

## ЕФЕКТ ДАЛЕКОДІЇ В КОНДЕНСОВАНИХ СЕРЕДОВИЩАХ ТА ЙОГО ПРОЯВ У КРЕМНІЙ ОПРОМІНЕНОМУ ВИСОКОЕНЕРГЕТИЧНИМИ ЛЕГКИМИ ІОНАМИ

© 2010 А. А. Гроза, П. Г. Литовченко, М. І. Старчик, **В. І. Хіврич**, Г. Г. Шматко, В. І. Варніна*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

Проаналізовано відомі експериментальні результати і теоретичні моделі виникнення ефекту далекодії у твердих тілах при енергетичних зовнішніх впливах. Наведено результати наших досліджень монокристалів кремнію, опромінених високоенергетичними ядрами водню (протонами) та гелію (альфа-частинками). Виявлено радіаційний вплив на відстанях, які перевищують пробіг іонів, тобто за областю їхнього гальмування в зразках ("ефект далекодії"), що не передбачено існуючою теорією взаємодії заряджених частинок з речовиною. Зроблено висновок про можливу реалізацію солітонного механізму ефекту далекодії.

*Ключові слова:* кремній, опромінення, іони, ефект далекодії.

**Вступ**

Існуючі теорії передбачають подібні профілі розподілу радіаційних дефектів і домішкових атомів, уведених іонним опроміненням у кристали [1]: обидва профілі мають гауссову форму, причому максимум розподілу для дефектів розташований трохи ближче до поверхні мішені (програми TRIM). Орієнтаційні ефекти можуть приводити до більш глибокого проникнення іонів у мішень уздовж певних кристалографічних напрямків іонів [2], проте доля таких іонів у загальному розподілі відносно невелика, якщо не дотримуватись умов прецизійної орієнтації зразка відносно напрямку опромінення.

Однак у численних експериментальних роботах різними методами спостерігали радіаційну дію на глибинах які в деяких випадках на порядки перевищували розрахункові (проекційні) пробіги ( $R_p$ ) іонів - це "ефект далекодії" (ЕД). Стосовно до прискорених атомарних частинок він означає можливість розповсюдження дефектної структури на аномально далекі відстані в матеріалі мішені.

ЕД є одним із важливих питань радіаційного пошкодження матеріалів. З одного боку, розподіл радіаційних дефектів та імплантованих іонів по глибині становить першорядний технічний інтерес, оскільки в багатьох випадках ці відомості важливі для радіаційної модифікації матеріалів. З іншого боку, дослідження даного ефекту має важливе фундаментальне значення для розуміння природи взаємодії опромінювання з речовиною, яка в наявних моделях описується спрощено.

ЕД було виявлено на межі 70-х років минулого століття при іонному опроміненні твердих тіл. Пізніше з'явилися експериментальні дані про виникнення ЕД при різних зовнішніх впливах нетермічного походження на тверді тіла (див. огляд [3]). Так, при опроміненні іонами ( $B^+$ ,  $Ar^+$ )

змінювався час життя неосновних носіїв заряду і постійна ґратки кремнію на глибинах до десятків мікрон, а на боці, протилежному опромінюваному, виявлено зміни дислокаційної структури при товщині пластин у сотні мікрон. Дослідження ЕД показали, що в більш дефектних кристалах ефект посилюється. Виявилось, що далекодія стає ефективнішою, якщо пластини кремнію перед опроміненням проходять спеціальну обробку (термічне окислення), при якому утворюються дефекти пакування. Автори роботи [3] пояснюють це тим, що при зіткненні іона з поверхнею відбувається щось подібне до мікрровибуху, що породжує гіперзвукову хвилю. Частота хвилі буде порядку оберненої тривалості збудження, пов'язаного або з локальним розігрівом речовини в трековій іона ("термічний" пік), або з перебуванням дефектів, що виникають уздовж піка ("пік зміщення"), за час  $10^{-11}$ - $10^{-12}$  с. Зустрічаючи на своєму шляху протяжні дефекти (наприклад, дефекти пакування), гіперхвиля викликає їхню перебудову, яка супроводжується породженням вторинних хвиль і т.д.

