

<https://doi.org/10.15407/dopovidi2022.02.048>

УДК 621.315.592

**Г.П. Гайдар**, <https://orcid.org/0000-0003-2077-3484>

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ

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

## До методики визначення поперечного тензоопору в багатодолинних напівпровідниках

Представлено академіком НАН України О.Є. Беляєвим

Досліджено поперечний (струм у зразка орієнтований перпендикулярно до осі деформації) і поздовжній (струм спрямований уздовж осі деформації) тензоопори високоомних кристалів *n-Si*. Обчислено параметр анізотропії рухливості *K* для цих двох випадків. Встановлено збіг (у межах похибок експериментів) одержаних значень параметра *K* у разі проходження струму вздовж напрямку деформування і перпендикулярно до нього. На кристалах *n-Ge* підтверджено надійність методики вимірювань поперечного тензоопору за допомогою обчислення параметра анізотропії рухливості із залученням даних двох незалежних експериментів. Одержано хороший збіг значень параметра анізотропії *K*, обчислених за даними вимірювань тільки поздовжнього тензоопору та за даними вимірювань поздовжнього і поперечного тензоопорів. Експериментально підтверджено, що в умовах сильної направленої пружної деформації стиснення (за відсутності прояву компонент деформації зсуву в кристалах *n-Si*) відбуваються лише відносні зміщення ізоенергетичних еліпсоїдів у багатодолинних напівпровідниках за шкалою енергій, однак форма еліпсоїдів залишається практично незмінною.

**Ключові слова:** кремній, германій, одновісна деформація стиснення, поперечний тензоопір, параметр анізотропії рухливості.

Застосування направлених пружних деформаційних впливів на кристали, що змінюють як міжатомні відстані, так і симетрію ґратки, призводить до істотних змін електронної підсистеми багатодолинних напівпровідників [1, 2]. Тому дослідження тензорезистивних ефектів у напівпровідникових кристалах високої симетрії має важливе значення як у науковому, так і в прикладному аспектах [3–7].

Завдяки дослідженням тензоопору (зміни питомого опору під дією механічних напружень) багатодолинних напівпровідників в області сильних одновісних напружень стиснення реалізуються такі можливості: *а)* вивчення кінетичних явищ в одно- та дво- долинній зоні провідності з анізотропним законом дисперсії (такі моделі широко використовуються в разі теоретичного розгляду різноманітних фізичних явищ у напівпровід-

Цитування: Гайдар Г.П. До методики визначення поперечного тензоопору в багатодолинних напівпровідниках. *Допов. Нац. акад. наук Укр.* 2022. № 2. С. 48–57. <https://doi.org/10.15407/dopovidi2022.02.048>

никах) [8, 9]; б) одержання інформації як про мінімуми енергії в зоні провідності, так і про формування хвостів густини станів, які поширюються в глибину забороненої зони [10]; в) дослідження додаткових екстремумів зони провідності, які за відсутності деформації розміщені вище (за шкалою енергій) від абсолютних мінімумів і в досить слабких електричних полях узагалі не беруть участі в явищах перенесення [9, 11]; г) виявлення внеску  $f$ - і  $g$ -переходів у міждолинне розсіяння носіїв заряду в  $n$ -Si [12, 13]; д) визначення констант деформаційного потенціалу, а також параметрів анізотропії рухливості і розсіяння носіїв заряду [2, 14, 15].

У разі вивчення змін питомого опору багатодолинних напівпровідників типу  $n$ -Si та  $n$ -Ge під впливом направленого (одновісного) тиску зазвичай користуються припущенням, що такий тиск тільки зміщує ізоенергетичні еліпсоїди в шкалі енергій, не змінюючи при цьому помітним чином їхньої форми [9]. Враховуючи важливість цього припущення, бажано було б отримати додатковий експериментальний доказ його прийнятності в рамках спеціально поставлених експериментів. Таким чином одержали б ще одну підставу стверджувати, що назване вище припущення відповідає дійсності.

Подібну перевірку можна реалізувати шляхом вибору якогось конкретного (важливого в пізнавальному сенсі) параметра, що використовується для опису різних (чи споріднених) фізичних явищ і взаємозв'язку між ними. У даній праці в якості такого параметра було обрано у багатодолинних напівпровідниках параметр анізотропії рухливості  $K = \mu_{\perp} / \mu_{\parallel}$  ( $\mu_{\perp}$  і  $\mu_{\parallel}$  — рухливості носіїв заряду вздовж і поперек довгої осі ізоенергетичного еліпсоїда відповідно), який можна обчислювати за різними співвідношеннями з використанням експериментальних результатів з вимірювання поздовжнього і поперечного тензоопорів.

