

ФИЗИКА ПРОЧНОСТИ И ПЛАСТИЧНОСТИ

PACSnumbers: 61.72.Hh, 61.72.Yx, 61.80.Cb, 62.20.Qr, 71.55.Cn, 81.40.Rs, 81.40.Wx

Особливості зміни мікромеханічних характеристик кремнію при комбінованій дії магнетного поля та малих доз Рентгенового випромінення

Л. П. Стебленко, А. М. Курилюк, С. М. Науменко, Ю. Л. Кобзар,
О. М. Кріт*, Д. В. Калініченко, П. О. Теселько, П. П. Когутюк

*Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
фізичний факультет, кафедра фізики металів,
просп. Акад. Глушкова, 4^а,
03022 Київ, Україна*

**Навчально-науковий центр «Фізико-хімічне матеріалознавство»
Київського національного університету імені Тараса Шевченка і НАН України,
вул. Володимирська, 64,
01033 Київ, Україна*

В роботі досліджуються зміни мікромеханічних характеристик кристалів кремнію, стимульовані окремою та комбінованою дією низькоенергетичного малодозового Рентгенового випромінення ($D = 10^2$ Гр) та слабкого ($B = 0,17$ Тл) постійного магнетного поля. Показано, що застосування комбінованого впливу малих доз Рентгенового опромінення та слабкого магнетного поля призводить до взаємного знищення радіаційномеханічного та магнетомеханічного ефектів, які спостерігаються при окремій дії зазначених чинників. Це пов'язується з особливостями характеру дислокаційно-домішкової взаємодії при застосуванні окремих та подвійних оброблянь.

The changes of micromechanical characteristics in silicon crystals stimulated by separate and combined actions of low-energy X-rays ($D = 10^2$ Gy) and weak ($B = 0.17$ T) static magnetic field are investigated. As shown, the use of the combined influence of low-energy X-rays and a weak magnetic field leads to mutual annihilation of radiation-mechanical and magnetomechanical effects as opposed to individual action of these factors. These features are associated with the nature of dislocation–impurity interaction under separate and dual treatments.

В работе исследуются изменения микромеханических характеристик кристаллов кремния, стимулированные отдельным и комбинированным действием низкоэнергетического малодозового рентгеновского излучения ($D = 10^2$ Гр) и слабого ($B = 0,17$ Тл) постоянного магнитного поля. Показано,

что применение комбинированного воздействия малых доз рентгеновского облучения и слабого магнитного поля приводит к взаимному уничтожению радиационномеханического и магнитомеханического эффектов, которые наблюдаются при раздельном действии указанных факторов. Это связывается с особенностями характера дислокационно-примесного взаимодействия при использовании отдельных и двойных обработок.

Ключові слова: кремній, структурні дефекти, мікротвердість, Рентгенове випромінення, магнетне поле.

(Отримано 27 березня 2014 р.)

1. ВСТУП

Як показано в роботах [1–3], застосування до кристалів з різним типом хемічних зв'язків, в тому числі з металевим зв'язком [4], комбінованої дії малих доз Рентгенового випромінення та слабого магнетного поля, за рахунок впливу на процес дефектоутворення змінювало межу плинності та величину переміщення дислокацій. В роботі [5] вивчено можливість використання адсорбції алюмінію як способу впливу на характер релаксації магнетомеханічного ефекту (ефекту зміни мікротвердості, стимульованого магнетною дією). В зв'язку з цим представляє науковий інтерес пошук та дослідження інших «комбінаційних» ефектів, що виникають при сумісній дії іонізуючого випромінення та магнетного поля. Подібні дослідження є особливо доцільними в світлі фізичної природи магнетопластичного (МПЕ) та магнетомеханічного (ММЕ) ефектів [6–9]. Дані ефекти полягають у зміні мікропластичних та мікромеханічних властивостей діямагнетних кристалів у слабкому магнетному полі (МП). Теоретична модель зазначених ефектів, які зафіксовані в немагнетних кристалах, основана на концепції спін-залежних електронних переходів у зовнішньому МП: поле знімає заборону на певний спіновий перехід, який радикально змінює спінову конфігурацію як в комплексах точкових дефектів, так і в системі дислокація–парамагнетний центр (стопор). Останнє призводить до зміни характеру дислокаційно-домішкової взаємодії і, відповідно, до зміни структурних мікропластичних та мікромеханічних характеристик [10, 11].

