

О. В. Конорева, П. Г. Литовченко, Є. В. Малий, І. В. Петренко,
М. Б. Пінковська, В. П. Тартачник, В. В. Шлапацька*

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ

** Інститут фізичної хімії імені Л. В. Писаржевського НАН України, Київ*

ПОВЕРХНЕВИЙ РОЗПОДІЛ ІНТЕНСИВНОСТІ СВІТЛЕННЯ ФОСФІД-ГАЛІЄВИХ СВІТЛОДІОДІВ

Досліджувались мікроплазмові пробої червоних та зелених діодів GaP. Виявлено, що на початку пробою основний внесок у зворотний струм створює тунельна компонента; лавинна складова відіграє основну роль при великих пробійних струмах. Спектр мікроплазми розглядається як результат накладання випромінювання гарячих носіїв та рекомбінаційного випромінювання “домішковий рівень - валентна зона”. Уведення радіаційних дефектів електронами з $E = 2$ МеВ сприяє зменшенню числа мікроплазм.

Ключові слова: фосфід галію, світлодіод, мікроплазма, пробій.

Вступ

Фосфід-галієві джерела світла завдяки простій, усталеній та дешевій технології одержання, підвищеній радіаційній стійкості знайшли широке застосування в мікроелектронній техніці, промисловості, а також у побуті [1 - 3].

Якість роботи оптоелектронних комірок залежить як від поверхневої однорідності, так і від відсутності світлового сигналу при зворотному зміщенні діода. Технологія нанесення омичного контакту на GaP *p-n*-структуру передбачає швидке нагрівання (~ 15 хв) разом із контактним сплавом до 550 °С [4], унаслідок чого формується область із високим рівнем легування, але з підвищеною концентрацією точкових дефектів, дислокацій і, відповідно, механічних напруг. Усі ці обставини призводять до деформації профілю близько розташованого *p-n*-переходу, а відтак – до зміни спектрального складу світлення [5].

Скупчення дислокацій є також основною причиною появи дефектів темних ліній та темних плям – джерела центрів безвипромінювальної рекомбінації [6].

У зворотно-зміщених діодах при досягненні критичного поля ($E \approx 10^5$ В/см) виникають локальні пробої, мікроплазми (МП), що супроводжуються світленням. Така властивість особливо шкідлива у випадку, коли діод працює в імпульсному режимі – зворотне зміщення може спричинити помилкове спрацювання оптоелектронного модуля.

МП значно погіршують характеристику стабільності, що використовуються на початковій ділянці пробою.

Актуальність вивчення МП пробою не обмежується перерахованими аргументами. Виявляється, що МП можна використовувати для одержання інформації про параметри глибоких рівнів [7], здійснювати підрахунок фотонів [8], вони можуть служити генератором контрольованого шуму [9].

І, нарешті, дослідження МП важливі з погляду прогнозування надійності приладів та підвищення стабільності їхніх характеристик.

Експеримент

Досліджувались зелені світлодіоди GaP, леговані азотом, телуром, та червоні, леговані цинком, киснем, в інтервалі температур 77 – 300 К. Залежність інтенсивності світлення від координати на поверхні зразка визначалась фотокамерою за допомогою окремо розробленої програми. Випромінювання МП у полі мікроскопа реєструвалося фотоапаратом в інтервалі температур 120 - 300 К.

Спектри світлення одержано за допомогою автоматичного оптичного комплексу, зібраного на базі спектрометра МДР-23.

Результати

На рис. 1 показано залежність інтенсивності випромінювання двох смуг $h\nu = 1,8$ еВ, $h\nu = 2,21$ еВ від координати поверхні червоного та зеленого діодів відповідно, зняту при кімнатній температурі. Видно, що при $I = 20$ мА спостерігається зростання яскравості світлення зеленої смуги під час наближення до середини зразка; випромінювання червоної смуги залишається незмінним, що, очевидно, є наслідком насичення рекомбінаційних Zn-O центрів.

