

SENSOR MATERIALS

МАТЕРІАЛИ ДЛЯ СЕНСОРІВ

УДК 621.315.592

DOI <http://dx.doi.org/10.18524/1815-7459.2017.1.96441>

ВПЛИВ ЕЛЕКТРОННОГО ОПРОМІНЕННЯ НА ТЕНЗООПІР МОНОКРИСТАЛІВ n-Ge

¹С. В. Луньов, ¹А. І. Зіміч, ¹М. В. Хвищун, ²В. Т. Маслюк, ²І. Г. Мегела

¹Луцький національний технічний університет,
Вул. Львівська 75, м. Луцьк, 43018, luniovser@mail.ru

²Інститут електронної фізики НАН України,
Вул. Університетська, 21, м. Ужгород, 88017, volodymyr.maslyuk@gmail.com

ВПЛИВ ЕЛЕКТРОННОГО ОПРОМІНЕННЯ НА ТЕНЗООПІР МОНОКРИСТАЛІВ n-Ge

С. В. Луньов, А. І. Зіміч, М. В. Хвищун, В. Т. Маслюк, І. Г. Мегела

Анотація. Досліджено тензоопір при $T=300$ К для опромінених електронами, з енергією 10 МеВ, монокристалів n-Ge, одновісно деформованих вздовж кристалографічних напрямків [100], [110] та [111]. На основі аналізу одержаних залежностей сталої Холла від одновісного тиску було зроблено висновок, що домінуючим механізмом тензоопору опромінених монокристалів n-Ge є зміна співвідношення між концентраціями електронів та дірок при одновісній деформації. Одержана лінійна залежність тензоопору при одновісному тиску $P > 0,25$ ГПа вздовж кристалографічного напрямку [100] може бути використана для конструювання на основі опроміненого n-Ge тензодатчиків для контролю високих одновісних тисків.

Ключові слова: монокристали n-Ge, радіаційні дефекти, тензоопір, стала Холла, одновісний тиск

THE INFLUENCE OF ELECTRON IRRADIATION ON TENSORESISTANCE OF SINGLE CRYSTALS n-Ge

S. V. Luniov, A. I. Zimych, M. V. Khvyshchun, V. T. Maslyuk, I. G. Megela

Abstract. Tensoresistance at $T=300$ K for irradiated by the electrons, with the energy of 10 MeV, single crystals n-Ge, which are uniaxially deformed along the crystallographic directions [100], [110] and [111], is investigated. Based on an analysis of the obtained dependencies of the Hall constant on the uniaxial pressure, it was concluded that the dominant mechanism of tensoresistance of irradiated single crystals n-Ge is a change in the ratio between the concentrations of the electrons and holes at the uniaxial deformation. The obtained linear dependence of the tensoresistance on the uniaxial pressure $P > 0,25$ GPa along the crystallographic direction [100] can be used to design based on irradiated n-Ge the pressure sensors for the control of high uniaxial pressure.

Keywords: single crystals n-Ge, radiation defects, tensoresistance, Hall constant, uniaxial pressure

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА ТЕНЗОСОПРОТИВЛЕНИЕ МОНОКРИСТАЛЛОВ n-Ge

С. В. Лунёв, А. И. Зимич, М. В. Хвещун, В. Т. Маслюк, И. Г. Мегела

Аннотация. Исследовано тензосопротивление при $T=300$ К для облученных электронами с энергией 10 МэВ, монокристаллов n-Ge, одноосно деформированных вдоль кристаллографических направлений [100], [110] и [111]. На основе анализа полученных зависимостей постоянной Холла от одноосного давления был сделан вывод, что доминирующим механизмом тензосопротивления облученных монокристаллов n-Ge является изменение соотношения между концентрациями электронов и дырок при одноосной деформации. Полученная линейная зависимость тензосопротивления при одноосном давлении $P > 0,25$ ГПа вдоль кристаллографического направления [100] может быть использована для конструирования на основе облученного n-Ge тензодатчиков для контроля высоких одноосных давлений.

