

О. І. Власенко¹, В. П. Велешук¹, З. К. Власенко¹, М. П. Киселюк¹, П. Г. Литовченко²,
І. В. Петренко², В. П. Тартачник², М. Б. Пінковська²

¹ Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України, Київ

² Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ

ВПЛИВ НЕЙТРОННОГО ОПРОМІНЕННЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОТУЖНИХ InGaN/GaN СВІТЛОДІОДІВ

Вивчено вплив потоку швидких нейтронів реактора ($E = 2 \text{ MeV}$, $\Phi = 2 \cdot 10^{14} \text{ н/см}^2$) на вольт-амперні та вольт-фарадні характеристики, інтенсивність електролюмінесценції потужних InGaN/GaN світлодіодів на кремнієво-вуглецевій підкладинці та на кремнієвій підкладинці із золото-олов'яним контактом. Виявлено, що величина та знак зміни тунельних струмів після радіаційного опромінення у світловипромінюючих InGaN/GaN гетероструктурах суттєво залежить від підкладинки.

Ключові слова: потужні InGaN/GaN світлодіоди, опромінення, вольт-амперні характеристики.

Вступ

Потоки швидких частинок успішно використовуються як технологічний інструмент для модифікації параметрів готових виробів і з метою одержання матеріалів із заданими характеристиками [1, 2]. Але на сьогодні необхідної інформації про вплив радіації на InGaN/GaN світлодіоди (СД) для розробки методів активної модифікації структури кристала та формування неоднорідностей потрібного виду недостатньо. Ефект впливу малих доз нейтронів на InGaN/GaN СД розглянуто в роботі [3]; дослідження з використанням великих доз ($\Phi = 2 \cdot 10^{16} - 8 \cdot 10^{19} \text{ н/см}^2$) виконані на плівках GaN, вирощених на сапфірі [4 - 6]; деградація InGaN/GaN СД під дією γ -квантів, електронів і нейтронів вивчалась у роботах [1, 2, 7, 8].

Гетероструктури InGaN/AlGaIn/GaN різних потужностей та конструкцій використовуються як індикатори, джерела підсвітки, входять до складу оптоелектронних пристроїв, блоків автоматичного керування ядерних установок, беруть участь у забезпеченні космічного зв'язку. Установлення механізмів впливу радіаційних дефектів на випромінювальну здатність приладів і на їхні вольт-амперні характеристики (ВАХ) особливо актуальне як із погляду можливого поліпшення якості гетероструктур, так і для прогнозування їхньої стійкості.

У роботі вивчено вплив опромінення швидкими нейтронами реактора InGaN/GaN СД та розглянуто механізм впливу порушень радіаційного походження на електричні та люмінесцентні характеристики. Досліджено роль перехідної області «підкладинка - активний шар» у процесі радіаційної деградації СД.

Експеримент та зразки

У роботі вивчено вплив опромінення нейтронами на електричні та люмінесцентні характеристики потужних ($P_{\text{ел}} = 1 \text{ Вт}$, $I_{\text{ном}} = 350 \text{ мА}$) InGaN/GaN світлодіодних структур із площею гетеропереходу 1 мм^2 на кремнієво-вуглецевій підкладинці (SiC) та на кремнієвій підкладинці із золото-олов'яним контактом (AuSn/Si). Колір випромінювання синій ($\lambda_{\text{пик}} = 463 \text{ нм}$). Дані промислові світлодіодні гетероструктури були виготовлені за дещо різними технологіями: одні вироблені на сапфіровій підкладинці, а потім відділені ультрафіолетовим Krf лазером ($\lambda = 248 \text{ нм}$) (LLO – процес [9]) та перенесені на кремнієву підкладинку за допомогою золото-олов'яної (AuSn) евтектики. Густина дислокацій у них $\rho \approx 10^9 \text{ см}^{-2}$. Інші структури вирощені на 6H-SiC підкладинці *n*-типу, і густина дислокацій у них $\rho \approx 10^7 \text{ см}^{-2}$. Гетероструктури містились у стандартному промисловому корпусі із пластмаси та прозорого полімеру.

