

# SENSOR MATERIALS

---

## МАТЕРІАЛИ ДЛЯ СЕНСОРІВ

---

---

УДК 621.315.592

### ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРИ НА ТЕНЗОЧУТЛИВІСТЬ СИЛЬНОДЕФОРМОВАНИХ МОНОКРИСТАЛІВ n-Ge

*О. В. Бурбан*

Луцький національний технічний університет  
вул. Львівська 75, м. Луцьк, 43018, Україна; e-mail: sashaboortban@gmail.com

### ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРИ НА ТЕНЗОЧУТЛИВІСТЬ СИЛЬНОДЕФОРМОВАНИХ МОНОКРИСТАЛІВ n-Ge

*О. В. Бурбан*

**Анотація.** Досліджено  $p$ 'єзоопір монокристалів n-Ge для випадку одновісного тиску вздовж кристалографічного напрямку [100]. Отримано залежності коефіцієнта тензочутливості для даних умов експерименту при різних фіксованих температурах. Показано, що максимум коефіцієнта тензочутливості припадає на діапазон одновісних тисків 2,3–2,5 ГПа та зменшується зі збільшенням температури. Таке зменшення при температурах, коли не проявляється ще власна провідність, пояснюється “виключенням” механізму розсіяння електронів на міждолинних та оптичних фонах при інверсії типу (L1-  $\Delta$ 1) абсолютного мінімуму в n-Ge. При температурах  $T > 240$  К необхідно додатково, при високих одновісних тисках, враховувати збільшення концентрації електронів в зоні провідності за рахунок власної провідності, що впливає як на величину  $p$ 'єзоопору, так і коефіцієнта тензочутливості n-Ge.

**Ключові слова:** монокристали n-Ge, коефіцієнт тензочутливості, питомий опір, одновісний тиск

## THE TEMPERATURE INFLUENCE ON TENSOSENSITIVITY OF STRAIN SINGLE CRYSTALS n-Ge

*O. V. Burban*

**Abstract.** Piezoresistance of single crystals n-Ge in case uniaxial pressure in [100] crystallographic direction is investigated. The dependencies of coefficient of tensosensitivity for different fixed temperature are obtained. It was shown that the maximum coefficient of tensosensitivity correspond pressure range 2,3–2,5 GPa and reduce with increasing of temperature. That is result of the "exception" mechanism of electron scattering on intervalley and optical phonons due inversion of (L1- $\Delta$ 1) type of absolute minimum in n-Ge. At the temperatures of  $T > 240$  K and high uniaxial pressures needs additionally to take into account the increase of concentration of electrons in the conduction band due to intrinsic conductivity. Intrinsic conductivity influences on the value of piezoresistance and coefficient of tensosensitivity of n - Ge.

**Keywords:** single crystals n-Ge, coefficient of tensosensitivity, resistivity, uniaxial deformation

## ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ТЕНЗОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ СИЛЬНОДЕФОРМИРОВАННЫХ МОНОКРИСТАЛЛОВ n-Ge

*O. V. Burban*

**Аннотация.** Исследовано пьезосопротивление монокристаллов n-Ge для случая одноосного давления вдоль кристаллографического направления [100]. Получены зависимости коэффициента тензочувствительности для данных условий эксперимента при разных фиксированных температурах. Показано, что максимум коэффициента тензочувствительности приходится на диапазон одноосных давлений 2,3-2,5 ГПа и уменьшается с увеличением температуры. Такое уменьшение при температурах, когда не проявляется еще собственная проводимость, объясняется "исключением" механизма рассеяния электронов на междолинных и оптических фонах при инверсии типа (L1 -  $\Delta$ 1) абсолютного минимума в n-Ge. При температурах  $T > 240$  К необходимо дополнительно, при высоких одноосных давлениях, учитывать увеличение концентрации электронов в зоне проводимости за счет собственной проводимости, которая влияет как на величину пьезосопротивления, так и коэффициента тензочувствительности n - Ge.

