

PACS numbers: 61.05.cp, 61.72.Dd, 61.72.J-, 61.72.uj, 61.80.Jh, 61.82.Fk, 68.55.Ln

Структурні зміни в імплантованих іонами He^+ монокристалах ГГГ в процесі природного старіння

Б. К. Остафійчук, І. П. Яремій, С. І. Яремій, В. Д. Федорів,
М. М. Уманців, У. О. Томин, О. С. Скакунова

*Прикарпатський національний університет ім. Василя Стефаника,
кафедра матеріалознавства і новітніх технологій,
вул. Шевченка, 57,
76018 Івано-Франківськ, Україна*
**Інститут металлофизики ім. Г. В. Курдюмова НАН України,
бульв. Акад. Вернадського, 36,
03680, МСП, Київ-142, Україна*

На основі результатів Х-променевого структурного аналізу вивчено зміни кристалічної структури, які відбувалися впродовж 4 років у приповерхневих шарах монокристалів ГГГ, імплантованих іонами He^+ . Виявлено, що значення відносної максимальної деформації приповерхневих шарів майже для всіх доз опромінення зростало впродовж перших 38 місяців дослідження, а далі — зменшувалося. Для дози 10^{16} см^{-2} зростання відбувалося протягом всього досліджуваного інтервалу часу. Визначено основні типи радіаційних дефектів, що формуються в приповерхневих шарах монокристалів ГГГ після імплантації, та досліджено зміну їхніх параметрів з часом у процесі їхнього природного старіння. Пояснено причини виявлених змін.

На основании результатов рентгеноструктурного анализа изучены изменения кристаллической структуры, которые происходили на протяжении 4 лет в приповерхностных слоях монокристаллов ГГГ, имплантированных ионами He^+ . Обнаружено, что значение относительной максимальной деформации приповерхностных слоёв почти для всех доз облучения росло в течение первых 38 месяцев исследования, а позже — уменьшалось. Для дозы 10^{16} см^{-2} возрастание происходило в течение всего исследуемого интервала времени. Определены основные типы радиационных дефектов, формирующихся в приповерхностных слоях монокристаллов ГГГ после имплантации, и исследовано изменение их параметров со временем в процессе их естественного старения. Дано объяснение причины обнаруженных изменений.

The changes in the crystal structure of the subsurface layers of GGG single crystals implanted with He^+ ions, which took place during four years, are

studied, using the results of X-ray analysis. As found, the value of the maximum relative deformation of subsurface layers for almost all doses of radiation is increasing during the first 38 months of investigation, and then it is decreasing. For the dose of 10^{16} cm^{-2} , the growth takes place during the whole time interval of a study. The main types of defects formed in the subsurface layers of GGG single crystals after their implantation are determined, and the change of their parameters with time caused by the natural ageing is investigated. The explanation of the causes of observed changes is presented.

Ключові слова: радіаційні дефекти, відносна максимальна деформація, природне старіння, X-променевий структурний аналіз.

(Отримано 12 квітня 2013 р.; остаточн. варіант — 18 жовтня 2012 р.)

1. ВСТУП

Розроблення довговічних і надійних приладів, виготовлених на основі модифікованих іонною імплантацією монокристалів та епітаксійних гетероструктур, має важливе значення для радіоелектроніки. Серед магнітних матеріалів, модифікацію поверхні яких виконують шляхом іонної імплантації, одне з провідних місць займають матеріали із структурою гранату [1]. Унікальність даних матеріалів пов'язана з особливостями як їх кристалічної структури (наявністю неповністю заповнених окта- тетра- та додекаедричних порожнин, в яких у широкому діапазоні допускається заміщення магнітними чи немагнітними іонами і, відповідно, утворення однієї, двох чи трьох магнітних підґратниць), так і наявністю в них трьох взаємозв'язаних високочастотних коливальних підсистем: електромагнітної, магнітної та пружної.

Монокристали гадоліній-галієвого гранату (ГГГ, $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$) широко використовуються як матеріал оптоелектронної техніки (хвилеводи, люмінофори для світлодіодів), так і в якості підкладок для ферит-гранатових плівок, які застосовуються в НВЧ-техніці, магнітооптиці, сенсорах магнітних полів [2, 3]. Іонна імплантація монокристалів ГГГ може бути використана для зміни оптичних властивостей приповерхневого шару (в тому числі і зміни показника заломлення), тобто може бути використана для створення оптичних хвилеводів [4]. Також монокристали ГГГ є зручними модельними зразками зі складним базисом для дослідження розподілу структурних дефектів (ростових, наведених післяростовим обробленням) в об'ємі та приповерхневих шарах монокристалів.

Зміна з часом фізичних властивостей характерна для всіх матеріалів, в тому числі і таких радіаційно стійких як ферит-гранати, а перебудова та міграція дефектів кристалічної ґратниці в процесі експлуатації — основні фактори, що призводять до змін експлуатаційних характеристик пристроїв з імплантованими епітаксійними

ферит-гранатовими плівками. Тому важливим є вивчення часової стабільності структурних параметрів модифікованого шару, встановлення закономірностей перебудови його кристалічної структури в процесі старіння при кімнатних температурах та прогнозування їх поведінки в процесі експлуатації.