Зауважимо, що параметр анізотропії рухливості можна визначити з високою точністю на основі вимірювань лише поздовжнього тензоопору, але за умови повного переселення електронів у мінімум(и), який(і) опускається(ються) при деформації. Окрім цього, визначивши параметр анізотропії рухливості  $K$ , можна знайти також параметр анізотропії розсіяння  $K_{\tau} = \langle \tau_{\parallel} \rangle / \langle \tau_{\perp} \rangle$  ( $\tau_{\parallel}$  і  $\tau_{\perp}$  — компоненти тензора часу релаксації за відсутності магнітного поля в лінійному наближенні; ламаними дужками позначено усереднення за енергією), оскільки  $K = \frac{\mu_{\perp}}{\mu_{\parallel}} = \frac{K_m}{K_{\tau}} = \frac{m_{\parallel}}{m_{\perp}} \frac{\langle \tau_{\perp} \rangle}{\langle \tau_{\parallel} \rangle}$ , де  $K_m = m_{\parallel} / m_{\tau}$  — параметр анізотропії ефективної маси;  $m_{\parallel}$  і  $m_{\perp}$  — циклотронні ефективні маси носіїв заряду вздовж і поперек довгої осі ізоенергетичного еліпсоїда відповідно. Однак, усе зазначене справедливе лише тоді, коли з деформацією істотно не змінюються: енергетичний спектр електронів; фононний спектр коливань кристалічної ґратки; константи деформаційного потенціалу; а визначальна роль у формуванні ефекту тензоопору належить деформаційному перерозподілу електронів між долинами (при збереженні їх загальної концентрації в зоні провідності ( $c$ -зоні):  $4n_0 = \text{const}$  — у випадку  $n$ -Ge і  $6n_0 = \text{const}$  — в  $n$ -Si).

Одним із факторів, який порушує вказані умови у випадку  $n$ -Si (змінює при деформації відносний внесок між окремими механізмами тензоопору), є залежність від деформації ймовірності  $f$ -переходів між долинами, розміщеними на взаємно перпендикулярних осях. Саме тому, для надійного визначення параметра анізотропії рухливості  $K$ , в  $n$ -Si при  $T > 100$  К (коли істотним стає міждолинне розсіяння), необхідно експериментально вивчати не лише поздовжній тензоопір  $\rho_X^{\parallel} / \rho_0$  (при  $\vec{j} \parallel \vec{X}$ ,  $j$  — струм крізь зразок,  $X$  — механічне напруження

стиснення), але також вимірювати й поперечний тензоопір  $\rho_X^\perp / \rho_0$  (при  $\vec{j} \perp \vec{X}$ ). Методика вимірювань поперечного тензоопору більш складна, однак дає можливість розширити інформацію про властивості досліджуваних багатодолинних напівпровідників. Це, зокрема, знаходить свій прояв в експериментах із кристалами кремнію при концентраціях домішки  $N_d > 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , коли в області низьких температур проявляється деформаційна залежність ступеня іонізації домішкових центрів, а також, як зазначалося, в області температур, коли істотним стає міждолинне розсіяння.

Мета даного дослідження полягала в експериментальному підтвердженні надійності методики вимірювань поперечного тензоопору на прикладі визначення параметра анізотропії рухливості в кремнії та германії двома різними способами.

**Поперечний тензоопір *n*-Si. Теоретичні відомості.** У ході вивчення поперечного тензоопору фізична картина явища залишається тією самою, що й у разі дослідження поздовжнього тензоопору: одновісна пружна деформація, змінюючи симетрію кристалічної ґратки, призводить до зняття виродження за енергією еквівалентних мінімумів.

Розглянемо для трьохеліпсоїдної моделі зміну питомого опору *n*-Si у разі накладання механічного напруження *X* для випадку  $\vec{j} \perp \vec{X} \parallel [100]$ . За відсутності механічного напруження (при  $X = 0$ ) питома електропровідність кристала в напрямку  $[100]$  дорівнює  $\sigma_0 = n_0 e \mu_\perp + n_0 e \mu_\perp + n_0 e \mu_\parallel$  або

$$\sigma_0 = n_0 e \mu_\perp \left( 2 + \frac{1}{K} \right) = n_0 e \mu_\perp \left( \frac{1+2K}{K} \right), \quad (1)$$

де  $n_0$  — концентрація електронів у кожному з мінімумів при  $X = 0$ ;  $e$  — заряд електрона.

Після прикладання механічного напруження *X* еліпсоїд, розміщений на осі деформації  $[100]$ , опуститься за шкалою енергій, а два інших еліпсоїди піднімуться. Це й призведе до перерозподілу носіїв. Тепер питома електропровідність деформованого кристала матиме такий вигляд:

$$\sigma_X = n_1 e \mu_\perp + n_2 e \mu_\perp + n_2 e \mu_\parallel, \quad (2)$$

де  $n_1, n_2$  — концентрації електронів в еліпсоїді, що опускається, і в тому, що піднімається, відповідно.

