

УДК 621.315.592

ОСОБЛИВОСТІ ЕЛЕКТРОПРОВІДНОСТІ ОПРОМІНЕНИХ ТА ПРУЖНОДЕФОРМОВАНИХ КРИСТАЛІВ p-Si

Б. Павлик¹, Р. Дідик¹, Й. Шикоряк¹, М. Кушлик¹, І. Чегіль²

¹ Львівський національний університет імені Івана Франка
вул. Ген. Тарнавського, 107, 79017, Львів, Україна
pavlyk@electronics.wups.lviv.ua

² НВП «Карат», вул. Стрийська, 202, 79031, Львів, Україна

Досліджено механостимульовані електрофізичні процеси в кристалах p-Si, які були піддані дії рентгенівського опромінення. З'ясовано, що в процесі одновісної пружної деформації в кристалах p-Si відбувається прогинання наявних дислокацій. На ядрах цих дислокацій локалізовані хмарини Котрелла, які змінюють механостимульовану електропровідність зразків. Немонотонність зміни механостимульованої провідності є підтвердженням локалізації заряджених дефектів та домішок у хмаринах Котрелла. На підставі експериментальних даних доведено, що низькодозове ($D \leq 260$ Гр) X-опромінення приводить до збільшення механічної жорсткості досліджуваних кристалів. Цей ефект пояснюється процесами радіаційно-стимульованого впорядкування дефектної структури кристала, а також тим фактом, що міжвузлові атоми Si, які утворюються під дією опромінення, є ефективними стопорами для руху дислокацій.

Ключові слова: монокристали p-Si, механостимульовані електрофізичні процеси, дія рентгенівського опромінення.

Вступ. Відомо, що дія зовнішніх чинників може впливати на електрофізичні та хімічні властивості напівпровідникових кристалів, зокрема, на поведінку лінійних дефектів, які генеруються в процесі різних типів технологічних обробок та механічної деформації.

У науковій літературі проаналізовано різні аспекти цієї проблеми [1-4], однак участь локалізованих поблизу дислокацій домішок та точкових дефектів (хмарини Котрелла) в одновісно деформованих та опроміненних кристалах кремнію практично не розглянуто.

У праці [2] одержано результати дослідження впливу зовнішніх чинників на характер релаксації магнітомеханічного ефекту (ММЕ) в кристалах кремнію. Наприклад, комбінована дія рентгенівської обробки (РО) і магнітної обробки (МО) засвідчила, що РО, проведена перед магнітною обробкою, впливає на кінетику релаксації ММЕ. Цей експериментальний факт пояснюють так. Якщо РО проводити перед МО, то вакансії, введені під час РО, модифікують А-подібні дефекти, тобто О-V комплекси, і утворюють стабільні дефекти типу О-V₂, які заморожують процес релаксації та призводять до появи залишкового ММЕ.

Опромінення кремнію електронами з енергією, більшою від порога дефектоутворення ($E > 170$ кеВ) дає змогу селективно модифікувати його електричні властивості [3]. Сьогодні більшість електрично-активних радіаційних дефектів (РД) однозначно ідентифікована. Найбільше зацікавлює опромінення напівпровідникових матеріалів за температур $T > 300$ К. Це пов'язане з термічною стабільністю РД, що їх генерують електрони, за температур, близьких до кімнатної. Відомо [3], що при $T \approx 300$ К мікротвердість (Н) монокристалів кремнію визначена, головню, рухливістю нерівноважних точкових дефектів. Отже, мікротвердість може слугувати індикатором стану власних і радіаційних структурних дефектів. У праці [2] також виявлено немонотонну зворотну зміну Н монокристалів кремнію, зумовлену малими дозами (флюенс $\Phi < 1,2 \cdot 10^{12}$ см⁻²) β -опромінення за кімнатної температури.

