

ОСОБЛИВОСТІ МЕХАНО-СТИМУЛЬОВАНИХ ЗМІН ЕЛЕКТРОПРОВІДНОСТІ X-ОПРОМІНЕНИХ КРИСТАЛІВ p-Si

Б.В. Павлик¹, Р.М. Лис¹, Р.І. Дідик¹, Й.А. Шикоряк¹, В.Т. Петриця²

¹ Львівський національний університет імені Івана Франка
вул. ген. Тарнавського, 107, 79017 Львів, Україна
bohdan.pavlyk@lnu.edu.ua

² Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного
вул. Героїв Майдану, 32, 79026 Львів, Україна

В роботі досліджені механо-стимульовані зміни електропровідності (опору) неопромінених та опромінених X-променями монокристалічних зразків кремнію p-типу провідності. Виявлено, що на початковій ділянці дії деформації починає формуватись і збільшується ділянка слабкої залежності зміни опору від механічного навантаження.

Встановлено, що на початковому етапі одновісної пружної деформації опромінених кристалів домінують процеси генерації фотоелектронів з подальшою електронно-дірковою рекомбінацією. Результатом цих процесів є наявність максимуму (збільшення величини опору) на початковій стадії деформації опромінених зразків. Подальше збільшення величини пружного механічного навантаження, супроводжується домінуванням процесів генерації носіїв заряду (при вивільненні акцепторних центрів із більш складних дефектів, які руйнуються при деформації кристалу і захопленні їх рухомими дислокаціями) над їхнім гетеруванням і, як наслідок, механо-стимульоване збільшення електропровідності кристалів p-Si.

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

Вступ. Однією з актуальних проблем сучасної мікроелектроніки є формування якісних і надійних омичних контактів метал-напівпровідник. При їх формуванні особливу роль відіграє структурна досконалість поверхні приповерхневого шару, напівпровідника [1]. Термічна обробка кристалів у процесі формування відповідних структур супроводжується частковою релаксацією локальних механічних напружень, анігіляцією міжвузлових атомів, а також агрегатизацією точкових та лінійних дефектів. Процеси релаксації механічних напружень в планарних контактних структурах дають можливість покращити структурну досконалість поверхні матеріалів, що в свою чергу забезпечує формування якісних і надійних омичних контактів для матеріалів (p-Si).

Сьогодні найбільша увага приділяється розв'язанню науково-практичних проблем створення нового покоління сенсорів та інжекційних випромінювальних пристроїв на базі замкнутого кремнієвого циклу. На сучасному етапі нагромаджено значний теоретичний і експериментальний матеріал досліджень параметрів та властивостей напівпровідникових структур на базі кремнію. При цьому невирішеними залишаються деякі питання з впливом технологічної обробки експериментальних зразків на

стабільність і відтворювальність їхніх параметрів після багаторазової дії зовнішніх чинників.

Перерозподіл концентрації носіїв заряду, еволюція структурних дефектів у деформованих і опромінених Х-променями кристалах р-Si в значній мірі визначається досконалістю вихідного матеріалу, наявністю і рухливістю дислокацій, які є стоками для зарядів і дефектів, особливо у приповерхневій ділянці. Крім цього, поверхня з напиленими металевими контактами є ефективним гетером для глибокорівневих структурних дефектів [1]. Невідповідність параметрів ґраток кристалу і напиленого на нього металевого контакту приводить до появи локальних механічних напружень [2]. Радіаційне опромінення кристалів і приладів напівпровідникової електроніки супроводжується накопиченням зарядів на внутрішніх дефектах, зміною поверхневих станів, формуванням внутрішніх електричних полів та полів в ділянці контакту напівпровідник-діелектрик тощо. Ці та інші механо- і радіаційно-стимульовані ефекти стимулюють зміни електрофізичних параметрів кристалів і, як наслідок, погіршення експлуатаційних характеристик приладів мікроелектронної техніки [3-5]. Тому дослідження процесів релаксації механічних напружень і їх вплив на зміни електрофізичних характеристик кристалів Si за дії зовнішніх чинників є актуальними.