Для зразків, у яких носії заряду описуються статистикою Максвелла—Больцмана, відношення  $n_2 / n_1$  може бути представлене так:

$$\frac{n_2}{n_1} = C = \exp \left( -\frac{\Delta E}{kT} \right), \quad (3)$$

де  $\Delta E$  — енергетична щілина між розщепленими мінімумами у деформованому кристалі. Враховуючи (3), а також умову сталості повної концентрації електронів у зоні провідності ( $n_1 + 2n_2 = 3n_0$ ), знаходимо, що

$$n_1 = \frac{3n_0}{1+2C}, \quad n_2 = \frac{3n_0 C}{1+2C}. \quad (4)$$

На основі (4) і (2) запишемо у загальному вигляді  $\sigma_X = n_1 e \mu_{\perp} \left(1 + C + \frac{C}{K}\right)$  або

$$\sigma_X = 3n_0 e \mu_{\perp} \frac{K + CK + C}{K(1 + 2C)}. \quad (5)$$

Якщо перейти від питомої електропровідності до питомого опору  $\rho$ , то одержимо

$$\rho_X = \rho_0 \frac{(1 + 2C)(1 + 2K)}{3(K + CK + C)}, \quad (6)$$

де  $\rho_0$  – питомий опір кристала у разі відсутності деформації.

Зв'язок між  $\rho_X$  і  $\rho_{\infty}$  одержимо, враховуючи, що  $\sigma_{\infty} = 3n_0 e \mu_{\perp}$  (при  $X \rightarrow \infty$ ). Підставивши цей вираз у (5), знаходимо, що

$$\rho_X = \rho_{\infty} \frac{K(1 + 2C)}{K + CK + C}, \quad (7)$$

де  $\rho_{\infty} = \lim_{X \rightarrow \infty} (X)$  – значення питомого опору при деформації  $X$ , яка забезпечує повне переселення носіїв заряду в мінімуми енергії, розташовані в напрямку осі прикладання механічного напруження  $X$ .

Таким чином, за вимірними значеннями  $\rho_0$ ,  $\rho_{\infty}$  при відомих значеннях  $K$  і  $C$  на основі співвідношень (6) і (7) можна розрахувати питомий опір кристала при будь-якому значенні  $X$ . Крім того, знаючи відношення  $\rho_{\infty}/\rho_0$  можна одержати з виразу (7) і параметр анізотропії рухливості  $K$  (при  $X = 0$ ,  $C = 1$ ):

$$\frac{\rho_{\infty}}{\rho_0} = \frac{1 + 2K}{3K}, \quad (8)$$

звідки для  $n$ -Si при накладанні механічного напруження  $X$  в умовах  $\vec{j} \perp \vec{X} \parallel [100]$  матимемо вираз для визначення параметра анізотропії рухливості:

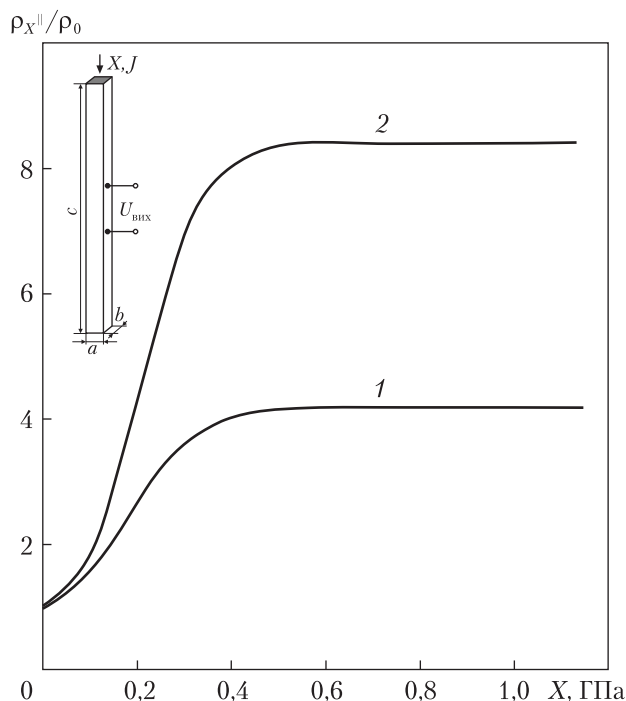
$$K_{\vec{j} \perp \vec{X}} = \frac{1}{3 \frac{\rho_{\infty}}{\rho_0} - 2} = \left(3 \frac{\rho_{\infty}}{\rho_0} - 2\right)^{-1}. \quad (9)$$

У випадку деформації  $n$ -Si в умовах  $\vec{j} \parallel \vec{X} \parallel [100]$  параметр  $K$  матиме такий вигляд [9]:

$$K_{\vec{j} \parallel \vec{X}} = \frac{3 \rho_{\infty}^{\parallel}}{2 \rho_0} - \frac{1}{2}. \quad (10)$$

Тут  $\rho_{\infty}^{\parallel}$  – питомий опір зразка, вимірний вздовж осі стиснення  $[100]$  в  $n$ -Si (і  $[111]$  в  $n$ -Ge) в області механічних напружень, які відповідають насиченню тензоопору.