СД опромінювались швидкими нейтронами реактора ІЯД НАН України (середня енергія $E = 2 \text{ MeV}$, флюєнс $\Phi = 2 \cdot 10^{14} \text{ н/см}^2$). ВАХ вимірювались при постійному струмі, вольт-фарадні характеристики (ВФХ) – на частоті 1 МГц .

Результати

Виявлено, що в досліджуваних InGaN/GaN СД струм на прямій ВАХ після нейтронного опромінення ($\Phi = 2 \cdot 10^{14} \text{ н/см}^2$) зростає у використаному діапазоні напруг зміщення (рис. 1). При цьому тунельна складова струму для структури на SiC підкладинці в діапазоні напруг від 0 до $1,7 \text{ В}$ зросла більш ніж на два порядки (див. рис. 1, б), у структурі на AuSn/Si підкла-

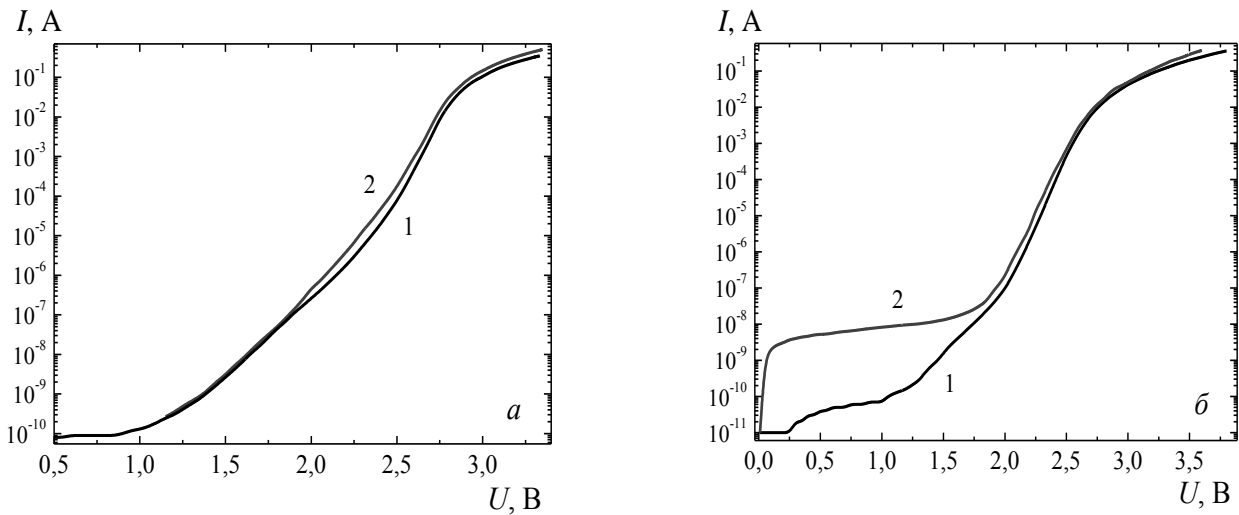


Рис. 1. Прямі ВАХ InGaN/GaN СД на AuSn/Si підкладинці (а) та SiC підкладинці (б) до (1) та після (2) опромінення нейтронами, $\Phi = 2 \cdot 10^{14}$ н/см².