Методика експерименту. В роботі досліджено монокристалічні зразки кремнію р-типу провідності, вирощені методом Чохральського, марки КДБ-10 ($\rho = 10 \text{ Ом}\cdot\text{см}$), розміром $3.55 \times 3.99 \times 7.60 \text{ мм}$. Різка, шліфування і полірування кристалів проводили за стандартною методикою. Перед напильненням омічних алюмінієвих контактів (AL) кристали протравили в лужному травнику і промили в дистильованій воді. Полірування поверхні здійснювали в суміші кислот $\text{HF} + \text{HNO}_3$ (1:3) тривалістю 25 с, після чого кристали промивали в метиловому спирті. Вакуумне ($p = 10^{-3} \text{ Па}$) напильнення омічних контактів (AL) на кристалі у вигляді смужок шириною 2 мм проводили на площину (111) біля торців зразка. До AL-смужок приварювали золоті мікродротини термокомпресійним методом.

Опромінення зразків проводили Х-променями з використанням установки УРС-1.0 ($U = 55 \text{ кВ}$, $I = 8 \text{ mA}$, W-атикатод). Механо-стимульовану зміну електропровідності $R(\sigma)$ досліджуваних зразків проводили за допомогою установки, описаної в роботі [6].

Експериментальні результати та їх аналіз. На рис. 1 показані криві механо-стимульованої залежності зміни електропровідності кристалу від кількості циклів пружної деформації.

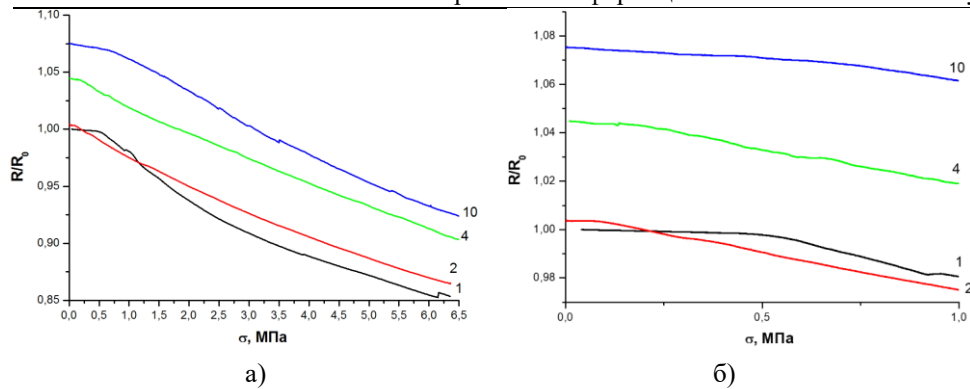


Рис. 1. Механо-стимульована зміна електропровідності одновісно пружно деформованих кристалів: 1 – перша деформація; 2 – друга деформація; 4 – четверта деформація, 10 – десятий цикл пружної деформації (на рис. 1,б – зображено початкову ділянку).

З аналізу закономірностей змін цих залежностей видно, що з кожним наступним циклом стиску-розтиску, починаючи з другого, на кривих залежності $R/R_0=f(\sigma)$ на початковій ділянці дії деформації починає формуватися і збільшується ділянка слабкої залежності зміни $R(\sigma)$, аж до 10 циклу.

Аналіз закономірностей механо-стимульованих змін електропровідності кристалів p-Si показує, що на початковій стадії (~ 0.6 МПа) першої пружної деформації (одновісний стиск вздовж напрямку $[11\bar{2}]$, паралельно до площини (111)), величина R/R_0 практично не зазнає змін (рис. 1, крива 1). Така залежність може бути зумовлена прогином дислокацій, закріплених по краях, а також екрануванням руху зарядів напруженнями внутрішніх контактних полів, зумовлених невідповідністю параметрів постійних ґраток Al та Si. Подальше одновісне стискання супроводжується експоненціальним механо-стимульованим зменшенням величини опору, з енергією активації процесу, яка співмірна з величиною енергії приповерхневого виносу зарядів дислокаціями із закріпленими кінцями.

Зняття навантаження з кристалу і витримка його при 300 K дванадцять діб у вакуумній камері (10^{-2} Torr) без освітлення супроводжується поверненням величини початкового опору R_0 практично до початкового (вихідного) значення.

В другому циклі одновісного стиску ділянка початкового незмінного значення механо-стимульованої зміни R/R_0 зменшується з 0.6 МПа до 0.08 МПа, а подальший хід кривої $R/R_0=f(\sigma)$ описується майже лінійною функцією.

