

Г.П. Гайдар

## Дослідження змін питомого опору n-Si з температурою і направленим тиском

Інститут ядерних досліджень НАН України, пр. Науки, 47, Київ, 03680, Україна. e-mail: [gaydar@kinr.kiev.ua](mailto:gaydar@kinr.kiev.ua)

У роботі досліджено зміни питомого опору кристалів n-Si з температурою і направленим тиском  $X$ , орієнтованим як у напрямку  $\langle 100 \rangle$ , так і в напрямку  $[111]$ . За експериментальними даними поздовжнього і поперечного тензоопору одержано значення параметра анізотропії рухливості для умов  $\vec{J} \parallel \vec{X} \parallel [100]$  та  $\vec{J} \perp \vec{X} \parallel [100]$ . Виявлено наявність тензоопору в n-Si за умов  $\vec{X} \parallel \vec{J} \parallel [111]$ , тобто, при відсутності міжмінімумного перерозподілу носіїв заряду. Наведено фізичне обґрунтування одержаних результатів.

**Ключові слова:** кремній, питомий опір, направлена пружна деформація, тензоопір, параметр анізотропії рухливості.

Стаття постуила до редакції 07.11.2016; прийнята до друку 05.03.2017.

### Вступ

Основними матеріалами для виробництва найширшого класу електронних приладів у напівпровідниковій електроніці уже понад половини століття залишаються кремній та германій [1, 2]. Прилади, виготовлені на їх основі, використовуються як у наукових дослідженнях, так і в промисловій індустрії [3-5]. Жорсткі вимоги в області техніки щодо надійності у роботі напівпровідникових приладів і їхньої стійкості до різних фізико-активних зовнішніх впливів спонукають дослідників до застосування методів, які дають найбільш точні і однозначні результати при визначенні основних параметрів матеріалів у широких інтервалах зміни зовнішніх умов [6, 7]. Застосування направлених пружних деформаційних впливів на кристали, що змінюють як міжатомні відстані, так і симетрію ґратки, призводить до суттєвих змін електронної підсистеми багатодолинних напівпровідників [8, 9]. Тому дослідження тензоефектів у напівпровідникових кристалах високої симетрії має важливе значення як у науковому, так і в прикладному аспектах [10, 11]. Значна інформативність такого методу дозволяє з високим ступенем достовірності вивчати особливості зонної структури багатодолинних напівпровідників та визначати її параметри і величини, які характеризують механізми розсіяння носіїв заряду [9, 12, 13].

Деформація напівпровідника є причиною виникнення низки ефектів, зумовлених взаємодією електронів з кристалічною ґраткою. Фізичним підґрунтям деформаційних ефектів є зміщення енергетичних рівнів напівпровідника під дією деформації і пов'язана з цим зміна енергетичного спектру носіїв заряду, що спричинює зміни електричних характеристик матеріалу [14]. В однорідних напівпровідниках зміщення енергетичних рівнів призводить до залежності питомого опору від деформації, тобто виникає *тензорезистивний ефект*, або *ефект тензоопору*. Одновісна пружна деформація знімає виродження по енергії еквівалентних мінімумів в Ge і Si n-типу провідності, а виникаючий при цьому міжмінімумний перерозподіл електронів зумовлює зміни питомого опору, оскільки рухливість носіїв заряду в ізоенергетичних еліпсоїдах цих кристалів різко анізотропна [8, 14].

Усі дослідження тензоопору можна умовно розбити на дві групи: у лінійному і нелінійному за деформацією наближеннях. У першому випадку виміри проводяться в області малих деформацій (які задовольняють умові  $\Xi_u \cdot u \ll kT$ , де  $\Xi_u$  – константа деформаційного потенціалу,  $u = X/C^*$  – деформація,  $C^*$  – пружна константа) і їхні результати служать для визначення числових значень коефіцієнтів тензоопору. У другому випадку зміна електропровідності кристалів досліджується при великих деформаціях, коли енергетична щільність  $\Delta E \sim \Xi_u \cdot u$  між долинами, що піднімаються, і тими,

що опускаються, стає порівнянню з  $kT$  ( $\Xi_u \cdot u \gg kT$ ) і тому в багатодолинних напівпровідниках починають проявлятися нелінійні за деформацією ефекти. Це, природно, відображається на залежностях змін питомого опору  $r_X/r_0$  від механічного навантаження  $X$  [ $r_X/r_0 = f(X)$ ], за допомогою яких ідентифікуються механізми спостережуваних явищ.