ЕД виявлено і при малоінтенсивному опроміненні кремнію світлом видимого діапазону з густиною потужності 0,2 - 1,5 Вт/см<sup>2</sup> протягом 8 с. Ефект полягав у підвищенні мікротвердості на боці, протилежному опромінюваному, і не був термічного походження [4]. Автори припустили, що в основі даного ефекту лежить той же механізм, що й при іонному опроміненні, - генерація пружних хвиль і їхня взаємодія із системою дефектів за наявності зворотного зв'язку між пружними хвилями та системою дефектів. У випадку іонного опромінення джерелом пружних хвиль є реакції між радіаційними дефектами та (або) тепловими піками. У випадку світлового опромінення пружні хвилі виникають при рекомбінації збуджених носіїв заряду через центри рекомбінації (точкові дефекти). На відміну від іонного опромінення в останньому випадку змі-

ни мікротвердості нестабільні й релаксують протягом декількох діб.

У роботі [5] автори спостерігали ЕД через вплив механічної обробки (шліфування) підкладки на спектри фотолюмінесценції епітаксialьних шарів *n-GaAs*.

Особливо вражаючий ЕД для металів [3]. Іонному опроміненню були піддані прокатані полікристалічні зразки ряду чистих металів і сплавів товщиною декілька десятків і сотень мікрон (фольга). Далекодіючий вплив опромінення на їхні механічні властивості проявлявся в тому, що після опромінення змінювалась мікротвердість з обох боків фольги як опромінюваної, так і зворотної; вплив опромінення розповсюджувався і через границю поділу (стопа з різних фольг товщиною кожної десятки мікрон). Виявилось, що ЕД має універсальний характер: при опроміненні електронами з  $E = 40 - 70$  кеВ і малоінтенсивними світловими потоками відбуваються такі ж зміни мікротвердості, як і при опроміненні іонами. Дозові залежності близькі для всіх видів опромінення. Для світла більші зміни на зворотному боці фольги (десятки відсотків). Основна відмінність - у тривалості змін. Зміни відсутні при видаленні перед опроміненням природного окислу. Близькість форм дозових залежностей навела авторів на думку, що основну роль в ЕД відіграє потік енергії, яка поступає на поверхню, а не конкретний вид енергії, від якого залежить лише тривалість змін, що виникли. Імовірно, тут має місце взаємодія відносно малих потоків енергії з нерівноважними системами, що потребує загального підходу. При порівняно низьких енергіях іонів і, відповідно, малих розрахункових пробігах атомів зареєстровано аномально глибоку (на десятки і сотні мікрон) дифузію чужих атомів (надглибоке масоперенесення). Особливість умов опромінення - надзвичайно висока густина струму.

При опроміненні іонами середніх енергій до доз  $10^{15} - 10^{18}$  см<sup>-2</sup> з густиною струму десятки мікроампер на 1 см<sup>2</sup> значного масоперенесення не відбувалося. Імпантовані іони знаходяться там, де передбачає теорія. За областю їхнього пробігу спостерігався шар зі зміненими властивостями. Різними методами отримано докази існування радіаційно-зміненого шару товщиною в десятки мікрон при розрахунковій глибині проникнення іонів до 200 Å для кристалічних, керамічних і аморфних матеріалів [6 - 8]. Утворення "радіаційних білих шарів" (шарів зміненого витравлювання) на поперечних перерізах опромінених іонами зразків у сплаві Fe-Cr супроводжувалось спостереженням просторової організації структури мішені, яка проявлялася на різних масшта-

бних рівнях, що є ознаками формування дисипативної структури.

Експериментальні результати й теоретичні моделі ЕД при атермічних зовнішніх впливах проаналізували автори роботи [9]. На важливу роль дефектної системи вихідних зразків і колективних процесів її зміни при цих впливах указує сукупність експериментальних фактів. Розглянуто такі теоретичні моделі ЕД: дифузійну, ударну (генерація дефектів під дією пружних хвиль), хвиль перемикавання (перехід опроміненої системи в інший стаціонарний стан), автохвильову (асимптотичний розв'язок системи нелінійних рівнянь дифузії вакансій та їхніх комплексів показує, що розповсюдження вакансій відбувається у вигляді автохвилі перекидання). Механізм перенесення енергії у вигляді потенціальної енергії дефектів є комбінацією механізмів, описаних у дифузійній та ударній моделях.

Колективна, а не парна, взаємодія атомів речовини з енергетичними частинками є принципово новим механізмом моделі розгляду ЕД. У цьому випадку фронт радіаційного пошкодження буде просуватися значно швидше, ніж при дифузійному русі окремих точкових дефектів. На думку авторів [6 - 8], для металів при високому рівні радіаційних пошкоджень в основі ЕД лежать радіаційно-індуковані кооперативні процеси, при яких реалізується гідродинамічний рух вакансійної плазми.

Можливість генерації солітоноподібних імпульсів при високоенергетичному впливі на групу й на окремий атом вільної поверхні показано за результатами моделювання методом молекулярної динаміки. Енергія, що закачується в приповерхневі шари матеріалу солітоноподібними імпульсами, буде трансформуватись в енергію дефектної системи кристала, включаючи дислокаційну структуру [10].

