

О. В. Конорева¹, Є. В. Малий¹, І. В. Петренко¹, М. Б. Пінковська¹,
В. П. Тартачник¹, В. В. Шлапацька²

¹ Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ

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

ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ ТА ОПТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФОСФІДО-ГАЛІЄВИХ ДІОДІВ, ОПРОМІНЕНИХ ЕЛЕКТРОНАМИ З $E = 2$ МеВ

Досліджувалися серійні червоні та зелені фосфід-галієві світлодіоди, опромінені електронами з $E = 2$ МеВ. Вимірювалися вольт-амперні характеристики в інтервалі температур 77 - 300 К. Опромінення проводилося при кімнатній температурі в імпульсному режимі. При низьких температурах ($T < 90$ К) і малих струмах ($I < 10$ мА) окрім описаної в літературі S -подібної нестабільності виявлено додаткову ділянку від'ємного диференційного опору. Наведено детальні спектральні характеристики обох видів діодів, одержані для різних температур та рівнів інжекції, а також залежності інтенсивності свічення від дози опромінення. Представлено результати відновлення інтенсивності електролюмінесценції опромінених зразків у результаті ізохронного відпалу.

Ключові слова: фосфід галію, світлодіод, опромінення, вольт-амперні характеристики.

Вступ

Фосфід галію – широкозонний напівпровідник, на базі якого одержують джерела видимого світла. Головна особливість цього кристала – наявність усіх трьох основних видів рекомбінаційних процесів, в основі яких лежить анігіляція вільних екситонів, екситонів, зв'язаних на ізоелектронних домішках, випромінювання, зумовленого переходами між донорно-акцепторними парами [1, 2].

Наразі всі вони достатньо вивчені. Тому, зважаючи на таку обставину, як кристал, так і прилади, виготовлені з нього, можна вважати модельними об'єктами для дослідження впливу зовнішніх факторів на оптоелектронні характеристики. Надійність, довговічність і простота виготовлення епітаксійних GaP p - n -структур – найважливіші їхні переваги перед високоефективними, але дорогими і складними багатощаровими випромінювачами.

Значного підвищення квантового виходу діодів GaP досягнуто в результаті легування азотом. У такий спосіб знято принципове обмеження для квантового виходу непрямозонного напівпровідника, яке впливало з «ефекту зонної структури». Позитивна роль атома азоту зводиться до локалізації електрона в координатному просторі, що, згідно з невизначеністю Гейзенберга, приводить до делокалізації у просторі імпульсів. Отже, хвильовий вектор електрона може приймати будь-які значення в межах зони Бріллюена; участь фонона в акті випромінювальної рекомбінації перестає бути обов'язковою.

На шляху подальшого підвищення квантового виходу діодів GaP лежить також проблема

зниження концентрації безвипромінювальних рівнів у кристалі, розв'язання якої неможливе без накопичення інформації про властивості структури. Пучки прискорених часток – зручний інструмент для їхнього контрольованого введення, зміни виду та концентрації.

За допомогою проникаючого випромінювання можна коригувати й уніфікувати характеристики приладів; про окремі напрямки такого застосування йтиметься нижче.

Експеримент

Використовувались промислові діоди GaP, основними домішками легування в яких був азот (зелені) та цинк і кисень (червоні). Проводились вимірювання спектрів електролюмінесценції та вольт-амперних характеристик (ВАХ) в інтервалі температур 77 - 300 К автоматизованими комплексами у режимах генератора струму та генератора напруги.

Скляні захисні покриття окремих діодів усувались; виявилось, що зміна оптичного пропускання епоксидних лінз у межах використаних доз неістотна.

Опромінення електронами з $E = 2$ МеВ здійснювалося в імпульсному режимі на прискорювачі ИЛУ-6 зі струмом пучка електронів $I = 4$ мА при кімнатній температурі.

Результати

Виявлено, що при малих дозах опромінення ($\Phi = 10^{14} - 10^{15}$ см⁻²) в області невеликих додатних зміщень діодів (~ до 3 В) прямий струм через p - n -перехід зростає (рис. 1).

