

ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРНОЇ НЕОДНОРІДНОСТІ ПРИПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ ПЛІВОК ЗАЛІЗО-ІТРІЄВОГО ГРАНАТУ ШЛЯХОМ ІМПЛАНТАЦІЇ ІОНІВ Si⁺

Б.К. Остафійчук, О.З. Гарпуль, В.М. Пилипів, І.П. Яремій, В.В. Куровець

*Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника (Івано-Франківськ)
Україна*

Надійшла до редакції 10.05.2011

Представлено результати досліджень приповерхневих шарів плівок ЗІГ, імплантованих іонами Si⁺ дозою $5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ в діапазоні енергій 100 – 150 кеВ. Математичне моделювання процесу іонної імплантації показало, що утворення пар Френкеля та дефектів більш складного типу є рівномірним. Теоретично розраховано профіль концентрації радіаційних дефектів, який в основному формується дефектами, утвореними внаслідок пружних взаємодій іона-імплантата з атомами мішені. Експериментально встановлено, що імплантація іонів Si⁺ у плівки ЗІГ призводить до утворення в приповерхневому шарі монотонно-спадних профілів відносної деформації.

Ключові слова: ферит-гранатові плівки, іонна імплантація, крива дифракційного відбивання, профіль відносної деформації.

Представлены результаты исследований приповерхностных слоев пленок ЗИГ, имплантированных ионами Si⁺ дозой $5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ в диапазоне энергий 100 – 150 кэВ. Математическое моделирование процесса ионной имплантации показало, что образование пар Френкеля и дефектов более сложного типа является равновероятным. Теоретически рассчитано профиль концентрации радиационных дефектов, который в основном формируется дефектами, образовавшимися в результате упругих взаимодействий иона-имплантата с атомами мишени. Экспериментально установлено, что имплантация ионов Si⁺ в пленки ЗИГ приводит к образованию в приповерхностном слое монотонно-нисходящих профилей относительной деформации.

Ключевые слова: феррит-гранатовые пленки, ионная имплантация, кривая дифракционного отражения, профиль относительной деформации.

The results of studies of near-surface layers of YIG films, ion implanted Si⁺, dose of $5 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ in the energy range 100 – 150 keV. Mathematical modeling of ion implantation showed that the formation of Frenkel pairs of defects and more complex types are equally likely. The concentration profile of radiation defects, which mainly formed defects formed as a result of elastic ion-implant interactions with atoms of the target was calculated. Experimentally determined that the implantation of Si⁺ ions in YIG films leads to the formation in the subsurface layer monotonically-decreasing relative strain profiles.

Keywords: ferrite-garnet films, ion implantation, reflection curve, the relative strain profile.

ВСТУП

Серед широкого спектру магнітних матеріалів у вигляді епітаксійних плівок, що використовуються в мікроелектроніці, одне з провідних місць займають матеріали зі структурою гранату, основними сферами застосування яких є надвисокочастотні пристрої, прикладна магнітооптика, засоби магнітного запису та зчитування інформації [1]. Модифікація поверхневих шарів ферит-гранатових плівок (ФГП) шляхом іонної імплантації призводить до ряду суттєвих змін в їхніх характеристиках, внаслідок чого виникає можливість ефективного перетворення імпульс-

ного НВЧ-сигналу в біжучі спінові хвилі та генерації хвиль із набагато меншими довжиною та втратами, а також застосовується для усунення жорстких магнітних доменів. У зв'язку з цим встановлення фізичних закономірностей трансформації кристалічної ґратки епітаксійних ФГП внаслідок іонної імплантації при різних режимах є актуальною науковою проблемою.

Процес іонного бомбардування супроводжується внесенням у приповерхневий шар плівки великої кількості радіаційних дефектів (вакансій, міжвузельних атомів, їх скупчень) [2], які викликають в ній появу пружних на-

пруг та призводять до локальних змін властивостей матеріалу, тобто до утворення пружно-деформованого приповерхневого шару [3].

ОБ'ЄКТИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Об'єктами нашого дослідження були імплантовані іонами Si^+ монокристалічні плівки залізо-ітрієвого гранату (ЗІГ) $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$, вирощені методом рідкофазної епітаксії на підкладках гадоліній-галієвого гранату (ГІГ) $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ із кристалографічною площиною зрізу (111). Імплантація проводилася на прискорювачі МРВ-202 в умовах, що виключають каналування та самовідпал.