Модель виникнення в конденсованому середовищі нанорозмірних областей вибухового енерговиділення з випромінюванням ударних хвиль розглядається у роботах [11, 12]. Виникнення таких областей ("термічних піків"), які є результатом розвитку піків зміщень атомів, є загальним явищем для різних видів корпускулярного опромінення (для частинок з масою, більшою за масу нуклона). Для аналітичного опису ударно-хвильових процесів, генерованих опроміненням, автор застосував рівняння гідродинаміки. Чисельний розв'язок цих рівнянь підтвердив модель розповсюдження солітонової хвилі жорсткого профілю в метастабільному середовищі.

До цього часу немає єдиної теорії ЕД. Існуючі теорії, в основу яких покладено уявлення про парну взаємодію швидких частинок з атомами

речовини, дають розподіл радіаційних дефектів тільки в області пробігу та гальмування іонів. При побудові такої теорії можуть бути корисними наші експериментальні дані про особливості дії високоенергетичних легких іонів на монокристали кремнію.

### Експеримент

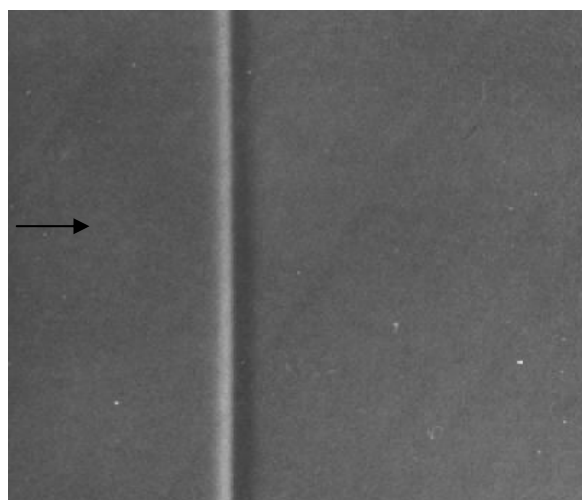
На прискорювачах У-120 і У-240 Інституту ядерних досліджень НАН України проводилось опромінення монокристалів кремнію протонами з енергією  $E = 6,8$  MeV ( $\Phi = 1 \div 3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ ),  $E = 43$  MeV ( $\Phi = 1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ ),  $E = 50$  MeV ( $\Phi = 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ ) та альфа-частинками з енергією  $E = 27,2$  MeV ( $\Phi = 1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ ). Інтенсивність потоку частинок підтримувалась у межах  $10^{12} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ . Зразки під час опромінення охолоджувались парами рідкого азоту або проточною водою. Температура зразків при цьому не перевищувала  $100^\circ\text{C}$ .

Для дослідження топографічного зображення дефектної структури кремнію зразок розрізався

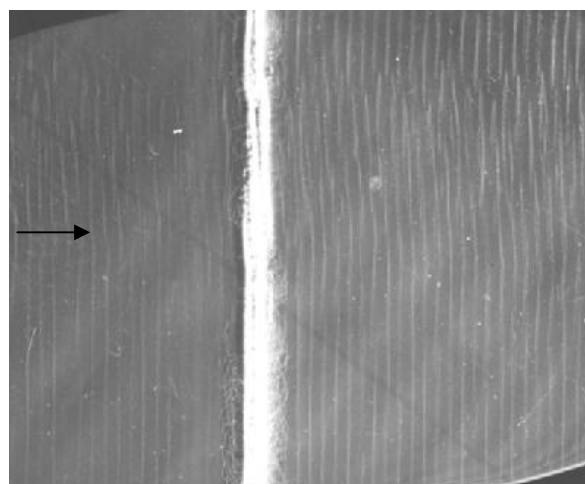
вздовж напрямку опромінення на пластинки, які після механічної та хімічної обробки поверхні досліджувались на метал-мікроскопі та в растровому електронному мікроскопі (JSEM-90). Поперечні перерізи опромінених зразків досліджувались також методом рентгенівської топографії за Лангом на просвіт.

### Результати експерименту та їхній аналіз

Результати досліджень показали, що одразу після опромінювання протонами з енергією 6,8 та 43 MeV на рентгенівських топограмах кремнію (рис. 1, *a*) чітко виявляється область страглінга (чорно-білий контраст, характерний для напружень у кристалічній ґратці, які виникають в області гальмування протонів на глибині  $R_p$  від опроміненої поверхні, що дорівнює 360 мкм та 9,4 мм відповідно). У цій області гальмування протонів з енергією 43 MeV у кремнії, при ізохронному відпалюванні ( $T = 300 \div 1000^\circ\text{C}$ ), при  $800^\circ\text{C}$  спостерігається утворення дислокацій та їхніх скупчень.