Різниця в залежностях $R/R_0=f(\sigma)$ пояснюється механо-стимульованою генерацією електронів і їх подальшою частковою рекомбінацією з основними носіями заряду (дірками) у приповерхневому шарі кристалу, що і приводить до практично незмінної величини R/R_0 на початковій стадії деформації. Подальший хід кривих $R/R_0=f(\sigma)$ свідчить про те, що ефективність генерації механо-стимульованих електронів з подальшою рекомбінацією починає домінувати, в результаті чого концентрація дірок зменшується. В першому циклі деформації концентрація механо-стимульованих електронів є дещо більша, ніж у другому, тому ефективність електрон-діркової рекомбінації є вища і швидкість зменшення величини R/R_0 також є більшою (експоненційною). В другому

циклі деформації дислокації виносять електрони із більших глибин об'єму кристалу, тому і ефективність електрон-діркової рекомбінації є дещо нижча.

Необхідно також зауважити, що десять циклів стиску-розтиску приводять до збільшення величини залишкового опору зразка в сумарному на $\Delta R = 13.4\%$, а опір досліджуваного зразка складається з опору об'ємного кристалу і опору приповерхневого шару контакту напівпровідник-метал. В ділянці приповерхневого шару кристалу де осаджена Al-плівка, за рахунок невідповідності параметрів ґраток Al і Si, під плівкою алюмінію формується область напруженого стану кристалу. За дії деформаційного потенціалу, зумовленого невідповідністю параметрів ґраток Al та Si, у приповерхневому шарі кристалу зростає величина електропровідності i , зазвичай, на 50 – 70 % збільшується рухливість носіїв заряду [7]. Крім цього, осаджена на поверхню Si металева плівка сприяє формуванню у приповерхневому шарі ділянки, яка є ефективним гетером для глибокорівневих структурних дефектів [8]. Такими дефектами можуть бути домішкові атоми, переміщені з об'єму зразка у приповерхневу область, атоми Si, які виходять з вузлів ґратки у міжвузлові положення та вакансії, що генеруються за таких виходів [9]. Механо-стимульована перебудова дефектного стану кристалу і його приповерхневого шару приводить до збільшення центрів захоплення носіїв заряду із збільшенням кількості деформаційних циклів. Тому на початковій стадії кожного наступного циклу деформації збільшується ділянка ($\sigma_1 = 0 \div 0.15$ МПа та $\sigma_2 = 0 \div 0.70$ МПа) малозмінної залежності $R(\sigma)$.

Подальше збільшення величини деформації, після ділянки слабкої залежності $R(\sigma)$, супроводжується домінуванням процесів генерації носіїв заряду (при вивільненні акцепторних центрів із більш складних дефектів, які руйнуються при деформації кристалу і захопленні їх рухомими дислокаціями) над їхнім гетеруванням i , як наслідок, механо-стимульоване збільшення електропровідності кристалів p-Si.

Закономірності зміни електропровідності кристалів p-Si в процесі одновісного пружного стиску і розтиску можна пояснити механо-стимульованою зміною зонної структури, оскільки зростає частка швидких носіїв заряду при стиску та їх зменшення при розтиску.

Дія X-опромінення на експериментальні зразки p-Si супроводжується генерацією електронів та радіаційних дефектів, еволюцією та заліковуванням структурних дефектів. Ці процеси відбуваються й реалізуються з різною імовірністю у різні проміжки часу і за різних величин доз опромінення і величин ступеня деформації.

На початковій стадії одновісної пружної деформації опромінених кристалів домінують процеси генерації фотоелектронів з подальшою електронно-дірковою рекомбінацією. Результатом цих процесів є збільшення величини опору на початковій стадії деформації опромінених зразків (рис. 2).

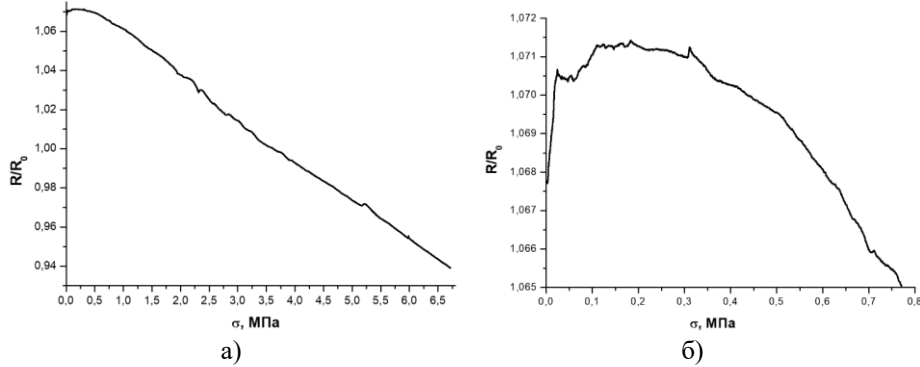


Рис. 2. Механо-стимульована зміна залежності опору опромінених X-променями кристалів p-Si ($D = 312 \text{ Гр}$) (на рис. 2,б – зображено початкову ділянку).

