

О. М. Гонтарук, О. В. Конорева, М. В. Литовченко, Є. В. Малий,  
І. В. Петренко, М. Б. Пінковська, В. П. Тартачник

*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

## ОСОБЛИВОСТІ ЕЛЕКТРООПТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СВІТЛОДІОДІВ ФОСФІДУ ГАЛІЮ В УМОВАХ ВИСОКИХ РІВНІВ ІНЖЕКЦІЇ

Досліджувалась електролюмінесценція зелених діодів фосфіду галію, легованих азотом. При низьких температурах ( $T \leq 90$  К), на вольт-амперних характеристиках, виявлено область від'ємного диференційного опору, причиною виникнення якого може бути перерозподіл рекомбінаційного струму між каналами анігіляції на ізолюваних атомах азоту та на парах NN1.

*Ключові слова:* фосфід галію, електролюмінесценція, екситон, від'ємний диференційний опір.

### Вступ

Світлодіодні джерела світла завдяки своїм незаперечним перевагам над випромінювачами інших видів, а саме мініатюрності, швидкодії, високій спектральній чистоті та економічності, є незамінними елементами оптоелектронних ліній зв'язку, засобів відображення інформації, пристроїв керування та ін. Водночас їхні малі розміри накладають обмеження на величину розсіюваної потужності, а відтак і на здатність пропускати потужні імпульси прямого струму.

Використання діода в умовах значних густин струмів зумовлює прискорену деградацію свічення, особливо актуальну для широкозонного фосфіду галію (GaP). Виявляється, що достатньо лише двох актів безвипромінювальної рекомбінації на одному центрі, щоб за час релаксації збудженого атома ( $\sim 10^{-3}$  с) виник дефект Френкеля [1].

Відомо, що у GaP реалізуються різноманітні види механізмів випромінювальної рекомбінації – від міждомішкового до екситонного [2]. Внесок кожного в інтенсивність свічення залежить від струму, і при переході від номінальних величин ( $I = 20$  мА) до вищих рівнів інжекції спектральний склад електролюмінесценції змінюється, що спричиняє небажані відхилення від режиму роботи всього оптоелектронного модуля.

Проблема поліпшення якості приладу разом із підвищенням його експлуатаційного ресурсу пов'язана з наявністю інформації про особливості електрооптичних характеристик діода та даними про механізм їхнього виникнення. Тому, беручи до уваги зазначені вище міркування, автори роботи основну увагу зосередили на розгляді факторів, здатних неконтрольовано змінити режим експлуатації діода при переході до високих рівнів збудження, а також на виявленні причин появи нестабільностей, що різко змінюють спектральний склад свічення.

### Експеримент

Досліджувались зелені діоди GaP, леговані азотом. Вольт-амперні характеристики (ВАХ) знімалися в неперервному та імпульсному режимі в інтервалі температур 77 - 300 К. Спектральний розподіл інтенсивності свічення вимірювався спектрометром BLK-C (F1000-VIS NIR-1) виробництва StellarNet Inc для діапазону 190 - 850 нм у межах  $I = 20 \div 180$  мА.

### Результати

На рис. 1 показано ВАХ зелених діодів GaP, зняті при різних температурах. Видно, що їхнє охолодження до  $\sim 90$  К приводить до виникнення області від'ємного диференційного опору (ВДО), механізм формування якого обговорювався в роботах [3 - 5], проте природу центрів, завдяки яким вона виникає, досі остаточно не виявлено.

У ранній роботі Бхаргави [3] висловлювалась думка, що глибоким рівнем, який діє як рекомбінаційний центр і забезпечує появу S-подібності на ВАХ GaP-діодів, є кисень – основна домішка легування в p-GaP та неконтрольований донор у n-GaP. Пізніше Маєда [4] пов'язав ВДО S-типу в обох видах світлодіодів із подвійною інжекцією носіїв в i-область p-n-структури та її нагріванням (майже до 50 °С).