**Результати та обговорення.** Тензоефекти у напівпровідниках вивчаються зазвичай на спеціально підготовлених зразках. Це пов'язано, перш за все, з необхідністю проводити ви-



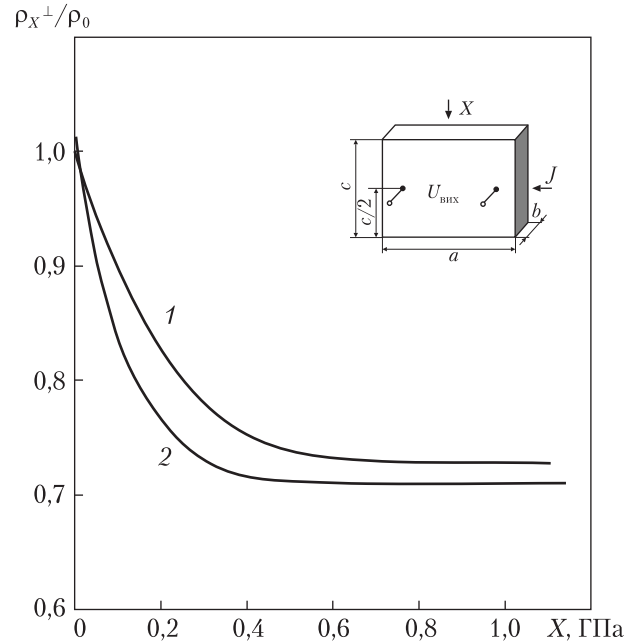
**Рис. 1.** Поздовжній тензоопір  $\rho_X^{\parallel} / \rho_0 = f(X)$ , виміряний при  $T = 77 \text{ К}$  на кристалах: 1 –  $n\text{-Si}$  ( $\rho_{300\text{К}} \cong 100 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ );  $\vec{j} \parallel \vec{X} \parallel [100]$ ; 2 –  $n\text{-Ge}$  ( $\rho_{300\text{К}} \cong 0,75 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ );  $\vec{j} \parallel \vec{X} \parallel [111]$ . Розміри зразків  $0,7 \times 0,5 \times 10 \text{ мм}$

мірювання в заданому кристалографічному напрямку. Величини вказаних ефектів і особливості відповідних кривих істотно залежать від вибраної орієнтації кристала. Крім того, для досягнення екстремальних (за прикладеним навантаженням) умов експерименту зразки повинні мати сталу площу поперечного перерізу вздовж осі дії  $\vec{X}$  і містити мінімум механічних пошкоджень, що забезпечується лише в процесі цілеспрямованої обробки вихідних кристалів за спеціальною методикою.

Зауважимо, що на практиці вивчення тензоефектів при  $\vec{j} \perp \vec{X}$  пов'язано зі значними труднощами. Це зумовлено, в основному, двома причинами. По-перше, потрібно створити однорідну одновісну деформацію зразка у досить широкому діапазоні механічних напружень. По-друге, при вимірюванні тензоопору кристала потрібно виключити (або звести до мінімуму) крайовий ефект, що виникає внаслідок зміни границь ліній струму між електродами в процесі деформації. Вся складність полягає в тому, що чим краще виконується одна із вказаних умов, тим гірше реалізується інша.

Результати вимірювань поздовжнього ( $\vec{j} \parallel \vec{X}$ ) і поперечного ( $\vec{j} \perp \vec{X}$ ) тензоопорів на високоомних зразках  $n\text{-Si}$  ( $\rho_{300\text{К}} \cong 100 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ ) в умовах  $\vec{X} \parallel [100]$  та  $n\text{-Ge}$  ( $\rho_{300\text{К}} = 100 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ ) при  $\vec{X} \parallel [111]$  наведено на рис. 1 і 2. На вставках у цих рисунках показано оптимальну форму досліджуваних зразків і їхні розміри ( $a \times b \times c$ ), встановлені експериментальним шляхом. Стрілками вказано напрямки дії механічного навантаження  $\vec{X}$  і пропускання струму  $\vec{j}$ . Кожен із рисунків виконано так, щоб дати уявлення про існуючі пропорції між сторонами досліджуваних зразків. Сірим кольором позначено області струмових контактів, які готувалися за такою технологією. На зразки  $n\text{-Si}$  при температурі 450 К вплавлювали попередньо підготовлену евтектику  $\text{Au}+\text{Si}$  (трохи недонасичену кремнієм) на глибину, що регулювалася вмістом золота в розчині та часом вплавлення. Після цього на місця вплавлення наносили олово. На зразки  $n\text{-Ge}$  контакти наносили оловом із домішкою сурми. Нанесені контакти після короткочасного відпалу при 580 К і плавному зменшенні температури перевіряли на омичність за температури рідкого азоту. Потім до контактів кремнієвих і германієвих зразків підпаювали тонкі мідні провідники.

