

## ОСОБЛИВОСТІ ВПЛИВУ ПРОНИКНОЇ РАДІАЦІЇ НА ВОЛЬТ-АМПЕРНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРЯМОЗМЩЕНИХ СВІТЛОДІОДІВ GaP

*О.М. Гонтарук, 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, Україна;*

*\*Інститут фізичної хімії ім. Л.В. Писаржевського НАН України, Київ, Україна*

*E-mail: okskon@meta.ua*

Досліджувалися вольт-амперні характеристики (ВАХ) вихідних світлодіодів GaP та опромінених електронами з  $E = 2$  МеВ, швидкими нейтронами реактора ( $E = 2$  МеВ) та  $\alpha^{++}$ -частинками з  $E = 27$  МеВ. Вимірювання проводились у автоматичному режимі в інтервалі температур 77...300 К. На низькотемпературних ВАХ ( $T \leq 90$  К) виявлено  $N$ - та  $S$ -ділянки від'ємного диференційного опору. Зростання прямого струму на низьковольтній ділянці опромінених зразків зумовлене перерозподілом спаду напруг на базі та  $p$ - $n$ -переході. Велике значення швидкості видалення носіїв при  $\alpha^{++}$ -опроміненні пов'язується з високим рівнем іонізації, характерним для такого виду частинок.

### ВСТУП

Світлодіоди на основі широкозонного GaP – перші ефективні некогерентні джерела видимого випромінювання, які одразу знайшли широке застосування, починаючи від космічного приладобудування і завершуючи побутовими пристроями. Основною характеристикою світлодіодної структури є випромінювальна рекомбінація, інтенсивність якої визначається не лише формою зони провідності. У реальних кристалах головним деструктивним фактором, що істотно зменшує квантовий вихід свічення, є наявність різноманітних дефектів ґратки, які здебільшого відіграють роль безвипромінювальних центрів.

Надійність роботи окремого модуля радіоелектронного пристрою, до складу якого входить світлодіод, залежить від стабільності його електричних параметрів – зміна рівня інжекції носіїв через  $p$ - $n$ -перехід спричиняє відхилення від номінального значення інтенсивності свічення діода. Аналіз нетипової поведінки ВАХ дає можливість з'ясувати причини аномалій, розробити методи впливу на джерела і механізми їхнього виникнення [1].

Неконтрольоване опромінення швидкими частинками напівпровідникових матеріалів і приладів, як правило, згубно діє на їхні вихідні показники внаслідок руйнування  $p$ - $n$ -переходу, зменшення провідності базових частин, падіння часу життя неосновних носіїв струму та ін. [2, 3].

У біполярних транзисторах, наприклад, розширення області просторового заряду колектора та емітера призводить до їхнього перекривання; у роботі мікросхем спостерігається ефект «защеплювання» паразитних 4-х шарових структур, які, переходячи в низькоомний стан, подібно тиристорам, провокують виникнення лавинного пробоя в разі потужного джерела живлення. Водночас проникну радіацію можна

використовувати як інструмент для керування властивостями матеріалів та характеристиками приладів [4].

«Поліпшення» параметрів готових виробів може стосуватися зменшення часу життя неосновних носіїв при малих дозах  $\gamma$ - чи електронного опромінення і підвищення швидкодії імпульсних діодів, зниження внутрішніх напруг у міжфазних областях, зменшення поверхневих струмів обтікання та ін. [5–7].

Нижче будуть проаналізовані результати впливу опромінення на ВАХ GaP-світлодіодів; виявлені причини, які зумовлюють зростання струму через  $p$ - $n$ -перехід у зразках, опромінених малими дозами; розглянуті особливості дефектоутворення у випадку бомбардування важкими зарядженими частинками.

