

УДК 621.315.592

ВПЛИВ ПРУЖНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ НА ЕЛЕКТРОПРОВІДНІСТЬ ЗРАЗКІВ p-Si З РІЗНОЮ КОНЦЕНТРАЦІЄЮ ДИСЛОКАЦІЙ

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

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

Досліджено вплив дислокацій на залежність провідності кристалів p-Si в процесі пружної одновісної деформації. Під час пружної деформації “бездислокаційного” зразка в кристалічній ґратці виникають дефекти, що відіграють роль пасток для основних носіїв струму. Наявність дислокацій суттєво змінює залежність провідності кристалів від механічного навантаження. З’ясовано, що в ході припинення процесу стискання простежується швидка зміна опору і механічного навантаження зразка. За умови припинення процесу за розтискання подібна залежність не простежується.

Ключові слова: монокристалічний кремній, одновісна пружна деформація, дислокації, перебудова дефектів.

Раніше [1] ми дослідили залежність електропровідності (опору) від пружної деформації ($R(\sigma)$) “бездислокаційних” промислових монокристалів p-Si марки КДБ 1–10, які застосовують для виготовлення електронних приладів. Вимірювали опір зразка між двома контактними площинами на грані (111) за заданої швидкості зміни навантаження протягом циклу стискання та розтискання зразка, які відбувалися один за одним. Використовували три швидкості зміни навантаження: *I* – 0,12 кг/хв, *II* – 0,24 кг/хв, *III* – 0,5 кг/хв. Силу тиску прикладали паралельно до цієї грані (у напрямі $[1\bar{1}\bar{2}]$).

Основні результати досліджень $R(\sigma)$ за стискання та розтискання зразка такі:

- на перших стадіях експерименту в процесі стискання опір зразка помітно зростає, за розтискання ж він слабо змінюється. Наприклад, під час першого циклу внаслідок стискання опір зразка збільшився на 2,0 %, за другого – на 0,7 %, а після двох наступних циклів наприкінці стискання опір збільшився лише на 0,1 %. Усього після першої серії з чотирьох циклів стискання–розтискання опір зразка збільшився на 2,8 % (з 13,980 до 14,370 Ом);

- кожен наступну серію циклів стискання–розтискання проводили після перерви на три–п’ять діб. За той час опір зразка практично відновлювався (за винятком четвертої серії) до початкового значення 14,12 Ом. Четверту серію досліджень розпочинали з опору зразка 14,28 Ом;

- з кожною наступною серією зміна опору зразка після одного циклу зменшувалась з 0,7 до 0,2 % (на четвертій серії, яка складалась з восьми циклів).

Описані результати досліджень свідчать про те, що у “бездислокаційному” (коли концентрація дислокацій не перевищує 100 см^{-2}) монокристалічному зразку під час

пружної деформації виникають дефекти, що зменшують його електропровідність, час життя яких за кімнатної температури не перевищує 40 год. Після 10–12 циклів стискання–розтискання виникають стійкіші дефекти, які зберігаються в кристалі й після 100 год витримки зразка за кімнатної температури, спричиняючи збільшення опору зразка на 1,13 %.

Цікаво було дізнатись, як впливатимуть дислокації на залежність $R(\sigma)$ такого ж зразка.

Для дослідження впливу дислокацій на залежність провідності кристалів кремнію в процесі пружної деформації вивчали зразок p -Si, вирізаний поряд з дослідженим вище зразком з монокристалічного диска товщиною 4 мм з орієнтацією площин (111). Розміри зразка після механічної та хімічної обробок [2] були близькі до попереднього і становили $7,6 \times 4 \times 3,6$ мм. У цьому зразку пластичною деформацією за 700°C (на спеціальному пристрої [3]) уздовж довшої грані в напрямі $[11\bar{2}]$ створено дислокації. Селективним травленням виявлено місця виходу дислокацій на поверхню зразка, які на грані (111) виглядають як крапки завдяки короткому часу травлення (близько 20 с). У випадку спостереження в розсіяному світлі граней (111) видно нерівномірний розподіл дислокацій уздовж зразка (рис. 1). Поблизу торців їхня концентрація більша, ніж у центральній частині (рис. 2). Простежуються рядки дислокацій, якими продкоровані виходи на грань (111) площин ковзання шарів монокристала під час пластичної деформації. Середня густина дислокацій в 1-міліметровій зоні поблизу торців зразка становила $8,22 \cdot 10^4 \text{ см}^{-2}$.