**Рис. 2.** Поперечний тензоопір  $\rho_{\vec{X}}^{\perp} / \rho_0 = f(X)$ , виміряний при  $T = 77$  К на кристалах: 1 –  $n$ -Si ( $\rho_{300\text{K}} \cong 100$  Ом·см);  $\vec{j} \perp \vec{X} \parallel [100]$ ; 2 –  $n$ -Ge ( $\rho_{300\text{K}} \cong 0,75$  Ом·см);  $\vec{j} \perp \vec{X} \parallel [111]$ . Розміри зразків  $2,2 \times 0,5 \times 2,0$  мм



Вимірювання тензоопору за умов  $(\vec{j} \perp \vec{X})$  збільшують об'єм інформації, яку можна отримати про властивості досліджуваного багатодолінного напівпровідника. Крім даних, необхідних для розрахунку константи деформаційного потенціалу  $\Xi_w$ , такі дослідження надають також експериментальний матеріал для обчислення параметра анізотропії рухливості.

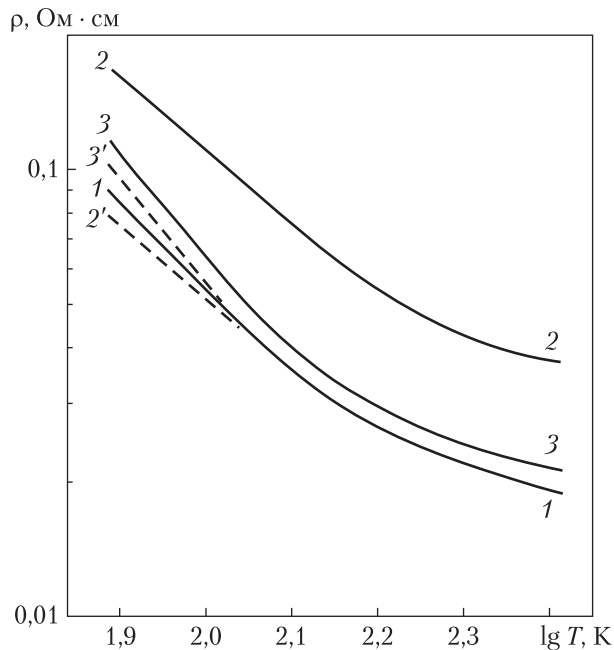
Справа в тому, що в напівпровідниках із багатодолінною структурою при підключенні до міждолінного перерозподілу носіїв заряду будь-якого додаткового механізму тензоефектів співвідношення (10) стає непридатним для визначення  $K$ . Його потрібно замінити на більш коректний вираз:

$$K_{\vec{j} \perp \vec{X}}^{\vec{j} \parallel \vec{X}} = \frac{\rho_{\infty}^{\parallel}}{\rho_{\infty}^{\perp}}, \quad (11)$$

де  $\rho_{\infty}^{\perp}$  – питомий опір зразка, виміряний поперек осі стиснення в області механічних напружень, які відповідають насиченню тензоопору.

Для кристалів  $n$ -Ge, деформованих у напрямку  $[111]$ , використавши експериментальні дані (див. рис. 1 і 2, криві 2) та вирази (10) і (11), обчислимо значення параметра анізотропії рухливості. Таким чином, параметр  $K$  буде одержано із залученням даних двох незалежних експериментів. Параметр  $K$ , який визначався зі співвідношення (11), дорівнював  $K_{\vec{j} \perp \vec{X}}^{\vec{j} \parallel \vec{X}} \cong 12,0$ . Параметр  $K$ , обчислений за формулою (10) з використанням даних тільки позовдгнього тензоопору (див. рис. 1, крива 2), дорівнював  $K_{\vec{j} \parallel \vec{X}} \cong 12,1$ . Така хороша узгодженість числових значень параметра анізотропії рухливості, одержаних двома різними способами, підтверджує надійність методики вимірювань поперечного тензоопору.

Використання експериментально отриманих результатів для кристалів  $n$ -Si (див. рис. 1, крива 1) в області насичення досліджених залежностей призвело, згідно з (10), до одержання параметра анізотропії рухливості  $K_{\vec{j} \parallel \vec{X}} \cong 5,8$ . А вираз (9), разом із даними рис. 2 (крива 1), забезпечив отримання параметра анізотропії рухливості  $K_{\vec{j} \perp \vec{X}} \cong 5,3$  для  $n$ -Si. Тобто одержані результати для кристалів  $n$ -Si при проходженні струму вздовж напрямку деформування  $[100]$  і перпендикулярно до нього досить близькі між собою, щоб можна було (з урахуванням точності проведених експериментів) вважати їх такими, що майже збігаються. Із цього безпосередньо випливає, що вирази, призначені для отримання зна-



**Рис. 3.** Залежності  $\rho=f(T)$  у подвійному логарифмічному масштабі для низькоомного  $n$ -Si (P) ( $n_e \approx 3,44 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ): 1 – механічне напруження  $X = 0$ ; 2 –  $\vec{j} \parallel \vec{X} \parallel [001]$  та 3 –  $\vec{j} \parallel \vec{X} \parallel [111]$  при  $X = 1,2$  ГПа. Штрихові лінії 2' і 3' відповідають паралельному зміщенню кривих 2 і 3 відповідно

чень параметра анізотропії рухливості  $K$ , в обох розглянутих випадках адекватно описують зміну опору багатодолинного напівпровідника під впливом направленою (одновісного) тиску. А отже, ізоенергетичні еліпсоїди в багатодолинних напівпровідниках зазнають при цьому лише зміщень в шкалі енергій, майже не змінюючи (або дуже мало змінюючи) свою форму.