У праці [4] розглянуто взаємодію дислокації з точковим парамагнітним центром у кристалах з позицій теорії спин-залежних хімічних реакцій. Запропоновані теоретичні моделі ґрунтуються на використанні Δg -механізму змішування станів спинів дефектів парамагнітних центрів на дислокації і парамагнітного точкового дефекту в об'ємі кристала, коли $U_S - U_T \approx \mu_B \Delta g S_e B_0$, де U_S, U_T – енергія синглетного та триплетного станів відповідно; μ_B – магнетон Бора; Δg – механізм змішування спинових станів дефектів; S_e – спин електрона; B_0 – індукція магнітного поля, за якої енергія, що передається дефекту, є мінімальною.

Якщо нема МП, то ці дефекти можуть утворити стійку квазімолекулу в триплетному T_0 або синглетному S станах. Енергія зв'язку такої пари більша в T_0 -стані, ніж в S -стані. Тому керування заселеністю цих станів за допомогою МП на стадії зближення дислокації і стопора може змінити заселеність рівнів, імовірність утворення зв'язків і середню “потужність” перешкод. Усереднювання імовірності переходу за гаусовим розподілом часів перебування пар в ділянці зближення термів передбачає відносну зміну швидкості дислокації $\Delta v / \langle v \rangle = (B/B_0)^2$, де Δv – зміна швидкості руху дислокацій за час Δt ; $\langle v \rangle$ – середня швидкість руху дислокацій; B – індукція прикладеного магнітного поля. Надалі описана схема була модифікована і в ній розглядали спин-залежну стадію взаємодії дислокації зі стопором на основі “релаксаційного” механізму змішування S - і T -станів. Перевага цієї моделі полягає в тому, що в ній враховують відмінність у швидкостях відходу проміжних пар з S - і T -станів.

Наявність у науковій літературі декількох моделей взаємодії дислокацій з кристалічною ґраткою, дефектами та домішками, неоднозначне трактування процесів перебудови структури кристала під дією деформації, опромінення та дії магнітного поля не дає змоги зробити однозначний висновок про вплив дислокацій на електрофізичні властивості опроміненого кремнію. Наша мета – дослідження механостимульованих електрофізичних процесів у кристалах кремнію, які були піддані дії радіації

Методика експерименту. Зразки кремнію КДБ–10 вирізали з монокристала, вирощеного за методикою Чохральського і отриманого нами для досліджень НВП “Карат” (м. Львів). Експериментальні зразки розмірами $3 \times 3 \times 7$ мм вирізали так, щоб два протилежні боки мали орієнтацію (111). Після стандартної обробки поверхонь (механічного шліфування і хімічного полірування в лужному травнику) зразки були піддані вакуумній ($P = 10^{-4}$ Па) термообробці при $T = 570$ К.

Для дослідження змін електропровідності кристалів у процесі пружної деформації на обидві протилежні поверхні (111) наносили термічним випаровуванням омичні контакти з алюмінію (рис. 1). Таке розміщення контактів дає змогу вимірювати механостимульовану зміну електропровідності вздовж осі деформації, та перпендикулярно до неї (вздовж напрямку [111]). Досліджені зразки закріплювали у спеціально виготовлену касету з притискними контактами, яку встановлювали у вакуумну деформаційну установку, описану в [5].

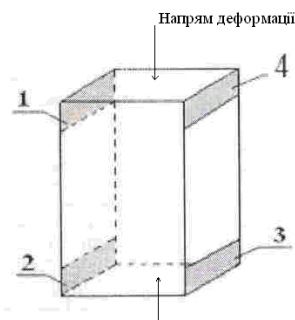


Рис. 1. Розміщення контактів на кристалі відносно осі деформації

Експериментальні дослідження проводили в режимі постійної швидкості деформації ($v = 0,008$ мм/хв) з контролем механічних навантажень оптичним динамометром за умов безмасляного вакууму $P = 10^{-6}$ Па при кімнатній температурі.

