ДОПОВІДІ
НАЦІОНАЛЬНОЇ
АКАДЕМІЇ НАУК
УКРАЇНИ

ФІЗИКА
PHYSICS

https://doi.org/10.15407/dopovidi2021.01.039
УДК 621.315.592

**Г.П. Гайдар, М.Б. Пінковська, М.І. Старчик**

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ
E-mail: gaydar@kinr.kiev.ua

# Ефекти впорядкування дефектної структури *n*-Si, індуковані великими флюенсами іонів МеВ-них енергій

*Представлено академіком НАН України О.Є. Бєляєвим*

*Узагальнено результати досліджень структурних і оптичних властивостей кремнію, опроміненого легкими іонами МеВ-них енергій флюенсами, що перевищували $10^{16}$ $см^{-2}$. Структуру опроміненого іонами кремнію умовно поділено на декілька областей (пробігу, гальмування та за межею області гальмування), вигляд яких визначається типом іонів, їхньою масою, енергією і температурою під час опромінення. Встановлено, що опромінення великими флюенсами легких іонів МеВ-них енергій спричинює утворення в об'ємі кремнію на глибинах до декількох сотень мікрон упорядкованих шарів, пов'язаних із дефектами, властивості яких відрізняються від властивостей матриці. Показано, що за таких умов опромінення характер дефектоутворення (кількість і ширина виявлених упорядкованих лінійних структур та їх розташування відносно області гальмування іонів) залежить від маси й енергії іонів, інтенсивності пучка іонів, температури опромінення і властивостей кристала.*

*Ефект упорядкування дефектів у вигляді ліній напружень та їх поширення за межі області гальмування виявлено при опроміненні кремнію іонами як водню, так і гелію. З'ясовано, що даний ефект залежить від інтенсивності опромінення і виникає тільки при щільності струму пучка меншій, ніж 0,45 $мкА/см^2$. Установлено, що для кремнію, опроміненого іонами гелію, в області пробігу іонів характерною є не монокристалічна, а фрагментарна структура, яка має сукупність упорядкованих ліній напружень (пов'язаних із дефектами), паралельних смузі гальмування іонів гелію, а смуга гальмування складається з порожнеч, витравлених як суцільний шар та у вигляді окремих скупчень. Виявлено, що опромінення дислокаційного кремнію іонами дейтерію призводить до руху дислокацій у процесі опромінення та до перетину ними лінії гальмування дейтронів унаслідок утворення дефектів пакування.*

***Ключові слова:*** *кремній, опромінення, іони, упорядкована дефектна структура.*

Актуальність дослідження впливу опромінення іонами напівпровідників зумовлюється широким застосування методів іонно-променевої модифікації матеріалів у мікро- і наноелектроніці [1]. Використавши контрольоване введення радіаційних дефектів (РД) і провівши необхідні термічні обробки, можна істотно змінювати електрофізичні характеристики напівпровідників у широких межах [2].

Цитування: Гайдар Г.П., Пінковська М.Б., Старчик М.І. Ефекти впорядкування дефектної структури *n*-Si, індуковані великими флюенсами іонів МеВ-них енергій. *Допов. Нац. акад. наук Укр.* 2021. № 1. С. 39—50. https://doi.org/10.15407/dopovidi2021.01.039

Застосування іонної імплантації як методу прецизійного локального легування твердих тіл забезпечило, по суті, реалізацію переваг планарної технології в мікроелектроніці. Саме з іонною імплантацією значною мірою пов'язують бурхливий розвиток мікроелектроніки в останні десятиліття [3].

Імплантація газів, таких як водень, неон, аргон, гелій, представляє значний інтерес завдяки можливості контрольованого введення у матрицю кристала нанопорожнин, здатних гетерувати небажані домішки з об'єму і слугувати центрами релаксації напружень в оточуючій ґратці [4, 5]. Умовами отримання впорядкованих структур із нанопорожнин в опромінених кристалах є великі флюенси іонів або значна щільність струму іонних пучків.

Радіаційний вплив прискорених важких іонів у разі їхньої імплантації в кристал спостерігали за допомогою різних методів на глибинах, які в деяких випадках на порядки перевищували проекційні пробіги іонів [6]. Для виявлених ефектів було запропоновано спеціальну назву — "ефекти далекодії". Щодо впливу легких іонів, які не використовуються в технології іонного легування, особливості ефекту далекодії наразі є не зовсім зрозумілими. Механізм виникнення його досі не пояснено, оскільки теоретичні моделі взаємодії випромінювання з кристалами, які досить добре описують поведінку окремих РД або їхніх комплексів у твердих тілах, виявилися непридатними у разі опромінення великими флюенсами високоенергетичних іонів, коли значна кількість дефектів накопичується в обмеженому об'ємі, й потрібно враховувати їхню колективну взаємодію.

На даний час опромінення Si іонами кеВ-них енергій найбільш повно вивчено, оскільки протягом багатьох років воно було підґрунтям для отримання різних опто-, нано- та сенсорних пристроїв, інтегрованих у кремнієві підкладки. Застосування важких іонів з енергією декілька сотень МеВ стало перспективним зі створенням потужних прискорювачів, оскільки відкрило широкі можливості для одержання наноструктурованих матеріалів [7]. На сьогодні поведінка нерівноважної системи дефектів у разі тривалого енергетичного опромінення остаточно не встановлена, і вплив іонів з енергією порядку десятків МеВ на властивості кремнію залишається найменш вивченим.

Мета праці — визначити особливості та умови формування впорядкованої дефектної структури кремнію, індукованої великими флюенсами легких іонів МеВ-них енергій.

