

doi: <https://doi.org/10.15407/dopovidi2019.05.067>

УДК 621.315.592

**Г.П. Гайдар**

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ

E-mail: [gaydar@kinr.kiev.ua](mailto:gaydar@kinr.kiev.ua)

## До методології визначення тензоопору $n$ -Ge та $n$ -Si у кристалографічних напрямках $\langle 110 \rangle$

Представлено академіком НАН України О.Є. Бєляєвим

*У рамках теорії анізотропного розсіяння для багатодолинних напівпровідників  $n$ -Ge та  $n$ -Si одержано корисні для практичного застосування вирази, які дають змогу розраховувати значення тензоопору в насиченні для кристалографічних напрямків, де цей ефект незначний, за результатами вимірювання тензоопору в інших кристалографічних напрямках, де вказаний ефект значний за величиною.*

**Ключові слова:** кремній, германій, тензоопір, параметр анізотропії рухливості.

Останнім часом велика увага приділяється дослідженню впливу направлених пружних деформацій на фізичні властивості напівпровідників, що зумовлено низкою чинників.

Одновісна деформація знижує симетрію кристала, змінюючи його фізичні властивості. Направлені деформаційні впливи на кристали, що змінюють як міжатомні відстані, так і симетрію ґратки, спричиняють істотні зміни електронної підсистеми багатодолинних напівпровідників. Фізичні властивості кристалів кубічної симетрії, які були ізотропними у природному стані кристала, у разі направленої деформації набувають анізотропного характеру [1].

Кількісні зміни кінетичних коефіцієнтів, зумовлені одновісними пружними деформаціями, за порядком величин є набагато більшими, ніж зміни, що спричинені такими самими за величиною, але всебічними деформаціями (гідростатичним тиском).

У разі одновісного деформування кристалів можуть з'являтися зовсім нові фізичні явища. Наприклад, саме завдяки використанню направленої деформації вперше було описано явище, назване фотоп'єзоелектричним ефектом, яке полягало в появі електричної різниці потенціалів у деформованому та освітленому зразку германію [2].

Оскільки ефект тензоопору досить чутливий до наявності глибоких рівнів, то особливо перспективними і результативними є дослідження у разі одновісної пружної деформації кристалів із домішковими центрами, які мають глибокі енергетичні рівні у забороненій зоні [3]. Вивчення поведінки глибоких центрів у разі деформації дає можливість визначити характер зв'язку локальних електронних станів цих центрів із найближчими зонами, тип

симетрії дефекту, ступінь деформації внутрішніх зв'язків у ґратці. У багатодолинних напівпровідниках типу  $n$ -Ge та  $n$ -Si властивості електронів, що належать одній долині, важко піддаються дослідженню внаслідок симетричного розташування еліпсоїдів енергії в просторі квазіімпульсів  $\vec{k}$ , отже, ізотропного характеру кінетичних властивостей усього кристала. Штучно знижуючи симетрію кристала за допомогою одновісної деформації, можна отримати інформацію, яка характеризує кожен екстремум окремо.

За допомогою одновісних деформацій можна змінювати властивості напівпровідників у певному потрібному напрямку, отримувати матеріали з новими, наперед заданими властивостями. Розробка високоефективних нових технологій, що використовують ефекти впливу одновісного тиску в епітаксійних шарах (МОН (метал—окисел—напівпровідник) транзистори з  $n$ - і  $p$ -типом провідності фірми Intel Corporation [4, 5]), розвиток нового напрямку електроніки, який одержав назву велетроніка (valleytronics) [6, 7], — усе це надає нового імпульсу дослідженням впливу направлених пружних деформацій на багатодолинні напівпровідники типу  $n$ -Ge та  $n$ -Si.

На сьогодні високі вимоги в області техніки щодо надійності роботи напівпровідникових приладів та їхньої стійкості до зовнішніх впливів спонукають дослідників до застосування методів, які дають найбільш точні й однозначні результати в ході визначення основних параметрів матеріалів у широких інтервалах змін зовнішніх умов, серед яких чільне місце справедливо займає деформаційна метрологія [8]. Так, значна інформативність методу тензоопору дає змогу глибше й детальніше досліджувати властивості напівпровідників, з високим ступенем достовірності вивчати особливості їх зонної структури, анізотропію фізичних властивостей, надійно визначати параметри і величини, які характеризують механізми розсіяння носіїв заряду [9–12].