Метою досліджень було вивчення змін у кристалічній структурі приповерхневих шарів плівок ЗІГ, спричинених імплантацією іонів Si^+ з різною енергією в діапазоні 100 – 150 кеВ та дозою $D = 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$.

Для дослідження приповерхневих шарів плівок ЗІГ використано метод двокристалічної Х-променевої дифрактометрії, який реалізувався у бездисперсійній схемі в геометрії Брега на установці ДРОН-2.0 у $\text{CuK}_{\alpha 1}$ випромінюванні (монокроматором слугував монокристал ГІГ із площиною зрізу (111)). Із експериментальних кривих дифракційного відбивання (КДВ) розраховано профілі відносної деформації $\Delta d/d(h)$ приповерхневого шару імплантованих іонами Si^+ плівок ЗІГ, шляхом моделювання взаємодії Х-променів із неідеальним монокристалом засобами динамічної теорії розсіяння у формі рівнянь Такагі. Моделювання процесу іонної імплантації здійснено за допомогою програми SRIM-2008.

ОСОБЛИВОСТІ ПРОЦЕСУ ДЕФЕКТОУТВОРЕННЯ ПРИ ІМПЛАНТАЦІЇ ПЛІВОК ЗІГ ІОНАМИ Si^+

Для визначення вигляду функції, якою буде задаватися профіль відносної деформації $\Delta d/d(h)$ приповерхневого шару плівок ЗІГ, імплантованих іонами Si^+ , розглянемо механізм руху імплантованої частинки в монокристалі детальніше.

Високоенергетичний іон у процесі гальмування в кристалі втрачає свою енергію внаслідок пружних зіткнень із зарядженими ядрами атомів, екранованими електронними оболонками, і непружних зіткнень, зумовле-

них збудженням та емісією електронів. Внаслідок цього існує можливість утворення дефектів як за рахунок ядерних енергетичних втрат, так і за рахунок електронних енергетичних втрат іона-імплантанта. При малих дозах опромінення обидва процеси можна вважати незалежними.

Якщо енергія, яка передається атому при пружному зіткненні, перевищує енергію зв'язку атомів у твердому тілі, то атом залишає вузол і в результаті утворюється пара Френкеля – вакансія + міжвузловий атом. Атоми, які знаходяться в поверхневому шарі, отримавши енергію бомбардуючого іона, можуть відриватися від кристалу – відбувається процес розпилення і утворюється вакансія – дефект Шоткі. Якщо енергія первинно зміщеного атома, який називають атомом віддачі, порівняно велика, то на шляху свого руху такий атом утворює цілий ряд (каскад) зміщень, внаслідок чого в кристалі виникають окремі розупорядковані зони розміром $3 \div 10 \text{ нм}$. По мірі імплантації іонів відбувається накопичення радіаційних дефектів, і коли густина вкорінених на одиницю поверхні іонів, перевищить деяке критичне значення, яке називають дозою аморфізації, утвориться суцільний аморфний шар [4]. В роботі [5] запропонована динамічна модель структури імплантованого шару, згідно якої модифікований приповерхневий шар ФІП складається з наступних підшарів: поверхневого аморфного, дефектно-деформованого кристалічного, внутрішнього аморфного та пружно-деформованого кристалічного.

В той же час, розподіл іонів за глибиною плівки визначається їх проективним пробігом R_p і середньоквадратичним розкидом проективних пробігів ΔR_p . Оскільки іони Si^+ належать до іонів середньої маси, які близькі до важких [6], то на профілі розподілу зміщених атомів за глибиною плівки буде існувати прихований максимум концентрації вкоріненої домішки.

Механізм генерації радіаційних дефектів спричинених ядерними енергетичними втратами, а також розподіл вказаних дефектів за глибиною в порушеному шарі, детально вивчений і його опис може бути проведений як шляхом теоретичних розрахунків [7], так і з

використанням комп'ютерного моделювання процесу іонної імплантації [8]. У наших дослідженнях для вивчення особливостей формування радіаційних дефектів та їх розподілу за глибиною в порушеному шарі за рахунок іонно-атомних зіткнень проводилося моделювання процесу імплантації іонів Si^+ в ЗПІ за допомогою програми SRIM-2008. При розрахунках використовувалися дані роботи [9], згідно якої порогові енергії зміщення іона з вузла ґратки для Y^{3+} , Fe^{3+} та O^{2-} в даній структурі становлять відповідно 66, 56 та 40 еВ. Розрахунки утворення каскадів атом-атомних зіткнень здійснювались у наближенні аморфної мішені, що забезпечувалось умовами імплантації.

