

Яремій І.П.

## КРИСТАЛІЧНА СТРУКТУРА ПЛІВОК ЗІГ РІЗНОЇ ТОВЩИНИ

*В роботі проведено аналіз трансформації кристалічної структури епітаксійних плівок ЗІГ різної товщини. Показано, що елементарна комірка плівок ЗІГ є ромбодрично деформована, а ступінь деформації суттєво залежить від товщини плівки.*

Епітаксійні плівки залізо-ітрієвого гранату (ЗІГ) використовуються у техніці надвисоких частот та для створення сенсорних пристроїв візуалізації просторового розподілу неоднорідних магнітних полів [1]. На значну залежність магнітних характеристик гранатових плівок від їх структурної досконалості вказується в [2]. В роботі [3] показано, що плівки ЗІГ володіють великою структурною досконалістю, однак в них все ж існують мікронапруги, які виникають за рахунок різниці в сталих ґратки плівки і підкладки, а також за рахунок різниці в їх термічних коефіцієнтах. Крім того, вирощені плівки в повній мірі відтворюють дефекти, які існували на поверхні підкладки [4]. Із вказаних причин відбувається підвищення потенціальної енергії гетероструктури, що сприяє погіршенню структурної досконалості епітаксійних плівок, а перевага одного з механізмів виникнення механічних напруг при певній товщині плівки призводить до різної структурної досконалості та магнітних характеристик плівок з різною товщиною навіть при вирощуванні в однакових умовах. Тому метою даної роботи було вивчення трансформації кристалічної ґратки епітаксійних плівок ЗІГ різної товщини.

Для дослідження використовувалися плівки ЗІГ товщинами 0,49; 2,9; 10,3 та 30 мкм, вирощені на підкладках галій-гадолінієвого гранату (ГГГ) з площиною зрізу  $\langle 111 \rangle$ . Дослідження проводилися на двокристальному рентгенівському дифрактометрі ДРОН-3.0 в  $Si_{ka1}$  випромінюванні. В якості монохроматора використовувався досконалий монокристал ГГГ. Міжплощинна відстань визначалася методом Бонда для відбивань (444), (888) та (880).

При вирощуванні епітаксійних структур, при ненульовій різниці в сталих ґратки плівки і підкладки, плівки отримуються деформованими таким чином, що трансляція її ґратки в площині плівки повторює трансляцію структури підкладки. Враховуючи співвідношення товщин підкладки і плівки, останню можна

розглядати як деформовану в напрямку, перпендикулярному площині росту (рис. 1).

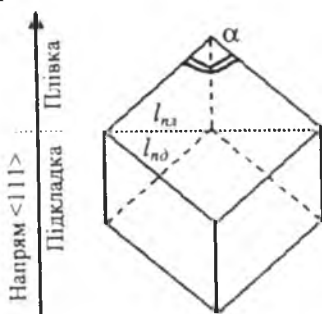


Рис. 1. Елементарний ромбодр.

В роботі [5] показано, що плівки ЗІГ, вирощені на площині зрізу  $\langle 111 \rangle$  мають ромбодричну структуру, а для характеристики ступеня ромбодризації введений параметр  $\delta$ :  $\delta = 1 - \frac{d_{111}^2}{d_{100}^2}$ . Крім того, було запропоновано критерій існування дислокацій невідповідності за рахунок різниці в сталих ґратки плівка-підкладка: дислокації відсутні

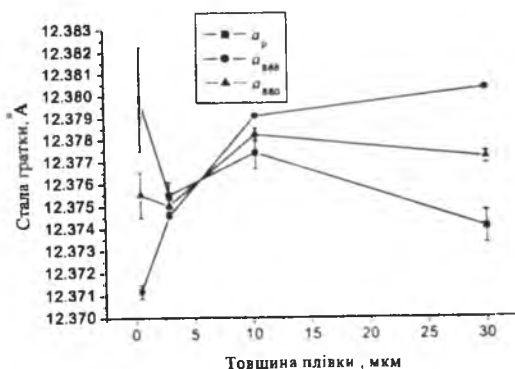


Рис. 2. Залежність експериментально визначених параметрів ґратки від товщини плівки.

при  $\delta = \cos(\alpha)$  (\*), де  $\alpha$  – кут при вершині ромбоедра; дислокації існують при порушенні цієї рівності.

Для порівняння та інтерпретації одержаних результатів, крім параметрів ґратки ромбоедрично-деформованої плівки  $a_p$  та кута при вершині ромбоедра  $\alpha$ , використовувалися обчислені параметри псевдокубічної ґратки  $a_{hkl} = d_{hkl} \sqrt{h^2 + k^2 + l^2}$  у припущенні, що деформація відсутня.