У ході експериментального дослідження властивостей напівпровідників час від часу виникає потреба вимірювати малі за значенням параметри або параметри, які досить чутливі до впливу незначних неоднорідностей, що існують у кристалі. Однак, коли важкодоступний для вимірювання параметр пов'язаний співвідношенням із легко вимірюваним, то доцільно експериментально отримати останній, а потім, використовуючи математичні вирази, обчислити параметр, величину якого необхідно визначити [13].

Відомо [1], що експериментально виміряти тензоопір кристалів  $n$ -Si та  $n$ -Ge у разі прикладання механічного напруження стиснення у певних кристалографічних напрямках (типу  $\langle 110 \rangle$ ) досить складно, оскільки величина його мала. Мета даного дослідження полягала у встановленні в рамках теорії анізотропного розсіяння таких співвідношень, які дають змогу за величиною поздовжнього тензоопору стиснення, виміряного в кристалографічних напрямках  $\langle 100 \rangle$  для  $n$ -Si та  $\langle 111 \rangle$  для  $n$ -Ge, де його величина максимальна, обчислювати тензоопір у напрямках типу  $\langle 110 \rangle$ , де ефект тензоопору виявляється слабо.

Ефект тензоопору (зміна питомого опору багатодолинних напівпровідників у разі одновісної пружної деформації) в  $n$ -Si та  $n$ -Ge пов'язаний із деформаційним порушенням енергетичної еквівалентності ізоенергетичних еліпсоїдів у таких дослідах та міжмінімумним перерозподілом носіїв заряду при незмінній їх концентрації в зоні провідності ( $c$ -зоні), тобто з деформаційно-індукованими переходами носіїв заряду в мінімуми зі зниженою рухливістю.

На прикладі  $n$ -Si розглянемо зміну питомого опору у разі накладання механічного напруження  $X$ , коли  $\vec{X} \parallel \vec{J} \parallel [100]$  (де  $\vec{J}$  — струм крізь зразок). Внаслідок деформації  $n$ -Si у

напрямку [100] мінімуми 2, 2' (рис. 1) опускаються вниз за шкалою енергій, а мінімуми 1, 1' і 3, 3' піднімаються вгору, що спричиняє перерозподіл електронів між мінімумами.

За відсутності тиску ( $X = 0$ ) питома електропровідність *n*-Si у напрямку [100] описується співвідношенням

$$\sigma_0^{[100]} = \sigma_0 = \frac{1}{\rho_0^{[100]}} = 2en_0\mu_{\parallel} + 4en_0\mu_{\perp}, \quad (1)$$

де  $\rho_{\parallel}^{[100]} = \rho_{\perp}$  – питомий опір недеформованого *n*-Si;  $\mu_{\parallel}$ ,  $\mu_{\perp}$  – рухливість носіїв заряду відповідно вздовж і поперек головної осі ізоенергетичного еліпсоїда;  $n_0$  – концентрація електронів в одному мінімумі до деформації кристала;  $e$  – заряд електрона.

У разі накладання досить великого механічного напруження  $X$  у напрямку [100], що забезпечує повний перехід усіх носіїв заряду в еліпсоїди 2–2' (рис. 1), які опускаються (за шкалою енергій), провідність *n*-Si у напрямку [100] задається виразом

$$\sigma_{\infty}^{[100]} = \frac{1}{\rho_{\infty}^{[100]}} = 6en_0\mu_{\parallel}. \quad (2)$$

Знайдемо відношення виразів (1) і (2):

$$\frac{\sigma_0}{\sigma_{\infty}^{[100]}} = \frac{\rho_{\infty}^{[100]}}{\rho_0} = \frac{2}{3} \frac{\mu_{\perp}}{\mu_{\parallel}} + \frac{1}{3}. \quad (3)$$

Враховуючи результати визначення параметра анізотропії рухливості  $K = \mu_{\perp}/\mu_{\parallel}$  [1], одержимо

$$\frac{\rho_{\infty}^{[100]}}{\rho_0} = \frac{1}{3} (2K + 1) \quad (4)$$

або отримаємо зв'язок параметра анізотропії рухливості з питомим опором у напрямку, в якому тензоопір максимальний:

$$K = \frac{3}{2} \frac{\rho_{\infty}^{[100]}}{\rho_0} - \frac{1}{2}. \quad (5)$$

