

О. В. Конорева^{1,*}, П. Г. Литовченко¹, О. І. Радкевич²,
В. М. Попов², В. П. Таргачник¹, В. В. Шлапацька³

¹ Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

² ДП «Науково-дослідний інститут мікроприладів» НТК «Інститут монокристалів» НАН України, Київ, Україна

³ Інститут фізичної хімії імені Л. В. Писаржевського НАН України, Київ, Україна

*Відповідальний автор: okskon@meta.ua

ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВИХІДНИХ ТА ОПРОМІНЕНИХ СВІТЛОДІОДІВ GaAsP

Досліджувалися світлодіоди, вирощені на основі твердих розчинів GaAsP. При низьких температурах $T \leq 130$ К виявлено ділянки від'ємного диференційного опору. Опромінення електронами ($E = 2$ MeV) призводить до зростання диференційного опору діодів, зміни контактної різниці потенціалів та падіння інтенсивності випромінювання. Виявлені ефекти зумовлені впливом глибоких рівнів радіаційних дефектів та поверхневих станів, активізованих високими рівнями іонізаційного збудження, властивого електронному опроміненню.

Ключові слова: GaAsP, світлодіод, від'ємний диференційний опір, вольт-амперні характеристики.

1. Вступ

Удосконалення і розвиток сучасних способів обробки, зберігання та передавання інформації можуть бути забезпеченими лише за наявності високоефективних, швидкісних, стабільних і малогабаритних джерел світла, стійких до дії різноманітних зовнішніх факторів, у тому числі й до впливу ядерного випромінювання [1].

Вивчення механізмів деградаційних процесів у неоднорідних об'єктах, їхнє моделювання шляхом контрольованого введення певного виду порушень структури, розроблення методів корекції характеристик та відновлення параметрів деградованих приладів – напрямки досліджень, де академічна зацікавленість поєднується з вирішенням технічних задач [2, 3].

Світлодіоди GaAsP – випромінювачі видимої області з відносно простою й добре налагодженою технологією епітаксійного вирощування. Вони знайшли широке застосування як в автоматичних системах контролю і зв'язку з віддаленими об'єктами, так і в пристроях керування потужними джерелами енергії, де уникнути присутності полів із підвищеним рівнем радіації неможливо.

Накопичення неосновних носіїв заряду (ННЗ) у квазінейтральній області p - n -переходу при зворотному зміщенні знижує швидкодію діода і збільшує втрати потужності на комутацію. Корекція їхнього часу життя шляхом введення рекомбінаційних рівнів пучками прискорених частинок у поєднанні з наступним відпалом – технологія значно ефективніша і дешевша від легування золотом чи платиною [4, 5].

Слід відзначити, що в результаті зростання щільності пакування модулів мікроелектронної

апаратури загострюється проблема перегрівання приладів, пов'язана з існуванням струмів розтікання, особливо в режимі «сну» [6]. Одним із радикальних способів усунення як поверхневих канальних, так і струмів розтікання по неконтрольованих поверхневих станах є застосування проникного випромінювання [5, 7, 8].

Відтак, враховуючи згадані вище виклики, потреби і задачі, сформульовані розробниками сучасної мікроелектронної техніки, можливості їхнього вирішення засобами ядерно-фізичних технологій, автори проведених досліджень зосередили увагу на вивченні деградаційних процесів у світлодіодах GaAsP, якими супроводжується опромінення швидкими частинками.

Відзначимо також, що в літературі відсутні дані, які стосуються впливу радіаційних дефектів, уведених електронами проміжних енергій ($E = 1\div 3$ MeV) на основні характеристики світлодіодів GaAsP.

Принадно зауважимо, що в діодах GaAsP ділянку від'ємного диференційного опору виявлено й досліджено вперше.

Одержана інформація, з нашого погляду, може бути корисною як при плануванні робочих режимів приладів в умовах жорсткого випромінювання, так і для застосування радіації в ролі технологічного інструмента.

2. Експериментальні вимірювання

Використовувались серійні світлодіоди GaAsP, виготовлені методом рідинної епітаксії на підкладці GaP. Випромінювальні та вольт-амперні характеристики (ВАХ) вимірювались в інтервалі температур $77\div 300$ К.

