

Вплив одновісного тиску на σ_2 -провідність сильно легovanого p -Si(B)

Л.І. Панасюк^{1,*}, В.В. Коломоець², В.М. Єрмаков², С.А. Федосов³

¹ Луцький національний технічний університет, вул. Львівська, 75, 43018 Луцьк, Україна

² Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України, пр. Науки, 41, 03028 Київ, Україна

³ Східноєвропейський національний університет імені Лесі Українки, пр. Волі, 13, 43025 Луцьк, Україна

(Одержано 13.12.2016, у відредагованій формі – 08.02.2017, опубліковано online 20.02.2017)

У роботі представлені результати досліджень тензорезистивного ефекту в сильно деформованих слабоізоляторних кристалах p -Si(B) в області σ_2 -провідності для головних кристалографічних напрямків $X||[111]$, $X||[110]$ та $X||[001]$. Робота переслідує мету дослідити вплив сильного одновісного тиску на домішкову σ_2 -провідність у кристалах p -Si(B) із концентрацією домішок, яка наближається до критичної концентрації переходу метал-ізолятор та встановити механізми досліджуваних ефектів. Встановлено, що немонотонні залежності $\rho_X/\rho_0 = f(X)$ поздовжнього тензорезистивного ефекту для головних кристалографічних орієнтацій та їх анізотропія визначаються зміною ефективних мас важких дірок з тиском, обумовленою відповідними закономірностями перебудови енергетичного спектру валентної зони за рахунок зняття виродження зон важких і легких дірок при одновісному тиску.

Ключові слова: Кристал, Домішкова провідність, Анізотропія, Одновісний тиск, Тензорезистивний ефект, Кристалографічний напрямок.

DOI: 10.21272/jnep.9(1).01020

PACS number: 72.20.Fr

1. ВСТУП

Тензорезистивний (ТР) ефект вперше експериментально виявлений Смітом у кристалах кремнію та германію n -типу. Фізичний зміст, одержаних Смітом дослідних даних, пояснив Херрінг [1]. Одновісна пружна деформація знімає виродження еквівалентних відносно осей симетрії k -простору мінімумів енергії [1]. Це зумовлює зміщення їх по відношенню один до одного. А виникаючий при цьому міжмінімумний перерозподіл електронів, призводить до зміни питомого опору, оскільки рухливість носіїв струму в ізоенергетичних еліпсоїдах цих кристалів різко анізотропна. Міждолинний перерозподіл носіїв струму, при виникненні енергетичної щільності між долинами, відбувається у відповідності з законом розподілення електронів по енергії, що описується функцією Больцмана для неvirодженого електронного газу або функцією Фермі-Дірака для virодженого випадку. Величина енергетичної щільності між долинами залежить від орієнтації осі деформації, величини цієї деформації і значень констант деформаційного потенціалу.

Домішкова провідність, яка спостерігається в напівпровідниках при низьких температурах характеризується різними енергіями активації. Енергію ε_2 пов'язують з переходом носіїв з основного стану в домішкову зону, що утворюється з двократно заповнених домішкових станів (A^+ – для напівпровідників p -типу). Залежність домішкової провідності від деформації абсолютно різна для різних областей концентрацій домішок.

Результати дослідження ТР ефекту у неvirоджених кристалах p -Si в області σ_1 -провідності для головних кристалографічних орієнтацій [2] вказують на те, що зміна питомого опору при $T = 78$ К зумов-

лена домінуючим ефектом зменшення величини ефективної маси "важких" дірок при зростанні одновісного тиску X незважаючи на наявність механізму зростання ефективної маси "легких" дірок при переселенні їх в зону "важких" дірок.

Слід також зазначити, що збільшення концентрації легуючої домішки у p -Si, для орієнтації $X||[100]$ призводить до зростання внеску в тензорезистивні ефекти механізму переселення дірок із зони "легких" у зону "важких" дірок.

