

**В. Г. Воробійов<sup>1</sup>, О. В. Конорева<sup>1</sup>, Є. В. Малий<sup>1</sup>, М. Б. Пінковська<sup>1</sup>,  
В. П. Тартачник<sup>1</sup>, В. В. Шлапацька<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ

<sup>2</sup> ДП «Радма», Інститут фізичної хімії ім. Л. В. Писаржевського НАН України, Київ

## **ВПЛИВ ОПРОМІНЕННЯ ЕЛЕКТРОНАМИ З ЕНЕРГІЄЮ 2 МеВ НА ЗВОРОТНІ СТРУМИ ФОСФІД-ГАЛІЄВИХ СВІТЛОДІОДІВ**

Наведено результати досліджень зворотних електрофізичних характеристик вихідних та опромінених електронами з  $E = 2$  МеВ червоних та зелених фосфід-галієвих світлодіодів. Виявлено, що зворотний струм зумовлений переважно тунелюванням носіїв при  $U_{зв} \leq 9$  В та лавинним множенням при  $U_{зв} \geq 13$  В; у межах  $U = 9 \div 13$  В беруть участь обидва механізми. Зростання струму в області високих напруг ( $U_{зв} > 19$  В) обмежується опором базової частини діода. При значних зворотних струмах ( $I > 1$  мА) опромінення діодів призводить до зсуву зворотних вольт-амперних характеристик у бік більших напруг.

*Ключові слова:* фосфід галію, GaP, світлодіод, опромінення, електрони, вольт-амперні характеристики, зворотний струм, пробій.

### **Вступ**

Генерація світлових потужностей – основна функція світлодіодів. Однак беручи участь у формуванні, обробці та передачі інформаційних потоків, вони можуть піддаватися впливу значних зворотних напруг.

Відомо [1], що в діодах GaP при такому зміщенні виникають мікроплазми – точкові джерела випромінювання широкого спектрального діапазону, які збільшують рівень шумів приладу і можуть бути причетними до формування паразитних сигналів, збоїв у роботі, відмов та хибних спрацьовувань контрольно-регулювальної апаратури [2]. Не меншою загрозою для нормальної роботи електронних модулів та оптоелектронних схем є випадок, коли в результаті сукупної взаємодії численних мікроплазм на вольт-амперні характеристики (ВАХ) виникає різка ділянка лавинного множення носіїв; при цьому струм зростає на декілька порядків і виникає небезпека короткого замикання. При зворотному зміщенні одночасно з лавинним механізмом може також проявлятися вплив тунелювання носіїв, особливо небажаний у високочастотних колах, позаяк середній час розвитку останнього процесу близький до максвеллівського ( $\tau = 10^{-14} \div 10^{-15}$  с).

Важливість дослідження механізмів формування зворотних гілок ВАХ зумовлена також можливістю використання одержаних результатів при конструюванні фотоприймачів, що працюють на основі внутрішнього підсилення струму в області лавинного пробію – лавинних фотодіодів і транзисторів, лавино-пролітних діодів, стабілітронів та ін. [1, 3]. Аналіз відхилень ВАХ від типових залежностей  $I(U)$  дає змогу виявити причини аномалій, розробити засоби неруйнівного впливу на фактори, що сприяють їхньому виникненню, запропонувати способи уніфікації та модифікації характеристик промислових виробів.

Сучасні контрольно-регулювальні пристрої з оптоелектронними розв'язками можуть працювати в полі дії проникного опромінення. Актуальною задачею в цих умовах стає прогнозування їхньої радіаційної стійкості та технологічного використання пучків швидких частинок з метою корекції параметрів приладів у потрібному напрямку.

Головною метою проведених нами досліджень було з'ясування механізмів протікання струмів у світлодіодах GaP при зворотному зміщенні та впливу радіаційних дефектів на формування зворотних гілок ВАХ.

### **Експеримент**

Досліджувались фосфід-галієві зелені GaP(N) та червоні GaP(Zn,O) світлодіоди, виготовлені епітаксійним способом на підкладинці, одержаній із вирощеного методом Чохральського монокристала. Температурна залежність рухливості носіїв струму вихідних та опромінених кристалів визначалась шляхом вимірювання ефекта Холла. Вольт-амперні характеристики знімалися в інтервалі температур  $77 \div 300$  К. Опромінення електронами з  $E = 2$  МеВ проводилось на прискорювачі ИЛУ-6 в імпульсному режимі при температурі, що не перевищувала кімнатної.