Метою даної роботи було дослідження часової стабільності структурних параметрів імплантованих іонами He^+ приповерхневих шарів монокристалів ГТГ та встановлення закономірностей перебудови їх кристалічної структури в процесі старіння при кімнатних температурах.

2. ОБ'ЄКТИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Зміни параметрів кристалічної структури приповерхневих порушених шарів вивчалися на вирощених методом Чохральського пластинках монокристалів ГТГ (площина зрізу (111)). Після ростового оброблення містило механічне шліфування, механічне, хіміко-механічне та хімічне полірування; поверхня підкладок відповідала 14 класу шорсткості. Імплантація іонів He^+ виконувалася з енергією $E = 100$ кеВ в інтервалі доз (D) 10^{15} см^{-2} – 10^{16} см^{-2} у режимі, що виключає каналювання.

Дослідження кристалічної структури неімплантованих монокристалів ГТГ та іонно-імплантованих приповерхневих шарів монокристалів ГТГ виконувалося методами дво- та трикристальної X-променевої дифрактометрії на установках ДРОН-3 та високороздільному трикристальному дифрактометрі «X'Pert PRO MRD XL» у бездисперсійній схемі з використанням $\text{CuK}_{\alpha 1}$ -випромінювання.

Експериментальні криві дифракційного відбивання (КДВ), одержані від імплантованих монокристалів ГТГ, моделювалися із використанням узагальненої динамічної теорії розсіювання X-променів [5–8], яка дає можливість враховувати наявність у кристалічній структурі дефектів різних типів.

Зважаючи на те, що розподіл згенерованих при іонній імплантації радіаційних дефектів є сильно неоднорідним, при моделюванні концентрація та радіус дефектів у приповерхневому порушеному шарі задавалися пропорційними профілю відносної деформації. Виходячи з такого задання, найбільш чутливою до дефектів є область останньої осциляції додаткової осциляційної структури КДВ, тобто область, яка відповідає максимальній деформації.

3. ПЕРЕРОЗПОДІЛ ДЕФОРМАЦІЇ В ІОННО-ІМПЛАНТОВАНОМУ ШАРІ В ПРОЦЕСІ ПРИРОДНОГО СТАРІННЯ

З часом параметри порушених шарів зазнають змін, які можна про-

слідкувати вже за одержаними через певні проміжки часу експериментальними КДВ. В першу чергу це виявляється в області «хвостів» додаткової осциляційної структури.

З вигляду експериментальних КДВ (рис. 1) видно, що величина відносної максимальної деформації в приповерхневому порушеному шарі зазнала дещо несподіваних змін: замість очікуваного монотонного спадання з часом вона спочатку протягом деякого часу зростала, і тільки потім почала зменшуватися. Тому процес перебудови структури приповерхневого порушеного шару можна розділити на два етапи: I етап — максимальна деформація в порушеному шарі зростала (до 38 місяців для доз $\leq 6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$), II етап — максимальна деформація в порушеному шарі спадала (після 38 місяців).

Розрахунок профілів відносної деформації здійснювався в припущенні його пропорційності профілю радіаційних дефектів (справедливо при низьких дозах опромінення), який, в свою чергу, можна представити сумою двох складових [9]. Перша складова формується внаслідок ядерних енергетичних втрат (описується асиметричною Гаусіаною), а друга — за рахунок електронних енергетичних втрат (описується спадною Гаусіаною). Тому, профіль відносної деформації в імплантованих іонами He^+ приповерхневих шарах монокристалів ГГГ задавався у вигляді суми асиметричної та спадної Гаусіан. Приклад профілю деформації та експериментальних і теоретичних КДВ для дози $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ наведено на рис. 2. Складова

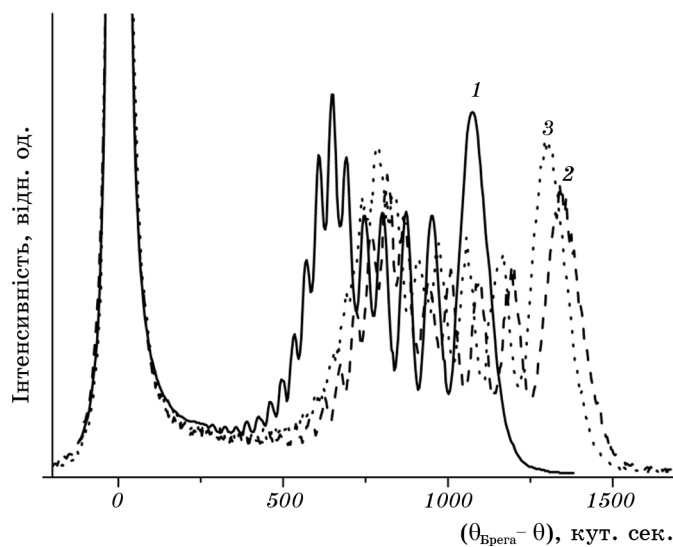


Рис. 1. Експериментальні КДВ (444), одержані від імплантованих іонами He^+ монокристалів ГГГ ($E = 100 \text{ кеВ}$, $D = 4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$) на різних етапах старіння: 1 — 4 місяці після імплантації, 2 — 38 місяців, 3 — 50 місяців.