Метою нашої роботи являється дослідження впливу одновісного тиску на σ_2 -провідність у кристалах p -Si(B) із концентрацією домішок, яка наближається до критичної концентрації N_c переходу метал-ізолятор для головних кристалографічних напрямків $X||[111]$, $X||[110]$, $X||[001]$ та встановлення механізмів досліджуваних ефектів.

2. ОПИС ОБ'ЄКТУ ТА МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Опис об'єкту

Структура валентної зони кристалів p -Si та p -Ge є набагато складнішою, ніж зони провідності і складається з трьох зон, які називають зоною важких, легких дірок та спин-орбітально відщепленою зоною (рис. 1а). Перші дві валентні зони, для яких стан $J = 3/2$, virоджені при $k = 0$ і взаємодія між ними зумовлює деформацію їх енергетичних поверхонь, які у трьохвимірному просторі являють собою деформовані сфери (гофровані поверхні), вигляд яких зображено на рис. 1а [3].

Третя зона, за рахунок впливу спин-орбітальної взаємодії відщеплена від двох інших, має сферичну енергетичну поверхню і в провідності участі не

* leonid9030@gmail.com

приймає. Енергія спін-орбітального розщеплення становить 0,29 еВ для кристалу германію [4] і 0,044 еВ для кремнію [4]. Таким чином діркова провідність у кремнії визначається співвідношенням:

$$\sigma = e^2 \cdot \tau \left(\frac{p_h}{m_h} + \frac{p_l}{m_l} \right), \quad (1)$$

де e – заряд електрона, τ , m_h , m_l , p_h , p_l – час релаксації, маса та концентрація відповідно важких та легких дірок. Слід зазначити, що час релаксації τ передбачається однаковим для важких та легких дірок, ізотропним і незалежним від тиску.

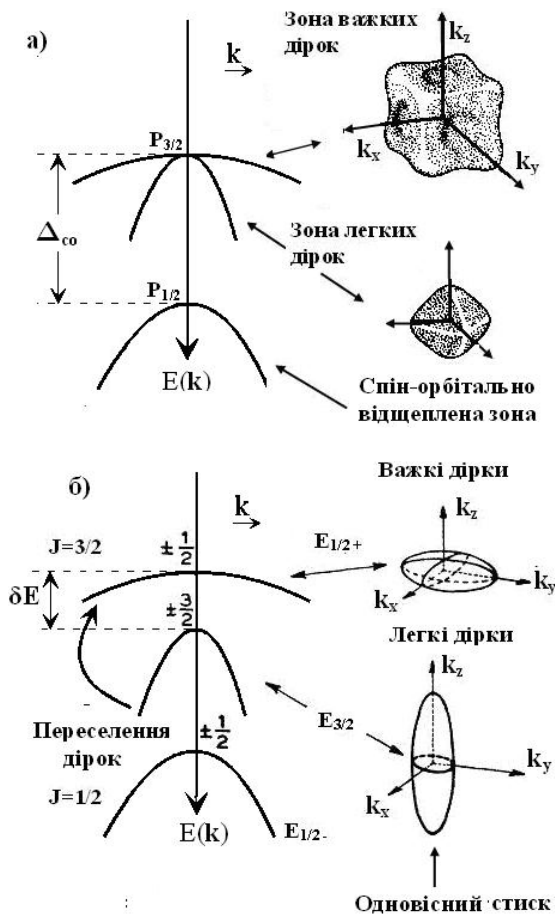


Рис. 1 – Структура валентної зони для недеформованих (а) та одновісно-деформованих (б) кристалів кремнію та германію

При одновісному тиску відбувається зміна кубічної симетрії та розщеплення зон легких і важких дірок. В одновісно-деформованих кристалах, коли виродження повністю знімається, при умові $X \parallel [001]$ та $X \parallel [111]$ ізоенергетичні поверхні легких і важких дірок являтимуть анізотропні поверхні. Ці поверхні близькі до еліпсоїдів обертання, осі яких збігаються з віссю деформації. Причому в зоні важких дірок формується сплюснутий, а в зоні легких витягнутий вздовж осі деформації еліпсоїди (рис. 1б). У результаті чого легкі дірки із зони з меншою кривизною переходять у зону з більшою кривизною, де їх ефективна маса стає більшою. Якщо концентрація