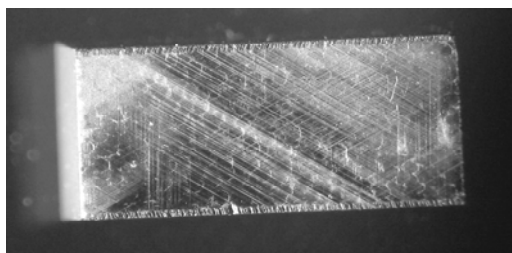
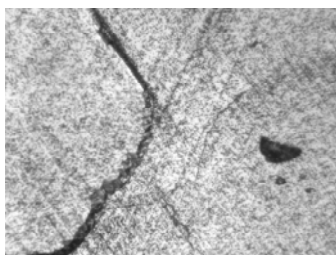
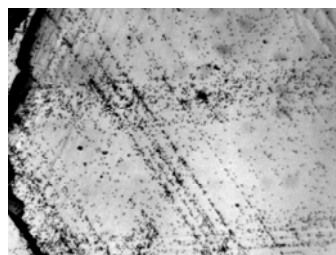


Рис. 1. Вигляд пластично-деформованого зразка p -Si в полі зору оптичного мікроскопа. $\times 10$.



a



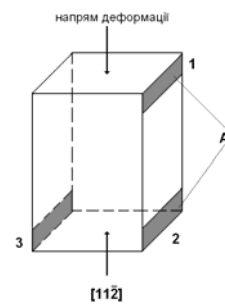
б

Рис. 2. Дислокаційні ямки травлення зразка p -Si поблизу торця (*a*) та біля середини досліджуваного зразка (*б*). $\times 240$.

Зразок після пластичної деформації пролежав за кімнатної температури 42 місяці, після чого його використали для досліджень залежності його електропровідності від сили стискання.

Для дослідження електропровідності на гранях (111) створено три омичні контакти (рис. 3) за відомою технологією [4] з використанням спеціального пристрою для одночасного нанесення контактних алюмінієвих плівок на протилежні грані зразка. До алюмінієвих площадок були приварені термокомпресійним способом тонкі, діаметром 20 мкм, золоті дрітчини за допомогою двобічної касети, яка давала змогу проводити експрес-контроль якості зварювання.

Рис. 3. Розміщення електричних контактів на експериментальному зразку.



Стискання і розтискання зразків проводили з трьома швидкостями. Криві залежності $R(\sigma)$ мали форму, показану на рис. 4, *a*, *б*, які відповідають швидкостям II та III, відповідно. Усі криві $R(\sigma)$, що відповідають різним швидкостям стискання, подібні між собою: криві 1 зменшення опору за підвищення тиску йдуть нижче від кривих 2, які відповідають збільшенню опору зразка в процесі зниження тиску на нього (див. рис. 4) й обидві сходяться, якщо тиску на зразок нема. У разі переходу з режиму стискання до режиму розтискання (правий бік рисунків) простежується різкий стрибок опору (показано штрихом на рис. 4, *a*). Для детальнішого вивчення цього явища проведено в цій ділянці два додаткові короткі цикли стискання–розтискання зразка (на правій частині рис. 4, *б* – дві додаткові петлі). Кожна наступна петля проходить вище від попередньої, що зумовило хід кривою 2 дещо вище над кривою 1, ніж це є на рис. 4, *a*.

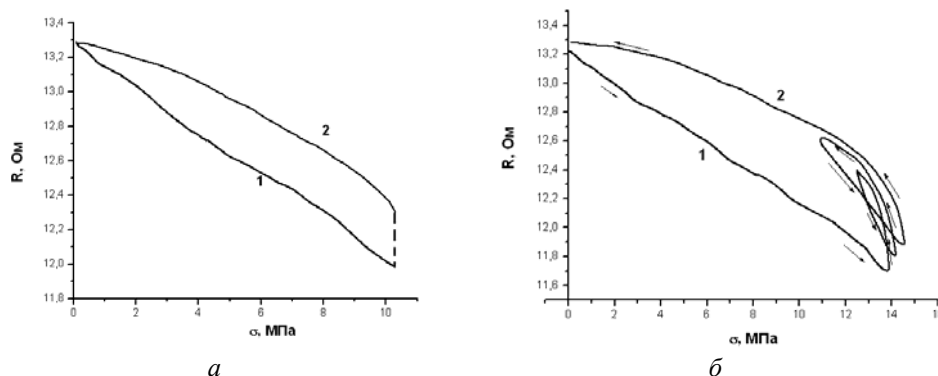


Рис. 4. Криві залежності електроопору від механічного навантаження на зразок p -Si: 1 – для стискання; 2 – для розтискання. Стрілками показано напрям зміни механічного навантаження на зразок. Швидкість стискання–розтискання становила 0,24 (*a*) та 0,5 (*б*) кг/хв.

