

УДК 621.315.592

ВПЛИВ ПРОЦЕСУ ВИМІРЮВАННЯ ОПОРУ КРИСТАЛІВ *p*-Si НА ЙОГО ЗНАЧЕННЯ ЗА ДІЇ ПРУЖНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ

Б. Павлик, Р. Дідик, Р. Лис, Й. Шикоряк, Д. Слободзян

*Львівський національний університет імені Івана Франка,
бул. Ген. Тарнавського, 107, 79017 Львів, Україна
pavlyk@electronics.lnu.edu.ua*

Досліджено вплив процесу вимірювання опору кристалів *p*-Si на його абсолютне значення за дії пружної деформації та магнітного поля ($B = 0,354$ Тл).

Визначено вплив прикладеної напруги до зразка на результати вимірювання залежності $R(\sigma)$. З'ясовано, що зовнішня прикладена напруга, яка збігалася з полярністю напруги від омметра, зумовлює збільшення електричного опору кристалів. Оброблення зразка зовнішнім електричним полем (напругою 1 В) зумовлює збільшення швидкості зміни опору майже на порядок під час вимірювання $R(\sigma)$.

Ключові слова: кремній, вимірювання опору, одновісна пружна деформація.

Проведені останніми десятиліттями експериментальні дослідження свідчать про можливість модифікації властивостей дефектів кристалічної ґратки в немагнітних кристалах (у тім числі кремнію) під дією зовнішнього магнітного поля [1, 2].

У попередніх наших дослідженнях [3, 4] визначено, що характерною особливістю залежності опору зразка *p*-Si від його механічної деформації ($R(\sigma)$) є зменшення опору під час стискання і збільшення під час розтискання протягом одного циклу деформації. Зі збільшенням кількості циклів стискання–розтискання різниця між положенням кривих стискання та розтискання зменшується.

Відомо [1, 2], що перетворення магніточутливих дефектів під дією магнітного поля, здатних впливати на електропровідність, – дуже повільний процес. Ми виявили повільну зміну опору зразка в магнітному полі в бік збільшення або зменшення.

Наша мета – визначити вплив електричного поля (як зовнішнього, так і створеного вимірювальним приладом) на залежності зміни механо- та магнітостимульованої електропровідності кристалів *p*-Si.

Основні результати. Досліджували зразок *p*-Si (КДБ-10, “бездислокаційний”) 1 (рис. 1), вирізаний з монокристалічного диска з орієнтацією плоских поверхонь (111). Розміри зразка після механічного та хімічного оброблень становили $3,6 \times 4,0 \times 7,6$ мм. Зразок був поміщений у затемнену робочу камеру 2 в прес 3 та у магнітне поле постійного магніту з магнітною індукцією 0,354 Тл так, що його силові лінії, перпендикулярні до поверхні (110), проходили паралельно до поверхонь (111), на яких були створені омичні контакти 4 [5], як показано на рис. 1. Електричний опір зразка вимірювали двозондовим методом за допомогою універсального вольтметра В7-34А. Механічні

навантаження вимірювали за допомогою приладу ХКЗ118Т1 з датчиком 5 (див. рис. 1). Установка давала змогу також виконувати дослідження без дії магнітного поля.

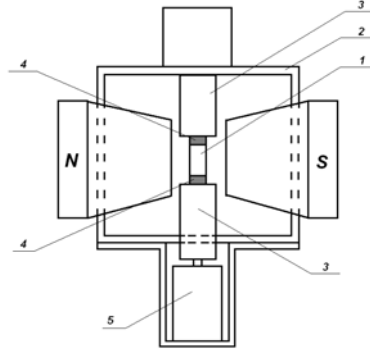


Рис. 1. Спрощений вигляд установки для досліджень.

Ми зафіксували повільну зміну опору зразка (у межах 3–5 %) у магнітному полі, що почергово збільшується або зменшується. Якщо не брати до уваги набагато швидші зміни опору в процесі вимірювання $R(\sigma)$ та в разі вимірювання опору в різні моменти часу перебування зразка у магнітному полі, то зміну опору з часом перебування зразка у магнітному полі можна схематично зобразити у вигляді ламаної лінії (рис. 2).