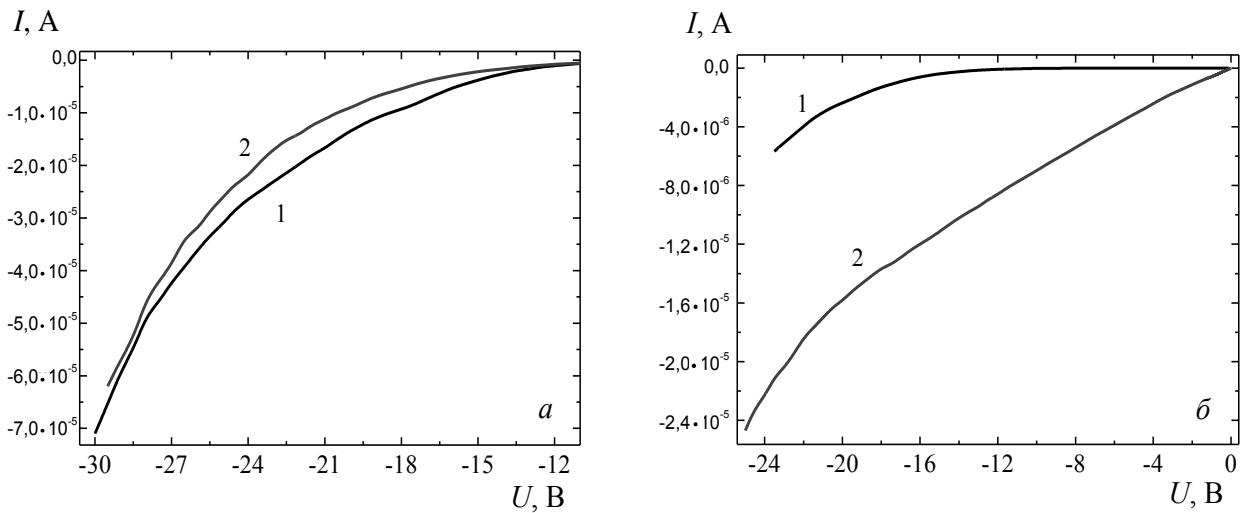


Рис. 2. Зворотні ВАХ InGaN/GaN СД на AuSn/Si підкладинці (а) та SiC підкладинці (б) до (1) та після (2) опромінення нейтронами, $\Phi = 2 \cdot 10^{14}$ н/см².

динці зміни мінімальні (див. рис. 1, а). У цілому характер пострадіаційних змін виявився близьким до відхилень ВАХ, виявлених у роботах [10, 11].

Струм зворотної ВАХ СД на AuSn/Si підкладинці після опромінення нейтронами $\Phi = 2 \times 10^{14}$ н/см² дещо зменшується при всіх напругах (рис. 2, а); водночас у структурі на SiC підкладинці після такої ж дози опромінення він зростає у 5 разів (див. рис. 2, б). До напруги -20 В замість типової експоненційної спостерігається лінійна ділянка, що свідчить про зміну механізму струмопереносу на зворотній ВАХ.

На рис. 3 наведено ВФХ вихідних та опромінених СД нейтронами. Видно, що зміни двох типів СД різні. Для структури на AuSn/Si підкладинці ємність у діапазоні від -3 до 0 В після опромінення дещо зросла, у діапазоні від 0 до 3 В – зменшилась (майже в 2 рази в діапазоні від 2 до 3 В) (а). Ємність структури на SiC підкла-

динці зменшилась, проте форма кривої залишилась незмінною (б). Зазвичай спад ємності свідчить про виникнення каналів протікання струму через дефектні стани у межах області просторового заряду (ОПЗ).

З рис. 4 видно, що інтенсивність електролюмінесценції (ЕЛ) після опромінення діодів, вирощених на AuSn/Si, знизилась на 9 відсотків (спектри 1 та 2). Майже на таку ж величину зменшилась інтенсивність ЕЛ СД на SiC підкладинці (спектри 3 та 4). Тут світловий потік СД становить 21 Лм (спектр 1) та 30,6 Лм (спектр 3), тобто люмінесцентні характеристики СД на SiC підкладинці кращі.

Подібні зміни на ВАХ, ВФХ та спектрах ЕЛ спостерігались нами в результаті опромінення нейтронами ($\Phi = 10^{15}$ н/см²). Для всіх структур протягом семи місяців зберігання при кімнатній температурі на ВАХ виявлено поступову релаксацію струму у бік вихідних значень.