Дещо інакше веде себе низькоомний  $n$ -Si (P) ( $\rho_{300\text{K}} \approx 0,02 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ ) при його деформуванні в умовах можливого прояву деформації зсуву, яка виникає при  $\vec{j} \parallel \vec{X} \parallel [111]$  (тобто за умов симетричного розміщення осі деформації відносно всіх ізоенергетичних еліпсоїдів, коли міжмінімумний перерозподіл носіїв заряду відсутній). Характерно, що в останньому випадку, як видно з рис. 3, температурні зміни питомого опору  $\rho=f(T)$  в недеформованих і одновісно деформованих кристалах за різними кристалографічними напрямками, як і слід було очікувати, виявилися істотно різними. Причому названі відмінності, як свідчить рис. 3, особливо помітні в області переважно домішкового розсіяння (тобто за низьких температур). У цій температурній області при  $\vec{j} \parallel \vec{X} \parallel [111]$ , незважаючи на відсутність міжмінімумного перерозподілу носіїв заряду, виявлено наявність змін питомого опору в кристалах  $n$ -Si.

З рис. 3 видно, що крутизна зростання  $\rho$  зі зниженням  $T$  в області азотних температур у недеформованому кристалі (крива 1) помітно вища, ніж в умовах деформованого кристала при  $\vec{j} \parallel \vec{X} \parallel [001]$  (криві 2 і 2' цього ж рисунка). Зростання крутизни  $\rho=f(T)$  (рис. 3, криві 3 і 3'), яке спостерігається в умовах деформації  $n$ -Si вздовж  $[111]$ , порівняно з недеформованим кристалом (крива 1), свідчить про те, що у випадку  $\vec{X} \parallel [111]$  енергетична щільність між дном зони провідності і рівнем залягання домішок зі зростанням  $X$  не зменшується (як це було при  $X \parallel [001]$  [9]), а зростає.

Оскільки енергія іонізації домішки фосфору в  $n$ -Si ( $\sim 0,045 \text{ eV}$ ) приблизно в 4 рази вища, ніж значення цього параметра для  $n$ -Ge ( $\sim 0,012 \text{ eV}$ ), то це призводить до того, що за інших рівних умов повне “виснаження” донорних центрів (у даному випадку домішкових атомів фосфору) в помірно і сильно легованих (але не вироджених) кристалах  $n$ -Si, на відміну від  $n$ -Ge, навіть за кімнатної температури (тим більше за нижчих  $T$ ) не досягається. Отже, вивчення змін питомого опору в даних експериментах відбувалося в умовах неповного “ви-



снаження” домішкових центрів і це призвело (при  $T = \text{const}$ ) до появи специфічного ефекту тензоопору, пов’язаного не з міжмінімумним перерозподілом носіїв заряду (якого не може бути в принципі в  $n$ -Si при  $\vec{X} \parallel [111]$ ), а з їх деформаційним “виморожуванням” із  $c$ -зони.

**Висновки.** Підтверджено надійність методики вимірювань поперечного тензоопору на кристалах  $n$ -Ge за допомогою обчислення параметра анізотропії рухливості  $K$  із залученням даних двох незалежних експериментів (одержано хороший збіг значень параметра  $K$  – відповідно  $K_{\vec{j} \parallel \vec{X}} \cong 12,1$  та  $K_{\vec{j} \perp \vec{X}} \cong 12,0$ ).

У високоомних кристалах  $n$ -Si при несиметричному розміщенні осі деформації відносно всіх ізоенергетичних еліпсоїдів виявлено близькість значень параметра анізотропії рухливості у разі проходження струму вздовж напрямку деформування ( $K_{\vec{j} \parallel \vec{X}} \cong 5,8$ ) і перпендикулярно до нього ( $K_{\vec{j} \perp \vec{X}} \cong 5,3$ ).

Одержано експериментальний доказ того, що в умовах сильної направленої пружної деформації стиснення (за відсутності прояву компонент деформації зсуву в  $n$ -Si) ізоенергетичні еліпсоїди в багатодолінних напівпровідниках зазнають лише відносних зміщень у шкалі енергій, практично не змінюючи своєї форми.

#### ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Бир Г.Л., Пикус Г.Е. Симметрия и деформационные эффекты в полупроводниках. Москва: Наука, 1972. 587 с.
2. 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. <https://eom.ifa.md/ru/journal/shortview/1164>
3. 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. <http://page.if.ua/uploads/pcss/vol13/11301-05.pdf>
4. Gaidar G.P. On methodology of measuring parameters with the increased sensitivity to residual or irradiation induced inhomogeneities in semiconductors. *Semicond. Phys. Quantum Electron. Optoelectron.* 2009. **12**, № 4. P. 324–327. [http://journal-spqeo.org.ua/n4\\_2009/v12n4-2009-p324-327.pdf](http://journal-spqeo.org.ua/n4_2009/v12n4-2009-p324-327.pdf)
5. Горін А.Є., Громова Г.В., Єрмаков В.М., Когутюк П.П., Коломоєць В.В., Назарчук П.Ф., Панасюк Л.І., Федосов С.А. Кремнієві  $p$ -МОН та  $n$ -МОН транзистори з одночасно деформованими каналами у нанотехнологіях електронних приладів. *Укр. фіз. журн.* 2011. **56**, № 9. С. 920–925. <http://archive.ujp.bitp.kiev.ua/files/journals/56/9/560907pu.pdf>
6. Kolomoets V., Ermakov V., Panasyuk L., Fedosov S., Orasgulyev B., Nazarchuk P. Application of high uniaxial strain methods for semiconductor parameter determination. *Physica B*. 2013. **417**. P. 46–48. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2013.02.017>
7. Єрмаков В.М., Федосов А.В., Коломоєць В.В., Горін А.Є. Використання тензорезистивного ефекту в  $n$ -Si та  $p$ -Si для підвищення рухливості носіїв струму в каналах  $n$ -МОН та  $p$ -МОН транзисторів. *Наук. вісн. КУЕІТУ. Нові технології*. 2008. № 2 (20). С. 48–51.
8. Баранський П.І., Беляєв О.Є., Гайдар Г.П. Кінетичні ефекти в багатодолінних напівпровідниках. Київ: Наук. думка, 2019. 448 с.
9. 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.
10. Баранський П.І., Коломоєць В.В., Сусь Б.А., Шаповалов В.В. Некоторые характеристики энергетических минимумов типа  $\langle 110 \rangle$  в  $n$ -Ge. *Фізика і техніка напівпровідників*. 1979. **13**, № 3. С. 602–604.
11. Baranskii P.I., Baidakov V.V., Ermakov V.N., Grigorev N.N., Kolomoets V.V., Kudykina T.A. The ionisation of impurity states of Sb in Ge, connected with L- and X-valleys of the conduction band. *Phys. Status Solidi B*. 1982. **114**, № 2. P. K101–K103. <https://doi.org/10.1002/pssb.2221140258>
12. Федосов А.В., Лунёв С.В., Федосов С.А. Особенности междолинного рассеяния носителей тока в  $n$ -Si при высоких температурах. *Фізика і техніка напівпровідників*. 2010. **44**, № 10. С. 1307–1309. <http://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/7237>



13. Панасюк Л.І., Коломоєць 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. <http://evnuir.vnu.edu.ua/handle/123456789/5249>
14. Луньов С.В., Панасюк Л.І., Федосов С.А. Константи деформаційного потенціалу  $\Xi_u$  та  $\Xi_d$  у  $n$ -Si, визначені методом тензорезистивного ефекту. *Укр. фіз. журн.* 2012. 57, № 6. С. 637–642. <http://archive.ujp.bitp.kiev.ua/files/journals/57/6/570608pu.pdf>
15. Панасюк Л.І., Захарчук Д.А., Ящинський Л.В., Коваль Ю.В. Кінетичні ефекти в кремнії та германії при сильних одновісних тисках. Луцьк: ІВВ Луцького НТУ, 2019. 154 с. <http://lib.lntu.edu.ua/uk/147258369/4997>

