ФІЗИКА І ХІМІЯ ТВЕРДОГО ТІЛА
Т. 8, № 2 (2007) С. 273-280

PHYSICS AND CHEMISTRY OF SOLID STATE
V. 8, № 2 (2007) P. 273-280

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

ISSN 1729-4428

Б.К. Остафійчук, В.М. Пилипів, В.О. Коцюбинський, В.Д. Федорів, О.О. Григорук

Трансформація магнітної мікроструктури приповерхневих шарів епітаксійних плівок залізо-ітрієвого гранату після імплантації іонами фосфору та відпалу

Прикарпатський національний університет ім. Василя Стефаника, вул. Шевченка, 57, Івано-Франківськ, 76000, Україна
e-mail: v_kotsuybynsky@mail.ru, тел: +8(097) 3803959

Досліджено взаємозв'язок змін магнітної мікроструктури епітаксійних плівок ЗІГ після імплантації іонами фосфору та наступного відпалу з трансформацією внутрікристалічних електричних полів. Встановлено наявність в тетраедричній підгратці приповерхневого шару плівки ЗІГ двох магнітонеекеквівалентних позицій іонів Fe^{3+} та парамагнітних іонів Fe^{2+}. Розраховано просторову орієнтацію магнітних моментів окремих підграток заліза, простежено та обґрунтовано зміни значень параметрів надтонкої взаємодії після імплантації та відпалу.

Ключові слова: ферит-гранатові плівки; іонна імплантація, радіаційні дефекти, конверсійна месбауерівська спектроскопія.

Стаття поступила до редакції 10.10.2006; прийнята до друку 15.032006.

Вступ

Взаємозв'язок структурних та магнітних властивостей епітаксійних плівок зі структурою гранату та способи їх цілеспрямованої модифікації вивчається на протязі трьох десятиліть [1], проте широкий спектр можливих практичних застосувань даного матеріалу в якості активного середовища електронних пристроїв зумовлює продовження наукового пошуку в цій галузі. На початковому етапі (80-і роки) основний акцент робився на розробці плівкових епітаксійних структур для пристроїв надвисокочастотної техніки та систем енергонезалежної магнітної пам'яті; в 90-х роках інтерес до плівкових гранатових матеріалів посилився у зв'язку зі створенням планарних хвилеводних структур та лазерів. Сьогодні основна увага приділяється розробці активних матеріалів сенсорних пристров візуальної магнітометрії. Епітаксійні плівки залізо-ітрієвого гранату (ЗІГ) з площинною анізотропією відіграють тут основну роль, оскільки їх власна доменна магнітна мікроструктура не впливає на величину фарадеївського обертання [2]. Необхідність контролю просторового розподілу неоднорідних магнітних полів викликала потребу детальних досліджень магнітної мікроструктури приповерхневих шарів ЗІГ та впливу на неї умов росту та обробки плівки на всіх етапах її підготовки.

I. Об'єкти та методи дослідження

Плівки залізо-ітрієвого гранату номінального складу $Y_3Fe_5O_{12}$ були вирощені методом рідкофазної епітаксії в промислових умовах на діелектричній немагнітній підкладці гадоліній-галієвого гранату $Gd_3Ga_5O_{12}$ товщиною близько 500 мкм. Досліджувані плівки товщиною 10,2 мкм були орієнтовані в площині (111), кут розорієнтації не перевищував 7′. Температура переохолодження розчину-розплаву складала 10°С, температурний режим підтримувався з точністю до 0,1 °С. Поверхня зразків протравлювалася в ортофосфорній кислоті при температурі 130 °С для зняття тонкого неоднорідного шару "плівка-повітря" товщиною 10-15 нм. Зразки опромінювалися іонами фосфору з енергією 65 кеВ та дозами $5\cdot10^{14}$, $1{,}8\cdot10^{15}$ та $1\cdot10^{16}$см$^{-2}$. Імплантація проводилась при кімнатній температурі на установці типу "Везувій" в режимі, що виключав каналювання. Для запобігання ефекту самовідпалу густина струму імплантації не перевищувала 2 мкА/см^2. Після імплантації зразки були піддані ізотермічному відпалу в потоці кисню при температурі 950 ^{0}С на протязі 300 хв. Для дослідження магнітної мікроструктури

застосовувався метод конверсійної електронної месбауерівської (КЕМ) спектроскопії. Спектрометр типу ЯГРС-4М працював у режимі постійних прискорень. Для поліпшення якості КЕМ спектрів заліза у вихідній шихті використовувався оксид Fe_2O_3, збагачений до 8% ізотопом Fe^{57}. КЕМ спектри Fe^{57} отримувалися при кімнатній температурі з використанням джерела гама-квантів Co^{57} в хромовій матриці з активністю ~ 30 мКu в режимі постійних прискорень. Для реєстрації конверсійних електронів використовувався пропорційний газопроточний лічильник, що працював на суміші 96% *He*+4% CH_4. Калібрування КЕМ спектрів заліза проводилось відносно металічного α-*Fe*.