Механо-стимульоване збільшення величини опору опромінених кристалів зумовлене генерацією фотоелектронів, які локалізуються на плитких донорних центрах, а в процесі деформації захоплюються рухомими дислокаціями і виносяться у приповерхневий шар, де рекомбінують з основними носіями заряду. Дія опромінення і подальшої деформації супроводжується зменшенням величини залишкового опору ΔR від 13.4% до 10.6%, що може бути зумовлено накладанням на процес двох протилежних чинників: генерації фотоелектронів та електронно-діркової рекомбінації. Відомо [10], що X-опромінення кристалів p-Si приводить до збільшення величини пробігу дислокацій приблизно в 3-4 рази. При цьому ефект збільшення пробігу посилюється за збільшення величини поглинутої дози опромінення, тобто має місце радіаційно-пластичний ефект.

В X-опромінених кристалах p-Si, в яких електрони локалізуються на мілких акцепторних центрах, характерними є релаксаційні процеси навіть за кімнатної температури (293 K) і тривалості 18–24 год. На нашу думку, дані релаксаційні процеси можуть бути пов'язані із переміщенням дислокацій шляхом переповзання. Цей механізм руху дислокацій є цілком можливий, якщо врахувати суттєве збільшення їхньої швидкості в X-опромінених кристалах. В результаті цих релаксаційних процесів, опромінений кристал ($D = 312 \text{ Гр}$) при одновісній деформації поводить себе як неопромінений (вихідний) зразок.

Опромінення експериментальних зразків X-променями також проявляється у тому, що характерні максимуми на кривих стиску і розтиску (рис. 2) починають більш чітко проявлятися. А це означає, що частина генерованих X-опроміненням електронів може локалізуватись і на більш стійких комплексних дефектах ґратки, які утворились в результаті повторюваних циклів деформації, і звільнюються з них при досягненні певних величин механічних напружень, здатних активізувати дані дефекти, підсилюючи їхній вплив на певні закономірності зміни електропровідності.

Висновки. Механо-стимульоване збільшення величини електричного опору опромінених кристалів p-Si зумовлене генерацією фотоелектронів, які в процесі деформації захоплюються рухомими дислокаціями і виносяться у приповерхневий шар, де рекомбінують із основними носіями заряду-дірками. Після завершення рекомбінаційних процесів механо-стимульовані зміни опору зразка описуються закономірностями неопромінених кристалів.