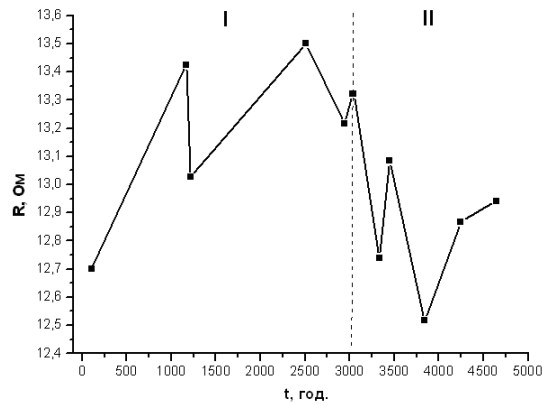


Рис. 2. Характер зміни опору монокрystala p -Si з часом перебування у магнітному полі ($B = 0,354$ Тл) в незатисненому стані (ділянка I) та у пружно деформованому стані (ділянка II).

На рис. 2 спрощено показано зміни опору досліджуваних зразків з часом їхнього перебування в магнітному полі. На них не відображено інших, швидших змін опору, зумовлених додатковими чинниками (крім магнітного поля) впливу на кристал (про які йтиметься нижче), хоча вони можуть також впливати на вигляд цих кривих. Бачимо, що вони мають знакозмінний та періодичний характер. Згідно з рис. 2, знак зміни опору (ΔR) з часом (від зростання до спадання) частіше відбувається у пружно деформованому зразку (починаючи з 3034-ї години і до кінця експерименту, ділянка II на рис. 2), а швидкості наростання опору є більшими порівняно з періодом перебування зразка у незатисненому стані (ділянка I на рис. 2).

Без магнітного поля характер залежності швидкості зміни опору зразка V_R від часу t суттєво відрізняється від описаного вище: знакозмінна залежність не простежується, або, можливо, це є наслідком збільшення періоду коливань до декількох тисяч годин.

Експериментально з'ясовано, що під час вимірювання опору його остаточне значення усталюється не миттєво, а через 40–50 с після приєднання зразка до омметра (рис. 3). Повільніше релаксує вимірюваний опір (у режимі безперервного його вимірювання) після припинення пружної деформації зразка та перебування його під досягнутим навантаженням (рис. 4).

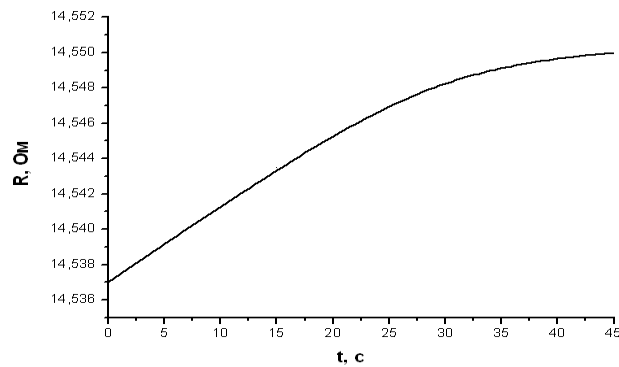


Рис. 3. Крива наростання опору зразка з часом вимірювання.

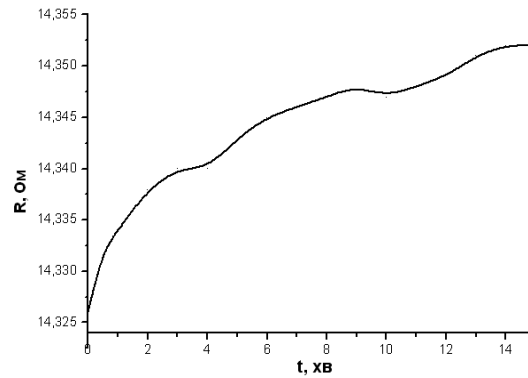


Рис. 4. Зміни опору зразка (за безперервного вимірювання) з часом після припинення його механічного стиснення за 17 МПа.