Недолік досліджень лінійних за деформацією ефектів полягає у недостатності інформації при поясненні експериментальних результатів, особливо у випадку, коли одночасно проявляються декілька механізмів тензоефектів. У лінійній теорії ефектів тензоопору зазвичай не враховують зміну ефективної маси носіїв заряду в зоні провідності завдяки малості ефекту взаємодії між зоною провідності і валентною зоною внаслідок великої ширини забороненої зони в цих матеріалах. Крім того, як правило, також нехтують ефектами міждолинного розсіяння носіїв заряду, оскільки вважається, що за звичайних умов при  $T < 100$  К міждолинне розсіяння вносить незначний вклад у час релаксації електронів провідності, який визначає електропровідність кристалів. Однак при більш високих температурах ( $T > 100$  К) у невідроджених кристалах n-Si міждолинне розсіяння починає проявлятися як у температурній залежності рухливості, так і в тензоопорі, оскільки деформація (при певних розміщеннях осі деформації відносно осей кристала) істотним чином може змінити або повністю виключити переходи між відповідними долинами [15,16]. Отже, обидва ефекти помітно будуть проявлятися в області сильних деформацій.

Для збільшення об'єму інформації, яку можна отримати про властивості досліджуваного багатодолинного напівпровідника в області сильних деформацій, експериментальні дані вимірів поздовжнього тензоопору (в умовах  $\vec{J} \parallel \vec{X}$ , де  $J$  – струм) бажано було б доповнювати вимірами поперечного тензоопору (хоча на практиці вивчення тензоефектів при  $\vec{J} \perp \vec{X}$  пов'язано зі значними труднощами). Окрім даних, необхідних для розрахунку константи деформаційного потенціалу  $\Xi_u$ , такі дослідження надають також експериментальний матеріал для обчислення параметра анізотропії рухливості  $K$ .

Метою даної роботи було встановлення закономірностей змін питомого опору монокристалів n-Si у залежності від механічного навантаження за умови орієнтації струму в зразку як уздовж, так і перпендикулярно до осі деформації, а також у залежності від температури (як за умови відсутності механічного навантаження, так і при прикладанні його вздовж різних кристалографічних напрямків).

## I. Поздовжній тензоопір. Теоретичні відомості

Розглянемо, як змінюється питомий опір n-Si в умовах направленої стиску при  $\vec{X} \parallel \vec{J} \parallel [100]$ . За

відсутності механічного напруження (при  $X = 0$ ) питома електропровідність кристала задається виразом:

$$S_0 = 2n_0 e m_{\parallel} + 4n_0 e m_{\perp}, \quad (1)$$

або

$$S_0 = 2n_0 e m_{\parallel} (1 + 2K), \quad (2)$$

де  $n_0$  – концентрація електронів в одному мінімумі недеформованого кристала (при  $X = 0$ ),  $m_{\parallel}$  і  $m_{\perp}$  – рухливість носіїв заряду вздовж і поперек довгої осі ізоенергетичного еліпсоїду відповідно,  $e$  – заряд електрона,  $K = m_{\perp} / m_{\parallel}$  – параметр анізотропії рухливості.

При накладанні у кремнії механічного напруження вздовж кристалографічного напрямку  $[100]$  два мінімуми ( $[100]$  та  $[\bar{1}00]$ ), розміщені в цьому напрямку, опускаються по шкалі енергій вниз, а чотири останні мінімуми ( $[010]$ ,  $[0\bar{1}0]$ ,  $[001]$ ,  $[00\bar{1}]$ ) піднімаються вгору, що і приведе до перерозподілу носіїв заряду між мінімумами. У цьому випадку питома електропровідність деформованого кристала матиме вигляд

$$S_X = 2n_1 e m_{\parallel} + 4n_2 e m_{\perp}, \quad (3)$$

де  $n_1$  та  $n_2$  – концентрація електронів у мінімумі, який опускається, та у мінімумі, що піднімається по шкалі енергій під впливом одновісної пружної деформації відповідно.

Слід зауважити, що у невідроджених кристалах n-Si зміна питомого опору зі збільшенням механічного напруження  $X$  (коли  $\vec{X} \parallel \vec{J} \parallel [100]$ ) обумовлена тим, що носії, переселяючись із долин, що піднімаються, в долини, що опускаються, зменшують свою рухливість від значення  $m_{\perp}$  до величини  $m_{\parallel}$ .

Для зразків, у яких носії заряду описуються статистикою Максвела-Больцмана, відношення  $n_2/n_1$  може бути представлене наступним чином:

$$\frac{n_2}{n_1} = \exp\left(-\frac{\Delta E}{kT}\right) = C, \quad (4)$$

де  $\Delta E$  – енергетична щілина між мінімумами енергії в деформованому кристалі, яка визначається співвідношенням:

$$\Delta E = \Xi_u (S_{11} - S_{12}) X, \quad (5)$$

де  $S_{11}$  і  $S_{12}$  – константи жорсткості.

