

С. В. Луньов¹, А. І. Зіміч¹, П. Ф. Назарчук¹, В. Т. Маслюк², І. Г. Мегела²¹ Луцький національний технічний університет, Луцьк² Інститут електронної фізики НАН України, Ужгород**ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ РАДІАЦІЙНИХ ДЕФЕКТІВ В ОПРОМІНЕНИХ ВИСОКОЕНЕРГЕТИЧНИМИ ЕЛЕКТРОНАМИ МОНОКРИСТАЛАХ n-Ge**

Досліджено ефект Холла для монокристалів n-Ge, опромінені різними потоками електронів з енергією 10 МеВ. Враховуючи отримані експериментальні результати, знайдено енергетичний спектр рівнів радіаційних дефектів та встановлено їхні основні параметри. На основі розв'язків систем рівнянь електронейтральності показано, що створеним радіаційним дефектам належить лише два глибоких енергетичних рівні ($E_c - 0,27$) еВ та ($E_v + 0,27$) еВ. Незначну зміну енергетичного положення цих рівнів при збільшенні дози опромінення можна пояснити впливом внутрішніх механічних напружень, що виникають у ґратці германію навколо утворених радіаційних дефектів.

Ключові слова: радіаційні дефекти, глибокі рівні, внутрішні напруження, монокристали германію.

Актуальність теми

Опромінення напівпровідників навіть малими дозами радіації через високу чутливості електричних характеристик напівпровідників до появи малої концентрації радіаційних дефектів може викликати істотні змінами параметрів напівпровідникових приладів. У той же час утворення радіаційних дефектів у твердих тілах, особливо в поєднанні з іншими впливами (зі зміною температури, механічного навантаження, електричного поля, освітлення), дозволяє направлено регулювати властивостями твердотільних матеріалів [1, 2].

Перспективним напівпровідниковим матеріалом, який використовується і також може знайти своє нове практичне використання в радіаційних технологіях напівпровідників та напівпровідникових наноструктур, є монокристалічний германій [3 - 6]. Вивчення властивостей наноматеріалів при дії опромінення є важливим щодо створення на основі цих компонент реакторів поділу та синтезу нового покоління (реактори на швидких нейтронах, високотемпературні газові та термоядерні реактори) [7, 8].

Взаємодія заряджених частинок та випромінювання з твердим тілом призводить до виникнення в ньому різного роду радіаційних дефектів (точкові дефекти, комплекси точкових дефектів з домішками, області розвпорядкування) [9]. Обмеженість застосування методу електронного парамагнітного резонансу для германію не дозволяє точно ідентифікувати, як у кремнії, рівні радіаційних дефектів [10]. Спроби розділити дефекти за їхніми інтервалами відпалу часто призводять до непорозумінь, коли декілька радіаційних дефектів відпалюють у тій самій температурній області [11]. Тому в літературі міститься суттєвий розкид даних щодо визначених різними

методами значень енергетичних рівнів радіаційних дефектів германію [11 - 14]. Це аргументує актуальність дослідження природи утворених радіаційних дефектів, їхнього впливу на електричні та оптичні властивості монокристалів германію та створення на основі даного матеріалу різних електронних приладів та сенсорів, робочі характеристики яких можуть зазнавати суттєвих змін при дії радіації.

