

С.В. ЛУНЬОВ,<sup>1</sup> А.І. ЗІМИЧ,<sup>1</sup> М.В. ХВИЩУН,<sup>1</sup> В.Т. МАСЛЮК,<sup>2</sup> І.Г. МЕГЕЛА<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Луцький національний технічний університет

(Вул. Львівська, 75, Луцьк 43018; e-mail: luniouser@mail.ru)

<sup>2</sup> Інститут електронної фізики НАН України

(Вул. Університетська, 21, Ужгород 88017; e-mail: volodymyr.maslyuk@gmail.com)

## ОСОБЛИВОСТІ ВІДПАЛУ РАДІАЦІЙНИХ ДЕФЕКТІВ В МОНОКРИСТАЛАХ *n*-Ge, ОПРОМІНЕНИХ ЕЛЕКТРОНАМИ ВИСОКИХ ЕНЕРГІЙ

УДК 621.315.592

*Досліджено ізотермічний відпал опроміненних потоком електронів  $\Phi = 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  з енергією 10 МеВ монокристалів *n*-Ge. На основі одержаних температурних залежностей сталої Холла, з розв'язків рівнянь електронейтральності, було обчислено концентрацію радіаційних дефектів, що належать А-центрам, в опроміненних монокристалах *n*-Ge до і після відпалу. При температурі відпалу  $T_B = 403 \text{ K}$ , для часів відпалу до трьох годин, було виявлено аномальне збільшення сталої Холла. Відпал при температурі  $T_B = 393 \text{ K}$  протягом однієї години призвів до *n*-*p* конверсії. Дані ефекти пояснюються зростанням концентрації А-центрів за рахунок генерації вакансій, які утворюються при відпалі ядер областей розвпорядкування.*

*Ключові слова:* ізотермічний відпал, радіаційні дефекти, області розвпорядкування, *n*-*p*-конверсія, монокристали германію.

### 1. Вступ

Радіаційні технології є потужним інструментом цілеспрямованої зміни властивостей твердих тіл та відповідно створення на їх основі різних складних пристроїв функціональної електроніки [1–4]. Під впливом радіаційного опромінення в твердих тілах виникають різного роду дефекти, які суттєво змінюють їх механічні, електричні, оптичні та інші фізичні властивості. Особливо чутливими до впливу радіації є напівпровідникові матеріали, серед яких базовими є Ge та Si. Саме ці матеріали, модифіковані домішками або радіаційними дефектами, є сировиною для створення елементів сучасної електронної техніки [5, 6]. Окрім того, германій та кремній використовуються в CMOS технологіях електронних приладів [7, 8] та в наноструктурах (квантові точки Ge, гетероструктури Si/Ge

[9, 10], які також можуть знаходитись в області дії зовнішніх радіаційних полів, наприклад, при експлуатації електронної техніки в космічних апаратах [11]. Електрофізичні властивості опроміненних монокристалів Ge та Si визначаються, в основному, наявністю різного роду вторинних радіаційних дефектів, які виникають в результаті квазіхімічних реакцій між вакансіями, міжвузловими атомами та атомами хімічних домішок [1–3]. Такі дефекти, як правило, створюють в забороненій зоні германію та кремнію глибокі енергетичні рівні [12]. На сьогодні більш вивченими є мікроструктура та енергетичні спектри радіаційних дефектів в Si, порівняно з Ge, що, в першу чергу, пов'язане з обмеженістю використання ЕПР для цього матеріалу [13, 14]. Наприклад, комплекс вакансія-кисень (А-центр) є одним з найбільш вивчених дефектів в монокристалах Si. Ідентифікація цього дефекта в Ge є більш ускладненою [15]. Зокрема, згідно з даними спектроскопічних досліджень робіт [16, 17],