Із умови сталості повної концентрації електронів у зоні провідності (с-зоні):

$$2n_1 + 4n_2 = 6n_0 \quad (6)$$

та з використанням виразу (4) знаходимо:

$$n_1 = \frac{3n_0}{1+2C}, \quad n_2 = \frac{3n_0 C}{1+2C}. \quad (7)$$

На основі (7) і (3) запишемо у загальному вигляді

$$s_X = 6n_0 e m_{\parallel} \frac{(1+2CK)}{(1+2C)} \quad (8)$$

або ж одержимо тензопір n-Si, що виникає в умовах направленої стиску при  $\vec{X} \parallel \vec{J} \parallel [100]$  і описується співвідношенням:

$$r_X = r_0 \frac{(1+2K)(1+2C)}{3(1+2CK)}, \quad (9)$$

де  $r_0$  – питомий опір недеформованого кристала. Але оскільки за даних умов при досить високій деформації всі електрони переселяються у дві долини, то провідність визначатиметься наступним чином:

$$s_{\infty} = 6n_0 e m_{\parallel}. \quad (10)$$

Підставляючи (10) у (8), одержимо зв'язок між  $r_X$  і  $r_{\infty}$ :

$$r_X = r_{\infty} \frac{1+2C}{1+2CK}, \quad (11)$$

де  $r_{\infty} = \lim_{X \rightarrow \infty} r(X)$  – значення питомого опору при деформації  $X$ , яка забезпечує повне переселення носіїв струму в мінімуми енергії, розташовані в напрямку осі деформації.

Отже, у випадку з n-Si за вимірними значеннями  $r_0$  чи  $r_{\infty}$  при відомих значеннях  $K$  і  $C$  на основі співвідношень (9) і (11) можна розрахувати питомий опір кристала при будь-якому значенні  $X$ . Крім того, знаючи відношення  $r_{\infty} / r_0$  можна одержати з виразу (11) і параметр анізотропії рухливості  $K$  (при  $X = 0, C = 1$ ):

$$\frac{r_{\infty}}{r_0} = \frac{1+2K}{3}, \quad (12)$$

звідки для n-Si за умов  $\vec{X} \parallel \vec{J} \parallel [100]$  матимемо співвідношення

$$K \frac{r_{\parallel}}{J \parallel X \parallel [100]} = \frac{3}{2} \frac{r_{\infty}}{r_0} - \frac{1}{2}, \quad (13)$$

Розглянувши (по аналогії з n-Si) зміну питомого опору n-Ge від прикладеного механічного напруження  $X$ , коли  $\vec{X} \parallel \vec{J} \parallel [111]$ , можна одержати вираз, подібний до виразу (13), але для кристалів германію:

$$K \frac{r_{\parallel}}{J \parallel X \parallel [111]} = \frac{3}{2} \frac{r_{\infty}}{r_0} - \frac{1}{2}, \quad (14)$$

Одержані для n-Si і n-Ge співвідношення (13) і (14) подібні за зовнішнім виглядом, але по суті відрізняються тим, що у випадку n-Si  $\frac{r_{\infty}}{r_0} \equiv \frac{r_{\infty}^{[100]}}{r_0}$ ,

а для n-Ge  $\frac{r_{\infty}}{r_0} \equiv \frac{r_{\infty}^{[111]}}{r_0}$ .

Співвідношення (13) і (14) дозволяють визначати з високою точністю параметри анізотропії рухливості

на основі вимірів лише поздовжнього тензопору, але за умови повного переселення електронів у мінімум(и), який(і) опускається(ються) при деформації. Окрім цього, зазначені співвідношення дають можливість надійно визначати параметр анізотропії розсіяння  $K_t = \langle t_{\parallel} \rangle / \langle t_{\perp} \rangle$  (ламаними дужками позначено звичайне усереднення за енергією), оскільки  $K = \frac{m_{\perp}}{m_{\parallel}} = \frac{K_m}{K_t} = \frac{m_{\parallel} \langle t_{\perp} \rangle}{m_{\perp} \langle t_{\parallel} \rangle}$ , де

$K_m = m_{\parallel} / m_{\perp}$  – параметр анізотропії ефективної маси;  $m_{\parallel}$  і  $m_{\perp}$  – циклотронні ефективні маси носіїв заряду вздовж і поперек довгої осі ізоенергетичного еліпсоїда відповідно;  $t_{\parallel}$  і  $t_{\perp}$  – компоненти тензора часу релаксації за відсутності магнітного поля в лінійному наближенні відповідно.