У випадку припинення процесу стискання, за механічного навантаження понад 3 МПа, простежується швидка, протягом перших секунд, зміна опору (крива 1) і механічного навантаження зразка (крива 2 на рис. 5, а). У разі припинення процесу розтискання, як бачимо з рис. 5, б, подібна залежність $R(\sigma)$ не виявлена. За переходу від режиму стискання до режиму розтискання зразка відбувається нетривале припинення стискання і потім – початок розтискання – умови, які подібні до припинення стискання, описані на рис. 5, а: у разі припинення стискання відбувається швидке зростання опору зразка, що бачимо на рис. 4.

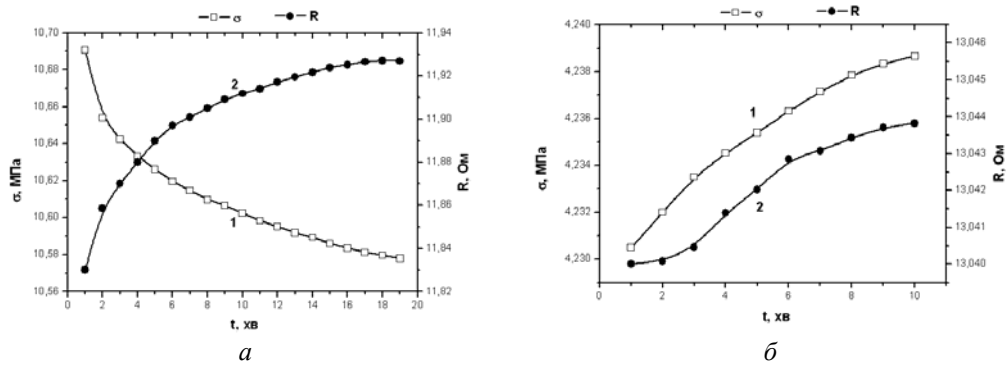


Рис. 5. Криві зміни сили стискання зразка p -Si (крива 1) і його електроопору (крива 2) з часом, який минув після припинення механічного стискання за досягнення тиску на зразок 9,8 (а) та 3,8 (б) МПа. Стискання відбувалося зі швидкістю 0,24 кг/хв.

Зазначимо, що швидкість зміни опору зразка ΔR за відповідної зміни сили тиску на зразок ΔP у випадку припинення стискання у шість разів перевищує відповідне відношення у випадку стискання зразка. Результати таких обчислень на різних етапах і за різних швидкостей стиску наведено в таблиці.

Зведені результати обчислення $\Delta R/\Delta P$ (позначимо через A) під час стиску і після припинення стиску зразка p -Si

Значення стискання, кг	Швидкість стискання, кг/хв	Під час стискання. A_1 , Ом/кг	Після припинення стискання. A_2 , Ом/кг	A_2/A_1	Усереднене за швидкостями стискання A_2/A_1
4	0,12	-0,13	-1,36	10,5	6,4
8	0,12	-0,18	-0,96	5,3	
12-13	0,12	-0,25	-0,84	3,4	
5-6	0,24	-0,12	-0,8	6,34	6,34
10	0,24	-0,11	-0,69	6,24	
12-13	0,24	-0,09	-0,58	6,44	
5	0,5	-0,082	-0,72	8,78	5,96
15	0,5	-0,15	-0,47	3,13	

Після закінчення досліджень зразок був хімічно відполірований і повторно протравлений у селективному травнику. Середня густина дислокацій на описаній вище ділянці зразка (1-міліметрова зона біля торця) становила $48,3 \cdot 10^4 \text{ см}^{-2}$. Збільшення

густини ямок травлення, можливо, зумовлене додатковою деформацією приповерхневого шару зразка плівкою алюмінію, яку нанесено для створення омичного контакту [5].

Трактування отриманих результатів

Описані вище результати досліджень $R(\sigma)$ зразків, які відрізняються між собою лише концентрацією дислокацій, можна пояснити впливом дефектів ґратки на їхню електропровідність.

Під час пружної деформації “бездислокаційного” зразка в кристалічній ґратці виникають дефекти, що відіграють роль пасток для основних носіїв струму (дірок). Вони нагромаджуються у зразку в тому випадку, коли цикли стискання–розтискання чергуються один за одним без перерви. Після припинення цього процесу вони поступово зникають. Тому після тривалої перерви в експерименті (близько 40 год) початкове значення опору зразка відновлюється. Після 10–12 циклів утворюються більш термостійкі дефекти (можливо кластери вищезгаданих центрів), які зберігаються і після 100 год відпалу за кімнатної температури. Вони зумовлюють стійкіше підвищення опору зразка.