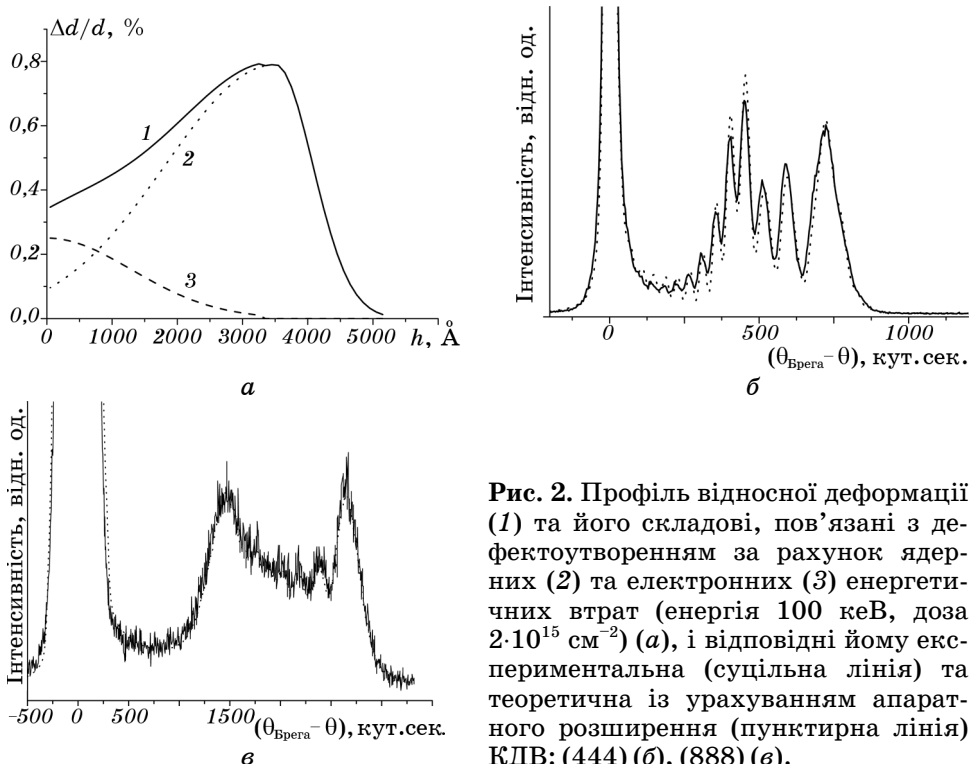


Рис. 2. Профіль відносної деформації (1) та його складові, пов'язані з дефектоутворенням за рахунок ядерних (2) та електронних (3) енергетичних втрат (енергія 100 кеВ, доза $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$) (а), і відповідні йому експериментальна (суцільна лінія) та теоретична із урахуванням апаратного розширення (пунктирна лінія) КДВ: (444) (б), (888) (в).

профілю, пов'язана з дефектоутворенням за рахунок ядерних енергетичних втрат, добре корелює із обчисленим за допомогою програми SRIM-2010 профілем дефектів.

Розраховані із одержаних через різний час після іонної імплантації експериментальних КДВ профілі відносної деформації зображено на рис. 3. Визначені профілі є практично однотипними, однак низка їхніх параметрів (величина та положення максимуму деформації, деформація на поверхні, максимальна глибина) змінюються немонотонно. Тому розглянемо зміну кожного з параметрів детальніше.

Залежність значення максимальної деформації та деформації на поверхні від часу наведено на рис. 4. Як бачимо, для доз $\leq 6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ максимальна відносна деформація протягом 38 місяців зростала (I етап старіння), а потім почала зменшуватися (II етап старіння). При $D = 10^{16} \text{ см}^{-2}$ ріст максимальної деформації повільніший, однак, на відміну від нижчих доз опромінення, він не завершується за час 50 місяців, тобто для даної дози I етап старіння триває впродовж усього часу дослідження.