### 1. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

Досліджувалися ВАХ червоних GaP (Zn, O) та зелених GaP (N) світлодіодів, вирощених методом подвійної рідинної епітаксії на підкладинці, виготовленій із кристала, одержаного методом Чохральського. Розміри активного елемента діода становили 0,5·0,5 мм<sup>2</sup>. Вимірювання проводилися в інтервалі температур 77...300 К автоматизованим комплексом у режимах генератора струму та генератора напруги. Опромінення електронами з  $E = 2$  МеВ на прискорювачі ІЛУ-6 здійснювалося в імпульсному режимі при температурі, не вищій за кімнатну; скляна лінза діода попередньо видалялася.

Джерело швидких нейтронів – реактор ВВРМ;  $\alpha^{++}$ -частинок з  $E = 27$  МеВ – циклотрон У-120.

### 2. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

На рис. 1 наведено типові ВАХ GaP-світлодіодів, зняті при різних температурах у режимах генератора струму (див. рис. 1,а) та генератора напруги (див. рис. 1,б). Видно, що охолодження зразка до  $T \leq 90$  К призводить до виникнення  $S$ - та  $N$ -подібних ділянок від'ємного диференційного опору (ВДО).

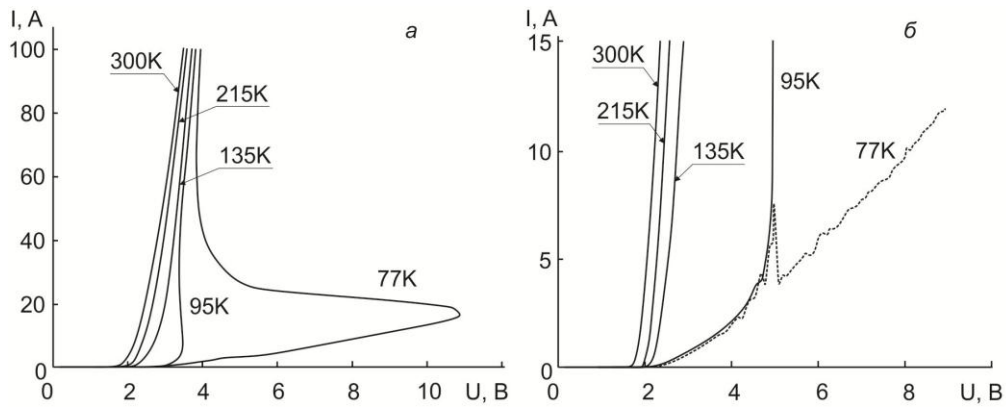


Рис. 1. Вольт-амперні характеристики червоного діода GaP (Zn,O), зняті при різних температурах у режимі: а – генератора струму; б – генератора напруги

Природа подібних відхилень ВАХ від монотонної поведінки розглядалася у роботах [8–11]. З рис. 2 видно, що в межах доз до  $\Phi \approx 10^{15} \text{ см}^{-2}$  та невеликих прямих зміщень ( $U \leq 2 \dots 3 \text{ В}$ ) спостерігається зростання струму, причому точка перетину ВАХ вихідного та опроміненого діода при зростанні дози опромінення зміщується вниз вздовж осі струмів.

Падіння напруги на діоді можна подати у вигляді падіння напруги на базі  $U_{\delta}$  та на  $p-n$ -переході  $U_{p-n}$ . На базі маємо:

$U_{\delta} = \frac{IW\rho}{S}$ , де  $W$  – товщина переходу,  $S$  – його площа,  $\rho$  – питомий опір напівпровідника.

Оскільки  $\rho = \rho_0 e^{k_n \Phi}$ ,  $k_n = \frac{1}{n_0} \left( \frac{dn}{d\Phi} \right)$  –

відносна швидкість видалення носіїв, то знехтувавши зміною їхньої рухливості внаслідок опромінення, одержуємо:

$$U_{\delta} = \frac{IW\rho_0 e^{k_n \Phi}}{S}; \quad (1)$$

$$\frac{dU_{\delta}}{d\Phi} = U_{\delta_0} k_n e^{k_n \Phi}. \quad (2)$$

Отже, опір базової частини приладу при опроміненні зростає експоненційно.