© О. В. Конорева, Є. В. Малий, І. В. Петренко, М. Б. Пінковська, В. П. Тартачник, В. В. Шлапацька, 2014

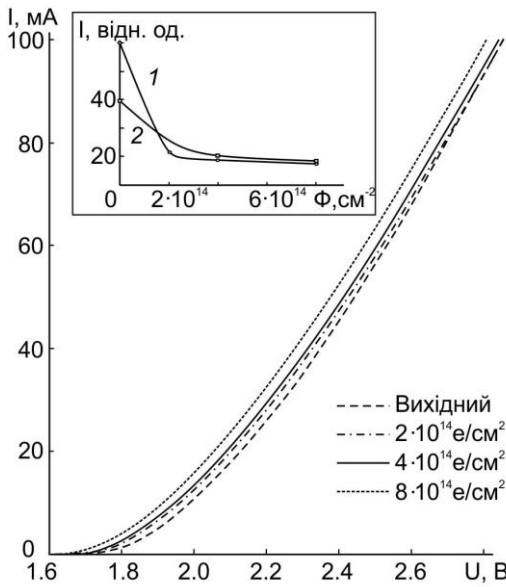


Рис. 1. Зміни прямих ВАХ світлодіода GaP:N при $T = 300$ К після опромінення електронами. На вставці наведено дозові залежності інтенсивності випромінювання двох діодів з різними вихідними значеннями яскравості свічення.

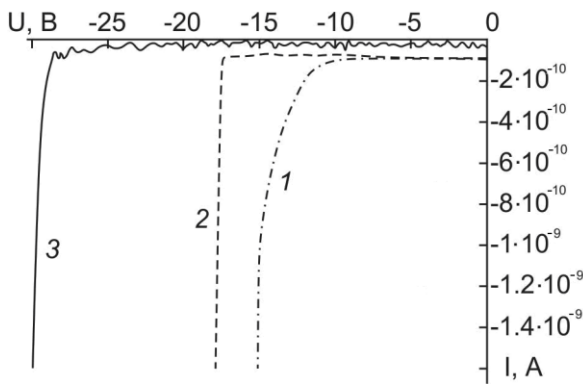


Рис. 2. Зворотні гілки ВАХ світлодіода GaP:N, опроміненого різними дозами: 1 - $8 \cdot 10^{14}$ e/cm²; 2 - $1,2 \cdot 10^{15}$ e/cm²; 3 - $8 \cdot 10^{16}$ e/cm².

Величини зворотних струмів насичення I_s як червоних, так і зелених діодів близькі до 10^{-10} А; електронне опромінення частково стабілізує цю гілку ВАХ, зсовуючи пробійну частину в область

більших від'ємних напруг (рис. 2). Очевидно, що подібне «поліпшення» ВАХ під дією радіації зумовлене падінням рухливості носіїв струму в опромінених зразках, яке приводить до зменшення довжини вільного пробігу [3].

Нестабільності, характерні для більших доз (див. рис. 2, крива 3), породжуються мікроплазмовими пробоями.

Відомо, що у діодах GaP при низьких температурах ($T \leq 90$ К) виникає ділянка від'ємного диференційного опору (ВДО), природа якої обговорювалась у роботах [4 - 6]. Використання прицевійних методик вимірювання ВАХ дало змогу виявити ще одну область нестабільності, розташовану нижче (рис. 3). При $T \leq 90 \div 110$ К у зелених діодах вона не проявляється. За відсутності необхідної інформації про порушення структури у збідненій частині *p-n*-переходу прийти до однозначного висновку щодо механізму її формування поки що складно. Одним із можливих варіантів причин виникнення нестійкості може бути ефект подвійної інжекції носіїв струму у збіднену ділянку переходу. Тоді вихід діода зі стану ВДО при $T \leq 150$ К найімовірніше зумовлений заповненням рекомбінаційного рівня, відповідального за формування від'ємної провідності.

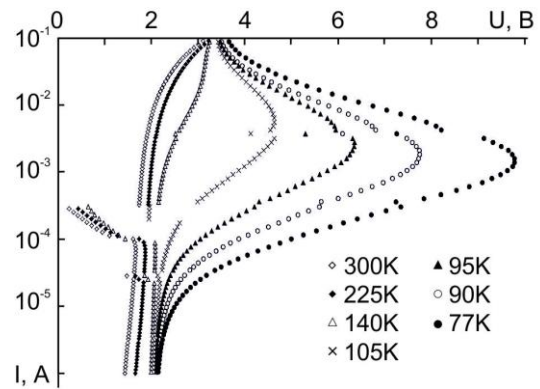


Рис. 3. ВАХ діода GaP:N, виміряні при різних температурах. По вертикальній осі відкладено значення прямого струму.