Особливості радіаційного дефектоутворення в приповерхневих шарах епітаксійних плівок ЗІГ при імплантації іонами фосфору розглядалися нами в роботі [3]

II. Постановка задачі

Кристалічна структура ЗІГ належить до кубічної просторової групи *Ia3d;* на елементарну гратку припадає 16 кристалографічно еквівалентних іонів *Fe* в октакоординованих (*a*) порожнинах з точковою симетрією $\overline{3}$ та 24 еквівалентних іонів *Fe* в тетеракоординованих (*d*) порожнинах з точковою симетрією $\overline{4}$. Точкові групи для a- та d-позицій *Fe* визначають аксіальну симетрію тензорів градієнтів внутрішньокристалічних електричних полів (ГЕП), осі симетрії яких співпадають, відповідно, з кристалографічними напрямками $\{111\}$ та $\{100\}$. Месбауерівська спектроскопія дозволяє розділити вклади окремих груп іонів Fe з різними значеннями кута θ між напрямками ГЕП та вектором їх сумарного магнітного моменту, який є .алельним до напрямку ефективного магнітного поля $H_{еф}$ на ядрах цих йонів. Таким чином в загальному випадку месбауерівський спектр ЗІГ являє собою суперпозицію семи парціальних секстетів. Для монокристалічних плівок $Y_3Fe_5O_{12}$ з орієнтацією в площині (111) набір кутів скорочується до трьох $\theta_{a_1} = 0,\ \theta_{a_2} = 70^0 52',\ \theta_d = 54^0 44'$ і месбауерівський спектр можна апроксимувати трьома компонентами з співвідношенням інтегральних інтенсивностей $S_d : S_{a_1} : S_{a_2} = 6:3:1$. Магнітне впорядкування в структурі ЗІГ визначається величиною електростатичних полів, наведених на ядра заліза іонами гратки і власними електронними оболонками з нецентральносиметричним розподілом заряду. Антиферомагнітне впорядкування у ЗІГ виникає як наслідок опосередкованої взаємодії між іонами *Fe* через іони кисню. Магнітні моменти Fe^{3+} згідно [4] рівні: $m_{24d} = 4.2\mu_Б$ та $m_{16a} = -4.0\mu_Б$. Сумарний магнітний момент кожного домену плівки напрямлений вздовж осі типу <111>, яка є віссю легкого намагнічування [5]. Порушення непрямої обмінної взаємодії при радіаційному руйнуванні кристалічної структури під час іонної імплантації призводить до появи магнітонееквівалентних позицій заліза з меншими (порівняно з неімплантованим зразком) ефективними полями на ядрах, аж до появи парамагнітного стану іонів *Fe*.

Для ЗІГ характерним є одночасне існування електричної квадрупольної та магнітної дипольної взаємодій приблизно рівних інтенсивностей, що створює труднощі при математичній обробці експериментальних даних. Додатковим фактором є те, що для епітаксійних плівок $Y_3Fe_5O_{12}$ активний вплив чинитиме поверхня феримагнітного зразка, стрибок намагніченості на якій індукуватиме появу додаткової планарної складової намагніченості. Ефект поверхневого розмагнічування спричинює поворот осі легкого намагнічування від напрямку нормалі до площини плівки.

Основною метою роботи є експериментальне встановлення змін просторової орієнтації магнітних моментів кристалографічно нееквівалентних іонів заліза після імплантації іонами фосфору та наступного відпалу.

III. Результати експерименту

Інформацію про характер зміни магнітного впорядкування в приповерхневому шарі ФГП було отримано з використанням методу месбауерівської спектроскопії конверсійних електронів. Застосована методика дала можливість отримати інформацію про зміни симетрії ближнього оточення ядер *Fe* в приповерхневому шарі плівки товщиною ≤ 100 нм після імплантації та відпалу. Експериментальні месбауерівські спектри наведено на рис.1.

В загальному випадку, при аналізі експериментальних месбауерівських спектрів необхідно використовувати гамільтоніан змішаної надтонкої взаємодії, що враховує одночасне існування магнітного дипольного та електричного квадрупольного розщеплення надтонкої структури спектрів. Здійснювалася діагоналізація матриці ядерного гамільтоніану відповідно до методики запропонованої в [6]. Парціальні секстети вважалися суперпозицією лоренціан. Систему координат було вибрано таким чином, що тензор ГЕП є діагональним і вісь *z* паралельна U_{zz}. В застосованій моделі тензор ГЕП вважався аксіально симетричним – параметр асиметрії

$$\eta = \frac{\left(U_{xx} - U_{yy}\right)}{U_{zz}} = 0 .$$

КЕМ спектри епітаксійних плівок ЗІГ після імплантації та відпалу наведено на рис. 1, а результати їх математичної обробки в табл. 1.