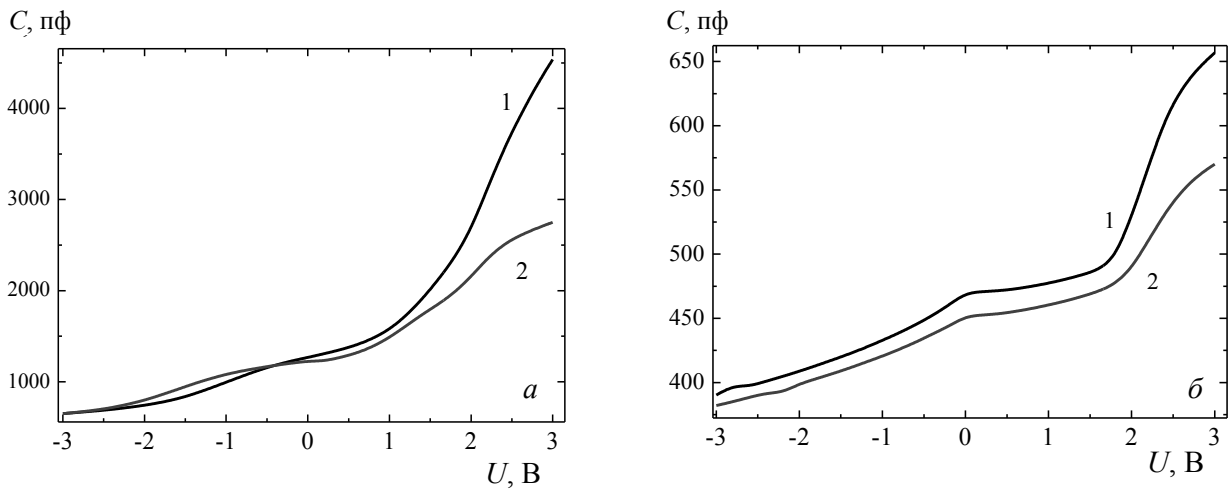


Рис. 3. ВФХ InGaN/GaN СД на AuSn/Si підкладинці (а) та SiC підкладинці (б) до (1) та після (2) опромінення нейтронами, $\Phi = 2 \cdot 10^{14}$ н/см².

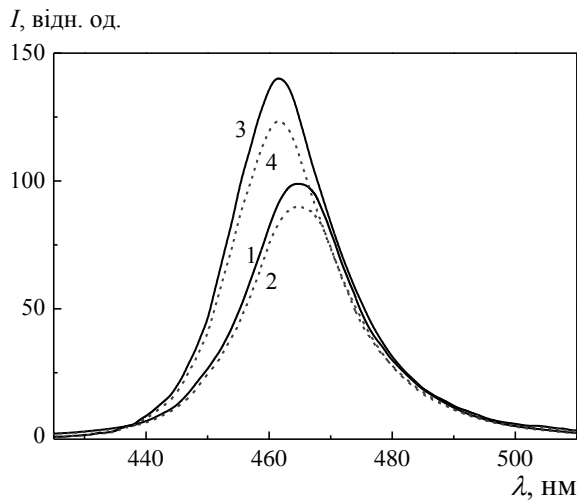


Рис. 4. Спектри електролюмінесценції InGaN/GaN СД на AuSn/Si підкладинці до (1) та після (2) опромінення нейтронами, та на SiC підкладинці до (3) та після (4) опромінення, $\Phi = 2 \cdot 10^{14}$ н/см².

Обговорення

Потік частинок впливає як на епітаксійні плівки GaN [4 - 6] та омичні контакти [12, 13], так і на гетероструктуру СД в цілому [1 - 3, 7, 8], яка містить квантову яму InGaN товщиною 30 Å, блокуючий електрони шар p-AlGaIn та підкладинку AuSn/Si, SiC або Al₂O₃. Їхні границі розділу містять підвищену концентрацію дефектів.

Зменшення струму на зворотній ВАХ СД з AuSn/Si підкладинкою (див. рис. 2, а) узгоджується зі зростанням ємності (див. рис. 3, а) в інтервалі напруг 0 ÷ -3 В.

Одночасне зростання тунельного та інжекційного струму (див. рис.1) не є типовим – зазвичай при радіаційній деградації інжекційний струм (струм після напруги ввімкнення електролюмі-

несценції, $\approx 2,6 \dots 2,7$ В) знижується [1, 3, 8]. Подібне «покращення» прямої ВАХ в області номінального струму автори [10, 11] раніше спостерігали у GaP СД.

