ФІЗИКА І ХІМІЯ ТВЕРДОГО ТІЛА
Т. 9, № 4 (2008) С. 723-727

PHYSICS AND CHEMISTRY OF SOLID STATE
V. 9, № 4 (2008) P. 723-727

УДК 548.55:53.091

ISSN 1729-4428

С.І. Яремій

Вплив іонної імплантації на мікротвердість монокристалів ГГГ

Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника,
вул. Шевченка, 57, 76000 Івано-Франківськ, Україна,
e-mail: sofiya.yaremiy@rambler.ru, тел: +(03422) 59-60-80

В роботі досліджено динаміку зміни величини мікротвердості монокристалів ГГГ, імплантованих іонами He^+. На основі проведеного моделювання процесу іонної імплантації та рентгенодифрактометричних досліджень приповерхневих шарів іонно-імплантованих монокристалів ГГГ запропоновано механізм зміни величини мікротвердості. Показано, що незначна кількість дефектів в іонно-імплантованому шарі приводить до зростання величини мікротвердості монокристалів.

Ключові слова: мікротвердість, гадоліній-галієвий гранат, імплантація, профіль деформації, профіль аморфізації.

Стаття поступила до редакції 20.03.2008; прийнята до друку 15.09.2008.

Вступ

Серед широкого спектру магнітних матеріалів у вигляді епітаксійних плівок, що використовуються в мікроелектроніці, одне з провідних місць займають матеріали із структурою гранату. В процесі виготовлення та використання вказаний матеріал деякий час безпосередньо контактує з іншими предметами, зазнаючи при цьому певних навантажень. Тому, важливо знати різні механічні характеристики гранатів та вміти ними керувати.

Дослідженню фізико-механічних властивостей монокристалів та плівок із структурою гранату присвячена незначна кількість робіт, і то, в основному, досліджувалися чисті, практично бездефектні матеріали [1-3]. Однак, як відомо, механічні характеристики кристалів залежать від їх досконалості, зокрема від кількості дислокацій, точкових дефектів та ін. Наприклад, як зауважується в [4], при іонній імплантації мікротвердість може підвищуватися в декілька разів.

Метою нашої роботи було визначення мікротвердості монокристалів гадоліній-галієвих гранатів (ГГГ) і дослідження зміни їх механічних властивостей під впливом іонної імплантації.

Результати та їх обговорення

Монокристали ГГГ ($Gd_3Ga_5O_{12}$), які використовуються в якості підкладок для ферит-гранатових плівок (ФГП), вирощувалися методом Чохральського. Післяростова обробка включала механічну шліфовку, механічну, хіміко-механічну та хімічну поліровки; поверхня підкладок відповідала 14 класу шорсткості. Для експерименту бралися як вихідні зразки ГГГ, так і імплантовані іонами He^+ в межах доз $D = 1\cdot10^{15}$см$^{-2}$ – $1\cdot10^{16}$см$^{-2}$ з енергією 100 кеВ. Імплантація проводилася на установці "Везувій" в режимі, що виключає каналювання та самовідпал.

Мікротвердість по Вікерсу вимірювалася стандартним способом з допомогою мікротвердоміра ПМТ-3 [5]. При цьому використовувалися навантаження по 50 і 100 г.

В процесі вимірюваня мікротвердості було виявлено, що при навантаженні 100 г відбуваються розтріскування та сколи монокристалів (рис. 1, а). Тому, подальші дослідження проводилися з використанням вантажу масою 50 г, при якому сколів і розтріскувань не спостерігалося (рис. 1, б).

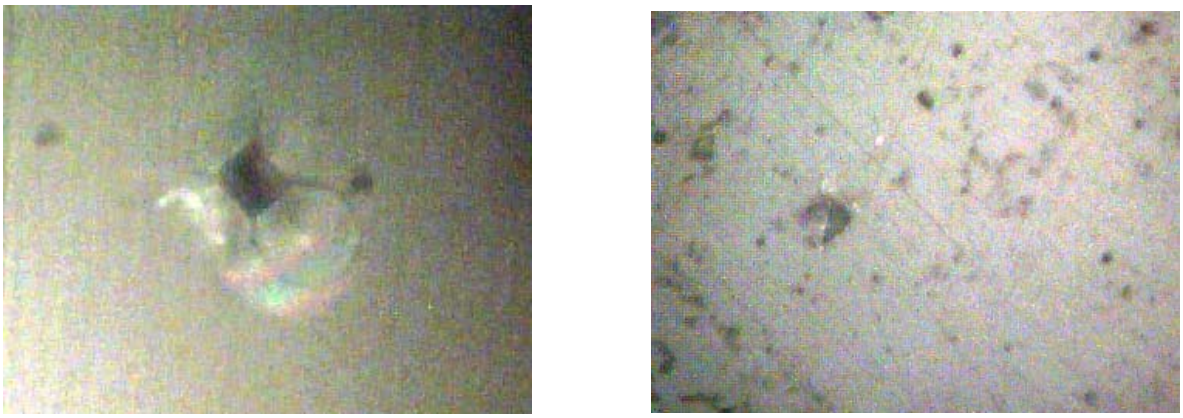
Оцінка мікротвердості проводилася за формулою

