4 кд/м². У більшості приладів, що витримали випробування при струмі 0,1 А на протязі 10^3 годин, квантовий вихід випромінювання при струмі 0,1 А зберігався незмінним з точністю 3% на протязі часу випробування.

У процесі випробувань у ПС контролювалися вольт-амперні характеристики та залежність інтегральної по спектру потужності випромінювання (P) від величини живильного струму (I). Результати для двох типових зразків представлені на рис. 2.

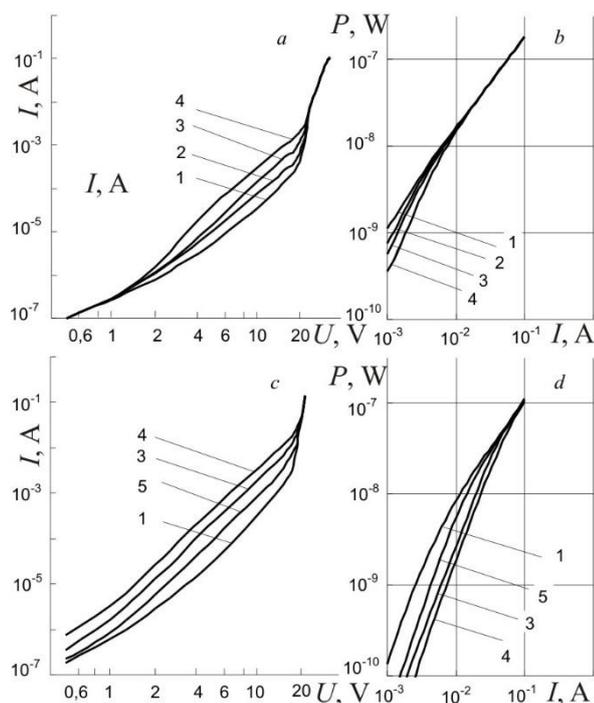


Рис. 2. Залежність вольт-амперної (a, c) та ват-амперної (b, d) характеристик типових ПС від часу роботи при струмі напрацювання 120 мА. Зразки ПС: №1 – (a, b); №2 – (c, d). Час напрацювання, годин: 1 – 0; 2 – 134; 3 – 2110; 4 – 5607; 5 – 52.

Як бачимо з рисунку, зміна потужності випромінювання ПС та напруги при постійному струмі відбувалися синхронно на початкових ділянках вольт-та ват-амперної характеристик. Величина струму, відповідна до нижньої межі

діапазону стабільної роботи ПС, корелювала з величиною струму, що відповідає перегину на вольт-амперній характеристиці, попередньому до ділянки різкого зростання струму. Цей перегин пов'язується нами з початком ударної іонізації. Деградація при заданому струмі була виражена слабо, якщо величина струму, що відповідає перегину на вольт-амперній характеристиці, була нижче заданої величини струму на 1,5–2 порядку. Швидкість деградації була максимальною у початковий період випробувань. Тривалість цієї ділянки складала біля 1000 годин.

Візуальне спостереження під мікроскопом виявило, що збільшення струму на початкових ділянках вольт-амперної характеристики у процесі напрацювання пов'язано з появою низьковольтних мікроплазм.

Отримані результати дозволяють зробити наступні практичні висновки: стабільність досягається на ділянках розвинутого пробою; з метою підвищення стабільності корисним є остарювання приладів на протязі біля 1000 годин; висока стабільність вольт-амперної характеристики свідчить, що ПС є стабільним навантаженням для формувачів імпульсного струму.

Значення диференціального опору зразків при струмі 100 мА перебувало у межах 15–60 Ом (збільшувалося із збільшенням робочої напруги у інтервалі 16–30 В). Температурний коефіцієнт потужності випромінювання не перевищував 0,05 %/К.