Виходячи з кристалографічних передумов, очікувався експериментальний спектр у вигляді суперпозиції трьох парціальних секстетів, проте прийнятний результат апроксимації було отримано тільки після введення двох магнітонееквівалентних *d*-позицій з різними значеннями ефективних магнітних полів та інших парамагнітних параметрів (ізомерний зсув δ, магнітне поле $H_{еф}$, значення аксіальної компоненти ГЕП U_{zz}). Аналогічний результат було отриманий в [7] і інтерпретовано як

наслідок порушення аніонної стехіометрії внаслідок нерівноважності процесу росту плівки та входження в гранатову структуру домішкових атомів з розчину-розплаву на завершальних етапах епітаксії.

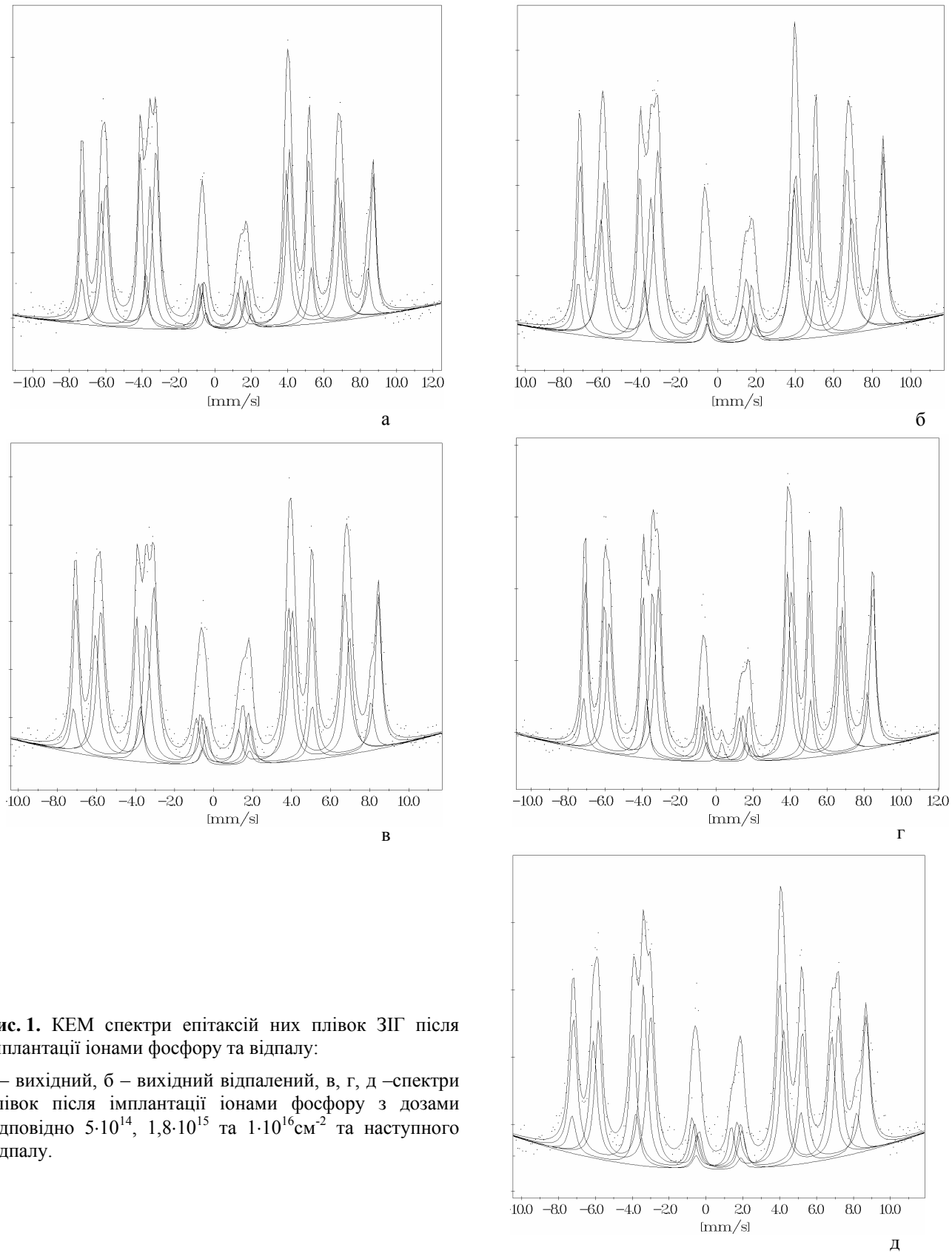

Рис. 1. КЕМ спектри епітаксій них плівок ЗІГ після імплантації іонами фосфору та відпалу:

а – вихідний, б – вихідний відпалений, в, г, д –спектри плівок після імплантації іонами фосфору з дозами відповідно $5{\cdot}10^{14}$, $1{,}8{\cdot}10^{15}$ та $1{\cdot}10^{16}$см$^{-2}$ та наступного відпалу.

Таблиця 1.