Отже, сам процес вимірювання опору, особливо якщо це серія вимірювань з невеликими інтервалами часу між циклами стиснення–розтиснення (15–20 хв), впливає на вигляд кривих часових змін опору, показаних на рис. 2 (початок ділянки II в межах 3070 та 3446 год перебування зразка в магнітному полі), накладаючи на них пилоподібні зубці (рис. 5). Вимірювання в межах зубця відбувалося протягом 5–7 год.

У процесі вимірювання опору приладом В7–34А до зразка прикладається напруга 9,7 мВ, яка впливає на результат вимірювання. На початку вимірювання значення опору

зростає по експоненті (рис. 3). Для перевірки припущення, що ця зміна опору зумовлена впливом електричного поля на стан заряджених дефектів у кристалі, у проміжки часу між вимірюваннями залежностей $R(\sigma)$ прикладали постійну напругу до зразка (0,5 або 1,0 В) від окремого джерела. Після того, як зразок обробили електричним полем, швидкість зміни опору (V_R) під час вимірювання $R(\sigma)$ зросла майже на порядок.

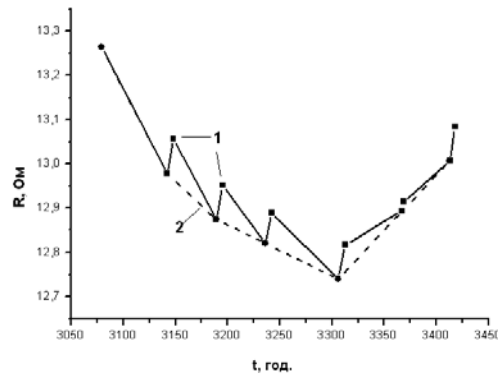


Рис. 5. Пилоподібні виступи 1 на графіках часових змін опору зразка (крива 2), зумовлені впливом вимірювань опору.

На рис. 6 показано фрагмент кривої зміни опору з часом у проміжку між 3630 та 3840 год витримки зразка в магнітному полі, “промодульованої” зубцями, що зумовлені вимірюваннями опору. Ліві боки зубців відповідають зростанню опору. Зубці 1, 2, 5 отримані без прикладання додаткової напруги (крім 9,7 мВ від омметра), зубці 3 і 4 – після додаткового прикладання напруги. Швидкості наростання опору в зубцях 3, 4 вищі, ніж у зубцях 1, 2, 5, що видно з більшої крутості наростання зубців 3 і 4 порівняно з 1, 2, 5. Зубець 4 повністю зумовлений зміною опору зразка під дією прикладеної додаткової напруги: спочатку опір швидко збільшився (лівий бік зубця, що наростає), пізніше під дією тієї ж напруги різко зменшився (правий бік зубця). Цифрові дані цих досліджень наведено в таблиці.

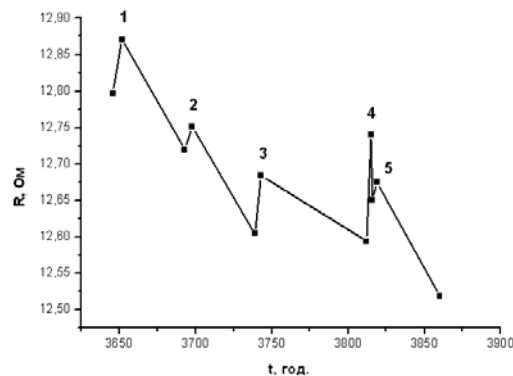


Рис. 6. Вплив прикладання додаткової напруги (зубці 3, 4) на характер зміни опору зразка p-Si.

Для детальнішого дослідження впливу попередньо прикладеної напруги на вигляд максимумів 4 та 5 (див. рис. 6) на кривій $R(t)$ їх побудовано в більшому масштабі по експериментальних точках (рис. 7).

