

УДК 539.23: 537.311

Б.К. Остафійчук, В.Д. Федорів, Л.С. Яблонь, І.П. Яремій, Б.І. Яворський\*  
**Залежність ступеня деформації LaGa-заміщених ферит-гранатових плівок від дози іонної імплантації**

*Прикарпатський університет імені Василя Стефаника,  
\*Івано-Франківська державна медична академія*

В роботі проведено дослідження структури приповерхневих шарів галій-лантан-заміщених ФГП імплантованих іонами фтору з енергією 90 кеВ в межах доз  $1 \cdot 10^{13}$ - $2 \cdot 10^{14}$  іон/см<sup>2</sup>. Обчислено профілі відносної зміни міжплощинної відстані при різних дозах опромінення та запропоновано механізм формування деформованого шару. Встановлено залежність ступеня деформації від дози іонної імплантації.

**Ключові слова:** енергія зв'язку, рідкісноземельні елементи, теплота адсорбції, поверхня перехідних металів.

*Стаття постуила до редакції 27.08.2002; прийнята до друку 23.09.2002*

## **I. Постановка задачі і об'єкти дослідження**

В останні роки зріс інтерес до використання ферит-гранатових плівок (ФГП) в пристроях НВЧ-діапазону, які працюють на магнітостатичних хвилях (МСХ). Однією з основних вимог до таких пристроїв є наявність мінімальних магнітних втрат при поширенні МСХ, що відповідає малій ширині лінії феромагнітного резонансу (ФМР).

Зменшення ширини лінії ФМР можна досягнути зміною складу плівки, тобто заміщенням невеликої кількості іонів Y іонами La [1] чи іонами Ga [2]. З ростом вмісту галію в плівках ширина ліній ФМР зменшується, досягаючи мінімального значення при  $x = 0,18$  і збільшується поле анізотропії, що зв'язано з ростом пружних напруг, які виникають в системі плівка-підкладка через невідповідність параметрів їх кристалічних ґраток [2]. Для отримання товстих плівок (>10 мкм) ферит-гранату ітрію на підкладці ГГГ (гадоліній-галієвий гранат) в склад плівки вводять іони La<sup>3+</sup>, що дозволяє зменшити різницю між сталими ґратки плівки і підкладки [3]. Для мінімізації даної різниці можна вводити одночасно атоми La і Ga. Такі LaGa-заміщені плівки залізо-ітрієвого гранату використовуються в багатошарових пристроях на МСХ з метою покращення дисперсійних характеристик.

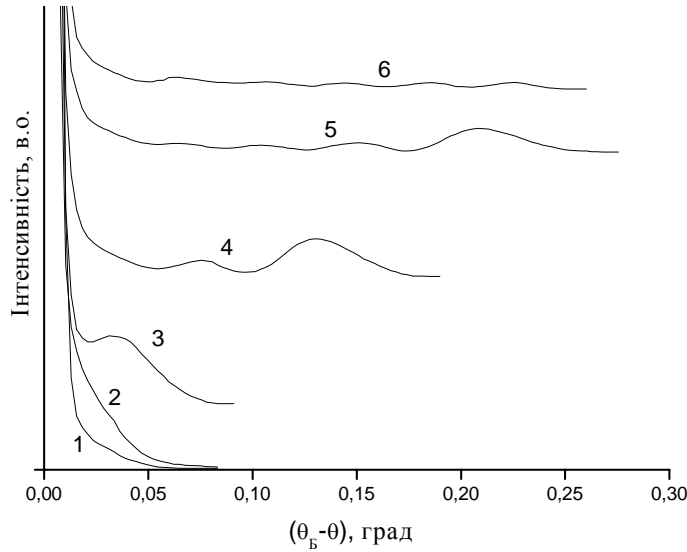
З метою пошуку можливості ціленаправленої модифікації фізико-хімічних властивостей

приповерхневих шарів LaGa-заміщених ферит-гранатових плівок були проведені експериментальні і теоретичні дослідження впливу дози імплантованих іонів F<sup>+</sup> на їх кристалічну мікроструктуру. Плівки Y<sub>2,8</sub>La<sub>0,2</sub>Fe<sub>4,545</sub>Ga<sub>0,455</sub>O<sub>12</sub> товщиною 2,44 мкм опромінювались іонами F<sup>+</sup> з енергією 90 кеВ в межах доз  $1 \cdot 10^{13}$  –  $2 \cdot 10^{14}$  іон/см<sup>2</sup>. Імплантація проводилась при кімнатній температурі в геометрії, що виключає каналювання.