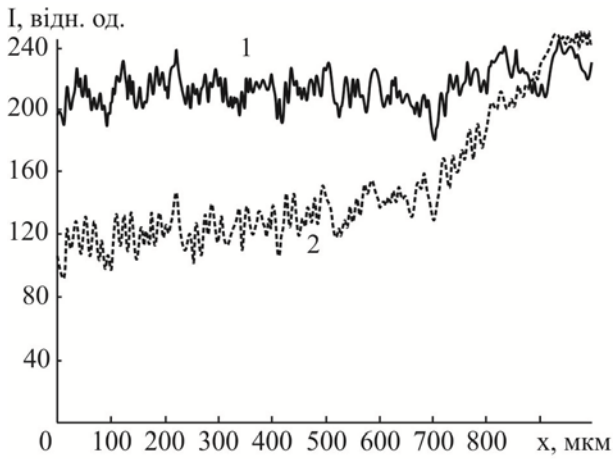


Рис. 1. Залежність інтенсивності свічення червоного (1) та зеленого (2) діодів GaP від координати на поверхні зразка. Точка початку відліку збігається з його краєм.

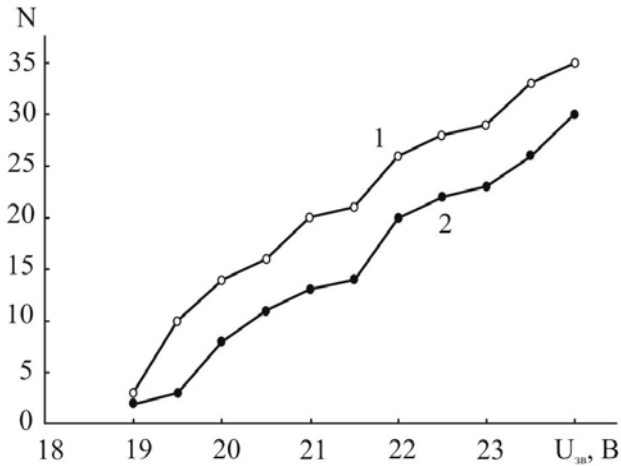


Рис. 2. Залежність числа мікроплазми від зворотної напруги: 1 – вихідний зразок GaP; 2 – опромінений електронами, $E = 2 \text{ MeV}$, $\Phi = 8,2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$.

Відомо [10], що зворотний струм шнура пробою може виникати внаслідок дії трьох механізмів: термоелектронної іонізації (ефект Френкеля - Пула); тунельного підбар'єрного просування носіїв струму (ефект Зінера) та ударно-іонізаційного, що ґрунтується на процесі лавинного множення носіїв.

Перший є наслідком зменшення енергії термічної іонізації домішкового атома під впливом зовнішнього поля. У цьому випадку концентрації електронів міняється за експоненціальним законом

$$n = n_0 \exp\left(\frac{K\sqrt{E}}{2K_0T}\right),$$

де $K = e\sqrt{\frac{e}{\epsilon\epsilon_0\pi}}$; e – заряд електрона; E – напруженість електричного поля; K_0 – постійна Больц-

За винятком приконтактної області, значних відхилень від середньої величини інтенсивності випромінювання периферії червоного діода не виявлено, що свідчить про відносно рівномірний розподіл пар Zn-O в епітаксійній структурі. Властиве зеленому діоду збільшення яскравості в центральній частині найімовірніше обумовлене відсутністю насичення рекомбінаційного каналу, пов'язаного з азотом (див. рис. 1), та більшою густиною ліній струму біля контакту. Не слід виключати з розгляду також можливість накопичення легких атомів азоту в атмосфері Коттрелла, оскільки густина дислокацій у межах біляконтактної ділянки підвищена.

Число МП зростає зі збільшенням струму (рис. 2) і супроводжується характерним свіченням (рис. 3), інтенсивність якого також зростає з температурою.

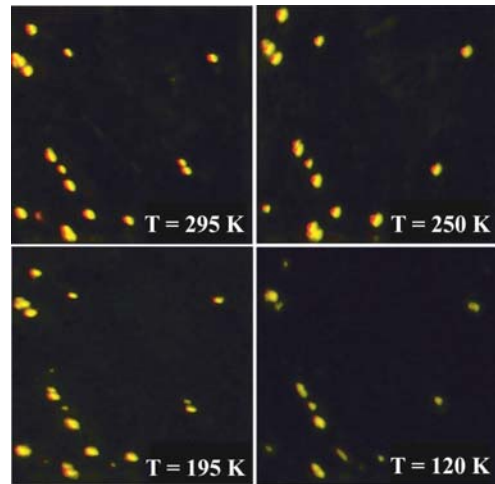


Рис. 3. Свічення мікроплазми діода GaP при різних температурах (120, 195, 250, 295 K; $I = 2 \text{ mA}$).