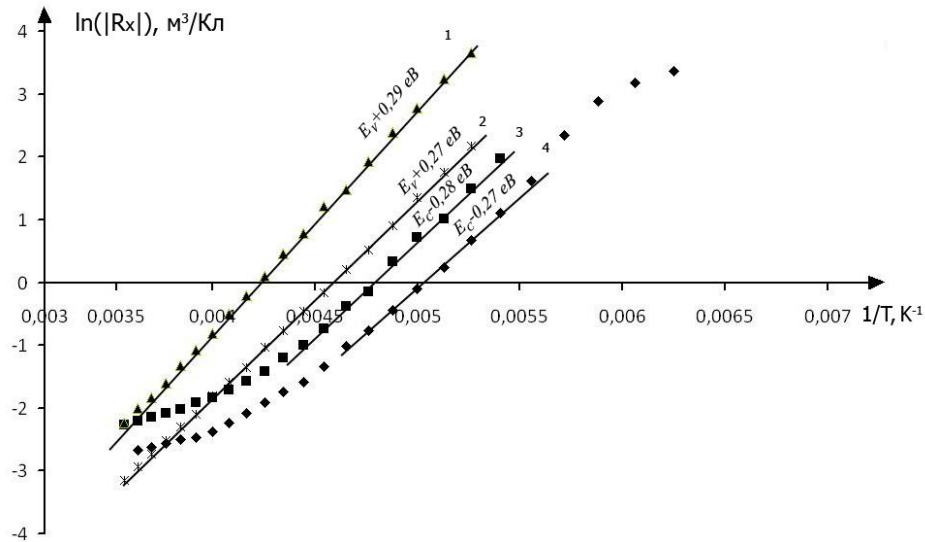
Експериментальні результати

У даній роботі проводилися вимірювання ефекту Холла для опромінені монокристалів n-Ge різними дозами електронів з енергією 10 МеВ. Концентрація легуючої домішки сурми для досліджуваних монокристалів n-Ge становила $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$.

Опромінювання зразків проводилося на мікротроні М-30, параметри якого дозволяють формувати пучки прискорених електронів з енергіями в діапазоні 1 - 25 МеВ із моноенергетичністю 0,02 % та струмом до 50 мкА. В умовах даного експерименту опромінювання проводилося при щільності потоку прискорених електронів $5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ та кімнатній температурі (18 °С). Контроль температури здійснювався *in situ* за допомогою мідь-константової термодари, для якої, як встановлено, параметри є стійкими до тривалої дії радіації. За час опромінювання зміни температури не перевищували $\pm 3 \text{ °С}$ і регулювалися шляхом обдуву повітрям.

На рисунку представлено результати вимірювань температурних залежностей сталої Холла для різних доз електронного опромінення n-Ge. Для доз опромінення $\Phi < 10^{16} \text{ см}^{-2}$ германій не змінював тип провідності, а при $\Phi > 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ конвертував у р-тип.

© С. В. Луньов, А. І. Зіміч, П. Ф. Назарчук, В. Т. Маслюк, І. Г. Мегела, 2016



Температурна залежність сталої Холла $\ln(|R_H|) = f(1/T)$ для опромінених монокристалів n-Ge різними дозами електронів Φ , см^{-2} : 1 – $2 \cdot 10^{16}$; 2 – $5 \cdot 10^{16}$; 3 – 10^{16} ; 4 – $5 \cdot 10^{15}$.

За нахилом кривих залежностей рисунка було визначено енергетичні рівні радіаційних дефектів в n-Ge. Для доз опромінення $\Phi = 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ та $\Phi = 10^{16} \text{ см}^{-2}$ енергетичні рівні практично збіглися (рисунок, енергетичні рівні ($E_c - 0,27$) eV та ($E_c - 0,28$) eV). Також незначна розбіжність у положенні енергетичних рівнів у забороненій зоні германію спостерігається й після n-p конверсії – енергетичні рівні ($E_v + 0,29$) eV та ($E_v + 0,27$) eV).

Як було показано в роботах [15, 16], внутрішні напруження, створені міжвузловими атомами та вакансіями, можуть призводити до зсуву енергетичних рівнів у забороненій зоні і навіть до появи нових станів. При збільшенні дози опромінювання змінюється середня відстань між компонентами пар Френкеля, а отже, і величина самих внутрішніх напружень [16].

Тому можна вважати, що для нашого випадку при електронному опроміненні германію в забороненій зоні виникає лише два різних енергетичних рівні, положення яких може змінюватись залежно від величини внутрішніх напружень у ґратці германію. У роботах [10, 17] показано, що в германії енергетичний рівень ($E_c - 0,27$) eV належить до А-центру, а ($E_v + 0,27$) eV – до вакансії. Такі дефекти можуть модифіковуватись різними фоновими домішками, однією з яких є кисень [10].