## **II. Методика дослідження та обробки експериментальних результатів**

При дослідженні структури імплантованих шарів було використано методи рентгеноструктурного аналізу та математичного моделювання. Криві дифракційного відбивання (КДВ) були одержані методом двокристалічної рентгенівської спектроскопії на установці ДРОН-2.0 в симетричній геометрії Бреґа, відбиваюча площина <444>, з використанням Cu-K $\alpha$ -випромінювання.

КДВ досліджуваних зразків аналізували на основі динамічної теорії дифракції рентгенівських променів [4]. За КДВ розраховано профілі відносної зміни міжплощинної відстані іонно-імплантованого (II) шару з глибиною. Загальний вигляд вказаних профілів, як і в роботі [5], вибирався у вигляді асиметричної гаусіани:



**Рис. 1.** Фрагменти експериментальних КДВ La, Ga-заміщених ЗІГ, опромінених іонами F<sup>+</sup> дозами: 1 – не імплантований; 2 -  $1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ ; 3 -  $2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ ; 4 -  $6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ ; 5 -  $1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ ; 6 -  $2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$

$$D = \begin{cases} D_{\max} \exp[-(z - R_P)^2 / \sigma_1^2], & \text{якщо } z < R_P \\ D_{\max} \exp[-(z - R_P)^2 / \sigma_2^2], & \text{якщо } z \geq R_P \end{cases}$$

де  $D = \frac{\Delta d}{d}$ ,  $z$  – відстань, яка відраховується від поверхні в глибину кристалу;

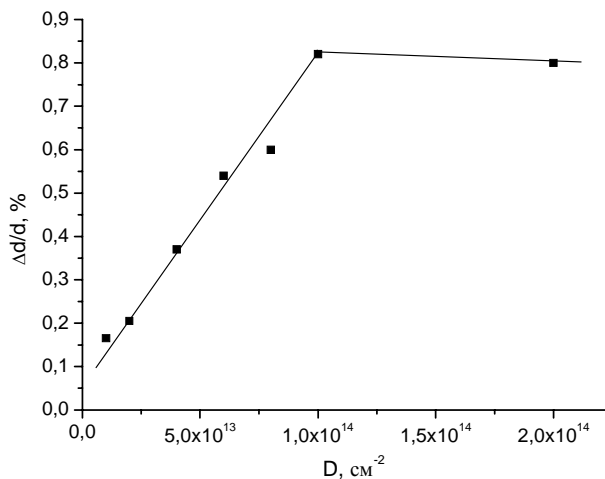
$R_P$  – точка шивки гаусіан;

$\sigma_1$  і  $\sigma_2$  – параметри гаусіан, які характеризують їх ширину на піввисоті.

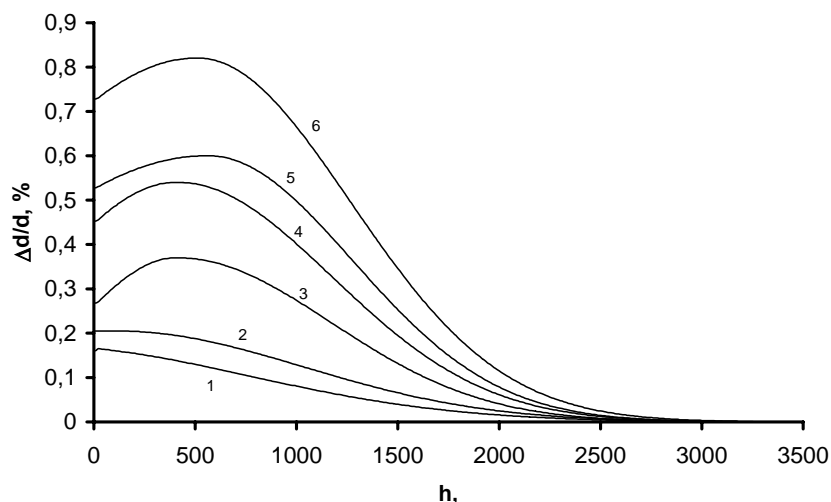
Результати експерименту та їх обговорення