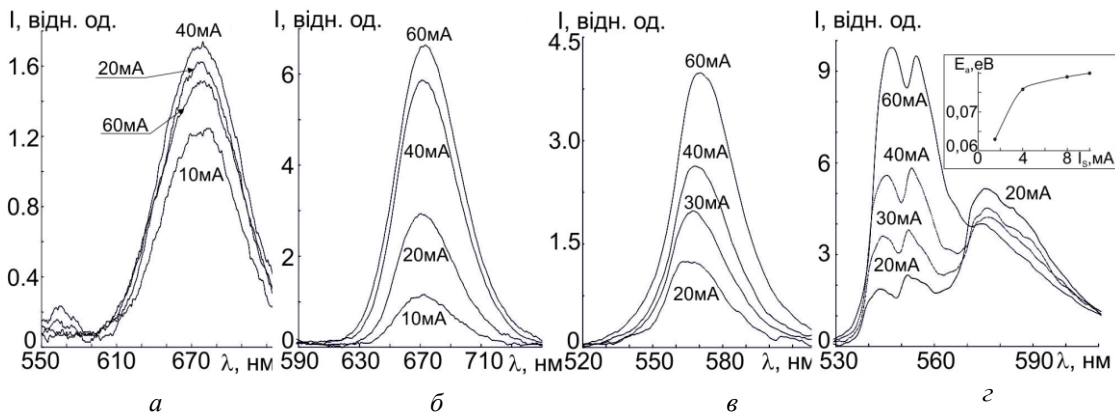


Рис. 4. Спектри електролюмінесценції GaP-світлодіода, легованого цинком і киснем (а - 300 К, б - 77 К) та азотом (в - 300 К, г - 77 К) при різних інтенсивностях збудження. На вставці показано залежність енергії термічної активації основної смуги NN_1 від величини струму через діод.

Спектри електролюмінесценції червоних та зелених зразків показано на рис. 4. Широка безструктурна смуга $\lambda_{\max} = 670$ нм червоних діодів зумовлена рекомбінацією екситона, зв'язаного на парі атомів цинку та кисню, розташованих у сусідніх вузлах ґратки. У спектрі зеленого діода найінтенсивніша лінія екситона, зв'язаного на парі сусідніх атомів азоту, які заміщують фосфор ($\lambda_{\max} = 547$ нм, 77 К). Її енергія активації, одержана з температурних залежностей інтенсивності випромінювання, залежить від рівня збудження (див. рис. 4 з, вставка), що, ймовірно, є наслідком присутності в широкій смузі $\lambda_{\max} = 547$ нм випромінювання пар NN із більшими відстанями і перенесенням рекомбінаційних потоків до ближчих пар, глибина залягання рівнів яких більша (див. рис. 4).

Дозова залежність інтенсивності свічення діода має вигляд кривої з ділянками швидкої та повільної деградації. Очевидно, що перша швидка ділянка пов'язана з руйнуванням екситонів полями радіаційних дефектів; друга може бути результатом впливу процесу накопичення безвипромінювальних рівнів у кристалі.

Відновлення інтенсивності свічення опромінених діодів протікає протягом двох стадій із центрами $T = 140$ °С та $T = 230 - 290$ °С. Основною для червоних діодів є друга стадія, на якій відпалюються вакансії фосфору в p -області переходу [7, 8]. Високотемпературна деградація інтенсивності випромінювання зумовлена порушенням однорідності p -GaP [7].

Висновки

Виявлено «поліпшення» електричних характеристик світлодіодів GaP у межах доз опромінення ($\Phi = 10^{14} - 10^{15}$ см⁻²), яке проявляється у вигляді зростання прямих струмів при малих напругах (\sim до 3 В) та зміщення пробійної гілки ВАХ в область більших напруг. Зростання величини пробійної напруги розглядається як результат зменшення рухливості носіїв струму в опромінених зразках.

При низьких температурах ($T \leq 90$ К) у діодах GaP зафіксовано існування додаткової ділянки ВДО. Висловлюється припущення про можливу участь у її формуванні глибокого рекомбінаційного рівня.

Енергія активації свічення зеленого діода залежить від рівня інжекції, що може бути зумовлено присутністю в основній смузі випромінювання NN₁ компонент із більшими відстанями між домішковими атомами азоту.

Дозову залежність інтенсивності випромінювання можна розглядати як суму двох компонент – швидкої (при малих дозах) та повільної (при більших), причому швидка є результатом руйнування екситонів полями радіаційних дефектів, а повільна – наслідком уведення в кристал рівнів безвипромінювальної рекомбінації.