Залежність швидкості зміни опору в процесі його вимірювання від значення і часу попередньо прикладеної напруги до зразка p -Si

Номер зубця	Бік зубця	Прикладена напруга до зразка	Час прикладання напруги	Швидкість зміни опору V_R , Ом/год	Примітка
3	Лівий	0,5 В	10 + 10 с	+ 0,0188	
4	Лівий	0,5 В	5 + 10 хв	+ 0,0627	
4	Лівий	1,0 В	5 хв	+ 0,0627	
4	Правий	1,0 В	5 + 5 хв	- 0,146	
1	Лівий	9,7 мВ	Під час вимірювання опору	- 0,00925	Напруга прикладена омметром
2	Лівий	9,7 мВ	Під час вимірювання опору	+ 0,00586	Напруга прикладена омметром
5	Лівий	9,7 мВ	Під час вимірювання опору	+ 0,00954	Напруга прикладена омметром

Як бачимо, прикладена напруга (яка співпадала із полярністю напруги від омметра) значенням 0,5 В протягом 5 хв спричиняє збільшення швидкості зміни опору. Якісно відрізняється дія напруги в 1,0 В протягом 15 хв – опір зразка починає зменшуватися (максимум 4) і лише після трьох вимірювань опору (протягом 45 хв) традиційний хід кривої відновлюється (максимум 5). Без дії додаткових напруг (як у випадку зубців 1, 2, 3 на рис. 6) вимірювання опору пішло б по штриховій кривій (див. рис. 7), (момент часу і тривалість прикладання напруги позначено вертикальними лініями).

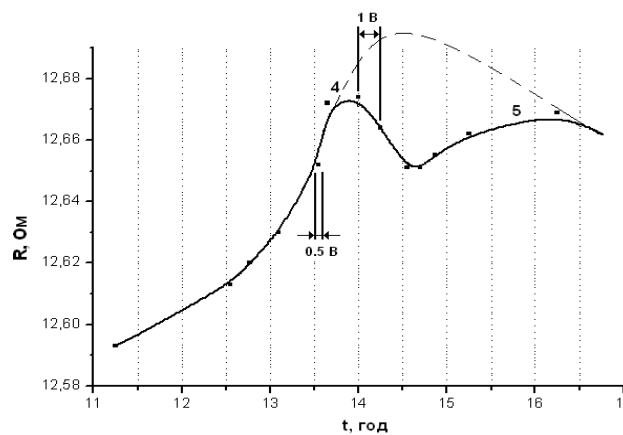


Рис. 7. Вплив попередньо прикладеної напруги на характер зміни опору під час вимірювання.

Незважаючи на те, що використовували “бездислокаційні” зразки, під нанесеною алюмінієвою плівкою утворювався zdeформований шар товщиною до 1 мкм, збагачений петлеподібними дислокаціями. У разі деформації ці дислокаційні петлі поширюються вглиб кристала й захоплюють точкові дефекти, які під час розтискання виходять у приповерхневий шар. Унаслідок кількох таких проходжень дислокацій глибші шари кристала очищаються від точкових дефектів. У збідненні від дефектів ділянки дифундують точкові дефекти з кристала – простежується гетерний ефект.

Відомо [1, 2], що магнітне оброблення немагнітних кристалів (у тім числі кремнію) призводить до декількох ефектів, зокрема, до збільшення швидкості руху дислокацій, структурної перебудови, активації поверхні і посилення перебігу процесів адсорбції та гетерування. Проадсорбовані магнітоактивованою поверхнею з навколишньої атмосфери кисень, вуглець та інші домішкові атоми і їхні групи, зокрема, гідроксильні, можуть вступати в стимульовані магнітним полем міждефектні реакції, наприклад, у реакції з наявними на поверхні зарядженими центрами, завдяки чому їхній зарядовий стан повинен нейтралізуватись. Імовірно, адсорбційні процеси, з одного боку, нейтралізують заряджені центри на поверхні, а з іншого, – збільшують її зарядовий стан, створюючи завдяки проадсорбованим частинкам додаткові донорні й акцепторні рівні.