© С.В. ЛУНЬОВ, А.І. ЗІМИЧ, М.В. ХВИЩУН,  
В.Т. МАСЛЮК, І.Г. МЕГЕЛА, 2019

спостерігався розкид за температурою відпалу (від 50 °С до 150 °С) смуги поглинання  $620 \text{ см}^{-1}$ , яку пов'язують з А-центром. Це, в свою чергу, робить неоднозначним контроль А-центру за даною смугою та вказує на її можливу приналежність лише одному із зарядових станів цього комплексу. Одним із ефективних методів дослідження параметрів радіаційних дефектів в монокристалах Ge є вимірювання ефекту Холла в комплексному поєднанні з термообробкою (відпалом). Як відомо, відпал використовується для відновлення електрофізичних властивостей опромінених напівпровідників. Кінцева мета відпалу — визначення енергії активації відпалу та частоти стрибків дефекта на стік, а також встановлення можливості реакції з утворенням нових дефектів, які є більш термостійкими [18]. Крім цього, процеси відпалу можуть знайти своє прикладне застосування, оскільки, підбравши оптимальну температуру та час відпалу, можна направлено регулювати концентрацією дефектів і тим самим підвищити термічну, магнітну, тензо- та фоточутливість напівпровідникового матеріалу. На основі таких матеріалів можуть бути створені різного роду датчики та електронні прилади. Також дані щодо енергії активації відпалу та частоти стрибків радіаційних дефектів на стік дозволяють оцінити час стабільної роботи електронної апаратури, що містить елементи на основі опроміненого матеріалу. Тому цікавим, як з теоретичної, так і практичної точок зору є дослідження процесів відпалу радіаційних дефектів в монокристалах Ge та їх впливу на різні його фізичні властивості.

## 2. Експериментальні результати та теоретичні розрахунки

В попередній нашій роботі [19] проводилися вимірювання ефекту Холла для опромінених різними потоками електронів, енергією 10 МеВ, монокристалів *n*-Ge, легованих домішкою сурми з концентрацією  $N_d = 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ . При поточковій електронного опромінення  $\Phi = 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  ефективно вводились радіаційні дефекти з глибоким енергетичним рівнем ( $E_C = 0,27 \text{ eV}$ ), що належить А-центру [13, 20]. Автор роботи [13] моделює точковий дефект в Ge з аналогічним енергетичним спектром як комплекс, який складається з вакансії, атома кисню та двох міжвузлових атомів герма-

нію ( $VOI_{2Ge}$ ). Опромінені зразки *n*-Ge мали *n*-тип провідності і лише при великих дозах опромінення спостерігалась *n-p*-конверсія. Проведений нами в роботі [21] порівняльний аналіз експериментальних та теоретичних температурних залежностей холлівської рухливості для цих самих монокристалів *n*-Ge дозволив встановити, що для вказаних вище умов опромінення крім А-центрів вводяться також області розвпорядкування.

Основна кількість публікацій, в яких досліджувався відпал радіаційних дефектів в германії, присвячена вивченню відпалу простих радіаційних дефектів (А-, Е-центрів, дивакансій та інших дефектів), які є домінуючими для енергій електронного опромінення, менших від 10 МеВ, або складних дефектів (областей розвпорядкування), що утворюються в монокристалах германію при опроміненні електронами з енергіями кілька десятків МеВ [22]. При цьому вважалось, що після відпалу електрофізичні властивості монокристалів германію визначаються, в основному, механізмами відпалу дефектів якогось одного типу. Випадок, коли ефективним є одночасний відпал як простих, так і складних дефектів на сьогодні мало вивчений. Відповідно не існує адекватних моделей, які пояснюють механізми такого відпалу, та недосліджений його вплив на фізичні властивості монокристалів германію.

