

МЕХАНІЗМИ НЕПРУЖНОСТІ ТА ЗМІЦНЕННЯ ОПРОМІНЕНИХ МОНОКРИСТАЛІВ СИЛІЦІУ

М.Я. Рохманов*, А.К. Гнап, В.М. Андронов*

(Харківський національний аграрний університет ім. В.В. Докучаєва,

*Харківський національний університет ім. В.М. Каразіна)

Проведено дослідження впливу альфа-, та гамма-випромінювання на характеристики амплітудної та температурної залежності внутрішнього тертя у монокристалах силіцію при частотах коливань 5 Гц – 5 кГц. Такі дослідження важливі з точки зору підвищення надійності виробів твердотільної електроніки, які у процесі експлуатації піддаються впливу не тільки опромінення, але і циклічних навантажень.

Вступ. Вироби твердотільної електроніки у процесі експлуатації піддаються дії не тільки високоенергетичного випромінювання, але і циклічного навантаження. Одним із методів підвищення службових характеристик матеріалів є гасіння шкідливих вібрацій за рахунок оптимізації демпфіруючої здатності матеріалу деталей [1]. Як правило, в процесі опромінення спостерігається деградація матеріалу і лише в деяких випадках сам процес опромінення може сприяти зміцненню. Зміцнення у процесі опромінення альфа-частинками спостерігалось, зокрема, у силіції в роботі [2] при порівняно невисоких потужностях дози порядку $5 \cdot 10^6 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Однак механізм цього ефекту до кінця не з'ясований. В силіції спостерігається висока чутливість механічних властивостей до опромінення [3], тому він є досить добрим модельним об'єктом. Для нього зроблені узагальнення експериментальних робіт і розвинуті нові теоретичні уявлення щодо впливу нейтронного, гамма-опромінювання, руху у ґратці кристала первинно зміщених атомів за рахунок формування областей розупорядкування [4, 5]. Але для частинок з низькою проникаючою здатністю механізми формування областей розупорядкування, особливо в об'ємі матеріалу, ще потребують дальшого вивчення.

У зв'язку з цим метою роботи було вивчення механізмів впливу важких заряджених частинок (альфа-частинок) на дисипативні властивості й структуру областей пошкоджень в силіції та порівняння такого впливу з випадком високопроникаючого випромінювання (гамма-промені).

Методика експерименту. Об'єктом дослідження обрано кремній р і п-типів високої чистоти, що використовується для епітаксialьного нарощування плівок кремнію, марок ЕКДБ-10-5 та ЕКЕС-0,01-5. Зливки крем-

нію вирощені методом Чохральського. Пластини зі зливка у вигляді дисків товщиною 410 ± 20 мкм діаметром 60 мм вирізались перпендикулярно кристалографічному напрямку [1] на станку "Алмаз-6". Після розрізки пластини шліфували з обох боків зв'язаним абразивом, потім полірували. Видалення порушеного шару проводили хіміко-механічним поліруванням на основі суспензії аеросила (дрібнодисперсний кварцевий порошок) і етиленаміду. Пластини мали дзеркальну поверхню 14 класу. Зразки монокристалів для досліджень у вигляді полосок довжиною від 12 до 60 мм і шириною 5 – 6 мм вирізались з дисків у напрямках типу $\langle 011 \rangle$ і $\langle 211 \rangle$.

Для вимірювання внутрішнього тертя у роботі використана методика досліджень при згинанні на частоті $f \sim 5$ Гц. Внутрішнє тертя Q^{-1} визначалось за логарифмічним декрементом вільних коливань δ : $Q^{-1} = \delta \cdot \pi^{-1} = N^{-1} \times \ln 2$ при зменшенні амплітуди ϵ_0 після N коливань вдвоє. Вимірювання температурних залежностей внутрішнього тертя були виконані за допомогою комп'ютеризованої методики [6] на тих же зразках в період стажування одного з авторів у ФРН в Інституті металофізики та ядерної фізики технічного університету м. Брауншвайг. Для бомбардування α -частинками паралельно поверхні зразка (на відстані 3 – 4 мм) розміщувались плутонієві джерела активністю $3,7 \cdot 10^7 - 5,53 \cdot 10^7$ Бк. На гамма-установці ХНУ ім. В.Н. Каразіна зразки опромінювались гамма-променями (Co^{60}).