*a*



*б*



*в*

Рис. 1. Рентгенівські топограми кремнію, опроміненого протонами з  $E_{p+} = 43$  MeV,  $\Phi = 10^{17} \text{ см}^{-2}$ : *a* - до відпалу; *б* - відпаленого при  $1000^\circ\text{C}$  0,5 год.; *в* - неопроміненого, відпаленого при  $1000^\circ\text{C}$  0,5 год ( $\times 9$ ).

При підвищенні температури відпалу до  $\sim 900 \div 1000$  °С в прошарках росту кремнію для областей пробігу і після гальмування протонів відбувається утворення частинок нової фази і дефектів, що їх супроводжують (рис. 1, б, в). Цей ефект почав спостерігатися при температурі на 50 °С нижчій у запробіжній для протонів області кристала, ніж у пробіжній (див. рис. 1, б). Таким чином, було встановлено, що радіаційний вплив на структурні характеристики кристала в областях пробігу та за областю гальмування протонів проявляється в прискореному утворенні термо-

дефектів у шарах росту кремнію, яке в запробіжній частині зразка було більш інтенсивним і спостерігалось при нижчій температурі відпалу.

У кремнії, опромінену протонами з енергією 6,8 МеВ, на растрових електронних мікрофотографіях зразка, вирізаному вздовж напрямку опромінення, виявлялась тільки одна світла лінія на глибині  $\sim R_p$  (рис. 2). Проте спостереження на метал-мікроскопі виявили на цьому ж зразку дві „стінки“ дефектів на відстанях 358 і 645 мкм від поверхні з боку опромінення.

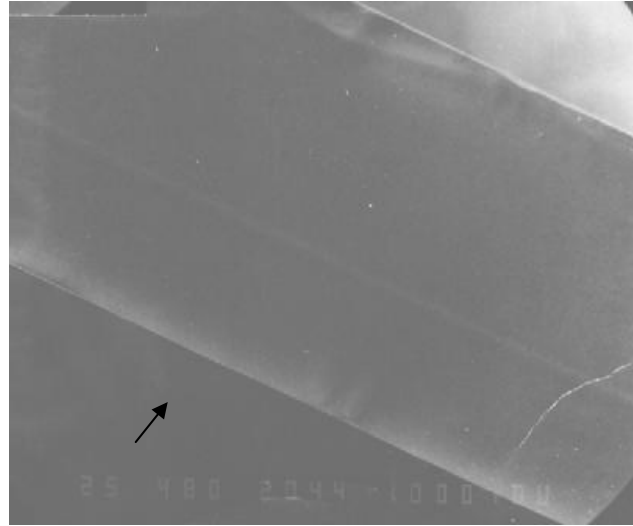
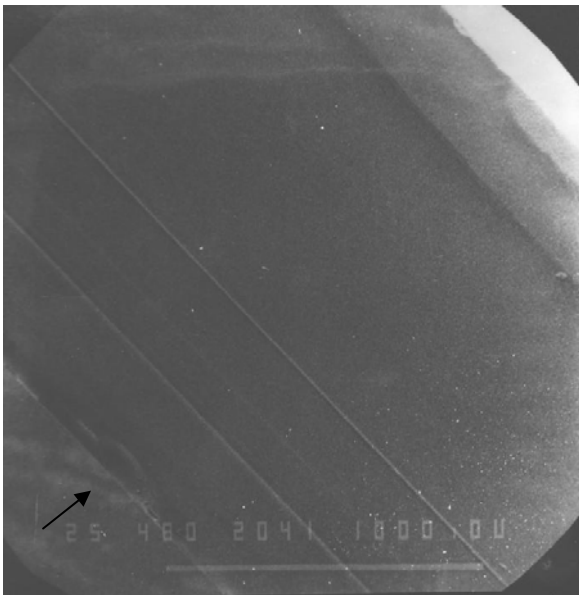
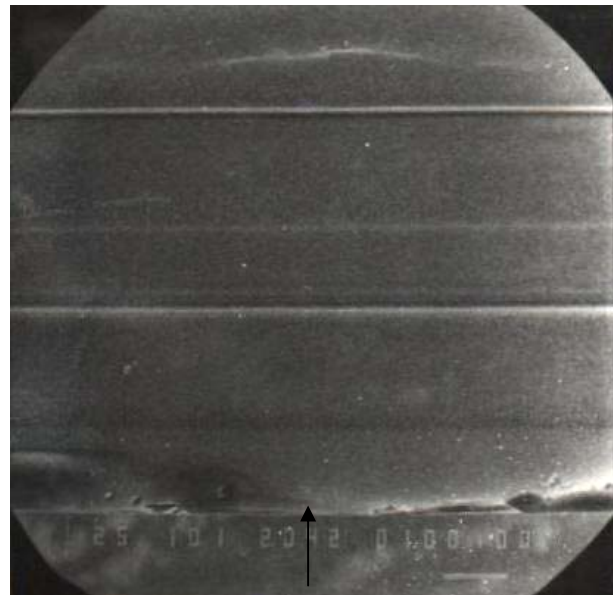