© О. В. Конорева, П. Г. Литовченко, О. І. Радкевич,
В. М. Попов, В. П. Таргачник, В. В. Шлапацька, 2019

Джерелом швидких електронів ($E = 2 \text{ MeV}$) був імпульсний лінійний прискорювач ИЛУ-6 із середнім струмом 20 mA ; сила струму в імпульсі становила 10^3 A з частотою і тривалістю імпульсів 100 s^{-1} та $2,5 \cdot 10^{-8} \text{ s}$ відповідно. Середня потужність пучка 40 кВт . Опромінення проводилось при кімнатній температурі.

З окремої партії зразків перед опроміненням знімалось захисне покриття; епоксидна лінза зашліфовувалась до мінімально можливої товщини. Вимірювання засвідчили, що пострадіаційне потемніння матеріалу лінз при використаних дозах опромінення не вносить суттєвих змін в інтенсивність вихідного випромінювання. Інтервал застосованих флюенсів становив $(2 \cdot 10^{14} \div 2,64 \cdot 10^{16}) \text{ см}^{-2}$.

Похибки вимірювань електрофізичних характеристик становили $\sim 1 \%$, оптичних $- 0,3 \%$.

3. Результати та обговорення

На рис. 1 наведено прямі ВАХ діодів GaAsP, зняті у режимі генератора струму при різних температурах. Видно, що починаючи з $\sim 135 \text{ K}$ на кривих виникають ділянки від'ємного диференційного опору (ВДО), властиві також діодам GaP; їхня природа обговорювалась у роботі [9]. Зауважимо, що на відміну від діодів GaP у зразках GaAsP N -подібна ділянка ВДО розширена і простягається від $U = 3 \text{ В}$ аж до переходу в область S -подібності, розпадаючись на окремі нестійкості, які добре відтворюються на ВАХ опроміненого зразка.

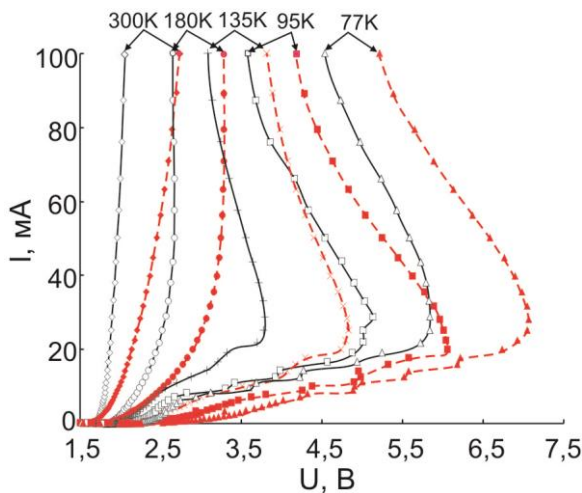


Рис. 1. ВАХ вихідного (суцільна лінія) та опроміненого ($E = 2 \text{ MeV}$, $\Phi = 5,7 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$, пунктирна лінія) помаранчевого діода GaAsP, зняті при різних температурах.

Імовірно, що їхнє походження може бути пов'язане із просторовими флуктуаціями розподілу атомів Ga та P твердого розчину, що призводять до локальної зміни ширини забороненої

зони (E_g), а відтак до можливого зона-зонного та зона-домішкового тунелювання носіїв [10, 11].

Із рис. 1 видно, що опромінення спричиняє зростання диференційного опору як до, так і після перемикавання у режим S -подібного ВДО.

Оцінки, зроблені за ВАХ зразка GaAsP, опроміненого флюенсом $\Phi = 8,24 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$, $T = 77 \text{ K}$, в області напруг, де величина струму обмежується опором бази, показують, що додатне значення диференційного опору $R_{dif}^+ = \frac{dU}{dI}$ становить 162 Ом , після переходу в режим ВДО $R_{dif}^- = 9 \text{ Ом}$; після опромінення $R_{dif}^+ = 428 \text{ Ом}$ та $R_{dif}^- = 32 \text{ Ом}$ відповідно.

В області робочих зміщень при фіксованій напрузі на зразку $U = 2,5 \text{ В}$ дозова залежність прямого струму експоненційна: $I = Ae^{-K\Phi}$, де $A = 8,5 \cdot 10^{-2} \text{ A}$; $K = \frac{1}{I_0} \frac{dI}{d\Phi} = 7 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$, що добре

узгоджується з характером зміни концентрації носіїв струму, характерної для GaP [3] (рухливість носіїв при таких дозах залишається практично незмінною).