У випадку *n*-Ge за умови  $\vec{X} \parallel \vec{J} \parallel [111]$  можна одержати аналогічне співвідношення для параметра анізотропії рухливості:

$$K = \frac{3}{2} \frac{\rho_{\infty}^{[111]}}{\rho_0} - \frac{1}{2}. \quad (6)$$

Тут  $\rho_{\infty}^{[100]} = \lim_{X \rightarrow \infty} \rho(X)$  та  $\rho_{\infty}^{[111]} = \lim_{X \rightarrow \infty} \rho(X)$  – значення питомого опору у разі прикладання механічного напруження  $X$ , яке забезпечує повне переселення носіїв заряду в мінімуми енергії (два чи один), розташовані в напрямку осі деформації ([100] чи [111]).

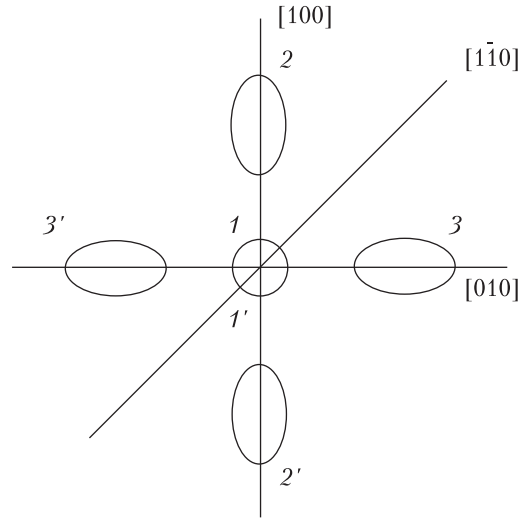


Рис. 1. Взаємне розміщення ізоенергетичних еліпсоїдів у зоні провідності *n*-Si

Оскільки для  $n$ -Ge за умов  $\vec{X} \parallel \vec{J} \parallel [111]$  та  $\vec{X} \parallel \vec{J} \parallel [110]$  відповідно до [14]

$$\rho_{\infty}^{[110]} = \frac{1}{en_e} \frac{3}{(\mu_{\perp} + 2\mu_{\parallel})}, \quad (7)$$

$$\rho_{\infty}^{[111]} = \frac{1}{en_e\mu_{\parallel}} \quad (8)$$

( $n_e$  — повна концентрація носіїв заряду в кристалі), то параметр анізотропії рухливості в окремо взятому ізоенергетичному еліпсоїді матиме вигляд

$$K = 3 \frac{\rho_{\infty}^{[111]}}{\rho_{\infty}^{[110]}} - 2. \quad (9)$$

Аналогічно для  $n$ -Si за умов  $\vec{X} \parallel \vec{J} \parallel [100]$  та  $\vec{X} \parallel \vec{J} \parallel [110]$  відповідно до [15] отримаємо зв'язок параметра анізотропії рухливості з комбінованим відношенням, чисельник якого характеризує максимальний прояв тензоопору, а знаменник — один із напрямків, в якому тензоопір (як в  $n$ -Si, так і в  $n$ -Ge) незначний:

$$K = 2 \frac{\rho_{\infty}^{[100]}}{\rho_{\infty}^{[110]}} - 1. \quad (10)$$

Оскільки ліві частини виразів (6) і (9), а також (5) і (10) рівні між собою, то і праві частини цих виразів як для  $n$ -Ge, так і для  $n$ -Si можна порівняти між собою, тобто

$$\text{для } n\text{-Ge} \quad \frac{3}{2} \frac{\rho_{\infty}^{[111]}}{\rho_0} - \frac{1}{2} = 3 \frac{\rho_{\infty}^{[111]}}{\rho_{\infty}^{[110]}} - 2, \quad (11)$$

$$\text{для } n\text{-Si} \quad \frac{3}{2} \frac{\rho_{\infty}^{[100]}}{\rho_0} - \frac{1}{2} = 2 \frac{\rho_{\infty}^{[100]}}{\rho_{\infty}^{[110]}} - 1. \quad (12)$$