### **Результати та обговорення**

Типовий вигляд зворотної гілки ВАХ діода при кімнатній та азотній температурах показано на рис. 1. Охолодження зразка до 77 К призводить до зсуву кривої у бік менших напруг; при цьому на залежності  $I(U)$  виділяється область різкого зростання струму до  $I = -3 \cdot 10^{-2}$  А та пологіша ділянка при більших зміщеннях.

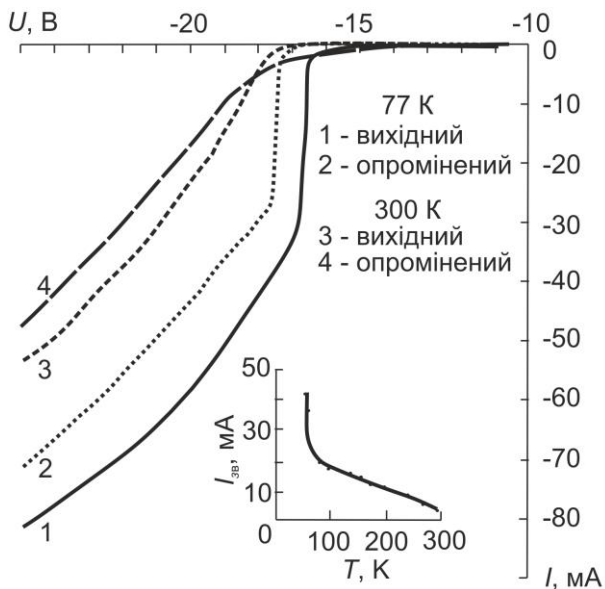


Рис. 1. Зворотні гілки ВАХ вихідного та опроміненого електронами ( $E = 2 \text{ МеВ}$ ,  $\Phi = 8 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ ) червоного GaP-діода при кімнатній та азотній температурах для інтервалу струмів  $I = 0 \div -90 \text{ мА}$ . На вставці показано температурну залежність зворотного струму на ділянці лавинного пробою.

Відомо, що при напрузі  $U_1 > \frac{6E_g}{q}$  основним механізмом пробою є процес лавинного множення носіїв; якщо  $U_2 < \frac{4E_g}{q}$  – протікання струму зумовлюється тунелюванням [4]. Для фосфіду галію ( $E_g^{300\text{K}} = 2,24 \text{ еВ}$ )  $U_1 \approx 13 \text{ В}$ ,  $U_2 \approx 9 \text{ В}$ ; отже, ділянка в межах  $I = 10^{-3} \div 3 \cdot 10^{-2} \text{ А}$  найімовірніше пов'язана із формуванням лавини. Додатковим підтвердженням існування лавинного механізму пробою є як температурний зсув цієї ділянки, так і різке зменшення її величини при 300 К (див. рис. 1, вставка). Коли температура сягає кімнатної, в області лавинного пробою залежність струму через  $p$ - $n$ -перехід від напруги на ньому задається співвідношенням Міллера [1]

$$I = \frac{I_0}{1 - \left(\frac{U}{U_l}\right)^n},$$

де  $U_l$  – напруга лавинного пробою, при якій коефіцієнт множення носіїв  $M = \frac{I}{I_0}$  наближається до нескінченності;  $I_0$  – вхідний струм в область просторового заряду. Числовий показник  $n = 5$  власний електронам,  $n = 3$  – діркам.

Оцінки показують, що коли  $n = 5$ , величина струму  $I$  наприкінці пробійної ділянки становить  $2,58 \cdot 10^{-2} \text{ А}$ ; якщо ж  $n = 3$ , то  $I = 4,24 \cdot 10^{-2} \text{ А}$ .

Отже, пробій у межах  $I \approx 0,1 \div 3 \cdot 10^{-2} \text{ А}$  забезпечується обома видами носіїв, причому електронна компонента переважає. Полога частина кривої  $I_{зв}(U)$  ( $I = 3 \cdot 10^{-2} \div 7 \cdot 10^{-2}$ ) може бути поданою у вигляді лінійної функції  $I = 10^{-2}(-10,54 + 0,61 U)$  із нахилом  $R_6 = 162 \text{ Ом}$ . Виконання закону Ома незаперечно свідчить про вирішальний вплив опору бази на проходження струму.