**Ключевые слова:** монокристаллы n-Ge, коэффициент тензочувствительности, удельное сопротивление, одноосное давление

### 1. Актуальність теми дослідження.

Сучасний рівень розвитку інформаційно-виміральної техніки вимагає пошуку як нових сировинних матеріалів, так і подальшого та детального вивчення властивостей вже відомих. Одним із таких напівпровідникових матеріалів, який широко використовується для виготовлення різного роду приладів та сенсорів є германій. Монокристалічний германій застосовується в дозиметричних при-

борах та приладах, що вимірюють напруженість постійних та змінних магнітних полів, пікосекундній оптоакустиці [1, 2]. Масиви Ge (GeSi) квантових точок з успіхом можуть бути застосовані для виготовлення фотодетекторів для ближнього інфрачервоного діапазону та світловипромінюючих діодів для цієї ж спектральної області [3, 4].

Ключовим завданням сучасного напівпровідникового матеріалознавства є детальне ви-

вчення залежностей електрофізичних характеристик напівпровідникового матеріалу від дії різних зовнішніх чинників, наприклад, деформації, що є основою для створення тензочутливих елементів. Дослідження впливу деформації на напівпровідники є фундаментом для подальшої розробки математичної моделі перетворювачів тиску з частотним вихідним сигналом, на основі якої можна встановлювати залежності вольт-амперної характеристики, активної і реактивної складових повного опору перетворювача, частоти генерації та рівняння чутливості від тиску [5]. Зокрема, для проектування та створення певних електронних приладів необхідно вивчити вплив деформації на зонну структуру матеріалу. Так, у Ge/Si гетероструктурах, внаслідок неспівпадіння сталих ґратки кремнію та германію приблизно на 4%, виникають дуже сильні внутрішні напруження, які можуть спричинити кардинальну перебудову зонної структури цих напівпровідникових матеріалів [6]. Як наслідок, високоенергетичні мінімуми зони провідності, які за звичайних умов знаходяться набагато вище за шкалою енергій від основних та не беруть участь в різного роду кінетичних та оптичних ефектах, можуть давати суттєвий вклад у відповідні процеси.

Германій є багатодолинним напівпровідником, що значною мірою пояснює його фізичні властивості в полях ефективного зовнішнього впливу [7]. В n-Ge вище за шкалою енергій на 0,18 eV основних чотирьох  $L_1$ -мінімумів є набір з шести  $\Delta_1$ -мінімумів. Під дією як гідростатичного, так і одновісного тиску зонна структура германію значно змінюється. Різні мінімуми зміщуються за шкалою енергій в різних напрямках та із різною швидкістю [8]. Внаслідок різної зміни положення енергетичних мінімумів зони провідності внаслідок дії тиску можна реалізувати інверсію типу ( $L_1$ - $\Delta_1$ ) абсолютного мінімуму. При гідростатичному тиску можна отримати шестиеліпсоїдну  $\Delta_1$ -модель зони провідності, при одновісному тиску в напрямку [100] – двохеліпсоїдну модель, а при одновісному тиску в напрямку [110] – чотирьохеліпсоїдну модель.

В роботі [9] на основі теорії анізотропного розсіяння проводились розрахунки рухливості

електронів та коефіцієнта тензочутливості для різної структури  $\Delta_1$ -зони провідності кристалів германію, утвореної сильним гідростатичним або одновісним тиском вздовж кристалографічних напрямків [100] та [110]. Було показано, що для різної концентрації домішки при  $T=77$  К максимальні значення зміни питомого опору з тиском та коефіцієнта тензочутливості кристалів n-Ge можна отримати при сильному одновісному тиску вздовж кристалографічного напрямку [100]. Але в даній роботі не вивчався вплив температури на величину коефіцієнта тензочутливості.

## 2. Одержані експериментальні результати та методика проведення експериментальних досліджень.

Тому досліджувався ефект п'єзоопору при одновісному тиску вздовж кристалографічному напрямку [100] монокристалів n-Ge, легованих домішкою сурми концентрацією  $N_D=5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ , для різних фіксованих температур (рис. 1). Зразки n-Ge для досліджень виготовлялись гантелеподібної форми (рис. 2 та рис. 3). Така специфічна форма досліджувальних зразків збільшує їх механічну стійкість в порівнянні із зразками паралелепіпедної форми [10]. Це дозволяє досліджувати тензорезистивні ефекти в монокристалах германію при одновісних тисках  $P > 2$  ГПа, коли вже зразки паралелепіпедної форми, як правило, руйнуються.