Ключевые слова: монокристаллы n-Ge, радиационные дефекты, тензосопротивление, постоянная Холла, одноосное давление

1. Вступ

Розвиток ядерної та термоядерної енергетики, атомної та космічної техніки стимулювало дослідження впливу ядерного випромінювання на властивості твердих тіл. Модифікація властивостей твердих тіл за допомогою ядерного випромінювання є потужним інструментом спрямованої зміни їх властивостей, для створення на основі них нових матеріалів та приладів з наперед заданими характеристиками [1]. Серед таких приладів значна увага приділяється сенсорам механічних величин,

які можуть функціонувати в екстремальних умовах дії низьких або високих температур, сильних електричних та магнітних полів, при впливові термічних ударів, механічних напружень та ударних навантажень, вібрацій, радіаційних випромінювань [2, 3]. Це в свою чергу, висуває нові вимоги до датчиків тиску, які широко використовуються у машинобудуванні, транспорті, авіакосмічній промисловості, енергетиці, наукових дослідженнях та ін. За даними багатьох міжнародних наукових конференцій по сенсорній електроніці, наприклад, Eurosensors, XIII-XXIX, 1999-2015,

напівпровідникові структури на основі багатодолинних напівпровідників Si, GaAs та Ge є елементною базою сучасної мікро та наноелектроніки та викликають найбільший інтерес для створення на основі них різних електронних приладів та датчиків. Стабільність параметрів таких структур обумовлена дефектами і домішками, які виникають при технологічному процесі їх отримання або експлуатації. Тому монокристалічний германій є одним з перспективних напівпровідникових матеріалів, який широко використовується в радіаційних технологіях напівпровідників, напівпровідниковій електроніці та сенсоріці [4-7].

2. Експериментальні результати та їх обговорення

В даній роботі досліджувався тензоопір та тензо-холл-ефект при $T=300$ К для неопромінених та опромінених потоком електронів $\Phi=5 \cdot 10^{15}$ см², з енергією 10 МеВ, монокристалів n-Ge, легованих домішкою Sb, концентрацією $5 \cdot 10^{14}$ см⁻³. Одновісний тиск та напрямок струму для досліджуваних зразків n-Ge співпадали з кристалографічними напрямками [100], [110] та [111]. На рис.1 представлено залежності тензоопору для неопромінених монокристалів n-Ge, одновісно деформованих вздовж кристалографічних напрямків [100], [110] та [111], при $T=300$ К.

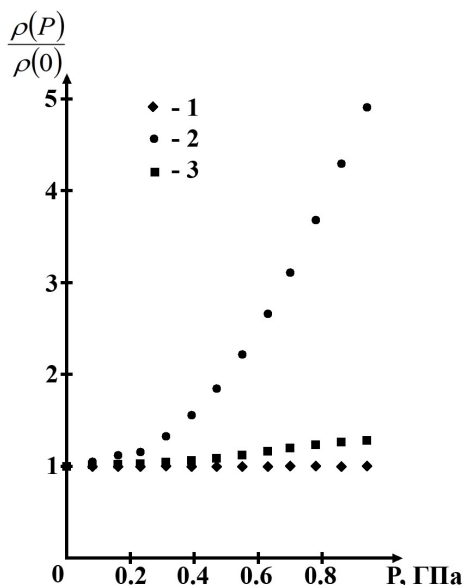


Рис.1. Залежності тензоопору для неопромінених монокристалів n-Ge при $T=300$ К, які одновісно деформовані вздовж різних кристалографічних напрямків: 1 - [100], 2 - [111], 3 - [110].