У разі протікання великого струму рівняння Шоклі для p - n -переходу перестає бути справедливим унаслідок впливу опору бази R_b . Тоді величина струму через діод

$$I = I_s \left(e^{\frac{q(U_k - IR_b)}{KT}} - 1 \right), \quad (1)$$

де U_k – контактна різниця потенціалів, яка при рівнях легування наших зразків може вважатись близькою до E_g ; I_s – струм насичення.

Якщо струм достатньо великий, то прикладена напруга розподіляється між збідненою областю переходу та опором бази $U_0 = U_k + IR_b$. ВАХ стає лінійною і, екстраполюючи залежність $I(U)$ до нуля, можна оцінити величину E_g .

На рис. 2 наведено ВАХ діода GaAsP, опроміненого різними флюенсами. Значення величини U_k для чотирьох випадків становлять: $U_k^{e_{lux}} = 2,12 \text{ eV}$; $U_k^{\Phi=2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}} = 2,20 \text{ eV}$; $U_k^{\Phi=4,12 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}} = 2,25 \text{ eV}$; $U_k^{\Phi=8,24 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}} = 2,35 \text{ eV}$.

Однією з можливих причин такого аномального зсуву ВАХ у бік вищих напруг може бути зростання при опроміненні відсоткового внеску GaP у розчині GaAsP внаслідок більшого поперечного перерізу розсіяння електронів атомами As порівняно з атомами P ($\sigma_{As} = 47,9 \text{ б}$, $\sigma_P = 30 \text{ б}$ – розрахунок проведений згідно з моделлю МакКінлі - Фешбаха [12]).

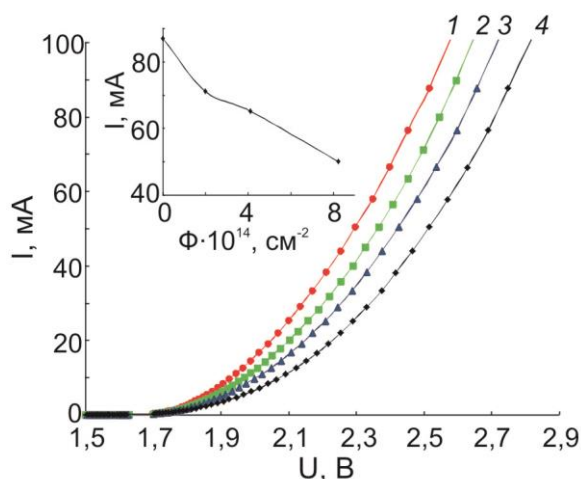


Рис. 2. ВАХ вихідного (I) та опроміненого різними флюенсами ($E = 2$ MeV) помаранчевого діода GaAsP при кімнатній температурі: 2 – $\Phi = 2 \cdot 10^{14}$ cm^{-2} ; 3 – $\Phi = 4,12 \cdot 10^{14}$ cm^{-2} ; 4 – $\Phi = 8,24 \cdot 10^{14}$ cm^{-2} . (На вставці наведено залежність величини струму через зразок від флюенсу електронів при $U = 2,5$ В.)

Проте оцінка кількості зміщених атомів As одним електроном $\bar{v}_{As} = \sigma_{As} n_0 \Phi$ (n_0 – концентрація атомів) показує, що ця величина навіть для чистого GaAs становить лише $\bar{v}_{GaAs} = 2$ cm^{-3} . При $\Phi = 8,2 \cdot 10^{14}$ cm^{-2} середня концентрація зміщених атомів As ($N_{As} \leq 1,64 \cdot 10^{15}$ cm^{-3}) є надто малою і не може відчутно вплинути на значення U_k .

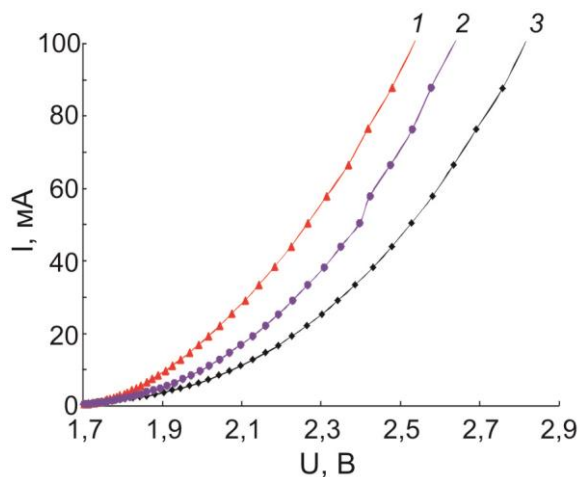


Рис. 3. ВАХ вихідного (I), опроміненого (3) ($E = 2$ MeV, $\Phi = 8,24 \cdot 10^{14}$ cm^{-2}) та відпаленого (2) ($T = 175^\circ\text{C}$) помаранчевого діода GaAsP при кімнатній температурі.

