

УДК 548.73/.75+621.315.592  
PACS NUMBER: 71.18.+Y

ISSN 1729-4428

Б.К. Остафійчук, В.М. Ткачук, О.М. Ткачук, В.М. Пилипів,  
В.І. Кравець, О.О. Григорук

## Механізм формування магнітної макроструктури $Y_3Fe_5O_{12}$ при імплантації легкими та важкими йонами

*Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника, вул. Шевченка, 57,  
Івано-Франківськ, 76000, Україна*

Методами конверсійної електронної мессбауерівської спектроскопії та моделюванням процесу йонної імплантації проведено дослідження магнітної макроструктури приповерхневого шару епітаксійної плівки залізо-ітрієвого гранату орієнтації (111). Встановлено, що в залежності від маси імплантованого йону і, як наслідок, різних механізмів дефектоутворення та руйнування кристалічної структури переорієнтація вектора намагніченості плівки відбувається по-різному. Враховуючи магнітострикційні властивості досліджуваних структур можна припустити, що визначальним в цьому процесі є рівень пружних напруг кристалічної ґратки, зумовлений радіаційними дефектами, з одного боку, і ефекти аморфізації кристалічної структури та її перехід в парамагнітний стан, з другого.

**Ключові слова:** залізо-ітрієвий гранат, конверсійна електронна мессбауерівська спектроскопія, йонна імплантација, радіаційні дефекти, комп'ютерне моделювання.

*Стаття поступила до редакції 30.06.2006; прийнята до друку 15.09.2006.*

### Вступ

Одним із основних методів модифікації кристалічної структури приповерхневих шарів плівкових матеріалів а, як наслідок, магнітної мікро- та макроструктури традиційно була і залишається йонна імплантација [1]. При цьому вплив на характер формування магнітної структури імплантованого шару мають як тип та концентрація радіаційних дефектів, так і рівень зумовлених ними пружних деформацій кристалічної структури [2].

Зручним і, у всіх відношеннях, модельним об'єктом дослідження таких процесів як на мікро-, так і на макрорівні є монокристалічні плівки залізо-ітрієвого гранату номінального складу  $Y_3Fe_5O_{12}$ . Радіаційні процеси в них можуть бути ефективно досліджені такими сучасними експериментальними методами, як конверсійна електронна мессбауерівська спектроскопія (КЕМС) та рентгеноструктурні дослідження. Їх поєднання із модельними, комп'ютерно - розрахунковими методами дослідження дозволяє значно розширити розуміння самих процесів формування радіаційних дефектів, які безпосередньо експериментально дослідити неможливо [3,4].

Магнітне впорядкування у залізо-ітрієвому гранаті виникає як наслідок непрямой обмінної взаємодії

між йонами  $Fe^{3+}$  через йони кисню. Вектори магнітних моментів йонів  $Fe^{3+}$  в а- та d-позиціях антипаралельні. Наявність комбінованої магнітної та електростатичної взаємодії на резонансному мессбауерівському ядрі та різна орієнтація осей локальної симетрії дозволяє із експериментальних даних отримати поведінку локальної мікроструктури в оточенні резонансного ядра. Важливим є той факт, що товщина інформаційного КЕМС – шару, звідкіля приносять інформацію електрони конверсії, є співмірною із товщиною порушеного йонною імплантацією приповерхневого шару.

Метою даного дослідження було встановлення поведінки просторової орієнтації магнітних моментів йонів заліза в структурі гранату у взаємозв'язку із механізмами та параметрами руйнування кристалічної гранатової структури в ході набору дози при опроміненні легкими та важкими йонами.