Очевидно, що при опроміненні InGaN/GaN структур відбувається часткова модифікація енергетичних станів дефектів технологічного походження на гетерограницях InGaN/GaN, AlGaIn/GaN, які можуть бути центрами тунелювання, захвату і безвипромінювальної рекомбінації й відповідати за тунельну безвипромінювальну компоненту струму [13, 14]. Такі дефекти знижують квантовий вихід та зміщують його максимум в область малих струмів (нижче $I_{ном}$, де інтенсивність ЕЛ є дуже мала). З іншого боку, потрібно врахувати, що випромінювальна рекомбінація в InGaN/GaN структурах може відбуватися на неоднорідностях – областях, збагачених індієм (нанорозмірні локальні «квантові ями») та в областях модуляції зонного потенціалу пружним полем дислокацій, де можлива локалізація електронів та дірок, здатних випромінювально рекомбінувати. При опроміненні швидкими частинками, окрім глибоких рівнів [14], утворюються нові метастабільні дефектні області, які можуть відігравати роль «квантових ям» [10]. Оскільки підвищення величини прямого струму відбувається на всій ділянці ВАХ СД, можна припустити, що зменшення опору плівок відбувається за рахунок механізму модуляції зонного потенціалу в об'ємі.

Неоднакові зміни зворотної ВАХ та тунельного струму до $U = 1,7$ В на прямій ВАХ зумовлені різними технологіями виготовлення гетероструктур. Світлодіодна епітаксійна структура на кремнієвій підкладинці виготовляється за технологією “thin GaN film” [9], після від’єднання від сап-

фірової підкладки ультрафіолетовим лазером вона прикріплюється до кремнієвої підкладки за допомогою AuSn сплаву. У гетероструктурах на SiC підкладці шари GaN одразу вирощуються на SiC підкладці. Тому гетероструктури на кремнієвій підкладці дефектніші ($\rho_{\text{дисл}} \approx 10^9 \text{ см}^{-2}$); будучи розташованими на металевому контакті AuSn, вони є радіаційно стійкішими; СД із SiC підкладкою містять додатковий гетероперехід GaN/SiC. Відтак радіаційне дефектоутворення у SiC підкладці та на гетерограниці GaN/SiC буде значно активніше впливати на їхні ВАХ та ВФХ. На гетерограниці «підкладка - активний шар» області розупорядкування та точкові дефекти створюють систему акцепторних та донорних рівнів, які впливають на струмоперенесення та на опір (про що і свідчить зміна зворотної ВАХ на рис. 2, б).

Можна припустити можливість участі механізму стрибкової провідності, зумовленого деформацією зонного потенціалу кластерами радіаційних дефектів, в ефекті зростання прямого струму ВАХ СД InGaN/GaN (SiC).

Висновки

Виявлено зміни ВАХ, ВФХ та спад інтенсивності ЕЛ у світлодіодних гетероструктурах на SiC та AuSn/Si підкладках після опромінення швидкими нейтронами реактора (середня енергія $E = 2 \text{ MeV}$) при $\Phi = 2 \cdot 10^{14} \text{ н/см}^2$.

У структурі на SiC підкладці струм прямої ВАХ у діапазоні напруг $U = 0 \div 1,7 \text{ В}$ зростає в 10 – 100 разів, а в структурі на AuSn/Si підкладці тунельний струм не змінюється. На зворотній ВАХ СД на SiC підкладці в результаті опромінення струм різко зростає; у структурі на AuSn/Si підкладці – зменшується.

Таким чином, радіаційна стійкість світлопромінюючих InGaN/GaN гетероструктур залежить від підкладки, на якій вони сформовані. СД на SiC підкладці мають кращі електричні та люмінесцентні характеристики, проте нейтронне опромінення призводить до більших змін їхніх характеристик.