Як зазначено, у процесі вимірювання опору універсальним вольтметром В7-34А до зразка прикладається напруга у 9,7 мВ. Під дією цієї напруги протікає струм, у якому теж беруть участь вивільнені з пасток носії струму. Кількість донорів, заповнених носіями, з часом протікання струму зменшується, і ми фіксуємо повільне зростання опору зразка в ході вимірювання до усталення рівноваги між процесами вивільнення та захоплення носіїв струму пастками (або їхнього спустошення, унаслідок чого вони перестають впливати на опір зразка), яка після початку вимірювання настає через 40–50 с (див. рис. 3). Щоразу після наступного вимірювання (наприклад, протягом робочого дня) така рівновага настає за вищих значень опору. Так формується лівий бік зубця зростання опору (див. рис. 5, 6). Прикладаючи вищу напругу (0,5 та 1,0 В) протягом різного часу, можна пришвидшити спустошення донорів носіїв струму, що зумовить збільшення швидкості зростання опору у 7 разів (див. таблицю). Заповнення пасток носіями струму під час витримки без вимірювань (як бачимо з нахилу правих боків зубців на рис. 6) триває значно повільніше.

Форма кривих $R(\sigma)$ зумовлена вивільненням (або захопленням) носіїв пастками під впливом пружної деформації ґратки, а також зменшенням ефективної маси носіїв струму (дірок):

– процес вимірювання опору зумовлює його зростання. Відомо [6–9], що за одночасної дії електростатичного поля (у нашому випадку – прикладання напруги під час вимірювання опору) та механічного напруження пробіги і, відповідно, швидкості руху дислокацій збільшуються у 2–4 рази, а часи затримки початку руху дислокацій зменшуються або зникають. Крім того, автори [6] виявили ефект “дислокаційної пам’яті” впливу електростатичного поля, який полягає в тому, що коли до зразка кремнію прикласти електростатичне поле, то дислокації запам’ятовують цей факт і в разі наступного прикладання лише механічного навантаження рухаються з такими швидкостями, які вони зазвичай мають за одночасної дії аналогічного електростатичного поля та механічного напруження. Отже, у нашому випадку, для кристалів p -Si зростання опору зі збільшенням (стискання) та зменшенням (розтискання)

навантаження можна пояснити процесом руху дислокацій, які захоплюють основні носії заряду;

– за стиску опір зразка зменшується. Зменшення опору кристалів кремнію зі збільшенням навантаження пов'язане зі зменшенням поздовжньої ефективної маси важких дірок [10–12] та відповідним збільшенням їхньої рухливості за стиску. Також, можливо, спрацьовують чутливі до механічних напружень донори. Це можуть бути покинуті хмаринки точкових дефектів дислокаціями та кластерами після зміщення їх полем механічних напружень;

– за розтиску (крім зменшення рухливості основних носіїв заряду) дислокації та інші макродефекти повертаються на свої місця, унаслідок чого колишні донори, що містяться в хмаринках Коттрела та на дислокаціях, перетворюються в акцептори. Кількість таких акцепторів є максимальною на початкових стадіях розтискання, тому там спостерігаємо максимальну швидкість зростання опору.

Наведені якісні пояснення процесів перетворення точкових дефектів кристалічної ґратки p -Si під час пружної деформації (у тому числі в магнітному полі) потребують детальнішого теоретичного обґрунтування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. *Макара В. А.* Вплив магнітної обробки на мікротвердість та структуру приповерхневих шарів кристалів кремнію / В. А. Макара, М. О. Васильєв, Л. П. Стебленко [та ін.] // Фізика і хімія твердого тіла. – 2009. – Т. 10, № 1. – С. 193–198.
2. *Макара В. А.* Особливості магнітостимульованої зміни поверхневого електричного потенціалу в кристалах кремнію, що використовуються для потреб сонячної енергетики та мікроелектроніки / В. А. Макара, Л. П. Стебленко, О. О. Коротченков [та ін.] // Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології. – 2014. – Т. 12, № 2. – С. 247–258.
3. *Павлик Б.* Особливості електрофізичних характеристик пружнодеформованих монокристалів p -Si / Б. Павлик, Р. Дідик, Р. Лис [та ін.] // Електроніка та інформаційні технології. – 2013. – Вип. 3. – С. 54–61.
4. *Павлик Б.* Вплив пружної деформації на електропровідність зразків p -Si з різною концентрацією дислокацій / Б. Павлик, Р. Дідик, Р. Лис, Й. Шикоряк // Електроніка та інформаційні технології. – 2016. – Вип. 6. – С. 39–44.
5. *Павлик Б. В.* Особливості електрофізичних характеристик поверхнево-бар'єрних структур на базі кристалів p -Si / Б. В. Павлик, А. С. Грипа, Р. М. Лис [та ін.] // Фізика і хімія твердого тіла. – 2009. – Т. 10, № 4. – С. 935–938.
6. *Стебленко Л. П.* Зміна мікротвердості кристалів кремнію, індукована слабоінтенсивним рентгенівським випромінюванням / Л. П. Стебленко, С. М. Науменко, О. М. Кріт [та ін.] // Вісник Київ. ун-ту. Сер.: фіз.-мат. науки. – 2009. – № 3. – С. 44–48.
7. *Красильников В. В.* Особенности самоорганизации дислокационно-вакансионного ансамбля в облученных деформируемых материалах / В. В. Красильников, В. Ф. Клепиков, С. Е. Савотченко, А. А. Пархоменко // Вопросы атомной науки и техники. Серия: физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. – 2005. – № 5. – С. 26–32.