носіїв струму мала і температури досить низькі (78 К), то при значній деформації лише зона важких дірок буде зайнята носіями струму. Вони і прийматимуть участь у різних кінетичних ефектах з тією ефективною масою, яка відповідатиме цій зоні. Перерозподіл легких та важких дірок внаслідок різної їх рухливості веде до зміни провідності та опору кристалів (тензорезистивний ефект). Таким чином ТР ефект в кремнії та германії p -типу пов'язаний з переселенням дірок та зміною їх маси.

Домішкова провідність, яка спостерігається в напівпровідниках при низьких температурах характеризується трьома енергіями активації [5]. Температурна залежність провідності може бути представлена у вигляді:

$$\sigma = \sigma_1 \exp \frac{\varepsilon_1}{kT} + \sigma_2 \exp \frac{\varepsilon_2}{kT} + \sigma_3 \exp \frac{\varepsilon_3}{kT}, \quad (2)$$

де ε_1 – енергія іонізації акцептора (якщо говорити про матеріал p -типу), ε_2 пов'язують з переходом носіїв з основного стану в домішкову зону, що утворюється з двократно заповнених домішкових станів (A^+ – для напівпровідників p -типу), енергія ε_3 відповідає стрибковій провідності.

У залежності від вмісту домішок і ступеня компенсації при зміні температури спостерігається той чи інший тип домішкової провідності: σ_1 , σ_2 , σ_3 . Із збільшенням концентрації домішок N енергії активації ε_2 та ε_3 зменшуються і при деякій критичній концентрації N_c зникають. Якщо $N > N_c$ питомий опір і коефіцієнт Холла практично не залежать від температури і провідність має металічний характер. Детальний теоретичний та експериментальний огляд домішкової провідності для різних областей концентрацій можна знайти в роботі Мотта [6].

2.2 Методи дослідження

З метою розширення діапазону одновісних тисків (до 6 ГПа) та автоматизації експерименту на базі ЕОМ, було вдосконалено лабораторний варіант установки [7] для досліджень фізичних властивостей твердого тіла при одновісних деформаціях. Спеціально розроблена електрична схема дозволяла проводити вимірювання в широкому діапазоні зміни струмів (0,1 мкА ÷ 100 мА) при незмінному коефіцієнті стабілізації у всьому діапазоні і температурній незалежності вихідних величин, що значно спрощує та прискорює процес вимірювання у випадку великої зміни опору.

Для дослідження тензоефектів при великих одновісних тисках використовувались гантелеподібні циліндричні зразки. Особливістю таких зразків було те, що струмові контакти наносились на краї потовщень. Це дозволяло виводити їх із зони екстремального механічного навантаження, тоді як для зразків у формі прямокутного паралелепіпеда струмові контакти знаходилися на торцях зразка і були, таким чином, розташовані безпосередньо у зоні впливу механічного тиску. Гантелеподібні циліндричні зразки виготовлялись за допомогою спеціально розроблено-

го устаткування і мали такі розміри: діаметр тонкого перешийка – $(0,5 \div 0,6)$ мм; довжина тонкого перешийка $(1,5 \div 2,0)$ мм; діаметр потовщень $\sim 2,5$ мм; їх довжина ~ 2 мм.

Використання зразків такої форми дозволило не тільки виключити інжекцію неосновних носіїв струму, що важливо при дослідженні явищ транспорту в сильних електричних полях, але й досягти гранично високих значень одновісного тиску кристалів, так як в цьому випадку контакти винесені із зони високого тиску в вузькій області зразка.

Зразки для досліджень вирізались з монокристалічних зливків *n*-Si, вирощених за методом Чохральського в певних кристалографічних напрямках. Точність методу рентгенівської кристалографічної орієнтації $\pm 15^\circ$. Дезорієнтація прикладеної напруги по відношенню до кристалографічної осі була не більше $\pm 30'$ [9].