Надійшло до редакції 10.01.2022

## REFERENCES

1. Bir, G. L. & Pikus, G. E. (1974). Symmetry and strain-induced effects in semiconductors. New York: Wiley (in Russian).
2. Gaidar, G. P. (2015). Tensoreistance 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. <https://link.springer.com/article/10.3103/S1068375515020039>
3. Budzuliak, S. I. (2012). Tensoreistance effects in strongly deformed  $n$ -Si and  $n$ -Ge crystals. *Physics and Chemistry of Solid State*, 13, No. 1, pp. 34-39 (in Ukrainian). <http://page.if.ua/uploads/pccs/vol13/11301-05.pdf>
4. Gaidar, G. P. (2009). On methodology of measuring parameters with the increased sensitivity to residual or irradiation induced inhomogeneities in semiconductors. *Semicond. Phys. Quantum Electron. Optoelectron.*, 12, No. 4, pp. 324-327. [http://journal-spqeo.org.ua/n4\\_2009/v12n4-2009-p324-327.pdf](http://journal-spqeo.org.ua/n4_2009/v12n4-2009-p324-327.pdf)
5. Gorin, A. E., Gromova, G. V., Ermakov, V. M., Kogoutyuk, P. P., Kolomoets, V. V., Nasarchuk, P. F., Panasjuk, L. I. & Fedosov, S. A. (2011). Silicon  $p$ -MOS and  $n$ -MOS transistors with uniaxially strained channels in electronic device nanotechnology. *Ukr. J. Phys.*, 56, No. 9, pp. 917-921. <http://archive.ujp.bitp.kiev.ua/files/journals/56/9/560907p.pdf>
6. Kolomoets, V., Ermakov, V., Panasyuk, L., Fedosov, S., Orasgulyev, B. & Nazarchuk, P. (2013). Application of high uniaxial strain methods for semiconductor parameter determination. *Physica B*, 417, pp. 46-48. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2013.02.017>
7. Jrmakov, V. M., Fedosov, A. V., Colomojec, V. V. & Gorin, A. E. (2008). Application of tensorresistivity effect in high uniaxially strained  $n$ -Si and  $p$ -Si for increasing of current carriers mobility in channels of  $n$ - and  $p$ -MOS transistors. *Naukovyi Visnyk KUEITU. Novi Tekhnolohii*, No. 2 (20), pp. 48-51 (in Ukrainian).
8. Baranskii, P. I., Belyaev, O. E., Gaidar, G. P. (2015). Kinetic effects in multi-valley semiconductors. Kyiv: Naukova Dumka (in Ukrainian).
9. 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: Nadstyr'e (in Ukrainian).
10. Baranskii, P. I., Kolomoets, V. V., Sus', B. A. & Shapovalov, V. V. (1979). Some characteristics of the energy minima of  $\langle 110 \rangle$  type in  $n$ -Ge. *Fizyka i Tekhnika Poluprovodnikov*, 13, No. 3, pp. 602-604 (in Russian).
11. Baranskii, P. I., Baidakov, V. V., Ermakov, V. N., Grigorev, N. N., Kolomoets, V. V. & Kudykina, T. A. (1982). The ionisation of impurity states of Sb in Ge, connected with L- and X-valleys of the conduction band. *Phys. Status Solidi B*, 114, No. 2, pp. K101-K103. <https://doi.org/10.1002/pssb.2221140258>
12. Fedosov, A. V., Luniov, S. V. & Fedosov, S. A. (2010). Specific features of intervalley scattering of charge carriers in  $n$ -Si at high temperatures. *Semiconductors*, 44, No. 10, pp. 1263-1265. <https://doi.org/10.1134/S1063782610100039>
13. Panasjuk, L. I., Kolomojec, V. V. & Bozhko, V. V. (2012). The dominant role of  $f$ - and  $g$ -transitions in intervalley dissipation of  $n$ -type silicon in the temperature range of  $T = 300\text{--}450$  К. *Naukovyi Visnyk Volyn's'koho Universytetu im. Lesi Ukrainki. Fizychni Nauky*, No. 3, pp. 3-8 (in Ukrainian). <http://evnuir.vnu.edu.ua/handle/123456789/5249>
14. Luniov, S. V., Panasiuk, L. I. & Fedosov, S. A. (2012). Deformation potential constants  $\Xi_u$  and  $\Xi_d$  in  $n$ -Si determined with the use of the tensorresistance effect. *Ukr. J. Phys.*, 57, No. 6, pp. 636-641. <http://archive.ujp.bitp.kiev.ua/files/journals/57/6/570608p.pdf>
15. Panasiuk, L. I., Zakharchuk, D. A., Yashchynskiy, L. V. & Koval, Yu. V. (2019). Kinetic effects in silicon and germanium at strong uniaxial pressures. Lutsk: IVV Lutskoho NTU (in Ukrainian). <http://lib.lntu.edu.ua/uk/147258369/4997>

Received 10.01.2022

G.P. Gaidar, <https://orcid.org/0000-0003-2077-3484>

Institute for Nuclear Research of the NAS of Ukraine, Kyiv

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

#### ON THE METHODOLOGY OF DETERMINING THE TRANSVERSE TENSORESISTANCE IN MULTI-VALLEY SEMICONDUCTORS

The transverse (the current in the sample is oriented perpendicular to the deformation axis) and longitudinal (the current is directed along the deformation axis) tensor resistances of high-resistance  $n$ -Si crystals are investigated. The mobility anisotropy parameter was calculated for these two cases. The coincidence (within the experimental errors) of the obtained values of the parameter  $K$  was established when the current passes along the direction of deformation and perpendicular to it. Using  $n$ -Ge crystals, the reliability of the technique for measuring the transverse tensor resistance was confirmed by calculating the mobility anisotropy parameter using the data obtained from two independent experiments. A good agreement was obtained for the values of the anisotropy parameter  $K$ , calculated from the measurement data of only the longitudinal tensor resistance and from the measurement data of the longitudinal and transverse tensor resistances. It was experimentally confirmed that under conditions of strong elastic directional compressive deformation (in the absence of manifestation of the shift deformation components in  $n$ -Si crystals), only relative displacements of isoenergetic ellipsoids in multi-valley semiconductors along the energy scale occur, but the shape of the ellipsoids remains practically unchanged.

**Keywords:** *silicon, germanium, uniaxial compressive deformation, transverse tensor resistance, mobility anisotropy parameter.*