Публікація містить результати досліджень, проведених при грантовій підтримці Державного фонду фундаментальних досліджень за конкурсним проектом Ф64/49-2015.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Li C.S. Radiation Effects in III-V Compound Semiconductor Heterostructure Devices. - M.S. thesis, Oregon State University, 2002.
2. Polyakov A.Y., Pearton S.J., Frenzer P. et al. Radiation effects in GaN materials and devices // J. Mater. Chem. C. - 2013. - No. 5. - P. 877 - 887.
3. Kim H.-Y., Kim J., Ren F., Jang S. Effect of neutron irradiation on electrical and optical properties of InGaN/GaN light-emitting diodes // J. Vac. Sci. Technol. B. - 2010. - Vol. 28, No. 27. - P. 3268136.
4. Бойко В.М., Брудный В.Н., Вережкин С.С. и др. Электронные свойства p-GaN(Mg), облученного реакторными нейтронами // ФТП. - 2014. - Т. 48, вып. 7. - С. 885 - 889.
5. Брудный В.Н., Кособуцкий А.В., Колин Н.Г., Корупин А.В. Изменение структурных параметров решетки и электронных спектров пленок n-GaN на сапфире при облучении реакторными нейтронами // ФТП. - 2011. - Т. 45, вып. 4. - С. 461 - 467.
6. Бойко В.М., Вережкин С.С., Колин Н.Г. и др. Влияние нейтронного облучения и температуры отжига на электрофизические свойства и период решетки эпитаксиальных слоев нитрида галлия // ФТП. - 2011. - Т. 45, вып. 1. - С. 136 - 142.
7. Градобоев А.В., Рубанов П.В., Скакова И.М. Деградация светодиодов на основе гетероструктур InGaN/GaN при облучении гамма-квантами // Изв. ВУЗов. Физика. - 2011. - № 1/2 - С. 190 - 194.
8. Гридин В.Н., Рыжиков И.В., Виноградов В.С. Исследование воздействия быстрых нейтронов и электронов на светодиоды с белым и синим цветом свечения // Изв. ВУЗов. Электроника. - 2009. - № 1 (75). - С. 27 - 32.
9. Haerle V., Hahn B., Kaiser S. et al. High brightness LEDs for general lighting applications Using the new ThinGaN™-Technology // Phys. Stat. Sol. (a) - 2004. - Vol. 201, No. 12. - P. 2736 - 2739.
10. Konoreva O., Opilat V., Pinkovska M., Tartachnyk V. Features of current-voltage characteristics inherent to GaP light-emitting diodes with quantum wells // SPQEO. - 2006. - Vol. 9, No. 4. - P. 45 - 48.
11. Коляденко І.В., Литовченко П.Г., Опилат В.Я. та ін. Деградація фосфідо-галієвих світлодіодів, обумовлена радіаційними дефектами // Фізика і хімія твердого тіла. - 2006. - Т. 7, № 1. - С. 184 - 188.
12. Беляев А.Е., Болтовец Н.С., Конакова Р.В. и др. Радиационные повреждения контактных структур с диффузионными барьерами, подвергнутых γ -облучению ^{60}Co // ФТП. - 2010. - Т. 44, вып. 4. - С. 467 - 475.
13. Бочкарева Н.И., Журнов Э.А., Ефремов А.А. и др. Влияние состояний на границах раздела на емкость и эффективность электролюминесценции InGaN/GaN-светодиодов // ФТП. - 2005. - Т. 39, вып. 7. - С. 829 - 833.
14. Соболев М.М., Соболев Н.А., Усиков А.С. и др. Глубокий уровень, образующийся в слоях GaN при облучении протонами // ФТП. - 2002. - Т. 36, вып. 12. - С. 1437 - 1439.

**А. І. Власенко¹, В. П. Велещук¹, З. К. Власенко¹, М. П. Киселюк¹, П. Г. Литовченко²,
І. В. Петренко², В. П. Тартачник², М. Б. Пинковська²**

¹ *Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарева НАН Украины, Киев*

² *Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев*

ВЛИЯНИЕ НЕЙТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ МОЩНЫХ InGaN/GaN СВЕТОДИОДОВ

Изучено влияние потока быстрых нейтронов реактора ($E = 2 \text{ MeV}$, $\Phi = 2 \cdot 10^{14} \text{ н/см}^2$) на вольт-амперные и вольт-фарадные характеристики, интенсивность электролюминесценции мощных InGaN/GaN светодиодов на кремниевое-углеродной подложке и на кремниевой подложке с золото-оловянным контактом. Выявлено, что величина и знак изменения туннельных токов после радиационного облучения в светоизлучающих InGaN/GaN гетероструктурах существенно зависит от подложки.