8. *Островский И. В.* Влияние ультразвуковой обработки на подвижность коротких дислокаций в кристаллах кремния / И. В. Островский, Л. П. Стебленко, А. Б. Надточий // ФТТ. – 2000. – Т. 42, Вып. 3. – С. 478–481.
9. *Надточій В. О.* Мікропластичність алмазоподібних кристалів (Si, Ge, GaAs, InAs) : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня доктора фіз.-мат. наук: спец. 01.04.07 “Фізика твердого тіла” / В. О. Надточій. – Харків, 2006. – 38 с.
10. *Павлик Б. В.* Дослідження змін електропровідності опромінених X-променями кристалів *p*-Si в процесі пружної деформації / Б. В. Павлик, Р. М. Лис, Р. І. Дідик [та ін.] // Фізика і хімія твердого тіла. – 2014. – Т. 15, № 2. – С. 297–303.
11. *Gorin A. E.* Silicon *p*-MOS transistors with uniaxially strained channels in electronic device nanotechnology / A. E. Gorin, G. V. Gromova, V. M. Ermakov [et. al.] // Ukr. J. Phys. – 2011. – Vol. 56, N 9. – P. 917–921.
12. *Павлик Б. В.* Особенности одноосной упругой деформации кристаллов *p*-Si, облученных рентгеновскими лучами / Б. В. Павлык, Р. М. Лыс, Р. И. Дидык, И. А. Шикорьяк // Физика и техника полупроводников. – 2015. – Т. 49, вып. 5. – С. 638–643.

Стаття: надійшла до редакції 10.10.2017,

доопрацьована 17.10.2017,

прийнята до друку 22.10.2017.

IMPACT OF THE PROCESS OF MEASURING THE *p*-Si CRYSTALS RESISTANCE ON ITS VALUE DURING THE ELASTIC DEFORMATION

B. Pavlyk, R. Didyk, R. Lys, J. Shykoryak, D. Slobodzyan

*Ivan Franko National University of Lviv,
107 Tarnavsky St., UA - 79017 Lviv, Ukraine
pavlyk@electronics.lnu.edu.ua*

The influence of the resistance measurement process of *p*-Si crystals on its absolute magnitude has been investigated under the influence of elastic deformation and magnetic field ($B = 0.354$ T).

It has been experimentally discovered that during measuring the resistance, its final value is not established immediately. It is established in 40–50 seconds once the sample is connected to an ohmmeter. It has been established the influence of the voltage applied to the sample on the results of the measurement of the $R(\sigma)$ dependence. It has been shown that the external voltage, which coincided with the voltage polarity from the ohmmeter, causes an increase in the resistance of the crystals. The processing of the sample by an external electric field ($1 V$) causes an increase in the resistance change rate by almost an order of magnitude during the measurement $R(\sigma)$.

A slow change in the resistance of the sample (within 5 %) in the magnetic field is observed. Resistance increases or decreases in turn. Changes in resistance over time (from growth to decrease) occur more often in an elastically deformed sample. The growth rates of resistance are greater compared to the rates of change in resistance of the sample, which was in a non-compressed state. Without the magnetic field, the nature of the dependence of the rate of change in the resistance of the sample from time t significantly differs from that described above.

Key words: silicon, resistance measurement, uniaxial elastic deformation.