Товщина порушеного шару в монокристалах ГТТ для всіх досліджуваних доз опромінення на першому етапі старіння дещо змен-

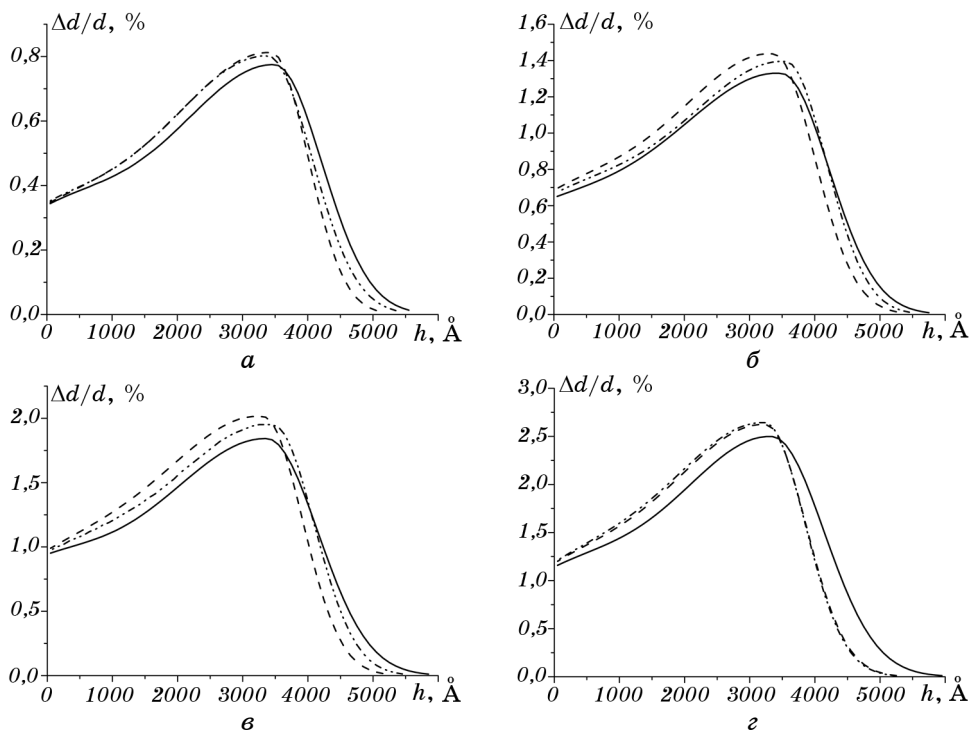


Рис. 3. Профілі відносної деформації приповерхневих шарів монокристалів ГГГ імплантованих іонами He^+ з енергією 100 кеВ та дозами: $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ (а), $4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ (б), $6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ (в), 10^{16} см^{-2} (г) через 4 (—), 38 (---) та 50 (— · —) місяців після імплантації.

шується, а на другому — незначно зростає. Виняток становить зразок, імплантований дозою 10^{16} см^{-2} , для якого вказане зростання впродовж часу дослідження не спостерігалось (рис. 5, а). Це, очевидно, пов'язано з особливостями процесів, які відбуваються при даній дозі в порушеному шарі, і підтверджує продовження для даної дози I етапу старіння. Подібних змін з часом зазнає і положення максимально деформованого шару (параметр R_p), яке на першому етапі старіння незначно зміщується до поверхні, а на другому — в глибину (рис. 5, б). Із ростом дози опромінення в кожен з досліджуваних моментів часу положення максимальної деформації зміщується до поверхні.

Зміщення положення максимальної деформації в глибину при зменшенні величини самої максимальної деформації спостерігалось нами при відпалі імплантованих іонами V^+ плівок залізоітрієвого гранату (ЗІГ). Описані при цьому зміни в процесі відпалу, очевидно, є аналогічними до змін, які відбуваються в імплантованих іонами He^+ монокристалах ГГГ на II етапі старіння. Зважаючи