мана; n_0 – концентрація носіїв при $E = 0$.

Видно, що підвищення температури зразка різко зменшує величину цієї складової. Оскільки наші вимірювання показують, що інтенсивність свічення МП зростає зі збільшенням температури, вплив ефекту Френкеля - Пула на розвиток пробою в діодах GaP можна вважати, принаймні, незначним. В основі тунельного ефекту лежить проходження носіїв струму з домішкового рівня в зону провідності іншого боку p - n -переходу чи зона-зонне тунелювання через бар'єр трикутної форми. Перехід із домішкового рівня особливо ефективний – порівняно з шириною забороненої зони висота бар'єра значно менша.

У загальному випадку прозорість бар'єра визначається як [10]

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{2}{\hbar} \int_0^b \sqrt{2m^* [V(x) - E^*]} dx\right),$$

де E^* – енергія електрона; b – ширина бар’єра; m^* – ефективна маса електрона; $V(x) = E_g$ – для бар’єра трикутної форми.

Залежність імовірності тунельного переходу від температури проявляється через температурну зміну E_g . У GaP нагрівання кристала приводить до звуження ширини забороненої зони і тунельний струм повинен зростати з температурою, що відповідає зростанню інтенсивності свічення МП, виявленому в нашій роботі. Ударний механізм множення носіїв характеризується коефіцієнтом лавинного множення

$$\alpha = \frac{1}{n_0} \frac{dn}{dx}$$

(де n_0 – концентрація носіїв струму на вході у кан) який визначає число пар, створених одним носієм на одиниці довжини шляху. Оцінки показують, що товщина d збідненої області p - n -переходу в GaP близька до 1 мкм; довжина пробігу електрона λ зі зростанням температури зразка змінюється від 50 Å (77 К) до 35 Å (300 К). Оскільки $d \gg \lambda$, електрон у межах збідненої області може прискоритись до енергії, значно вищої від енергії іонізації атома. У роботі [11] показано, що у діодах GaP при зміні поля від $3,5 \cdot 10^3$ до 10^6 В/см α може зростати від 10 до 10^5 см⁻¹. Імовірність лавинного пробігу висока, проте підвищення температури, як видно з наведених оцінок, повинне зменшувати вплив пробійного механізму за рахунок зменшення довжини вільного пробігу.

Результати експерименту свідчать про протилежне – інтенсивність свічення, що супроводжує мікроплазмові пробі, з підвищенням температури зростає (див. рис. 3).

Критерієм, що дає змогу відрізнити тунельний механізм від лавинного, є температурна залежність пробійної гілки вольт-амперної характеристики (ВАХ): у разі тунельного – вона зсувається в область менших напруг при підвищенні температури; коли переважає лавинний – відбувається зсув у протилежний бік.

Детальний аналіз температурних залежностей $I_{зв.}(T)$ показує, що зворотним гілкам ВАХ властивий різний нахил, унаслідок чого криві, зняті при різних температурах, перетинаються в якійсь точці, нехай I_0 . Наслідком такої поведінки є існування двох ділянок на зворотних ВАХ – до точки перетину в області менших струмів та після – при $I > I_0$ – ділянки більших струмів (рис. 4). Підвищення температури діода від 77 до 300 К зсуває верхню частину $I_{пр.}(T)$ праворуч, нижню – в область більших значень пробійних напруг.

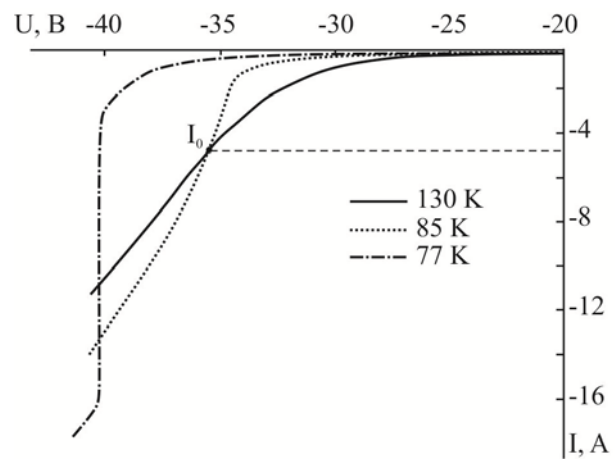


Рис. 4. Температурні залежності зворотних гілок ВАХ діода GaP.