Ключевые слова: мощные InGaN/GaN светодиоды, облучение, вольт-амперные характеристики.

**A. I. Vlasenko¹, V. P. Veleschuk¹, Z. K. Vlasenko¹, M. P. Kisselyuk¹, P. G. Lytovchenko²,
I. V. Petrenko², V. P. Tartachnyk², M. B. Pinkovska²**

¹ *V. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv*

² *Institute for Nuclear Research, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv*

EFFECT OF NEUTRON IRRADIATION ON CHARACTERISTICS OF POWER InGaN/GaN LIGHT-EMITTING DIODES

Effect of the fast neutron flux reactor ($E = 2 \text{ MeV}$, $\Phi = 2 \cdot 10^{14} \text{ n/cm}^2$) on the current-voltage, capacitance-voltage characteristics, the electroluminescence intensity of power InGaN/GaN LEDs on the SiC and AuSn/Si substrates are studied. It was revealed that radiation hardness of InGaN/GaN heterostructures depend on the substrate.

Keywords: power InGaN/GaN light emitting diode, irradiation, current-volt characteristic.

REFERENCES

1. *Li C.S.* Radiation Effects in III-V Compound Semiconductor Heterostructure Devices. - M.S. thesis, Oregon State University, 2002.
2. *Polyakov A.Y., Pearton S.J., Frenzer P. et al.* Radiation effects in GaN materials and devices // *J. Mater. Chem. C.* - 2013. - No. 5. - P. 877 - 887.
3. *Kim H.-Y., Kim J., Ren F., Jang S.* Effect of neutron irradiation on electrical and optical properties of InGaN/GaN light-emitting diodes // *J. Vac. Sci. Technol. B.* - 2010. - Vol. 28, No. 27. - P. 3268136.
4. *Bojko V.M., Brudnyj V.N., Verevkin S.S. et al.* // *FTP.* - 2014. - Vol. 48, Iss. 7. - P. 885 - 889. (Rus)
5. *Brudnyj V.N., Kosobutskij A.V., Kolin N.G., Korulin A.V.* // *FTP.* - 2011. - Vol. 45, Iss. 4. - P. 461 - 467. (Rus)
6. *Bojko V.M., Verevkin S.S., Kolin N.G. et al.* // *FTP.* - 2011. - Vol. 45, Iss. 1. - P. 136 - 142. (Rus)
7. *Gradoboev A.V., Rubanov P.V., Skakova I.M.* // *Izv. VUZov. Fizika.* - 2011. - No. 1/2 - P. 190 - 194. (Rus)
8. *Gridin V.N., Ryzhikov I.V., Vinogradov V.S.* // *Izv. VUZov. Elektronika.* - 2009. - No. 1 (75). - P. 27 - 32. (Rus)
9. *Haerle V., Hahn B., Kaiser S. et al.* High brightness LEDs for general lighting applications Using the new ThinGaN™-Technology // *Phys. Stat. Sol. (a)* - 2004. - Vol. 201, No. 12. - P. 2736 - 2739.
10. *Konoreva O., Opilat V., Pinkovska M., Tartachnyk V.* Features of current-voltage characteristics inherent to GaP light-emitting diodes with quantum wells // *SPQEO.* - 2006. - Vol. 9, No. 4. - P. 45 - 48.
11. *Kolyadenko I.V., Lytovchenko P.G., Opylat V.Ya. et al.* // *Fizyka i khimiya tverdogo tila.* - 2006. - Vol. 7, No. 1. - P. 184 - 188. (Ukr)
12. *Belyaev A.E., Boltovets N.S., Konakova R.V. et al.* // *FTP.* - 2010. - Vol. 44, Iss. 4. - P. 467 - 475. (Rus)
13. *Bochkareva N.I., Zhirnov E.A., Efremov A.A. et al.* // *FTP.* - 2005. - Vol. 39, Iss. 7. - P. 829 - 833. (Rus)
14. *Sobolev M.M., Sobolev N.A., Usikov A.S. et al.* // *FTP.* - 2002. - Vol. 36, Iss. 12. - P. 1437 - 1439. (Rus)

Надійшла 01.10.2015

Received 01.10.2015