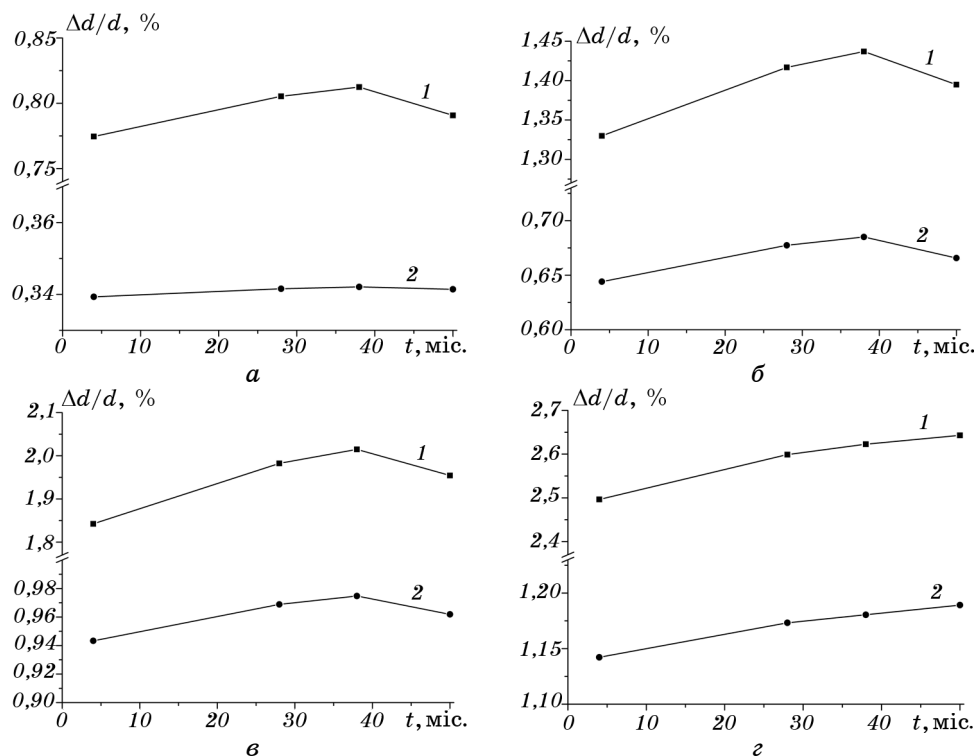


Рис. 4. Залежність від часу величини відносної максимальної деформації (1) та величини відносної деформації на поверхні (2) в імплантованих іонами He^+ монокристалах ГТГ для доз: $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ (а), $4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ (б), $6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ (в), 10^{16} см^{-2} (г).

на те, що мінімальна температура відпалу була 250°C , то I етап (якщо він мав місце) міг бути не зафіксованим експериментально.

4. ЕВОЛЮЦІЯ РАДІАЦІЙНИХ ДЕФЕКТІВ У ПРОЦЕСІ ПРИРОДНОГО СТАРІННЯ

Зважаючи на те, що при ω -скануванні з широкою щілиною перед лічильником у всій області додаткової осциляційної структури КДВ фіксується як когерентне, так і дифузне розсіяння від приповерхневого порушеного шару, для аналізу використовувалася частина КДВ, яка розміщена за додатковою осциляційною структурою і в якій внесок когерентної складової не перевищує 5%. При визначенні параметрів дефектів із дифузної складової виявилось, що хорошому збігу теоретичних та експериментальних КДВ для відбивання (444) в області за додатковою осциляційною структурою мо-

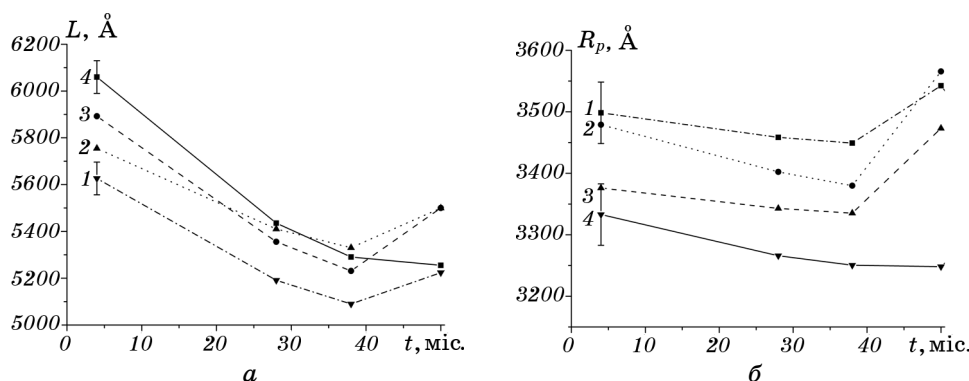


Рис. 5. Залежність товщини порушеного шару (а) та положення максимальної деформації (б) від часу в імплантованих іонами He^+ монокристалах ГПГ для доз: $2 \cdot 10^{15} \text{см}^{-2}$ (1), $4 \cdot 10^{15} \text{см}^{-2}$ (2), $6 \cdot 10^{15} \text{см}^{-2}$ (3), 10^{16}см^{-2} (4).

жуть відповідати низка наборів значень радіусів та концентрацій петель. Інтервали за радіусами і концентраціями петель, в яких спостерігається хороше наближення, обмежувалися середнім кутом нахилу експериментальних КДВ за межами додаткової осциляційної структури.

Зважаючи на те, що обчислені значення статичних факторів ($E = e^{-W}$) для вказаних інтервалів концентрацій і радіусів дислокаційних петель $\approx 0,92-0,98$, то на зменшенні інтенсивності когерентних складових КДВ наявність дефектів суттєво не позначиться. Розрахована дифузна складова у всьому інтервалі доз також є малоінтенсивною, і тому однозначне визначення радіусів R і концентрацій n дефектів тільки з відбивання (444) є практично неможливим.

Графічне представлення вказаних параметрів як $n(R)$ у логарифмічному масштабі для різних доз опромінення дають прямі лінії на рис. 6. Із ростом дози опромінення вказані лінії зміщуються в область більших значень показників статичного фактора Дебая–Валлера W , що пов'язано із ростом розупорядкування порушеного шару.