Можливість створення впорядкованих структур вивчали на монокристалах $n$-Si з питомим опором $\rho = 3 \div 4$ кОм $\cdot$ см, вирощених методом Чохральського, бездислокаційних та зі щільністю дислокацій $N_Д \approx 10^3$ см$^{-2}$. Опромінення проводили на прискорювачі У-120 ІЯД НАН України іонами водню з енергією 6,8 МеВ, іонами дейтерію з енергією 13,6 МеВ та іонами гелію з енергією 27,2 МеВ флюенсами $\Phi \geqslant 5 \cdot 10^{16}$ см$^{-2}$, варіюючи щільність струму іонного пучка в межах 0,25—3 мкА/см$^2$. Іонами водню та гелію опромінювали бездислокаційні кристали, тоді як іонами дейтерію — кристали, що містили дислокації. Зразки Si завтовшки 1—2 мм були приклеєні до підкладки спеціального тримача, який під час опромінення охолоджували протічною водою. За цих умов зразок також охолоджувався по краях поверхні, при цьому його температура не перевищувала 100 °C.

У кремнії проекційні (розрахункові) довжини пробігу іонів водню і гелію використаних енергій є майже однаковими й становлять приблизно $R_p \approx 360$ мкм. У разі опромінення Si іонами дейтерію з енергією 13,6 МеВ проекційна довжина пробігу є значно більшою — $R_p \approx 780$ мкм.

Для вивчення топографічного зображення дефектної структури кремнію зразки розрізали вздовж напрямку опромінення на пластини, проводили їх механічну (шліфування, полірування) та хімічну (протравлювання) обробки. Поверхні зразків досліджували на метал-мікроскопі (МІМ-8), за допомогою растрового електронного мікроскопа (JSEM-90) та атомно-силового мікроскопа (AFM). Поперечні перерізи опромінених зразків досліджували методом рентгенівської топографії на просвіт (методом Ланга) [8]. Вимірювання спектрів інфрачервоного (ІЧ) поглинання проводили на фур'є-спектрофотометрі FIS-113V. Для оптичних досліджень виготовляли зразки, що мали дві плоскопаралельні полiровані сторони.

Завдяки таким комплексним дослідженням проведено порівняння дефектної структури Si в областях пробігу, гальмування та за межею області гальмування для іонів різних мас, оскільки характер дефектоутворення в цих областях визначається типом іонів, їхніми масою, енергією і температурою під час опромінення. Виявлено зростання й ускладнення ступеню пошкодження кремнію у всіх трьох областях зі збільшенням енергії та маси іонів.

Дослідження властивостей Si, опроміненого іонами водню, становить важливий аспект радіаційної фізики напівпровідників. Це, передусім, вивчення радіаційної стійкості кремнієвих детекторів, які використовують у сучасних прискорювачах. Деградація сонячних батарей на космічних апаратах, здебільшого, зумовлена протонами (ядрами водню), які в значних кількостях випромінює Сонце, особливо під час магнітних бур [9]. Варто враховувати, що вихідним матеріалом для одержання високоякісного монокристалічного кремнію є моносилан ($SiH_4$). Вміст водню в отриманих із такої сировини монокристалах досить великий. Відомо застосування іонів водню для створення деяких типів напівпровідникових приладів із поліпшеними електрофізичними властивостями [10]. Усе це зумовлює актуальність проведених досліджень щодо опромінення кремнію іонами водню.

У *n*-Si, опроміненому іонами водню з енергією 6,8 МеВ флюенсом $10^{17}$ см$^{-2}$, на растровій електронній мікрофотографії зразка, вирізаного вздовж напрямку опромінення, виявлено сильно порушений прошарок (лінію напружень) на глибині $R_p \approx 360$ мкм — це лінія гальмування іонів. Однак спостереження на метал-мікроскопі виявили на цьому самому зразку в центрі опроміненої області (при щільності струму пучка іонів водню $\leqslant 0{,}45$ мкА/см$^2$) дві лінії напружень, пов'язаних із дефектами і паралельних лінії гальмування, на відстанях 358 ($\sim R_p$) і 645 мкм ($\sim 2R_p$) від поверхні з боку опромінення. Наявність другої лінії напружень на відстані подвійного пробігу іонів є проявом ефекту далекодії (поширення дефектної структури за межі області гальмування). Ширина лінії гальмування іонів становила близько 50–80 мкм, а другої витравленої лінії — близько 20—30 мкм.

Виявлено залежність поширення дефектів за лінію гальмування іонів водню від величини щільності іонного струму, тобто від інтенсивності опромінення. При збільшенні щільності струму до 1 мкА/см$^2$ лінія напружень на відстані подвійного пробігу іонів водню у Si не спостерігалася (тобто ефект далекодії не проявлявся).

Після відпалу опроміненого іонами водню Si при 500, 550 і 600 °С протягом 0,5 год проведено пошарове (з кроком 50 мкм) дослідження дефектів структури методом вибіркового протравлювання і наприкінці пробігу іонів виявлено пухирці розміром 0,2—0,5 мм (рис. 1). Водень, що вивільнявся зі зв'язків Si–H при 600 °С, утворював бульбашки, які росли і лус-

***Рис. 1.*** Серія (110)-рентгенівських топограм *n*-Si, опроміненого іонами водню ($E$ = 6,8 МеВ, Ф = 2,1 · $10^{17}$ см$^{-2}$) до (*а*) та після ізохронного відпалу упродовж 0,5 год при $T$, °С: *б* — 500; *в* — 550; *г* — 600. Напрямок опромінення перпендикулярний даній площині

калися, створюючи порожнечі (пори), розміри і щільність яких визначалися енергією іонів водню та інтенсивністю опромінення (рис. 1, *г*).

Дослідження ІЧ-спектрів поглинання Si, опроміненого іонами водню з енергією 6,8 МеВ, виявило утворення ряду центрів, до складу яких входить водень, локалізований на розірваних зв'язках утворених РД. Повний відпал цих центрів відбувався при 600 °С і супроводжувався розриванням Si—H зв'язків. Слід зазначити, що утворення дефектів структури пухирцевого типу спостерігалося в тому самому температурному інтервалі 580—600 °С, що й розривання Si—H зв'язків за даними ІЧ-поглинання.