Як відомо [8, 9], при одновісній деформації n-Ge вздовж кристалографічного напрямку [100] відсутній деформаційний перерозподіл електронів між L_1 -мінімумами зони провідності германію і відповідно тензоопір (рис. 1, крива 1). Для випадків одновісної деформації n-Ge вздовж кристалографічних напрямків [110] та [111] буде відбуватись перерозподіл електронів з різною рухливістю між мінімумами зони провідності германію, які зміщуються при деформації в протилежних напрямках за шкалою енергій [8]. При цьому середня рухливість електронів зменшується, а питомий опір відповідно зростає при збільшенні одновісного тиску (рис. 1, криві 2 та 3). Як було показано нами раніше [10], для цих же умов опромінення в монокристалах n-Ge утворюються радіаційні дефекти з глибокими енергетичними рівнями $E_C - 0,27$ еВ та $E_V + 0,27$ еВ в забороненій зоні германію, які належать А-центру (комплекс вакансія – кисень) [11, 12].

На рис. 2 представлено температурну залежність сталої Холла для неопромінених та опромінених електронами потоком $\Phi=5 \cdot 10^{15}$ см² монокристалів n-Ge. Для одержаної залежності можна виділити такі три характерні температурні області: 1) область іонізації рівня $E_C - 0,27$ еВ (від 180 до 260 К); 2) область іонізації рівня $E_V + 0,27$ еВ (від 285 до 325 К); 3) область власної провідності ($T > 325$ К).

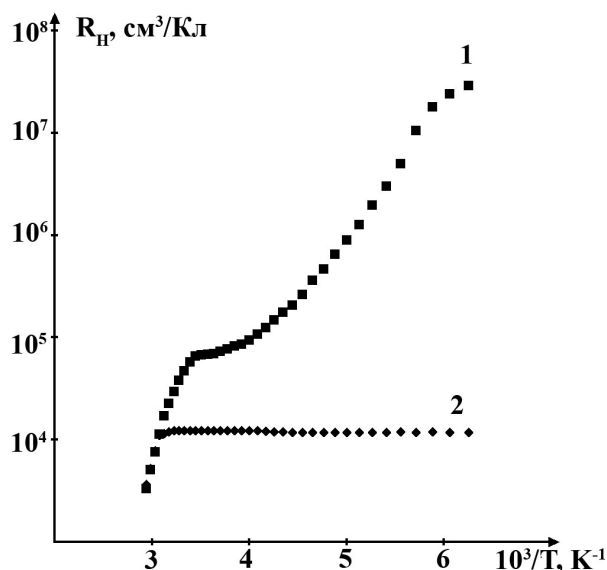


Рис. 2. Температурна залежність сталої Холла для неопромінених (крива 2) та опромінених електронами потоком $\Phi=5 \cdot 10^{15}$ см² монокристалів n-Ge.

Детальний аналіз електричних властивостей опромінених монокристалів n-Ge для першої температурної області було зроблено в роботі [13]. Зокрема, нехарактерне зростання холівської рухливості електронів, порівняно з неопроміненими зразками, при збільшенні величини одновісного тиску вздовж кристалографічного напрямку [100] пояснюється зменшенням градієнтів питомого опору та концентрації заряджених дефектів з рівнем $E_C - 0,27$ еВ при їх перезарядці за рахунок збільшення концентрації електронів в зоні провідності при деформації. Як видно з рис. 2, при $T > 325$ К області власних провідностей для неопромінених та опромінених монокристалів n-Ge повністю співпадають. Очевидно, що для даного випадку радіаційні дефекти, які утворились при електронному опроміненні, не будуть впливати на тензоопір n-Ge. Механізми тензоопору в області власної провідності для неопромінених монокристалів n-Ge детально досліджені в роботах [14, 15]. Практичний інтерес при пошуку тензочутливого матеріалу для тензодатчиків на основі германію представляє дослідження тензоопору опромінених монокристалів n-Ge при кімнатній температурі (область іонізації рівня $E_V + 0,27$ еВ). На рис. 3 представлені залежності тензоопору при одновісному тиску вздовж кристалографічних напрямків [100], [110] та [111] для опромінених електронами монокристалів n-Ge при $T=300$ К. Відомо [16], що зміна величини енергії іонізації глибокого рівня при деформації пояснюється різними значеннями баричних коефіцієнтів зміщення самого рівня та екстремумів зон провідності та валентної. Тому зменшення питомого опору опроміненого n-Ge при збільшенні одновісного тиску, на відміну від неопромінених зразків n-Ge (рис. 1), може бути пов'язане зі зміною концентрації носіїв струму за рахунок зміни енергії іонізації глибокого рівня $E_V + 0,27$ еВ при деформації.