Тому в нашій роботі досліджувався ізотермічний відпал монокристалів *n*-Ge, опромінених електронами потоком  $\Phi = 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ , енергією 10 МеВ. Зразки монокристалів *n*-Ge для досліджень мали характерні розміри  $1 \times 2 \times 10 \text{ мм}$ . Опромінення проводилося на електронному прискорювачі (мікротроні) М-30, параметри якого дозволяли формувати на площі  $100 \text{ см}^2$  однорідне радіаційне поле із щільністю  $4 \cdot 10^{11} \text{ ел./}(см^2 \text{ с})$ . Охолодження зразків здійснювалося парами азоту. Температура на опромінюваних зразках контролювалася дистанційно за допомогою мідь-константанової термопари, для якої, як встановлено, її параметри є стійкими до тривалої дії радіації. Роль гальмівного  $\gamma$ - та нейтронного випромінювання при утворенні дефектів в *n*-Ge в умовах даного експерименту є другорядною, оскільки їх внесок в радіаційне поле М-30 не перевищує 1%. Ймовірність фото- чи нейтрон-ядерних реакцій при енергії електронів 10 МеВ в  $10^4$ – $10^5$  разів менша, ніж утворення радіаційного дефекту (пе-

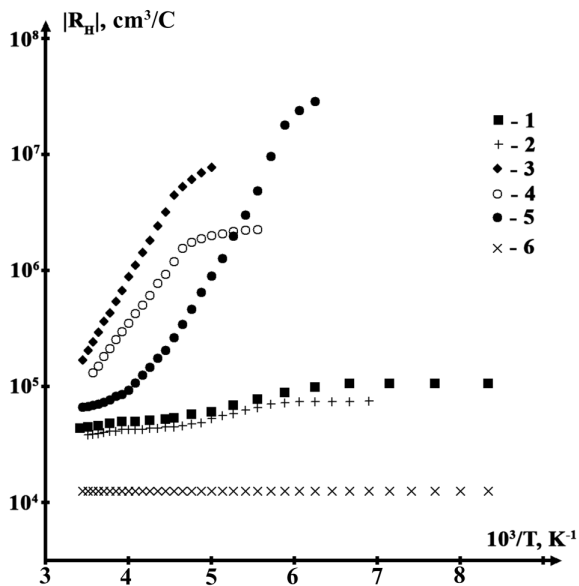


Рис. 1. Температурна залежність сталої Холла  $|R_H| = f(10^3/T)$  для опромінених монокристалів  $n$ -Ge після ізотермічного відпалу протягом 1 год. при різних температурах відпалу  $T_B$ , К: 1 – 433; 2 – 448; 3 – 403; 4 – 393; 5 – невідпалений зразок; 6 – неопромінений зразок

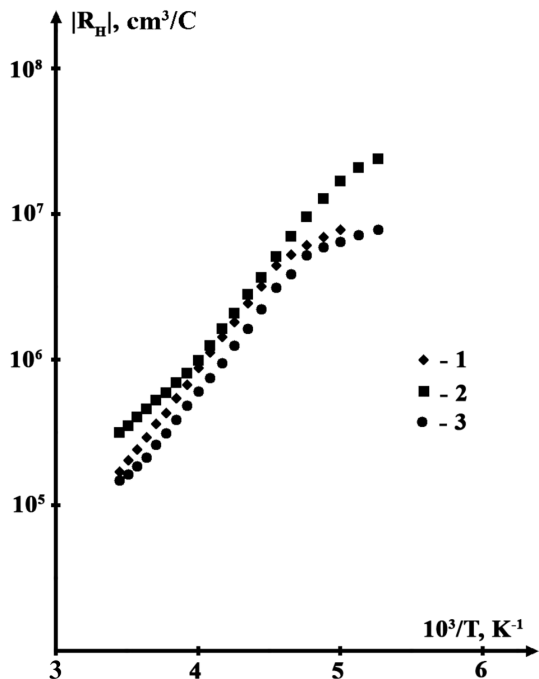


Рис. 2. Температурна залежність сталої Холла  $|R_H| = f(10^3/T)$  для опромінених монокристалів  $n$ -Ge при температурі ізотермічного відпалу  $T_B = 403$  К при різних часах відпалу  $t$ , год.: 1 – 1; 2 – 3; 3 – 5

період реакції  $\gamma$ - $n$  становить порядку 10 мб, а утворення дефекту 10–100 б). Тому процеси дефектоутворення в досліджуваних монокристалах  $n$ -Ge будуть визначатись лише потоками опромінення високоенергетичних електронів.