Розрахунок концентрації та енергетичних рівнів радіаційних дефектів в опроміненому електронами n-Ge

Для інтерпретації отриманих експериментальних результатів нами на основі статистики не-

виродженого електронного та діркового газу в напівпровідниках проводили теоретичні розрахунки енергетичного спектра радіаційних дефектів в опроміненому електронами n-Ge.

Нехай у германії з концентрацією донорної домішки N_d створюються радіаційні дефекти з концентрацією N і кожному такому дефекту належить L акцепторних рівнів. Розглянемо спочатку випадок, коли при опроміненні германій не конвертує в р-тип. Тоді при температурі абсолютного нуля будуть заповнені всі рівні дефектів і частина донорних рівнів. Для температур, коли мілкі донори повністю іонізовані, а верхній енергетичний рівень радіаційних дефектів частково, можна записати рівняння електронейтральності

$$N(L - 1) + n_a + n = N_d, \tag{1}$$

де n_a – концентрація електронів на найвищому за шкалою енергій акцепторному рівні; n – концентрація електронів у зоні провідності. Враховуючи вирази для відповідних концентрацій [18]

$$n_a = \frac{N}{2e^{\frac{E_a - F}{kT}} + 1}, \quad n = N_c e^{\frac{F}{kT}}, \tag{2}$$

рівняння (1) можна записати як

$$N(L - 1) + \frac{N}{1 + \frac{2N_c}{n} e^{\frac{E_a}{kT}}} + n = N_d, \tag{3}$$

$N_c = \frac{(2m_n kT)^{3/2}}{4\pi^3 \hbar^3}$ – ефективна густина станів зони провідності; F – енергія Фермі. У рівняння (3)

входять три невідомих параметри радіаційних дефектів: N – концентрація радіаційних дефектів; L – число акцепторних рівнів, які належать кожному такому дефекту; E_a – енергія іонізації найвищого за шкалою енергій акцепторного рівня. Для обчислення даних параметрів запишемо рівняння (3) для трьох різних значень концентрації електронів. У результаті отримаємо таку систему рівнянь:

$$\left\{ \begin{aligned} N(L-1) + \frac{N}{1 + \frac{2N_c(T_1) e^{\frac{E_a}{kT_1}}}{n_1}} + n_1 &= N_d, \\ N(L-1) + \frac{N}{1 + \frac{2N_c(T_2) e^{\frac{E_a}{kT_2}}}{n_2}} + n_2 &= N_d, \\ N(L-1) + \frac{N}{1 + \frac{2N_c(T_3) e^{\frac{E_a}{kT_3}}}{n_3}} + n_3 &= N_d. \end{aligned} \right. \quad (4)$$

Враховуючи значення ефективної маси густини станів для електронів, концентрацію домішки сурми $N_d = 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ та експериментальні значення концентрацій електронів, n_1, n_2, n_3 для відповідних температур T_1, T_2, T_3 (див. рисунок, криві 3 і 4), можна знайти зазначені вище параметри радіаційних дефектів для опромінених монокристалів n-Ge різними дозами електронів. Результати даних розрахунків наведено в табл. 1.

Таблиця 1. Параметри радіаційних дефектів в опромінену електронами n-Ge до n-p конверсії

Доза електронного опромінення $\Phi, \text{ см}^{-2}$	$N, \text{ см}^{-3}$	L	$E_a, \text{ еВ}$
$5 \cdot 10^{15}$	$2,8 \cdot 10^{14}$	1,96	$E_c - 0,27$
10^{16}	$3,1 \cdot 10^{14}$	1,97	$E_c - 0,275$

Як видно з табл. 1, параметр L дуже близький до 2, що підтверджує наше припущення щодо існування в забороненій зоні германію лише двох енергетичних рівнів радіаційних дефектів ($E_c - 0,27$) еВ та ($E_v + 0,27$) еВ. Незначне зміщення рівня ($E_c - 0,27$) еВ при збільшенні дози опромінення n-Ge від $5 \cdot 10^{15}$ до 10^{16} см^{-2} можна пояснити зміною величини внутрішніх механічних напружень у ґратці германію.