### І. Об'єкти та методи дослідження

Плівки залізо-ітрієвого гранату були вирощені методом рідкофазної епітаксії з розчину-розплаву  $Y_2O_3-Fe_2O_3-PbO-B_2O_3$  на немагнітній підкладці галій-гадолінієвого гранату  $Gd_3Ga_5O_{12}$  з площиною зрізу (111). Для збільшення ймовірності резонансного розсіювання  $\gamma$ -квантів оксид  $Fe_2O_3$  у вихідній шихті

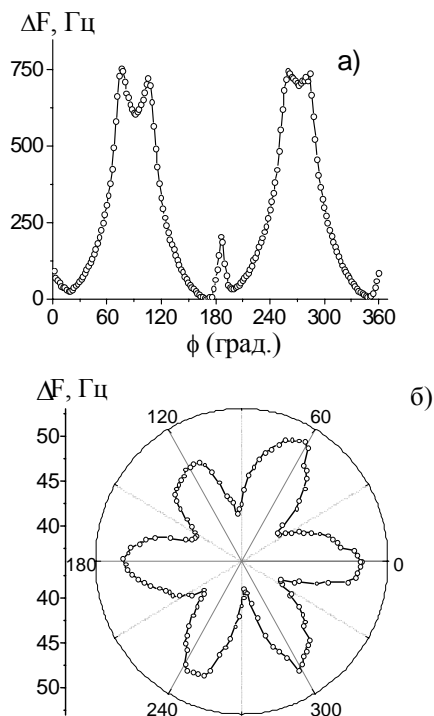
збагачувався ізотопом  $Fe^{57}$  до 10 ат. %. Для реєстрації конверсійних електронів використовувався пропорційний газовий лічильник. В якості джерела  $\gamma$  - квантів було використано ізотоп  $Co^{57}$  активністю 50 мКи в хромовій матриці.

Імплантація здійснювалася двома типами йонів: відносно легким йоном кисню із енергією 90 keV, який також входить до складу кристалічної структури гранату та формує, в основному, точкові дефекти, ефективно руйнуючи при цьому аніонну підгратку залізо-ітрієвого гранату (ЗІГ), і важким йоном миш'яку із енергією 60 keV, який руйнує кристалічну структуру, в основному, за рахунок ефекту теплових піків (при цьому визначальними є процеси його гальмування на важких йонах, що входять до складу кристалічної структури).

За експериментальними кривими дифракційного відбивання на основі динамічної теорії розсіювання рентгенівських хвиль з використанням диференціальних рівнянь Такагі аналізувався рівень деформації (зміни міжплощинних відстаней) в йонно-імплантованих шарах [5].

## II. Результати експерименту

Для паспортизації досліджуваних зразків та відпрацювання модельних, методологічних підходів до розшифрування експериментальних КЕМ спектрів плівок ЗІГ із малою розділеністю парціальних



**Рис. 1.** Кутова залежність магнітної сприйнятливості плівки ЗІГ у зовнішньому підмагнічуючому магнітному полі  $H = 3,2 E$ :

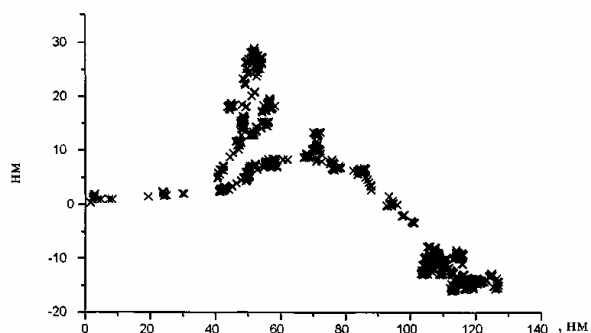
- а) – за азимутальним кутом;
- б) – за полярним кутом.

підспектрів від резонансних ядер у різних нееквівалентних положеннях було проведено індуктивно-частотні дослідження (рис.1.), які дають інформацію про просторову орієнтацію вектора намагніченості.

Легко бачити, що в площині плівки можна виділити 6 осей легкого намагнічування, які дають максимуми магнітної сприйнятливості (рис. 1б). Магнітні моменти йонів по підгратках близькі до колінеарного стану та відхилені від нормалі до площини плівки на однаковий кут (рис. 1а). Азимутальний кут 90 градусів відповідає орієнтації зовнішнього підмагнічуючого поля в площині плівки. Магнітний момент кожного із магнітних доменів направлений вздовж осі типу  $\langle 111 \rangle$ , яка є віссю легкого намагнічування гранатової структури.