Опрямлювали зразки X -променями (W , 50 кВ, 10 мА), з двох боків на які нанесені вимірні контакти з алюмінію.

Результати досліджень та їх аналіз. Під час хімічного полірування механічно прошліфованої поверхні (111) у “лужному” травнику за температури 360 К відбувається розчинення поверхні шляхом огранкування мікронерівностей у трикутну форму та поступового росту таких трикутників. Після 20 хв травлення поверхня набуває східчастого терасоподібного вигляду (рис. 2).

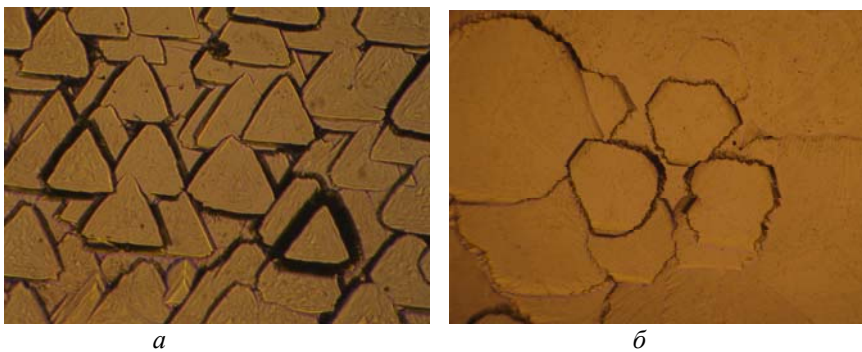


Рис. 2. Вигляд хімічно полірованої поверхні (111) кремнію після 10 (а) та 20 хв (б) травлення в “лужному” травнику

Травлення поверхонь зразка, перпендикулярних до (111), виявляє менш (рис. 3, *a*) або більш (див. рис. 3, *б*) чітко виражену шарувату структуру.

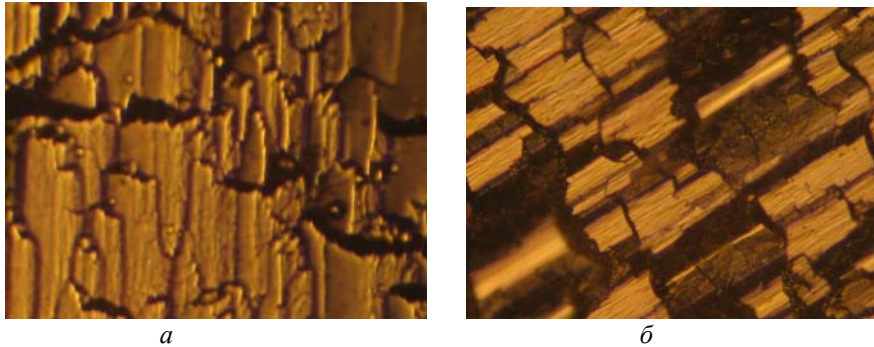


Рис. 3. Вигляд перпендикулярних до поверхні (111) боків прямокутного монокристалічного зразка кремнію після 20 хв травлення в “лужному” травнику.

Можна припустити, що така структура зумовлена інтенсивним протравленням місць локалізації киснево-вакансійних комплексів, оскільки кисень має тенденцію накопичуватись у ділянках зі зміненим деформаційним потенціалом, знижуючи енергію зв'язку в кристалі.

Вакуумне нагрівання зразків до температур 490–600 К приводить до локалізації кисню вздовж дислокацій та в місцях їхнього перегину, оскільки, як уже зазначено, кисень максимально накопичується в ділянках найбільшої зміни деформаційного потенціалу, біля ядер дислокацій з утворенням добре відомих хмарин Котрелла.

Густина дислокацій на гранях (111) визначали травленням хімічно полірованих поверхонь у селективному “хромовому” травнику тривалістю 3–5 хв. Ямки травлення трикутної форми (рис. 4) ми спостерігали на оптичному мікроскопі “Люмам И–3” у відбитому світлі. Концентрація дислокацій становила $\approx 6 \cdot 10^3 \text{ см}^{-2}$.