Наявність дислокацій суттєво змінює залежність $R(\sigma)$. Під час пружної деформації в кристалічній ґратці виникають поля механічних напружень. Ці поля деформуються біля дислокацій і точкових дефектів ґратки, що, відповідно, зумовлює їхнє переміщення за умови, що це призведе до зменшення сумарної потенціальної енергії зразка. Вивільнені дефекти можуть бути електрично активними і впливати на електропровідність зразка. Це явище чітко виявляється під час припинення процесу стискання (див. рис. 5, а). Оскільки такі релаксаційні явища простежуються в насиченому дислокаціями зразку, то можна стверджувати, що спостережувані релаксаційні процеси, які мають дифузійний характер, відбуваються, переважно, поблизу дислокацій. Пружна деформація ґратки приводить до зміщення дислокацій, за якими не встигають їхні хмаринки Котрелла, які складаються з точкових дефектів, що продифундували з бездислокаційних ділянок ґратки. Для утворення таких хмаринок було достатньо часу (42 місяці). Релаксація кристалічної ґратки (відновлення початкових розмірів зразка) також виявилась у разі припинення процесу розтискання, у зростанні механічного напруження у зразку (крива 1 на рис. 5, б).

З таблиці бачимо, що $\Delta R/\Delta P$ у разі стискання зразка і після припинення стискання відрізняються у шість разів. Річ у тому, що в процесі стискання відбуваються два взаємно конкурентні процеси: вивільнення електроактивних центрів під час руху дислокації та захоплення (нейтралізація) таких центрів “оголеною” від дефектів рухомою дислокацією. У випадку припинення стискання відбувається дифузійний процес поновлення хмаринки Котрелла з електроактивних центрів (збільшення опору зразка – крива 2 на рис. 5, а), унаслідок концентрації точкових дефектів біля дислокацій та зменшення механічного напруження ґратки (крива 1 на рис. 5, а).

Зазначимо, що подібний характер залежності $R(\sigma)$ також простежується між контактами 1–3 та 2–3 (див. рис. 3) (опір між ними вимірювали одночасно).

Наведені якісні пояснення процесів перетворення точкових дефектів кристалічної ґратки p -Si під час пружної деформації потребують детальнішого теоретичного обґрунтування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Павлик Б. Особливості електрофізичних характеристик пружно деформованих монокристалів p-Si / Б. Павлик, Р. Дідик, Й. Шикоряк [та ін.] // Електроніка та інформ. технології. – 2013. – Вип. 3. – С. 54–61.
2. Павлик Б. Деякі особливості хімічного травлення поверхонь монокристалічного кремнію / Б. Павлик, Р. Дідик, Й. Шикоряк [та ін.] // Електроніка та інформ. технології. – 2011. – Вип. 1. – С. 50–59.
3. Патент 86829 Україна (корисна модель), МПК G01N 3/08, H01L 21 / 322. Пристрій для пластичної деформації напівпровідникових матеріалів / Б. В. Павлик, Р. І. Дідик, Й. А. Шикоряк [та ін.] ; заявник і власник ЛНУ імені Івана Франка. – № u201309259; заявл.23.07.2013 ; опубл. 10.01.2014. Бюл. № 1..
4. Патент 47597 Україна (корисна модель), МПК C23C 14/50, C23C 14/54, H01L 21 / 02. Пристрій для двостороннього нанесення покриттів у вакуумі / Б. В. Павлик, Р. І. Дідик, Й. А. Шикоряк [та ін.] ; заявник і власник ЛНУ імені Івана Франка. – № u200909571; заявл.18.09.2009 ; опубл. 10.02.2010. Бюл. № 3.
5. Павлик Б. В. Електрофізичні характеристики приповерхневих шарів кристалів Si p-типу, з напиленими плівками Al, підданих пружній деформації / Б. В. Павлик, М. О. Кушлик, Р. І. Дідик [та ін.] // Укр. фіз. журн. – 2013. – Вип. 58, № 8. – С. 742–747.

Стаття: надійшла до редакції 13.04.2016,
доопрацьована 20.04.2016
прийнята до друку 21.04.2016

**IMPACT OF ELASTIC STRAIN ON THE CONDUCTIVITY OF p-Si SAMPLES
WITH DIFFERENT CONCENTRATIONS OF DISLOCATIONS**

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

*Ivan Franko National University of Lviv, Faculty of Electronics
Tarnavskogo Str. 107, UA - 79017 Lviv, Ukraine
pavlyk@electronics.lnu.edu.ua*

The effect of dislocations on conductivity dependence of p-Si crystals was investigated in the process of elastic uniaxial deformation. Defects that act as traps for the major current carriers occur in the crystal lattice during the elastic deformation of “dislocation-free” samples. The presence of dislocations significantly changes the crystal’s conductivity dependence on the size of mechanical load. It was established that during the stoppage of compression process there is a rapid change in the value of resistance and mechanical load of the sample. Similar dependence is not observed under the process stoppage in case of unclamping.

Key words: single-crystal silicon, uniaxial elastic strain, dislocations, defects reconstruction