В процесі імплантації ФГ плівок іонами F<sup>+</sup> відбувається структурне розупорядкування атомів в

кристалічній ґратці, що приводить до зростання міжплощинної відстані в імплантованому шарі. Внаслідок цього, порушений шар відбиває рентгенівські промені під дещо іншим кутом, тобто утворюється додаткова осциляційна структура. На КДВ (рис. 1), отри-маній від ФГП імплантованої дозою  $1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ , є вплив з сторони малих кутів основного брегівського піку плівки, тобто деформація плівки незначна. Зростання дози



**Рис. 2.** Залежність відносної максимальної деформації плівки імплантованої іонами F<sup>+</sup> від дози



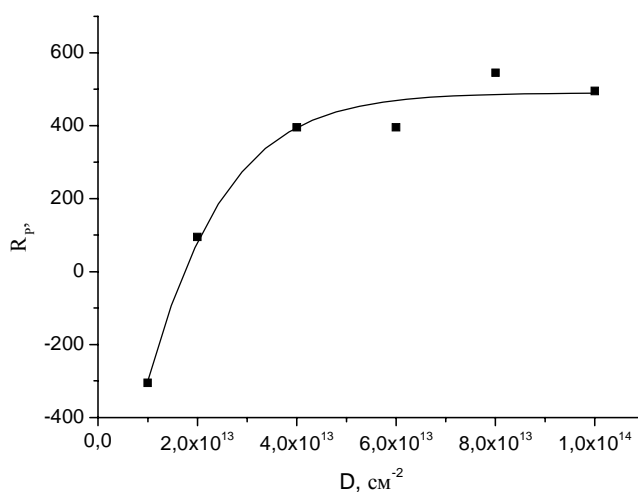
**Рис. 3.** Профілі відносної зміни міжплощинної відстані для La, Ga-заміщених плівок, опромінених іонами  $F^+$  дозами: 1 -  $1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ ; 2 -  $2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ ; 3 -  $4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ ; 4 -  $6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ ; 5 -  $8 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ ; 6 -  $1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$

імплантації до  $1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$  приводить до виникнення на КДВ додаткових осциляцій, а при дозі  $2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$  спостерігається зменшення інтенсивності останньої осциляції, що свідчить про часткову аморфізацію шару з максимальною деформацією.

Залежність відносної максимальної деформації плівки імпантованої іонами  $F^+$  від дози представлено на рис. 2. При дозах, менших  $1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ , відбувається поступове накопичення точкових дефектів, що підтверджується зростанням відносної зміни міжплощинної відстані. Як бачимо, залежність величини максимальної відносної деформації ґратки від дози імплантації на проміжку  $1 \cdot 10^{13}$ - $1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$  є лінійною, а при подальшому зростанні дози, відносна зміна міжплощинної відстані зменшується, досягаючи при дозі  $2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$  0,8 %. Саме проміжну дозу в інтервалі від  $1 \cdot 10^{14}$ - $2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ , очевидно, можна назвати критичною, що не суперечить даним

роботи [6], де показано, що при імплантації іонів  $F^+$  з енергією 43 кеВ при 20оС поріг аморфізації складає  $\sim 2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ . Зменшення критичної дози в нашому випадку можна пояснити підвищенням енергії імпантованих іонів.

На рис. 3 зображені, обчислені за допомогою рівнянь Такагі, профілі відносної зміни міжплощинної відстані. Як видно, при низьких дозах ( $1 \cdot 10^{13}$ - $2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ ) вони є монотонними, а при зростанні дози стають немонотонними з максимумами на глибині, яка співпадає з розрахованою за допомогою програми SRIM-2000 відстанню від поверхні, на якій відбуваються максимальні енергетичні втрати. Згідно проведених розрахунків, товщина деформованого шару L в межах точності обчислень при всіх дозах однакова і досягає  $\sim 3100 \text{ \AA}$  (під товщиною порушеного шару розуміється глибина від поверхні, на якій деформація