Як видно з рис. 1, у всьому досліджуваному діапазоні початкових енергій бомбардуючого іона Si^+ (100 – 150 кеВ) в процесі гальмування у плівці ЗПІ електронні втрати співмірні з ядерними енергетичними втратами, що складають ~ 420 еВ/нм. Із збільшенням енергії проєктивний пробіг іонів-імплантантів лінійно зростає (від 90 до 130 нм).

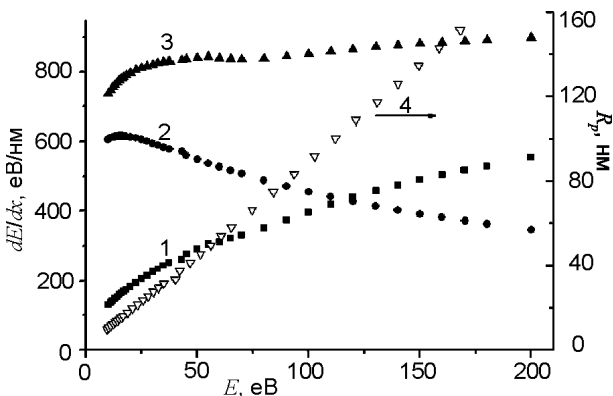


Рис. 1. Розрахункові залежності енергетичних втрат (електронні – 1, ядерні – 2, сумарні – 3) та величини середнього проєкційного пробігу (4) іона Si^+ від його початкової енергії при гальмуванні у плівці ЗПІ.

Розглянемо детальніше випадок імплантації іонів Si^+ з початковою енергією 100 кеВ. Характерний вигляд каскаду атом-атомних зіткнень бомбардуючого іона з атомами матриці зображено на рис. 2, з якого видно, що, окрім точкових дефектів, спостерігаються певні скупчення (кластери) радіаційних дефектів. Первинно вибиті атоми плівки продукують значну кількість вторинних дефектів ($\sim 88\%$ від загалу).

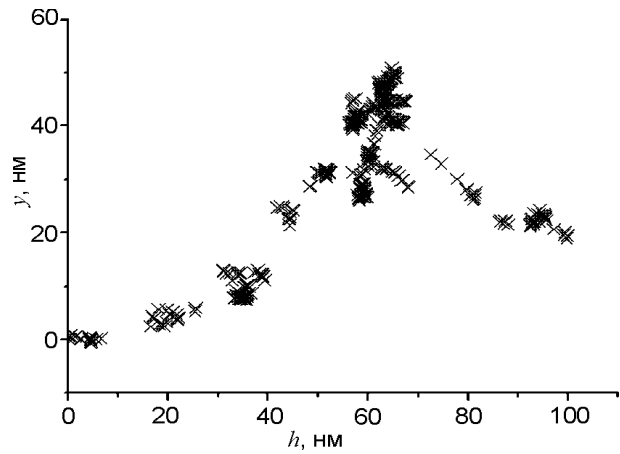


Рис. 2. Каскад атом-атомних зіткнень, викликаних входженням іона Si^+ з енергією 100 кеВ у плівку ЗПІ.

Інформацію про перебіг генерації і розвитку каскадів вторинних зіткнень для 2000 іонів-імплантантів було опрацьовано статистично. Для застосованих умов імплантації максимальну ймовірність зафіксовано для процесу генерації френкелівської пари – 44 %; для розвитку каскаду з двох атомів віддачі – 15%, трьох – 8% і т. д. (рис. 3). Ймовірність розвитку каскаду із десяти атомів віддачі і більше складає близько 16%.

