

Г.П. Гайдар, П.І. Баранський¹

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ ДОКАЗ НЕЗМІННОСТІ ФОРМИ ІЗОЕНЕРГЕТИЧНИХ ЕЛІПСОЇДІВ *n*-Ge В УМОВАХ СИЛЬНОЇ ОДНОВІСНОЇ ПРУЖНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ

Досліджено зміни тензоопору в кристалах *n*-Ge та *n*-Si різних кристалографічних орієнтацій у широкому інтервалі механічних напружень стиску при 77 К. Встановлено, що під впливом сильної одновісної деформації ізоенергетичні еліпсоїди *n*-Ge, зберігаючи свою форму незмінною, зазнають лише відносних зміщень по шкалі енергії. Виявлено, що ізоенергетичні еліпсоїди *n*-Si за умов, при яких можливий прояв деформації зсуву, змінюють свою форму внаслідок зростання поперечної ефективної маси носіїв заряду з ростом механічного навантаження X . Запропоновано важливий для практики метод деформаційно-зумовленої екстраполяції для визначення параметра анізотропії рухливості кристалів *n*-Si в умовах прояву деформації зсуву.

Ключові слова: германій, кремній, одновісна пружна деформація, тензоопір, ізоенергетичний еліпсоїд, параметр анізотропії рухливості.

1. ВСТУП

Відповідно до уявлень теорії Сміта–Херрінга, при пружному деформуванні багатодолинних напівпровідників у напрямку, відносно якого ізоенергетичні еліпсоїди розташовані несиметрично, енергетична еквівалентність долин може бути порушена, внаслідок чого виникатиме міжмінімумний перерозподіл носіїв заряду (при незмінній їх концентрації в зоні провідності), що, в свою чергу, спричинить зміни питомого опору досліджуваного кристала під впливом направленої деформації [1–4].

При симетричному розміщенні осі деформації відносно ізоенергетичних еліпсоїдів, коли міжмінімумний перерозподіл носіїв заряду всередині зони провідності виключено, тензоопір Сміта–Херрінга з'являтися не повинен. Однак у кристалах *n*-Ge навіть за таких умов ($\vec{X} \parallel \vec{J} \parallel [100]$, X – механічне напруження, J – струм) при досить високих $X > 1$ або 1,5 ГПа (відповідно для температур $T = 300$ і 77 К) виникає тензоопір, пов'язаний із закидом носіїв заряду з мінімумів типу $\langle 111 \rangle$ у розташовані вище мінімуми типу $\langle 100 \rangle$ [5]. Особливістю тензоопору, що виникає в *n*-Si при $\vec{X} \parallel \vec{J} \parallel [111]$, яка відрізняє його від тензоопору в *n*-Ge при $\vec{X} \parallel \vec{J} \parallel [100]$, є характерне для *n*-Si зростання ρ_X / ρ_0 , починаючи з найменших механічних напружень стиску X [6]. Як теорія [7], так і дані з циклотронного резонансу [8] в одновісно-деформованому *n*-Si показують, що за наявності компоненти деформації зсуву (характерної для $\vec{X} \parallel [111]$ в *n*-Si) поперечна ефективна маса носіїв заряду m_{\perp} лінійно збільшується з ростом X (приблизно на 1 % на кожні 0,25 ГПа). Отже, в *n*-Si можлива поява тензоопору, пов'язаного зі зміною рухливості $\mu = \mu(X)$.

Дослідження змін питомого опору багатодолинних напівпровідників під впливом направленої пружної деформації зазвичай проводилися у припущенні, що ізоенергетичні еліпсоїди зазнають лише зміщень по шкалі енергії, але їх форма при цьому залишається незмінною. З урахуванням важливості зазначеного припущення метою даної роботи була його експериментальна перевірка на монокристалах германію і кремнію *n*-типу провідності різної кристалографічної орієнтації.

2. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Для постановки експерименту зі зливка n -Ge ($n_e \cong 9,5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$) два зразки вирізалися в кристалографічному напрямку [111], а інші два – в напрямку [110]; зі зливка n -Si ($n_e \cong 7,10 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$) три зразки вирізалися в напрямку [100], а ще три – в напрямку [110]. Вивчався поздовжній тензоопір кристалів (струм крізь зразок спрямовувався вздовж осі деформації $\vec{J} \parallel \vec{X}$). Механічні напруження, які прикладалися до зразків, знаходилися в межах $0 < X \leq 0,9$ ГПа.

Для дослідження поздовжнього тензоопору в широкому інтервалі механічних напружень стиску ($0 < X \leq 1,4$ ГПа) зі зливка n -Si з концентрацією носіїв заряду $n_e \cong 3,47 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ було вирізано три зразки в кристалографічному напрямку [100]; зі зливка n -Si з $n_e \cong 3,54 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ ще три зразки вирізалися в напрямку [110].

Зміни тензоопору кристалів n -Ge та n -Si різних кристалографічних орієнтацій вимірювалися при $T = 77$ К. Одержані результати наведено на рис. 1 та 2.

На основі результатів вимірювань тензоопору n -Ge за умов $\vec{X} \parallel \vec{J} \parallel [111]$ та n -Si при $\vec{X} \parallel \vec{J} \parallel [100]$ можна визначити таку фундаментальну характеристику цих кристалів, як параметр анізотропії рухливості в окремо взятому ізоенергетичному еліпсоїді:

$$K = \mu_{\perp} / \mu_{\parallel} = K_m / K_{\tau} = (m_{\parallel} \langle \tau_{\perp} \rangle) / (m_{\perp} \langle \tau_{\parallel} \rangle), \quad (1)$$

де μ_{\parallel} і μ_{\perp} – рухливості носіїв заряду вздовж і поперек довгої осі еліпсоїда відповідно; $K_m = m_{\parallel} / m_{\perp}$ – параметр анізотропії ефективної маси; m_{\parallel} і m_{\perp} – ефективні маси носіїв заряду вздовж і поперек довгої осі ізоенергетичного еліпсоїда відповідно; $K_{\tau} = \langle \tau_{\parallel} \rangle / \langle \tau_{\perp} \rangle$ – параметр анізотропії розсіяння; τ_{\parallel} і τ_{\perp} – компоненти тензора часу релаксації за відсутності магнітного поля у лінійному наближенні. Параметр K пов'язано з граничним значенням тензоопору співвідношенням [3]:

$$K = 1,5 \cdot (\rho_{\infty}^{[ikl]} / \rho_0) - 0,5, \quad (2)$$

де $[ikl] = \begin{cases} [111] & \text{для } n\text{-Ge} \\ [100] & \text{для } n\text{-Si} \end{cases}$, ρ_0 – питомий опір кристала за відсутності деформації. Під

граничним значенням тензоопору мається на увазі величина $\rho_{\infty}^{[ikl]} / \rho_0 \equiv \lim_{X \rightarrow \infty} (\rho(X) / \rho_0)$ при деформації X , яка забезпечує повне переселення носіїв заряду (за умови $T = \text{const}$) з еліпсоїдів, які піднімаються вгору по шкалі енергії, в еліпсоїди, які опускаються вниз. Оскільки для n -Ge, відповідно до [3],

$$\rho_{\infty}^{[110]} = 3 (e n_e)^{-1} (\mu_{\perp} + 2\mu_{\parallel})^{-1}, \quad (3)$$

$$\rho_{\infty}^{[111]} = (e n_e \mu_{\parallel})^{-1}, \quad (4)$$

де e – заряд електрона, а n_e – повна концентрація носіїв заряду в кристалі, то параметр анізотропії рухливості матиме вигляд:

$$K = 3 \cdot (\rho_{\infty}^{[111]} / \rho_{\infty}^{[110]}) - 2. \quad (5)$$

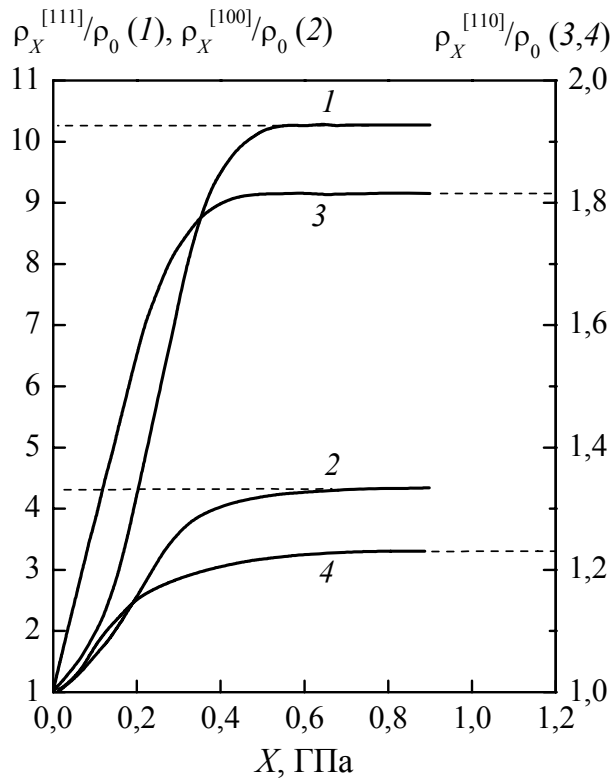


Рис. 1. Залежності поздовжнього тензопору ρ_X/ρ_0 від механічного напруження стиску $0 < X \leq 0,9$ ГПа, виміряні при $T = 77$ К на кристалах n -Ge ($n_e \cong 9,5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$) (1, 3) та n -Si ($n_e \cong 7,1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$) (2, 4) різної кристалографічної орієнтації в умовах: 1 – $\vec{X} \parallel \vec{J} \parallel [111]$; 2 – $\vec{X} \parallel \vec{J} \parallel [100]$; 3, 4 – $\vec{X} \parallel \vec{J} \parallel [110]$.

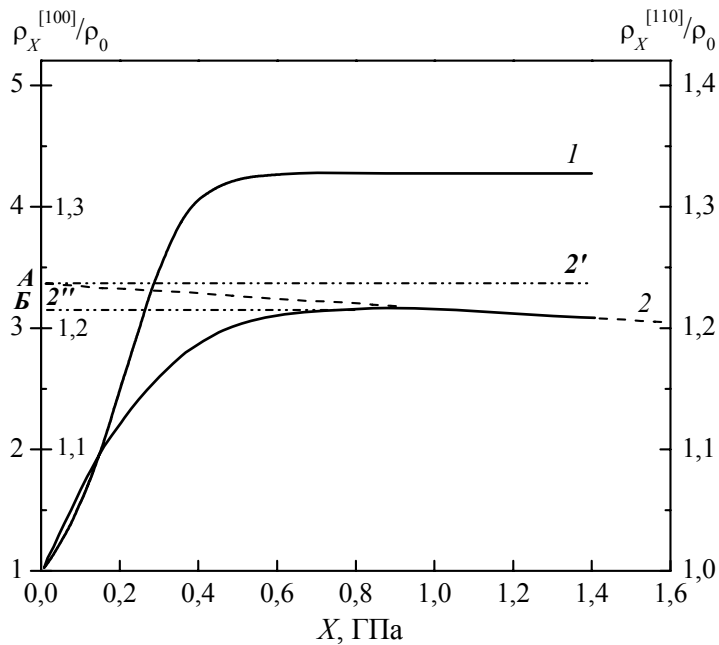


Рис. 2. Залежності поздовжнього тензопору $\rho_X/\rho_0 = f(X)$, виміряні при $T = 77$ К в широкому інтервалі механічних напружень стиску $0 < X \leq 1,4$ ГПа на кристалах n -Si: 1 – $n_e \cong 3,47 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ при $\vec{X} \parallel \vec{J} \parallel [100]$; 2 – $n_e \cong 3,54 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ при $\vec{X} \parallel \vec{J} \parallel [110]$. Точка А відповідає перетину продовження прямолінійної ділянки кривої 2 з віссю ординат; пряма $B2''$ – дотична до кривої 2 в її максимумі; пряма $A2'$ – паралельна прямій $B2''$.