,

де P – навантаження (кГ/мм^2), α – кут при вершині алмазної пірамідки, d – довжина діагоналі відбитку пірамідки (мм).

Залежність величини мікротвердості іонно-імплантованого приповерхневого шару пластин монокристалу ГГГ від дози опромінення представлена на рис. 2.

Для оцінки об’єму відбитку пірамідки, який припадає на іонно-імплантований шар, проводилося моделювання процесу іонної імплантації за допомогою програми SRIM-2003, результати якого представлені на рис. 3. Як бачимо, товщина іонно-



а б

Рис. 1. Фотографії відбитку пірамідки на поверхні ГГГ:
а) при навантаженні 100 г; б) при навантаженні 50 г.

імплантованого шару ~ 5500 Å, при цьому максимум розподілу іонів гелію припадає на глибину 4200 Å, а зміщених іонів матриці – на 3500 Å. Зважаючи на те, що частка іонно-імплантованого шару займає > 80 % загального об'єму відбитка пірамідки, обчислену мікротвердість можна розглядати, як інтегральну характеристику міцності порушеного шару монокристалів.

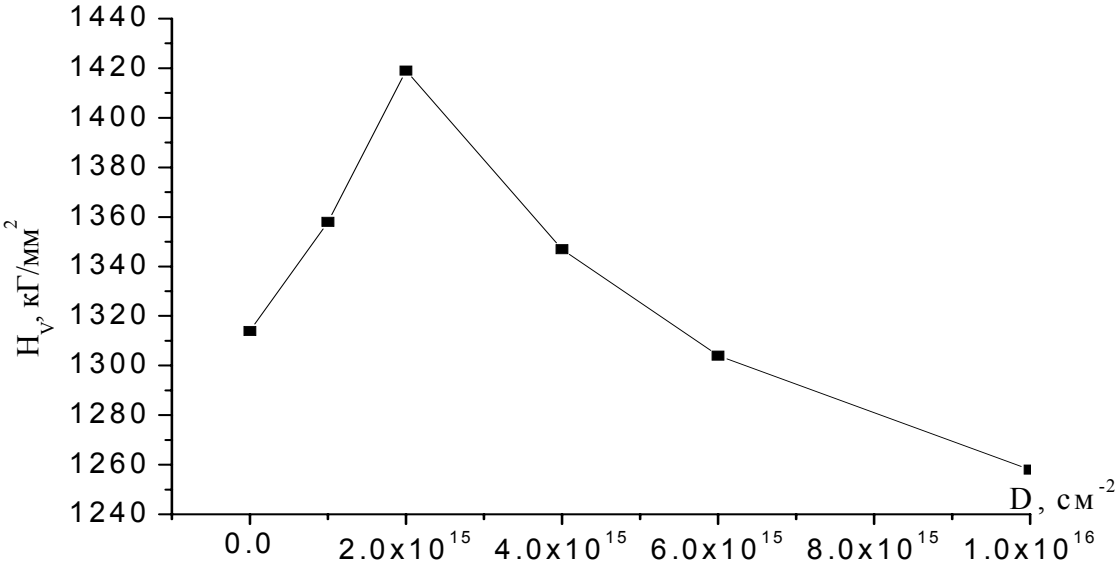


Рис. 2. Залежність величини мікротвердості H_V від величини дози імплпнтованих іонів He^+ в ГГГ (E = 100 кеВ).

Із залежності величини мікротвердості від дози імплантації (рис. 2) бачимо, що до дози $D = 2\cdot10^{15}$см$^{-2}$ мікротвердість зростає. Така ситуація може пояснюватися введенням в структуру незначної кількості дефектів, які пружно деформують кристалічну ґратку (підвищуючи енергію структури), але не приводять до її значного руйнування.

Починаючи із дози $D = 2\cdot10^{15}$см$^{-2}$ мікротвердість спадає, що, очевидно, пов'язане із збільшенням кількості дефектів, які утворюються при іонному опроміненні і, відповідно, частковому порушенні зв'язку між атомами кристалу.