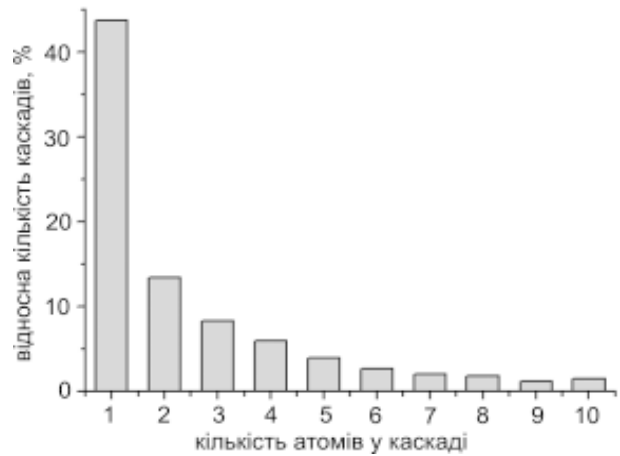


Рис. 3. Ймовірність утворення каскадів вторинних зіткнень із різною кількістю іонів.

Із розподілу ядерних енергетичних втрат іона кремнію, представленого на рис. 4, а, видно, що процеси пружного дефектоутворення простягаються на глибину до 160 нм, а максимум ядерних втрат (відповідно, і найбільший ступінь дефектоутворення) припадає на глибину 50 нм, де ймовірність утворення протяжних комплексів радіаційних дефектів є найбільшою.

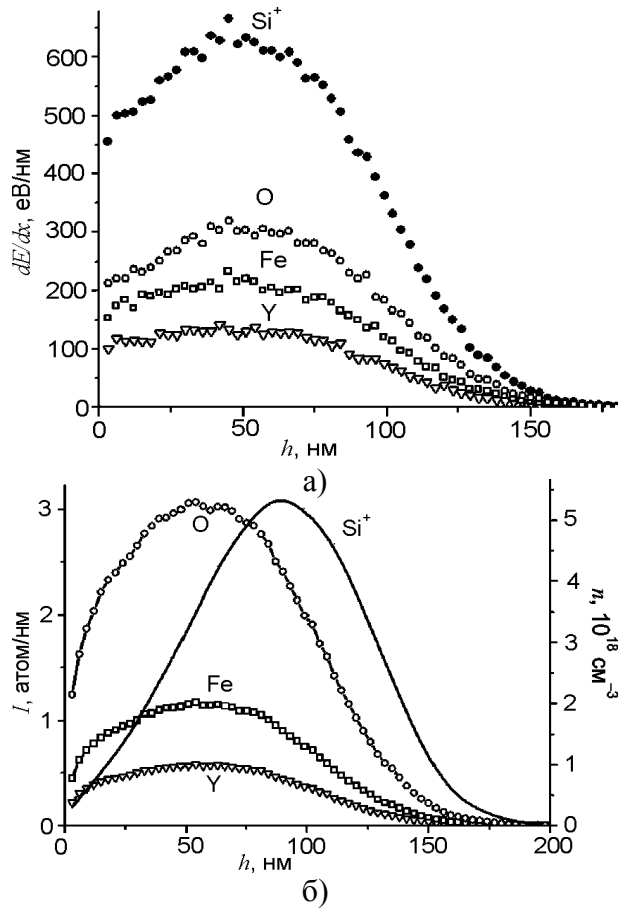


Рис. 4. Розподіли за глибиною енергії іона-імпланта Si⁺ ($E = 100$ кеВ), переданої атомами матриці при ядерному гальмуванні в плівці ЗПГ (а), і розподіли зміщених іонів матриці та імплантованих іонів (б).

Теоретично розрахований профіль імплантованих іонів для дози $5 \cdot 10^{13}$ Si⁺/см² та розподіли зміщених іонів матриці на одиниці пробігу іона-імпланта наведено на рис. 4б. Проективний пробіг іонів кремнію становить ~100 нм, максимальна глибина зупинки іонів 200 нм. Радіаційне розупорядкування найсуттєвішим є в аніонній підгратці, для якої кількість зміщених іонів досягає значення 3 атоми/нм пробігу імпланта і приблизно втри-