Підвищення надійності і точності перевірки недеформованості ізоенергетичних еліпсоїдів n -Ge у даній роботі забезпечувалося за рахунок того, що питомий опір, вимірний у двох різних напрямках, було введено у формулу (5) у вигляді відношення вимірюваних величин. А збіг значень параметра K (14,98 та 15; див. табл., частину I), отриманих за умов вимірювань тензоопору при прикладанні тиску X у двох напрямках (рис. 1, криві 1, 3) і використання формул (5) та (2) для n -Ge, можна вважати переконливим доказом недеформованості еліпсоїдів у дослідженнях з кристалами n -Ge.

Друга серія експериментів (табл., частина II) щодо вивчення тензоопору проводилася на зразках n -Si при 77 К до значень X , що відповідали умовам насичення (рис. 1, криві 2, 4). При деформуванні n -Si в умовах $\vec{X} \parallel \vec{J} \parallel [100]$ та $\vec{X} \parallel \vec{J} \parallel [110]$ справедливими є відповідно співвідношення (2) та (6) [3]:

$$K^{[110]} = \left[3 \cdot \left(\rho_{\infty}^{[110]} / \rho_0 \right) - 2 \right] / \left[4 - 3 \cdot \left(\rho_{\infty}^{[110]} / \rho_0 \right) \right]. \quad (6)$$

Використавши дані з тензоопору, виміряні на n -Si (рис. 1, криві 2, 4), та вирази (2) і (6), одержали такі значення для параметра анізотропії рухливості у різних кристалографічних напрямках: $K^{[100]} = 5,97$ і $K^{[110]} = 5,45$. Виявлену особливість кристалів n -Si ($K^{[110]} \neq K^{[100]}$), як і появу тензоопору в напрямку $[111]$ [6], можна розглядати як результат зміни поперечної ефективної маси носіїв заряду $m_{\perp} = m_{\perp}(X)$ при наявності деформації зсуву в n -Si (відсутньої при $\vec{X} \parallel \vec{J} \parallel [100]$ і характерної для напрямків $[110]$ та $[111]$), що пов'язано з деяким відхиленням форми ізоенергетичного еліпсоїда від еліпсоїда обертання. Цей результат (що повністю відповідає раніше виявленому в дослідженнях з циклотронним резонансом в області гелієвих температур [8]) одержано в даній роботі при 77 К в умовах вивчення ефекту тензоопору, придатного для роботи не тільки з вільними від домішок, але й з легованими кристалами.

Аналізуючи отримані дані, слід зазначити, що в умовах пружного деформування n -Si у напрямках $[100]$ і $[110]$ кінцевий результат дещо по-різному міг би змінювати той факт, що міждолинне f -розсіяння електронів (при $X \rightarrow \infty$) можна вважати повністю виключеним лише в умовах вимірювань $\rho_{\infty}^{[100]} / \rho_0$, тоді як при вимірюваннях $\rho_{\infty}^{[110]} / \rho_0$ міждолинне розсіяння f -типу могло б частково себе проявляти. Але цей ефект міг би проявитися лише при $T > 100$ К [9, 10], тоді як дослідження виконувалися при 77 К.

Розширивши інтервал механічних напружень стиску до 1,4 ГПа (що значно виходить за межі насичення функції $\rho_{\infty}^{[110]} / \rho_0 = f(X)$), на зразках n -Si різної кристалографічної орієнтації провели третю серію експериментів з вивчення тензоопору (рис. 2 і табл., частина III). Враховуючи зміни ефективної маси носіїв заряду при зростанні механічного напруження $\vec{X} \parallel [110]$ на кристалі, необхідно було відмовитися (для обчислення K за допомогою (2)) від використання значень тензоопору $\rho_{\infty}^{[110]} / \rho_0$ в області типового насичення (при $X \approx 0,7-0,9$ ГПа), оскільки (у зв'язку з $m_{\perp} = m_{\perp}(X) = \text{const} \cdot X$) усі значення $\rho_{\infty}^{[110]} / \rho_0$ у межах $0 \leq X \leq X_{\infty}$ будуть заниженими пропорційно X . Значення $\rho_{\infty}^{[110]} / \rho_0$, придатне для обґрунтованого використання в формулі (6), можна знайти, істотно розширивши діапазон значень X до ділянки яскраво вираженого лінійного спадання кривої 2 (рис. 2), екстраполюючи цей відрізок прямої до перетину з віссю ординат у точці A .