Рис. 2. Растрові електронні мікрофотографії поверхні кремнію, опроміненого протонами ( $E = 6,8$  МеВ,  $\Phi = 10^{17}$  см $^{-2}$ , напрямок опромінення [110] паралельний даній площині).



а



б

Рис. 3. Растрові електронні мікрофотографії поверхні поперечного перерізу зразка кремнію № 3, опроміненого альфа-частинками ( $E = 27,2$  МеВ,  $\Phi = 10^{17}$  см $^{-2}$ , напрямок опромінення [111] паралельний даній площині).

Після опромінення кремнію альфа-частинками з енергією  $E = 27,2$  МеВ флюенсом  $\Phi = 1 \cdot 10^{17}$  см $^{-2}$  при тій же проєкційній глибині проникнення, як і для 6,8 МеВ протонів ( $R_p = 360$  мкм), при метало-

графічному дослідженні опромінених зразків виявлено утворення восьми періодично розташованих „стінок” напружень, зумовлених дефектами (перші два стовпці в таблиці).

**Розташування “стінок” дефектів у зразках кремнію, опромінених альфа-частинками**

№ стінки	Відстань “стінок” дефектів і ліній від поверхні зразка, мкм			
	Метал-мікроскопія	Растрова електронна мікроскопія		
		Зразок № 1	Зразок № 2	Зразок № 3
I	132	150	145	140
II	242	282		
III	341	362	337	327
IV	380	385	380	352
V	423			441
VI	627	636	666	637
VII	720	674		
VIII	764			
		855	839	

На растрових електронних мікрофотографіях опромінених зразків виявлено лінії (див., наприклад, рис. 3 і останні три стовпці в таблиці), які за їхньою відстанню від поверхні зразків можна віднести до відповідних візуально спостережуваних “стінок” дефектів, позначених у першому стовпці таблиці римськими цифрами.

На рис. 3 (а, б) наведено мікрофотографії поверхні поперечного перерізу для зразка № 3, на яких ці лінії видно найбільш чітко. Похибка у визначенні відстані ліній від поверхні зразка з боку опромінення може сягати до 20 мкм.

На рис. 4 наводимо комп’ютерну фотометрію растрової електронної мікрофотографії (див. рис. 3, б) поверхні поперечного перерізу зразка № 3, що наочно ілюструє розташування “стінок” дефектів по відношенню до поверхні зразка та інтенсивність відповідних їм ліній. Інтенсивність ліній (%) порівняно з фоном (I) відкладена по осі

ординат, по осі абсцис - відстань (мкм) від поверхні зразка з боку опромінення. Позитивні значення I відповідають світлим лініям на рис. 3, б, негативні - темним. Привертає увагу той факт, що інтенсивність відповідних ліній практично однакова у всіх трьох дефектних областях кристала. При з’ясуванні природи дефектів у “стінках” ми поки що можемо спиратися лише на наявні непрямі дані [13]. У цій роботі отримано експериментальні результати та проведено розрахунки профілів розподілу радіаційних дефектів та імплантованих атомів з використанням програми TRIM для кремнію, опроміненого іонами Si<sup>+</sup>, які показали, що в області до ~ (1/2) R<sub>p</sub> переважає утворення точкових дефектів вакансійного типу, а трохи ближче до R<sub>p</sub> - великих вакансійних кластерів, а дефекти міжвузловинного типу спостерігаються в районі ~ (1/2) R<sub>p</sub> і ~ R<sub>p</sub>.