Слід зауважити, тим не менш, що обґрунтоване використання співвідношень (13) і (14) можливе тільки тоді, коли з деформацією істотно не змінюються: енергетичний спектр електронів; фононний спектр коливань кристалічної ґратки; константи деформаційного потенціалу  $\Xi_u$ ; а визначальна роль у формуванні ефекту тензопору належить деформаційному перерозподілу електронів між долинами (при збереженні їх загальної концентрації у зоні провідності (с-зоні):  $4n_0 = const$  – у випадку n-Ge і  $6n_0 = const$  – в n-Si).

Одним із факторів, який порушує зазначені умови у випадку n-Si (змінює при деформації відносний внесок між окремими механізмами тензопору), є залежність від деформації ймовірності  $f$ -переходів між долинами, розміщеними на взаємно перпендикулярних осях (рис. 1). Саме тому, для надійного визначення параметра анізотропії рухливості  $K = m_{\perp} / m_{\parallel}$ , в n-Si при  $T > 100$  К (коли істотним стає міждолинне розсіяння), необхідно експериментально вивчати не лише поздовжній тензопір  $r_X^{\parallel} / r_0$  (при  $\vec{J} \parallel \vec{X}$ ), але також

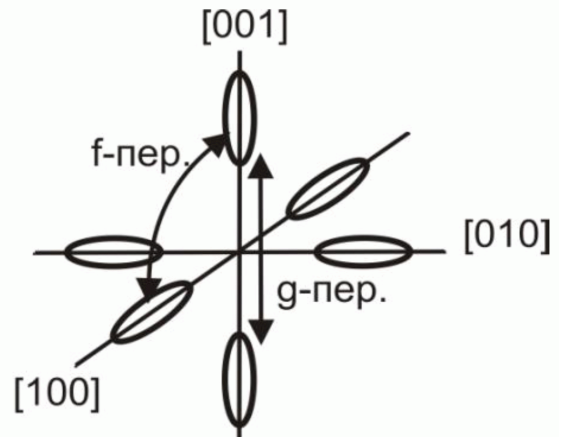


Рис. 1. Міждолинне розсіяння електронів у n-Si [16].

проводити виміри і поперечного тензоопору  $r_{\vec{X}}^{\perp} / r_0$  (при  $\vec{J} \perp \vec{X}$ ). Такі виміри дають можливість розширити інформацію про властивості досліджуваних багатодолинних напівпровідників. Це, наприклад, знаходить свій прояв у дослідах з 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.

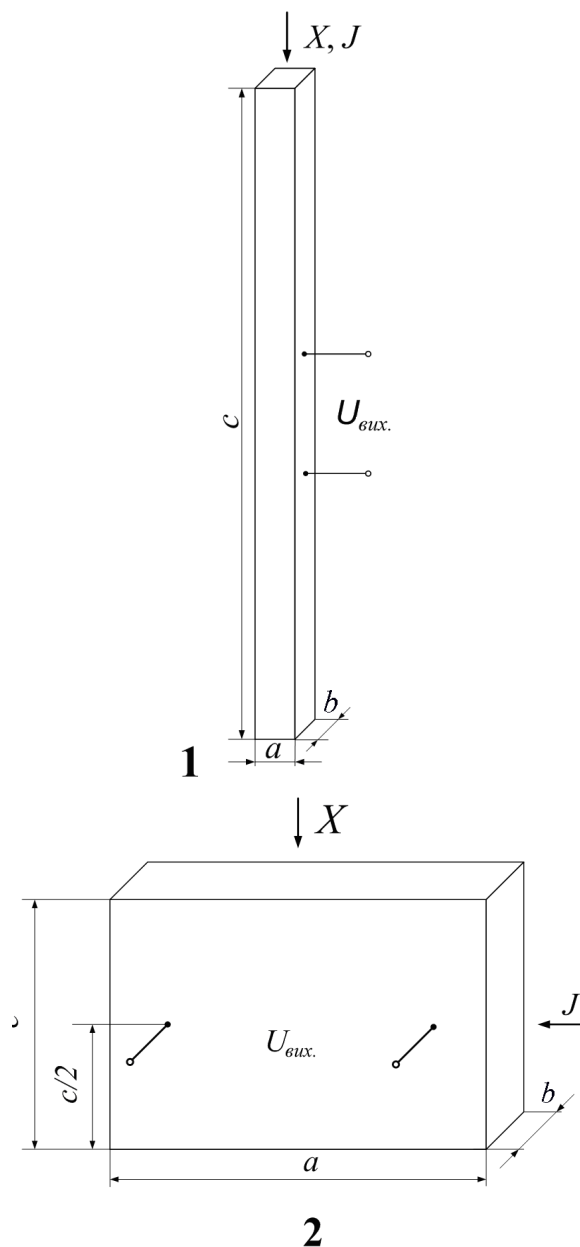
Слід зауважити, що при вивченні ефекту поперечного тензоопору, фізична картина явища залишається тією ж самою, що і при дослідженні поздовжнього тензоопору. Одновісна пружна деформація, змінюючи симетрію кристалічної ґратки, приводить до зняття виродження по енергії еквівалентних мінімумів. Для n-Si при накладанні механічного напруження  $X$  в умовах  $\vec{J} \perp \vec{X} \parallel [100]$ , відповідно до [14], матимемо вираз для обчислення параметра анізотропії рухливості:

$$K_{\vec{J} \perp \vec{X} \parallel [100]} = \frac{1}{3 \frac{r_{\infty}}{r_0} - 2} = \left( 3 \frac{r_{\infty}}{r_0} - 2 \right)^{-1}, \quad (15)$$

## II. Результати та обговорення

При вивченні змін питомого опору багатодолинних напівпровідників типу n-Si та n-Ge під впливом направленного (одновісного) тиску зазвичай користуються припущенням, що такий тиск тільки зміщує ізоенергетичні еліпсоїди в шкалі енергії, не змінюючи при цьому помітним чином їхньої форми [14]. Враховуючи важливість цього припущення, метою даної роботи була необхідність отримати додатковий доказ його прийнятності в рамках спеціально для цього поставлених дослідів. Таким чином, одержали б ще одну підставу стверджувати, що назване вище припущення відповідає реаліям і при практичному його використанні поява будь-яких сумнівів недоречна.

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 якості такого параметра було обрано параметр анізотропії рухливості в багатодолинних напівпровідниках  $K$ , який можна обчислювати з результатів дослідів по тензоопору, використовуючи при цьому різні співвідношення, а саме: (13) і (15) (для випадку n-Si). Співвідношення (13) використовується для обробки результатів вимірів тензоопору n-Si в умовах  $\vec{J} \parallel \vec{X} \parallel [100]$ , а співвідношення (15) придатне для обробки результатів, отримуваних теж при дослідженні тензоопору n-Si, але за умов, що відповідають взаємно перпендикулярному розміщенню векторів струму  $\vec{J}$  і механічного



**Рис. 2.** Типова форма зразків і їх розміри ( $a \times b \times c$ ) для вимірів поздовжнього і поперечного тензоопору: 1 –  $\vec{J} \parallel \vec{X}$  ( $0,7 \times 0,5 \times 10$  мм); 2 –  $\vec{J} \perp \vec{X}$  ( $2,2 \times 0,5 \times 2,0$  мм).

напруження  $\vec{X}$ , тобто, при  $\vec{J} \perp \vec{X} \parallel [100]$ .

На рис. 2 представлено типову форму та розміри зразків для дослідження тензоефектів уздовж і поперек осі дії деформуючого зусилля.

У даній роботі необхідні виміри проведено при  $T = 77,4$  К на кристалах n-Si з питомим опором  $r_{300\text{K}} \cong 100$  Ом·см, і результати цих вимірів зображено відповідними кривими на рис. 3.

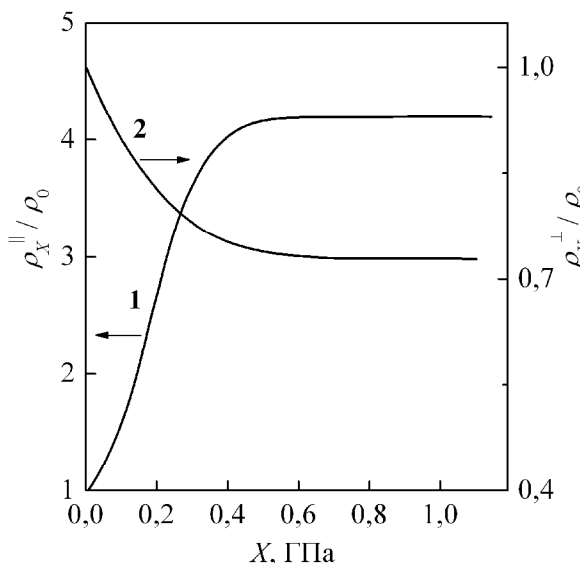
Використання експериментально отриманих результатів в області насичення досліджених залежностей (рис. 3) забезпечило одержання даних щодо параметра анізотропії рухливості  $K$ , а саме: у відповідності з (13) та кривою 1

$$K \frac{\mathbf{r}}{J \parallel \dot{X}} \parallel [100] = \frac{3}{2} \frac{r_{\infty}^{\parallel}}{r_0} - \frac{1}{2} \cong 5,8; \quad (16)$$