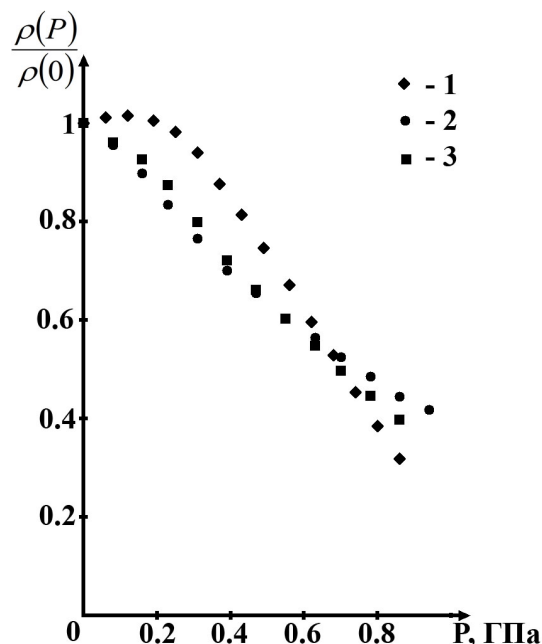


Рис. 3. Залежності тензоопору для опромінених електронами потоком $\Phi=5 \cdot 10^{15}$ см⁻² монокристалів n-Ge при $T=300$ К, які одночасно деформовані вздовж різних кристалографічних напрямків: 1 - [100], 2 - [111], 3 - [110].

Для більш детального вивчення ефекту тензоопору для опромінених монокристалів n-Ge нами також проводились вимірювання тензохолл-ефекту, які представлені на рис. 4.

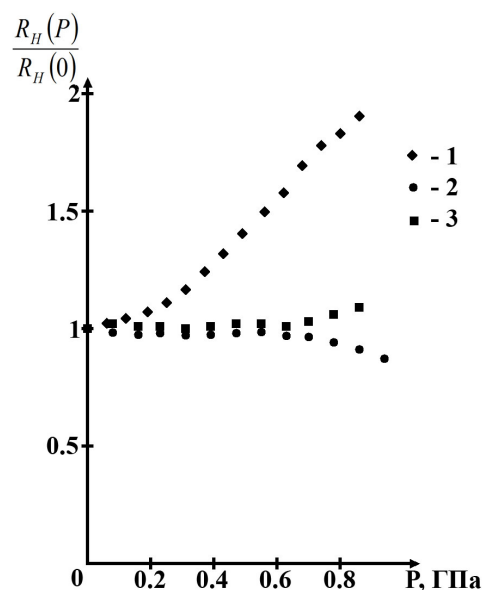


Рис. 4. Залежності сталої Холла для опромінених електронами потоком $\Phi=5 \cdot 10^{15}$ см⁻² монокристалів n-Ge при $T=300$ К, які одночасно деформовані вздовж різних кристалографічних напрямків: 1 - [100], 2 - [111], 3 - [110].

Як слідує з рис. 4, стала Холла практично не залежить від одновісного тиску вздовж кристалографічних напрямків [110] та [111], коли $P < 0,6$ ГПа. Для випадку ж одновісного тиску вздовж кристалографічного напрямку [100] спостерігається монотонне зростання сталої Холла (рис. 4, крива 1). Як відомо [17], для носіїв одного типу (з однією ефективною масою) стала Холла обернено пропорційна до їх концентрації. Тому зростання концентрації носіїв струму при деформації мало б призвести як до зменшення питомого опору, так і сталої Холла. А це суперечить експериментальним результатам, які представлені на рис. 4. Як показують вимірювання часових залежностей тензоопору для неопромінених та опромінених монокристалів n-Ge при фіксованих значеннях одновісних тисків, питомий опір досліджуваних зразків n-Ge не залежить від часу експерименту. Це свідчить про відсутність або другорядну роль механізму механіко-стимульованої провідності та рекомбінаційних процесів за участю утворених радіаційних дефектів. Тому одержані аномальні залежності сталої Холла для опромінених монокристалів n-Ge можуть бути пояснені наявністю носіїв струму двох типів: електронів та дірок з співрозмірними концентраціями. Сталу Холла за наявності носіїв струму з різною рухливістю та концентрацією можна записати так [17]:

$$R_H = \frac{q_1 r_1 n_1 \mu_1^2 + q_2 r_2 n_2 \mu_2^2}{(q_1 r_1 n_1 \mu_1 + q_2 r_2 n_2 \mu_2)^2}, \quad (1)$$

де q_1, q_2 , r_1, r_2 , n_1, n_2 - заряд, холл-фактор, концентрація та рухливість носіїв струму першого типу, а q_1, q_2 , r_1, r_2 , n_1, n_2 - відповідно другого. Для всіх випадків одновісного тиску стала Холла не змінювала знак, а опромінені монокристали n-Ge мали n-тип провідності. Величина сталої Холла в одновісно деформованому n-Ge, згідно з виразом (1), буде залежати, в першу чергу, від співвідношення між концентраціями електронів та дірок. Аналіз випадків одновісного тиску вздовж кристалографічних напрямків [110] та [111] (рис. 4, криві 2 та 3) є ще складнішим, оскільки при цьому необхідно додатково враховувати залежності рухливості електронів від деформації. Також величина тензоопору та сталої Холла для опромі-

нених монокристалів n-Ge залежить від рухливості дірок, яка зростає при збільшенні одновісного тиску [18, 19].

3. Висновки

Одержані залежності тензоопору при одновісному тиску вздовж кристалографічних напрямків [110] та [111] для неопромінених монокристалів n-Ge є нелінійними, особливо при високих одновісних тисках. Даний недолік затрудняє градування на основі германію тензодатчиків і відповідно зменшує точність їх вимірів. Це вимагає додаткової калібровки сигналу датчика. Введення за рахунок електронного опромінення певної концентрації контрольованих радіаційних дефектів дозволяє в широких межах керувати тензочутливістю монокристалів n-Ge. Для випадку одновісного тиску $P > 0,25$ ГПа вздовж кристалографічного напрямку [100] опромінених монокристалів n-Ge були одержані лінійні залежності тензоопору. Така особливість тензоопору, на відміну від неопромінених зразків, може знайти своє практичне використання для конструювання на основі опроміненого n-Ge тензодатчиків для контролю високих одновісних тисків.

Список використаної літератури

- [1]. L. S. Smirnov. Voprosyi radiatsionnoy tehnologii poluprovodnikov. Nauka, Novosibirsk 291 s. (1980) (in Russian).
- [2]. A. G. Buryachenko, G. S. Ranchenko, S. M. Ryabokon. Rezultaty issledovaniya parametricheskoy nadezhnosti aviatsionnyih datchikov davleniya // Aviatsionno-kosmicheskaya tehnika i tehnologiya, 8, s. 240–245 (2013) (in Russian).
- [3]. E. A. Mokrov, I. N. Barinov. Razrabotka vyisokotemperaturnyih poluprovodnikovyih datchikov davleniya // Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol, diagnostika, 1, S. 23-27 (2009) (in Russian).
- [4]. C. Claes, E. Simoen Germanium-Based Technologies. Elsevir, Oxford 449 p. (2007).
- [5]. By Shai Levy, Issai Shlimak, David H. et al. Structure and Spatial Distribution of Ge Nanocrystals Subjected to Fast Neutron Irradiation // Nanomater. Nanotechnol, 1(1), pp. 52-57 (2011).