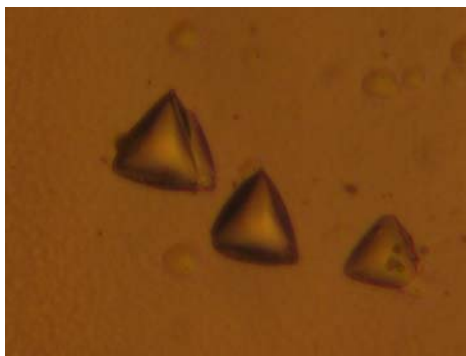


Рис. 4. Дислокаційні ямки травлення монокристалічного кремнію на поверхні (111)

На рис. 5 показано деформаційну криву зразка та її зміну під дією опромінення і термічного відпалу у вакуумі за 573 К. З аналізу кривих у режимі стискування кристала (див. рис. 5, *a*) можна стверджувати, що після першого опромінення ($D = 260$ Гр) кутовий коефіцієнт нахилу кривої збільшився, що свідчить про збільшення механічної міцності зразка. Термічний відпал у вакуумній установці при 573 К привів до незначного зменшення кута нахилу кривої, що є підставою стверджувати про частковий відпал генерованих радіацією дефектів. У разі подальшого опромінення зразка ще раз дозою 260 Гр ми бачимо ще більше зростання жорсткості зразка, яке виходить на насичення за сумарної дози опромінення до 520 Гр. Підтвердженням того, що ми працюємо в діапазоні пружної деформації, є результати, показані на рис. 5, *б*.

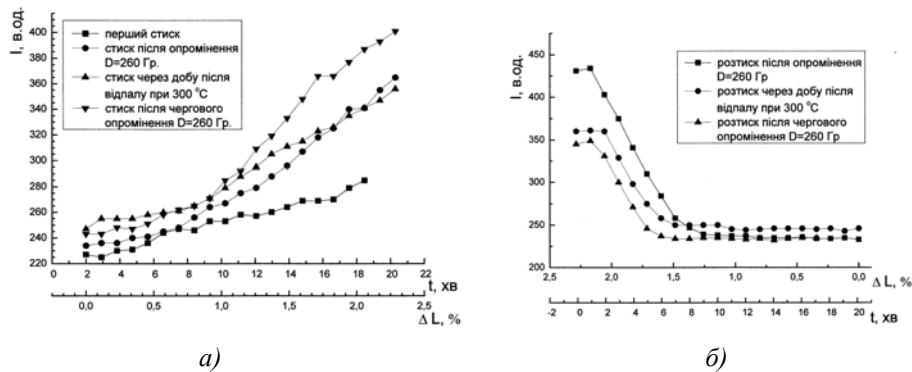
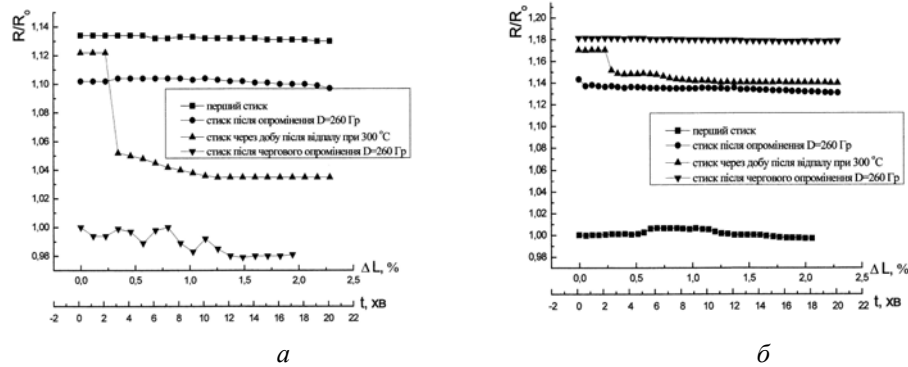
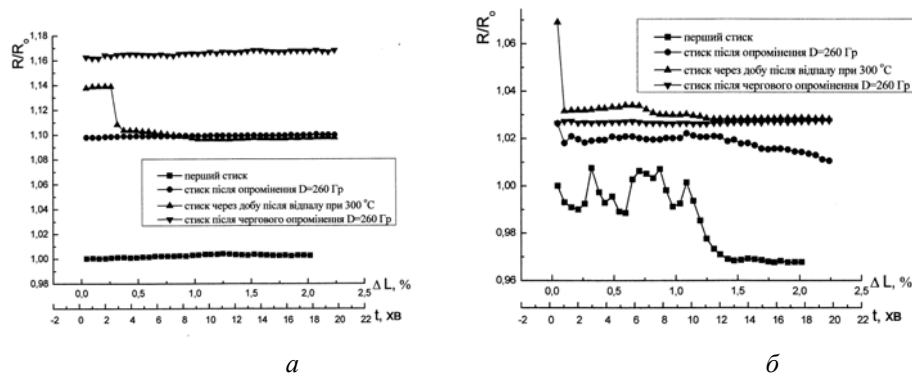