Зростання флюенсу призводить до сповзання точки перетину ВАХ донизу вздовж осі струмів. У кожній із цих точок зменшення падіння напруги на p - n -переході при введенні радіаційних дефектів компенсується її збільшенням на базовій частині приладу.

Водночас при малих флюенсах і високих рівнях збудження вирішальний вплив на характеристики зразка створює механізм допорогового дефектоутворення, в основі якого лежить дія на ґратку через електронну підсистему шляхом формування локальних нерівноважних станів [13]. Якщо об'ємні ефекти починають проявлятися після доз 10^7 рад, то поверхневі – уже при 10^3 рад [14]. Тому видається цілком вірогідним, що спостережувані зміни ВАХ можуть бути пов'язані з перезарядженням поверхневих станів в умовах високих рівнів іонізації та наступною зміною конфігурації дефектів певного виду [15, 16].

Така специфічна реакція кристала на екстремально високий рівень збудження особливо властива неоднорідним об'єктам [17], одним з яких у нашому випадку є зразок, який вирощений на основі твердого розчину і містить p - n -перехід.

Відпал опроміненних діодів при 170°C активізує рух вакансій фосфору [3] і може сприяти частковому відновленню стану P_i у підґратці GaAs (рис. 3).

В області малих струмів (малі струми – нижче точки перетину ВАХ вихідного і опроміненого діодів (рис. 4)) струм опроміненого діода стає більшим за струм вихідного. Додатковий струм, спричинений опроміненням, одержав назву «надлишкового». В окремих випадках різниця між ними може сягати більше двох порядків.

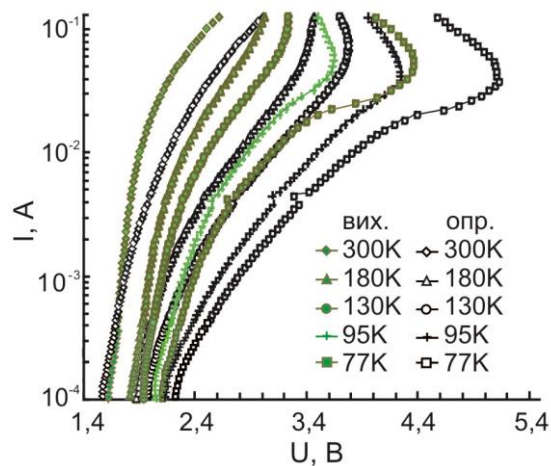


Рис. 4. ВАХ вихідного та опроміненого ($E = 2$ MeV, $\Phi = 2,64 \cdot 10^{16}$ cm^{-2}) помаранчевого діода GaAsP зняті при різних температурах (напівлогарифмічна шкала).

Згідно з [3]

$$\frac{dU_{p-n}}{d\Phi} = -\frac{mkT}{q} \left\{ K_n + \frac{\tau_{p0}}{2(K_1 + \tau_{p0}\Phi)} \right\}, \quad (2)$$

$$\frac{dU_{\sigma}}{d\Phi} = U_{\sigma 0} K_n e^{K_n \Phi}, \quad (3)$$

де $K_n = \left(\frac{dn}{d\Phi}\right) \frac{1}{n_0}$ – відносна швидкість видалення носіїв із зони провідності;

$K_1 = \frac{\tau_0 \tau \Phi}{\tau_0 - \tau}$ – коефіцієнт радіаційної зміни часу життя носіїв заряду, m – коефіцієнт неідеальності діода; k – константа Больцмана, T – абсолютна температура;

q – заряд електрона; τ_0, τ – час життя носіїв; U_{60} – падіння напруги на базі до опромінення.