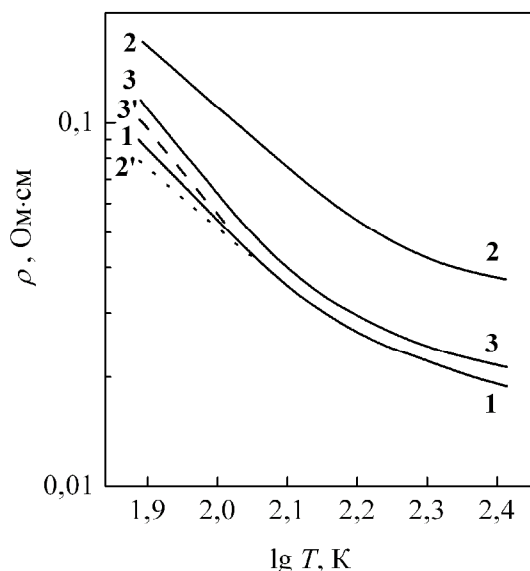
у відповідності з (15) та кривою 2 цього ж рисунка

$$K \frac{\mathbf{r}}{J \perp \dot{X}} \parallel [100] = \left( 3 \frac{r_{\infty}^{\perp}}{r_0} - 2 \right)^{-1} \cong 5,3 \quad (17)$$

Таким чином, отримані результати для n-Si при проходженні струму вздовж напрямку деформування [100] і перпендикулярно до нього виявилися досить близькими між собою, щоб можна було (з



**Рис. 3.** Залежності  $r_{X}^{\parallel} / r_0 = f(X)$  і  $r_{X}^{\perp} / r_0 = f(X)$  кристалів n-Si ( $r_{300K} \cong 100 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ ) при  $T = 77,4 \text{ К}$  і  $\dot{X} \parallel [100]$ : 1 –  $\dot{J} \parallel \dot{X}$ ; 2 –  $\dot{J} \perp \dot{X}$ .



**Рис. 4.** Залежності  $r = f(\lg T)$  у подвійному логарифмічному масштабі для низькоомного n-Si <P> ( $n_e \cong 3,44 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ): 1 –  $X = 0$ ; 2 –  $\dot{J} \parallel \dot{X} \parallel [001]$  та 3 –  $\dot{J} \parallel \dot{X} \parallel [111]$  при  $X = 1,2 \text{ ГПа}$ . Штрихові лінії 2' і 3' відповідають паралельному зміщенню кривих 2 і 3 відповідно.

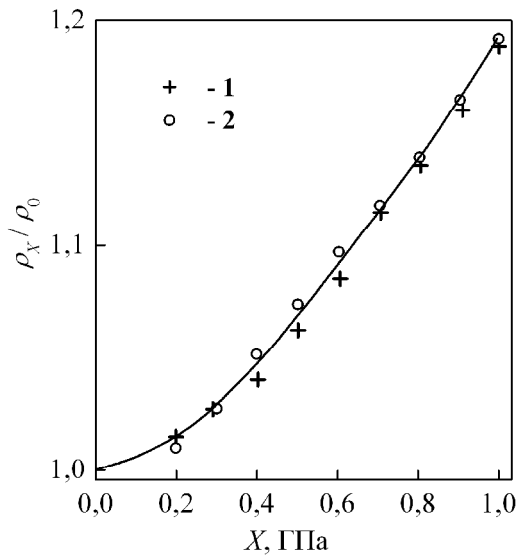
урахуванням точності проведених експериментів) вважати їх близькими до співпадаючих. Із цього безпосередньо випливає, що вирази, призначені для отримання значень параметра анізотропії рухливості  $K$ , в обох розглянутих вище випадках адекватно описують зміну опору багатодолинного напівпровідника під впливом направленою (одновісного) тиску. А отже, ізоенергетичні еліпсоїди в багатодолинних напівпровідниках зазнають при цьому лише зміщень в шкалі енергій, практично не змінюючи (або дуже мало змінюючи) свою форму.