Параметри парціальних компонент експериментальних месбауерівських спектрів монокристалічної плівки $Y_3Fe_5O_{12}$

Доза, см$^{-2}$	*Кристалографічна позиція*	*β°*	$\overline{\beta_a}$, $\overline{\beta_d}$	U_{zz}, $\cdot 10^{21}$ В/м^2	*H, кЕ*	δ_s, *мм/с*	*ω, мм/с*	*S, %*
Вихідний	a_1	63,6	73,4	1,05	496	0,62	0,33	27,5
	a_2	104,3		3,05	487	0,65	0,33	9.2
	d_1	77,9	78,4	-2,10	395	0,50	0,41	34,5
	d_2	78,9		-5,23	406	0,41	0,37	26,0
	D					0,50	0,33	2,8
Вихідний відпалений	a_1	74,2	83,1	1,22	487	0,60	0,37	27,8
	a_2	110,7		3,22	478	0,56	0,36	9,3
	d_1	72,9	77,05	-5,16	387	0,42	0,44	28,70
	d_2	82,1		4,02	401	0,34	0,44	32,0
	D					0,74	0,34	2,2
$5\cdot10^{14}$	a_1	76,3	83,2	0,87	481	0,63	0,36	27,8
	a_2	104,3		2,87	472	0,55	0,36	8,9
	d_1	70,6	75,4	-5,22	385	0,49	0,45	34,3
	d_2	80,3		6,42	398	0,33	0,41	26,5
	D					0,79	0,36	2,5
$1{,}8\cdot10^{15}$	a_1	74,59	82,8	0,91	482	0,63	0,32	27,9
	a_2	108,2		2,92	474	0,60	0,32	9,3
	d_1	82,9	81,05	-0,27	386	0,48	0,40	31,0
	d_2	79,2		5,37	395	0,31	0,36	30,4
	D					0,99	0,32	1,4
$1\cdot10^{16}$	a_1	74,7	78,5	0,68	492	0,69	0,47	28,4
	a_2	90,0		2,68	479	0,56	0,47	9,5
	d_1	79,6	83,5	-6,96	395	0,48	0,47	27,7
	d_2	87,4		5,40	401	0,49	0,43	30,8
	D				-	0,79	0,48	3,6
Похибка фітування		± 1,0	± 1,0	± 0,09	± 1	± 0,03	± 0,02	± 0,1

У не імплантованому зразку виявлено наявність дублетної компоненти, що відзначалося також авторами [8]; відповідно до величини квадрупольного розщеплення дублет однозначно зумовлюється іонами Fe^{2+} у парамагнітному стані. Причиною зміни валентності та виключення іонів *Fe* з надобмінної взаємодії є їх заміщення немагнітними іонами Pb^{2+}, Pb^{4+} та Pt^{4+}. Відомо [9], що іони свинцю Pb^{2+} та Pb^{4+} займають октаедричні позиції, витісняючи Fe^{3+} з ймовірністю 0,4 та 0,3 відповідно, іони Pt^{4+} – виключно октапозиції. Приналежність іонів *Fe* в парамагнітному стані до тетрапідгратки підтверджується експериментальними значеннями співвідношення інтегральної інтенсивності підспектрів *Fe* в окта- і тетрапорожнинах для вихідного зразка до та після відпалу. Відношення заселеностей *a*- та *d*- вузлів катіонами заліза в ЗІГ структурі визначається співвідношенням [10]:

$$\frac{n_d}{n_a} = \frac{S_d}{S_a}\frac{f_a}{f_d},$$

де S_a, S_d – інтегральні інтенсивності відповідних парціальних підспектрів, f_a f_d – імовірність ефекту Месбауера для окта- і тетра- положень відповідно. Відношення *f*-факторів для катіонів заліза в *a*- та *d*-положеннях в ЗІГ не залежить від ступеня заміщення іонів заліза і при кімнатній температурі рівне 0,94 ± 0,02 [10]. Зміни заселеності *a*- та *d*- порожнин катіонами *Fe* після імплантації і (чи) відпалу наведено на рис. 2. Незважаючи на похибку експерименту, можна простежити тенденцію до відновлення магнітного впорядкування відпаленої плівки ЗІГ при дозах імплантації нижчих за $1\cdot10^{16}$см$^{-2}$. Після відпалу плівки, імплантованої з дозою $1{,}8\cdot10^{15}$ см$^{-2}$, співвідношення n_d/n_a стає рівним 1,510 ± 0,015, що свідчить про рівномірність розподілу домішкових іонів *Pb* та *Pt* в приповерневому шарі плівки за катіонними пігратками після іонного перемішування. Проте, доза імплантації $1\cdot10^{16}$см$^{-2}$ призводить до невідновлюваних для даної температури відпалу процесів кристалічного та, відповідно, магнітного розвпорядкування, що відображається у зменшенні

співвідношення заселеностей *a*- та *d*-підграток до 1,340±0,015. Це значення ще раз підтверджує відзначений авторами [11] факт порівняно більшої радіаційної стійкості тетраедричної катіонної підгратки, пов'язаний з меншою кількістю кисневих аніонів в першій координаційні сфері. Зміни ближнього оточення та процеси відбудови кристалічної структури імплантованих плівок після відпалу зумовлюють зміни інтегральних ефективним магнітних полів H_{ef} на ядрах іонів заліза, що знаходяться в різних координаціях (рис. 3).