Для перевірки наших припущень було проведено рентгеноструктурні дослідження даних зразків на двокристальному рентгенівському дифрактометрі ДРОН 2.0.

Наближена оцінка максимальної деформації здійснювалася за формулою , де $\theta_Б$ – кут Брега для ідеальної частини монокристалу, $\Delta\theta$ – різниця між кутами, які відповідають максимумам від основного і імплантованого шарів для відбивання (444). Уточнення величини максимальної деформації проводилося при визначенні профілів відносної деформації $\Delta d/d$ (h), які розраховувалися з експериментально одержаних КДВ. Дані розрахунки проводилися шляхом моделювання поширення рентгенівських променів в неідеальному кристалі засобами динамічної теорії

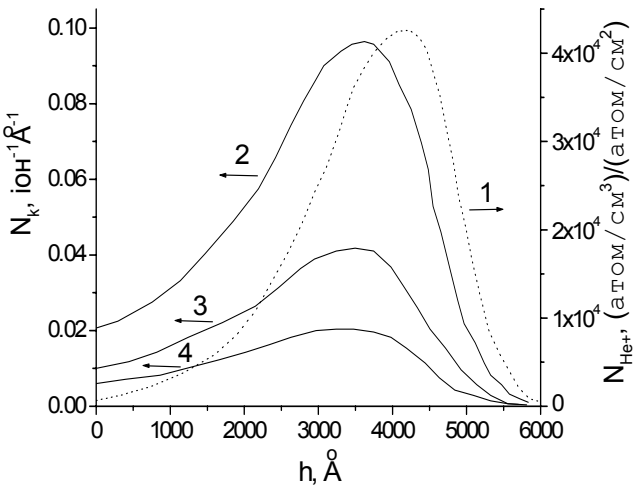


Рис. 3. Профілі розподілу імплантованих іонів He^+ в монокристалі ГГГ (E = 100 кеВ) (нормовано о величини дози) – 1, та зміщених іонів матриці 2, 3, 4 – кисню, галію та гадолінію відповідно) .

розсіяння у формі рівнянь Такагі. У зв'язку з тим, що при іонній імплантації міжплощинна відстань не є сталою по глибині величиною, весь порушений шар розділявся на підшари, в межах яких міжплощинна відстань вважалася сталою. Профілі відносної деформації задавалися функціонально, з врахуванням того, що при низьких дозах вони пропорційні відповідним профілям дефектів [6], які, згідно динамічної моделі іонно-імплантованого шару [7], є сумою двох складових: дефектів, що утворюються за рахунок ядерних та дефектів, які утворюються за рахунок електронних енергетичних втрат. Профіль дефектів (а отже і профіль відносної деформації) має складну залежність з глибиною, однак, її без втрати точності можна записати у вигляді суми асиметричної та спадної гаусіан [8]:

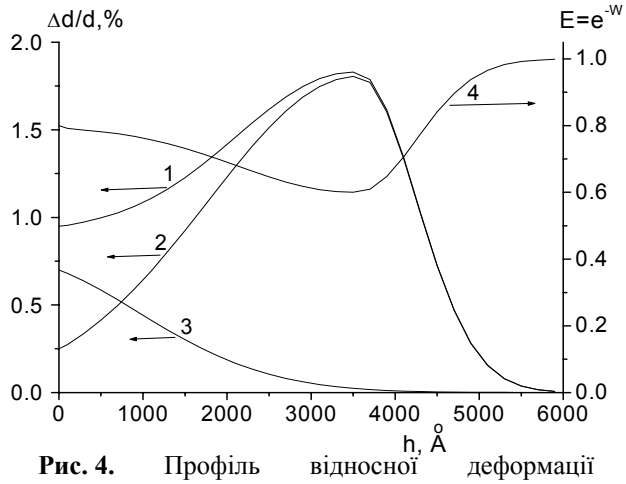


Рис. 4. Профіль відносної деформації приповерхневого шару ГГГ, імплантованого іонами He^+ з енергією 100 кеВ та дозою $6\cdot10^{15}$ см$^{-2}$ – 1, та його складові, пов'язані з ядерними – 2 та електронними – 3 енергетичними втратами; 4 – профіль аморфізації.