Експериментальні результати. *Альфа-опромінення.* При збільшенні амплітуди коливань у силіції спостерігається наростання загасання (рис. 1, крива 1). Тенденція зберігається, але стає менш вираженою при опроміненні альфа-частинками ($5 \cdot 10^6 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ – крива 2). При її збільшенні до $7,6 \cdot 10^6 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ амплітудна залежність практично зникає аж до амплітуд порядку $2 \cdot 10^{-4}$, де у зразку без опромінення починали активно розвиватись процеси мікропластичної деформації. Спостерігалось загальне ослаблення амплітудної залежності енергетичних втрат, яке свідчить про зміцнення матеріалу.

Гамма-опромінювання. На відміну від альфа-опромінювання попереднє гамма-опромінення викликає немонотонну реакцію з точки зору непружної поведінки (рис. 2). На амплітудній залежності загасання після опромінювання при набраній дозі $1,1 \cdot 10^5$ Гр при амплітуді $\epsilon_0 \sim 3 \cdot 10^{-5}$ з'являється максимум та гістерезисний ефект при циклах навантаження-розвантаження (рис. 2, криві 2 – 3). Максимум руйнується впродовж декількох тисяч циклів попередніх коливань і на кривій зворотного ходу (рис. 2, крива 3) максимуму немає. Звертає на себе увагу ефект пам'яті (крива 4), а саме відновлення і навіть деяке підсилення максимуму через 100 – 200 годин відпалу зразка силіцію при кімнатній температурі. На температурній залежності внутрішнього тертя, що виконані при частотах 900 – 5000 Гц після гамма-

опромінення можна спостерігати появу максимумів А і Б (рис. 3). Після відпаду при 773 К протягом 600 с на кривій зворотного ходу їх немає. Частота коливань чутлива до структурних змін. Вона свідчить про аномальні зміни ефективного модуля пружності в області температур піка А.

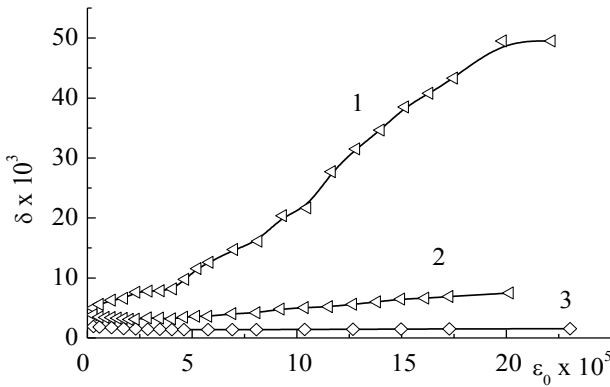


Рис. 1. Амплітудні залежності логарифмічного декременту δ p-Si $\langle 011 \rangle$:
 1 – до опромінення (1) і при опроміненні α -частинками;
 2 – потужність дози $5 \cdot 10^6 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, 3 – $7,6 \cdot 10^6 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$

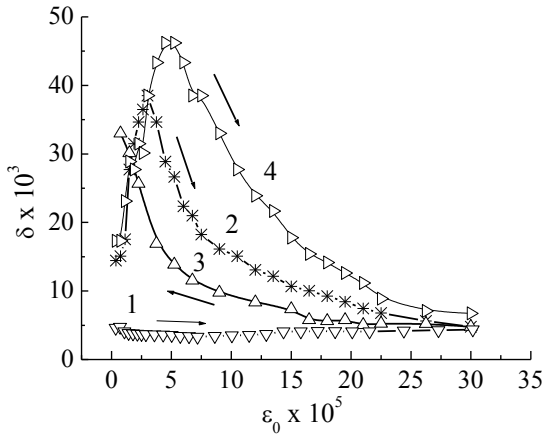


Рис. 2. Амплітудна залежність загасання p-Si- $\langle 011 \rangle$ до опромінення –1, після гамма-опромінення (доза $1,1 \cdot 10^5$ Гр) при прямому – 2 і зворотному – 3 ході за амплітудою та повторні вимірювання кривої – 4 через 168 годин

Обговорення результатів. Опромінення гамма-квантами (Co^{60}) приводить головним чином до іонізації атомів мішені. Це призводить до виникнення вільних електронів і вторинних малоенергетичних електронів, що ло-

калізовані поблизу пов'язаних з ними позитивних іонів, які утворюють просторові області перерозподілу заряду [3, 4]. Можна висунути припущення, що поява максимумів амплітудної залежності та спад загасання як при α -, так і гамма-опроміненні може бути пов'язаний з процесами іонізації у всьому об'ємі матеріалу, хоча у випадку α -випромінювання таке припущення не очевидне, оскільки глибина проникнення альфа-частинок становить всього десятки мікрометрів при товщині зразка $h = 410$ мкм.