На рис. 1 наведені результати вимірювань температурних залежностей сталої Холла для відпалених зразків після першої години відпалу. Як видно з рис. 1, при температурах відпалу  $T_B = 433$  К та  $T_B = 448$  К протягом 1 год. спостерігалось зменшення сталої Холла в порівнянні з опроміненими (невідпаленими) зразками для всього досліджуваного діапазону температур, що свідчить про зростання концентрації електронів у зоні провідності за рахунок відпалу А-центрів. Збільшення часу відпалу також призводило до подальшого зменшення сталої Холла і відповідно концентрації А-центрів. Після 1 год. відпалу при температурі  $T_B = 403$  К було виявлене аномальне зростання сталої Холла в порівнянні з опроміненими (невідпаленими) зразками (рис. 1, крива 3), яке тривало до 3 год. (рис. 2, крива 2).

Після першої години відпалу, при температурі відпалу  $T_B = 393$  К,  $n$ -Ge конвертував у  $p$ -тип. Подальша термічна обробка від 1 до 3 год. при даній температурі відпалу (рис. 3, криві 1 та 2) призводила до зменшення сталої Холла при  $T > 210$  К, що свідчить про збільшення концентрації дірок у валентній зоні відпалених зразків германію. Після 6 годин відпалу за рахунок зменшення концентрації А-центрів Ge знову став  $n$ -типу провідності. Подальший відпал призводив до зменшення сталої Холла.

Оскільки зміна сталої Холла  $R_H$  після відпалу опромінених монокристалів  $n$ -Ge може бути спричинена як зміною концентрації електрично активних дефектів (А-центрів), так і появою нових комплексів з іншим енергетичним спектром [1, 23], то нами для інтерпретації одержаних результатів було розраховано концентрацію та енергетичний спектр радіаційних дефектів для відпалених зразків германію.

Нехай після відпалу в зразках германію, що мали  $n$ -тип провідності, рівноважна концентрація радіаційних дефектів становить  $N$  і кожному такому дефекту відповідає  $L$  акцепторних рівнів. Тоді при температурах, коли мілкі донори повністю іонізовані, а верхній енергетичний рівень радіаційних дефектів частково, можна записати таке рів-

няння електронейтральності:

$$N(L - 1) + n_a + n = N_d, \quad (1)$$

де  $n_a$  – концентрація електронів на найвищому за шкалою енергій акцепторному рівні,  $n$  – концентрація електронів у зоні провідності,  $N_d$  – концентрація донорної домішки. Враховуючи вирази для відповідних концентрацій [24]:

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

рівняння (1) можна записати так:

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

$N_c = \frac{(2m_p kT)^{3/2}}{4\pi^3 \hbar^3}$  – ефективна густина станів зони провідності,  $F$  – енергія Фермі. В рівняння (3) входять три невідомі параметри радіаційних дефектів, які могли змінитись у порівнянні з опроміненими (невіддаленими) зразками:  $N$  – 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. В результаті отримаємо таку систему рівнянь:

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

Зміна типу провідності напівпровідників ( $n$ - $p$ -конверсія), легованих донорною домішкою, спричинена сильною компенсацією мілких енергетичних рівнів донорів акцепторними рівнями радіаційних дефектів. Якщо припустити, що за наявності кількох акцепторних рівнів для напівпровідника  $p$ -типу провідності, найнижчий за шкалою енергій акцепторний рівень буде частково заповнений електронами, а всі інші повністю вільними, то для віддалених зразків при  $T_B = 393$  К, які мали  $p$ -тип провідності, можна записати:

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

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

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),

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

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

$$\begin{cases} N_d + p_1 = \frac{N}{1 + 2\frac{p_1 \exp\left(\frac{E_d}{kT_1}\right)}{N_V(T_1)} \exp\left(\frac{E_a}{kT_1}\right)}, \\ N_d + p_2 = \frac{N}{1 + 2\frac{p_2 \exp\left(\frac{E_d}{kT_2}\right)}{N_V(T_2)} \exp\left(\frac{E_a}{kT_2}\right)}. \end{cases} \quad (8)$$