Обидві точки зору на механізм виникнення ВДО [3, 4] породжують певні сумніви. У разі справедливості першої [3] велика концентрація неконтрольованого домішкового кисню в біляконтактній p-області зеленого діода, де омичний контакт створюється на основі сплаву Zn + In, спричиняла б виникнення бодай незначного червоного свічення, що не зафіксовано в жодній з експериментальних робіт, виконаних на зелених діодах GaP.

© О. М. Гонтарук, О. В. Конорева, М. В. Литовченко, Є. В. Малий, І. В. Петренко, М. Б. Пінковська, В. П. Тартачник, 2015

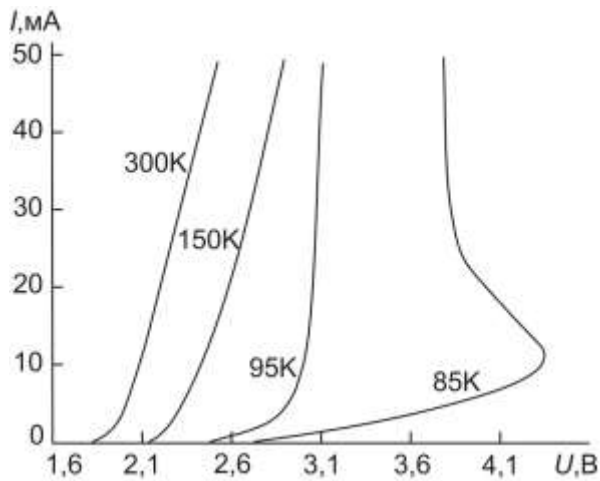


Рис. 1. ВАХ зеленого діода GaP, виміряні при різних температурах (імпульсний режим, генератор струму).

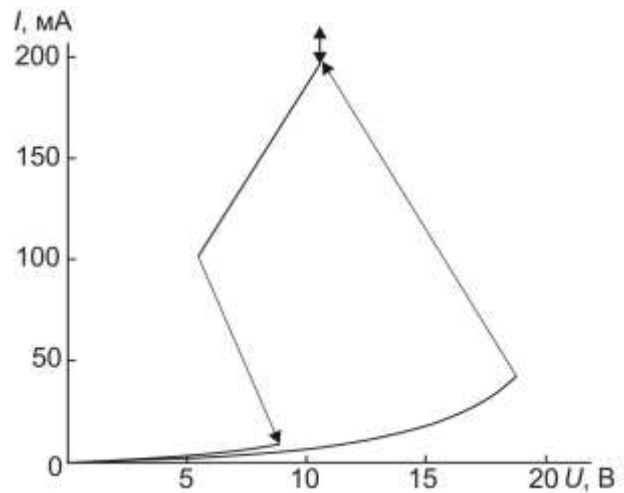


Рис. 2. ВАХ зеленого діода GaP, виміряні в неперервному режимі при температурі 77 K (стрілками показано напрями переходу в низькоомний та високоомний стани).

Якщо посилатись на механізм, запропонований у [4], стає незрозумілим, чому ділянка ВДО не виникає на ВАХ діода, нагрітого до кімнатної температури.

З метою одержання додаткової інформації про причини виникнення ділянки ВДО на ВАХ зеле-

них діодів GaP в області «зриву» струму вимірювання здійснювалися методом неперервної зміни напруги (рис. 2). Область переходу з високоомного в низькоомний стан відповідає ділянці ВДО на характеристиці рис. 1.