Отже, у межах значень $I_{пр.} < I_0$ переважає тунельна компонента загального струму пробією; нижня частина ВАХ, коли $I > I_0$, складається переважно зі струму лавинного походження. Оскільки зростання температури супроводжується сповзанням точки перетину I_0 вниз по зворотній гілці ВАХ, наближення температури до 300 К збільшує внесок тунельної складової $I_{зв.}$.

Таким чином, спостережуване на експерименті збільшення інтенсивності свічення МП з підвищенням температури обумовлене переважанням внеску тунельної складової струму пробією. Додатковим підтвердженням висновку є дані, одержані на p - n -переходах, виготовлених на основі $Al_xGa_{1-x}As$ та $GaAs_{1-x}P_x$ [12].

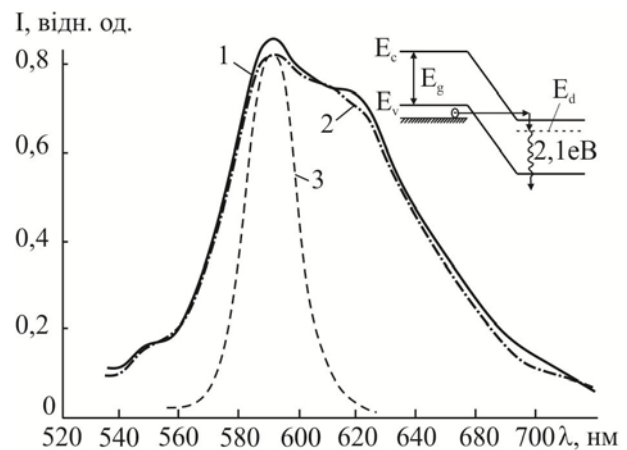


Рис. 5. Спектри свічення мікроплазми зеленого (1) та червоного (2) світлодіодів GaP зняті при різних зворотних струмах ($T = 300$ К). 3 – можливий вигляд смуги, що виникає внаслідок рекомбінаційного процесу “домішковий рівень – валентна зона”. Схема переходу – на вставці.

Спектр свічення зворотно-зміщеного діода має вигляд широкої безструктурної смуги з максимумом $h\nu = 2,1$ еВ. Її значно більша ширина порівняно з основною смугою $h\nu = 1,8$ еВ червоного діода очевидно обумовлена накладанням

гальмівного випромінювання лавини та рекомбінацією, викликаною тунелюванням електрона з V -зони p -області p - n -переходу в C -зону n -області та наступним його захватом на рівень неконтрольованої домішки поблизу дна C -зони (рис. 5).

Про участь саме неконтрольованої домішки свідчить однаковий вигляд спектра зворотного зміщення як червоного, так і зеленого діодів (див. рис. 5).

Вплив радіації на МП є фактором позитивним – опромінення електронами з $E = 2$ МеВ призводить до падіння інтенсивності свічення за рахунок зменшення їхнього числа. Причина гасіння МП, очевидно, полягає у блокуванні дрібних пробійних каналів радіаційними дефектами, зменшенні довжини вільного пробігу носіїв – у випадку дії лавинного механізму, уведенні швидкими частками додаткового числа безвипромінювальних рівнів, якщо розглядати вплив на тунельно-рекомбінаційну компоненту зворотного струму.

Висновки

Виявлено, що зворотний струм пробійної ділянки ВАХ є сумою тунельної та лавинної компонент, причому тунельна переважає лавинній. Зростання інтенсивності свічення МП з температурою є наслідком переважаючого впливу тунельної складової; його спектр має вигляд широкої безструктурної смуги з максимумом $h\nu = 2,1$ еВ, до складу якої входить випромінювання гарячих носіїв та рекомбінаційне свічення, зумовлене переходами електронів з рівня неконтрольованої домішки у валентну зону.