Після n-p конверсії енергетичний рівень ($E_c - 0,27$) еВ, що належить А-центру, буде повністю вільний від електронів, а рівень ($E_v + 0,27$) еВ частково заповненим. Для даного

випадку рівняння електронейтральності має вигляд

$$N_d + p = n_a, \quad (5)$$

$$p = N_v e^{\frac{-E_g - F}{kT}}, \quad (6)$$

де p – концентрація дірок у валентній зоні; E_g – ширина забороненої зони германію; $N_v = \frac{(2m_p kT)^{3/2}}{4\pi^3 \hbar^3}$ – ефективна густина станів валентної зони, $m_p = 0,3m_0$ – ефективна маса густини станів для дірок. Враховуючи вираз (6),

$$N_d + p = \frac{N}{1 + 2 \frac{p e^{\frac{E_g}{kT}} e^{\frac{E_a}{kT}}}{N_v}}. \quad (7)$$

Для визначення концентрації радіаційних дефектів та енергії іонізації акцепторного рівня E_a запишемо рівняння (7) для концентрацій дірок p_1 та p_2 при температурах T_1 і T_2 відповідно.

$$\left\{ \begin{aligned} N_d + p_1 &= \frac{N}{1 + 2 \frac{p_1 e^{\frac{E_g}{kT_1}} e^{\frac{E_a}{kT_1}}}{N_v(T_1)}}, \\ N_d + p_2 &= \frac{N}{1 + 2 \frac{p_2 e^{\frac{E_g}{kT_2}} e^{\frac{E_a}{kT_2}}}{N_v(T_2)}}. \end{aligned} \right. \quad (8)$$

Результати розрахунків для опромінених електронами монокристалів n-Ge дозами $\Phi = 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ та $\Phi = 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ наведено в табл. 2.

Таблиця 2. Параметри радіаційних дефектів в опромінену електронами n-Ge після n-p конверсії

Доза електронного опромінення $\Phi, \text{ см}^{-2}$	$N, \text{ см}^{-3}$	$E_a, \text{ еВ}$
$2 \cdot 10^{16}$	$4,2 \cdot 10^{15}$	$E_v + 0,29$
$5 \cdot 10^{16}$	$5,1 \cdot 10^{15}$	$E_v + 0,27$

Як видно з табл. 2, енергетичний рівень вакансії ($E_v + 0,27$) еВ, як і енергетичний рівень А-центра, зазнає деякого зміщення за шкалою енергій при варіації дози опромінення, що може бути пов'язано зі зміною величини внутрішніх деформаційних полів навколо утворених радіаційних дефектів.

Висновки

Використовуючи лише статистику невідродженого електронного і діркового газу та результатів експериментальних вимірювань ефекту Холла на основі розв'язків систем рівнянь електронейтральності було обчислено енергетичний спектр радіаційних дефектів в опромінену електронами n-Ge та встановлено їхні основні параметри. З аналізу одержаних експериментальних результатів і проведених теоретичних розрахунків можна припустити, що положення енергетичних рівнів утворених радіаційних дефектів може дещо змінюватись залежно від величини внутрішніх механічних напружень, які виникають у ґратці германію в результаті опромінювання. Значне зростання сталої Холла при зменшенні температури, а отже, й однієї з таких важливих характеристик датчиків Холла, як поріг