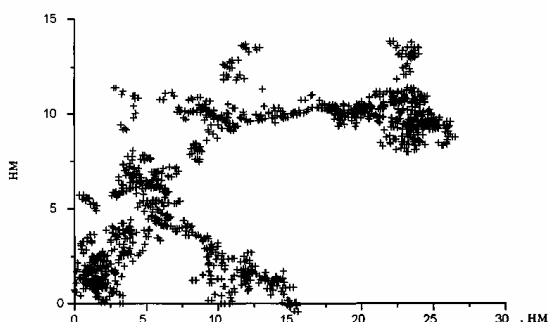
Як видно із результатів індуктивно-частотних досліджень, вектор намагніченості не лежить у площині плівки, а виходить з неї під кутом приблизно 20 градусів, що узгоджується із даними КЕМС досліджень вихідних неімплантованих структур.

Радіаційний каскад атомних зіткнень, як показують результати комп'ютерного моделювання, у випадку входження в кристалічну структуру ЗІГ кисневого атома, складається, в основному, із точкових дефектів (рис. 2). За рахунок вторинних імплантаційних процесів з невеликою імовірністю формуються також невеликі (порядку 200-400 атомів) аморфні області. Імовірність "виживання" таких областей, оцінена за методикою, описаною в [6], практично прямує до нуля. В загальному ні густини виділеної енергії, ні концентрації радіаційних дефектів є недостатньо для переведення кристалічної структури в аморфний стан в межах одного каскаду радіаційних зіткнень. Наслідком накопичення такого типу радіаційних дефектів (практично тільки точкових дефектів) в ході набору дози буде (якщо знехтувати можливостями перекриття окремих радіаційних каскадів) пружна деформація кристалічної структури. Такі пружні деформації, враховуючи магнітострикційні властивості гранатової структури, на експерименті повинні проявлятися в просторовій переорієнтації вектора намагніченості до площини плівки.



**Рис. 2.** Характерний вигляд одного імплантаційного каскаду атомних зіткнень, викликаного входженням йону кисню в гранатову структуру. Хрестиками відмічено зміщені йони матриці.

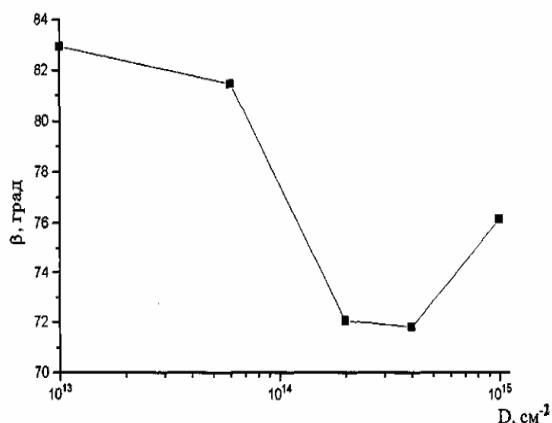
Входження в кристалічну структуру йона As, навпаки, внаслідок високої густини енерговиділення в області каскаду руйнує її за рахунок ефекту теплових піків. Релаксація таких областей, враховуючи їхню геометрію, призведе до збільшення міжплощинної відстані в напрямку нормалі до площини плівки. Важливу роль при імплантації такого типу йонів мають вторинні імплантаційні процеси. Вони формують, як правило, точкові радіаційні дефекти в області хвоста каскаду атомних зіткнень. Такі процеси на експерименті вийдуть на перший план тоді, коли в ході набору дози приповерхнева область буде повністю аморфізованою і формування експериментального КЕМ спектра буде відбуватися саме цими областями.



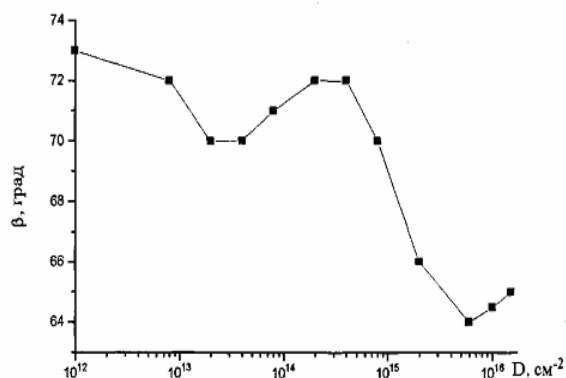
**Рис. 3.** Імплантаційний каскад атомних зіткнень, викликаний гальмуванням йона миш'яку в гранатовій структурі.