Враховуючи значення ефективної маси густини станів для електронів зони провідності та дірок

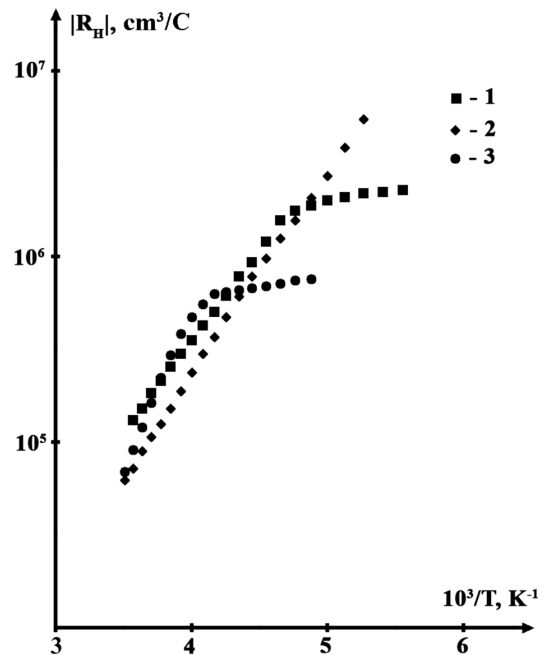


Рис. 3. Температурна залежність сталої Холла  $|R_H| = f(10^3/T)$  для опромінених монокристалів  $n$ -Ge після ізотермічного віддалу при температурі  $T_B = 393$  К, для різних часів віддалу  $t$ , год.: 1 – 1; 2 – 3; 3 – 6

валентної зони германію, концентрацію домішки сурми  $N_d = 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ , експериментальні значення концентрацій електронів та дірок, які були знайдені з температурних залежностей сталої Холла, було обчислено вище зазначені параметри радіаційних дефектів для відпалених зразків Ge в різних режимах. Як показують дані розрахунки, енергетичний спектр радіаційних дефектів для відпалених зразків виявився аналогічним до раніше знайденого нами в роботі [19] для опромінених (невідпалених) монокристалів *n*-Ge: для германію *n*-типу провідності домінуючим був глибокий рівень А-центру ( $E_c - 0,27$ ) еВ, а для германію *p*-типу провідності – рівень ( $E_V + 0,27$ ) еВ. Це свідчить про неможливість або про малу ефективність утворення при відпалі іншого типу дефектів. Результати розрахунків концентрації А-центрів для відпалених зразків наведені в таблиці.

Як відомо [22], висока концентрація вакансій у ядрі області розвпорядкування дає можливість більш легкій його перебудові та дифузії вакансій у провідну матрицю кристала. Тому дифундуючі вакансії можуть знову вступати у квазіхімічні реакції з киснем та міжвузловими атомами германію і створювати нові А-центри, що і пояснює одержаний нами при температурах  $T_B = 403 \text{ К}$  та  $T_B = 393 \text{ К}$  аномальний відпал. Збільшення ж часу відпалу призводить до зменшення концентрації областей розвпорядкування і відповідно вакансій, з яких можуть бути утворені нові А-центри. В результаті такого довготривалого відпалу можливе також формування нових областей розвпоряд-

кування, які є більш термостійкими [22]. Внаслідок цього концентрація вакансій, які виникають при відпалі ядер областей розвпорядкування, буде зменшуватись. Дані процеси є причиною того, що при температурах відпалу  $T_B = 403 \text{ К}$  (більше 3 год.) та  $T_B = 393 \text{ К}$  (більше 6 год.) починають переважати процеси відпалу А-центрів над процесами їх генерації, що, в свою чергу, зумовлює зменшення сталої Холла при  $T_B = 403 \text{ К}$ , для часу відпалу 5 год. (рис. 2, крива 3) та зворотню *p*-*n*-конверсію опроміненого германію при температурі відпалу  $T_B = 393 \text{ К}$  протягом 6 годин.