чутливості, у результаті електронного опромінення, по відношенню до неопроміненних монокристалів n-Ge, може знайти своє практичне використання для створення на основі германію високочутливих датчиків Холла. Робочі характеристики таких датчиків залежатимуть від температури оточуючого середовища. Унікальні властивості наноматеріалів роблять їх досить перспективними для застосування в наноелектроніці, космосі, ядерній енергетиці [19 - 21]. Однак вивчення закономірностей зміни властивостей таких матеріалів під дією радіаційних впливів зараз тільки починається. Тому знайдені параметри радіаційних дефектів в опромінену електронами n-Ge можуть бути використанні для моделювання впливу радіаційного опромінення на властивості наноструктур на основі германію.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Кошкин В.М., Воловичев Н.В., Гуревич Ю.Г. и др. Материалы и устройства с гигантским радиационным ресурсом // Материалы сцинтилляционной техники. - Харьков: Ин-т монокристаллов, 2006. - С. 60.
2. Вопросы радиационной технологии полупроводников / Под ред. Л. С. Смирнова. - Новосибирск: Наука, 1980. - С. 291.
3. Claes C., Simoen E. Germanium-Based Technologies: From Materials to Devices. - Elsevier Science, 2007. - 476 p.
4. Levy S., Shlimak I., Dressler D.H. et al. Structure and Spatial Distribution of Ge Nanocrystals Subjected to Fast Neutron Irradiation // Nanomater. nanotechnol. - 2011. - Vol. 1, No. 1. - P. 52 - 57.
5. Krasilnik K.E. Kudryavtsev A.N., Kachemtsev D.N. et al. Comparative analysis of radiation effects on the electroluminescence of Si and SiGe/Si(001) heterostructures with self-assembled Islands // Semiconductors. - 2011. - Vol. 45, Iss. 2. - P. 225 - 229.
6. Sobolev N.A. Radiation effects in Si-Ge quantum size structure // Semiconductors. - 2013. - Vol. 47, Iss. 2. - P. 217 - 227.
7. Andrievski R.A. Nanostructures under extremes // Uspekhi fizicheskikh nauk. - 2014. - Vol. 57 (10). - P. 945 - 958.
8. Азаренков Н.А., Воеводин В.Н., Кириченко В.Г., Ковтун Г.П. Наноструктурные материалы в ядерной энергетике // Вісн. Харків. ун-ту ім. В. Н. Каразіна. Серія: фізична «Ядра, частинки, поля». - № 887, вип. 1 /45/. - 2010. - С. 4 - 24.
9. Углов В.В. Радиационные эффекты в твердых телах. - Минск: БГУ, 2007. - С. 167.
10. Dolgolenko A.P. Modification of radiation defects in Si and Ge by background impurity // Nuclear Physics and Atomic Energy. - 2013. - Vol. 14, No. 4. - P. 377 - 383.
11. Mooney P.M., Poulin F., Bourgoin J.C. Annealing of electron-induced defects in n-type germanium // Phys. Rev. B. - 1983. - Vol. 28, No. 6. - P. 3372 - 3377.
12. Roro K.T., van Rensburg P.J. Janse, Auret F.D., Coelho S. Effect of alpha-particle irradiation on the electrical properties of n-type Ge // Physica B: Condensed Matter. - 2009. - Vol. 404. - P. 4496 - 4498.
13. Patel N.S., Monmeyran C., Agarwal A., Kimerling L.C. Point defect states in Sb-doped germanium // J. Appl. Phys. - 2015. - Vol. 118. - P. 155702.
14. Stein H.J. Light-Sensitive Defect Formation by Electron and Neutron Irradiation of n- and p-type Germanium near 80 K // J. Appl. Phys. - 1972. - Vol. 43. - P. 138.
15. Dolgolenko A.P., Litovchenko P.G., Varentsov M.D. et al. Particularities of the formation of radiation defects in silicon with low and high concentration of oxygen // Phys. Stat. Sol. (b). - 2006. - Vol. 243, No. 8. - P. 1842 - 1852.
16. Витовский Н.А., Емцев В.В., Машовец Т.В., Михнович В.В. Влияние упругих напряжений, создаваемых компонентами пар Френкеля, на энергетический спектр дефектов в полупроводниках IV группы // ФТП. - 1989. - Т. 23, вып. 1. - С. 184 - 185.
17. Fage-Pedersen J., Larsen A.N., Mesli A. Irradiation-induced defects in Ge studied by transient spectroscopies // Phys. Rev. B. - 2000. - Vol. 62, No. 15. - P. 10116 - 10125.
18. Киреев П.С. Физика полупроводников. - М.: Высш. шк., 1969. - 590 с.
19. Новиков Л.С., Воронина Е.Н. Перспективы применения наноматериалов в космической технике. - М.: Университетская книга, 2008. - 188 с.
20. Новиков Л., Воронина Е. Особенности моделирования радиационных воздействий на наноструктуры // Тр. XIII Межвуз. научн. школы молодых специалистов «Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине» / Под ред. Б. С. Ишханова, Л. С. Новикова. - М.: НИИЯФ МГУ 2012. - С. 133 - 141.
21. Тарасова Е.А. Моделирование радиационной стойкости НЕМТ // Вест. Нижегородского ун-та им. Н. И. Лобачевского. - 2014. - № 1 (2). - С. 100 - 115.