Схеми та характеристики формувачів імпульсного струму через пробійні світлодіоди

З метою досягнення максимальної інтенсивності випромінювання бажано забезпечити амплітуду імпульсів струму через ПС величиною до 1 А. При цьому амплітуда імпульсу напруги може досягати 100 В. Такі імпульси можуть бути отримані при швидкому розряді на ПС через комутуючий елемент ємнісного, чи іншого накопичувача, зарядженого до відповідної напруги. Найпростішим варіантом є використання у якості комутуючого елемента лавинних транзисторів. Перевагами таких схем є: простота, малі габарити, низька вартість; слаба залежність сформованих імпульсів від амплітуди і форми імпульсів запуску; можливість отримання імпульсів субнаносекундної тривалості; від'ємна полярність вихідного імпульсу (що дозволяє заземлити корпус ПС) для n-p-n транзисторів.

Використанню формувачів на лавинних транзисторах перешкоджає те, що транзистори, спеціально створені для роботи у цьому режимі (наприклад, транзистори фірми ZETEX FMMT415, 417), малодоступні та дорогі, а для поширених недорогих епітаксіальних транзисторів лавинний режим не є нормованим. Необхідним є індивідуальний відбір типів та екземплярів транзисторів. Крім того, відсутні надійні дані про стабільність формувачів, яка залежить, напевно, від індивідуальних особливостей використаних транзисторів.

SECTION 13.
ELECTRONICS AND TELECOMMUNICATIONS

У деяких випадках критичними є наступні недоліки схем на лавинних транзисторах: дуже обмежена можливість регулювання амплітуди сформованих імпульсів; значне теплове навантаження на транзистори, яке обмежує частоту сформованих імпульсів та погіршує стабільність пристроїв. У цих випадках можливо використовувати у якості комутуючого елемента швидкі польові транзистори. При цьому навантаження на лавинний транзистор значно зменшується. Недоліками таких схем є: збільшення габаритів та їх вартості; необхідність використання декількох живлячих напруг; обмежена можливість збільшення амплітуди світових імпульсів, оскільки швидкі польові транзистори не розраховані на експлуатацію при високих живлячих напругах.

У даній роботі наведені результати відпрацювання схем формувачів імпульсного струму через ПС на лавинних та швидких польових транзисторах, що працюють під керуванням лавинних.

Досліджували нестабільність формувачів імпульсного струму на лавинних транзисторах. Використовували найпростішу схему (рис.3). Режим запуску формувача за допомогою імпульсного трансформатора забезпечував його стійку роботу у діапазоні живлячої напруги U (від 160 до 250 В). При цьому амплітуда сформованого імпульсу змінювалася у незначних межах.

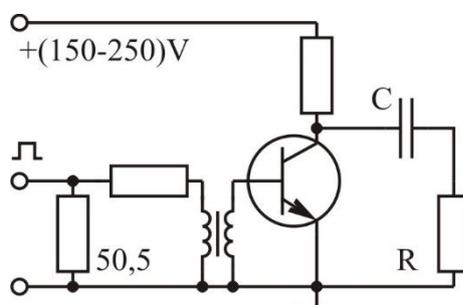


Рис. 3. **Формувач імпульсів на лавинному транзисторі**

Перевірили працездатність у складі формувача, зображеного на рис.3, великої кількості типів та екземплярів поширених епітаксійних n-p-n транзисторів. При цьому підтримували наступні умови роботи схеми: тривалість імпульсу запуску 230 нс, амплітуда 3 В; частота запуску 4,3 кГц; $R=20$ Ом, $C=560$ пФ. Критерієм відбору придатних транзисторів було спостереження стійкої осцилограми імпульсу, з крутим переднім фронтом, без помітних змін амплітуди у діапазоні живлячої напруги 160–250 В.

Деякі транзистори не переходили під впливом імпульсу запуску у стан високої провідності, а формували відносно пологий, з малою амплітудою, імпульс. Аналогічний імпульс спостерігали у того ж транзистора при зменшеній

живлячій напрузі, що відповідає відсутності пробую. Це явище можливо пов'язати з присутністю у вказаних транзисторів відносно грубих дефектів структури, що викликають появу низьковольтних мікроплазм, які відбирають на себе увесь стаціонарний струм пробую. У деяких транзисторів імпульс лавинного струму спостерігали на п'єдесталі підсиленого сигналу, що також можливо пояснити наявністю низьковольтних мікроплазм. У ряду транзисторів спостерігали нестійкість амплітуди імпульсу та його часового положення, що зникала у певних, порівняно вузьких інтервалах живлячої напруги.