Дещо інакше веде себе багатодолинний n-Si <P> ( $r_{300K} \cong 0,02 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ ) при його деформуванні в умовах можливого прояву деформації зсуву, яка виникає за умов  $\dot{J} \parallel \dot{X} \parallel [111]$  (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. 4, температурні зміни  $r = f(T)$  в недеформованих і одновісно пружно деформованих кристалах уздовж різних кристалографічних напрямків, як і слід було очікувати, виявилися суттєво різними. Причому названі відмінності, як свідчить рис. 4, особливо помітні в області переважно домішкового розсіяння (тобто, при низьких температурах). У цій температурній області при  $\dot{J} \parallel \dot{X} \parallel [111]$ , незважаючи на відсутність міжмінімумного перерозподілу носіїв заряду, виявлено наявність змін питомого опору в кристалах n-Si.

З рис. 4 видно, що крутизна зростання  $r$  зі зниженням  $T$  в області азотних температур у недеформованому кристалі (крива 1) помітно вища, ніж в умовах деформованого кристалу при  $\dot{J} \parallel \dot{X} \parallel [001]$  (криві 2 і 2' цього ж рисунка). Зростання крутизни  $r = f(T)$ , яке спостерігається в умовах деформації n-Si вздовж [111] (рис. 4, криві 3 і 3'), у порівнянні з недеформованим кристалом (крива 1), свідчить про те, що у випадку  $\dot{X} \parallel [111]$  енергетичний зазор між дном зони провідності і рівнем залягання домішок з ростом  $X$  не зменшується (як це було при  $\dot{X} \parallel [001]$ ), а зростає.

Оскільки енергія іонізації домішки фосфору в n-Si ( $\sim 0,045 \text{ eV}$ ) приблизно в 4 рази вища, ніж в 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 при кімнатній температурі (не кажучи вже про більш низькі  $T$ ) не досягається. Отже, вивчення змін питомого опору в даних експериментах відбувалося в умовах неповного "виснаження" 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  $\dot{X} \parallel [111]$ ), а з їх деформаційним "виморожуванням" із с-зони.

Слід зауважити, що ще одним доказом



**Рис. 5.** Тензоопір сильно легованого n-Si ( $r_{300\text{K}} \cong 0,43 \cdot 10^{-2}$  Ом·см) в області температури рідкого гелію за умов: 1 (+) –  $J \parallel X \parallel [111]$ ; 2 (o) –  $J \perp X \parallel [111]$ .

достовірності даних, які одержують при  $J \perp X$ , але (на відміну від вищеописаних дослідів) уже за відсутності міжмінімумного перерозподілу носіїв заряду, слугує наступний експериментальний факт. Величина тензоопору зразків n-Si, деформованих у напрямку [111] – симетричному відносно всіх ізоенергетичних еліпсоїдів – практично не залежить від того, вздовж чи поперек осі деформації вимірюється  $r$  (рис. 5). Причому це відмічається навіть тоді, коли в останньому випадку дослідження провести не в одному, а в двох взаємно перпендикулярних напрямках пропускання електричного струму крізь зразок.

Зазначені експерименти були виконані при  $T = 4,2$  К на сильно легованих кристалах n-Si (As) ( $r_{300\text{K}} \cong 0,43 \cdot 10^{-2}$  Ом·см,  $n_{e300\text{K}} \approx 1,07 \cdot 10^{17}$  см<sup>-3</sup>), вирощених у кристалографічному напрямку <111> методом Чохральського. Зразки вирізали в цьому ж напрямку з точністю виведення орієнтації (за допомогою загальноприйнятого рентгенівського

методу) не гірше 15'. Виміри тензоопору проводили при пропусканні струму як уздовж деформуючого навантаження  $X$ , так і перпендикулярно до нього, тобто, за умов  $J \parallel X \parallel [111]$  та  $J \perp X \parallel [111]$ . З'ясувалося також, що при низькотемпературних вимірах підвищується роздільна здатність результатів вимірів ефекту відносного збільшення питомого опору низькоомних кристалів n-Si в умовах прикладання механічного навантаження  $X \parallel [111]$ .

## Висновки

1. Експериментально досліджено зміни питомого опору монокристалів n-Si ( $r_{300\text{K}} \cong 100$  Ом·см) як при  $J \parallel X \parallel [100]$ , так і за умови, коли струм у зразку був орієнтованим перпендикулярно до осі деформації, тобто, при  $J \perp X \parallel [100]$ . Одержані значення параметра анізотропії рухливості при проходженні струму вздовж напрямку деформування ( $K_{J \parallel X \parallel [100]}^{\mathbf{r}} \cong 5,8$ ) і перпендикулярно до нього ( $K_{J \perp X \parallel [100]}^{\mathbf{r}} \cong 5,3$ ) виявилися близькими між собою.