Після розв'язання кожного з рівнянь (11) і (12) відносно  $\rho_{\infty}^{[110]}/\rho_0$  отримаємо

$$\text{для } n\text{-Ge} \quad \frac{\rho_{\infty}^{[110]}}{\rho_0} = 2 \frac{\rho_{\infty}^{[111]}/\rho_0}{1 + \frac{\rho_{\infty}^{[111]}}{\rho_0}}, \quad (13)$$

$$\text{для } n\text{-Si} \quad \frac{\rho_{\infty}^{[110]}}{\rho_0} = 4 \frac{\rho_{\infty}^{[100]}/\rho_0}{1 + 3 \frac{\rho_{\infty}^{[100]}}{\rho_0}}. \quad (14)$$

Знайдені вирази (13) і (14) дають змогу як у випадку  $n$ -Ge, так і для  $n$ -Si надійно отримати відносно невеликі за своїми значеннями величини тензоопору в кристалографічних напрямках типу  $\langle 110 \rangle$  ( $\rho_{\infty}^{(110)}/\rho_0$ ) за найбільшими (із можливих) значеннями тензоопору, вимірними у разі прикладання механічного напруження вздовж головних кристалографічних напрямків багатодолинних напівпровідників ( $\rho_{\infty}^{(111)}/\rho_0$  у випадку  $n$ -Ge та  $\rho_{\infty}^{(100)}/\rho_0$  у випадку  $n$ -Si).

Для експериментальної перевірки одержаних співвідношень були використані кристали *n*-Ge та *n*-Si з таким рівнем легування:

$$n\text{-Ge: } \rho_{300\text{ K}} = 17 \text{ Ом}\cdot\text{см}, n_e \equiv N_{\text{Sb}} = 9,5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3};$$

$$n\text{-Si: } \rho_{300\text{ K}} = 56 \text{ Ом}\cdot\text{см}, n_e \equiv N_{\text{P}} = 7,14 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}.$$

Тензоопір вимірювали при температурі рідкого азоту в різних кристалографічних напрямках: у випадку *n*-Ge за умов  $\vec{X} \pm \parallel \vec{J} \parallel [111]$  та  $\vec{X} \parallel \vec{J} \parallel [110]$ , у випадку *n*-Si – при  $\vec{X} \parallel \vec{J} \parallel [100]$  та  $\vec{X} \parallel \vec{J} \parallel [110]$ . Розміри зразків були  $0,7 \times 0,7 \times 10 \text{ мм}^3$ . Результати вимірювань наведено на рис. 2 і 3.

Після підстановки одержаних експериментальних даних для *n*-Ge

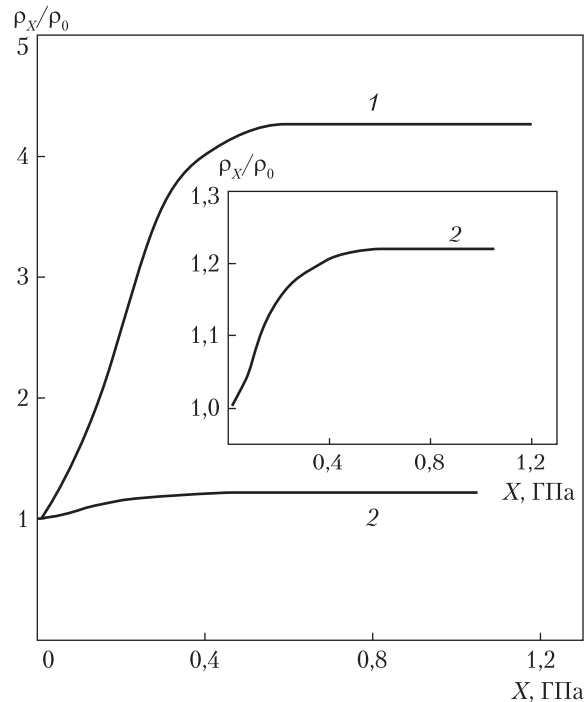
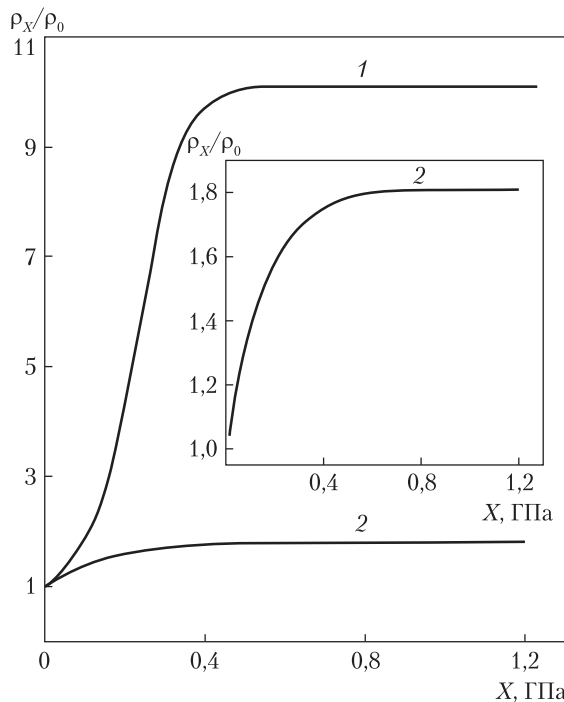
$$\frac{\rho_{\infty}^{[111]}}{\rho_0} = 10,1$$