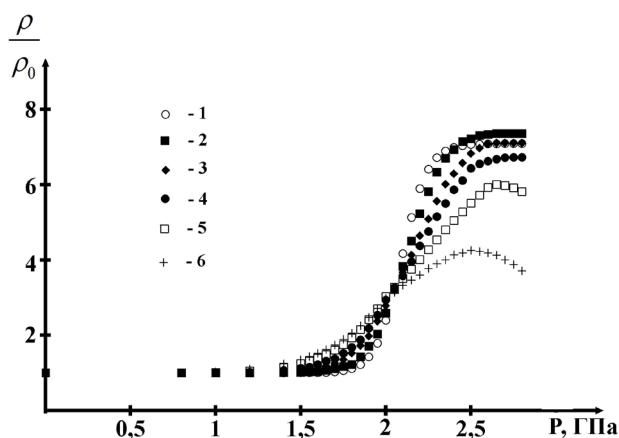


Рис. 1. П'єзоопір одновісно деформованих вздовж кристалографічного напрямку [100] монокристалів n-Ge при різних температурах T, К: 1-77; 2-110; 3-150; 4-180; 5-240; 6 – 290.

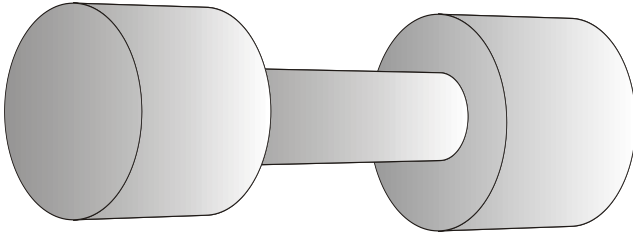


Рис. 2. Форма зразка монокристалу германію, який використовується для досліджень значних одновісних тисків.

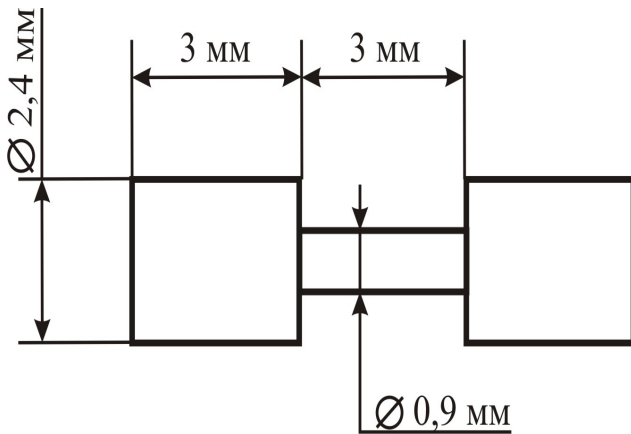


Рис. 3. Характерні розміри досліджуваного зразка монокристалу германію.

Коефіцієнт тензочутливості за деформацією  $P$  [11]:

$$S = \frac{\Delta\rho/\rho_0}{\Delta l/l_0} = \frac{\left(\frac{\rho_x}{\rho_0} - 1\right) \cdot E_{ю}}{P}, \quad (1)$$

де  $E_{ю}$  - модуль Юнга,  $\rho$  - питомий опір деформованого зразка, а  $\rho_0$  - недеформованого.

Враховуючи вираз (1) та експериментальні результати п'єзоопору n-Ge (рис.1), можна одержати відповідні залежності коефіцієнта тензочутливості від одновісного тиску (рис. 4).