- [6]. Z. F. Krasilnik, K. E. Kudryavtsev, A. N. Kachemtsev et al. Comparative analysis of radiation effects on the electroluminescence of Si and SiGe/Si(001) heterostructures with self-assembled Islands // *Semiconductors*, 45(2), pp. 225–229 (2011).
- [7]. R. A. Andrievski. Nanostructures under extremes // *Phys-Usp*, 57 (10), pp. 945–958 (2014).
- [8]. P. I. Baranskiy, A. V. Fedosov, G. P. Gaydar. Fizichni vlastivosti kristaliv kremniyu ta germaniyu v polyah efektyvnogo zovnishnogo vplyvu. Nadstir'ya, Lutsk 280 s. (2000) (*in Ukrainian*).
- [9]. S. V. Luniov, O. V. Burban, P. F. Nazarchuk, A. I. Zimych. Influence of electron-phonon interaction on piezoresistance of single crystals n-Ge // *Journal of Advances in Physics*, 7(3), pp. 1931–1938 (2015).
- [10]. 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 (1), pp. 47–52 (2016).
- [11]. J. Fage-Pedersen, A. Nylandsted Larsen and A. Mesli. Irradiation-induced defects in Ge studied by transient spectroscopies // *Phys. Rev. B*, 62(15), pp. 10116–10125 (2000).
- [12]. V. P. Markevich, I. D. Hawkins, A. R. Peaker, V. V. Litvinov, L. I. Murin, L. Dobaczewski and J. L. Lindström. Electronic properties of vacancy–oxygen complex in Ge crystals // *Applied Physics Letters*, 81(10), pp. 1821–1823 (2002).
- [13]. S. V. Luniov, A. I. Zimych, P. F. Nazarchuk, V. T. Maslyuk, I. G. Megela. Specific features of electron scattering in uniaxially deformed n-Ge single crystals in the presence of radiation defects // *Radiation Effects and Defects in Solids*, 171 (11), pp. 855–868 (2016).
- [14]. V. Ya. Duchal, V. N. Ermakov, V. V. Kolomoets. Mehanizmy tenzoeffektov v n-Ge v oblasti smeshanoy provodimosti. // *Fizika i tehnika poluprovodnikov*, 20 (10), s. 1902 – 1904 (1986) (*in Russian*).
- [15]. A. V. Fedosov, S. A. Fedosov, M. V. Khvyshchun, D. A. Zaharchuk. Osoblivosti pyezoporu germaniyu v oblasti vlasnoyi providnosti // *Naukoviy visnik Volinskogo derzhavnogo universitetu imeni Lesi Ukrayinki*, 7, s. 26–30 (2001) (*in Ukrainian*).
- [16]. A. L. Polyakova. Deformatsiya poluprovodnikov i poluprovodnikovykh priborov. – M., Nauka, 168 s. (1979) (*in Russian*).
- [17]. E. V. Kuchis. Galvanomagnitnyie efekty i metody ih issledovaniya. – M., Radio i svyaz, 264 s. (1990) (*in Russian*).
- [18]. P. I. Baranskiy, V. P. Duchal, V. V. Kolomoets, V. V. Chernyish. Anizotropiya podvizhnosti i deformatsionnyie potentsialyi valentnoy zonyi germaniya pri silnoy odnoosnoy deformatsii // *Fizika i tehnika poluprovodnikov*, 20 (11), s. 2112 – 2115 (1986) (*in Russian*).
- [19]. Ma, J., Fu, Z., Liu, P. et al. Hole mobility enhancement in uniaxial stressed Ge dependence on stress and transport direction // *Sci. China Phys. Mech. Astron*, 57, pp. 1860–1865 (2014).

Стаття надійшла до редакції 18.01.2017 р.