Рис. 5. Деформаційна крива навантаження кристала p-Si: *a* – у разі стискування кристала; *б* – у разі зняття навантаження з кристала

Отримані результати можна пояснити тим, що генеровані радіацією точкові дефекти (міжвузлові атоми) є стопорами для руху дислокацій у кристалі. Другим механізмом, який приводить до механічного зміцнення кристалів, є ефект радіаційно-стимульованого впорядкування дефектної структури. Суть ефекту полягає в різкому зростанні коефіцієнта дифузії міжвузлових атомів у полі радіації і, як наслідок, гетерування радіаційних дефектів на дислокаціях і в порушених приповерхневих шарах кристала, а також анігіляція дефектів з відновленням регулярної кристалічної ґратки. Детально такі ефекти описані в працях [6, 7].

Стан поверхні зразків після опромінення і термічного відпалу практично не змінився. Зміни концентрації характерних дислокаційних ямок травлення на поверхні деформованих зразків ми не помітили.

На рис. 6 показані закономірності зміни опору зразків, виміряні вздовж осі деформації (між контактами 1-2 і 3-4), та перпендикулярно до напрямку деформації (між контактами 1-4 і 2-3) (рис. 7).

Рис. 6. Зміни опору зразка вздовж осі деформації: *а* – контакти 1-2; *б* – контакти 3-4Рис. 7. Зміни опору зразка в напрямі перпендикулярно до осі деформації: *а* – контакти 2-3; *б* – контакти 1-4

Як бачимо з експериментальних залежностей тільки внаслідок першої деформації чітко виявилася зміна електропровідності вздовж та перпендикулярно до осі деформації. Таку зміну концентрації носіїв заряду (дірок) пояснено прогином закріплених на кінцях дислокацій, навколо ядра яких локалізована хмарина Котрелла. Дефекти виносяться на поверхню зразка і частина з них, яка має меншу енергією зв'язку з дислокацією, відривається і бере участь у перенесенні заряду.

Той факт, що дія радіації ($D = 260$ Гр) приводить тільки до збільшення механічної міцності кристала, але не приводить до зміни механостимульованої електропровідності, можна пояснити тим, що енергії X -променів є недостатньо для зміни зарядового стану хмарини Котрелла. Генеровані міжвузлові атоми кремнію відіграють роль стопорів для руху дислокацій, а також, частково, міжвузлові атоми в полі дії радіації беруть участь у заліковуванні структурних дефектів ("ефект малих доз"). Рекомбінаційні процеси, за участю генерованих фотоелектронів, приводять до певного зростання відносної зміни опору після першого разу опромінення.