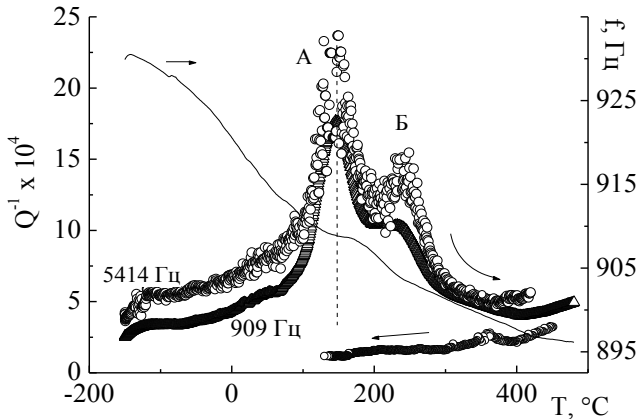


Рис. 3. Температурні залежності частоти f і внутрішнього тертя для $f = 909$ і 5414 Гц (амплітуди коливань $1 \cdot 10^{-5}$ і $3 \cdot 10^{-5}$, відповідно) для p-Si <011> після гамма опромінювання (доза $1,1 \cdot 10^5$ Гр) при нагріві і охолодженні після попереднього нагріву до 600 °C (показано стрілками)

Але, як виявилось [7], при опроміненні силіцію α -частинками, при проникненні однієї частинки з енергією $5,1$ MeV в мішень, лише частина енергії поглинається у поверхневому шарі напівпровідника, створюючи в ньому структурні зміни типу зміщених атомів і областей радіаційних пошкоджень. Приблизно $3,1$ MeV виділяється у вигляді електромагнітного випромінювання у ближній інфрачервоній (ІЧ) області спектру, оскільки термічні піки ($T \approx 10^4$ K і тиск величиною в десятки атмосфер) охолоджуючись, виділяють тепло, яке іде не тільки вбік поверхні, але і в об'єм кристала. Шляхом мікрофотометрування фотоплатівок, за допомогою яких реєстрували ІЧ-випромінювання з поверхні силіцію, який знаходився під дією α -випромінювання, показано [7], що дві третини енергії лежить в області довжин хвиль $0,76 - 1,1$ мікрометрів і третина потрапляє в область вище $1,1$ мкм.

Нами проведені дослідження інтенсивності пропускання інфрачервоного випромінювання для досліджених зразків n-Si (рис. 4) за допомогою спектрофотометра SPECORD-40. Вони показали, що досліджені зразки силіцію

прозорі для інфрачервоного світла з довжиною хвилі, що більша за 1 мікрометр і майже непрозорі при довжинах хвиль, що менші за 0,8 мікрометрів. Як видно з рис. 4 між зазначеними довжинами хвиль пропускання ІЧ випромінювання існує перехідна область часткової прозорості, причому за довжинами хвиль цей діапазон якраз відповідає діапазону ІЧ-випромінювання силіцію, на який приходить 2/3 енергії. Якщо зважити на те, що у випадку ідеальної прозорості поглинання енергії інфрачервоного випромінювання близьке до нуля, то можна припустити, що при довжинах хвиль напівпрозорості інфрачервоне випромінювання за рахунок внутрішнього фотоелектру найбільш ефективно буде передавати енергію атомам матеріалу.