### 3. Обговорення одержаних результатів та висновки.

Для інтерпретації одержаних експериментальних результатів проводились розрахунки температурних залежностей концентрації електронів для одновісно деформованих вздовж кристалографічному напрямку [100] монокристалів n-Ge. Концентрація власних

носів струму для деформованого напівпровідника [12]

$$n_i = n_{i0} e^{-\frac{\Delta E_g}{2kT}}, \quad (1)$$

де  $\Delta E_g = \Delta E_{C_i} - \Delta E_{V_i}$ ,  $n_{i0}$  - концентрація власних носів струму для недеформованого напівпровідника,  $\Delta E_g$ ,  $\Delta E_{C_i}$ ,  $\Delta E_{V_i}$  - зміна ширини забороненої зони та енергетичного положення мінімумів зони провідності та вершини валентної зони при деформації.

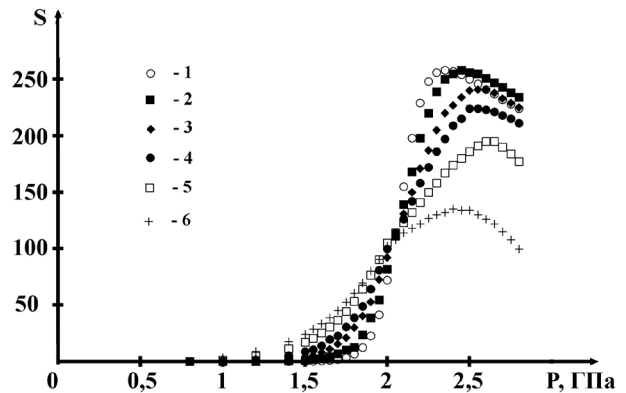


Рис. 4. Залежності коефіцієнта тензочутливості для одновісно деформованих вздовж кристалографічного напрямку [100] монокристалів n-Ge при різних температурах  $T$ , К: 1-77; 2-110; 3-150; 4-180; 5-240; 6 – 290.

Для умов, коли атоми легуючої домішки повністю іонізовані і проявляється часткова іонізація атомів основної речовини, концентрація електронів для напівпровідника n-типу провідності визначається так [13]:

$$n = \frac{N_D}{2} \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{4n_i^2}{N_D}} \right). \quad (2)$$

При одновісній деформації вздовж кристалографічному напрямку [100] чотири  $L_1$ -мінімумами зони провідності монокристалів n-Ge синфазно зміщуються вгору, а два  $\Delta_1$ -мінімумами опускаються вниз за шкалою енергій [8]. В результаті чого при одновісних тисках  $P \approx 2,1$  ГПа енергетична щілина між  $L_1$  та  $\Delta_1$  мінімумами “захлопується”. Тому при сильних одновісних тисках необхідно врахо-

увати також вклад  $\Delta_1$  мінімумів в різні кінетичні та оптичні ефекти в германії. Тоді для сильно деформованих монокристалів n-Ge

$$n_i = n_i^{L_1} + n_i^{\Delta_1}, \quad (3)$$

$$\text{де } n_i^{L_1} = n_{i0}^{L_1} e^{-\frac{\Delta E_g^{L_1}}{2kT}}, \quad n_i^{\Delta_1} = n_{i0}^{\Delta_1} e^{-\frac{\Delta E_g^{\Delta_1}}{2kT}}, \quad (4)$$

$$\Delta E_g^{L_1} = \Delta E_{L_1} - \Delta E_{V_1}, \quad \Delta E_g^{\Delta_1} = \Delta E_{\Delta_1} - \Delta E_{V_1}, \quad (5)$$

$$n_{i0}^{L_1} = \left( 2,31 \cdot 10^{31} \cdot \left( \frac{m_{nd}^{L_1} m_{pd}}{m_0^2} \right)^{3/2} \cdot T^3 \cdot e^{-\frac{E_{g0}^{L_1}}{kT}} \right)^{1/2}, \quad (6)$$

$$n_{i0}^{\Delta_1} = \left( 2,31 \cdot 10^{31} \cdot \left( \frac{m_{nd}^{\Delta_1} m_{pd}}{m_0^2} \right)^{3/2} \cdot T^3 \cdot e^{-\frac{E_{g0}^{\Delta_1}}{kT}} \right)^{1/2}, \quad (7)$$