На рис. 2 представлені графіки експериментально визначених параметрів ґратки  $a_p$ ,  $a_{888}$  та  $a_{880}$  від товщини зразка. Як бачимо, на відміну від монотонно зростаючого з товщиною плівки параметра  $a_{888}$ , який характеризує зміну міжплощинної відстані в перпендикулярному до площини зрізу напрямку, зміна параметра  $a_{880}$  (характеризує міжплощинну відстань в напрямку  $\approx 35^\circ$  до нормалі) має немонотонний характер. Монотонна зміна параметра  $a_{888}$  пов'язана з тим, що в напрямку  $\langle 111 \rangle$  в процесі росту для зміщення атомів перешкод немає. При охолодженні вирощених плівок, в них, крім напруг викликаних розходженням сталих ґраток плівки і підкладки, виникають напруги пов'язані різницею в їх термічних коефіцієнтах. Дані напруги, в основному, приводять до зміщення атомів в напрямку, перпендикулярному поверхні плівки. Характер зміни параметра  $a_{880}$ , імовірно, пов'язаний зі зміною співвідношень у вкладах вище вказаних причин виникнення деформації для плівок різної товщини. Залежність кута при вершині ромбоедра від товщини плівки представлена на рис.3.

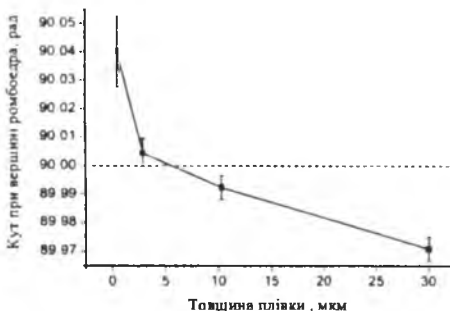


Рис. 3. Залежність кута при вершині ромбоедра від товщини плівки.

Проведемо аналіз трансформації кристалічної ґратки кожної з плівок.

З рис. 2 і 3 бачимо, що у плівки товщиною 0,49мкм стала ґратки зростає до значень, не характерних для чистого ЗІГ (12,3760Å [4]), а кут при вершині ромба суттєво перевищує 90°. З критерію (\*) випливає, що в даній плівці дислокацій невідповідності немає, тобто плівка, зважаючи на її малу товщину, є розтягнутою в площині росту до повного співпадання параметрів  $l_{nd}$  і  $l_{na}$  для плівки і підкладки відповідно.

При товщині плівки 2,9 мкм кристалічна ґратка набуває характерних для монокристалів ЗІГ розмірів і форми ( $a \approx 12,376 \text{Å}$ ,  $\alpha \approx 90^\circ$ ). Оцінюючи за допомогою співвідношення [5]  $\sigma = \frac{(l_{na} - l_{nd})^2}{(l_{nd} l_{na})^2}$

густину дислокацій невідповідності ( $l_{na} = a_{no} \sqrt{2}$ ,  $l_{nd} = 2a_p \sin(\alpha/2)$ ), з рис. 4 бачимо, що при переході до даної товщини відбувається зростання їх кількості.

Імовірно, при цій товщині відбувається деяка мінімізація енергії

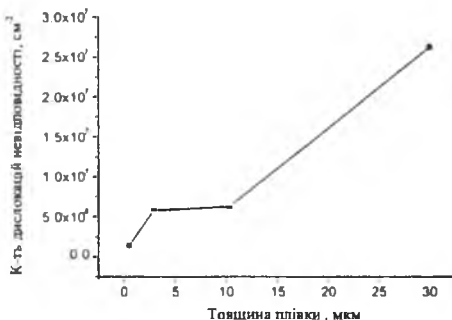


Рис. 4. Залежність кількості дислокацій невідповідності від товщини плівки

плівки, пов'язана як зі зняттям напруг у плівці через утворення дислокацій невідповідності, так і з особливостями розподілу елементів по товщині плівки. За даними [3], при вивченні розподілу заліза по підґратках заміщених ЗІГ, було виявлено зростання відношення інтегральної інтенсивності підспектрів в  $a$ - і  $d$ -позиціях на глибині 2,2 мкм, яке зв'язане з перерозподілом іонів заліза за

кристалографічними позиціями. У випадку плівки ЗІГ, подібні зміни могли відбуватися як за рахунок перерозподілу іонів заліза між окта- та тетра-підгратками, так і за рахунок входження технологічних домішок, що в загальному випадку приводить до зміни параметрів, які характеризують кристалічну структуру.

При подальшому зростанні товщини плівки відбувається зростання сталої ґратки з одночасним зменшенням кута при вершині ромбоєдра. Величина  $I_{\text{пл}}$ , а отже і кількість дислокацій невідповідності, залишається майже без змін, що очевидно, пов'язане з тим, що при даній товщині існуючих в плівці напругах енергетично вигідніша деформація кристалічної ґратки плівки, ніж утворення дислокацій невідповідності. Така ситуація зберігається до товщин плівок  $\sim 15$  мкм, при яких, за даними [6], гетероструктура володіє найбільшою енергією. Подальше зростання товщини плівки приводить до релаксації накопичених напруг, що відображається в різкому зростанні кількості дислокацій невідповідності при товщині плівки 30 мкм. Спотворення елементарних комірок ЗІГ у вигляді ромбоєдрів, витягнутих вздовж нормалі до площини плівки, та зменшення сталої ґратки плівки, очевидно, є наслідком зміни складу шихти в процесі росту (що особливо проявляється при вирощуванні товстих плівок) [7]. Крім того, при даних умовах зйомки одержувалася інформація тільки з поверхневого шару плівки товщиною  $\sim 10$  мкм.