Необхідною умовою для прояву МПЕ та ММЕ є наявність в кристалі нерівноважних дефектів, одним із способів генерації яких є Рентгенове опромінення. Цілком ймовірно, що застосування до опромінених кристалів магнетної дії може вплинути на процеси дефектно-домішкової взаємодії, і, як наслідок, може змінити склад генерованих при радіаційному опроміненні дефектів, що, в свою чергу, позначиться на мікромеханічних характеристиках кристалів.

Мета роботи полягала в перевірці цього припущення на прикладі діямагнетних кристалів кремнію.

2. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Дослідження виконувались на кристалах Si *n*- та *p*-типу провідності, легованих при вирощуванні методом Чохральського, відповідно, фосфором та бором. Зразки кремнію опромінювались низькоенергетичним ($W = 8$ кеВ) Рентгенівським випроміненням при кімнатній температурі, доза поглинутого опромінення складала $D = 10^2$ Гр. Магнетне оброблення зразків кремнію, яке здійснювалося у роботі, полягало у витримці зразків у постійному магнетному полі з індукцією $B = 0,17$ Тл протягом 7 діб. Схема експерименту полягала в наступному. Досліджувані зразки кремнію розбивались на три групи. В першу групу входили зразки Si, які піддавалися Рентгеновому опроміненню (РО), в другу — зразки Si, які піддавалися магнетному обробленню (МО). Третю групу зразків складали зразки Si, які пройшли подвійне оброблення в послідовності «РО + МО» та в послідовності «МО + РО». Тестування мікротвердості H за Віккерсом на площині {111} здійснювалося на приладі ПМТ-3М, як до, так і після зазначених оброблень кристалів Si, з похибкою, яка складала величину $\cong 3\%$. Ефект зміни мікротвердості визначався в різних за глибиною шарах, які залягають під поверхнею.

3. ОДЕРЖАНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Перш ніж приступити до вирішення задачі, пов'язаної з комбінованим впливом Рентгенового випромінення та магнетного поля, необхідно було дослідити окрему дію зазначених зовнішніх факторів на мікротвердість кристалів кремнію.

При дії низькоенергетичного малодозового Рентгенового випромінення був встановлений радіаційномеханічний ефект (РМЕ), який полягав у зменшенні мікротвердості (залежність 1 на рис. 1).

Виконані дослідження виявили, що ефект зміни мікротвердості є максимальним в найближчих до поверхні шарах ($h = 1,2$ мкм), а по мірі віддалення від поверхні (на глибині $h \geq 1,45$ мкм) РМЕ нівелиювався. При дії магнетного поля в досліджуваних зразках був зафіксований магнетомеханічний ефект, який виявлявся в зниженні мікротвердості (залежність 2 на рис. 1). Як видно з рисунка, характер зміни ММЕ з глибиною був подібний до характеру зміни з глибиною РМЕ. Слід зазначити, що характер зміни РМЕ та ММЕ за глибиною в кристалах Si *n*- та *p*-типу був ідентичним, проте абсолютні значення ефекту в кристалах *n*-типу були вищими в порівнянні з кристалами *p*-типу.