З врахуванням підвищеної хрупкості кремнію при температурах, нижчих за 300 К, необхідно було забезпечити досить плавне збільшення та зняття механічного навантаження на кристал. Таке навантаження досягалось за допомогою води, швидкість витікання якої могла змінюватись у досить широкому інтервалі. Окрім цього, треба було вимірювальний модуль при необхідності охолоджувати до температури рідкого азоту чи рідкого гелію. Таким чином, зараз така установка дозволяє одержувати при вказаних температурах для кристалів кремнію одновісні напруги (тиски) до 6,5 ГПа.

3. ОПИС ТА АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ

На рис. 2 представлені залежності $\rho_X/\rho_0 = f(X)$ для кристалів кремнію з концентрацією домішок бору $N_B = 3,5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, яка наближається до величини критичної концентрації переходу метал-ізолятор у цих кристалах. Таким чином нами було досліджено область σ_2 -провідності (див. рівняння 2). Експериментальні залежності були отримані для основних кристалографічних напрямків $X \parallel [111]$, $X \parallel [001]$, $X \parallel [110]$ при $T = 4,2$ К.

Збільшення питомого опору при зростанні одновісного тиску пов'язано із перебудовою основного стану енергетичного рівня акцепторної домішки при сильному одновісному тиску, який описується в наближенні ефективної маси [8]:

$$E_0 = -\frac{m^* e^4}{2\hbar^2 \chi^2}, \quad (3)$$

де m^* – ефективна маса, e – заряд електрона, \hbar – стала Планка, χ – діелектрична стала.

Слід розглядати спостережуване збільшення опору при зростанні тиску як наслідок трансформації хвильової функції основного стану акцепторної домішки від розширеної конфігурації до більш локалізованої. Сильний одновісний тиск знімає виродження краю валентної зони, змінює спін-орбітальне розщеплення і розщеплює акцепторний рівень на два двократно вироджених енергетичних рівня. Відмітимо, що в *p*-Si(B) ці перетворення відбуваються

внаслідок зміни величини ефективної маси носіїв струму – важких дірок. Підтвердженням цього служать залежності $\rho_X/\rho_0 = f(X)$ поздовжнього ТР ефекту для виродженого *p*-кремнію із концентрацією акцепторів $N_B = 1,0 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ (рис. 3).

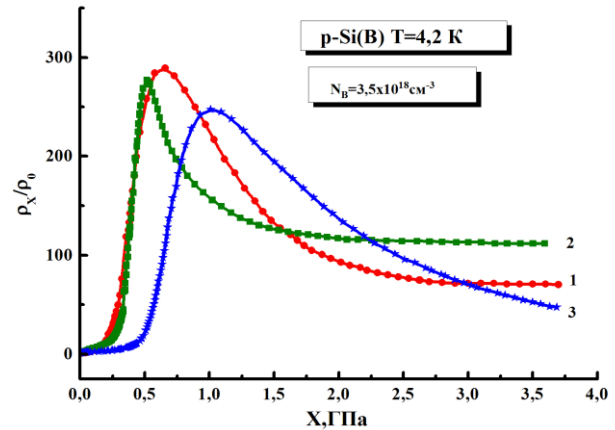


Рис. 2 – Залежності питомого опору з тиском $\rho_X/\rho_0 = f(X)$ у кристалах *p*-Si(B) ($N_B = 3,5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$) при $T = 4,2$ К для різних орієнтацій одновісного тиску: 1 – $X \parallel [111]$, 2 – $X \parallel [001]$, 3 – $X \parallel [110]$