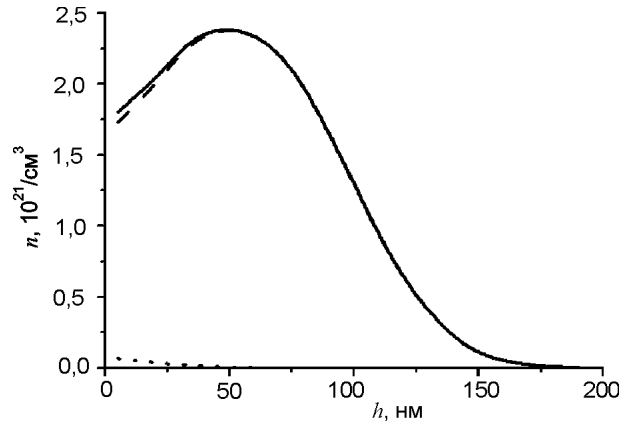


Рис. 5. Теоретично розрахований розподіл концентрації радіаційних дефектів (суцільна лінія) та його складові, пов'язані з електронними (·····) та ядерним (- - -) енергетичними втратами іонів Si⁺ ($E = 100$ кеВ, $D = 5 \cdot 10^{13}$ см⁻²) при русі у монокристалічній плівці ЗПГ.

чі перевищує аналогічний показник для підграток заліза.

Розрахунки ефективності непружного механізму виникнення дефектів за методикою [10] показали, що при бомбардуванні плівок ЗПГ іонами Si⁺ дефектоутворення за рахунок електронних енергетичних втрат є менш інтенсивним у порівнянні з дефектоутворенням за рахунок ядерних енергетичних втрат, і його можна не розглядати (рис. 5).

Результати моделювання процесу імплантації іонів Si⁺ в діапазоні енергій 100 – 150 кеВ у плівку ЗПГ представлені у табл. 1. При збільшенні початкової енергії E іона Si⁺ максимум пружного дефектоутворення (dE/dx)_{max} та глибина максимуму залягання радіаційних дефектів лінійно зростають, а максимальне значення концентрації дефектів n зменшується. Зростання початкової енергії іона імпланта призводить до зростання величини середнього проекційного пробігу R_p та товщини імплантованого шару h .

Таблиця 1

Результати моделювання процесу радіаційного дефектоутворення імплантованих іонами Si⁺ плівок ЗПГ

Початкова енергія іонів Si ⁺ E , кеВ	Проективний пробіг R_p , нм	Товщина імплантованого шару h , нм	Максимальні енергетичні втрати іона, еВ/нм	Відсоток ядерних енергетичних втрат, %	Положення максимуму енергетичних ядерних втрат (dE/dx) _{max} , нм	Максимальна концентрація дефектів n , 10^{21} /см ³	Максимальна глибина залягання радіаційних дефектів, нм
100	90	198	851	53	51	2,39	162
120	111	219	866	49	63	2,31	192
130	120	234	872	47	69	2,29	204
140	130	255	877	46	78	2,24	216
150	135	267	881	44	81	2,22	228

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Можна припустити, що при малих дозах імплантації профіль відносної деформації пропорційний профілю дефектів. Розподіл концентрації дефектів за глибиною імплантованого шару, в загальному випадку, є сумою двох складових: дефектів, утворених внаслідок релаксації електронних збуджень, та дефектів, утворених внаслідок пружних ядерних зіткнень [11]. Профіль дефектів, утворених внаслідок пружних ядерних зіткнень, пропорційний профілю енергетичних ядерних втрат, форму котрого можна задати кривою, утвореною об'єднанням двох напівгаусіан у точці R_p (асиметрична гаусіана) [12]. Як показали розрахунки концентрація дефектів, утворених внаслідок електронних енергетичних втрат, є незначною (рис. 5) і її профіль не впливає на загальний вигляд профілю радіаційно індукованих дефектів.

У зв'язку з цим, при обчисленні з експериментальних КДВ за допомогою спеціально складеного програмного забезпечення профілів відносної деформації їх вигляд задавався функцією [13]:

$$\frac{\Delta d}{d}(h) = \begin{cases} \left(\frac{\Delta d}{d}\right)_{\max} \exp\left[-\left(\frac{h-R_p}{w_1}\right)^2\right], & \text{при } h < R_p \\ \left(\frac{\Delta d}{d}\right)_{\max} \exp\left[-\left(\frac{h-R_p}{w_2}\right)^2\right], & \text{при } h \geq R_p \end{cases}$$

де h – відстань, яка відраховується від поверхні в глибину кристалу, R_p – точка об'єднання гілок гаусіан, w_1 і w_2 – параметри гаусіан, які характеризують їх ширину на піввисоті.