Радіаційну зміну напруги на  $p-n$ -переході одиничної площі наведено в роботі [5]:

$$\frac{dU_{p-n}}{d\Phi} = -\frac{mkT}{q} \left\{ k_n + \frac{1}{2} \frac{\tau_0}{k_{\tau} + \tau_0 \Phi} \right\}, \quad (3)$$

де  $k_{\tau}$  – коефіцієнт пошкодження часу життя носіїв визначається згідно  $\frac{1}{\tau_{\Phi}} = \frac{1}{\tau_0} + \frac{\Phi}{k_{\tau}}$ . Тоді сумарна

зміна напруги на діоді становитиме:

$$\frac{dU}{d\Phi} = IW\rho_0 e^{k_n \Phi} - \frac{mkT}{q} \left\{ k_n + \frac{1}{2} \frac{\tau_0}{k_{\tau} + \tau_0 \Phi} \right\}. \quad (4)$$

При досягненні деякого значення  $\Phi$ , в результаті взаємної компенсації радіаційних змін  $\Delta U_{\delta} = -\Delta U_{p-n}$  опромінений зразок не відрізнятиметься від вихідного, напруга на ньому така ж, як на неопроміненому; оскільки зразки ідентичні – струми через вихідний та опромінений

діоди при цій напрузі будуть рівними. Це означає, що ВАХ вихідного та опроміненого діода повинні перетнутися в точці, координата якої визначається з умови (4)  $\frac{dU}{d\Phi} = 0$ .

$$I_0 = \frac{mkT}{qW\rho_0 k_n} \left\{ k_n + \frac{\tau_0}{2(k_{\tau} + \tau_0 \Phi)} \right\} e^{-k_n \Phi}.$$

Зростання дози опромінення призводить до зменшення  $I_0$ , що співпадає з даними експерименту (рис. 2).

Збільшення прямого струму при опроміненні (див. рис. 2) можна розглядати як «позитивний» ефект впливу радіації, при якому потрібна величина струму досягається при менших напругах.

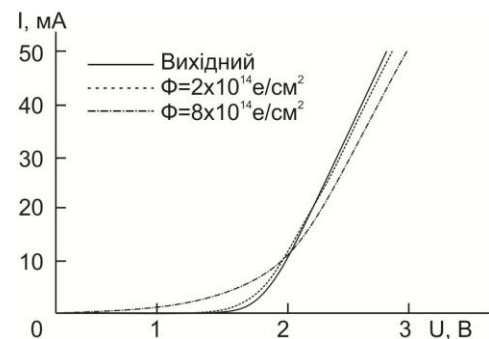


Рис. 2. Вольт-амперні характеристики діода GaP (Zn, O), зняті при температурі  $T = 300 \text{ K}$  до і після опромінення електронами

Як видно, він є наслідком зменшення величини бар'єрного потенціалу  $U_{p-n}$  – при малих дозах опромінення, коли падіння напруги на базі незначне; і переважанням  $U_{\delta}$  над  $U_{p-n}$  – при більших дозах і великих струмах.

Залежність величини струму  $I$ , що протікає через  $p-n$ -перехід від напруги  $U_{p-n}$  описується формулою Шоклі [1]:

$$I = I_S \frac{qU_{p-n}}{e^{mKT-1}}, \quad \text{де } m = 1 \dots 2.$$

$$I_S = \frac{qD_p p_n}{L_p} + \frac{qD_n n_p}{L_n} - \text{струм насичення; решта}$$

позначень – загальнозживані.

Для асиметричного  $p-n$ -переходу ( $\sigma_p \gg \sigma_n$ ):

$$I_S = \frac{q \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}}}{n_n} n_i^2; (n_n \cdot p_p = n_i^2),$$

$n_n = n_0 e^{-k_n \Phi}$ , де  $n_0$  – концентрація носіїв струму у вихідному зразку.

$$I_S = \frac{q \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}}}{n_0 e^{-k_n \Phi}} n_i^2.$$

Враховуючи значно крутішу експериментальну залежність від дози  $n_n(\Phi)$  порівняно з гіперболічною,  $\tau_p(\Phi)$ , можна вважати, що  $I_S(\Phi) = I_S(0) e^{k_n \Phi}$ .