Як видно з цих рисунків, для доз $\leq 6 \cdot 10^{15} \text{см}^{-2}$ на I етапі старіння відбувається зміщення одержаних ліній вправо (область більших значень показника статичного фактора Дебая–Валлера), що є наслідком більш інтенсивного дифузного розсіяння в область додаткової осциляційної структури. На II етапі старіння значення показника фактора Дебая–Валлера зменшується. За дози 10^{16}см^{-2} зміщення ліній $n(R)$ відбувається впродовж всього досліджуваного інтервалу часу, що корелює з ростом максимальної деформації.

Для одержання детальнішої інформації про дефектну структуру іонно-імплантованого шару було виконано додаткові X-променеві дифрактометричні дослідження і одержано експериментальні КДВ

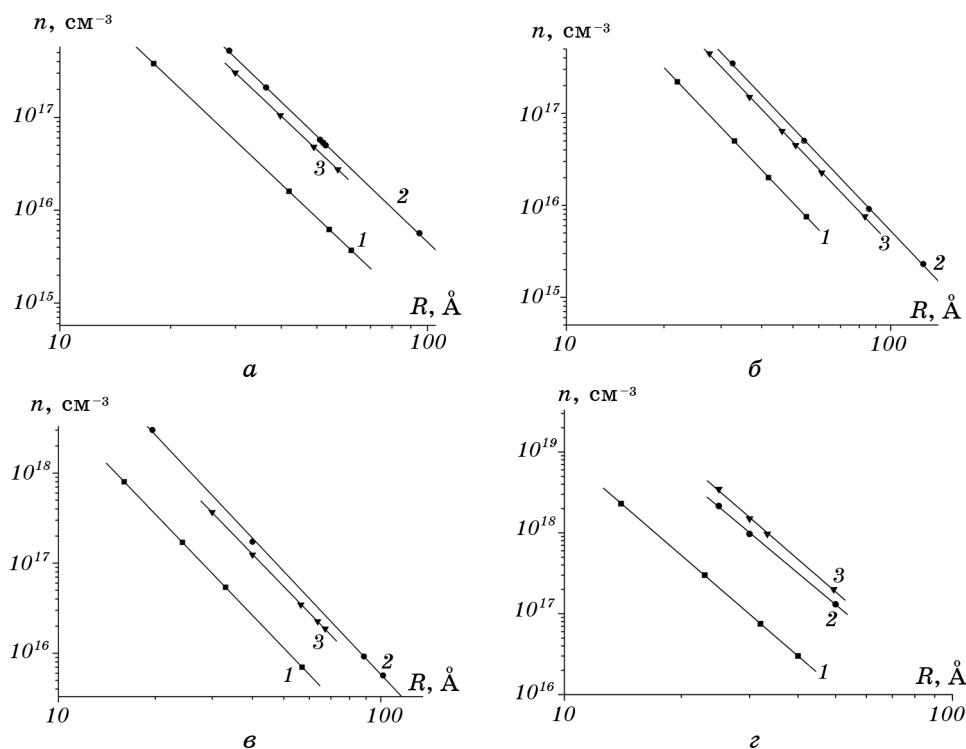


Рис. 6. Залежність концентрації дислокаційних петель у максимально деформованому шарі від їх радіуса при різних дозах імплантації: $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ (а), $4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ (б), $6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ (в), 10^{16} см^{-2} (г) (1 — 4 місяці, 2 — 38 місяців, 3 — 50 місяців після імплантації).

від сім'ї площин (888) із використанням ω - та $\omega/2\theta$ -сканування, що надало можливість оцінити внесок дифузної компоненти в загальну КДВ.

Для відбивання (888) величина статичного фактора E дорівнює $\cong 0,6-0,8$, що призводить до значного (в порівнянні з відбиванням (444)) зменшення інтенсивності когерентної складової та зростання інтенсивності дифузної складової. Зважаючи на те, що при іонній імплантації розподіл точкових дефектів сильно нерівномірний, а ймовірність їх об'єднання в складні дефекти суттєво залежить від концентрації точкових дефектів, при розрахунках вважалося, що концентрація дислокаційних петель пропорційна профілям деформації. При цьому, вплив дефектів особливо помітний на інтенсивності останньої осциляції, яка відповідає максимальній деформації і для якої E є найменшим. Таким чином, із зйомки (888) за інтенсивністю когерентної складової додаткової осциляційної структури, а особливо останньої осциляції, можна уточнити значення парамет-

рів n і R дислокаційних петель.

Радіуси та концентрації дислокаційних петель для різних доз імплантації, обчислені через 4 місяці після імплантації вище описаним способом, наведено на рис. 7.

Як бачимо, радіуси дислокаційних петель із ростом дози опромінення монокристалів ГТТ іонами He^+ зменшуються (рис. 7, б) при зростанні їх концентрації, що призводить до зростання величини статичного фактора Дебая–Валлера та інтенсивності дифузного розсіювання.