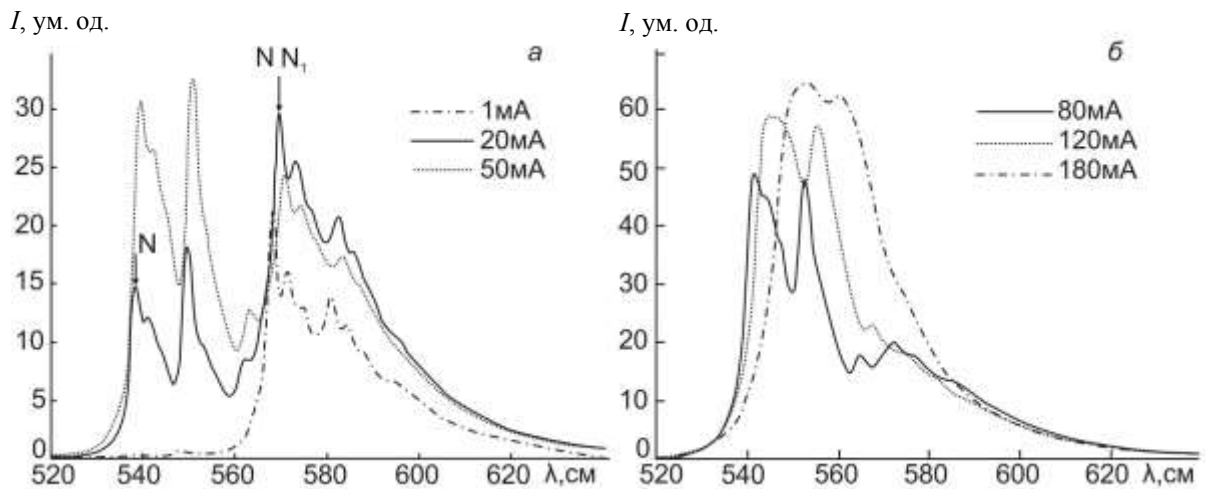


Рис. 3. Спектральний розподіл інтенсивності випромінювання зеленого діода GaP, виміряний при різних струмах ( $T = 77$  K): а – 1, 20, 50 мА; б – 80, 120, 180 мА.

На рис. 3 наведено спектри випромінювання зеленого діода, одержані при різних струмах ( $T = 77$  K). Вони містять лінії випромінювання екситонів, зв'язаних на ізолюваних атомах азоту ( $h\nu = 2,313$  eV), та лінії екситонів, зв'язаних на парах сусідніх атомів N ( $NN_1$ ,  $h\nu = 2,175$  eV), з відповідними фононними репліками. Положення максимумів визначено для номінального струму  $I = 20$  мА. На рис. 3, а перша лінія слабка внаслідок незначної величини струму збудження ( $I = 1$  мА).

Зростання струму до  $I = 20$  мА супроводжується збільшенням інтенсивності обох ліній,

причому швидкість зростання першої переважає; при  $I = 50$  мА їхні інтенсивності стають майже однаковими. Коли ж струм перевищує 80 мА, інтенсивність лінії N вже значно вища, ніж  $NN_1$  (див. рис. 3, б).

Усе це означає, що при  $I = 20$  мА в умовах наростання рівня подвійної інжекції носіїв у  $i$ -область  $p$ - $n$ -переходу частина електронів захоплюється  $NN_1$ -центрами – порівняно з ізолюваними атомами азоту вони розташовані глибше і, очевидно, володіють більшим поперечним перерізом захоплення носіїв. Струм, який у цей час тече через діод, має інжекційно-рекомбінаційну при-

роду й супроводжується анігіляційним випромінюванням екситонів, зв'язаних на  $NN_1$ -парах. Оскільки їхня концентрація у зразку значно менша, аніж концентрація окремих центрів N, збільшення струму через діод (при  $I = 50$  мА) приводить до насичення  $NN_1$ -рекомбінаційного каналу і до зростання інтенсивності лінії N. При цьому опір  $i$ -області зменшується в результаті накопичення в ній носіїв, розвивається ВДО S-типу (див. рис. 2).

Оцінки, проведені нами на основі температурного зміщення лінії N, показали, що при великих струмах ( $I = 180$  мА) температура діода сягає  $\approx 345$  К, що відповідає температурі переходу діода у режим ВДО [6].