$\Delta E_{L_1}$ ,  $\Delta E_{\Delta_1}$ ,  $\Delta E_V$  - зміщення при одновісному тискові  $P//[100]$   $L_1$ ,  $\Delta_1$  мінімумів та вершини валентної зони;  $m_{nd}^{L_1}$ ,  $m_{nd}^{\Delta_1}$  - ефективна маса густини станів для електронів в цих мінімумах;  $m_{pd}$  - ефективна маса густини для дірок валентної зони;  $m_0$  - маса вільного електрона;  $E_{g0}^{L_1} = 0,67$  еВ - ширина забороненої зони германію, зв'язана з  $L_1$  мінімумами. Оскільки  $\Delta_1$  мінімуми в германії знаходяться вище на 0,18 еВ за шкалою енергій  $L_1$ -мінімумів, то  $E_{g0}^{\Delta_1} = 0,85$  еВ. Зміщення при одновісному тискові  $L_1$ , та  $\Delta_1$  мінімумів зони провідності і також вершини валентної зони є лінійними функціями тиску [8, 12]. Тоді

$$\Delta E_{L_1} = \alpha P, \quad \Delta E_{\Delta_1} = \beta P, \quad \Delta E_V = \gamma P, \quad (8)$$

$$\text{де } \alpha = -8,65 \cdot 10^{-11} \text{ eB}/\text{Па} \quad [8],$$

$$\beta = 0,325 \cdot 10^{-11} \text{ eB}/\text{Па} \quad [14], \quad \gamma = 3,15 \cdot 10^{-11} \text{ eB}/\text{Па} \quad [12]$$

- баричні коефіцієнти для  $L_1$  та  $\Delta_1$  мінімумів і вершини валентної зони відповідно. Враховуючи також ефективні маси густини станів електронів даних мінімумів  $m_{nd}^{L_1} = 0,55m_0$ ,  $m_{nd}^{\Delta_1} = 0,88m_0$  та дірок валентної зони  $m_{pd} = 0,3m_0$  [11, 15,], можна на основі виразів (2-8) отримати температурні залежності концентрації електронів для монокристалів n-Ge,

легованих домішкою сурми концентрацією  $N_D = 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ , при різних фіксованих одновісних тисках (рис. 5).

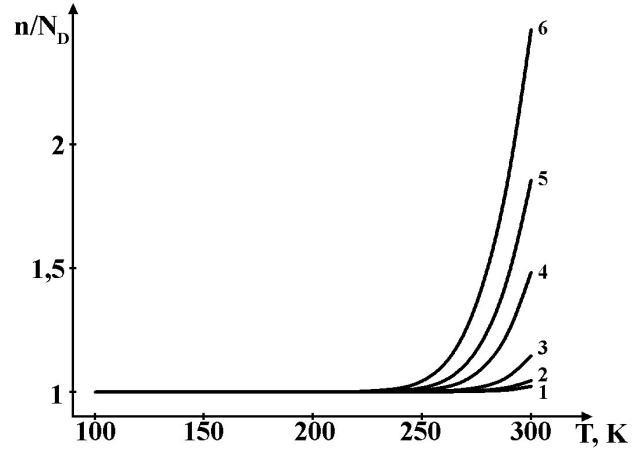


Рис. 5. Температурні залежності концентрації електронів для одновісно деформованих монокристалів вздовж кристалографічного напрямку [100] монокристалів n-Ge, легованих домішкою сурми, концентрацією  $N_D = 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ , при різних значеннях одновісних тисків  $P$ , ГПа: 1-1,5; 2-1,8; 3-2,2; 4-2,6; 5-2,8; 6 - 3.