Відновлення свічення опромінених діодів при ізохронному відпалі двостадійне з центрами стадій, що відповідають відпалу базових областей діода. У червоному зразку, де рекомбінаційні центри зосереджені в p -області, основною є друга стадія відпалу ($T = 230 - 290$ °С), на якій знищують вакансії галію.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Панков Ж. Оптические процессы в полупроводниках. - М.: Мир, 1973. - 455 с.
2. Берг А., Дин П. Светодиоды / Пер. с англ.; Под ред. А. Э. Юновича. - М.: Мир, 1979. - 686 с.
3. Дубовий В.К., Кочкін В.І., Опилат В. Я. та ін. Вплив нейтронного опромінення на зворотні струми фосфідо-галієвих світлодіодів // УФЖ. - 2007. - Т. 52, № 2. - С. 175 - 179.
4. Maeda K. Double injection in GaP electroluminescence diodes // Jap. J. Appl. Phys. - 1970. - Vol. 9, No. 1. - P. 71 - 80.
5. Bhargava R.N. Negative resistence in GaP electroluminescent diodes // Appl. Phys. Lett. - 1969. - Vol. 14, No. 6. - P. 193 - 195.
6. Манжара В.С., Тартачник В.П. Природа від'ємного диференціального опору фосфід-галієвих світлодіодів // УФЖ. - 2001. - Т. 46, № 2. - С. 196 - 200.
7. Браїловський Е.Ю., Конозенко І.Д., Тартачник В.П. Дефекты в GaP, облученном электронами // ФТТ. - 1975. - № 9, вып. 2. - С. 769 - 771.
8. Brailovskiy E.Yu., Makarenko V.G., Konosenko I.D. Introduction and annealing of defects in GaP upon electron irradiation // Lattice Defects in Semiconductors: Materials of International Conference (Germany. 1975).

О. В. Конорева¹, Е. В. Малый¹, И. В. Петренко¹, М. Б. Пинковская¹,
В. П. Тартачник¹, В. В. Шлапацкая²

¹ Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ

² ГП «Радма», Інститут фізическої хімії ім. Л. В. Писаржевського НАН України, Київ

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ И ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФОСФИД-ГАЛЛИЕВЫХ ДИОДОВ, ОБЛУЧЕННЫХ ЭЛЕКТРОНАМИ С $E = 2$ МэВ

Исследовались серийные красные и зеленые фосфид-галлиевые светодиоды, облученные электронами с $E = 2$ МэВ. Измерялись вольт-амперные характеристики в интервале температур 77 - 300 К. Облучение прово-

дилось при комнатной температуре в импульсном режиме. При низких температурах ($T < 90$ К) и малых токах ($I < 10^{-3}$ мА) кроме описанной в литературе S-образной неустойчивости обнаружена дополнительная область отрицательного дифференциального сопротивления. Приведены спектральные характеристики двух видов диодов, полученные при разных температурах и уровнях инжекции, а также зависимости интенсивности свечения от дозы облучения. Представлены результаты возобновления интенсивности электролюминесценции облученных образцов в результате изохронного отжига.

Ключевые слова: фосфид галлия, светодиод, облучение, вольт-амперные характеристики.

O. V. Konoreva¹, E. V. Malij¹, I. V. Petrenko¹, M. B. Pinkovska¹, V. P. Tartachnyk¹, V. V. Shlapatska²

¹ *Institute for Nuclear Research, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv*

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

ELECTRICAL AND OPTICAL CHARACTERISTICS OF GaP DIODES, IRRADIATED WITH 2 MeV ELECTRONS

Serial green and red GaP light emitting diodes were studied. Structures were irradiated at room temperatures with 2 MeV electrons in pulse mode and electrical characteristics were measured at 77 – 300 K. It was observed the new stage of negative differential resistance at low temperature (90 K) and the current ($< 10^3$ mA) interval, additionally to known S-type instability. Luminescence characteristics at different temperatures and injection levels were given for all types' diodes. Dose dependencies of luminescence intensity on electron dose and its restoring after irradiation were also presented.

Keywords: gallium phosphide, light emitting diode, irradiation, voltage-current characteristic.

REFERENCES

1. *Pankow J.* Optical processes in semiconductors. - Moskva: Mir, 1973. - 455 p. (Rus)
2. *Berg A., Dean P.* Light-emitting diodes / Trans. from Eng.; Ed. by A. E. Yunovich. - Moskva: Mir, 1979. - 686 p. (Rus)
3. *Dubovyi V.K., Kochkin V.I., Opylat V. Ya. et al.* // UFZh. - 2007. - Vol. 52, No. 2. - P. 175 - 179. (Ukr)
4. *Maeda K.* Double injection in GaP electroluminescence diodes // Jap. J. Appl. Phys. - 1970. - Vol. 9, No. 1. - P. 71 - 80.
5. *Bhargava R.N.* Negative resistance in GaP electroluminescent diodes // Appl. Phys. Lett. - 1969. - Vol. 14, No. 6. - P. 193 - 195.
6. *Manzhara V.S., Tartachnyk V.P.* // UFZh. - 2001. - Vol. 46, No. 2. - P. 196 - 200. (Ukr)
7. *Brailovs'kyi E.Yu., Konozenko Y.D., Tartachnyk V.P.* // FTT. - 1975. - No. 9, Iss. 2. - P. 769 - 771. (Rus)
8. *Brailovskiy E.Yu., Makarenko V.G., Konosenko I.D.* Introduction and annealing of defects in GaP upon electron irradiation // Lattice Defects in Semiconductors: Materials of International Conference (Germany. 1975).

Надійшла 20.10.2014
Received 20.10.2014