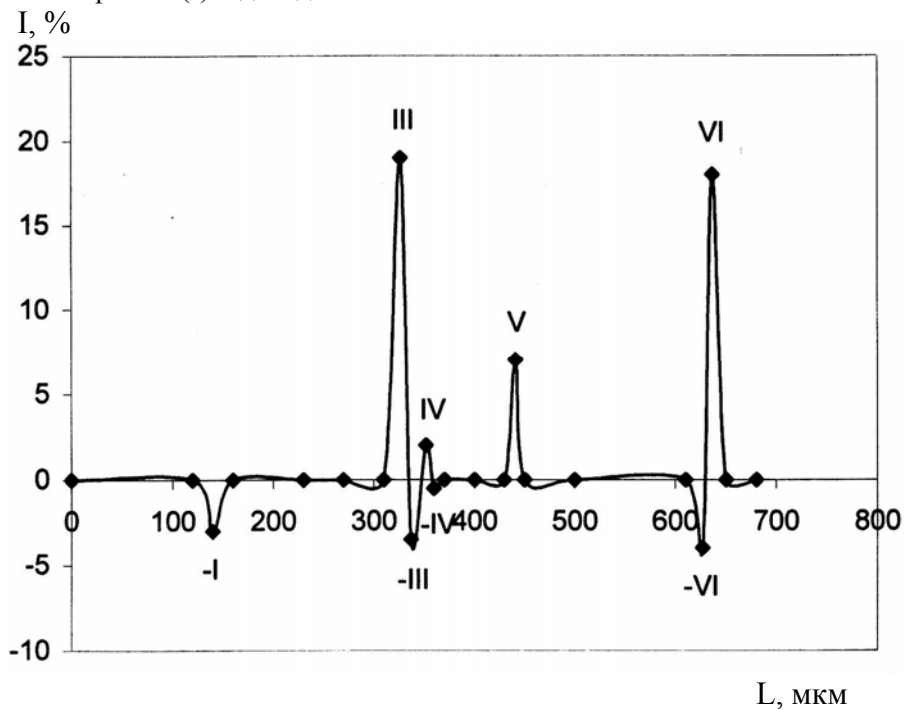


Рис. 4. Фотометрія растрової електронної мікрофотографії (див. рис. 3, б) поверхні поперечного перерізу зразка кремнію № 3, опроміненого альфа-частинками, напрямком опромінення по осі абсцис.

Наші дослідження [14, 15] виявили утворення скупчень дефектів (областей розупорядкування) дивакансійного типу та точкових вакансійно-домішкових дефектів у пробіжній для протонів частині кристала. Ефективність уведення останніх при протонному опроміненні на два-три порядки вища, ніж при нейтронному. Дослідження ІЧ-спектрів поглинання кремнію, опроміненого протонами з енергією 6,8 МеВ, в області їхнього гальмування виявили утворення ряду центрів, до складу яких входить водень, локалізований на розірваних зв'язках атомів кремнію. Повний відпал водневмісних центрів відбувався за температури 600 °С і супроводжувався розриванням Si-H зв'язків. За відпалу понад 600 °С відбувалося відшарування опроміненої ( $\Phi \geq 10^{17} \text{ см}^{-2}$ ) частини кристала товщиною, що відповідає глибині пробігу 6,8 МеВ протонів у кремнії (~360 мкм). Побічним ефектом цих досліджень було виявлення дефектів структури в запробіжній частині кристала на глибині до 720 мкм, густина яких ( $\sim 10^2 \text{ см}^{-2}$ ) у п'ять - вісім разів більша від густини дефектів в області пробігу протонів.

Утворення радіаційних дефектів вакансійного типу відбувається не тільки в області пробігу альфа-частинок, але й за областю їхнього гальмування [16].

Результати досліджень, наведені в даній роботі, показують, що дія опромінення легкими іонами розповсюджується на всю запробіжну для іонів частину кристала (див. рис. 1, б), тобто спостерігається явний ЕД. Температура відпалювання 1000 °С в нашому випадку, через прискорене утворення термодфектів у шарах росту опроміненого кристала, слугувала індикатором виявлення ефекту.

Дефектну систему на відстані, меншій від  $R_p$ , ми спостерігали тільки в зразках, опроміненних альфа-частинками. Отже, її формування, скоріш за все, чутливе до густини енерговиділення. Природа та структура дефектів у "стінках" потребує подальшого дослідження, однак співставляючи їхнє положення з даними роботи [13], можна припустити, що світлим ліням на рис. 2 і 3 та позитивним на рис. 4 відповідають скупчення дефектів вакансійного типу, темним (негативним) - міжвузловинного. Відповідна структура розповсюджується і в запробіжну для іонів частину кристала.