**Рис. 4.** Залежність положення максимуму деформації  $R_p$  від дози

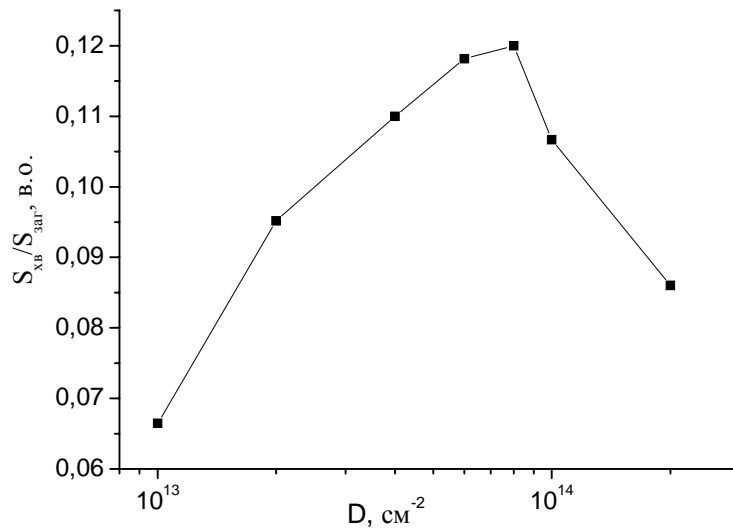


Рис. 5. Залежність  $S_{xb}/S_{zag}$  від дози опромінення.

не перевищує 0,01 %). Залежність параметра Rp від дози імплантації представлено на рис. 4. Максимуми деформації при імплантації дозою  $1 \cdot 10^{13}$ - $2 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$  знаходяться на поверхні, при зростанні дози зміщуються в глибину півки, виходячи при дозах, більших  $4 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ , на плато ( $h = 500 \text{ \AA}$ ).

Таку поведінку вказаного параметра для доз, нижчих критичної, можна пояснити наступним чином. В роботі [7] запропоновано можливий механізм аморфізації гранатових структур, основою якого є порівняння теоретично обчисленої за результатами моделювання середньої густини енергії, виділеної на один атом, з критичною енергією, необхідною для плавлення матеріалу матриці (1 еВ/атом). Розрахунки енерговиділення

вздовж траєкторії первинного іона в ядрну і електронну підсистему мішені були проведені для іонів N+, E = 80 keV, однак, зважаючи на сусідство як азоту, так і фтору з киснем в періодичній системі, висновки, отримані при моделюванні імплантації іонів N+ можуть бути використані для пояснення результатів, отриманих при імплантації іонів F+.

В глибині порушеного шару енергія, передана як в ядрну, так і в електронну підсистему мішені, не перевищує критичної, тобто утворення і ріст аморфної фази відбувається з набором дози в результаті накопичення радіаційних дефектів на глибині, яка відповідає положенню максимуму переданої в ядрну підсистему енергії. В приповерхневому шарі кожен іон втрачає енергію

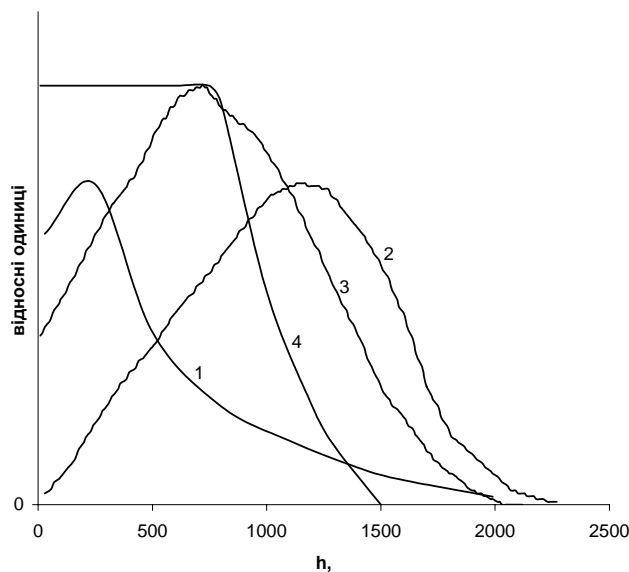


Рис. 6. Експериментальний (1) ( $D = 4 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ ) та теоретично обчислений (2) профілі концентрації іонів фтору, профіль ядерних енергетичних втрат (3) та дефектів в підґратці ітрію (4)

більшу критичної, тобто відбувається утворення окремих приповерхневих аморфних зон, кількість яких з ростом дози збільшується аж до їх злиття.