### III. Обговорення експериментальних результатів

Різні механізми дефектоутворення при входженні в кристалічну гранатову структуру легких та важких йонів проявляються у параметрах мессбуаєрівського



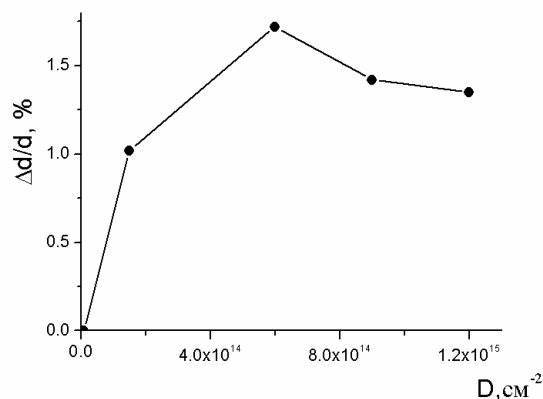
**Рис. 4.** Залежність орієнтації вектора намагніченості плівки відносно напрямку ходу гама-променів (нормалі до її площини) від дози іонної імплантації кисню.



**Рис. 5.** Залежність орієнтації вектора намагніченості плівки відносно напрямку ходу гама-променів (нормалі до її площини) від дози йонної імплантації As.

КЕМ спектра (див. рис.4 та рис.5.).

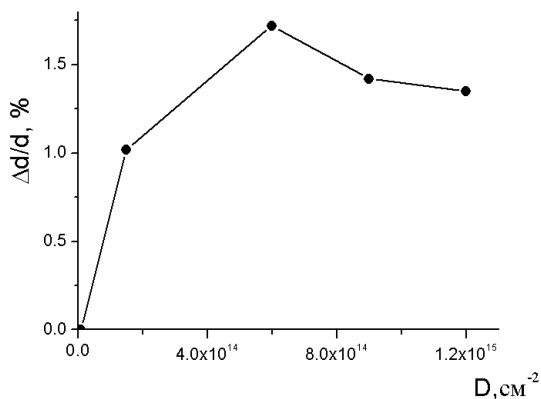
Для порівняння на рис. 6 та 7 подані результати обробки експериментальних кривих дифракційного відбивання. Профілі деформації приповерхневих йонно-імплантованих шарів розраховувались за методикою, описаною в [5].



**Рис. 6.** Дозова залежність величини зміни міжплощинної відстані в напрямку нормалі до площини плівки у випадку іонної імплантації кисню.

У випадку імплантації кисню спостерігається кореляція поведінки орієнтації вектора намагніченості та величини відносної деформації гранатової кристалічної структури, отриманих із експериментальних даних (рис. 4 та 6.). В поєднанні із модельними результатами комп'ютерного моделювання можна зробити висновок, що руйнування кристалічної структури після досягнення критичних доз (порядку  $4 \cdot 10^{14}$  йонів/см<sup>3</sup>) відбувається як наслідок простого, сумарного накопичення точкових радіаційних дефектів. За даними комп'ютерного моделювання, при таких дозах

концентрація точкових радіаційних дефектів досягає значень порядку 10 атомних процентів. Це призводить до того, що кристалічна структура гранату в експерименті сприймається як рентгеноаморфна. Велика кількість розірваних кисневих зв'язків зумовлює також руйнування магнітного впорядкування вже при кімнатних температурах.



**Рис. 7.** Дозова залежність величини зміни міжплощинної відстані в напрямку нормалі до площини плівки у випадку іонної імплантації миш'яку.

При імплантації миш'яку такої кореляції не спостерігається (рис. 5 та 7), що вказує на різні механізми руйнування кристалічної мікроструктури. Такі висновки безпосередньо впливають із результатів комп'ютерного моделювання на початкових етапах набору дози руйнування кристалічної структури відбувається за рахунок ефекту теплових піків в тонких (порядку 50-60 нм) приповерхневих областях. Важливим для "виживання" таких аморфних областей має також той факт, що густина викликаних імплантацією миш'яку атомних зіткнень у ньому є співмірною із атомною густиною кристалічної структури. По мірі аморфізації цієї області із набором дози на перший план виступають процеси дефектоутворення в

області хвоста імплантаційного розподілу, де руйнування кристалічної структури та рівень пружних деформацій задаються вторинними імплантаційними процесами.