Аналіз гістограм розподілу кількості придатних та непридатних транзисторів по напрузі пробую U_b (рис.4) показав, що розподіли для непридатних транзисторів зміщені відносно розподілів для придатних транзисторів у сторону менших напруг пробую, що підтверджує припущення про вплив низьковольтних мікроплазм. Максимальна для усіх типів кількість придатних транзисторів відповідає інтервалу напруги пробую 130 – 150 В.

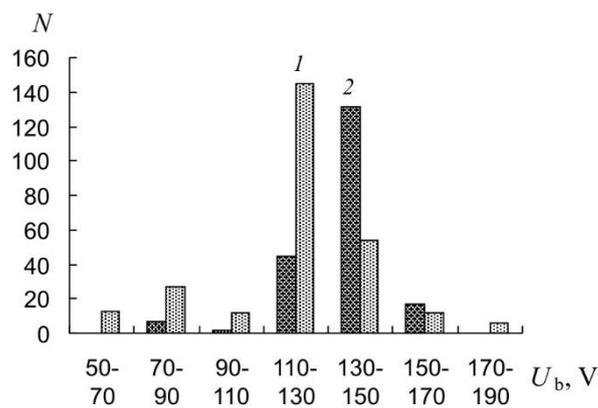


Рис. 4. Розподіл по напрузі пробую кількості транзисторів придатних та непридатних до роботи у лавинному режимі. 1– непридатні; 2– придатні

Проведено вимірювання часової нестабільності лавинних транзисторів при тривалій роботі їх у складі формувачів імпульсів струму. Контролювали напругу пробую U_b , амплітуду імпульсу U_i на навантаженні $R_n = 12$ Ом. Величина розрядної ємності C становила 1200 пФ. Тривалість наростання імпульсу не перевищувала 10 нс. Спад імпульсу був близьким до експоненціального із сталою часу біля 50 нс. Амплітуда імпульсу струму у розрядному ланцюзі становила 4,1–5,9 А. Контролювали також вольт-амперну характеристику колекторного переходу лавинних транзисторів до початку та після закінчення іспитів. Напрацювання формувачів проводили на протязі 1000 годин, цілодобово, при частоті запуску 2 кГц.

SECTION 13.
ELECTRONICS AND TELECOMMUNICATIONS

Виявлено, що для малопотужних транзисторів характерно суттєве збільшення напруги пробую і амплітуди імпульсу у процесі напрацювання. У більшості випадків, помітну зміну параметрів лавинних транзисторів спостерігали у початковий період напрацювання (декілька десятків годин). Для усіх транзисторів середньої потужності спостерігали високу стабільність пробійної напруги та амплітуди імпульсу у процесі напрацювання. Зміна контрольованих параметрів для цих транзисторів у процесі напрацювання не перевищувала 1%.

На рис. 5 наведені вольт-амперні характеристики колекторного переходу типових екземплярів транзисторів до та після напрацювання. Як бачимо з рисунків, відбувається значна зміна характеристики у процесі напрацювання, особливо на початкових ділянках, у бік збільшення різкості пробую.

Таким чином, доцільно вибирати робочу точку на ділянці розвинутого пробую, на достатньому віддаленні від нестабільних початкових ділянок.