У частині Si за областю гальмування іонів водню (>360 мкм), на глибині до 720 мкм, рівній подвоєній довжині пробігу ($2R_p$), після відпалу при 550—600 °С вибірковим протравлюванням виявлено дрібні дефекти розміром до десятка мікрон із концентрацією близько $10^2$ см$^{-2}$. Ефект можна пов'язати із каналюванням деякої частини іонів водню або РД.

Після опромінення 13,6 МеВ іонами дейтерію поверхня кремнію виявилася більш пошкодженою, ніж після опромінення іонами водню. За даними рентгенівської топографії і вибіркового протравлювання виявлено, що найбільші порушення структури (розупорядкування) спостерігалися в області гальмування іонів дейтерію, де концентрація дефектів була максимальною.

Картину вибіркового протравлювання Si, опроміненого флюенсом іонів дейтерію $10^{17}$ см$^{-2}$, наведено на рис. 2, *а—г*, де показано модифікацію протравленої смуги напружень уздовж лінії гальмування іонів (*1*) від краю до центра опроміненої області зразка. В області пробігу іонів у Si додаткова протравлена смуга напружень *2* виникала поблизу центра опроміненої області (на відстані ~130 мкм від першої смуги і ближче до поверхні), де температу-

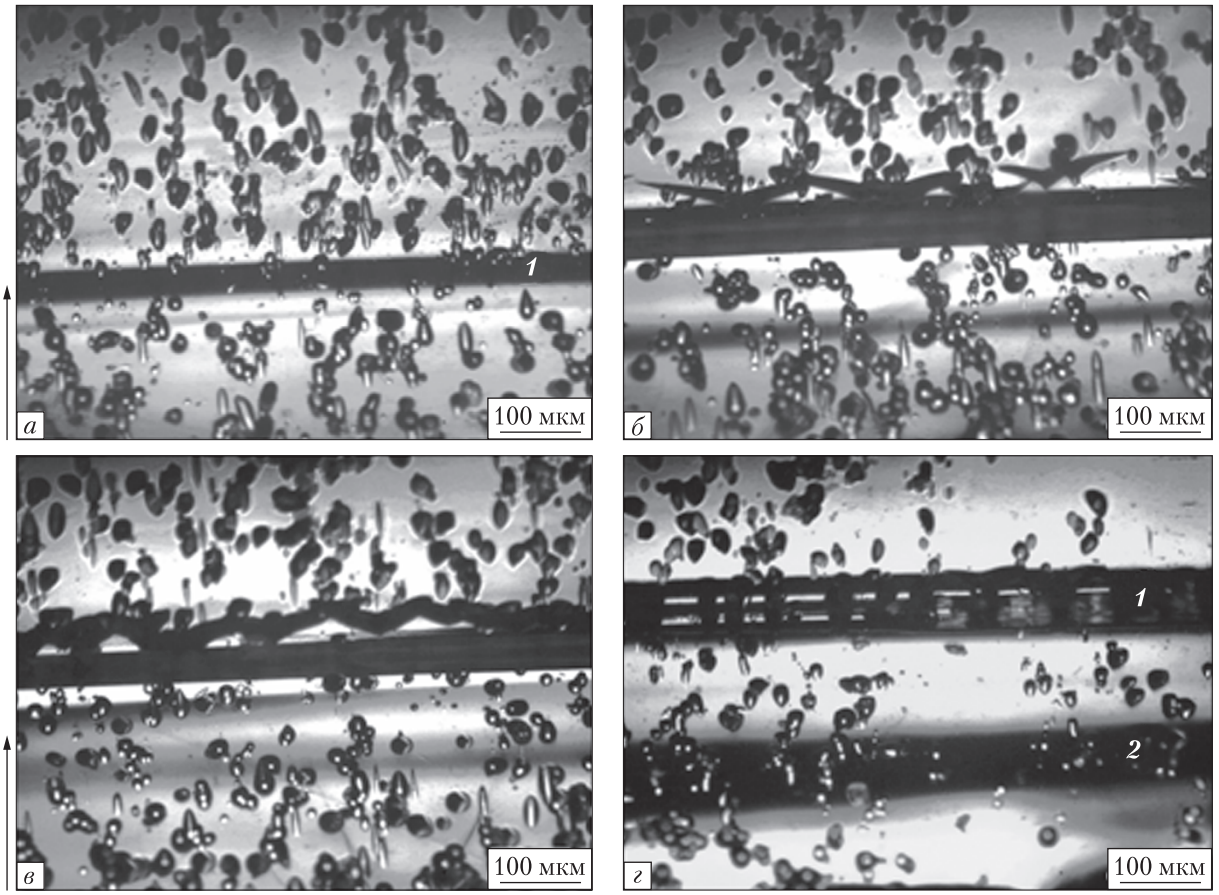


***Рис. 2.*** Мікрофотографії вибіркового протравлювання кремнію, опроміненого іонами дейтерію ($E$ = = 13,6 МеВ, $\Phi = 10^{17}$ см$^{-2}$); зміна смуги гальмування *1* від краю до центра (*а*—*г*) опроміненої області зразка; перетин смуги гальмування дефектами упаковки і додаткова протравлена лінія *2* напружень (*г*). Стрілки вказують напрямок опромінення.

ра зразка при опроміненні була максимальною (рис. 2, *г*). Ширина цієї смуги становила близько 100 мкм.