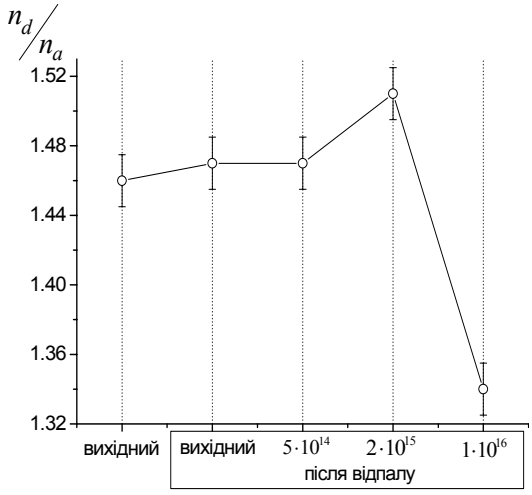

Рис. 2. Зміна відносної заселеності d- та *a*-підграток іонами заліза після імплантації фосфором та відпалу.

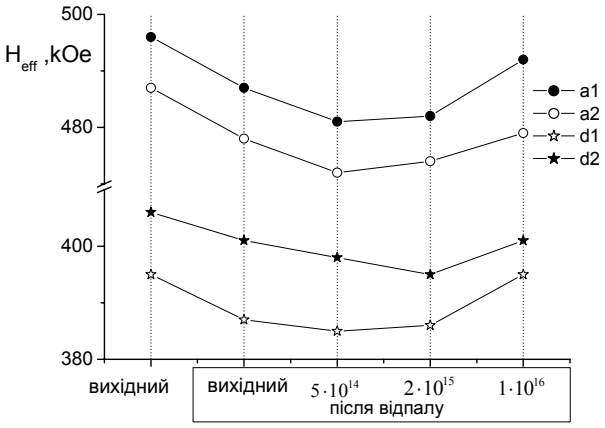

Рис. 3. Зміна ефективних магнітних полів на ядрах Fe^{57} для *d*- та *a*-підгратках плівок ЗІГ після імплантації фосфором та відпалу.

Ефективні поля H_{ef} для відпалених вихідного зразка та зразків імплантованих дозами до $1\cdot10^{16}$ см $^{-2}$ менші, порівняно з вихідним зразком, та проявляють тенденцію до зменшення зі збільшенням дози імплантації, що узгоджується з вищенаведеними припущеннями. Відпал вихідного зразка викликає зменшення ізомерних зсувів для всіх позицій (табл. 1), що можна пояснити температурно стимульованою релаксацією напруженого стану епітаксійної структури і збільшенням ступеня ковалентності хімічного зв'язку *Fe – O* [12]. Значення ізомерних зсувів для всіх позицій відпалених імплантованих зразків має тенденцію до збільшення (рис. 4,а), яка визначається ростом спотворення симетрії октаедричного та тетраедричного оточення заліза і, як наслідок, зменшенням перекриття електронних оболонок Fe^{3+} та O^{2-} та локалізації хвильової функції *s*-електронів на ядрі Fe^{57}. Аналогічною є поведінка ізомерного зсуву для іонів Fe^{2+} в тетрапідратці плівок після імплантації та відпалу (рис. 4,б).

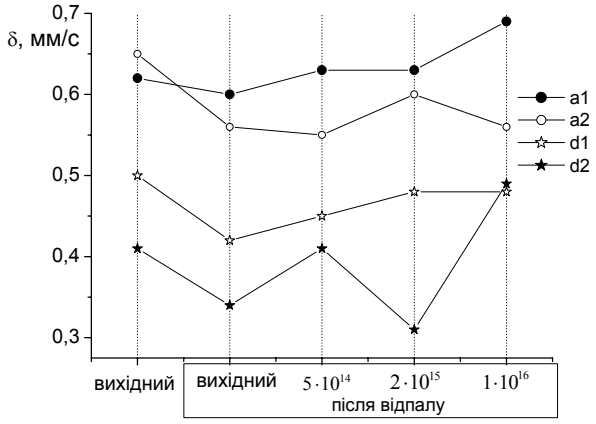

Рис. 4,а. Зміна ізомерних зсувів месбауерівських підспектрів для *d*- та *a*-підграток плівок ЗІГ після імплантації фосфором та відпалу.

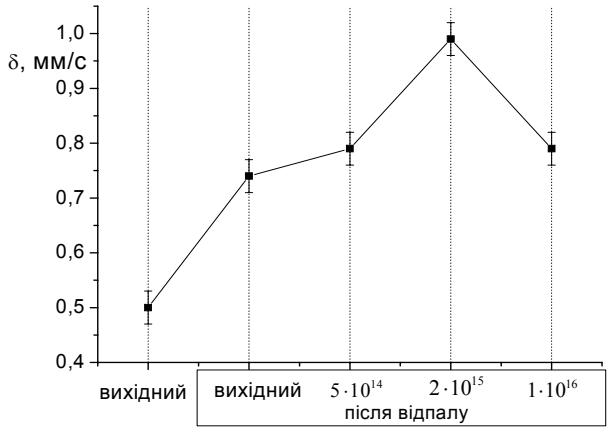

Рис. 4,б. Зміна ізомерного зсуву дублетної компоненти месбауерівського спектру плівок ЗІГ після імплантації фосфором та відпалу.