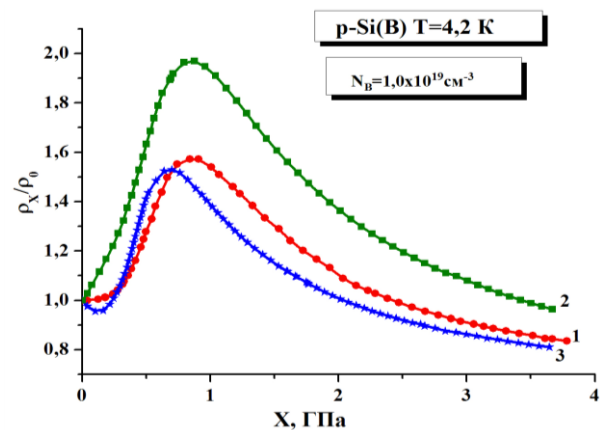


Рис. 3 – Залежності питомого опору з тиском $\rho_X/\rho_0 = f(X)$ у вироджених кристалах *p*-Si(B) ($N_B = 1,0 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$) при $T = 4,2$ К для різних орієнтацій одновісного тиску: 1 – $X \parallel [111]$, 2 – $X \parallel [001]$, 3 – $X \parallel [110]$

Зрозуміло, що в такому *p*-Si(B) зміна опору кристалу відбувається фактично за рахунок зміни ефективної маси дірок. Зміна ефективної маси важких дірок із збільшенням тиску (рис. 3) визначається двома конкуруючими механізмами. Перший механізм зміни ефективної маси пов'язаний із переселенням легких дірок із відповідної зони у зону з більшою ефективною масою – зону важких дірок. Як видно із рис. 3 цей механізм проявляється при тисках, які не перевищують значень ~ 1 ГПа. Другий механізм, що починає переважати при одновісних тисках $X > 1$ ГПа, зумовлений зменшенням величини ефективної маси важких дірок за рахунок зростання із тиском кривизни цієї зони. Відмітимо, що у невироджених кристалах крім зміни ефективної ма-

си необхідно враховувати також і зміну рухливості носіїв струму.

Встановлено, що характер залежностей $\lg(\rho_X/\rho_0) = f(X)$ для орієнтації $X \parallel [111]$ в області збільшення опору визначається лінійним зростанням логарифму питомого опору. У той час як відповідні залежності для орієнтацій $X \parallel [001]$ і $X \parallel [110]$ мають в області зростання опору перегин, який відмічений стрілками (криві 2, 3, рис. 4). Наявність лінійної залежності $\lg(\rho_X/\rho_0) = f(X)$ означає, що залежність опору від одновісного тиску має експоненціальний характер, що підтверджує активаційний характер провідності та лінійну залежність енергії активації від тиску.

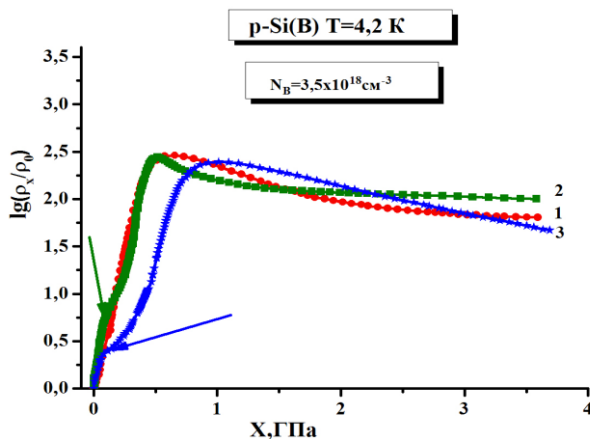


Рис. 4 – Залежність $\lg(\rho_X/\rho_0) = f(X)$ у сильно легovanого p -Si(B) ($N_B = 3,5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$) при $T = 4,2$ К для різних кристалграфічних орієнтацій: 1 – $X \parallel [111]$; 2 – $X \parallel [001]$; 3 – $X \parallel [110]$

Оскільки лінійне зростання логарифму опору в області активаційної провідності зумовлене експоненціальним зменшенням концентрації носіїв струму (важких дірок) за рахунок лінійного збільшення енергії активації з тиском, деформаційно-індукована перебудова валентної зони має супроводжуватися близьким до лінійного зростанням в області малих тисків ефективної маси важких дірок у таких кристалах. Дійсно, для кривих тензоопору вироджених кристалів кремнію (рис. 3), зміна питомого опору із зміною одновісного тиску яких безпосередньо визначається збільшенням ефективної маси дірок, спостерігається лінійна ділянка зростання опору в області малих тисків до 0,6 ГПа.