Смуга гальмування іонів (після вибіркового протравлювання) розширювалася та ускладнювалася ближче до центра опроміненої області, над нею з боку неопроміненого об'єму з'являлися дефекти пакування (рис. 2, *б*, *в*), які поблизу центра зразка практично під прямим кутом перетинали гальмівну смугу (рис. 2, *г*). Такий процес, очевидно, пов'язаний із наявністю дислокацій у вихідному Si, їхнім рухом і взаємодією з РД при опроміненні (в умовах підвищеної температури і великих концентрацій радіаційних дефектів). Установлено, що в разі опромінення Si іонами дейтерію ширина витравленої гальмівної смуги від краю опроміненої області до її центра варіювалася від 30 до 130 мкм у центрі зразка. Мінімальні значення цього параметра були отримані на краю зони опромінення, де температура зразка була нижчою внаслідок охолодження.

В області Si за смугою гальмування іонів дейтерію витравлені лінії напружень не виникали, тобто при опроміненні дислокаційного кремнію іонами дейтерію ефект далекодії

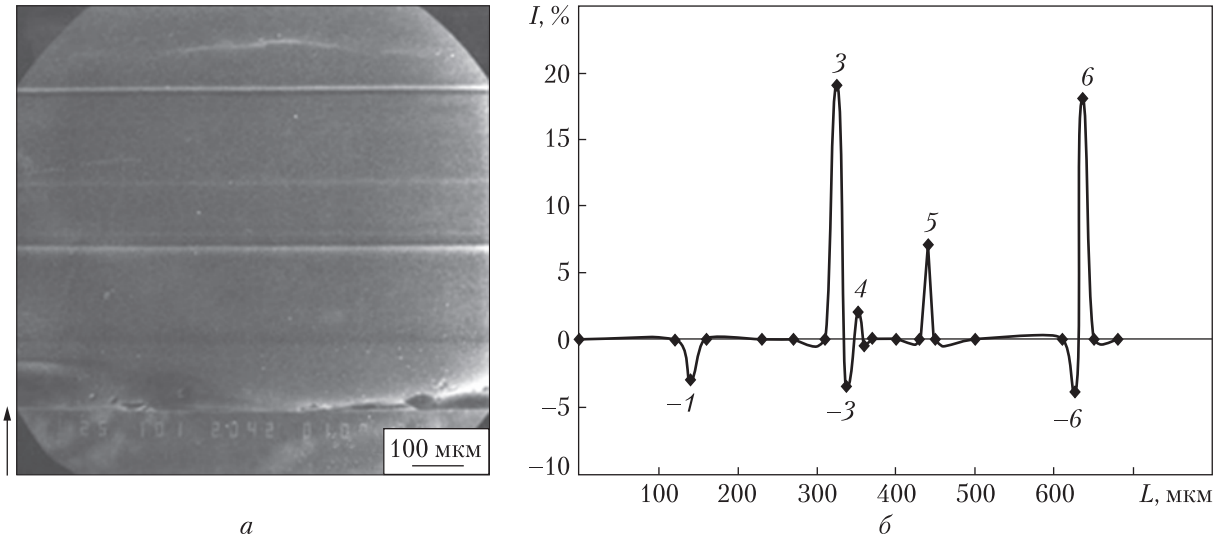


***Рис. 3.*** Поверхня поперечного перерізу зразка 3 кремнію (див. табл.) після опромінення іонами гелію ($E$ = 27,2 МеВ, $\Phi = 10^{17}$ см$^{-2}$) при щільності струму іонного пучка 0,3 мкА/см$^2$: *а* — растрова електронна мікрофотографія (РЕМ), напрям опромінення [111] паралельний даній площині (вказано стрілкою); *б* — фотометрія РЕМ поверхні поперечного перерізу зразка 3, напрям опромінення — вздовж осі абсцис.

не спостерігався, що може бути пов'язано з високим виділенням енергії і, відповідно, з високою температурою зразка при опроміненні.

Виявлено, що опромінення високоенергетичними іонами дейтерію дозволяє формувати тонкі шари шириною до 200 мкм в об'ємі Si на глибинах до 780 мкм, які мають властивості, відмінні від властивостей вихідної матриці.

Порівнюючи структуру областей пробігу і гальмування в Si, опроміненому іонами водню 6,8 МеВ і дейтерію 13,6 МеВ, можна зробити висновок, що зі збільшенням енергії іонів утворення дефектів в обох областях ускладнюється: з'являється додаткова лінія напружень. Сама лінія гальмування має різну ширину: вона вужча по краях і ширша в центрі опроміненої області, що, ймовірно, пов'язано зі значним охолодженням по краях кристала в процесі опромінення.

Структура Si на поверхні, в областях пробігу і гальмування іонів гелію з енергією 27,2 МеВ, виявилася найбільш пошкодженою (порівняно з опроміненням іонами водню і дейтерію), що можна було очікувати, оскільки енергія і маса іонів гелію більші.

**Відстані ліній напружень (в мкм) від поверхні зразка *n*-Si, опроміненого 27,2 МеВ іонами гелію флюенсом $\Phi = 10^{17}$ см$^{-2}$ при щільності струму пучка іонів 0,3 мкА/см$^2$**

| Номер лінії напруженості | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Металографія | | 132 | 242 | 341 | 380 | 423 | 627 | 720 | 764 | |
| РЕМ | зразок 1 | 150 | 282 | 362 | 385 | | 636 | 674 | | 865 |
| | зразок 2 | 145 | | 337 | 380 | | 666 | | | 839 |
| | зразок 3 | 140 | | 327 | 352 | 441 | 637 | | | |

Рентгенівська топографія опроміненого зразка Si, знята після шліфування й хімічного полірування поверхні, показала значні порушення структури в області гальмування іонів на глибині близько 360 мкм. На мікрофотографіях поверхні Si, отриманих за допомогою растрової електронної мікроскопії після опромінення флюенсом $10^{17}$ см$^{-2}$ при зміні щільності струму пучка іонів у діапазоні 0,25–0,45 мкА/см$^2$, впорядковані структури дефектів у вигляді ліній напружень, перпендикулярних напрямку струму іонного пучка, було видно як в області пробігу іонів, так і за лінією гальмування (рис. 3, *а*). Відстані ліній напружень від опромінюваної поверхні наведено в таблиці. Похибка у визначенні відстані ліній від поверхні зразка з боку опромінення може досягати 20 мкм. Лінії *3* та *4* можуть бути пов'язані з кінцем пробігу іонів гелію у Si. Інші лінії показано в області пробігу і за межами області гальмування іонів у зразку (тобто спостерігали ефект далекодії).