Опромінення діода електронами з  $E = 2 \text{ МеВ}$ ,  $\Phi = 8 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$  призводить до зсуву кривої  $I_{зв}(U_{зв})$  у бік більших напруг, що значною мірою проявляється в низькотемпературній області (див. рис. 1); в інтервалі  $100 \div 300 \text{ К}$  температурна залежність величини зворотного струму лінійна. У межах  $77 \div 300 \text{ К}$   $I_{зв}$  зменшується лише вдвічі, що зумовлено невеликою дозою опромінення. Тенденція до зменшення величини  $I_{зв}$  внаслідок опромінення, очевидно, є наслідком впливу радіаційних дефектів на рухливість носіїв. Останнє можна простежити на прикладі монокристалічного зразка GaP, опроміненого електронами з  $E = 1 \text{ МеВ}$  (рис. 2). Якщо у вихідному зразку  $\mu(T) \sim T^{-\frac{3}{2}}$ , що відповідає розсіюванню переважно на акустичних фонах, то в опроміненому вирішальний вплив на рухливість створюють дефекти радіаційного походження.

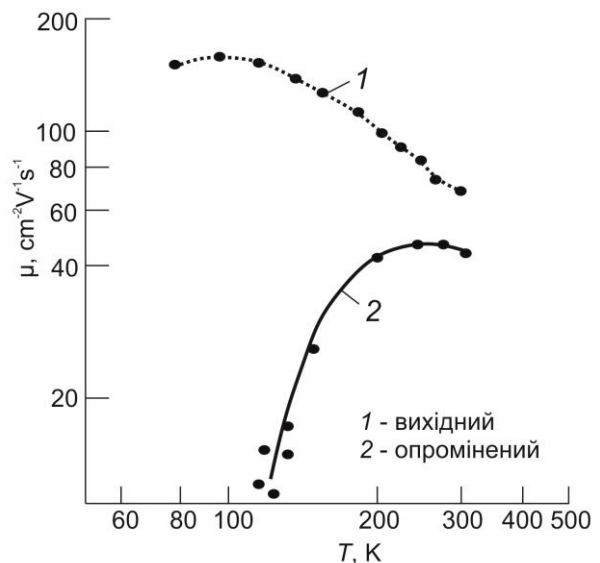


Рис. 2. Залежність рухливості носіїв від температури вихідного та опроміненого зразків GaP.

Важливо відзначити, що переважання лише одного з механізмів пробою – лавинного чи тунельного – на ВАХ не спостерігається. Підтвердженням зробленого висновку можуть служити криві  $I_{зв}(U_{зв})$ , зняті при різних температурах (77 К, 300 К) та у широкому діапазоні струмів і напруг (рис. 3). За напрямком температурного зсуву можна визначати вплив певного механізму на формування ділянки ВАХ. Видно, що залежно

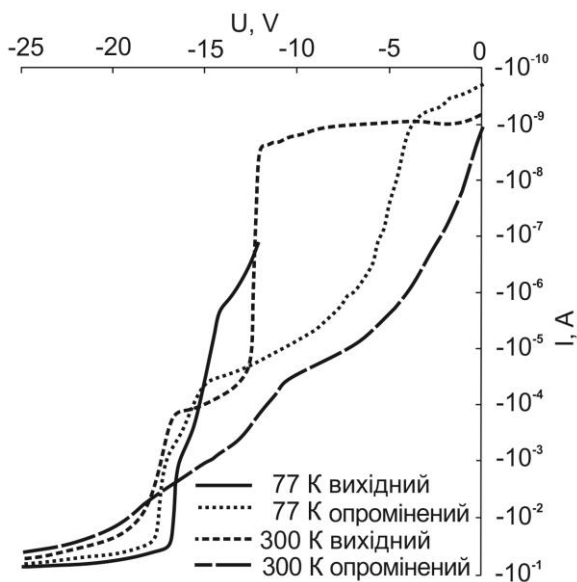


Рис. 3. Зворотні гілки ВАХ вихідного та опроміненого електронами ( $E = 2 \text{ MeV}$ ,  $\Phi = 8 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ ) червоного GaP-діода для кімнатної та азотної температур, зняті в межах  $I = 10^{-10} \div 10^{-1} \text{ A}$ .