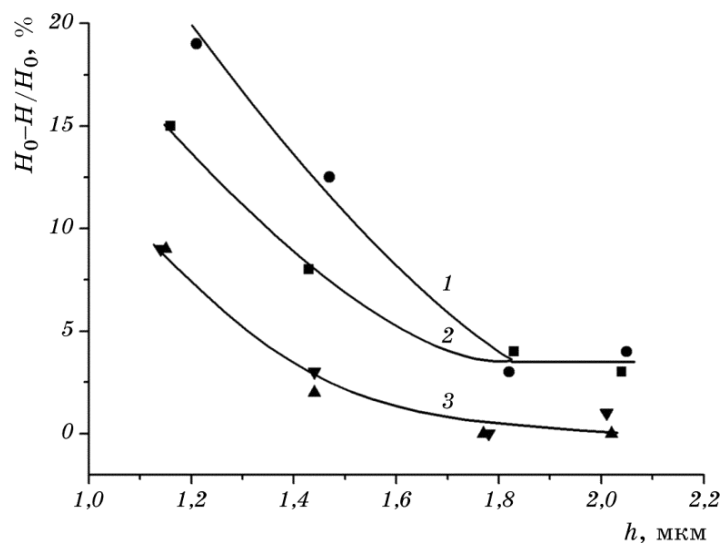


Рис. 1. Зміна відносної мікротвердості в кристалах Si *n*-типу залежно від глибини h залягання шарів під поверхнею; H_0 — мікротвердість контрольних (вихідних) зразків, H — мікротвердість зразків, змінена внаслідок окремого Рентгенового оброблення (1), окремого магнетного оброблення (2) та подвійних оброблень «РО + МО» та «МО + РО» (3).

Поряд з деякими спільними рисами в характері РМЕ і ММЕ були виявлені й відмінності. Було встановлено, що обидва ефекти є нестабільними і через певний час релаксують. При цьому швидкість релаксації РМЕ була приблизно в 10 разів меншою за швидкість релаксації ММЕ: РМЕ зникав через 50 діб після завершення РО, а ММЕ — приблизно через 5 діб після здійснення МО. Останнє вказує на те, що комплекси первинних радіаційних дефектів, які утворюються на основі міжвузлових атомів і вакансій і які спричинюють появу РМЕ, є більш стабільними, ніж структурні комплекси, які обумовлюють ММЕ і які пов'язують з, так званими, А-подібними дефектами (О-V-комплексами) [11]. Обидва ефекти (ММЕ і РМЕ), які зводяться до зменшення мікротвердості, можуть мати однакову природу зазначеного зменшення, яка полягає в зменшенні кількості зон стиснення за рахунок зв'язування структурних дефектів (вакансій і міжвузлових атомів) у комплекси. Проте в основі подібного комплексоутворення у випадку Рентгенового впливу лежать процеси радіаційного дефектоутворення, а у випадку магнетного впливу — спін-залежні процеси.

Після цих попередніх досліджень, які встановили ефекти, що виникають у кристалах Si при окремій дії МО та РО, були виконані експерименти для вирішення поставленої в роботі задачі, яка полягала у вивченні ефектів, спричинених комбінованою дією МП та X-

променів. Результати, представлені на рис. 1 (залежність Z), дозволяють визначити закономірності в зміні мікромеханічних характеристик, які з'являються в кристалах кремнію при здійсненні комбінованого впливу МО та РО.

Ці закономірності полягають, по-перше, в тому, що при комбінованій дії, використані оброблення взаємно розмивають одна одну в найближчих до поверхні шарах і компенсують вплив від дії Рентгенових променів та магнетного поля в більш віддалених шарах. Останнє призводить до того, що ефект зміни мікротвердості при комбінованому впливі біля поверхні істотно зменшується, а в більш глибоких шарах — зникає зовсім. Друга закономірність, яка була виявлена при застосуванні комбінованих оброблень, полягає в тому, що виявлені ефекти не залежали від послідовності виконання етапів подвійного оброблення.