Зауважимо, що для сильних одновісних тисків, як це видно із порівняння рис. 2 та рис. 3, необхідно здійснювати поправку до величини енергії σ_2 -провідності. Оскільки для p -кремнію спін-орбітальне розщеплення мале $\Delta = 0,044$ еВ, то третя валентна

зона сильно впливає на явища транспорту саме при сильних одновісних тисках. Якщо для області слабких тисків маємо відтворення залежності ефективної маси від тиску (залежності $\rho_X/\rho_0 = f(X)$ для слабоізоляторних кристалів рис. 2 повторюють хід відповідних залежностей вироджених кристалів рис. 3), то для області сильних одновісних тисків ($X > 1$ ГПа) за рахунок впливу зони відщепленої спін-орбітальною взаємодією, положення якої змінюється з тиском, криві тензоопору лише якісно відтворюють хід залежності ефективної маси від тиску. Причому ТР ефекти у цій області мають різну анізотропію представлених залежностей, яка не повторює анізотропію залежностей ефективних мас та відображає анізотропію впливу одновісної деформації на зону відщеплену спін-орбітальною взаємодією. Цей факт є додатковим свідченням того, що вперше виявлена анізотропія впливу сильної одновісної деформації на третю валентну зону.

Таким чином, немонотонні залежності $\rho_X/\rho_0 = f(X)$ поздовжнього ТР ефекту для головних кристалграфічних орієнтацій та їх анізотропія визначаються зміною ефективних мас важких дірок з тиском, обумовленою відповідними закономірностями перебудови енергетичного спектру валентної зони за рахунок зняття виродження зон важких і легких дірок при одновісному тиску. Отже, в невироджених, але сильно легованих та одновісно-деформованих кристалах p -Si(B) зміна ефективної маси важких дірок і визначає зміну енергії активації σ_2 -провідності.

4. ВИСНОВКИ

Експериментально досліджено у слабоізоляторних кристалах p -кремнію анізотропію поздовжнього тензорезистивного ефекту. Показано, що для областей слабких та сильних тисків спостерігаються відмінні закономірності ТР ефекту. Так для області слабких тисків хід залежностей питомого опору від тиску повторює хід залежностей зміни ефективної маси з тиском. Тоді як для області сильних одновісних тисків такої закономірності не спостерігається і залежності $\rho_X/\rho_0 = f(X)$ лише якісно відтворюють залежності $m_X/m_0 = f(X)$. Цей ефект пов'язаний з малим значенням спін-орбітального розщеплення валентної зони p -Si.

При сильних одновісних тисках необхідно враховувати поправки до величини енергії σ_2 -провідності p -Si, оскільки величина розщеплення складає суттєву долю Δ_{co} цих кристалів. Вперше виявлено анізотропію впливу одновісної деформації на спін-орбітально відщеплену зону.

Влияние одноосного давления на σ_2 -проводимость сильно легированного p-Si(B)Л.И. Панасюк¹, В.В. Коломоец², В.Н. Ермаков², С.А. Федосов³¹ Луцкий национальный технический университет, ул. Львівська, 75, 43018 Луцк, Украина² Институт физики полупроводников им. В.Е. Лашкарева НАН Украины, пр. Науки, 41, 03028 Киев, Украина³ Восточноевропейский национальный университет имени Леси Украинки, пр. Воли, 13, 43025 Луцк, Украина