Порівнюючи вирази (2) та (3), можна одержати значення прямого струму I_0 у точці компенсації. Остаточно I_0 становитиме

$$I_0 = \frac{mkTS}{qW\rho_0 K_n} \left[K_n + \frac{\tau_{p0}}{2(K_1 + \tau_{p0}\Phi)} \right] e^{-K_n\Phi}, \quad (4)$$

де W – ширина бази; S – площа перерізу; ρ_0 – питомий опір бази.

Експоненційна залежність $\rho_0 \sim e^{-\frac{E_a}{kT}}$ у виразі (4) переважає лінійну. Тому, вимірюючи $I_0(T)$, можна зробити оцінку енергії активації рівня, уведеного опроміненням. У нашому випадку ним виявився глибокий рівень з $E_a = 0,59$ еВ.

На рис. 5 наведено спектри помаранчевого діода GaAsP/GaP, зняті при різних температурах. Висока інтенсивність свічення у низькотемпературній області забезпечена легуванням азотом, яке знімає обмеження, накладені законом збереження імпульсу при непрямому переході $\Gamma_c \rightarrow X_v$.

У міру зростання температури ефективність випромінювання швидко зменшується внаслідок іонізації екситона, зв'язаного на азоті. Температурна залежність максимуму спектра дає можливість оцінити температурний коефіцієнт зміни E_g^{GaAsP} . Він виявився рівним $1,85 \cdot 10^{-3}$ еВ/град і близьким як до $\alpha^{GaAs} = 2 \cdot 10^{-3}$ еВ/град, так і до $\alpha^{GaP} = 2,2 \cdot 10^{-3}$ еВ/град [18].

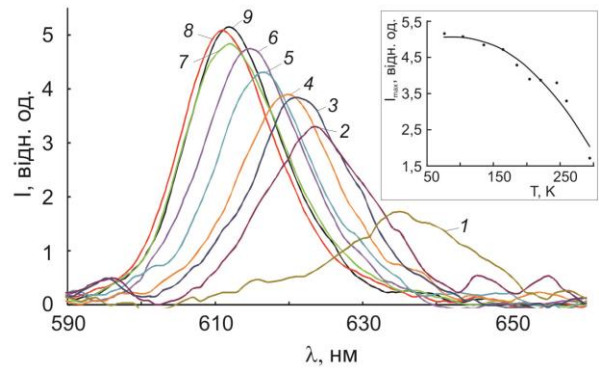


Рис. 5. Спектри випромінювання помаранчевого GaAsP світлодіода, виміряні при різних температурах (К): 1 – 295, 2 – 260, 3 – 220, 4 – 205, 5 – 185, 6 – 165, 7 – 135, 8 – 105, 9 – 77.)На вставці залежність величини максимуму випромінювання від температури.)

Уведення радіаційних дефектів супроводжується монотонним падінням інтенсивності свічення внаслідок уведення у кристал безвипромінювальних рівнів та руйнування полями радіаційних дефектів зв'язаних екситонів.

4. Висновки

В області низьких температур (130÷77 К) виявлено дві ділянки ВДО S- та N-типу. Наявність N-подібних нестійкостей може бути зумовлена існуванням флуктуацій просторового розподілу атомів As та P, завдяки чому виникають локальні зміни ширини забороненої зони кристала, що стають передумовою для формування тунельних зона-зонних чи зона-домішкових струмів.

Дійсно, неоднорідність розподілу дефектів зумовлюють виникнення хвостів густини станів та великомасштабних флуктуацій ширини забороненої зони. При наявності зовнішнього зміщення і локальних звужень ширини забороненої зони ймовірність тунелювання збільшуватиметься.