Відпал кристалів при $T = 573$ К (упродовж 1 год) приводить до перебудови структурних дефектів з участю кисню, який також частково локалізований уздовж дислокацій та в місцях їхнього перегину, оскільки кисень максимально накопичується в ділянках кристала, де є найбільша зміна деформаційного потенціалу.

У разі інтерпретації отриманих результатів необхідно також брати до уваги і той факт, що атом кисню, який займає положення у міжвузлі, не виявляє електричної активності. Він стає електрично-активним і бере участь у механізмі розсіювання носіїв заряду в разі заміщення атома кремнію у вузлі ґратки.

Рухливість носіїв заряду в кристалах р-Si, якщо виникає тільки один механізм розсіювання на фонах, становить $0,048$ м²/Вс. Наявність дислокацій також впливає на рухливість носіїв заряду, їхню концентрацію та час життя. Ці величини описують загально відомими виразами [7]:

$\mu_0 = e \langle \tau \rangle / m^*$, $\langle \tau \rangle = 3/8RNv$, де m^* – ефективна маса носіїв заряду ($m^* = 0,56 m_0$); R – радіус просторового заряду дислокацій ($R = 0,046$ мкм); N – густина дислокацій на поверхні; V – швидкість розсіювання носіїв заряду ($V = 1,56 \cdot 10^5$ м/с); e – заряд електрона.

За густин дислокацій $N_1 = 2 \cdot 10^6$ см⁻² отримуємо $\mu_1 = 8,2 \cdot 10^6$ м²/Вс;
 $N_2 = 2 \cdot 10^{10}$ см⁻² — $\mu_2 = 1,64 \cdot 10^3$ м²/Вс.

Як впливає з наведеного вище внеском фононної складової в загальній рухливості можна нехтувати. Тобто основний вклад зміни механостимульованої електропровідності вносять заряди, локалізовані на дислокаціях. Вакуумний термічний відпал зразків при $T = 573$ К приводить до перебудови структури дефектів з участю киснево-вакансійних комплексів. Різкі стрибки механостимульованої зміни електропровідності на початковій стадії можна пов'язати з термолокалізацією носіїв заряду та подальшим їх вивільненням під дією деформації.

Висновки. 1. В процесі одновісної пружної деформації в кристалах р-Si відбувається прогин наявних дислокацій, на ядрах яких локалізовані хмарини Котрелла, які змінюють механостимульовану електропровідність зразків.

2. Низькодозне ($D = 260$ Гр) X – опромінення приводить до збільшення механічної жорсткості досліджуваних кристалів. Цей ефект пояснюють процесами радіаційно-стимульованого впорядкування дефектної структури кристала, а також тим фактом, що міжвузлові атоми Si, які утворюються під дією опромінення, є ефективними стопорами для руху дислокацій.

1. Орлов А.М., Соловьев А.А., Євтушенко Н.О., Скворцов А.А. Влияние электрического поля на дислокационную структуру кремния при ионировании в воде // Физика твердого тела. 2009. Т. 51, Вып. 1. С. 48-51
2. Макара В.А., Стебленко Л.П., Весна Г.В., та ін. Дослідження фізичних основ впливу зовнішніх полів (електричного, магнітного, електромагнітного) на механічні та електрофізичні властивості приповерхневих шарів легованих кристалів кремнію. Проект ДФФД: 10.01/008.
3. Головин Ю.И., Дмитриевский А.А., Сучкова Н.Ю., Бадьялович М.В. Многостадийное радиационно-стимулированное изменение микротвердости монокристалов кремния // Физика твердого тела. 2005. Т. 47, Вып. 7. С. 1237-1240.