THE INFLUENCE OF ELECTRON IRRADIATION ON TENSORESISTANCE OF SINGLE CRYSTALS n-Ge

¹S. V. Luniov, ¹A. I. Zimych, ¹M. V. Khvyshchun, ²V. T. Maslyuk, ²I. G. Megela

¹Lutsk National Technical University,
²Institute of Electron Physics NAS of Ukraine

Summary

Tensoresistance at the uniaxial pressure along the crystallographic directions [100], [110] and [111] for unirradiated and irradiated single crystals n-Ge by the flow of electrons $F=5 \cdot 10^{15}$ el./cm², with the energy of 10 MeV, is investigated in the work. The presence of the tensorresistance for unirradiated single crystals n-Ge by the decrease of the average electrons mobility at the expense the deforming redistribution of electrons between the minima of conduction band of germanium with different mobility is explained. For the irradiated samples n-Ge the resistivity with the increasing uniaxial pressure has decreased for all crystallographic directions. For a more detailed study of the tensorresistance effect of the irradiated single crystals n-Ge, the measurements of tenso-Hall effect also have been conducted. The anomalous dependences of the Hall constant on uniaxial pressure along the crystallographic directions [100], [110] and [111] were obtained. With an analysis of these dependencies concluded that the observed tensorresistance effect for irradiated single crystals n-Ge, mainly, explains by the mechanisms of the mixed conductivity: by the changes of electrons concentration in the conduction band and holes in the valence band by changing the ionization energy of deep level $E_V + 0,27$ eV at the uniaxial pressure. The investigations of tensorresistance and tenso-Hall effect at room temperature were carried out. For irradiated single crystals of n-Ge, at the uniaxial pressure $P > 0,25$ GPa along the crystallographic direction [100], the linear dependence of the tensorresistance was obtained. Such feature of the tensorresistance, unlike the unirradiated samples, can find a practical use for designing based on irradiated n-Ge the pressure sensors for the control of high uniaxial pressure.

Keywords: single crystals n-Ge, radiation defects, tensorresistance, Hall constant, uniaxial pressure

УДК 621.315.592

DOI <http://dx.doi.org/10.18524/1815-7459.2017.1.96441>

ВПЛИВ ЕЛЕКТРОННОГО ОПРОМІНЕННЯ НА ТЕНЗООПІР МОНОКРИСТАЛІВ n-Ge

¹С. В. Луньов, ¹А. І. Зіміч, ¹М. В. Хвищун, ²В. Т. Маслюк, ²І. Г. Мегела

¹Луцький національний технічний університет,
²Інститут електронної фізики НАН

Реферат

В роботі досліджено тензоопір при одновісному тискові вздовж кристалографічних напрямків [100], [110] та [111] для неопромінених та опромінених потоком електронів $\Phi=5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$, з енергією 10 МеВ, монокристалів n-Ge. Наявність тензоопору для неопромінених монокристалів n-Ge пояснюється зменшенням середньої рухливості електронів за рахунок деформаційного перерозподілу електронів між мінімумами зони провідності германію з різною рухливістю. Для опромінених зразків n-Ge питомий опір при збільшенні одновісного тиску зменшується для всіх кристалографічних напрямків. Для більш детального вивчення ефекту тензоопору для опромінених монокристалів n-Ge також проводились вимірювання тензо-холл-ефекту. Були одержані аномальні залежності сталої Холла від одновісного тиску вздовж кристалографічних напрямків [100], [110] та [111]. З аналізу даних залежностей було зроблено висновок, що одержаний ефект теноопору для опромінених монокристалів n-Ge пояснюється, в основному, механізмами змішаної провідності: змінами концентрації електронів в зоні провідності, а дірок у валентній зоні за рахунок зміни енергії іонізації глибокого рівня $E_V + 0,27 \text{ eV}$ при одновісному тискові. Дослідження тензоопору та тензо-холл-ефекту проводились при кімнатній температурі. Для опромінених монокристалів n-Ge, при одновісному тиску $P > 0,25 \text{ ГПа}$ вздовж кристалографічного напрямку [100], була одержана лінійна залежність тензоопору. Така особливість тензоопору, на відміну від неопромінених зразків, може знайти своє практичне використання для конструювання на основі опроміненого n-Ge тензодатчиків для контролю високих одновісних тисків.

Ключові слова: монокристали n-Ge, радіаційні дефекти, тензоопір, стала Холла, одновісний тиск