від величини струму та напруги може переважати або тунельна, або лавинна складова. Коли вести мову про тунельні струми, слід мати на увазі, що відбувається не зона-зонне тунелювання, а тунельний перехід носіїв із зони дозволених енергій на дефектні стани, можливий лише при збігу рівня носія з положенням рівня дефекту. У нашому випадку фактором, що змінює енергію носія, є зовнішня напруга. Позаяк близько розташованих у забороненій зоні рівнів може бути декілька, то виникають точки перетину ВАХ, що розділяють лавинні та тунельні області.

На рис. 4 показано зворотні ВАХ зелених GaP-світлодіодів, одержані при різних температурах. Їхньою головною особливістю, порівняно із кривими червоних діодів (див. рис. 3), є відсутність пробійних ділянок у низькотемпературній області (майже до  $U = -10 \text{ V}$ , за винятком ВАХ при 300 K), що свідчить про вищий рівень доконалості  $p-n$ -переходу.

Можна припустити, що ізоелектронний атом заміщення  $N_p$  зелених зразків деформує потен-

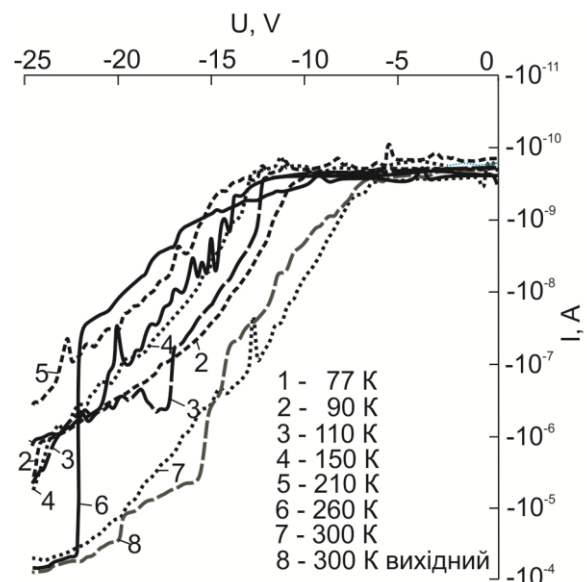


Рис. 4. Зворотні гілки ВАХ зелених світлодіодів GaP, опромінені електронами ( $E = 2 \text{ MeV}$ ,  $\Phi = 8 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ ), зняті при різних температурах в інтервалі  $I = 10^{-10} \div 10^{-4} \text{ A}$ .

ціал ґратки меншою мірою, ніж парне заміщення  $Zn_{Ga}-O_p$  у червоних. При високих рівнях легування, необхідних для забезпечення достатньої величини квантового виходу, імовірно виникнення скупчень пар  $Zn-O$ , здатних як деформувати краї зон, так і виконувати роль локальних центрів тунелювання «зона - дефект - зона».

### Висновки

Виявлено, що на зворотних ВАХ зелених і червоних GaP-світлодіодів існують ділянки тунельного та лавинного пробію. У межах  $I \approx 10^{-1} \div 3 \times 10^{-2} \text{ A}$  протікання струму забезпечується участю обох видів носіїв, причому електронна компонента переважає. При  $I > 3 \cdot 10^{-2} \text{ A}$  основну роль у механізмі протікання струму відіграє опір бази діода; середнє значення цієї величини близьке до  $R_b = 162 \text{ Ом}$ . Опромінення світлодіодів GaP електронами ( $E = 2 \text{ MeV}$ ,  $\Phi = 8 \cdot 10^{14} \text{ e/cm}^2$ ) призводить до зменшення зворотних струмів.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Грехов И.В., Серезжин Ю.Н. Лавинный пробой  $p-n$ -перехода в полупроводниках. - Л.: Энергия, 1980. - 150 с.
2. Гришин Ю.Г., Друзенко Н.В., Конорева О.В. та ін. Електрооптичні властивості вихідних та опроміненіх фосфід-галієвих  $p-n$ -переходів // Металофізика та нанотехнології. - 2008. - Т. 30. - С. 77 - 84.
3. Викулин И.М., Курмашев Ш.Д., Горбаев В.Э., Криськів С.К. Деградація елементів волоконно-оптичних ліній зв'язу при радіаційному облученні // Наукові праці ОНАЗ ім. О. С. Попова. - 2012. - № 1. - С. 57 - 63.
4. Ржевкин К.С. Физические принципы действия полупроводниковых приборов. - М.: Изд-во МГУ, 1986. - 255 с.