4. *Morgunov R.* Spin micromechanics: elementary spin-dependent processes and their influence on plasticity of crystals // *Physics-Uspekhi*. 2004. №47. P. 125.
5. *Матульський В.Б., Павлик Б.В., Струк Я.А.* Высоковакуумная установка для исследования термической и радиационной стойкости твердых тел в условиях механической нагрузки // *Приборы и техника эксперимента*. 1989. №4. С. 245-247.
6. *Павлик Б.В., Лишак М.В.* До моделі радіаційно-стимульованого впорядкування дефектної структури кристалів CdS // *Український фізичний журнал*. 2006. Т. 51. № 3. С. 275-278
7. *Савчин В.П., Шувар Р.Я.* Електронне перенесення в напівпровідниках та напівпровідникових структурах. Львів: Видавничий центр ЛНУ імені Івана Франка, 2008. 687 с.

THE FEATURES OF ELECTROCONDUCTIVITY OF IRRADIATED AND ELASTIC DEFORMED p-Si CRYSTALS

B. Pavlyk¹, R. Didyk¹, J. Shykoryak¹, M. Kushlyk¹, I. Tchegil²

¹*Ivan Franko National University of Lviv,
Tarnavskogo Str. 107, UA - 79017 Lviv, Ukraine
pavlyk@electronics.wups.lviv.ua*

²*Scientific Industrial Corporation «Karat», 202 Stryiska St., 79031 Lviv, Ukraine*

In this work the mechanical stimulated electrophysical processes were investigated in p-Si crystals, which were effected by X-rays. It is shown, that in processes of uniaxial elastic deformation in p-Si crystals the curvature of existing dislocations happens. The Cottrell clouds, which change value of mechanical stimulated electroconductivity of samples, are localized on the nuclei of these dislocations. The nonmonotonic character of mechanical stimulated conductivity change is a confirmation of localization of charged defects and impurities in the Cottrell clouds. Based on the experimental data it is shown, that low dose ($D \leq 260$ Gy) X-rays leads to increasing of the value of mechanical rigidity of investigated crystals. This effect is explained with processes of radiation-stimulated ordering of the defect structure of the crystal, and also the fact that interstitial atoms of Si, which are formed under the action of irradiation, are effective stoppers for dislocation movement.

Key words: p-Si crystals; mechanical stimulated electrophysical processes; the action of X-rays irradiation

**ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОПРОВодИМОСТИ ОБЛУЧЁННЫХ
И УПРУГОДЕФОРМИРОВАННЫХ КРИСТАЛЛОВ p-Si****Б. Павлык¹, Р. Дидык¹, И. Шикоряк¹, М. Кушлик¹, І. Чегіль²**

¹Львовский национальный университет имени Ивана Франко
ул. ген. Тарнавского, 107, 79017, Львов, Украина
pavlyk@electronics.wups.lviv.ua

²НПП «Карат», ул. Стрыйская, 202, 79031, Львов, Украина

Исследовано механостимулированные электрофизические процессы в кристаллах p-Si, которые были подвергнуты рентгеновскому облучению. Показано, что в процессе одноосной упругой деформации в кристаллах p-Si происходит изгиб существующих дислокаций. На ядрах этих дислокаций локализованы атмосферы Котрелла, которые изменяют механостимулированную электропроводимость образцов. Немонотонный характер изменения механостимулированной проводимости есть подтверждением локализации заряженных дефектов и примесей в атмосферах Котрелла. На основании экспериментальных данных показано, что низкодозное ($D \leq 260$ Гр) X-облучение приводит к увеличению величины механической жесткости исследуемых кристаллов. Данный эффект объяснено процессами радиационно-стимулированного упорядочения дефектной структуры кристалла, а также тем фактом, что межузельные атомы Si, которые образуются под действием облучения, есть эффективными стопорами для движения дислокаций.

Ключевые слова: монокристаллы p-Si; механостимулированные электрофизические процессы; действие рентгеновского облучения.

Стаття надійшла до редколегії 23.03.2010

Прийнята до друку 25.05.2010