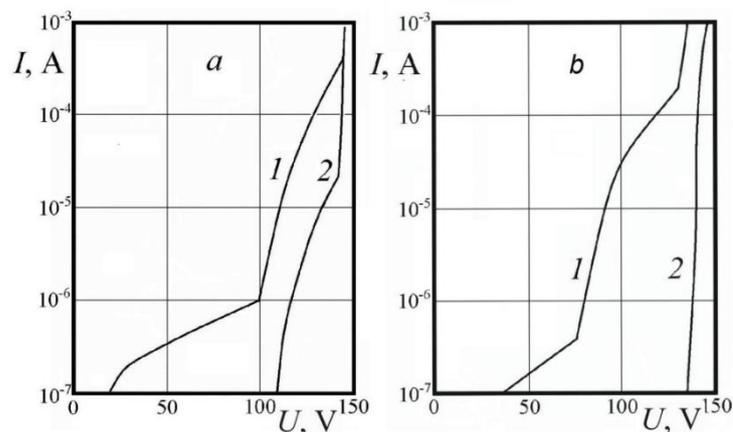


Рис. 5. Вплив напрацювання у лавинному режимі на ВАХ транзисторів:
a – середньої потужності; **b** – малої потужності
Час напрацювання, годин: 1 – 0; 2 – 1000

Схема формувача на лавинному та польовому транзисторі, що виявився найбільш ефективним для створення джерел з мінімальною тривалістю світлових імпульсів, представлена на рис.6. Його відрізняє від аналогів наявність додаткового регульованого джерела живлення (-5)–(-30) В у ланцюгу керування польовим транзистором. Це джерело зміщує робочу точку польового транзистора у ділянку негативних напруг на затворі. При цьому на запуск польового транзистора працює лише гостра верхня частина імпульсу струму, який виникає у розрядному контурі лавинного транзистора. Зважаючи на малу розрядну ємність (13 пФ) та малий опір цього контуру (15 Ом), а також

на значну величину вхідної ємності польового транзистора, сформований імпульс струму через ПС мав тривалість порядку десятих часток наносекунди. Амплітуду імпульсів струму можливо регулювати у межах до декількох ампер. Навантаження на лавинний транзистор у даному пристрої є дуже малим. Це дозволяє збільшити частоту вихідних імпульсів до декількох мегагерц.

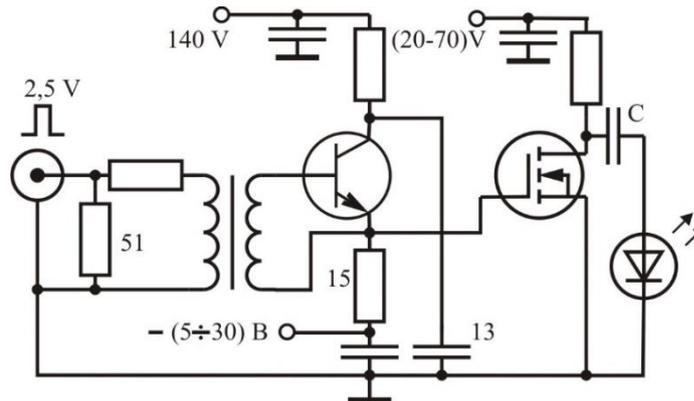


Рис. 6. **Схема формувача субнаносекундних імпульсів струму через ПС**

Отримані імпульси випромінювання

Для визначення форми імпульсів випромінювання використовували метод корельованого у часі рахування окремих фотонів за допомогою мікроканального фотоелектронного помножувача. Цей помножувач відрізнявся практичною відсутністю корельованих з сигналом динамічних перешкод. Часове розрізнення установки складало 0,25 нс. На рис.7 представлений імпульс випромінювання у оптимальному варіанті відносно тривалості. При цьому кількість фотонів у імпульсі випромінювання була порядку 10^2 .

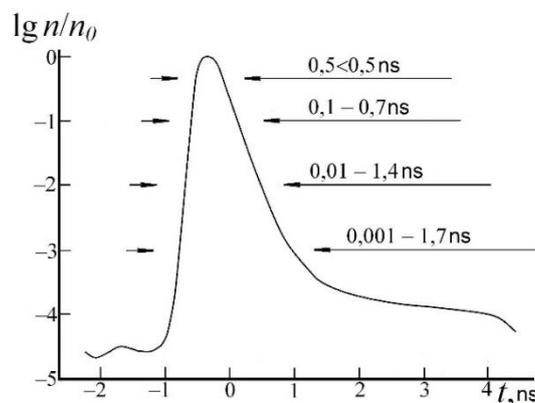


Рис. 7. **Імпульс випромінювання ПС у оптимальному варіанті відносно тривалості**