На КДВ, отриманих від імплантованих іонами Si^+ плівок ЗІГ (рис. 6, вставка), окрім головних брегівських піків від підкладки та непорушеної частини плівки, спостерігається чітко виражена додаткова осциляційна структура від деформованого шару. Розраховані з експериментальних КДВ профілі відносної деформації імплантованих іонами Si^+ плівок ЗІГ для дози $5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ та енергій 100 – 150 кеВ (рис. 6), є монотонно спадними, їх максимуми припадають на приповерхневий

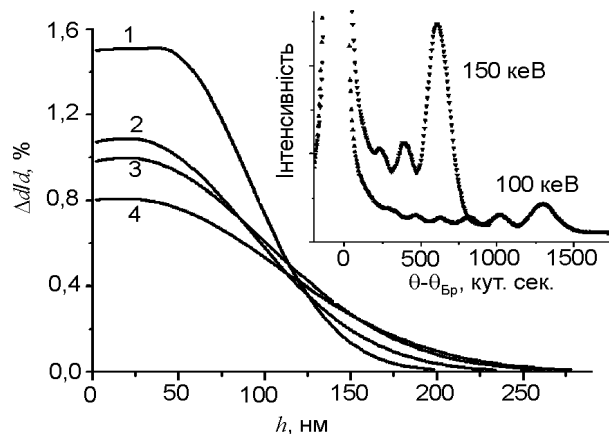


Рис. 6. Профілі відносної деформації в приповерхневих шарах монокристалічних плівок ЗІГ, імплантованих іонами Si^+ дозою $5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ та енергіями: 1 – 100 кеВ, 2 – 120 кеВ, 3 – 130 кеВ, 4 – 150 кеВ. На вставці представлено ділянки експериментальних КДВ.

шар та зміщуються у глибину, що пов'язано із зростанням проективного пробігу іона-імплантанта. Варто звернути увагу на відсутність кореляції у приповерхневій зоні між теоретично обчисленим розподілом дефектів (рис. 5) та розрахованим профілем відносної деформації (рис. 6). До глибини ~ 50 нм значення величини відносної деформації є незмінним, що можна пояснити дефектоутворенням за рахунок формування локальних теплових піків [14], які призводять до утворення розупорядкованих областей. Зосередження у приповерхневому шарі більшої концентрації дефектів у випадку меншої енергії іонів імплантантів призводить до його значнішого розупорядкування, що і проявляється в зростанні максимальної деформації порушеного шару при переході від енергії імплантації 150 кеВ до 100 кеВ (рис. 7).

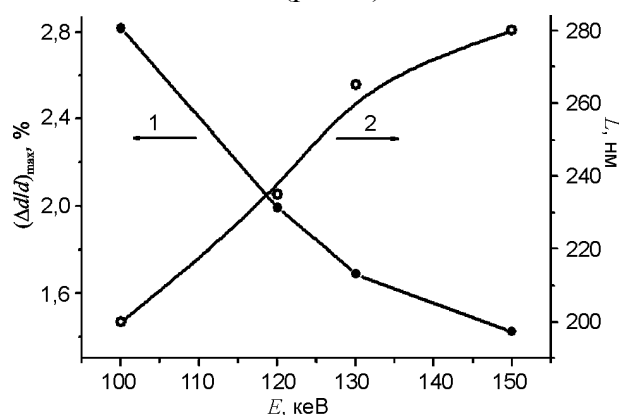


Рис. 7. Залежність максимальної відносної деформації (1) та товщини деформованого шару (2) від початкової енергії іонів Si^+ .

Із збільшенням початкової енергії бомбардуючих іонів товщина деформованого шару зростає (рис. 7). Положення максимуму розподілу зміщених іонів матриці та максимуму профілю відносної зміни міжплощинної відстані найкраще корелюють для енергії 100 кеВ, проте виявлено неспівпадіння для максимальних глибин відповідних профілів. При зростанні енергії імплантації різниця між цими параметрами збільшується, що свідчить про утворення між імплантованим шаром та досконалою частиною плівки ЗІГ пружно-деформованого перехідного шару.