Цікавим є факт узгодженої зміни H_{ef} для всіх підграток заліза відпалених зразків, що можна пояснити значенням температури відпалу (900 ^{o}C), при якій відновлюється як аніонна (до 400 ^{o}C) так і катіона (700-900 ^{o}C) геометрія [13].

Вектор намагніченості епітаксійної плівки ЗІГ лежить практично в її площині, що є результатом

ефектів розмагнічування поверхні [4]. Згідно з [14] кут між вектором намагніченості та нормаллю до поверхні плівки ЗІГ становить $71^{o} \pm 5^{o}$. Орієнтація вектора намагніченості визначається конкуруючим проявом одновісної, кубічної та ромбічної компонент анізотропії.

В даній роботі експериментально було визначено полярні кути орієнтації векторів магнітних моментів окремих кристалічно нееквівалентних підграток заліза відносно напрямку поширення пучка γ-променів (схема – рис. 5, результати – табл. 1).

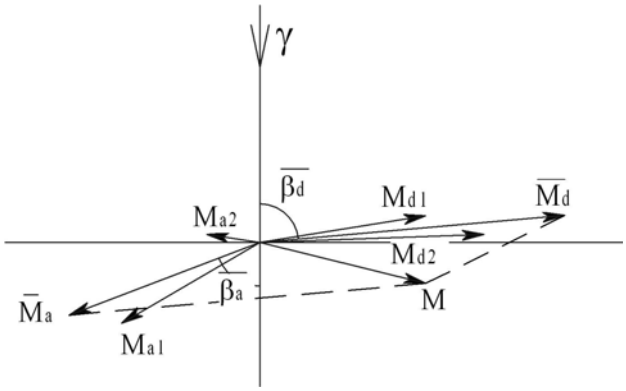

Рис. 5. Просторова орієнтація магнітних моментів атомів заліза окремих підграток та сумарного магнітного моменту відносно хвильового вектора γ - променя

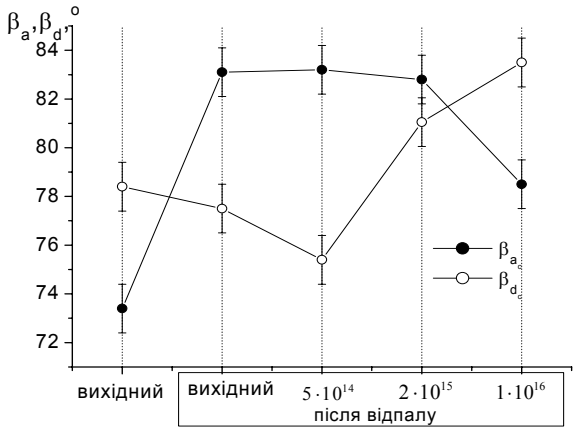

Рис. 6. Зміна полярних кутів орієнтації усереднених векторів магнітних моментів *d*- та *a*-підграток заліза відносно напрямку поширення пучка γ-променів плівок ЗІГ після імплантації фосфором та відпалу

Результати усереднення магнітних моментів для іонів заліза в окта- та тетраедричному оточенні з врахуванням експериментальних заселеностей окремих підграток наведено на рис.6.