При розрахунку радіусів і концентрації дефектів за узагальненою динамічною теорією вважалося, що для даної дози концентрація дефектів (дислокаційних петель) у процесі природного старіння не змінюється, а змінюються тільки їх розміри за рахунок приєднання чи від'єднання атомів. Повне зникнення дислокаційної петлі при кімнатній температурі, очевидно, буде неможливим. Зміна з часом розмірів петель в максимально деформованому шарі для різних доз представлена на рис. 8.

Як бачимо, величина радіуса дислокаційних петель в максимально деформованому шарі з часом корелює із величиною максимальної деформації. Це вказує на те, що основні зміни в кристалічній структурі відбуваються в максимально деформованому шарі. При дозі опромінення 10^{16} см^{-2} радіус дислокаційних петель у максимально деформованому шарі зростає на протязі всього досліджуваного часового інтервалу, що також корелює з величиною максимальної відносної деформації.

Пояснення вказаних змін у шарі монокристала ГТТ згідно з сучасними уявленнями про процес імплантації іонів у кристали є наступним. Радіаційні дефекти одразу ж після виникнення мігрують,

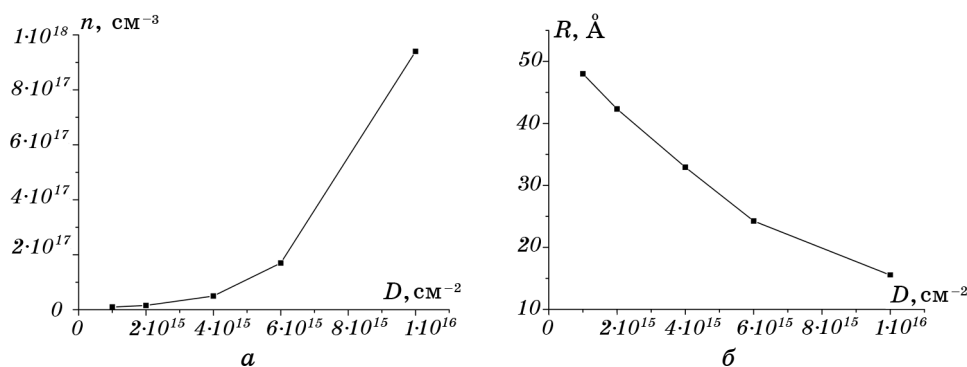


Рис. 7. Залежність концентрації (а) та радіусів дислокаційних петель (б) у максимально деформованому шарі монокристалів ГТТ, одержана через 4 місяці після імплантації іонами He^+ з енергією $E = 100 \text{ кеВ}$, від величини дози іонної імплантації.

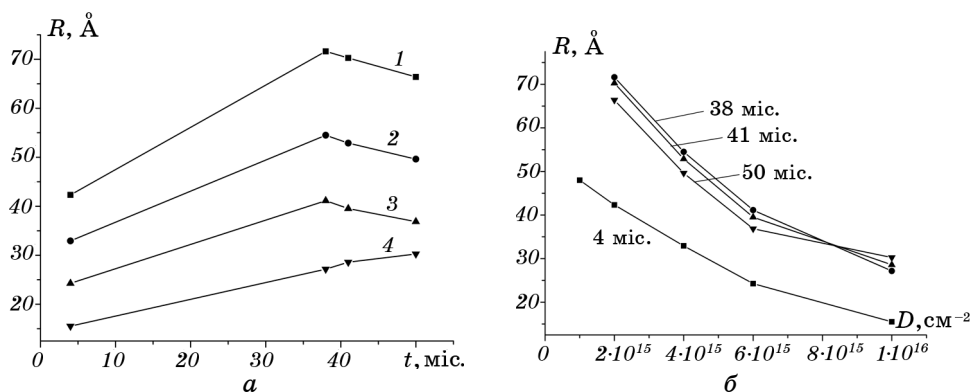


Рис. 8. Зміна з часом радіусів дислокаційних петель у максимально деформованому шарі (а) (1 — $D = 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$, 2 — $D = 4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$, 3 — $D = 6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$, 4 — $D = 10^{16} \text{ см}^{-2}$) та залежність радіуса дислокаційних петель у максимально деформованому шарі від величини дози імплантації через різні проміжки часу після імплантації (а).

анігілюють одні з одними, утворюють комплекси різного типу або залишаються одиничними і стійкими. Комплекси міжвузловинних атомів переходять у дислокаційні петлі міжвузловинного типу, а вакансійні кластери — в дислокаційні петлі або вакансійні пори [10]. Виходячи з того, що енергія міграції міжвузловинних атомів менша за енергію міграції вакансій, за час остигання утворений в каскаді міжвузловинний атом може віддалитися від місця свого утворення на більшу відстань, ніж вакансія [11].