ВИСНОВКИ

Проведені чисельні розрахунки розподілу дефектів, утворених внаслідок пружних та непружних зіткнень іона-імплантанта вздовж проективного пробігу в приповерхневих шарах монокристалічних плівок ЗІГ, дають можливість стверджувати, що дефектоутворення при імплантації іонами Si^+ з енергією 100 – 150 кеВ відбувається практично тільки за рахунок ядерних енергетичних втрат. При цьому найбільш ймовірним є утворення пар Френкеля – 44%; ймовірність розвитку каскаду із десяти атомів віддачі і більше складає близько 16%.

Імплантація плівок ЗІГ дозою $5 \cdot 10^{13} \text{ Si}^+/\text{cm}^2$ в діапазоні початкових енергій 100 – 150 кеВ зумовлює утворення монотонно спадних профілів відносної деформації. Відсутність кореляції між теоретично розрахованими розподілами пружно-індукованих радіаційних дефектів та профілями відносної деформації у приповерхневій ділянці зумовлена дефектоутворенням за рахунок виникнення теплових піків. У всьому інтервалі досліджуваних енергій імплантації між імплантованим шаром та досконалою частиною плівки ЗІГ утворюється пружно-деформований шар.

Робота виконана за підтримки CRDF/USAID (UKX 2-9200-IF-08) та МОН України (М/130-2009).

ЛІТЕРАТУРА

1. Ozgur U., Alivov Ya., Morkoc H. Microwave ferrites, part 1: fundamental properties//J. Mater Sci: Mater Electron. – 2009. – Vol. 20. – P. 789-834.

2. Башкиров Ш.Ш., Ивойлов Н.Г., Романов Е.С. Влияние ионной имплантации на свойства нарушенного слоя феррогранатовых ЦМД-пленок//ФТТ. – 1985. – Т. 27, №9. – С. 2853-2856.
3. Машкова Е.С., Теплова Я.А., Тулинов А.Ф., Чеченин Н.Г. Взаимодействие ионов с веществом//В сб. Энциклопедия Московского Универ. Науч.-иссл. ин-т ядерной физики. – 2005. – С. 101-120.
4. Афанасьев А. М., Александров П. А., Имаммов Р. М. Рентгеновская диагностика субмикронных слоев. – М: Наука, 1989. – 151 с.
5. Остафійчук Б.К., Федорів В.Д., Кравец В.И. и др. Структура приповерхностного слоя феррит-гранатовой пленки, имплантированной ионами бора//Металлофизика и новейшие технологии. – 1995. – Т.17, № 2. – С. 67-72.
6. Gerard P. Ion implantation in magnetic garnet//Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res. – 1987. – Vol. 19, № 20. – P. 843-850.
7. Риссел Х., Руге И. Ионная имплантация. – М.: Наука, 1983. – 320 с.
8. Ziegler J.F., Biersack J.P., Littmark U. The Stopping and Range of Ions in Solids. – New York.: Pergamon Press, 1985. – 321 p.
9. Ubizski S.B., Matkovskii A.O., Mironova-Ulmane N., Skvortsova V., Suchocki A., Potera P. Displacement Defect Formation in Complex Oxide Crystals under Irradiation//Phys. Stat. Sol. A. – 2000. – № 177. – P. 349-366.
10. Остафійчук Б.К., Федорів В.Д., Коцюбинський В.О., Яремій І.П. Механізми дефектоутворення в монокристалічних плівках залізоітрієвого гранату при іонній імплантації легкими іонами//Фізика і хімія твердого тіла. – 2003. – Т. 4, № 1. – С. 63-70.
11. Остафійчук Б.К., Яремій І.П., Кравец В.І., Федорів В.Д., Яблонь Л.С. Дослідження структури змін в монокристалах ГТГ, модифікованих іонами бору при різних енергіях//Фізика і хімія твердого тіла. – 2002. – Т. 3, № 3. – С. 437-440.
12. Balestrino G., Lagomarsino S., Milani E., Gerard P., Tucciarone A. Reconstruction mechanism in ion implanted yttrium iron garnet films//J. Appl. Phys. – 1988. – Vol. 63, № 8. – P. 2751-2755.
13. Остафійчук Б.К., Яремій І.П., Кравец В.І., Федорів В.Д., Коцюбинський В.О., Морущко О.В. Про можливість однозначного визначення профілів зміни міжплощинної відстані в приповерхневих шарах монокристалів за даними двокристалічної рентгенівської дифрактометрії//Фізика і хімія твердого тіла. – 2002. – Т 3, № 1. – С. 148-153.