Як видно з рис. 5, концентрація електронів при температурах  $T < 240$  К для всього діапазону досліджуваних тисків залишається сталою та рівною концентрації легуючої домішки сурми. Тому наявність п'єзоопору n-Ge для температур  $T < 240$  К (рис. 1, криві 1-4) пояснюється деформаційним перерозподілом електронів між чотирма  $L_1$ -мінімумами мінімумами з більшою рухливістю, які піднімаються вверх, та двома  $\Delta_1$ -мінімумами з меншою рухливістю, які опускаються вниз за шкалою енергій, що веде до зменшення середньої рухливості, а отже і до зростання питомого опору n-Ge при збільшенні одновісного тиску. Для діапазону одновісних тисків від 0 до 1,5 ГПа питомий опір не змінюється, оскільки в даних умовах  $L_1$ -мінімуми синхронно піднімаються вверх за шкалою енергій, а отже п'єзоопір Смітта-Херрінга буде відсутнім (п'єзоопір, пов'язаний з деформаційним перерозподілом електронів між мінімумами  $L_1$ ). Наявність плато залежності  $\frac{\rho}{\rho_0} = f(P)$  при одновісних тисках  $P > 2,5$  ГПа для температур  $T < 240$  К вказує на те, що всі електрони з  $L_1$ -мінімумів переселились в



$\Delta_1$ -мінімуми. При температурах  $T > 240$  К, як слідує з рис. 5, починає проявлятися при високих тисках власна провідність. Це пояснює зменшення величини п'єзоопору n-Ge при переході через максимум для температур  $T = 240$  К та  $T = 290$  К (рис. 1, криві 5-6).

Згідно з рис. 4, величина максимуму коефіцієнта тензочутливості зі збільшенням температури зменшується. В роботі [16] було показано, що для діапазону температур, коли енергетичні рівні домішки повністю іонізовані і не проявляється механізм власної провідності, питомий опір недеформованих монокристалів n-Ge ( $L_1$  модель зони провідності) змінюється за законом  $\rho \sim T^{1.66}$ , а для однобічно деформованих вздовж кристалографічного напрямку [100] при тискові  $P = 3$  ГПа ( $\Delta_1$  модель зони провідності) як  $\rho \sim T^{1.53}$  (рис. 6). Дані залежності пояснюються наявністю додаткового механізму розсіяння електронів на міждолинних та оптичних фононах в  $L_1$  моделі зони провідності n-Ge та відсутність даного механізму в  $\Delta_1$  моделі. Цей факт, в свою чергу, дозволяє пояснити зменшення величини плато п'єзоопору та максимуму коефіцієнта тензочутливості n-Ge при збільшенні температури. Як виняток, є зменшення величини плато п'єзоопору n-Ge при  $T < 110$  К (рис. 1, крива 1), що може бути пояснено зростанням відносного вкладу домішкового розсіяння. Тому слід очікувати зменшення величини плато п'єзоопору n-Ge при подальшому зниженні температури.

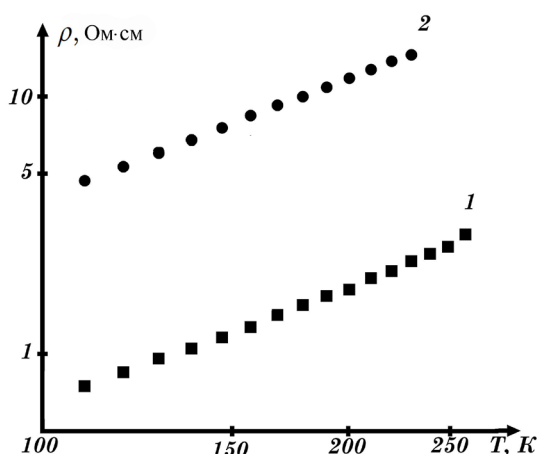


Рис. 6. Температурні залежності питомого опору для монокристалів n-Ge, легованих домішкою сурми, концентрацією  $N_D = 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ : 1 – недеформований зразок ( $L_1$  модель зони провідності); 2 – однобічно деформований зразок при тиску  $P = 3$  ГПа ( $\Delta_1$  модель зони провідності).

Отже, розширення області однобічних тисків від 1,5 до 3 ГПа дозволяє отримати для монокристалів n-Ge значний п'єзоопір та коефіцієнт тензочутливості, величина яких залежать від температури. Отримані результати можуть бути використані для конструювання датчиків тиску, які зможуть працювати в умовах сильних деформаційних полів та інтервалі температур від рідкого азоту до кімнатної. Діапазон вимірювань та точність таких датчиків буде залежати від їх робочих температур.