2. У кристалах n-Si (P) ( $r_{300\text{K}} \cong 0,02$  Ом·см) досліджено залежності питомого опору від температури  $r = f(T)$  як за умови  $X = 0$ , так і при  $J \parallel X \parallel [001]$  та  $J \parallel X \parallel [111]$  (де  $X = 1,2$  ГПа) і виявлено відмінності між цими залежностями в області переважно домішкового розсіяння (при низьких температурах із використаного діапазону). Виявлено наявність тензоопору в n-Si за умов симетричного розміщення осі деформації відносно всіх ізоенергетичних еліпсоїдів, коли міжмінімумний перерозподіл носіїв заряду в принципі відсутній.

**Гайдар Г.П.** - доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, завідувач відділу радіаційної фізики.

- [1] О.В. Третьак, В.В. Ільченко, Фізичні основи напівпровідникової електроніки (ВПЦ "Київський університет", Київ, 2011).
- [2] Н.Н. Герасименко, Ю.Н. Пархоменко, Кремний – матеріал наноелектроніки (Техносфера, Москва, 2007).
- [3] Я.В. Лепіх, Ю.О. Гордієнко, А.О. Дружинін, Створення мікроелектронних датчиків нового покоління для інтелектуальних систем: Монографія (Астропринт, Одеса, 2010).
- [4] А.Є. Горін, Г.В. Громова, В.М. Єрмаков, П.П. Когутюк, В.В. Коломєць, П.Ф. Назарчук, Л.І. Панасюк, С.А. Федосов, Укр. фіз. журн. 56 (9), 920 (2011).
- [5] G.P. Gaidar, S.V. Berdnichenko, V.G. Vorobyov, V.I. Kochkin, V.F. Lastovetskiy, P.G. Litovchenko, Вопросы атомной науки и техники № 2 (102), Сер. Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение (107), 17 (2016).
- [6] V. Kolomoets, V. Ermakov, L. Panasyuk, S. Fedosov, B. Orasgulyev, P. Nazarchuk, Physica B: Condensed Matter 417, 46 (2013).

- [7] Г.П. Гайдар, Кинетика электронных процессов в Si и Ge в полях внешних воздействий: Монография (LAP LAMBERT Academic Publishing, Saarbrücken, Deutschland, 2015).
- [8] Г.Л. Бир, Г.Е. Пикус, Симметрия и деформационные эффекты в полупроводниках (Наука, Москва, 1972).
- [9] Г.П. Гайдар, Электронная обработка материалов 51 (2), 85 (2015).
- [10] С.І. Будзуляк, Фізика і хімія твердого тіла 13 (1), 34 (2012).
- [11] G.P. Gaidar, Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics 12 (4), 324 (2009).
- [12] С.В. Луньов, Л.І. Панасюк, С.А. Федосов, Укр. фіз. журн. 57 (6), 637 (2012).
- [13] С.А. Федосов, С.В. Луньов, Д.А. Захарчук, Л.І. Панасюк, Ю.В. Коваль, Наук. вісн. Волин. нац. ун-ту ім. Лесі Українки. Фіз. науки (16), 39 (2011).
- [14] П.І. Баранський, А.В. Федосов, Г.П. Гайдар, Фізичні властивості кристалів кремнію та германію в полях ефективного зовнішнього впливу (Надстир'я, Луцьк, 2000).
- [15] А.В. Федосов, С.В. Лун'єв, С.А. Федосов, ФТП 44 (10), 1307 (2010).
- [16] Л.І. Панасюк, В.В. Коломоєць, В.В. Божко, Наук. вісн. Волин. нац. ун-ту ім. Лесі Українки. Фіз. науки (3), 3 (2012).

G.P. Gaidar

## Investigation of Changes in Resistivity of n-Si with Temperature and Uniaxial Stress

*Institute for Nuclear Research of NAS of Ukraine, 47, prospect Nauky, 03680 Kyiv, Ukraine, e-mail: [gaydar@kinr.kiev.ua](mailto:gaydar@kinr.kiev.ua)*

In this work the changes in resistivity of n-Si with temperature and uniaxial stress  $X$ , oriented both in  $\langle 100 \rangle$  and in  $[111]$  direction, were investigated. The value of the anisotropy parameter of mobility was obtained in the conditions of  $\vec{J} \parallel \vec{X} \parallel [100]$  and  $\vec{J} \perp \vec{X} \parallel [100]$  with using the experimental data concerning longitudinal and transverse tensorresistance. The presence of the n-Si tensorresistance was found in the conditions of  $\vec{X} \parallel \vec{J} \parallel [111]$ , i.e., in the absence of the interminimum redistribution of charge carriers. The physical explanation of the results was presented.

**Keywords:** silicon, resistivity, uniaxial elastic deformation, tensorresistance, anisotropy parameter of mobility.