де , h – відстань, яка відраховується від поверхні в глибину кристалу, $R_P^Я$ – точка зшивки асиметричної гаусіани, , і – параметри гаусіан,

$$D(h)=\begin{cases} D^Я_{max}exp[-(h-R^Я_p)^2/\sigma^{Я2}_1], \text{ якщо } h<R^Я_p \\ D^Я_{max}exp[-(h-R^Я_p)^2/\sigma^{Я2}_2], \text{ якщо } h\geq R^Я_p \end{cases}+$$

$$+D^E_{max}exp[-(h-R^E_p)^2/\sigma^{E2}],$$

які характеризують їх ширину на піввисоті. Верхні індекси *Я* і *E* означають, що вказані параметри характеризують складові профілю, пов'язані з ядерними та електронними енергетичними втратами відповідно.

Цілеспрямовано змінюючи параметри гаусіан було розраховано профілі відносної деформації для всіх досліджуваних зразків. Обчислені профілі відносної деформації в межах досліджуваних доз є однотипними (рис. 4), а максимальна деформація зростає від 0,6 % до 2,5 %.

З графіка залежності значень максимальної деформації від дози імплантації (рис. 5) видно, що в інтервалі доз $1\cdot10^{15}$ – $6\cdot10^{15}$см$^{-2}$ зміна відносної максимальної деформації має лінійний характер, що пов'зано із поступовим накопиченням радіаційних дефектів (без їх

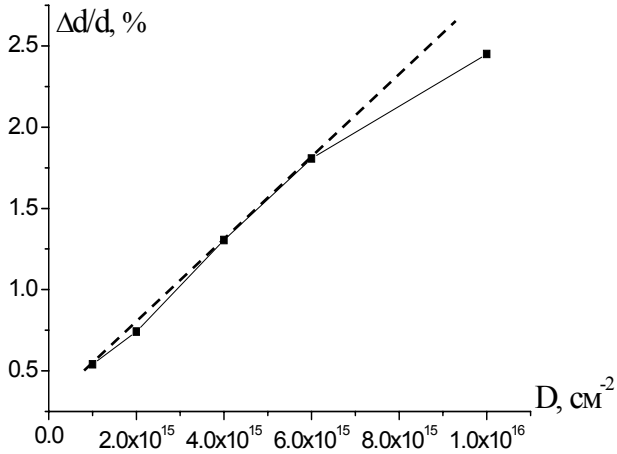


Рис. 5. Залежність максимальної відносної деформації від величини дози імплантованих іонів He^+ в ГГГ (E = 100 кеВ).

взаємодії між собою)

На величину мікротвердості, очевидно, значним чином буде впливати не тільки кількість дефектів в кристалі, але й структура "квазідосконалої" частини кристалу між дефектами, характеристикою якої є фактор аморфізації, який рівний $E=e^{-W}$, де W – статичний фактор Дебая-Валлера. При його визначенні за КДВ вважалося, що в максимально деформованих шарах порушеної частини монокристалу буде максимальним і розупорядкування. Тоді фактор

, де $\left.\frac{\Delta d}{d}\right|_{max}$ –

аморфізації можна задати формулою:

максимальна

деформація порушеного шару, k – коефіцієнт, який змінюється при підгонці. Для дози $6\cdot10^{15}$ см$^{-2}$ профіль фактора аморфізації $E(h)$ представлений на рис. 4.

Залежність величини фактора аморфізації в максимально деформованому шарі від дози імплантації (рис. 6), показує, що величина E в межах доз $\leq D = 2\cdot10^{15}$см$^{-2}$ практично не змінюється і близька до одиниці, тобто розвпорядкування кристалічної структури ГГГ незначне. Таким чином, практичне збереження кристалічної структури при незначному підвищенні її енергії за рахунок невеликої кількості радіаційних дефектів приводить до збільшення мікротвердості.

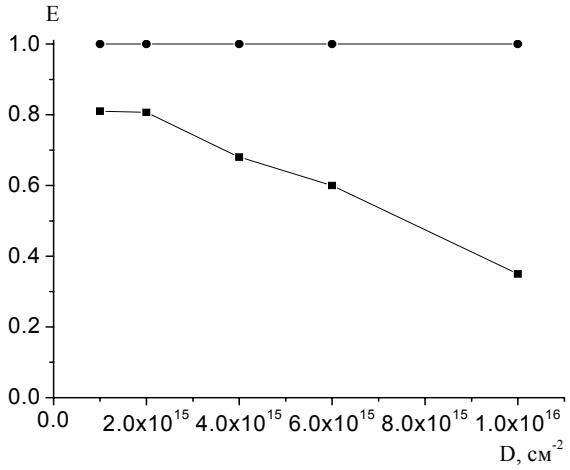


Рис. 6. Залежність значення фактора аморфізації E в області максимальної деформації від дози. ($E=e^{-W}=1$ $(W=0)$ – ідеальний кристал, $E=e^{-W}=0$ $(W=\infty)$ – аморфна речовина).