Той факт, що при комбінуванні РО та МО ефект зміни мікротвердості нівелюється, можна пояснити, враховуючи, що в основі механізму зміни мікротвердості лежить дислокаційно-домішкова взаємодія. Не виключено, що при комбінованій дії виникають два типи потенціальних стопорів для руху дислокацій в дислокаційному каркасі, що виникають при інденуванні поверхні в процесі вимірювання мікротвердості. Перший тип стопорів пов'язаний з радіаційними дефектами, які утворюються при РО [12], другий — з А-подібними дефектами [11], що формуються внаслідок МО. Відсутність ефекту зміни мікротвердості при комбінованій дії вказує на те, що локальні бар'єри для руху дислокацій стають такими ж як у вихідних (контрольних) зразках, тобто в зразках, які не піддавались РО та МО. Подібна зміна локальних бар'єрів і нівелювання їхнього впливу можуть бути пов'язані з міждефектними взаємодіями, наслідком яких є різке зменшення внутрішніх мікронапружень і, відповідне до цього, повернення мікромеханічних характеристик до значень, притаманних вихідним (контрольним) зразкам.

4. ВИСНОВКИ

1. Встановлено, що дія низькоенергетичного малодозового Рентгенового випромінювання ($D = 10^2$ Гр) викликає в кристалах кремнію появу радіаційномеханічного ефекту, а дія слабкого ($B = 0,17$ Тл) магнетного поля — магнетомеханічного ефекту. Дані ефекти, які характеризуються зменшенням мікротвердості, максимально виявляються в найближчих до поверхні шарах і зникають в більш глибоких шарах.

2. Виявлено, що застосування до кристалів Si подвійного оброблення (Рентгенового та магнетного) усуває прояв РМЕ та ММЕ. Мікротвердість кремнію внаслідок комбінованого оброблення набуває значень, притаманних вихідним (контрольним) зразкам Si.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА—REFERENCES

1. V. I. Alshits, E. V. Darinskaya, and O. L. Kazakova, *Pis'ma v ZhETF*, **62**, Nos. 3–4: 352 (1995) (in Russian).
2. M. V. Galustashvili, M. G. Abramishvili, D. G. Driaev, and V. G. Kvachadze, *Fiz. Tverd. Tela*, **53**, No. 7: 1340 (2011) (in Russian).
3. V. A. Makara, L. P. Steblenko, O. M. Kryt, D. V. Kalinichenko, A. M. Kurylyuk, and S. M. Naumenko, *Dopovid NANU*, No. 4: 71 (2012) (in Ukrainian).
4. V. P. Lebedev and V. S. Krylovskiy, *Fiz. Tverd. Tela*, **27**, No. 5: 1285 (1985) (in Russian).
5. V. A. Makara, L. P. Steblenko, M. O. Vasylyev, O. V. Koplak, A. M. Kuryliuk, S. M. Naumenko, Yu. L. Kobzar, and G. V. Vesna, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **30**, No. 10: 1339 (2008) (in Russian).
6. Yu. I. Golovin, *Fiz. Tverd. Tela*, **46**, No. 5: 769 (2004) (in Russian).
7. R. B. Morgunov, *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*, **174**, No. 2: 131 (2004) (in Russian).
8. V. A. Makara, M. A. Vasilev, L. P. Steblenko, O. V. Koplak, A. N. Kurylyuk, Yu. L. Kobzar, and S. N. Naumenko, *Fiz. Tekh. Poluprovodn.*, **42**, No. 9: 1061 (2008) (in Russian).
9. V. A. Makara, L. P. Steblenko, M. Ya. Horyd'ko, V. M. Kravchenko, and A. M. Kolomiyets', *Visnyk Kyiv. Univ. Ser. Fiz.-Mat. Nauk*, No. 4: 316 (1999) (in Ukrainian).
10. V. N. Buzyikin, O. I. Datsko, and S. N. Postnikov, *Ehlektronnaya Obrabotka Materialov*, No. 2: 16 (1993) (in Russian).
11. M. N. Levin and B. A. Zon, *ZhETF*, **111**, No. 4: 1373 (1997) (in Russian).
12. V. S. Vavilov, *Defekty v Kremnii i na Yego Poverkhnosti* (Moscow: Nauka: 1990) (in Russian).