В работе представлены результаты исследований тензорезистивного эффекта в сильно деформированных слабоизоляторных кристаллах p-Si(B) в области σ_2 -проводимости для главных кристаллографических направлений X| [111], X| [110] и X| [001]. Работа преследует цель исследовать влияние сильного одноосного давления на примесную σ_2 -проводимость в кристаллах p-Si(B) с концентрацией примесей, которая приближается к критической концентрации перехода металл-изолятор и установить механизмы исследуемых эффектов. Установлено, что немонотонные зависимости $\rho_X/\rho_0 = f(X)$ продольного тензорезистивного эффекта для главных кристаллографических ориентаций и их анизотропия определяются изменением эффективных масс тяжелых дырок с давлением, обусловленным соответствующими закономерностями перестройки энергетического спектра валентной зоны за счет снятия вырождения зон тяжелых и легких дырок при одноосном давлении.

Ключевые слова: Кристалл, Примесная проводимость, Анизотропия, Одноосное давление, Тензорезистивный эффект, Кристаллографическое направление.

Effect of Uniaxial Pressure on the σ_2 -Conductivity of Heavily Doped p-Si(B)L.I. Panasjuk¹, V.V. Kolomoets², V.M. Ermakov², S.A. Fedosov³¹ Lutsk National Technical University, 75, Lvivska St., 43018 Lutsk, Ukraine² V. E. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics NAS Ukraine, 41, Nauky Ave., 03028 Kyiv, Ukraine³ Lesya Ukrainka Eastern European National University, 13, Volya Ave., 43025 Lutsk, Ukraine

The paper presents the results of research tensorresistive effect in strongly deformed weakislator p-Si(B) crystals in the range of σ_2 -conductivity for the main crystallographic directions X| [111], X| [110] and X| [001]. The work aims to investigate the influence of strong uniaxial pressure on impurity σ_2 -conductivity in p-Si(B) crystals with a concentration of impurities, which is close to the critical concentration of metal-insulator transition and to establish mechanisms for the studied effects. It was found that non-monotonic dependence $\rho_X/\rho_0 = f(X)$ of the longitudinal tensorresistive effect for the main crystallographic orientations and their anisotropy defined by a change in the effective mass of the heavy holes with the pressure caused by the relevant laws of the restructuring of the energy spectrum of the valence band by removing the degeneracy of the bands of heavy and light holes under uniaxial pressure.

Keywords: Crystal, Impurity conductivity, Anisotropy, Uniaxial pressure, Tensorresistive effect, Crystallographic direction.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. C. Herring, *Bell. System. Techn. J.* **34**, 237 (1955).
2. A.E. Gorin, G.V. Gromova, V.M. Ermakov, *Ukr. J. Phys.* **56**, 917 (2011).
3. K. Wu, *Strain Effects on the Valence Band of Silicon: Piezoresistance in p-Type Silicon and Mobility Enhancement in Strained Silicon p-MOSFET: Ph. D. Dissertation* 146 (University of Florida: 2005).
4. R. Winkler, *Spin-Orbit Coupling Effects in Two-Dimensional Electron and Hole Systems* **236**, (2003).
5. H. Fritzsche, *Phys. Rev.* **125**, 1552 (1962).
6. N.F. Mott, E.A. Davis, *Electronic processes in non-crystalline materials, 2nd ed.* (Oxford: Oxford University Press: 2012).
7. В.В. Коломоец, В.Н. Ермаков, Б.А. Сусь, В.Е. Родионов, Пат. 2040785, Россия, МПК(1990): G01N 3/00, опубл. 25.07.1995, бюл. № 4903989 (V.V. Kolomoets, V.N. Yermakov, B.A. Sus', V.Ye. Rodionov, Pat. 2040785, Rossiya, MPK(1990): G01N 3/00, opubl. 25.07.1995, byul. № 4903989).
8. Г.Л. Бир, Г.Е. Пикус, *Симметрия и деформационные эффекты в полупроводниках* (Москва: Наука: 1972) (G.L. Bir, G.E. Pikus, *Symmetry and Strain-Induced Effects in Semiconductors* (Wiley: New York: 1974).