Очевидно, що при низьких дозах, доки профілі відносної зміни міжплощинної відстані монотонні, основний вклад у деформацію вносять якраз приповерхневі зони. При зростанні дози відбувається швидке накопичення дефектів в глибині порушеного шару, в результаті чого поле напруг в II шарі перерозподіляється, і відбувається зміщення максимуму деформації в область основних ядерних втрат.

Структурно чутливим до дефектів кристалічної ґратки параметром є інтегральна відбиваюча здатність [8]. В даній роботі проводиться дослідження приповерхневого порушеного шару, який розсіює рентгенівські промені під кутом, відмінним від кута Бреґа плівки і є причиною виникнення додаткових осциляцій. Для характеристики порушеного шару використовували відношення площі під додатковою осциляційною структурою до площі під всією КДВ. Залежність  $S_{хв}/S_{заг}(D)$  представлено на рис. 5. Як видно, при наближенні до дози  $1.10^{14} \text{ см}^{-2}$  відношення  $S_{хв}/S_{заг}$  зменшується, тобто збільшується кількість дефектів в імплантованому шарі, що приводить до його аморфізації.

За даними [9], при дозі  $4.10^{14} \text{ см}^{-2}$  додаткова осциляційна структура на КДВ зникає, тобто II шар стає «невидимим» для рентгенівського випромінювання, а це означає що при дозі  $4.10^{14} \text{ см}^{-2}$  відбувається повна аморфізація порушеного шару. Зменшення відношення  $S_{хв}/S_{заг}$  для доз, менших критичної (при незмінній товщині порушеного шару), пов'язане з тим, що при низьких дозах деформація значної частини імплантованого шару є малою, і, відповідно, частина інтенсивності рентгенівських променів, відбитих від порушеного шару, попадає під головний брегівський пік плівки і не враховується в  $S_{хв}$ .

В [9, 10] приведений експериментальний профіль концентрації фтору ( $D = 4.10^{14} \text{ см}^{-2}$ ), отриманий за допомогою методу ядерних реакцій  $^{19}\text{F}(p, \alpha, \beta)^{16}\text{O}$  та профіль дефектів в додекаедричній підґратці. Як видно з рис. 6, максимум експериментального профілю концентрації іонів фтору знаходиться біля поверхні, а пологий «хвіст» тягнеться до глибини  $\sim 2000 \text{ \AA}$ , що співпадає з результатами моделювання з допомогою програми SRIM-2000. Суттєві розбіжності в положеннях максимуму концентрації, пояснюються дифузиею фтору до поверхні, що відбувається, очевидно, за вакансійним механізмом у

зв'язку із високою дефектністю II шару, особливо в аніонній підґратці [11]. На користь цього припущення свідчить той факт, що при введенні іонів фтору в процесі синтезу феритів зі структурою гранату фтор надає перевагу вузлам аніонної підґратки [12].

Порівнюючи профілі ядерних енергетичних втрат, дефектів в підґратці ітрію та відносної зміни міжплощинної відстані для вказаних доз, можна зробити висновок, що напруги в II шарі спричинюються головним чином вибитими іонами матриці, а не іонами фтору, про що свідчить співпадання діапазонів глибин з з максимальними значеннями для вказаних вище профілів.

### III. Висновки

При імплантації іонів  $\text{F}^+$  структурне розупорядкування поверхні плівки і в її глибині відбувається за різними механізмами, які характеризуються різною швидкістю дефектоутворення з ростом дози опромінення. При малих дозах переважний вклад у деформацію вносять приповерхневі аморфізовані зони (профіль відносної зміни міжплощинної відстані монотонний), при більших дозах (докритичних) деформація відбувається за рахунок накопичення дефектів в глибині порушеного шару (профілі відносної зміни міжплощинної відстані стають немонотонними). Критичною дозою при імплантації іонів  $\text{F}^+$  з енергією 90 кеВ можна вважати дозу проміжну між  $1.10^{14}$  та  $2.10^{14} \text{ см}^{-2}$ .