(див. рис. 2, крива 1) та для *n*-Si

$$\frac{\rho_{\infty}^{[100]}}{\rho_0} = 4,27$$

(див. рис. 3, крива 1) у формули (13) і (14) відповідно матимемо для *n*-Ge

$$\frac{\rho_{\infty}^{[110]}}{\rho_0} \approx 1,82, \text{ а для } n\text{-Si} - \frac{\rho_{\infty}^{[110]}}{\rho_0} \approx 1,24.$$



**Рис. 2.** Залежності поздовжнього тензоопору  $\rho_X/\rho_0 = f(X)$  для *n*-Ge, виміряні при  $T = 77 \text{ K}$  за умов: 1 –  $\vec{X} \parallel \vec{J} \parallel [111]$ , 2 –  $\vec{X} \parallel \vec{J} \parallel [110]$ . На вставці крива 2 у збільшеному масштабі

**Рис. 3.** Залежності поздовжнього тензоопору  $\rho_X/\rho_0 = f(X)$  для *n*-Si, виміряні при  $T = 77 \text{ K}$  за умов: 1 –  $\vec{X} \parallel \vec{J} \parallel [100]$ , 2 –  $\vec{X} \parallel \vec{J} \parallel [110]$ . На вставці крива 2 у збільшеному масштабі

Як видно з рис. 2 і 3 (криві 2), розраховані таким чином дані з тензоопору для кристалографічного напрямку  $[110]$  виявилися близькими до отриманих експериментально для цього ж напрямку

$$\left( \text{для } n\text{-Ge } \frac{\rho_{\infty}^{[110]}}{\rho_0} = 1,807, \text{ а для } n\text{-Si } - \frac{\rho_{\infty}^{[110]}}{\rho_0} = 1,22 \right),$$

в якому тензоопір для обох випадків є малим. Остання обставина істотно ускладнює безпосереднє визначення даних з тензоопору кремнію та германію для кристалографічного напрямку  $\langle 110 \rangle$  експериментально. Таким чином, показано, що обидва одержаних вирази (13) і (14) знаходять експериментальне підтвердження в межах точності проведених вимірювань.

Отже, у рамках теорії анізотропного розсіяння встановлено для  $n\text{-Ge}$  та  $n\text{-Si}$  співвідношення (13) і (14), які дають змогу замість досить складних вимірювань тензоопору у фізично еквівалентних напрямках  $\langle 110 \rangle$ , в яких зазначений ефект слабко виражений, розраховувати зміни питомого опору з направленим тиском, що виводить функцію  $\rho_X / \rho_0 = f(X)$  на насичення, використовуючи надійно вимірювані в експериментах дані з тензоопору в інших кристалографічних напрямках ( $\langle 111 \rangle$  у випадку  $n\text{-Ge}$  та  $\langle 100 \rangle$  у випадку  $n\text{-Si}$ ), в яких зміни питомого опору з тиском є максимальними.

Запропонований підхід щодо методології визначення важкодоступних для вимірювань параметрів у напівпровідниках, які мають малі значення, за дослідними даними іншої величини, що обчислюється досить просто, може виявитися корисним у разі проведення експериментальних досліджень.

#### ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Баранський П.І., Федосов А.В., Гайдар Г.П. Фізичні властивості кристалів кремнію та германію в полях ефективного зовнішнього впливу. Луцьк: Надстир'я, 2000. 279 с.
2. Кикоин И.К., Лазарев С.Д. Новый фотопьезоэлектрический эффект в полупроводниках. *ЖЭТФ*. 1965. 47, № 2. С. 780–781.
3. Федосов С.А., Хвищун М.В., Шинкарук С.В. Вплив концентрації домішок на зміну положення глибокого рівня  $E_c - 0,2$  еВ при одновісній пружній деформації в  $n\text{-Ge}$   $\langle \text{Au} \rangle$ . *Наук. вісн. Волин. нац. ун-ту ім. Лесі Українки. Фіз. науки*. 2010. № 29. С. 37–43.
4. Thompson S., Anand N., Armstrong M., Auth C., Arcot B., Alavi M., Bai P., Bielefeld J., Bigwood R., Brandenburg J., Buehler M., Cea S., Chikarmane V., Choi C., Frankovic R., Ghani T., Glass G., Han W., Hoffmann T., Hussein M., Jacob P., Jain A., Jan C., Joshi S., Kenyon C., Klaus J., Klopce S., Luce J., Ma Z., McIntyre B., Mistry K., Murthy A., Nguyen P., Pearson H., Sandford T., Schweinfurth R., Shaheed R., Sivakumar S., Taylor M., Tufts B., Wallace C., Wang P., Weber C., Bohr M. A 90 nm logic technology featuring 50 nm strained silicon channel transistors, 7 layers of Cu interconnects, low k ILD, and 1  $\mu\text{m}^2$  SRAM cell. Technical Digest: Proceedings of International Electron Devices Meeting (San Francisco, 8–11 Dec. 2002). Piscataway, NJ: IEEE, 2002. P. 61–64. doi: <https://doi.org/10.1109/IEDM.2002.1175779>
5. Ghani T., Armstrong M., Auth C., Bost M., Charvat P., Glass G., Hoffmann T., Johnson K., Kenyon C., Klaus J., McIntyre B., Mistry K., Murthy A., Sandford J., Silberstein M., Sivakumar S., Smith P., Zawadzki K., Thompson S., Bohr M. A 90 nm high volume manufacturing logic technology featuring novel 45 nm gate length strained silicon CMOS transistors. Technical Digest: Proceedings of International Electron Devices Meeting (Washington, 8–10 Dec. 2003). Piscataway, NJ: IEEE, 2003. P. 978–980. doi: <https://doi.org/10.1109/IEDM.2003.1269442>
6. Nebel C.E. Valleytronics: Electrons dance in diamond. *Nat. Mater.*, 2013. 12, № 8. P. 690–691. doi: <https://doi.org/10.1038/nmat3724>

7. Culcer D., Saraiva A.L., Koiller B., Hu X., Sarma S.D. Valley-based noise-resistant quantum computation using Si quantum dots. *Phys. Rev. Lett.* 2012. **108**. № 12. 126804. doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.108.126804>
8. Гайдар Г.П. Тензосопротивление как источник информации о параметре анизотропии подвижности  $K = \mu_{\perp}/\mu_{\parallel}$  в многодолинных полупроводниках и некоторые новые возможности деформационной метрологии. *Электронная обработка материалов*. 2015. **51**, № 2. С. 85–92.
9. Gaidar G.P., Baranskii P.I. Thermoelectric properties of transmutation doped silicon crystals. *Physica B: Condensed Matter*. 2014. **441**. P. 80–88. doi: <https://doi.org/10.1016/j.physb.2014.02.011>
10. Гайдар Г.П., Баранський П.І. Концентраційні залежності параметра анізотропії рухливості  $K = \mu_{\perp}/\mu_{\parallel}$  і параметра анізотропії термоЕРС захоплення електронів фононами  $M = \alpha_{\parallel}^{\Phi}/\alpha_{\perp}^{\Phi}$  в  $n$ -Ge та  $n$ -Si. *Термоелектрика*. 2014. № 5. С. 22–30.
11. Федосов А.В., Луньов С.В., Федосов С.А. Визначення константи деформаційного потенціалу  $\Xi_d$  в  $n$ -Ge методом п'єзоопору. *Наук. вісн. Волин. нац. ун-ту ім. Лесі Українки. Фіз. науки*. 2010. № 6. С. 38–44.
12. 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.
13. Gaidar G.P. On methodology of measuring parameters with the increased sensitivity to residual or irradiation induced inhomogeneities in semiconductors. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*. 2009. **12**, № 4. P. 324–327.
14. Баранский П.И., Елизаров А.И., Коломоец В.В. Определение характеристических параметров  $\mu_{\parallel}$  и  $\mu_{\perp}$  отдельно взятого изоэнергетического эллипсоида в многодолинных полупроводниках. *ФТП*. 1974. **8**, № 1. С. 200–202.
15. Баранский П.И., Буда И.С., Даховский И.В. Коломоец В.В. Электрические и гальваномагнитные явления в анизотропных полупроводниках. Киев: Наук. думка, 1977. 270 с.