Радіаційна деградація інтенсивності електролюмінесценції – результат уведення у кристал безвипромінювальних рівнів радіаційних дефектів та руйнування їхніми полями основних центрів свічення – зв'язаних екситонів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. О.Н. Ермаков, А.И. Пихтин, Ю.Ю. Протасов. *Оптоэлектроника* (Москва: Янус-К, 2010) 699 с.
2. В.А. Бржезинский, М.В. Шевченко. *Оптоэлектроника* (К.: Віпол, 1995) 243 с.
3. Ф.П. Коршунов, Г.В. Гатальский, Г.М. Иванов. *Радиационные эффекты в полупроводниковых приборах* (Москва: Наука и техника, 1978) 232 с.
4. Ф.П. Коршунов и др. Влияние отжига радиационных дефектов на характеристики n⁺-р-структур на Si_{1-x}Ge_x:В. В кн.: 7-я Междунар. конф. «Взаимодействие излучений с твердым телом», Минск, Беларусь, 26 - 27 сент. 2007 г., с. 119.
5. Ф.П. Коршунов и др. Радиационные эффекты в технологии полупроводниковых материалов и приборов. В кн.: *Материалы Междунар. науч. конф. «Актуальные проблемы физики твердого тела»*, Минск, Беларусь, 4 - 6 нояб. 2003 г., с. 332.
6. А.И. Белоус, В.А. Солодуха, С.В. Шведов. *Космическая электроника* (Москва: Техносфера, 2015) 488 с.
7. В.В. Козловский, В.А. Козлов, В.Н. Ломасов. Модифицирование полупроводников пучками протонов. *Физика и техника полупроводников* 34 (2000) 129.
8. В.М. Воротынецев, В.Д. Скупов. *Базовые технологии микро- и нанoeлектроники* (Москва: Проспект, 2017) 519 с.

9. G. Gaydar et al. About bond model of S-type negative differential resistance in GaP LEDs. *Superlattices and Microstructures* 104 (2017) 316.
10. Б.И. Шкловский, А.Л. Эфрос. *Электронные свойства легированных полупроводников* (Москва: Наука, 1979) 416 с.
11. Ж. Панков. *Оптические процессы в полупроводниках*. Пер. с англ. Ж.И. Алферова, В.С. Вавилова (Москва: Мир, 1973) 458 с.
12. М. Томпсон. *Дефекты и радиационные повреждения в металлах*. Пер. с англ. В.Е. Юрасовой (Москва: Мир, 1971) 367 с.
13. Г.Л. Мирончук, Г.С. Давидюк, В.В. Божко. Дослідження підпорогових механізмів утворення центрів повільної рекомбінації в спеціально нелегованих і легованих міддю монокристалах сульфїду кадмію. *Нові технології* 20 (2008) 168.
14. В.А. Саакян. Действие различных видов облучения на параметры кремниевых приборов. *Известия НАН Армении: Физика* 43 (2008) 348.
15. А.П. Горшков, С.В. Тихов. *Физика поверхности полупроводников* (Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2013) 101 с.
16. О.В. Снитко. *Физические основы полупроводниковой электроники* (К.: Наук. думка, 1985) 302 с.
17. В.С. Вавилов, А.Е. Кив, О.Р. Ниязова. *Механизмы образования и миграции дефектов в полупроводниках* (Москва: Наука, 1981) 368 с.
18. Ф. Шуберт. *Светодиоды*. Пер. с англ. А.Э. Юнович (Москва: Физматлит, 2008) 496 с.

**О. В. Конорева^{1,*}, П. Г. Литовченко¹, А. И. Радкевич²,
В. М. Попов², В. П. Тартачник¹, В. В. Шлапацкая³**

¹ *Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев, Украина*

² *ГП «Научно-исследовательский институт микроприборов»*

НТК «Институт монокристаллов» НАН Украины, Киев, Украина

³ *Институт физической химии имени Л. В. Писаржевского НАН Украины, Киев, Украина*

*Ответственный автор: okskon@meta.ua

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИСХОДНЫХ И ОБЛУЧЕННЫХ СВЕТОДИОДОВ GaAsP

Исследовались светодиоды, выращенные на основе твердых растворов GaAsP. При низких температурах $T \leq 130$ К выявлены участки отрицательного дифференциального сопротивления. Облучение электронами ($E = 2$ МэВ) приводит к росту дифференциального сопротивления диодов, изменению контактной разницы потенциалов и падению интенсивности излучения. Обнаруженные эффекты обусловлены влиянием глубоких уровней радиационных дефектов и поверхностных состояний, активизированных высокой мощностью ионизирующего возбуждения, свойственного электронному облучению.

Ключевые слова: GaAsP, светодиод, отрицательное дифференциальное сопротивление, вольт-амперные характеристики.