Із формули (6) одержимо вираз для тензоопору n -Si при $\vec{X} \parallel \vec{J} \parallel [110]$:

$$\rho_{\infty}^{[110]} / \rho_0 = \left[2 \cdot (2K + 1) \right] / \left[3 \cdot (K + 1) \right]. \quad (7)$$

Таблиця. Результати обробки даних з тензоопору, одержаних (при $T = 77$ К) на зразках n -Ge та n -Si різної кристалографічної орієнтації експериментальним шляхом та методом деформаційно-зумовленої екстраполяції.

I	Матеріал	Кристалогр. орієнтація	n_{e_3} см ⁻³	$\frac{\rho_{\infty}^{[111]}}{\rho_0}$	$K = \frac{3}{2} \frac{\rho_{\infty}^{[111]}}{\rho_0} - \frac{1}{2}$	$\frac{\rho_{\infty}^{[110]}}{\rho_0}$	$K = 3 \frac{\rho_{\infty}^{[111]}}{\rho_{\infty}^{[110]}} - 2$		
	n -Ge	[111] (2 зр.); [110] (2 зр.)	$9,5 \cdot 10^{13}$	10,26	14,98	1,81	15,00		
II	Матеріал	Кристалогр. орієнтація	n_{e_3} см ⁻³	$\frac{\rho_{\infty}^{[100]}}{\rho_0}$	$K^{[100]} = \frac{3}{2} \frac{\rho_{\infty}^{[100]}}{\rho_0} - \frac{1}{2}$	$\frac{\rho_{\infty}^{[110]}}{\rho_0}$	$K^{[110]} = \frac{3 \frac{\rho_{\infty}^{[110]}}{\rho_0} - 2}{4 - 3 \frac{\rho_{\infty}^{[110]}}{\rho_0}}$		
	n -Si	[100] (3 зр.); [110] (3 зр.)	$7,1 \cdot 10^{13}$	4,31	5,97	1,23	5,45		
III	Матеріал	Кристалогр. орієнтація	n_{e_3} см ⁻³	$\frac{\rho_{\infty}^{[100]}}{\rho_0}$	$K^{[100]} = \frac{3}{2} \frac{\rho_{\infty}^{[100]}}{\rho_0} - \frac{1}{2}$	$\frac{\rho_{\infty}^{[110]}}{\rho_0} \Big _A$ \equiv $\frac{\rho_{\infty}^{[110]}}{\rho_0} \Big _{A'}$	$K^{[110]} \Big _{A''}$ рис. 3 ($A \rightarrow A' \rightarrow A''$)	$\frac{\rho_{\infty}^{[110]}}{\rho_0} \Big _B$ \equiv $\frac{\rho_{\infty}^{[110]}}{\rho_0} \Big _{B'}$	$K^{[110]} \Big _{B''}$ рис. 3 ($B \rightarrow B' \rightarrow B''$)
	n -Si	[100] (3 зр.)	$3,47 \cdot 10^{13}$	4,27	5,89				
	n -Si	[110] (3 зр.)	$3,54 \cdot 10^{13}$			1,24	5,91	1,21	4,63

Зображуючи графічно розраховану за формулою (7) залежність $\rho_{\infty}^{[110]}/\rho_0$ від K при зміні K у межах від 3 до 7 (рис. 3) і здійснюючи перенесення значення $\rho_{\infty}^{[110]}/\rho_0$ з точки A в точку A' (на вісь ординат рис. 3), у точці A'' знаходимо значення $K^{[110]} \Big|_{A''} = 5,91$ (табл., частина III). Практично таке ж значення параметра $K^{[100]} = 5,89$ для n -Si було одержано за допомогою співвідношення (2) з використанням величини $\rho_{\infty}^{[100]}/\rho_0 = 4,27$, що відповідає значенню тензоопору в області насичення кривої I (рис. 2).