С. В. Луньов¹, А. И. Зимич¹, П. Ф. Назарчук¹, В. Т. Маслюк², И. Г. Мегела²

¹ Луцкий национальный технический университет, Луцк,

² Институт электронной физики НАН Украины, Ужгород

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В ОБЛУЧЕННЫХ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ЭЛЕКТРОНАМИ МОНОКРИСТАЛЛАХ n-Ge

Исследован эффект Холла для монокристаллов n-Ge, облученных различными потоками электронов с энергией 10 МэВ. Учитывая полученные экспериментальные результаты, найден энергетический спектр уровней радиационных дефектов и установлены их основные параметры. На основе решений систем уравнений электронейтральности показано, что созданным радиационным дефектам отвечают только два глубоких энергетических уровня ($E_c - 0,27$) эВ и ($E_v + 0,27$) эВ. Незначительное изменение энергетического положения этих уровней при увеличении дозы облучения можно объяснить влиянием внутренних механических напряжений, возникающих в решетке германия вокруг образованных радиационных дефектов.

Ключевые слова: радиационные дефекты, глубокие уровни, внутренние напряжения, монокристаллы германия.

S. V. Luniov¹, A. I. Zimych¹, P. F. Nazarchuk¹, V. T. Maslyuk², I. G. Megela²

¹ Lutsk National Technical University, Lutsk

² Institute of Electron Physics, National Academy of Sciences of Ukraine, Uzhhorod

RADIATION DEFECTS PARAMETERS DETERMINATION IN n-Ge SINGLE CRYSTALS IRRADIATED BY HIGH-ENERGY ELECTRONS

Hall effect for single crystals of n-Ge, irradiated by various streams of electrons with an energy of 10 MeV is investigated. Taking into account the experimental results, the energy spectrum of radiation defects is found and established their parameters. On the basis solutions of electroneutrality equations systems is shown that the created radiation defects correspond only two deep energy levels ($E_c - 0,27$) eV and ($E_v + 0,27$) eV. A slight change of energy position of these levels with irradiation dose increasing can be explained by internal mechanical stresses influence that arise in the germanium lattice of around created of radiation defects.

Keywords: radiation defects, deep levels, internal stress, single crystals of germanium.