Магнітні моменти іонів за підгратками близькі до колінеарного стану і відхилені від нормалі до площини плівки на однаковий кут, що можна пояснити превалюючим характером кубічної складової анізотропії. Спостережувана неколінеарність магнітних моментів *a*- та *d*-підграток може бути пояснена входженням домішкових атомів у ланцюжки надобмінної взаємодії як на на етапі епітаксійного росту плівки [15], так і в процесі відбудови радіаційно-перемішаного порушеного шару. Відпал вихідного зразка спричинює помітні зміни в орієнтації магнітного моменту октапідгратки, викликаючи його поворот в напрямку площини плівки. Можна припустити, що усунення ростових дефектів при відпалі та релаксація гетероструктури з одночасним перерозподілом основних (*Fe*, *Y*) і домішкових (*Pb*, *Pt*) катіонів та змінами симетрії кисневого оточення впливає на величину одновісної анізотропії, яка визначається заселеністю домішковими іонами двох різних типів додекаедричних вузлів, нееквівалентних відносно напрямку росту кристалу на підкладці, орієнтованій в площині (111) [16]. Для відпаленого зразка, імплантованого з дозою $1{,}8 \cdot 10^{15}$ см$^{-2}$, неколінеарність магнітних моментів *a*- та *d*-підграток зникає в межах похибки визначення, що корелює з розрахунковими значеннями заселеності підграток (рис. 2) і є свідченням рівноважності кристаломагнітного впорядкування приповерхневого шару плівки ЗІГ. Проте для даного зразка спостерігається максимальна розбіжність в значеннях $|U_{zz}|$ ГЕП для кристалографічних позицій a_1 та a_2 (табл. 1.). Відомо [17], що ГЕП на ядрах месбауерівського атома створюється як іонами кристалічної гратки ("кристалічний" ГЕП), так і несферичними валентними оболонками самого месбауерівського атома ("валентний" ГЕП). Для ЗІГ основну роль в електронно-ядерних взаємодіях (формування ефективних магнітних полів на ядрах) відіграє контактна Фермі-складова, що визначається густиною *s*-електронів на ядрі Fe^{57} та ступенем їх спінової поляризації внаслідок обмінної взаємодії з 3*d*-електронами [18]. Навіть незначні зміни симетрії і типу оточення месбауерівського ядра різко впливають на ступінь ковалентності хімічного зв'язку, деформуючи розподіл електронної густини в обмінному ланцюжку $Fe_a - O - F_d$. Поява "валентної" складової ГЕП та вплив структурної розвпорядкованості на абсолютні значення компонент "кристалічного" ГЕП, очевидно, чинять визначальний вплив на експериментальні значення $|U_{zz}|$ (табл. 1). Використавши дані рентгеноструктурного аналізу про координати атомів в ідеальній структурі ЗІГ [19] було розраховано компоненти $|U_{zz}|$ "кристалічного" ГЕП, які для кристалографічних напрямків $\{111\}$ та $\{100\}$ кластера з 4480 атомів становлять відповідно $1{,}7 \cdot 10^{21}$ В/м^2 та $2{,}9 \cdot 10^{21}$ В/м^2 (усереднені значення). Порівняння розрахункових значень з експериментальними (табл. 1) утруднене, оскільки неможливо чисельно врахувати вплив "валентної" складової та структурних дефектів, проте можна відзначити якісний збіг $\left(|\bar{U}_{zz}|\right)_d > \left(|\bar{U}_{zz}|\right)_a$.

Висновки

1. У неімплантованому зразку виявлено дублетну компоненту, що відповідає Fe^{2+} у парамагнітному стані; ймовірна причина зміни валентності та виключення іонів *Fe* з надобмінної взаємодії – їх заміщення немагнітними іонами Pb^{2+}, Pb^{4+} та Pt^{4+} в процесі росту.
2. Встановлено наявність двох магнітонееквівалентних позицій Fe^{3+}, які займають тетраедричні вузли, що зумовлюється порушеннями аніонної стехіометрії внаслідок нерівноважності процесу росту плівки та входження в гранатову структуру домішкових атомів з розчину-розплаву на завершальних етапах епітаксії.
3. Відпал неімплантованого зразка викликає зменшення ізомерних зсувів для всіх позицій, що пояснюється температурно-стимульованою релаксацією напруженого стану епітаксійної структури і збільшенням ступеня ковалентності хімічного зв'язку *Fe – O;* тенденція до росту ізомерних зсувів для всіх позицій відпалених імплантованих зразків визначається збільшенням спотворення симетрії октаедричного та тетраедричного оточення заліза та зменшенням ступеня перекриття електронних оболонок Fe^{3+} та O^{2-} .
4. Спостережувана узгоджена зміни H_{ef} для всіх підграток заліза відпалених зразків пояснюється температурою відпалу (900 ^{o}C), при якій віднов.люється як аніонна так і катіона геометрія;
5. Магнітні моменти іонів заліза в *a*- та *d*- підгратках близькі до колінеарного стану та відхилені від нормалі до площини плівки на однаковий кут; спостережувана неколінеарність пояснюється входженням домішкових атомів у ланцюжки надобмінної взаємодії як на на етапі епітаксійного росту плівки, так і в процесі відбудови радіаційно-перемішаного порушеного шару.
6. На експериментальні значення $|U_{zz}|$ визначальний вплив чинять "валентна" складова ГЕП та структурна розвпорядкованість зразка.

Остафійчук Б.К. – д.ф.-м.н., професор;
Пилипів В.М. – к.ф.-м.н., доцент;
Коцюбинський В.О. – к.ф.-м.н., доцент;
Федорів В.Д.– к.ф.-м.н., доцент;
Григорук О.О. – аспірант.