Дискретність дефектної системи, наявність дрібномасштабної структури (наприклад, в області  $\sim R_p$ ), на нашу думку, свідчать про хвильовий механізм її утворення. Проте відомий автохвильовий механізм [9] не може пояснити далекого та наддалекого проникнення дії опромінення в запробіжну частину кристала, бо він передбачає

підтримання амплітуди розповсюдження концентраційного фронту радіаційних дефектів за рахунок пластичної деформації. За нашими даними [14], пластична деформація в зразках, опроміненних протонами, відбувається за вищої температури (розриванням Si-H зв'язків - при  $\sim 600$  °С), ніж температура зразків під час опромінення. Разом з тим у роботі [10] розглядається інший механізм розповсюдження радіаційного впливу – солітоноподібними імпульсами. У випадку великих флюенсів опромінення і високих енергій іонів, використаних у нашій роботі, при зіткненні з поверхнею може генеруватися величезне число солітоноподібних імпульсів. Імовірно, в області гальмування іонів буде теж генеруватися нова потужна хвиля імпульсів [11, 12]. Завдяки високій швидкості розповсюдження імпульсів у кристалі, перенесення енергії та її перерозподіл в об'ємі кристала можуть реалізуватися достатньо швидко й зумовлювати ЕД.

Формування дефектної структури в монокристалах кремнію, опроміненних альфа-частинками, може знайти пояснення в межах синергетичного підходу, як результат процесу самоорганізації радіаційних дефектів [17, 18]. У роботі [19] у межах моделей процесів самоорганізації зроблено спроби сформулювати загальні умови виникнення періодичних когерентних процесів у системах різної природи. За наших умов опромінення солітоноподібний механізм розповсюдження радіаційного впливу є найбільш імовірним і не є суперечливим щодо інших відомих хвильових механізмів, оскільки солітони це "частинкоподібні" нелінійні хвилі. Можливо, в наших умовах реалізується солітонний механізм виникнення і розповсюдження періодичних процесів.

## Висновки

Виявлено ефект далекодії в монокристалах кремнію, опроміненних високоенергетичними протонами і альфа-частинками, тобто радіаційну дію на відстанях, які значно перевищують глибину проникнення іонів у кристал, що не передбачено існуючою теорією взаємодії заряджених частинок із речовиною

Радіаційна дія протонного опромінення проявляється у прискореному утворенні (за ізохронного відпалу) термодфектів у шарах росту кристала, яке в запробіжній частині зразків спостерігається при температурі відпалювання на 50 °С нижчій, ніж у пробіжній.

У монокристалах кремнію, опроміненних альфа-частинками виявлено утворення дефектної структури у вигляді стінок дефектів, перпендикулярних напрямку руху іонного снопа, яка по-

ширюється як до, так і за область гальмування іонів. Формування дефектної структури може бути результатом процесу самоорганізації радіаційних дефектів.

На основі аналізу експериментальних даних зроблено висновок про реалізацію солітонного механізму ЕД.