Порівнюючи експериментально виявлене зростання струму насичення опроміненого діода із  $I_S(0)$  для вихідного, можна оцінити величину відносної швидкості видалення носіїв струму при опроміненні, а відтак і значення початкової швидкості видалення носіїв  $\left(\frac{dn}{d\Phi}\right)_{\Phi \rightarrow 0}$  у разі, коли цей важливий параметр складно одержати іншим способом.

Числові значення  $\frac{dn}{d\Phi}$  зразків, опромінені нейтронами реактора та електронами з  $E = 2$  МеВ виявилися близькими  $3 \dots 10 \text{ см}^{-1}$ , проте для  $\alpha^{++}$ -часток вони були майже на три порядки вищими. Висока ефективність дефектоутворення  $\alpha^{++}$ -часток, очевидно, зумовлена впливом іонізаційного чинника, властивого важким зарядженим частинкам, здатного збільшувати ймовірність виходу атома із вузла ґратки в результаті часткового руйнування міжатомних зв'язків.

Для зразків, опромінені нейтронами, простежується також температурна залежність  $\left(\frac{dn}{d\Phi}\right)_{\Phi \rightarrow 0}$ ; при охолодженні вона зростає (рис. 3).

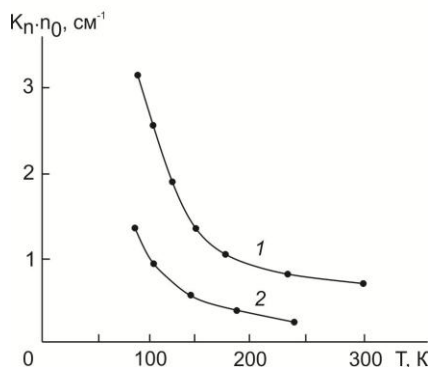


Рис. 3. Температурна залежність коефіцієнта пошкодження носіїв струму для діодів: 1 – GaP(N), 2 – GaP(Zn,O) після нейтронного опромінення,  $\Phi = 4,5 \cdot 10^{16}$  нейтр./см<sup>2</sup>

Подібна тенденція, вочевидь, зумовлена зміщенням рівня Фермі до середини забороненої зони, що активізує вплив акцепторів, уведених радіацією в  $n$ -області, та донорів – у  $p$ -області діода.

## ВИСНОВКИ

Виявлено, що опромінення швидкими частинками світлодіодних структур GaP призводить до зростання прямих струмів в області невеликих доз ( $\Phi \leq 10^{15} \text{ см}^{-2}$ ) та малих прямих зміщень ( $U \leq 2 \dots 3$  В). Показано, що радіаційне «поліпшення» ВАХ зумовлене зменшенням контактного потенціалу  $U_{p-n}$  у результаті часткового вирівнювання рівнів Фермі в базових ділянках діода. Значно більша величина швидкості видалення носіїв, властива  $\alpha^{++}$ -опроміненню, порівняно з нейтронним та електронним, пов'язана з високими рівнями іонізації кристала.

## БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. С. Зи. *Физика полупроводниковых приборов*. М.: «Мир», 1984, 455 с.
2. С.Н. Зайцев. Влияние нейтронов, протонов, электронов и  $\gamma$ -квантов на вольт-амперные характеристики GaP (Zn-Te(S)-N)-светодиодов // *Молодой ученый*. 2012, №12, с. 67-70.
3. И.М. Викулин, Ш.Д. Курмашев, В.Э. Горбаев, С.К. Крисков. Деграация элементов волоконно-оптических линий связи при радиационном облучении // *Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова*. 2012, №1, с. 57-63.
4. Ф.П. Коршунов, Ю.В. Богатырев, С.Б. Ластовский, И.Г. Марченко, Н.Е. Жданович. Радиационные эффекты в технологии полупроводниковых материалов и приборов // *Актуальные проблемы физики твердого тела*. Минск: «Беларусь наука», 2003, 245 с.
5. Ф.П. Коршунов, Г.В. Гатальский, Г.М. Иванов. *Радиационные эффекты в полупроводниковых приборах*. Минск: «Наука и техника», 1978, 232 с.
6. В.В. Болотов, В.А. Коротченко, А.Г. Мамонтов, А.В. Ржанов, Л.С. Смирнов, С.С. Шаймеев. Радиационные эффекты в полупроводниках при малых дозах облучения частицами // *Физика и техника полупроводников*. 1980, т. 14, в. 11, с. 2257-2260.
7. О.Ю. Борковская, С.А. Груша, Н.Л. Дмитрук, А.М. Евстигнеев, Н.А. Клебанова, Р.В. Конакова, А.Н. Крашко, К.А. Исмаилов, И.К. Сенищук, Н.Е. Лисогорский. Структурно-примесное упорядочение под действием малых доз проникающей радиации // *Журнал технической физики*. 1985, т. 55, №10, с. 1977-1982.
8. R.N. Bhargava. Negative resistance in GaP electroluminescent diodes // *Applied Physics Letters*. 1969, v. 14, № 6, p. 193-195.
9. K. Maeda. Double injection in GaP electroluminescent diodes // *Japanese Journal of Applied Physics*. 1970, v. 9, p. 71-80.
10. O. Konoreva, V. Opilat, M. Pinkovska, V. Tartachnyk. Features of current-voltage characteristics inherent to GaP light-emitting diodes with quantum wells // *Semiconductors Physics*,

*Quantum electronics & Optoelectronics*. 2006, v. 9, N 4, p. 45-48.

11. О.В. Конорева, П.Г. Литовченко, В.Я. Опилат, І.В. Петренко, М.Б. Пінковська, В.П. Тартачник. Дія проникаючої радіації на електрофізичні

характеристики світловипромінюючих діодів GaP // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационных и ионно-плазменных технологий»*. 2008, №2, с. 140-144.

*Статья поступила в редакцию 23.02.2015 г.*

## **ОСОБЕННОСТИ ВЛИЯНИЯ ПРОНИКАЮЩЕЙ РАДИАЦИИ НА ВОЛЬТ-АМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРЯМОСМЕЩЕННЫХ СВЕТОДИОДОВ GaP**

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

Исследовались вольт-амперные характеристики (ВАХ) исходных светодиодов GaP и облученных электронами с  $E = 2$  МэВ, быстрыми нейтронами реактора ( $E = 2$  МэВ) и  $\alpha^{++}$ -частичками с  $E = 27$  МэВ. Измерения проводились в автоматическом режиме с интервалом температур 77...300 К. На низкотемпературных ВАХ ( $T \leq 90$  К) обнаружены  $N$ - и  $S$ -области отрицательного дифференциального сопротивления. Рост прямого тока на низковольтном участке облученных образцов вызван перераспределением уменьшения напряжений на базе и  $p$ - $n$ -переходе. Большое значение скорости удаления носителей при  $\alpha^{++}$ -облучении связано с высоким уровнем ионизации, что характерно для такого вида частиц.

## **PECULIARITIES OF IONIZING RADIATION EFFECT ON CURRENT-VOLTAGE CHARACTERISTICS OF FORWARD-BIASED GaP LEDs**

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

The current-voltage characteristics of GaP light emitting diodes (LEDs), irradiated by electrons with  $E = 2$  MeV, fast reactor neutrons ( $E = 2$  MeV) and  $\alpha$ -particles with  $E = 27$  MeV were studied. Measurements were carried out automatically in the temperature range 77...300 K. It was revealed  $N$ - and  $S$ -plot of negative differential resistance in the low-temperature current-voltage curves ( $T \leq 90$  K). The growth of low-voltage direct current of irradiated samples is caused by redistribution of voltage between the diode's base and the  $p$ - $n$ -junction. Great value of the carriers' removal rate for alpha-irradiation is associated with high ionization level of this type of particles.