[1] С. Крупинка. *Физика ферритов и родственных им магнитных окислов.-В 2-х томах.* Мир, М. 1т.–359 с, 2т.–502 с. (1976).
[2] N. Adachi, T. Hibi, T. Okuda. Magnetic and magnetooptic properties of LPE Films of Nd-Lu-Y iron garnet // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials,* 177-181, 233-234 (1998).
[3] Б.К. Остафійчук, В.М. Пилипів, В.Д. Федорів, В.О. Коцюбинський, О.О. Григорук. Особливості радіаційного дефектоутворення в приповерхневих шарах епітаксійних плівок залізо-ітрієвого гранату при імплантації іонами фосфору // *Фізика і хімія твердого тіла,* ***8*(1)**, сс. 41-47 (2007).
[4] С.В. Вонсовский. *Магнетизм.* Наука, М. 1032 с. (1971).
[5] S.B. Ubizskii. Orientation states of magnetisation in epitaxial (111)-oriented iron garnet films // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials,* **195,** pp. 575-582 (1999).
[6] R.W. Grant**.** Mössbauer spectroscopy in magnetism: characterization of magnetically ordered compounds, in mössbauer spectroscopy , ed.U. Gonser, Springer-Verlag, 5 pp. 97 (1975).
[7] Б.К. Остафійчук, В.Д. Федорів, В.О. Коцюбинський, В.В. Мокляк. Мессбауерівські дослідження магнітних та електричних надтонких взаємодій в епітаксійних плівках $Y_3Fe_5O_{12}$. // *Фізика і хімія твердого тіла,* **6**(1), сс. 60-64 (2005).
[8] V.G. Kostishyn, V.V. Medved', L.M. Letyuk. Magnetic microstructure and properties of $Y_3Fe_5O_{12}$ epitaxial films with the various contents of Pb ions // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials,* 215-216, 519-521 (2000).
[9] *Элементы и устройства на ЦМД. Справочник* / Под ред. Н.Н. Евтихеева, Б.Н. Наумова. Радио и связь, М. 488 с. (1987).
[10] А.С. Камзин, Ю.Н. Мальцев. Исследование распределения катионов в приповерхностном слое и объеме пленок замещенных ферритов-гранатов // *ФТТ,* **39**(7), сс. 1248-1252 (1997).
[11] Б.К. Остафийчук, 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,* Киев.-1.91. 70 с. (1991).
[12] Б.К. Остафійчук, О.М. Ткачук, В.М. Ткачук, В.Д. Федорів. Механізм формування ефективних магнітних полів та ізомерного зсуву на ядрах Fe^{57} в ітрієвому ферит-гранаті при іонній імплантації кисню // *Журнал фізичних досліджень*, **3**(1), сс. 113-116 (1999).
[13] В.О. Коцюбинський , В.В. Немошкаленко, Б.К. Остафійчук, Я.П. Салій, В.Д. Федорів, П.І. Юрчишин. Кінетика відпалу радіаційних дефектів в епітаксійних плівках залізо-ітрієвого гранату // *Металлофизика и новейшие технологи,* **23**(11), сс. 1455-1464 (2001).
[14] G. Balestrino, S. Lagomarsino, B. Maturi, A Tucciarone. CEMS and x-ray standing waves study of surface

layers in magnetic garnets/ // *IEEE Trans. Magn.,* **20(**5), pp. 1864-1866 (1984).

[15] M.A. Gilleo. *Ferromagnetic insulators: garnets-ferromagnetic materials, V.2.* Ed. by Wohlfarth, Nort-Holland Publishing Company, pp. 1-53 (1980).

[16] R.F. Pearson. Magnetocrystalline anisotropy of rare-earth iron garnets // *J. Appl. Phys.,* **33(**3), pp. 1236-1242 (1962).

[17] П.П. Серегин. *Физика. Физические основы мессбауэровской спектроскопии: Учеб. пособие.* Изд-во СПбГПТУ, СПб. 168с. (2002).

[18] H. Winkler, R. Eisberg, E. Alp, R. Ruffer et all. Pure Nuclear Reflexes and Combined Hyperfine Interactions in YIG // *Z. Phys. B- Condensed Matter.,* **49,** pp. 331-341 (1983).

[19] В.І. Кравець. Дослідження структури імплантованих ферит– гранатових плівок рентгеноструктурним методом. *Автореф. дис. . . канд. фіз. мат. наук: 01. 04. 07* / Інститут металофізики НАН України. К., 17 с. (1998).

B.K. Ostafiychuk, V.M. Pylypiv, V.O. Kotsyubynsky,V.D. Fedoriv, O.O. Grygoruk

The Transformation of Yttrium Iron Ferrite-Garnet Films Magnetic Microstructure after Phosphorus Implantion and Annealing

Vasyl Stefanyk Precarpathion National University,
57 Shevchenko Str., Ivano-Frankivsk, 76000, Ukraine

The magnetic microstructure's changes together with the intracrystal electric fields transformations in phosphorus implanted (E = 65 keV, $D = 5\cdot10^{14}$, $1{,}8\cdot10^{15}$, $1\cdot10^{16}$ cm^{-2}) epitaxial yttrium iron garnet films on the base of Mëssbauer spectroscopy datas are investigated. The presence of two magnetic nonequivalent positions of tetra-coordinated Fe^{3+} and tetra-coordinated paramagnetic Fe^{2+} are detected. The space orientations of different sublattices magnetic moments are calculated; the dynamic of orientations changes are considered. The causes of Mëssbauer spectra's parameters changes after implantation and annealing are discussed.

Key words: yttrium iron garnet, ion implantation, radiation defects, Mëssbauer spectroscopy.