## Висновки

Проведено експериментальне та імітаційне комп'ютерне дослідження магнітної макроструктури епітаксійних плівок залізо-ітрієвого гранату, опромінених йонами різного типу в широкому інтервалі доз. Встановлено взаємозв'язок між механізмами процесів радіаційного дефектоутворення в йонно-імплантованому приповерхневому шарі плівки ЗІГ та орієнтацією вектора намагніченості відносно нормалі до площини плівки. Зроблено висновок про те, що характер радіаційного дефектоутворення проявляється у поведінці магнітної макроструктури, яка може служити критерієм механізмів дефектоутворення. Кореляція повороту вектора намагніченості із величиною деформації кристалічної структури вказує на переважаюче значення в її формуванні точкових радіаційних дефектів та сумування їх впливу в ході набору дози. Відсутність кореляції вказує на визначальне значення ефектів теплових піків при невеликих дозах йонної імплантації та вторинні радіаційні ефекти генерації точкових радіаційних дефектів в більш глибоких областях, які стають переважаючими при переході поверхневого шару плівки в аморфний стан.

**Остафійчук Б.К.** – доктор фіз.-мат. н., професор, зав. кафедри металофізики і новітніх технологій;  
**Ткачук В.М.** – кандидат фіз.-мат. н., доцент кафедри інформатики;  
**Ткачук О.М.** – кандидат фіз.-мат. н., доцент кафедри теорії і методики початкової освіти;  
**Пилипів В.М.** – кандидат фіз.-мат. н., доцент, декан факультету математики та інформатики;  
**Кравець В.І.** – кандидат фіз.-мат. н., доцент кафедри матеріалознавства і новітніх технологій;  
**Григоруку О.О.** – аспірант кафедри матеріалознавства і новітніх технологій.

- [1] P. Gerard. Ion implantation in magnetic garnet// *Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res.*, **19/20**, pp. 843-850 (1980).
- [2] Б.К. Остафійчук, В.А. Олейник, В.М. Пылыпив, Б.Т. Семен, Л.М. Смеркло, Б.И. Яворский, В.И. Кравец, И.В. Коваль. Кристаллическая и магнитная структура имплантированных слоев монокристаллических пленок железо-иттриевого граната // *Препринт ИМФ 1.91*, Киев, 70 с. (1991).
- [3] О.М. Tkachuk, V.М. Tkachuk. The Local Magnetic  $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  Structure Implanted by As Ions // *Phys. Stat. Sol.(a)*, **172**, pp. 477-484 (1999).
- [4] Б.К. Остафійчук, В.М. Ткачук, О.Н. Ворончак, Б.И. Яворский. О возможном механизме аморфизации поверхности феррит-гранатовых пленок вследствие ионной имплантации // *Металлофизика и новейшие технологии*, **16(8)**, сс. 51-54 (1994).
- [5] В.І. Кравець, В.М. Пилипів. Моделювання профілів деформації приповерхневих шарів монокристалів // *Вісник Національного університету «Львівська політехніка», Прикладна математика* (411), сс. 192-196 (2000).

B.K. Ostafiychuk, O.M. Tkachuk, V.M. Tkachuk, V.M. Pylypiv, V.I. Kravec,  
O.O. Grygoruk

## **Mechanism of Formation the Magnetic Macrostructure $Y_3Fe_5O_{12}$ by Implantation the Light end Hard Ions**

*Prekarpathion University named after V. Stefanyk, 57 Shevchenko Str., Ivano-Frankivsk, 76000, Ukraine*

Conversion electron Mossbauer spectroscopy and ion implantation modeling were applied for the investigation of the magnetic structure of epitaxial film surface layer for (111) yttrium iron garnet. It is established, that change of film magnetization vector has been result of various way in dependence on ion implantation mass and as consequence on different mechanisms of defects and crystalline structure destruction. Owing to magnetostriction property of investigation sample may permit that the elastic strain level of crystalline lattice is the dominant process. It is caused by radiation defects, amorphization effects of crystalline lattice and it transition in paramagnetic station.