### 3. Висновки

З аналізу отриманих експериментальних результатів та проведених теоретичних розрахунків випливає, що для досліджуваних монокристалів *n*-Ge, опромінених потоками швидких електронів з енергією 10 МеВ, кінетика накопичення та відпалу радіаційних дефектів може бути пояснена двома механізмами: 1) відпалом простих (точкових) дефектів, що належать А-центрам; 2) генерацією А-центрів, що відбувається за рахунок відпалу ядер областей розвпорядкування, енергія активації відпалу яких є меншою, ніж для А-центрів. Ефективність даних механізмів залежить як від температури, так і часу ізотермічного відпалу. Це пояснює аномальне зростання сталої Холла для температури відпалу  $T_B = 403 \text{ К}$  протягом трьох годин та зміну типу провідності (*n*-*p*-конверсію) для опромінених монокристалів германію після відпалу при температурі  $T_B = 393 \text{ К}$ .

Дослідження ізотермічного відпалу для опромінених високоенергетичними електронами монокристали *n*-Ge має також і прикладне значення. Контрольована зміна концентрації радіаційних дефектів з глибокими енергетичними рівнями за рахунок відпалу дозволить підвищити термо-, фото-, тензо- та магнітну чутливість опроміненого германію, на основі якого можуть бути створені високочутливі сенсори температури, магнітного поля, тиску, елементи інфрачервоної техніки.

1. В.В. Углов. *Радиационные эффекты в твёрдых телах* (БГУ, 2007).
2. В.Н. Воеводин, И.М. Неклюдов. *Эволюция структурно-фазового состояния и радиационная стойкость конструкционных материалов* (Наукова думка, 2006).

**Концентрація А-центрів в опромінених монокристалах Ge після ізотермічного відпалу**

| Температура відпалу $T_B$ , К | Час відпалу $t$ , год. | Концентрація А-центрів $N$ , $\text{см}^{-3}$ |
|-------------------------------|------------------------|---|
| 448                           | 1                      | $1,4 \cdot 10^{14}$                           |
| 433                           | 1                      | $2,1 \cdot 10^{14}$                           |
|                               | 1                      | $4,5 \cdot 10^{14}$                           |
| 403                           | 3                      | $4,6 \cdot 10^{14}$                           |
|                               | 5                      | $4,4 \cdot 10^{14}$                           |
|                               | 1                      | $5,4 \cdot 10^{14}$                           |
| 393                           | 3                      | $6,2 \cdot 10^{14}$                           |
|                               | 6                      | $3,8 \cdot 10^{14}$                           |
| Невідпалений зразок           | –                      | $2,8 \cdot 10^{14}$                           |