На рис. 3, *б* наведено комп'ютерну фотометрію растрової електронної мікрофотографії (див. рис. 3, *а*) поверхні поперечного перерізу зразка 3 кремнію, опроміненого іонами гелію, що наочно ілюструє розташування відносно поверхні зразка ліній напружень, пов'язаних із дефектами, та інтенсивність відповідних ліній. Інтенсивність ліній у відсотках ($I$) порівняно з фоном відкладено вздовж осі ординат, вздовж осі абсцис — відстань (у мкм) від поверхні зразка з боку опромінення. Додатні значення інтенсивності відповідають світлим лініям на рис. 3, *а*, від'ємні — темним.

При з'ясуванні природи дефектів у лініях напружень можна спиратися на наявні непрямі дані [5]. У цій праці отримано експериментальні результати і проведено розрахунки профілів розподілу РД та імплантованих атомів опроміненого іонами $Si^+$, які показали, що в області до ~$(1/2)R_p$ переважає утворення точкових дефектів вакансійного типу, трохи ближче до $R_p$ — великих вакансійних кластерів, а дефекти міжвузлового типу спостерігаються в областях ~$(1/2)R_p$ і ~$R_p$.

Згідно з даними праці [11], РД вакансійного типу генеруються не тільки в області пробігу іонів гелію, а й за областю їхнього гальмування.

Формування впорядкованої дефектної структури при опроміненні Si високоенергетичними іонами є чутливим до інтенсивності іонного пучка. Природа і структура дефектів у лініях напружень вимагає подальшого дослідження, проте, зіставляючи їхнє розташування з даними праці [5], можна припустити, що світлим лініям на рис. 3, *а* відповідають скупчення дефектів вакансійного типу, темним — міжвузлового. Відповідна структура поширюється і за межі області гальмування іонів гелію.

Зі збільшенням щільності струму пучка іонів гелію до 1 мкА/см$^2$ лінії напружень з'являлися тільки в області пробігу іонів. Ефект далекодії за цих умов не спостерігався. Кількість ліній напружень в області пробігу іонів визначалася, ймовірно, розподілом температури за опромінюваною поверхнею, зменшуючись від центра до краю зразка, де було максимальне охолодження.

Результати металографічного дослідження зразка Si, опроміненого флюенсом $10^{17}$ см$^{-2}$ при щільності струму іонного пучка 1 мкА/см$^2$, після вибіркового протравлювання показали, що область гальмування іонів гелію є сильно пошкодженою областю кремнію, яка складається з порожнеч різних розмірів і форм, витравлених як суцільний шар та у вигляді окремих кластерів, які супроводжуються утвореними дислокаційними петлями. Утворення порожнеч при імплантації високоенергетичних газових іонів, найімовірніше, пов'язане з