### Список використаної літератури

- [1]. A.A. Selezniyov, A.Y. Aleinikov, P.V. Ermakov, N.S. Ganchuk, S.N. Ganchuk, R.E. Jones. Molekuliarno-dinamicheskiy raschiot koefitsiyenta teploprovodimosti monokristalla germaniya // Fizika Tviordogo Tela, 54(3), pp. 436-441 (2012).
- [2]. N.V. Chygarev. Pikosekundnaya optoakusticheskaya giperzvukovaya spektroskopiya germaniya / N.V. Chygarev, D.Y. Parashchuk. // Trudy VI vserossiyskoi shkoly-seminara "Liuminiscencyia i soputstvuyushchie yavleniya". Irkutsk. pp. 194-203 (2000).
- [3]. G. M. Martines-duart, R. G. Martin-Palma, F. Agullo-rueda. Nanotehnologii dlia mikro- i optoelektroniki. Tehnosfera. M. (2009).
- [4]. S. Tong, J. Liu, L.J. Wan, K.L. Wang // Appl. Phys. Lett. 80, p.1189 (2002).
- [5]. O.V. Osadchuk, Y.O. Osadchuk. Deformatsiini efekty u napivprovodnykovykh strukturah // Visnyk Khmelnytskogo nacionalnogo universytetu, 2, p.211 (2014).
- [6]. K. Brunner. Si/Ge nanostructures // Rep. Prog. Phys, 65(1), pp. 27-72 (2002).
- [7]. P.I. Baranskyj, V.P. Klochkov, I.V. Potykevych. Poluprovodnikovaja elektronika. Naukova dumka, K. 704 s. (1975).
- [8]. S. Luniov, O. Burban, P. Nazarchuk. Deformation potentials for  $\Delta_1$  minimum of conduction band of single crystals n-Ge // Journal of Advances in Physics, 5(1), pp. 705-711 (2014).
- [9]. S. V. Luniov. Tenzochutlyvistiv v  $\Delta_1$ -modeli zony providnosti krystaliv germaniju // Sensorna elektronika ta mikrosystemni tehnologii, 10(3), pp. 76-81 (2013).
- [10]. S.V. Luniov, P.F. Nazarchuk, O.V. Burban, V.A. Lopuhovich. Metodyka vymirjувannja elektrychnykh vlastyivostej monokrystaliv n-Ge pry vysokyh odnovisnykh tyskah // Visnyk TNTU, 3, pp. 172 (2014).

[11]. V.P. Savchyn, R.Y. Shuvar. Elektronne perenesennja v napivprovidnykah ta napivprovidnykovykh strukturah. Vydavnychiy centr LNU imeni Ivana Franka, Lviv. 687 p. (2008).

[12]. A.L. Poljakova. Deformatcia poluprovodnikov I poluprovodnikovykh priborov. Energija, Moskva. 168 p. (1979).

[13]. P.S. Kireev. Fizika poluprovodnikov. Vysshaja shkola, Moskva. 592 p. (1969).

[14]. P.I. Baranskij, A.V. Fedosov, G.P. Gajdar. Fizychni vlastyvoli krystaliv kremniju ta germaniju v poljah efektyvnogo vplyvu, Nadstytja. Luts'k. 280 p. (2000).

[15]. S.V. Luniov, P.F. Nazarchuk, O.V. Burban.

Parametry vysokoenergetychnogo  $\Delta_1$  – minimumu zony providnosti krystaliv n-Ge. // Zhurnal fizychnykh doslidzhen. Журнал фізичних досліджень, (3), p. 3702 (2013) .

[16]. S. V. Luniov. Effect of phonon scattering of electrons by piezoresistance of single crystals n-Ge / S.V. Luniov, O.V. Burban, P.F. Nazarchuk, A.I. Zimych. // Proceedings of X International Scientific Conference “Electronics and Applied Physics”. Taras Shevchenko National University, Kyiv. pp. 84 -85 (2014).

Стаття надійшла до редакції 17.02.2015 р.