Починаючи від дози $D = 2\cdot10^{15}$см$^{-2}$ значення фактора аморфізації спадає, тобто зростає розупорядкування кристалічної структури, що проявляється в порушенні зв'язків між атомами та у зменшенні мікротвердості (рис. 2).

Зауважимо, що зростання максимальної деформації починаючи з дози $D = 6\cdot10^{15}$см$^{-2}$ дещо відхиляється від лінійного (рис. 5), що свідчить про початок взаємодії дефектів між собою з наступним зв'язуванням їх у комплекси. Вказаний процес перешкоджає руху дислокацій і пластичному руйнуванню досліджуваного зразка алмазною пірамідкою, а на рис. 2 відображається в повільнішому зменшенні величини мікротвердості при $D > 6\cdot10^{15}$см$^{-2}$.

Як показано в роботі [1], при аморфізації іонно-імплантованих шарів відбуваєтьсвя зростання мікротвердості, яка, із подальшим збільшенням дози імплантації, залишається незмінною. Зростання мікротвердості при наявності аморфних областей в іонно-імплантованому шарі пов'язане з блокуванням дислокаційного механізму руйнування кристалу.

Висновки

При значеннях доз імплантованих іонів He^{+} < $2\cdot10^{15}$см$^{-2}$ зростання величини мікротвердості в ГГГ є результатом росту кількості радіаційних дефектів при незначному розупорядкуванні кристалічної структури.

Подальше зростання кількості радіаційних дефектів (в межах доз $D = 2\cdot10^{15}$см$^{-2}$ – $6\cdot10^{15}$см$^{-2}$), що супроводжується розупорядкуванням кристалічної структури монокристалу, веде до зменшення величини мікротвердості.

Взаємодія радіаційних дефектів між собою приводить до блокування дислокаційного механізму руйнування кристалів (для $D > 6\cdot10^{15}$см$^{-2}$) і проявляється в зменшенні швидкості спадання величини мікротвердості з дозою.

Яремій С.І. – аспірант кафедри матеріалознавства і новітніх технологій.

[1] В.Н. Бережанский, В.Е. Петров, Ю.Н. Коробий. Влияние ионной имплантации на микротвердость эпитаксиальных и объемных кристаллов редкоземельних гранатов. // *Письма в ЖТФ*, **16** (21), сс. 89-91 (1990).

[2] D. B. Sirdeshmukh, L. Sirdeshmukh, K. G. Subhadra at al. Systematic hardness measurements on some rare earth garnet crystals // *Bull. Mater. Sci*., **24** (5), pp. 469-473 (2001).

[3] G. Y. Chin. *Deformation of ceramic materials.* New York: Plenum (1975).

[4] Х. Риссел, И.Руге. *Ионная имплантация*. Наука, М. 320 с. (1983).

[5] Микротвердомер ПМТ-3. Инструкция по эксплуатации. / Ленинградское оптико-механическое объединение. (1972).

[6] G. Balestrino, S. Lagomarsino, E. Milani at al. Reconstruction mechanism in ion implanted yttrium iron garnet films. // *J. Appl. Phys*., **63** (8), pp. 2751-2755 (1988).

[7] В.И. Кравец, Б.К. Остафийчук, С.И. Олиховский и др. Определение профиля деформации в ионно-имплантированных монокристаллах со структурой граната. // *Металлофизика и новейшие технологии*, **13** (2), сс. 81-87 (1991).

[8] І.П. Яремій. Рентгенодифрактометричне дослідження приповерхневих шарів монокристалічних плівок ЗІГ, імплантованих іонами B^{+} // *Фізика і хімія твердого тіла*, **4** (3), сс. 451-455 (2003).

S.I. Yaremiy

The Influence of Ion Implantation on Microhardness of GGG Monocrystals

Precarpathion University named after V. Stefanyk, 57, Shevchenko Str., Ivano-Frankivsk, 76000, Ukraine
e-mail: sofiya.yaremiy@rambler.ru, phone: +(03422) 59-60-75

The dynamics of microhardness change of GGG monocrystals implanted by He^+ ions is explored in work. The mechanism of change of microhardness size is offered accordingly realized design of ionic implantation process and X-ray diffraction research of surface layers of ion-implanted GGG monocrystals. It is shown, that insignificant amount of defects in ion-implanted layer results in increasing of microhardness size of monocrystals.