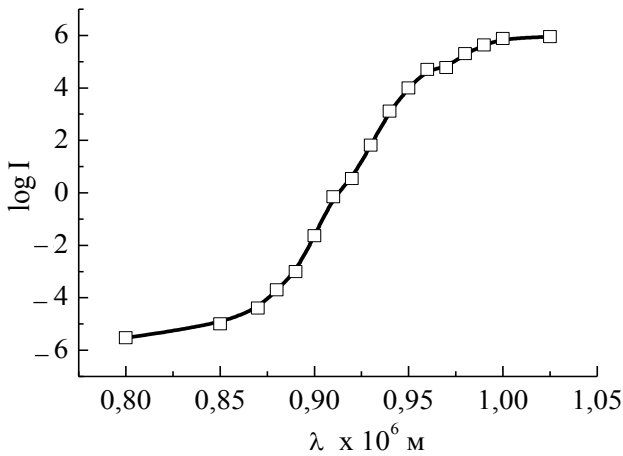


Рис. 4. Інтенсивність пропускання інфрачервоного випромінювання для n-Si

Згідно з [8], дислокації в кристалі n-типу ведуть себе як лінійний негативний заряд. Через електростатичну взаємодію іонізованих інфрачервоним (чи потоком вторинних фотоелектронів при гамма опроміненні) випромінюванням атомів і дислокацій вони утворюють комплекси, які не руйнуються у процесі циклічної деформації. Про існування комплексів свідчать ефекти пам'яті а також існування максимумів А і Б на температурній залежності енергетичних втрат.

Висновки. 1. У процесі бомбардування альфа-частинками спостерігалось зміцнення силіцію, що наростало зі збільшенням потужності дози з $5 \cdot 10^6 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ – $7,6 \cdot 10^6 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Його пояснено процесами іонізації в об'ємі матеріалу вторинним інфрачервоним випромінюванням, що виникає внаслідок гальмування альфа-частинок в поверхневих шарах кристала, та електростатичною взаємодією заряджених дислокацій з точковими дефектами і областями радіаційних порушень.

2. На кривих амплітудної залежності загасання в силіції, опромінену гамма-променями з дозою $1,1 \cdot 10^5$ Гр виявлено максимум при амплітуді відносної деформації $2 \cdot 10^{-5}$ при температурі 293 К. Ця температура припадає на область, де на температурних залежностях внутрішнього тертя розташовані низькотемпературні гілки максимумів, пов'язаних з процесами взаємодії дислокацій з асоціаціями точкових дефектів.

3. Після гамма-опромінення і циклічної деформації спостерігався ефект пам'яті, пов'язаний з відновленням максимуму радіаційного походження на амплітудній залежності загасання з часом. Він пояснюється існуванням областей радіаційних порушень, в яких ідуть процеси релаксації зарядового стану і вплив на які чинить циклічна деформація.

ЛІТЕРАТУРА

1. Гнап А.К., Рохманов М.Я. *Технічна механіка*. – Х.: ХНАУ, 2003. – 200 с.
2. Рохманов М.Я., Гнап А.К. *Внутреннее трение в монокристаллах кремния, облучаемого альфа-частицами* // СОІ. – Х.: ХВУ. – 2003. – Вып. 1. – С. 110 – 119.
3. Винецкий В.Л., Холодарь Х.А. *Радиационная физика полупроводников*. – К.: Наук. думка, 1979. – 336 с.
4. Пеліхатий М.М., Гнап А.К., Рохманов М.Я. та ін. *Області розупорядкування в напівпровідниках* // Вісник ХНУ, сер. Фізика „Ядра, частинки, поля”. – 2002. – Вып. 4. – С. 81 – 88.
5. Пеліхатый Н.М. *Влияние гамма и нейтронного облучения на параметры пассивных элементов интегральных схем* // Вісник ХДУ, сер. Фізика, 1999. – Вып. 3. – С. 155 – 160.
6. *Mechanical spectroscopy of ordered ferromagnetic Fe₃Al intermetallic compounds* / A. Nagy, U. Harms, F. Klose, H. Neuhäuser // *Material Science and Engineering*. – 2002. – V. A324. – P. 68 – 72.
7. Бендиков В.И., Гарбер Р.И., Гнап А.К. и др. *Исследование оптического излучения кремния при ионной бомбардировке* // *Радиационные дефекты в полупроводниках*. – Минск: БГУ, 1972. – С. 203 – 205.
8. Баранский П.И., Клочков В.П., Потыкевич И.В. *Полупроводниковая электроника*. – К.: Наук. думка, 1975. – 704 с.

Надійшла 14.10.2003

РОХМАНОВ Микола Якович, канд. фіз.-мат. наук, ст. наук співроб., старший науковий співробітник ХНУ. Область наукових інтересів – вплив електромагнітного випромінювання та екологія.

ГНАП Арлен Карпович, доктор фіз.-мат. наук, професор, зав. кафедрою ХНАУ. Закінчив ХГУ в 1965 році. Область наукових інтересів – радіофізика та електроніка.

АНДРОНОВ Володимир Михайлович, доктор фіз.-мат. наук, професор. Область наукових інтересів – фізика пружності та пластичності твердих тіл і конструкційних матеріалів.