**В. Г. Воробьев<sup>1</sup>, О. В. Конорева<sup>1</sup>, Е. В. Малый<sup>1</sup>, М. Б. Пинковская<sup>1</sup>,  
В. П. Тартачник<sup>1</sup>, В. В. Шлапацкая<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев*

<sup>2</sup> *ДП «Радма», Институт физической химии им. Л. В. Писаржевского НАН Украины, Киев*

### **ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОНАМИ С ЭНЕРГИЕЙ 2 МэВ НА ОБРАТНЫЕ ТОКИ ФОСФИД-ГАЛЛИЕВЫХ СВЕТОДИОДОВ**

Приведены результаты исследований обратных электрофизических характеристик исходных и облученных электронами с  $E = 2$  МэВ красных и зеленых фосфид-галлиевых светодиодов. Обнаружено, что обратный ток обусловлен преимущественно туннелированием носителей при  $U_{обр} \leq 9$  В и лавинным множением – при  $U_{обр} \geq 13$  В; в пределах  $U = 9 \div 13$  В принимают участие оба механизма. Возрастание тока в области высоких напряжений ( $U_{обр} > 19$  В) ограничивается сопротивлением базовой части диода. При значительных обратных токах ( $I > 1$  мА) облучение диодов приводит к сдвигу обратных вольт-амперных характеристик в сторону больших напряжений.

*Ключевые слова:* фосфид галлия, GaP, светодиод, облучение, электроны, вольт-амперные характеристики, обратный ток, пробой.

**V. G. Vorobiov<sup>1</sup>, O. V. Konoreva<sup>1</sup>, Ye. V. Malyi<sup>1</sup>, M. B. Pinkovska<sup>1</sup>,  
V. P. Tartachnyk<sup>1</sup>, V. V. Shlapatska<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Institute for Nuclear Research, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv*

<sup>2</sup> *SE "Radma", L.V. Pisarzhevskii Institute of Physical Chemistry, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv*

### **INFLUENCE OF 2 MeV ELECTRONS IRRADIATION ON GALLIUM PHOSPHIDE LIGHT-EMITTING DIODES REVERSE CURRENTS**

Results of reverse electrophysical characteristics study of red and green LEDs, initial and irradiated with 2 MeV electrons were given. It was found that reverse current was predominantly caused by carriers tunneling at  $U_{rev} \leq 9$  V, and by the avalanche multiplication at  $U_{rev} \geq 13$  V, in the range  $U = 9 \div 13$  V both mechanisms are available. Current increase at high voltage areas ( $U_{rev} > 19$  V) is limited by the base resistance of diode. In the case of significant reverse currents ( $I > 1$  mA) irradiation of diodes leads to the shift of reverse current-voltage characteristics into the high voltages direction.

*Keywords:* gallium phosphide, GaP, light-emitting diode, irradiation, electrons, current-voltage characteristics, reverse current, breakdown.

#### REFERENCES

1. *Grehov I.V., Seriozhkin Yu.N.* Avalanche breakdown of the  $p$ - $n$ -junction in semiconductors. - Leningrad: Energiya, 1980. - 150 p. (Rus)
2. *Grishin Yu.G., Druzenko N.V., Konoreva O.V. et al.* Electrooptical properties of initial and irradiated GaP  $p$ - $n$ -junctions // *Metallofizika i nanotekhnologii.* - 2008. - Vol. 30. - P. 77 - 84. (Ukr)
3. *Vikulin I.M., Kurmashev Sh.D., Gorbaev V.E., Kriskiv S.K.* Degradation of the elements of the optical communication under irradiation // *Scientific Papers of Odessa National Academy of Telecommunications (ONAT).* - 2012. - No. 1. - P. 57 - 63. (Rus)
4. *Rzhevkin K.S.* The physical principles of semiconductor devices action. - Moskva: Izdatelstvo MGU, 1986. - P. 255. (Rus)

Надійшла 12.05.2015

Received 12.05.2015