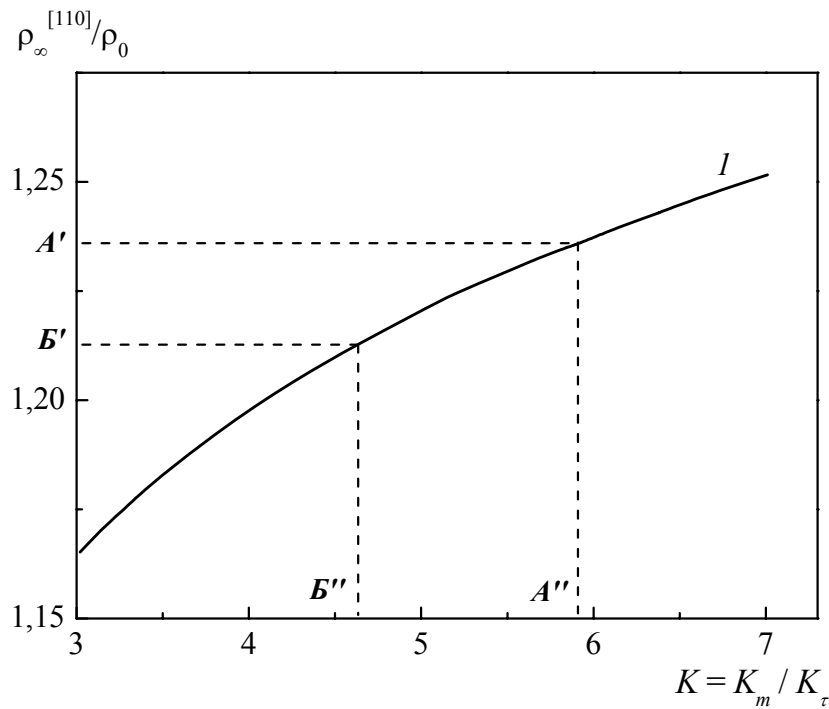


Рис. 3. Крива I – результат розрахунку [з використанням формули (7)] залежності $\rho_{\infty}^{[110]}/\rho_0$ від величини параметра анізотропії рухливості K , який змінювався у межах від 3 до 7 [як аргумент обчислюваної функції $\rho_{\infty}^{[110]}/\rho_0 = f(K)$].

Аналогічна операція з переведенням точки B в B'' (по шляху $B \rightarrow B' \rightarrow B''$) приводить до значення $K^{[110]}|_{B''} = 4,63$ (табл., частина III), яке суттєво відрізняється як від значення $K^{[100]} = 5,89$, одержаного безпосередньо за допомогою величини $\rho_{\infty}^{[100]}/\rho_0$ (в насиченні кривої I на рис. 2), так і шляхом екстраполяційної обробки залежності $\rho_{\infty}^{[110]}/\rho_0 = f(X)$ кривої 2 на рис. 2 ($K^{[110]}|_{A''} = 5,91$). Таким чином, у дослідженнях з тензоопору в n -Si (при $\vec{X} \parallel \vec{J} \parallel [110]$ і $T=77$ К) одержано додаткове підтвердження ($K^{[110]} \neq K^{[100]}$) перебудови ізоенергетичних еліпсоїдів під впливом деформації зсуву.

3. ВИСНОВКИ

Запропоновано метод деформаційно-зумовленої екстраполяції, який дозволяє при деформації n -Si навіть у кристалографічному напрямку $[110]$ (при $\vec{X} \parallel \vec{J} \parallel [110]$), для якого є характерним прояв деформації зсуву, отримати значення параметра анізотропії рухливості $K^{[110]}$, котре (в межах похибки експерименту) збігається зі значенням $K^{[100]}$, що одержується в умовах відсутності прояву деформації зсуву (при $\vec{X} \parallel \vec{J} \parallel [100]$).

Експериментально доведено, що при накладанні на кристали n -Ge одновісної пружної деформації стиску X відбувається лише зміщення ізоенергетичних еліпсоїдів по шкалі енергій, але форма еліпсоїдів залишається незмінною. Цей висновок тим більш цікавий, що в дослідженнях з n -Si за умов, при яких можливий прояв компонент деформації зсуву, повна недеформованість ізоенергетичних еліпсоїдів не зберігається. У цьому є суттєва відмінність направлено сильно деформованих кристалів n -Ge від аналогічним чином деформованих кристалів n -Si.