Надійшло до редакції 28.02.2019

## REFERENCES

1. Baranskii, P. I., Fedosov, A. V. & Gaidar, G. P. (2000). Physical properties of silicon and germanium crystals in the fields of effective external influence. Lutsk: Nadstyria (in Ukrainian).
2. Kikoin, I. K. & Lazarev, S. D. (1965). New photopiezoelectric effect in semiconductors. *Zhurn. eksperim. i teoret. fiziki*, 20, No. 2, pp. 780-781 (in Russian).
3. Fedosov, S. A., Khvyshchun, M. V. & Shynkaruk, S. V. (2010). Effect of the concentration of impurities on the change in position of the deep level  $E_c - 0.2$  eV under uniaxial elastic deformation in  $n$ -Ge  $\langle$ Au $\rangle$ . *Nauk. visnyk Volynskoho nats. un-tu im. Lesi Ukrainky. Fiz. nauky*, No. 29, pp. 37-43 (in Ukrainian).
4. Thompson, S., Anand, N., Armstrong, M., Auth, C., Arcot, B., Alavi, M., Bai, P., Bielefeld, J., Bigwood, R., Brandenburg, J., Buehler, M., Cea, S., Chikarmane, V., Choi, C., Frankovic, R., Ghani, T., Glass, G., Han, W., Hoffmann, T., Hussein, M., Jacob, P., Jain, A., Jan, C., Joshi, S., Kenyon, C., Klaus, J., Kloplic, S., Luce, J., Ma, Z., McIntyre, B., Mistry, K., Murthy, A., Nguyen, P., Pearson, H., Sandford, T., Schweinfurth, R., Shaheed, R., Sivakumar, S., Taylor, M., Tufts, B., Wallace, C., Wang, P., Weber, C. & Bohr, M. (2002). A 90 nm logic technology featuring 50 nm strained silicon channel transistors, 7 layers of Cu interconnects, low k ILD, and 1  $\mu\text{m}^2$  SRAM cell. *Proceedings of the International Electron Devices Meeting Technical Digest* (pp. 61-64), San Francisco. doi: <https://doi.org/10.1109/IEDM.2002.1175779>
5. Ghani, T., Armstrong, M., Auth, C., Bost, M., Charvat, P., Glass, G., Hoffmann, T., Johnson, K., Kenyon, C., Klaus, J., McIntyre, B., Mistry, K., Murthy, A., Sandford, J., Silberstein, M., Sivakumar, S., Smith, P., Zawadzki, K., Thompson, S. & Bohr, M. (2003). A 90 nm high volume manufacturing logic technology featuring novel 45 nm gate length strained silicon CMOS transistors. *Proceedings of the International Electron Devices Meeting Technical Digest* (pp. 978-980), Washington. doi: <https://doi.org/10.1109/IEDM.2003.1269442>
6. Nebel, C. E. (2013). Valleytronics: Electrons dance in diamond. *Nat. Mater.*, 12, No. 8, pp. 690-691 doi: <https://doi.org/10.1038/nmat3724>
7. Culcer, D., Saraiva, A. L., Koiller, B., Hu, X. & Sarma, S. D. (2012). Valley-based noise-resistant quantum computation using Si quantum dots. *Phys. Rev. Lett.*, 108, No. 12, 26804. doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.108.126804>