На I етапі старіння міжвузловинні атоми в іонно-імплантованому шарі, як такі, що призводять до зростання міжплощинної відстані, дифундують в область кристала із більшою величиною деформації. При цьому їх потік з області кристала з більшим середнім значенням градієнта деформації є інтенсивнішим. Ріст кількості міжвузловинних атомів у максимально деформованому шарі призводить до зростання величини відносної максимальної деформації, а зміщення положення максимальної деформації до поверхні в модифікованих іонною імплантацією монокристалах ГГГ пояснюється більш інтенсивним утворенням дислокаційних петель міжвузловинного типу в області максимальної деформації зі сторони кристала з більшим значенням градієнта деформації.

Таким чином, на I етапі старіння приплив міжвузловинних атомів у область максимально деформованого шару монокристала ГГГ переважає над процесом їх зникнення внаслідок приєднання до дислокаційних петель.

На II етапі старіння, на відміну від I, очевидно, переважає процес зникнення точкових дефектів, що спричиняє пониження значення

максимальної деформації. При цьому деяка кількість вакансій анігілює із міжвузловинними атомами, а решта — на дислокаційних петлях міжвузловинного типу. Зміщення положення максимально деформованого шару вглиб кристала пояснюється дифузією атомів гелію в область кристала з більшою величиною деформації та блокуванням їх руху в цій області через накопичення атомів гелію біля дислокаційних петель та утворення домішкових атмосфер типу Коттрелла.

5. ВИСНОВКИ

1. Основними типами радіаційних дефектів, які утворюються в приповерхневих шарах монокристалів ГГГ при імплантації іонами He^+ є точкові дефекти та дислокаційні петлі з середніми розмірами 30–70 Å. Із збільшенням дози імплантації концентрація дислокаційних петель зростає, а їхній радіус зменшується.

2. Процес перебудови структури приповерхневого порушеного шару з часом можна розділити на два етапи (для доз $\leq 6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$): I етап — до 38 місяців, II етап — після 38 місяців. При $D = 10^{16} \text{ см}^{-2}$ I етап старіння триває більше 50 місяців.

3. На першому етапі старіння при кімнатній температурі відбувається зміщення профілю деформації до поверхні при зростанні величини максимальної деформації, а на другому етапі — зміщення профілю деформації в глибину із зменшенням величини максимальної деформації.

4. У процесі природного старіння за рахунок приєднання чи від'єднання атомів змінюються розміри дислокаційних петель: на I етапі радіуси дислокаційних петель у максимально деформованому шарі зростають, а на II — зменшуються.

5. Аналіз зміни профілів відносної деформації та радіусів і концентрацій дислокаційних петель з часом надали можливість встановити, що: — на I етапі старіння приплив міжвузловинних атомів в область максимально деформованого шару монокристала ГГГ переважає над процесом їх релаксації внаслідок приєднання до дислокаційних петель;

— на II етапі старіння переважає релаксація точкових дефектів; при цьому частина вакансій анігілює із міжвузловинними атомами, а решта — на дислокаційних петлях міжвузловинного типу.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. L. M. Letyuk, *Tekhnologiya Ferritovykh Materialov Magnitoelektroniki* (Technology of Ferrite Materials of Magneto-electronics) (Moscow: MISiS: 2005) (in Russian).
2. I. M. Syvorotka, S. B. Ubizskii, M. Kucera, M. Kuhn, and Z. Vertesy, *J. Phys. D*, **34**: 1178 (2001).

3. V. V. Radoshkin and A. Ya. Chervonenkis, *Prikladnaya Magnitooptika* (Applied Magneto-optics) (Moscow: Energoatomizdat: 1990) (in Russian).
4. L. Kaladzedze, *IEEE Trans. Magn.*, **44**, No. 11: 3293 (2008).
5. V. B. Molodkin, S. I. Olikhovskii, E. N. Kislovskii, E. G. Len, and E. V. Pervak, *physica status solidi (b)*, **227**, No. 2: 429 (2001).
6. S. I. Olikhovskii, V. B. Molodkin, E. N. Kislovskii, E. G. Len, and E. V. Pervak, *physica status solidi (b)*, **231**, No. 1: 199 (2002).
7. V. B. Molodkin, A. P. Shpak, M. V. Koval'chuk, V. F. Machulin, and V. L. Nosik, *Physics—Uspekhi*, **54**, No. 7: 661 (2011).
8. S. I. Olikhovskii, V. B. Molodkin, E. N. Kislovskiy, E. G. Len, T. P. Vladimirova, O. S. Skakunova, and B. K. Ostafiychuk, *Metallofizika*, **27**, No. 5: 653 (2005) (in Russian).
9. B. K. Ostafiychuk, V. D. Fedoriv, I. P. Yaremiy, O. Z. Garpul, V. V. Kurovets, and I. C. Yaremiy, *physica status solidi (a)*, **208**, No. 9: 2108 (2011).
10. V. S. Vavilov and A. R. Chelyadinskiy, *Physics—Uspekhi*, **38**, No. 3: 333 (1995).
11. I. A. Sluchinskaya, *Osnovy Materialovedeniya i Tekhnologii Poluprovodnikov* (Fundamentals of Materials Science and Semiconductor Technology) (Moscow: Mir: 2002) (in Russian).