3. *Вопросы радиационной технологии полупроводников*, под ред. Л.С. Смирнова, (Наука, 1980).
4. A.G. Chmielewski, M. Haji-Saeid. Radiation technologies: past, present and future. *Radiat. Phys. Chem.* **71**, 17 (2004).
5. C. Claes, E. Simoen, *Germanium-Based Technologies: From Materials to Devices* (Elsevier Science, 2007).
6. F. Murphy-Armando, S. Fahy. Giant enhancement of n-type carrier mobility in highly strained germanium nanostructures. *J. Appl. Phys.* **109**, 113703 (2011).
7. B. Lemke, R. Baskaran, O. Paul. Piezoresistive CMOS sensor for out-of-plane normal stress. *Sensor. Actuat. A-Phys.* **176**, 10 (2012).
8. D.N. Lobanov, A.V. Novikov, K.E. Kudryavtsev, D.V. Shengurov, Yu.N. Drozdov, A.N. Yablonskiy, V.B. Shmagin, Z.F. Krasilnik, N.D. Zakharov, P. Werner. Effect of Ge(Si)/Si(001) self-assembled islands parameters on their electroluminescence at room temperature. *Semiconductors* **43**, 332 (2009).
9. S. Tong, J. Liu, L.J. Wan, Kang L. Wang. Normal-incidence Ge quantum-dot photodetectors at  $1.5\mu m$  based on Si substrate. *Appl. Phys. Lett.* **80**, 1189 (2002).
10. K. Brunner. Si/Ge nanostructures. *Rep. Prog. Phys.* **65**, 27 (2002).
11. К.И. Таперо, В.Н. Улимов, А.М. Членов. *Радіаційні ефекти в кремнієвих інтегральних схемах космічного примінення* (ВИНОМ, 2014).
12. А.К. Семенюк, *Радіаційні ефекти в багатодлинніснопівпровідниках* (Надстир'я, 2001).
13. A.P. Dolgolenko. Modification of radiation defects in Si and Ge by background impurity. *Nuclear Physics and Atomic Energy* **14**, 377 (2013).
14. П.Г. Баранов, А.Н. Ионов, И.В. Ильин, П.С. Копьев, Е.Н. Мохов, В.А. Храмов. Электроннопарамагнитный резонанс в нейтронно-легированных полупроводниках с изменённым изотопным составом. *ФТТ* **45**, 988 (2003).
15. В.В. Литвинов, Л.И. Мулин, Дж.Л. Линдстром, В.П. Маркевич, А.Н. Петух. Локальные колебательные моды комплекса кислород-вакансия в германии. *ФТП* **36**, 658 (2002).
16. J.A. Baldwin. Electron Paramagnetic Resonance in Irradiated Oxygen-Doped Germanium. *J. Appl. Phys.* **36**, 793 (1965).
17. R.E. Whan. Oxygen-Defect Complexes in Neutron-Irradiated Germanium. *J. Appl. Phys.* **37**, 2435 (1966).
18. Г.П. Гайдар. Отжиг радиационных дефектов в кремнии. *Электронная обработка материалов* **48**, 93 (2012).
19. S.V. Luniov, A.I. Zimych, P.F. Nazarchuk, V.T. Maslyuk, I.G. Megela. Radiation defects parameters determination in n-Ge single crystals irradiated by high-energy electrons. *Nuclear Physics and Atomic Energy* **17**, 47 (2016).
20. J. Fage-Pedersen, A.N. Larsen, A. Mesli. Irradiation-induced defects in Ge studied by transient spectroscopies. *Phys. Rev. B* **62**, 10116 (2000).
21. S.V. Luniov, A.I. Zimych, P.F. Nazarchuk, V.T. Maslyuk, I.G. Megela. The impact of radiation defects on the mechanisms of electron scattering in single crystals n-Ge. *Journal of physical studies* **19**, 4704 (2015).
22. Э.Н. Вологдин, А.П. Лысенко. *Интегральные радиационные изменения параметров полупроводниковых материалов* (Московский государственный институт электроники и математики, 1998).
23. Я.М. Олих, И.А. Лисюк, Н.Д. Тимочко. Акусто-стимулированное понижение температуры отжига радиационных дефектов в кристаллах Ge. Технология и конструирование в электронной аппаратуре **3**, 10 (2004).
24. П.С. Киреев. *Физика полупроводников* (Высшая школа, 1969).

Одержано 27.11.17

S.V. Luniov, A.I. Zimych,  
M.V. Khvyshchun, V.T. Maslyuk, I.G. MegelaFEATURES OF RADIATION-DEFECT  
ANNEALING IN n-Ge SINGLE CRYSTALS  
IRRADIATED WITH HIGH-ENERGY ELECTRONS

## S u m m a r y

The isothermal annealing of n-Ge single crystals irradiated with 10-MeV electrons to the fluence  $\Phi = 5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$  has been studied. On the basis of the measured temperature dependences of the Hall constant and by solving the electroneutrality equations, the concentrations of radiation-induced defects (A-centers) in irradiated n-Ge single crystals are calculated both before and after the annealing. An anomalous increase of the Hall constant is found, when the irradiated n-Ge single crystals were annealed at  $T_{\text{an}} = 403 \text{ K}$  for up to 3 h. The annealing at the temperature  $T_{\text{an}} = 393 \text{ K}$  for 1 h gave rise to the np conversion in the researched crystals. The revealed effects can be explained by the concentration growth of A-centers owing to the generation of vacancies at the annealing of disordered crystal regions.