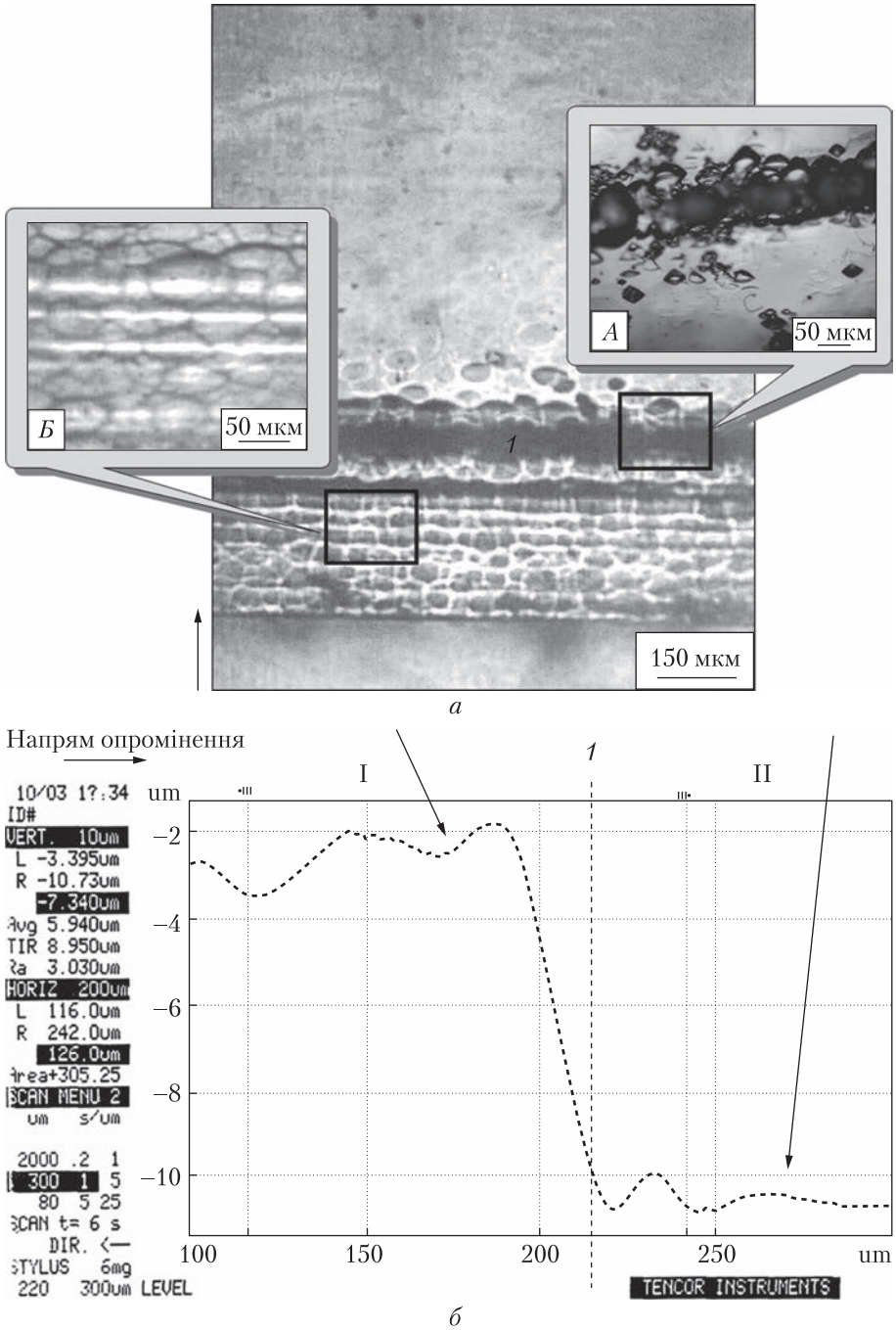


***Рис. 4.*** Поверхня *n*-Si після опромінення іонами гелію ($E = 27{,}2$ МеВ, $\Phi = 10^{17}$ см$^{2}$) при щільності струму іонного пучка 1 мкА/см$^{2}$: *а* — растрова електронна мікрофотографія, *1* — смуга гальмування іонів, на вставках — структура ділянок смуги гальмування (*А*) та області пробігу (*Б*), напрямок опромінення вказано стрілкою; *б* — мікропрофілограма, I — область пробігу іонів, II — область за лінією гальмування, вертикальна штрихова лінія вказує місце розташування смуги іонного гальмування *1*.

високою концентрацією дефектів вакансійного типу. Вакансії, об'єднуючись у комплекси, можуть видаляти напруження в ґратці, зокрема пов'язані з осадженням ростових домішок (кисню або вуглецю), і запобігати утворенню дислокацій.

Мікрофотографії області пробігу і смуги гальмування іонів гелію у Si, отримані за допомогою растрового електронного мікроскопа, показали, що структура області пробігу була не монокристалічною, а фрагментарною і мала сукупність упорядкованих ліній напружень (пов'язаних із дефектами), паралельних смузі гальмування *1* іонів гелію (рис. 4, *а*).

Мікропрофілограма поверхні зразка (рис. 4, *б*) показала розпухання Si в області пробігу іонів гелію. Різниця в профілі опроміненої (I) і неопроміненої (II) частин зразка становила близько 8 мкм. Зображення поверхонь вихідного й опроміненого зразків Si ($\Phi = 10^{17}$ см$^{-2}$), отримані за допомогою атомно-силового мікроскопа, підтвердили розпухання Si в області пробігу іонів. Шорсткість поверхні зразків Si до опромінення становила близько 0,5 нм, а після опромінення іонами гелію — 20 нм, що свідчило про значну деструкцію приповерхневого шару кремнію під дією опромінення.

При опроміненні Si іонами і водню, і гелію спостерігався ефект упорядкування дефектів у вигляді ліній напружень та їх поширення за межі області гальмування. Цей ефект залежав від щільності струму іонів (від інтенсивності опромінення) і виникав тільки при щільності струму пучка меншій, ніж 0,45 мкА/см$^2$, тобто при більш низьких температурах опромінення.

Упорядкованість дефектної системи може вказувати на хвильовий механізм її утворення. Хоча відомий автохвильовий механізм [6] не може пояснити далекого і наддалекого поширення впливу опромінення в частину кристала за областю гальмування іонів, оскільки він передбачає стабільність амплітуди поширення концентраційного фронту РД за рахунок пластичної деформації. Однак, як показав експеримент, пластична деформація у зразках, опромінених іонами водню, відбувається при вищій температурі (шляхом розриву Si—H зв'язків при 600 °C), ніж температура зразків під час опромінення.

У праці [12] розглядається інший механізм поширення радіаційного впливу, а саме — солітоноподібними імпульсами. У разі великих флюенсів опромінення і високих енергій іонів, використаних у нашій праці, при зіткненні з поверхнею може генеруватися величезне число солітоноподібних імпульсів. Імовірно, в області гальмування іонів буде також генеруватися нова потужна хвиля імпульсів [13, 14]. Завдяки високій швидкості поширення імпульсів у кристалі, перенесення енергії та її перерозподіл в об'ємі кристала можуть реалізуватися досить швидко і викликати ефект далекодії. Солітоноподібний механізм поширення радіаційного впливу не суперечить іншим відомим хвильовим механізмам, оскільки солітони — це певною мірою "частинкоподібні" нелінійні хвилі. Тому, на нашу думку, за створення впорядкованої дефектної структури поза межами області гальмування іонів відповідальним є солітонний механізм.

В області пробігу іонів упорядковані структури з'являються, ймовірно, внаслідок переміщення фронту рекристалізації сильно розупорядкованих шарів, можливо, аморфних, у процесі високоенергетичного тривалого іонного опромінення. Отже, формування впорядкованої дефектної структури може знайти пояснення в рамках синергетичного підходу, як результат процесу самоорганізації дефектів в опроміненому кристалі [15].

Таким чином, експериментально доведено, що в разі високоенергетичного опромінення *n*-Si іонами водню й гелію великими флюенсами (понад $5 \cdot 10^{16}$ см$^{-2}$) утворення дефектів

проходить через стадію впорядкування у вигляді ліній напружень, розташованих перпендикулярно до напрямку поширення пучка іонів, а кількість і розташування ліній напружень відносно лінії/смуги гальмування іонів залежить від щільності струму іонного пучка. Поширення дефектів у вигляді впорядкованих лінійних структур за межі області гальмування іонів свідчило про наявність ефекту далекодії, який спостерігався при щільності струму пучка іонів не більше, ніж 0,45 мкА/см$^2$, і пояснювався реалізацією, ймовірно, солітонного механізму.