Опромінення електронами з $E = 2$ МеВ призводить до зменшення числа МП унаслідок блокування радіаційними дефектами пробійних каналів та збільшення кількості безвипромінювальних рівнів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Маронюк С.* Светодиоды широкого применения // *Новости электроники.* - 2006. - № 12. - С. 22 - 25.
2. *Ермаков О.Н., Сушков В.П.* Полупроводниковые знакосинтезирующие индикаторы. - М.: Радио и связь, 1990. - 239 с.
3. *Числов А.А.* Исследование и прогнозирование радиационной стойкости светодиодов из фосфида галлия: Автореф. дис. ... канд. тех. наук / ГУЛ НПЦ «СПУРТ». - М., 2005. - 18 с.
4. *Андреев В.М., Долгинов Л.М., Третьяков Д.Н.* Жидкостная эпитаксия в технологии полупроводниковых приборов. - М.: Сов. радио, 1975. - 327 с.
5. *Беляев А.Е., Болтовец Н.С., Венгер Е.Ф., Канакова Р.В.* Физические методы диагностики в микро- и нанoeлектронике. - Х.: ИСМА, 2011. - 384 с.
6. *Берг А., Дин П.* Светодиоды / Пер. с англ.; Под ред. А. Э. Юновича. - М.: Мир, 1979. - 686 с.
7. *Ионычев В.К., Ребров А.Н.* Исследование глубоких центров в микроплазменных каналах кремниевых лавинных эпитаксиальных диодах // *ФТП.* - 2009. - № 43, вып. 7. - С. 980 - 984.
8. *Булярский С.В., Серезжин Ю.Н., Ионычев В.К.* Влияние ловушек на запуск лавины при пробое фосфидгаллиевых p - n -переходов // *Письма в ЖТФ.* - 1999. - № 25, вып. 5. - С. 9 - 12.
9. *Викулин И.М., Стафеев В.И.* Физика полупроводниковых приборов. - М.: Сов. радио, 1980. - 293 с.
10. *Орешкин П.Т.* Физика полупроводников и диэлектриков. - М.: Высш. шк., 1977. - 448 с.
11. *Друзенко Н.В., Куц В.І., Чирко Л.І., Тартачник В.П.* Деградаційні та відновні процеси у зворотно-зміщених фосфідо-галієвих діодах, спричинені швидкими нейтронами реактора // *ВАНТ.* - 2010. - № 1, вип. 4. - С. 112 - 114.
12. *Пронин Б.В., Рыжиков И.В.* Исследование тунельного пробоя и фотоэлектрических свойств p - n -переходов из $Al_xGa_{1-x}As$ и $GaAs_{1-x}P_x$ при обратном смещении // *ФТП.* - 1972. - № 6, вып. 8. - С. 1432 - 1437.

**О. В. Конорева, П. Г. Литовченко, Е. В. Малый, И. В. Петренко,
М. Б. Пинковская, В. П. Тартачник, В. В. Шлапацкая**

ПОВЕРХНОСТНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ ФОСФИД-ГАЛЛИЕВЫХ СВЕТОДИОДОВ

Исследовались микроплазменные пробои красных и зеленых диодов GaP. Обнаружено, что в начале пробоя основной вклад в обратный ток создает туннельная компонента; лавинная составляющая играет основную роль при больших пробойных токах. Спектр микроплазмы рассматривается как результат наложения излучения горячих носителей и рекомбинационного излучения “примесный уровень - валентная зона”. Введение радиационных дефектов электронами с $E = 2$ МеВ способствует уменьшению числа микроплазм.

Ключевые слова: фосфид галлия, светодиод, микроплазма, пробой.

**O. V. Konoreva, P. G. Litovchenko, E. V. Maliy, I. V. Petrenko,
M. B. Pinkovska, V. P. Tartachnyk, V. V. Shlapatska**

SURFACE DISTRIBUTION OF THE EMITTING INTENSITY OF GaP LIGHT-EMITTING DIODES

Microplasma breakdowns of red and green GaP diodes were studied. It has been shown that tunneling was the main component of reverse current at the beginning of the breakdown while an avalanche current prevailed at high breakdown current. Microplasma spectrum is considered to be the result of the overlapping of hot carrier emitting and recombination emitting of impurity level-valence band. 2 MeV electron irradiation leads to the decrease of microplasma number due to the radiation defect creating.

Keywords: gallium phosphide, light emitting diode, microplasma, breakdown.

Надійшла 21.03.2013
Received 21.03.2013