Із зростанням кількості циклів пружної деформації в кристалі накопичуються як точкові, так і більш складні дефекти ґратки, які завдяки руху дислокацій формують кластери різних розмірів і, як наслідок, генеровані внутрішні механічні напруження. Такі макродефекти здатні локалізувати заряди, а за одновісного стиску рухомі дислокації можуть сприяти перенесенню електронів до поверхні кристалу. За розтиску зразка дислокаційні петлі і рухомі дислокації можуть переміщувати заряди від поверхні в об'єм кристалу. Поява характерних максимумів на кривих залежності $R(\sigma)$ може бути індикатором початку незворотніх механо-стимульованих змін у структурі кристалу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. *Вавилов В.С.* Дефекты в кремнии и на его поверхности / В.С. Вавилов, В.Ф. Киселев, Б.Ф. Мукашев. – М.: Наука, 1990. – 216 с.
2. Особенности одноосной упругой деформации кристаллов р-Si, облученных рентгеновскими лучами / Б.В. Павлык, Р.М. Лыс, Р.И. Дидык, И.А. Шикорьяк // ФТП. – 2015. – Т. 49, Вып. 5. – С. 638–643.
3. *Горлов М.И.* Влияние рентгеновского облучения на электрические параметры полупроводниковых изделий / М.И. Горлов, Р.Н. Антонов, Е.А. Антонова // Технологии в электронной промышленности (ТвЭП). – 2012. – №6. – С. 76–81.
4. *Барабаш Л.І.* Сучасні методи підвищення радіаційної стійкості напівпровідникових матеріалів / Л.І. Барабаш, І.М. Вишневський, А.А. Гроза [та ін.] // Вопросы атомной науки и техники. Серия: физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. – 2007. – № 2. – С. 182–189.
5. *Жукавин Р.Х.* Стимулированное терагерцовое излучение доноров висмута в одноосно-деформированном кремнии при внутрицентровом оптическом возбуждении / Р.Х. Жукавин, С.Г. Павлов, А. Pohl [и др.] // ФТП. – 2019. – Т.53, Вып.5. – С. 1285–1288.
6. *Gaidar G.P.* Radiation-induced effects in silicon / G.P. Gaidar, M.B. Pinkovska, M.I. Starchyk // Problems of Atomic Science and Technology. – 2019. – Vol. 5, No. 123. – P. 35–43.
7. *Берман Л.С.* Регулярный рельеф на поверхности кремния как геттер структурных дефектов / Л.С. Берман, И.В. Грехов, Л.С. Костина [и др.] // Письма в ЖТФ. – 1999. – Т.25, №1. – С. 75–80.
8. *Павлик Б.В.* Електрофізичні характеристики приповерхневих шарів кристалів Si р-типу з напиленими плівками Al підданих пружній деформації / Б.В. Павлик, М.О. Кушлик, Р.І. Дідик [та ін.] // Український фізичний журнал. – 2013. – Т. 58, № 8. – С. 743–748.
9. *Крылов П.Н.* Физические модели термообработанного контакта металл-кремний / П.Н. Крылов // Вестник Удмуртского Университета. Физика. – 2006. – №4. – С. 125–136.
10. *Макара В.А.* Обумовлені дією рентгенівського випромінювання та магнітного поля особливості динамічної поведінки дислокацій у кристалах кремнію / В.А. Макара, Л.П. Стебленко, О.М. Кріт [та ін.] // Доповіді Національної академії наук України. – 2012. – №4. – С. 71–74.

FEATURES OF MECHANICALLY STIMULATED CHANGES IN ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF X-IRRADIATED P-SI CRYSTALS**B.V. Pavlyk¹, R.M. Lys¹, R.I. Didyk¹, J.A. Shykorjak¹, V.T. Petrytsya²**

¹ *Ivan Franko National University of Lviv,
107 Tarnavsky St., UA-79017 Lviv, Ukraine
bohdan.pavlyk@lnu.edu.ua*

² *Hetman Petro Sahaidachnyi National Army Academy,
32 Heroes of Maidan St., UA-79026 Lviv, Ukraine*

The mechanically stimulated changes on the electrical conductivity (resistance) of unirradiated and X-ray-irradiated silicon single-crystal samples with p-type conductivity are investigated. It is found that on the initial region of the deformation action the section of weak dependence of the resistance change on mechanical loading begins to form and increases.

It is established that on the initial stage of uniaxial elastic deformation of irradiated crystals the processes of photoelectron generation with subsequent electron-hole recombination dominate. The result of these processes is the presence the maximum (increase in the value of resistance) on the initial stage of deformation of the irradiated samples. A further increase of the elastic mechanical load magnitude is accompanied by the charge carrier generation processes dominance (with the release of acceptor centers from more complex defects that are destroyed by crystal deformation and their capture with mobile dislocations) of over their generation and, as a consequence, a mechanically stimulated increase on the electrical conductivity of p-Si crystals.

The mechanically stimulated increase in the resistance of the irradiated crystals is due to the generation of electrons that are localized at the donor centers. During the deformation of silicon, these photoelectrons are captured by mobile dislocations and carried into the near-surface layer, where they recombine with the main charge carriers. The action of irradiation and subsequent deformation is accompanied by a decrease in the residual resistance ΔR from 13.4 % to 10.6 %, which may be due to the imposition on the process of two opposite factors: electron generation and electron-hole recombination.

For X-irradiated p-Si crystals, in which electrons are localized at shallow acceptor centers, relaxation processes are characteristic even at room temperature (293 K) and duration 18–24 h. These relaxation processes may be associated with the movement of dislocations by crawling. This mechanism of dislocation motion is quite possible if we take into account a significant increase in their velocity in X-irradiated crystals. As a result of these relaxation processes, the irradiated crystal ($D = 312 \text{ Gy}$) under uniaxial deformation behaves like an unirradiated sample.

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

*Стаття: надійшла до редакції 02.12.2020,
доопрацьована 05.12.2020,
прийнята до друку 05.12.2020*