14. Остафійчук Б.К., Ткачук В.М., Ворончак О.Н., Яворський Б.И. О возможном механизме аморфизации поверхности феррит-гранатовых пленок вследствие ионной имплантации// *Металлофизика и новейшие технологии*. – 1994. – Т. 16, № 8. – С. 51-54.
9. Ubizski S.B., Matkovskii A.O., Mironova-Ulmane N., Skvortsova V., Suchocki A., Potera P. Displacement Defect Formation in Complex Oxide Crystals under Irradiation// *Phys. Stat. Sol. A*. – 2000. – № 177. – R. 349-366.
10. Остафійчук Б.К., Федорів В.Д., Котсубинський В.О., Яремий І.П. Механізми дефектоутворення в монокристалічних плівках залізо-ітриєвого гранату при іонній імплантації легкими іонами// *Фізика і хімія твердого тіла*. – 2003. – Т. 4, № 1. – С. 63-70.

LITERATURA

1. Ozgur U., Alivov Ya., Morkoc H. Microwave ferrites, part 1: fundamental properties// *J. Mater Sci: Mater Electron*. – 2009. – Vol. 20. – P. 789-834.
2. Bashkirov Sh.Sh., Ivoylov N.G., Romanov Ye.S. Vliyaniye ionnoy implantatsii na svoystva narushennogo sloya ferrogranatovykh TsMD-pelenok// *FTT*. – 1985. – Т. 27, №9. – С. 2853-2856.
3. Mashkova Ye.S., Teplova Ya.A., Tulinov A.F., Chechenin N.G. Vzaimodeystviye ionov s veshchestvom// *V sb. Entsiklopediya Moskovskogo Univer. Nauch.-issl. in-t yadernoy fiziki*. – 2005. – С. 101-120.
4. Afanasyev A. M., Aleksandrov P. A., Imamov R. M. Rentgenovskaya diagnostika submikronnykh sloyev. – M: Nauka, 1989. – 151 s.
5. Остафійчук Б.К., Федорів В.Д., Кравець В.І. і др. Структура приповерхностного шара феррит-гранатової плівки, імплантованої іонами бора// *Металлофізика і новітні технології*. – 1995. – Т.17, № 2. – С. 67-72.
6. Gerard R. Ion implantation in magnetic garnet// *Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res.* – 1987. – Vol. 19, № 20. – R. 843-850.
7. Rissel Kh., Ruge I. Ionnyaya implantatsiya. – M.: Nauka, 1983. – 320 s.
8. Ziegler J.F., Biersack J.P., Littmark U. The Stopping and Range of Ions in Solids. – New York.: Pergamon Press, 1985. – 321 p.
11. Остафійчук Б.К., Яремий І.П., Кравець В.І., Федорів В.Д., Яблон Л.С. Дослідження структури змін в монокристалах GGG, модифікованих іонами бору при різних енергіях// *Фізика і хімія твердого тіла*. – 2002. – Т. 3, № 3. – С. 437-440.
12. Balestrino G., Lagomarsino S., Milani E., Gerard P., Tucciarone A. Reconstruction mechanism in ion implanted yttrium iron garnet films // *J. Appl. Phys.* – 1988. – Vol. 63, № 8. – P. 2751-2755.
13. Остафійчук Б.К., Яремий І.П., Кравець В.І., Федорів В.Д., Котсубинський В.О., Морущко О.В. Про можливість однозначного визначення профілів змін мизьплощинної відстані в приповерхневих шарах монокристалів за даними двокристалної рентгенівської дифрактометрії// *Фізика і хімія твердого тіла*. – 2002. – Т. 3, № 1. – С. 148-153.
14. Остафійчук Б.К., Ткачук В.М., Ворончак О.Н., Яворський Б.И. О возможном механизме аморфизации поверхности феррит-гранатовых пленок вследствие ионной имплантации // *Металлофізика і новітні технології*. – 1994. – Т. 16, № 8. – С. 51-54.