G.P. Gaidar, P.I. Baranskii¹

EXPERIMENTAL EVIDENCE OF INVARIABILITY IN THE SHAPE OF *n*-Ge ISOENERGETIC ELLIPSOIDS INFLUENCED BY STRONG UNIAXIAL ELASTIC STRAINS

Tensoresistance changes in the *n*-Ge and *n*-Si crystals of different crystallographic orientations have been investigated in a wide range of the mechanical compressive stresses at 77 K. It has been ascertained that under the influence of strong uniaxial strains the *n*-Ge isoenergetic ellipsoids shift only relatively to each other in the energy scale, keeping their shape unchanged. It has been found that, under conditions when shear strains are possible, the *n*-Si isoenergetic ellipsoids change their shape due to the growth of the transverse effective mass of charge carriers with an increase in the mechanical load *X*. The extrapolation method has been proposed to determine the anisotropy parameter of mobility for *n*-Si crystals under conditions of shear strains manifestation. This method is very important for practice.

Keywords: germanium, silicon, uniaxial elastic strain, tensorresistance, isoenergetic ellipsoid, anisotropy parameter of mobility.

1. Будзуляк С.І. Тензорезистивні ефекти в сильно деформованих кристалах *n*-Si та *n*-Ge. *Фізика і хімія твердого тіла*. 2012. **13**, № 1. С. 34–39.
2. Гайдар Г.П. Тензосопротивление кристаллов *n*-Ge и *n*-Si при наличии радиационных дефектов. *Физика и техника полупроводников*. 2015. **49**, № 9. С. 1164–1168.
3. Баранський П.І., Федосов А.В., Гайдар Г.П. *Фізичні властивості кристалів кремнію та германію в полях ефективного зовнішнього впливу*. Луцьк: Надстир'я, 2000.
4. Гайдар Г.П. *Кинетика электронных процессов в Si и Ge в полях внешних воздействий*. Монография. Saarbrücken, Deutschland: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015. 268 с.
5. Баранський П.І., Коломоец В.В., Федосов А.В. Пьезосопротивление, возникающее в условиях симметричного расположения оси деформации относительно всех изоэнергетических эллипсоидов в *n*-Ge. *Физика и техника полупроводников*. 1976. **10**, № 11. С. 2179–2181.
6. Баранський П.І., Коломоец В.В., Федосов А.В. Пьезосопротивление, возникающее в условиях симметричного расположения оси деформации относительно всех изоэнергетических эллипсоидов в *n*-Si. *Физика и техника полупроводников*. 1979. **13**, № 4. С. 815–819.
7. Бир Г.Л., Пикус Г.Е. *Симметрия и деформационные эффекты в полупроводниках*. Москва: Наука, 1972.
8. Hensel J.C., Hasegawa H., Nakayama M. Cyclotron resonance in uniaxially stressed silicon. II. Nature of the covalent bond. *Phys. Rev.* 1965. **138**, No. 1A. P. A225–A238.
9. Федосов А.В., Лунёв С.В., Федосов С.А. Особенности междолинного рассеяния носителей тока в *n*-Si при высоких температурах. *Физика и техника полупроводников*. 2010. **44**, № 10. С. 1307–1309.
10. Панасюк Л.І., Коломоець В.В., Божко В.В. Про домінуючу роль *f*-переходів у міждолинному розсіюванні в *n*-Si при температурі $T = 300\text{--}450$ К. *Наук. вісн. Волин. нац. ун-ту ім. Лесі Українки. Фіз. науки*. 2012. № 3. С. 3–8.

Інститут ядерних досліджень
НАН України
47, просп. Науки,
03680 Київ, Україна
E-mail: gaidar@kinr.kiev.ua

¹Інститут фізики напівпровідників
ім. В.Є. Лашкарьова НАН України
45, просп. Науки,
03680 Київ, Україна