**O. V. Konoreva^{1,*}, P. G. Litovchenko¹, O. I. Radkevych²,
V. M. Popov², V. P. Tartachnyk¹, V. V. Shlapatska³**

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

² *State Enterprise "Scientific Research Institute of Microdevices"*

STC "Institute of Single Crystals", National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

³ *L. V. Pisarzhevsky Institute of Physical Chemistry, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine*

*Corresponding author: okskon@meta.ua

ELECTROPHYSICAL CHARACTERISTICS OF INITIAL AND IRRADIATED GaAsP LEDs STRUCTURES

Light emitting diodes based on gallium arsenide-phosphide solid solutions were studied. Negative differential resistance regions were identified at lower temperatures $T \leq 130$ K. Irradiation of diodes by electrons ($E = 2$ MeV) leads to the increase in the differential resistance, change in the contact potential difference, and a drop in the radiation intensity. These effects are due to the influence of deep radiation defects levels and surface states, activated by high levels of the ionization excitation peculiar to electron irradiation.

Keywords: GaAsP, light emitting diode, negative differential resistance, current-voltage characteristic.

REFERENCES

1. O.N. Ermakov, A.I. Pikhtin, Yu.Yu. Protasov. *Optoelectronics* (Moskva: Janus-K, 2010) 699 p. (Rus)
2. V.A. Brzezinski, M.V. Shevchenko. *Optoelectronics* (Kyiv: Vipol, 1995) 243 p. (Ukr)
3. F.P. Korshunov, G.V. Gatal'sky, G.M. Ivanov. *Radiation Effects in Semiconductor Devices* (Moskva: Nauka i Tekhnika, 1978) 232 p. (Rus)
4. F.P. Korshunov et al. Effect of annealing of radiation defects on the characteristics of n⁺-p-structures on Si_{1-x}Ge_x:B. In: 7-th Intern. Conf. "Interaction of Radiation with a Solid State", Minsk, Belarus, 26 - 27 Sept. 2007, p. 119. (Rus)
5. F.P. Korshunov et al. Radiation effects in the technology of semiconductor materials and devices. In: Proc. of the Intern. Scientific Conf. "Current Problems of Solid State Physics", Minsk, Belarus, 4 - 6 Nov. 2003, p. 332. (Rus)
6. A.I. Belous, V.A. Solodukha, S.V. Shvedov. *Space Electronics* (Moskva: Technosphaera, 2015) 488 p. (Rus)
7. V.V. Kozlovsky, V.A. Kozlov, V.N. Lomasov. Modification of semiconductors by proton beams. *Fizika i Tekhnika Poluprovodnikov* 34 (2000) 129. (Rus)
8. V.M. Vorotyntsev, V.D. Skupov. *Basic Technologies of Micro- and Nanoelectronics* (Moskva: Prospect, 2017) 519 p. (Rus)
9. G. Gaydar et al. About bond model of S-type negative differential resistance in GaP LEDs. *Superlattices and Microstructures* 104 (2017) 316.
10. B.I. Shklovsky, A.L. Efros. *Electronic Properties of Doped Semiconductors* (Moskva: Nauka, 1979) 416 p. (Rus)
11. J. Pankov. *Optical Processes in Semiconductors*. Translated from English by Zh.I. Alferov, V.S. Vavilov (Moskva: Mir, 1973) 458 p. (Rus)
12. M. Thompson. *Defects and Radiation Damage in Metals*. Translated from English by V.E. Yurasova (Moskva: Mir, 1971) 367 p. (Rus)
13. G.L. Myronchuk, G.E. Davydyuk, V.V. Bozhko. Investigation of subthreshold mechanisms for the formation of slow recombination centers in specially non-alloyed and doped by copper the cadmium sulfide single crystals. *Novi Tekhnolohiyi* 20 (2008) 168. (Ukr)
14. V.A. Sahakyan. The effect of various types of radiation on the parameters of silicon devices. *Izvestiya NAN Armenii: Fizika* 43 (2008) 348. (Rus)
15. A.P. Gorshkov, S.V. Tikhov. *Physics of Semiconductor Surface* (Nizhny Novgorod: Nizhny Novgorod State University, 2013) 101 p. (Rus)
16. O.V. Snitko. *Physical Fundamentals of Semiconductor Electronics* (Kyiv: Naukova Dumka, 1985) 302 p. (Rus)
17. V.S. Vavilov, A.E. Kiv, O.R. Niyazov. *Mechanisms of Formation and Migration of Defects in Semiconductors* (Moskva: Nauka, 1981) 368 p. (Rus)
18. F. Schubert. *LEDs*. Translated from English by A.E. Yunovich (Moskva: Fizmatlit, 2008) 496 p. (Rus)

Надійшла 15.03.2019

Received 15.03.2019