8. Gaidar, G. P. (2015). Tensorresistance as an information source on mobility anisotropy parameter  $K = \mu_{\perp}/\mu_{\parallel}$  in multivalley semiconductors and certain new possibilities of deformation metrology. Surf. Eng. Appl. Electrochem., 51, No. 2, pp. 188-195.
9. Gaidar, G. P. & Baranskii, P. I. (2014). Thermoelectric properties of transmutation doped silicon crystals. Physica B: Condensed Matter, 441, pp. 80-88. doi: <https://doi.org/10.1016/j.physb.2014.02.011>
10. Gaidar, G. P. & Baranskii, P. I. (2014). Concentration dependences of the anisotropy parameter of mobility  $K = \mu_{\perp}/\mu_{\parallel}$  and the anisotropy parameter of electron-phonon drag thermopower  $M = \alpha_{\parallel}^{\Phi}/\alpha_{\perp}^{\Phi}$  in *n*-Ge and *n*-Si. J. Thermoelectricity, No. 5, pp. 21-28.
11. Fedosov, A. V., Lunov, S. V. & Fedosov, S. A. (2010). Determination of the constant of the deformation potential  $\Xi_d$  in *n*-Ge by the piezoresistance method. Nauk. visnyk Volynskoho nats. un-tu im. Lesi Ukrainky. Fiz. nauky, No. 6, pp. 38-44 (in Ukrainian).
12. Budzuliak, S. I. (2012). Tensorresistive effects in the strongly deformed *n*-Si and *n*-Ge crystals. Fizyka i khimiia tverdoho tila, 13, No. 1, pp. 34-39 (in Ukrainian).
13. Gaidar, G. P. (2009). On methodology of measuring parameters with the increased sensitivity to residual or irradiation induced inhomogeneities in semiconductors. Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics, 12, No. 4, pp. 324-327.
14. Baranskii, P. I., Yelizarov, A. I. & Kolomoets, V. V. (1974). Determination of the characteristic parameters  $\mu_{\parallel}$  and  $\mu_{\perp}$  of the single isoenergetic ellipsoid in multi-valley semiconductors. Fizika i tekhnika poluprovodnikov, 8, No. 1, pp. 200-202 (in Russian).
15. Baranskii, P. I., Buda, I. S., Dahovskiy, I. V. & Kolomoets, V. V. (1977). Electrical and galvanomagnetic phenomena in anisotropic semiconductors. Kiev: Naukova Dumka (in Russian).

Received 28.02.2019

Г.П. Гайдар

Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев

E-mail: [gaydar@kinr.kiev.ua](mailto:gaydar@kinr.kiev.ua)

#### К МЕТОДОЛОГИИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕНЗОСОПРОТИВЛЕНИЯ *n*-Ge И *n*-Si В КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКИХ НАПРАВЛЕНИЯХ $\langle 110 \rangle$

В рамках теории анизотропного рассеяния для многодолинных полупроводников *n*-Ge и *n*-Si получены полезные для практического применения выражения, которые позволяют рассчитывать значения тензосопротивления в насыщении для кристаллографических направлений, где этот эффект незначительный, по результатам измерений тензосопротивления в других кристаллографических направлениях, где указанный эффект значительный по величине.

**Ключевые слова:** кремний, германий, тензосопротивление, параметр анизотропии подвижности.

G.P. Gaidar

Institute for Nuclear Research of the NAS of Ukraine, Kiev

E-mail: [gaydar@kinr.kiev.ua](mailto:gaydar@kinr.kiev.ua)

#### ON THE METHODOLOGY OF TENSORESISTANCE DETERMINATION FOR *n*-Ge AND *n*-Si IN THE CRYSTALLOGRAPHIC DIRECTIONS $\langle 110 \rangle$

In the framework of the theory of anisotropic scattering, the expressions useful for the practical application are obtained for many-valley semiconductors such as *n*-Ge and *n*-Si. These relations allow us to calculate the tensorresistance in saturation for crystallographic directions, where this effect is very small, by using the measurement results of tensorresistance in other crystallographic directions, where this effect has large values.

**Keywords:** silicon, germanium, tensorresistance, anisotropy parameter of mobility.