Виявлено, що в разі опромінення *n*-Si іонами гелію при щільності струму іонного пучка 1 мкА/см$^2$ ефект далекодії не спостерігався, впорядкована дефектна структура поширювалася тільки в області пробігу іонів і мала фрагментарний характер, а смуга гальмування іонів складалася з порожнеч різної форми і розмірів. Припускається, що утворення впорядкованої дефектної структури може бути результатом процесу самоорганізації РД.

З'ясовано, що наявність дислокацій у Si в процесі опромінення іонами дейтерію призводить до їхнього руху і перетину лінії гальмування внаслідок утворення дефектів пакування.

Установлено, що опромінення легкими іонами МеВ-них енергій викликає утворення в об'ємі *n*-Si на глибинах до декількох сотень мікрон упорядкованих дефектних шарів, що забезпечує можливість змінювати властивості кремнію.

Підводячи підсумок, слід зазначити, що розуміння процесів упорядкованого накопичення і розподілу дефектів і домішок при іонному опроміненні є необхідним для контролю їхньої кількості та локалізації.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Кадыржанов К.К. Ионно-лучевая и ионно-плазменная модификация материалов. Москва: Изд-во Моск. ун-та, 2005. 640 с.
2. Баранський П.І., Бєляєв О.Є., Гайдар Г.П. Кінетичні ефекти в багатодолинних напівпровідниках. Київ: Наук. думка, 2019. 448 с.
3. Larson L.A., Williams J.M., Current M.I. Ion implantation for semiconductor doping and materials modification. *Reviews of Accelerator Science and Technology*. 2011. **4**, № 1. P. 11—40. https://doi.org/10.1142/S1793626811000616
4. Abrams K.J., Hinks J.A., Pawley C.J., Greaves G., van den Berg J.A., Eyidi D., Ward M.B., Donnelly S.E. Helium irradiation effects in polycrystalline Si, silica, and single crystal Si. *J. Appl. Phys.* 2012. **111**, № 8. P. 083527 (6). https://doi.org/10.1063/1.4705450
5. Kögler R., Peeva A., Werner P., Skorupa W., Gösele U. Gettering centres in high-energy ion-implanted silicon investigated by point defect recombination. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B*. 2001. **175-177**. P. 340—344. https://doi.org/10.1016/S0168-583X(00)00533-4
6. Алалыкин А.С., Крылов П.Н., Шинкевич М.В. Эффект дальнодействия в полупроводниках. *Вестн. Удмурт. ун-та. Серия Физика и химия*. 2005. № 4. С. 141—152.
7. Дмитрук М.Л., Кондратенко О.С., Пінковська М.Б., Хівріч В.І., Власукова Л.О., Кучинський П.В. Оптичні та сенсорні властивості наноструктурованого кремнію, опроміненого високоенергетичними частинками (протони, α-частинки, важкі іони). *Укр. фіз. журн*. 2010. **55**, № 7. С. 811—819. http://archive.ujp.bitp.kiev.ua/files/journals/55/7/550708pu.pdf
8. Баранський П.І., Бєляєв О.Є., Гайдар Г.П., Кладько В.П., Кучук А.В. Проблеми діагностики реальних напівпровідникових кристалів. Київ: Наук. думка, 2014. 462 с.
9. Xapsos M.A., Barth J.L., Stassinopoulos E.G., Messenger S.R., Walters R.J., Summers G.P., Burke E.A. Characterizing solar proton energy spectra for radiation effects applications. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 2000. **47**, № 6. P. 2218—2223. doi: 10.1109/23.903756

10. Козлов В.А., Козловский В.В. Легирование полупроводников радиационными дефектами при облучении протонами и α-частицами. *Физика и техника полупроводников*. 2001. **35**, № 7. С. 769—795. http://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/38565
11. Макаренко Л.Ф., Коршунов Ф.П., Ластовский С.Б., Хиврич В.И. Образование дефектов в запробежной области кремниевых структур, облученных альфа-частицами. *Материалы и структуры современной электроники*: Сб. научн. трудов III междунар. науч. конф. (Минск, 25–26 сентября 2008). Минск: Изд. центр БГУ, 2008. С. 109—112.
12. Псахье С.Г., Зольников К.П., Кадыров Р.И., Руденский Г.Е., Шаркеев Ю.П., Кузнецов В.М. О возможности формирования солитонообразных импульсов при ионной имплантации. *Письма в ЖТФ*. 1999. **25**, № 6. С. 7—12. http://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/36341
13. Овчинников В.В. Радиационно-динамические эффекты. Возможности формирования уникальных структурных состояний и свойств конденсированных сред. *Успехи физ. наук*. 2008. **178**, № 9. С. 991—1001. doi: 10.3367/UFNr.0178.200809f.0991
14. Овчинников В.В. Динамические эффекты дальнодействия при облучении. Радиационные методы обработки материалов. *Взаимодействие излучений с твердым телом*: Материалы 8-й междунар. конф. (Минск, 23—25 сентября 2009). Минск: Изд. центр БГУ, 2009. С. 113—116.
15. Селищев П.А. Самоорганизация в радиационной физике. Киев: Аспект-Полиграф, 2004. 239 с.