З аналізу експериментального та теоретично обчисленого профілів концентрації іонів фтору та профілів ядерних енергетичних втрат та дефектів в підґратці ітрію, а також профілів відносної зміни міжплощинної відстані, впливає, що напруги в II шарі спричинюються головним чином вибитими іонами матриці, а не іонами фтору.

**Остафійчук Б.К.** – зав. каф. матеріалознавства і новітніх технологій, доктор фіз.-мат. наук., професор;

**Федорів В.Д.** – доцент кафедри матеріалознавства і новітніх технологій, канд. фіз.-мат. наук;

**Яблонь Л.С.** – аспірант II року навчання;

**Яремій І.П.** – м.Київ, інститут металофізики, мнс.

**Яворський Б.І.** – канд. фіз.-мат., наук, доцент кафедри біофізики.

- [1] Х.Л.Гласс. Ферритовые пленки для СВЧ-устройств // *ТИИЭР*, **76(2)** сс. 64-72 (1988).
- [2] С.И.Ющук, П.С.Костюк, И.Е.Лопатинский. Феррогранатовые пленки с повышенной термостабильностью магнитных параметров // *ЖТФ*, **(68)9** сс. 46-50 (1998).
- [3] *IEEE Trans. Magn.*, **(13)5**, ss.1238-1240 (1977).
- [4] А.М.Афанасьев, В.Г.Кон Внешний фотоэффект при дифракции рентгеновских лучей в кристаллах с нарушенным поверхностным слоем // *Журн. эксперим. и теор. физ.*, **(74)1**, сс. 300-313 (1978).
- [5] G. Balestrino, S. Lagomarsino, E. Milani, P. Gerard et al. Reconstruction mechanism in ion-implanted yttrium-iron garnet films // *J.Appl.Phys.*, **(63)8**, pp. 2751-2755 (1988).

- [6] Дж.С. Вильямса, Дж.М. Поута. *Ионная имплантация и лучевая технология*. Наукова думка, Київ 358 с. (1988).
- [7] Б.К.Остафійчук, В.М.Ткачук, О.М.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)
- [8] Л.И. Даценко, В.Б. Молодкин, М.Е. Осинковский. *Динамическое рассеяние рентгеновских лучей реальными кристаллами*. Наукова думка, К. 200 с., 1988.
- [9] Б.К. Остафійчук, В.Д. Федорив, В.А. Олейник, Е.И. Зубко, О.Н. Ворончак. Структурное и магнитное разупорядочение в феррит-гранатовых пленках, имплантированных ионами фтора // *ФТТ*, (32)11, сс. 3422-3424. (1990).
- [10] В.Д. Федорів Вплив іонної імплантації і відпалу на формування кристалічної і магнітної структури ферит-гранатових плівок, що містять ЦМД // Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук, Київ, ІМФ АН УРСР (1992).
- [11] В.В. Немошкаленко, Б.К. Остафійчук, В.А. Олейник, В.Д. Федорив. Структура феррит-гранатових пленок, имплантированных ионами бора // *Письма в ЖТФ*., (15)23. сс. 33-37 (1989).
- [12] A. Morell, V. Tanguy, F. Menil, J. Portier. Sur de nouveaux ferrites oxyfluores d'yttrium ou de gadolinium a structure grenat // *J. Sol. St. Chem.*, (8)3, pp. 253-259 (1973).

В.К. Ostafiychuk, V.D. Fedoriv, L.S. Yablon, I.P. Yaremiy, B.I. Yavorskiy

## **Doses dependents of relative deformations degree for La, Ga-substituted ferrit-garnet films**

*Vasyl Stefanyk Prekarpathian University*

The investigations structure of implanted layers of the Ga, La-substituted ferrit-garnet films implanted by  $F^+$  ions with energy 90 keV and doses  $1 \cdot 10^{13}$ - $2 \cdot 10^{14}$   $sm^{-2}$ . The relative deformation modification on implanted layer thickness at different implantation doses. The mechanism of defect structure formation are proposed. Dependents between implantation doses and relative deformation of crystal structure are obtained.