## Висновки

Виявлено перерозподіл інтенсивності екситонної рекомбінації між рекомбінаційними каналами, пов'язаними з анігіляцією екситонів на ізольованих атомах азоту та на парах близько розташованих атомів  $NN_1$ . Показано, що зростання струму через  $p$ - $n$ -перехід в області ВАХ, яка відповідає режиму ВДО, приводить до насичення каналу  $NN_1$  та зростання інтенсивності рекомбінації через канал анігіляції екситонів, зв'язаних на атомах N. Такий перерозподіл може бути основним фактором, який зумовлює перехід діода у стан ВДО.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Бржезинський В.А., Шевченко М.В.* Оптоелектроніка. - К.: Віпол, 1995. - 243 с.
2. *Берг А., Дин П.* Светодиоды / Пер. с англ.; Под. ред. А. Э. Юновича. - М.: Мир, 1979. - 686 с.
3. *Bhargava R.N.* Negative resistance in GaP electroluminescent diodes // Appl. Phys. Lett. - 1968. - Vol. 14, No. 6. - P. 193 - 195.
4. *Maeda K.* Double injection in GaP electroluminescent diodes // Jap. J. Appl. Phys. - 1970. - Vol. 9, No. 1. - P. 71 - 80.
5. *Manzhara V.S., Tartachnyk V.P.* Nature of negative differential resistance of GaP light diodes // Ukr. J. Phys. 2001. - Vol. 46, No. 2. - P. 196 - 200.
6. *Konoreva O., Litovchenko P., Opilat V. et al.* Degradation-relaxation processes stimulated by structural defects in green gallium phosphide light-emitting diodes // Ukr. J. Phys. 2006. - Vol. 5, No. 1 - 12. - P. 1119 - 1125.

**А. Н. Гонтарук, О. В. Конорева, М. В. Литовченко, Е. В. Малий,  
И. В. Петренко, М. Б. Пинковская, В. П. Тартачник**

*Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев*

## ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СВЕТОДИОДОВ ФОСФИДА ГАЛИЯ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОГО УРОВНЯ ИНЖЕКЦИИ

Проведено исследование электролюминесценции зеленых диодов фосфида галлия, легированных азотом. При низких температурах ( $T \leq 90$  К), на вольт-амперных характеристиках, обнаружена область отрицательного дифференциального сопротивления, условием возникновения которой может быть перераспределение рекомбинационных потоков между каналами аннигиляции на изолированных атомах азота и аннигиляционным каналом на парах  $NN_1$ .

*Ключевые слова:* фосфид галлия, электролюминесценция, экситон, отрицательное дифференциальное сопротивление.

**O. M. Hontaruk, O. V. Konoreva, M. V. Lytovchenko, E. V. Malyy,  
I. V. Petrenko, M. B. Pinkovska, V. P. Tartachnyk**

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

## PECULIARITIES OF ELECTROOPTICAL CHARACTERISTICS OF GALLIUM PHOSPHIDE LIGHT-EMITTING DIODES IN HIGH INJECTION LEVEL CONDITIONS

Electroluminescence of green N-doped gallium phosphide light-emitting diodes was studied. The negative differential resistance region in the current-voltage characteristics was found at low temperature ( $T \leq 90$  K). Possible reason of this phenomenon is the redistribution of recombinational flows between annihilation channels on isolated nitrogen atoms and annihilation channel on the  $NN_1$  pairs.

*Keywords:* gallium phosphide, electroluminescence, exciton, negative differential resistance.

## REFERENCES

1. *Brzhezyns'kyi V.A., Shevchenko M.V.* Optoelectronics. - Kyiv: Vipol, 1995. - 243 p. (Ukr)
2. *Berg A., Din P.* LEDs / Transl. from English; Ed. A. E. Yunovich. - Moskva: Mir, 1979. - 686 p. (Rus)
3. *Bhargava R.N.* Negative resistance in GaP electroluminescent diodes // Appl. Phys. Lett. - 1968. - Vol. 14, No. 6. - P. 193 - 195.
4. *Maeda K.* Double injection in GaP electroluminescent diodes // Jap. J. Appl. Phys. - 1970. - Vol. 9, No. 1. - P. 71 - 80.
5. *Manzhara V.S., Tartachnyk V.P.* Nature of negative differential resistance of GaP light diodes // Ukr. J. Phys. 2001. - Vol. 46, No. 2. - P. 196 - 200.
6. *Konoreva O., Litovchenko P., Opilat V. et al.* Degradation-relaxation processes stimulated by structural defects in green gallium phosphide light-emitting diodes // Ukr. J. Phys. 2006. - Vol. 5, No. 1 - 12. - P. 1119 - 1125.

Надійшла 19.01.2015

Received 19.01.2015