Надійшло до редакції 12.01.2021

REFERENCES

1. Kadyrzhanov, K. K. (2005). Ion-beam and ion-plasma modification of materials. Moscow: Moscow University (in Russian).
2. Baranskii, P. I., Belyaev, O. E., Gaidar, G. P. (2015). Kinetic effects in multi-valley semiconductors. Kyiv: Naukova Dumka (in Ukrainian).
3. Larson, L. A., Williams, J. M. & Current, M. I. (2011). Ion implantation for semiconductor doping and materials modification. Reviews of Accelerator Science and Technology, 04, No. 01, pp. 11-40. https://doi.org/10.1142/S1793626811000616
4. Abrams, K. J., Hinks, J. A., Pawley, C. J., Greaves, G., van den Berg, J. A., Eyidi, D., Ward, M. B. & Donnelly, S. E. (2012). Helium irradiation effects in polycrystalline Si, silica, and single crystal Si. J. Appl. Phys., 111, No. 8, pp. 083527 (6). https://doi.org/10.1063/1.4705450
5. Kögler, R., Peeva, A., Werner, P., Skorupa, W. & Gösele, U. (2001). Gettering centres in high-energy ion-implanted silicon investigated by point defect recombination. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B, 175-177, pp. 340-344. https://doi.org/10.1016/S0168-583X(00)00533-4
6. Alalykin, A. S., Krylov, P. N. & Shinkevich, M. V. (2005). Long-range action effect in semiconductors. Vestnik Udmurtskogo universiteta. Ceriya Fizika i khimiya, No. 4, pp. 141-152 (in Russian).
7. Dmitruk, N. L., Kondratenko, O. S., Pinkovska, M. B., Khivrich, V. I., Vlasukova, L. A. & Kuchynsky, P. V. (2010). Optical and sensitive properties of nanostructured silicon irradiated with high-energy particles (protons, α-particles, and heavy ions). Ukr. J. Phys., 55, No. 7, pp. 808-816. http://archive.ujp.bitp.kiev.ua/files/journals/55/7/550708p.pdf
8. Baranskii, P. I., Belyaev, O. E., Gaidar, G. P., Kladko, V. P. & Kuchuk, A. V. (2014). Problems of the diagnostics of real semiconductor crystals. Kyiv: Naukova Dumka (in Ukrainian).
9. Xapsos, M. A., Barth, J. L., Stassinopoulos, E. G., Messenger, S. R., Walters, R. J., Summers, G. P. & Burke, E. A. (2000). Characterizing solar proton energy spectra for radiation effects applications. IEEE Trans. Nucl. Sci., 47, No. 6, pp. 2218-2223. doi: 10.1109/23.903756
10. Kozlov, V. A. & Kozlovski, V. V. (2001). Doping of semiconductors using radiation defects produced by irradiation with protons and alpha particles. Semiconductors, 35, No. 7, pp. 735-761. doi: https://doi.org/10.1134/1.1385708
11. Makarenko, L. F., Korshunov, F. P., Lastovskiy, S. B. & Khivrich, V. I. (2008, September). The formation of defects behind the ion pass region in the silicon structure irradiated with alpha particles. Proceedings of the IIIrd International Scientific Conference Materials and structures of modern electronics, (pp. 109-112), Minsk: BSU Publishing Center (in Russian).

12. Psakh'ye, S. G., Zol'nikov, K. P., Kadyrov, R. I., Rudenskiy, G. E., Sharkeev, Yu. P. & Kuznetsov, V. M. (1999). About the possibility of the formation of soliton-like pulses under ion implantation. Pis'ma v zhurnal tekhnicheskoy fiziki, 25, No. 6, pp. 7-12 (in Russian). http://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/36341
13. Ovchinnikov, V. V. (2008). Radiation-dynamics effects. Potential for producing condensed media with unique properties and structural states. Phys.-Usp., 51, No. 9, pp. 955-964 (in Russian). doi: 10.1070/PU2008v051n09ABEH006609
14. Ovchinnikov, V. V. (2009, September). Long-range dynamic effects under corpuscular irradiation. Radiation methods of materials treatment. Proceedings of the 8th International Conference Interaction of radiation with solids, (pp. 113-116), Minsk: BSU Publishing Center (in Russian).
15. Celishchev, P. A. (2004). Self-organization in radiation physics. Kyiv: Aspekt-Poligraf (in Russian).

Received 12.01.2021

*G.P. Gaidar, M.B. Pinkovska, M.I. Starchyk*

Institute for Nuclear Research of the NAS of Ukraine, Kyiv
E-mail: gaydar@kinr.kiev.ua

THE ORDERING EFFECTS OF AN *n*-Si DEFECT STRUCTURE INDUCED BY HIGH FLUENCES OF IONS WITH MeV ENERGIES

The results of studies of the structural and optical properties of silicon irradiated with light ions of MeV energies with fluences exceeding $10^{16}$ $cm^{-2}$ are generalized. The structure of silicon irradiated with ions is conventionally divided into several regions (ion path, braking, and outside the braking region), the kind of which is determined by the type of ions, their mass, energy, and temperature during irradiation. It is established that the irradiation with high fluences of light ions of MeV energies causes the formation of ordered layers in the bulk of silicon at depths up to several hundred microns, associated with defects whose properties differ from those of the matrix. It is shown that, under such irradiation conditions, the nature of the defect formation (the number and width of the revealed ordered linear structures and their location relative to the braking region of ions) depends on the mass and energy of ions, the ion beam intensity, the irradiation temperature, and the crystal properties.

The effect of the ordering of defects in the form of stress lines and their propagation outside the braking region was discovered, when silicon was irradiated with ions of both hydrogen and helium. It is found that this effect depends on the irradiation intensity and occurs, only when the beam current density is less than 0.45 $\mu A/cm^2$. It is established that, for silicon irradiated with helium ions in the region of ion path, characteristic is not the monocrystalline, but fragmentary structure, which has an aggregate of ordered stress lines (associated with defects) located in parallel to the braking band of helium ions, and the braking band consists of voids etched as a continuous layer and in the form of separate clusters. It is revealed that the irradiation of dislocation silicon with deuterium ions leads to the movement of dislocations during the irradiation and to their crossing of the deuteron braking line due to the formation of stacking faults.

***Keywords:*** *silicon, irradiation, ions, ordered defect structure.*