Автори вдячні канд. фіз.-мат. наук Л. Г. Ніколаєвій за ініціативу проведення даних досліджень, чл.-кор. НАН України В. Й. Сугакову, д-ру фіз.-мат. наук В. І. Сороці і канд. фіз.-мат. наук І. Ю. Голінею за участь в обговоренні результатів, плідну дискусію та слушні зауваження.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Lindhard J., Scharff V., Shiott H.E. Range concepts and heavy ion-range // Mat. Fis. Medd. - 1963. - Vol 33, No. 14 - P.1 - 42.
2. Томпсон М. Каналирование частиц в кристаллах // УФН. - 1969. - № 99. - С. 297.
3. Тетельбаум Д.И., Баянкин В.Я. Эффект дальнего действия // Природа. - 2005. - № 4. - С. 9 - 17.
4. Тетельбаум Д.И., Пантелеев В.А., Гуткин М.В. Эффект дальнего действия при малоинтенсивном облучении кремния светом // Письма в ЖЭТФ. - 1999. - Т. 70, вып. 6. - С. 381 - 385.
5. Кладько В.П., Крыштаб Т.Г., Клейнфельд Ю.С. и др. Влияние утоньшения подложки на оптические свойства эпитаксиальных слоев арсенида галлия (эффект дальнего действия) // Физика и техника полупроводников. - 1992. - Т. 26, вып. 2. - С. 368 - 372.
6. Хмелевская В.С., Малынкин В.Г. Эффект дальнего действия и коллективные процессы в металлах. // Материаловедение - 1998. - Т. 2. - С. 25.
7. Хмелевская В.С., Малынкин В.Г., Канунников М.Ю. Эффект дальнего действия как проявление коллективного взаимодействия в облучаемой металлической системе // Поверхность. - 2003. - № 7. - С. 66 - 70.
8. Хмелевская В.С., Антошина И.А., Кордо М.Н. "Эффект дальнего действия" в материалах различной природы // Физика металлов и материаловедение. - 2007. - Т. 103, № 6. - С. 652 - 656.
9. Алашкин А.С., Крылов П.Н., Шашкевич М.В. Эффект дальнего действия в полупроводниках // Вест. Удмурд. ун-та. - 2005. - № 4. - С.141 - 152.
10. Псахье С.Г., Зольников К.П., Кадыров Р.И. и др. О возможности формирования солитоноподобных импульсов при ионной имплантации // Письма в ЖТФ. - 1999. - Т. 25, вып. 6. - С. 7 - 12.
11. Овчинников В.В. Радиационно-динамические эффекты. Возможности формирования уникальных структурных состояний и свойств конденсированных сред // УФН. - 2008. - Т. 178, № 9. - С. 991 - 1001.
12. Овчинников В.В. Динамические эффекты дальнего действия при облучении. Радиационные методы обработки материалов // Взаимодействие излучений с твердым телом: Материалы 8-й Междунар. конф. (Минск, 23 - 25 сент. 2009 г.) - Минск: Изд. центр БГУ. - С. 113 - 116.
13. Kögler R., Peeva A., Werner P. et al. Gettering centres in high-energy ion-implanted silicon investigated by point defect recombination // Nucl. Instrum. and Methods Phys. Res. - 2001. - В. 175 - 177 - P. 340 - 344.
14. Гроза А.А., Литовченко П.Г., Старчик М.И. Эффекты радіації в інфрачервоному поглинанні та структурі кремнію. - К.: Наук. думка, 2006. - 124 с.
15. Варнина В.І., Гроза А.А., Литовченко П.Г. та ін. Оптичні та структурні дослідження протонно опроміненого монокристалічного кремнію // УФЖ. - 2003. - Т. 48, № 3. - С. 269 - 274.
16. Макаренко Л.Ф., Коришонов Ф.П., Ластовский С.Б., Хиврич В.И. Образование дефектов в запробежной области кремниевых структур, облученных альфа-частицами // Материалы и структуры современной электроники: III Междунар. науч. конф. (25 - 26 сент. 2008 г.) - Минск, 2008. - С. 4 - 7.
17. Сугаков В.И. Основы синергетики. - К.: Обереги, 2001. - 287 с.
18. Селищев П.А. Самоорганизация в радиационной физике. - К.: Аспект-Поліграф, 2004. - 239 с.
19. Чалий О.В., Лукомський В.П., Ганджа І.С. та ін. Нелінійні процеси в фізиці: коливання, хвилі, самоорганізація. - К.: Четверта хвиля, 2005. - 358 с.

#### ЭФФЕКТ ДАЛЬНОДЕЙСТВИЯ В КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕДАХ И ЕГО ПРОЯВЛЕНИЕ В КРЕМНИИ, ОБЛУЧЕННОМ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ЛЕГКИМИ ИОНАМИ

А. А. Гроза, П. Г. Литовченко, М. И. Старчик, **В. И. Хиврич**, Г. Г. Шматко, В. И. Варнина

Проведен анализ известных экспериментальных результатов и теоретических моделей возникновения эффекта дальнего действия в твердых телах при энергетических внешних воздействиях. Приведены результаты наших исследований монокристаллов кремния, облученных высокоэнергетическими ядрами водорода и гелия. Обнаружено радиационное воздействие на расстояниях, превышающих пробег ионов, т.е. за областью их торможения ("эффект дальнего действия"), что не объясняется существующей теорией взаимодействия заряженных частиц с веществом. Сделан вывод о возможной реализации солитонного механизма эффекта дальнего действия.

*Ключевые слова:* кремний, ионы, облучение, эффект дальнего действия.

**LONG-RANGE EFFECT IN CONDENSED MATTER AND ITS REVEALING IN IMPLANTED  
WITH HIGH ENERGY LIGHT IONS SILICON****A. A. Groza, P. G. Litovchenko, M. I. Starchik, V. I. Khivrych, G. G. Shmatko, V. I. Varnina**

Experimental and theoretical results of long-range effects in condensed materials after energy influence were analyzed. The experimental results for silicon monocrystals irradiated by high energy hydrogen and helium ions are presented. The effect of radiation was found in the region far beyond the ion stopping range ("long-range effect") which cannot be explained in the frame work of the ion implantation theory. Assumption was made concerning the soliton's mechanism of the propagation of the radiation effect.

*Keywords:* silicon, ions, radiation, long-range effect.

Надійшла до редакції 08.02.10,  
після доопрацювання - 27.04.10.