REFERENCES

1. Koshkin V.M., Volovichev N.V., Gurevich Yu.G. et al. Materials and devices with a huge resource of radiation // Materials of scintillation techniques. - Kharkiv: Institute for Single Crystals, 2006. - P. 60. (Rus)
2. Radiation semiconductor technology problems / Ed. L. S. Smirnov. - Novosibirsk: Nauka, 1980. - P. 291 p. (Rus)
3. Claes C., Simoen E. Germanium-Based Technologies: From Materials to Devices. - Elsevier Science, 2007. - 476 p.
4. Levy S., Shlimak I., Dressler D.H. et al. Structure and Spatial Distribution of Ge Nanocrystals Subjected to Fast Neutron Irradiation // Nanomater. nanotechnol. - 2011. - Vol. 1, No. 1. - P. 52 - 57.
5. Krasilnik K.E., Kudryavtsev A.N., Kachemtsev D.N. et al. Comparative analysis of radiation effects on the electroluminescence of Si and SiGe/Si(001) heterostructures with self-assembled Islands // Semiconductors. - 2011. - Vol. 45, Iss. 2. - P. 225 - 229.
6. Sobolev N.A. Radiation effects in Si-Ge quantum size structure // Semiconductors. - 2013. - Vol. 47, Iss. 2. - P. 217 - 227.
7. Andrievski R.A. Nanostructures under extremes // Uspekhi fizicheskikh nauk. - 2014. - Vol. 57 (10). - P. 945 - 958.
8. Azarenkov N.A., Voevodyn V.N., Kyrychenko V.G., Kovtun G.P. // Visn. Kharkiv. un-tu im. V. N. Karazina. Seriya: fizychna «Yadra, chastynky, polya». - No. 887, Iss. 1 /45/. - 2010. - P. 4 - 24. (Rus)
9. Uglov V.V. Radiation effects in solids. - Minsk: BSU, 2007. - P. 167. (Rus)
10. Dolgolenko A.P. Modification of radiation defects in Si and Ge by background impurity // Nuclear Physics and Atomic Energy. - 2013. - Vol. 14, No. 4. - P. 377 - 383.
11. Mooney P.M., Poulin F., Bourgoin J.C. Annealing of electron-induced defects in n-type germanium // Phys. Rev. B. - 1983. - Vol. 28, No. 6. - P. 3372 - 3377.
12. Roro K.T., van Rensburg P.J. Janse, Auret F.D., Coelho S. Effect of alpha-particle irradiation on the electrical properties of n-type Ge // Physica B: Condensed Matter. - 2009. - Vol. 404. - P. 4496 - 4498.
13. Patel N.S., Monmeyran C., Agarwal A., Kimerling L.C. Point defect states in Sb-doped germanium // J. Appl. Phys. - 2015. - Vol. 118. - P. 155702.
14. Stein H.J. Light-Sensitive Defect Formation by Electron and Neutron Irradiation of n- and p-type Germanium near 80 K // J. Appl. Phys. - 1972. - Vol. 43. - P. 138.
15. Dolgolenko A.P., Litovchenko P.G., Varentsov M.D. et al. Particularities of the formation of radiation defects in silicon with low and high concentration of oxygen // Phys. Stat. Sol. (b). - 2006. - Vol. 243, No. 8. - P. 1842 - 1852.
16. Vitovskij N.A., Emtsev V.V., Mashovets T.V., Mikhnovich V.V. // FTP. - 1989. - Vol. 23, Iss. 1. - P. 184 - 185. (Rus)

17. *Fage-Pedersen J., Larsen A.N., Mesli A.* Irradiation-induced defects in Ge studied by transient spectroscopies // *Phys. Rev. B.* - 2000. - Vol. 62, No. 15. - P. 10116 - 10125.
18. *Kireev P.S.* Physics of Semiconductors. - М.: Vyshcha shkola, 1969. - 590 p. (Rus)
19. *Novikov L.S., Voronina E.N.* Prospects for the use of nanomaterials in space technology. - Moskva: University Book, 2008. - 188 p. (Rus)
20. *Novikov L., Voronina E.* Modeling of radiation effects on nanostructures features // Proc. of XIII Intercolleges scientific school of young professionals "Concentrated energy flows in the space technology, electronics, ecology and medicine" / Ed. B. S. Ishkhanov, L. S. Novikov. - Moskva: SINP 2012. - P. 133 - 141. (Rus)
21. *Tarasova E.A.* // Vest. Nizhegorodskogo un-ta im. N. I. Lobachevskogo. - 2014. - No. 1 (2). - P. 100 - 115. (Rus)

Надійшла 21.01.2016
Received 21.01.2016