За одержаними при визначенні міжплощинних відстаней кривими дифракційного відбивання було зроблено якісну оцінку ступеня дефектності плівок різної товщини. Як відомо, наявність в монокристалі дефектів II роду (за Кривоглазом) приводить до уширення дифракційної лінії (фізичного уширення) [8]. Для конкретного типу дефектів ступінь цього уширення, в залежності від кута падіння рентгенівського променя, змінюється за певним законом. Крім того, можливість впливу певного типу дефектів на уширення дифракційної лінії залежить від типу зйомки. Зважаючи на те, що в досліджуваних плівках ЗІГ структурна недосконалість є незначною, і в деяких випадках параметри, які характеризують цю недосконалість, наближаються до меж чутливості методу, для характеристики дефектності структури плівок використовувалася інтегральна ширина брегівського піка відбивання від плівки. Розділення фізичного уширення на складові, пов'язані з різними механізмами уширення рентгенівської лінії, та визначення їх числових характеристик у цій

роботі не проводилось. Метод  $\omega$ -сканування з широкою щілиною, який використовувався при зйомці кривих дифракційного відбивання, дає можливість здійснювати сканування одночасно вздовж і впоперек вузла оберненої ґратки [8], тобто одержані головні брегівські піки плівки несуть інформацію про всі дефекти структури, які реєструються рентгенівськими методами.

Як видно з рис. 5, залежність інтегральної ширини брегівського піка плівки від її товщини має характер, подібний до графіків  $a(h)$ ,  $a_{888}(h)$ ,  $a_{880}(h)$ . Найменшим фізичним уширенням, і, відповідно, найбільшою структурною досконалістю характеризуються плівки ЗІГ з товщиною 2,9 мкм. Одержані результати корелюють з результатами роботи [9], де методом резерфордівського зворотнього розсіювання досліджувався вплив товщини плівки ЗІГ на процеси дефектоутворення при іонній імплантації. Залежність параметра дефектоутворення, а також величини максимальної відносної деформації від товщини плівки, має вигляд аналогічний вигляду кривої представленої на рис. 5 (мінімум – при  $h=2,14$  мкм). Очевидно, що зменшення радіаційних пошкоджень при імплантації плівки товщиною 2,14 мкм пов'язане з відсутністю факторів, які стимулюють ріст кількості радіаційних дефектів. Цей факт підтверджує наші припущення про те, що в інтервалі товщин  $\sim 2-3$  мкм потенціальна енергія плівки є мінімальною. Погіршення структурної досконалісті плівки з товщиною  $\sim 0,49$  мкм викликане наявністю в ній мікронапруг, пов'язаних з різницею в сталих ґратки плівка-підкладка та наявністю перехідних шарів плівка-підкладка та плівка-повітря [10]. Зростання параметра дефектоутворення для плівки даної товщини підтверджує існування в них значних напруг, що відображається у пониженні енергії утворення дефектів і, відповідно, сприянні їх появи при іонній імплантації. Причини уширення дифракційної лінії при великих товщинах плівок ( $\sim 10-30$  мкм) вказані вище.

За результатами даної роботи можна зробити наступні висновки.

- Епітаксійні плівки ЗІГ мають ромбоєдричну кристалічну структуру. Ступінь ромбоєдризації залежить від товщини плівки.
- Субмікронні плівки ЗІГ деформуються у площині плівки до повного співпадання параметрів  $l$  плівки і підкладки, а елементарні ромбоєдри розтягнуті в площині плівки.
- В плівках, товщини яких перевищують 3 мкм, елементарні ромбоєдри розтягнуті в напрямку, перпендикулярному площині плівки. При цьому, в інтервалі товщин 3-10 мкм параметр  $l_{\perp}$

залишається сталим при зростанні сталої ґратки, а при більших товщинах  $l_{кл}$  і стала ґратки зменшуються за рахунок зростання кількості дислокацій невідповідності. Така поведінка пояснюється зняттям напруг, максимум яких припадає на товщину 15 мкм.

• Структурна досконалість плівок ЗІГ залежить від товщини плівки. Найбільшою структурною досконалістю володіють плівки, товщина яких лежить в межах 2-3 мкм, що пов'язано з мінімумом потенціальної енергії плівки при даних товщинах.

*The crystal structure of epitaxial ferrite garnet films with the different thickness has been studied. The rhomboedrical deformation of garnet films unit cell and depending strain on the garnet films thickness was obtained.*

[1]. Ubizskii S.B. Orientation states of magnetisation in epitaxial (111)-oriented iron garnet films// Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 1999. – V. 195. – P. 575-582.

[2]. Ющук С.І., Юр'єв С.О., Ніколайчук В.Й., Осипишин Л.І. Вплив орієнтації та якості обробки підкладок на резонансні властивості епітаксійних плівок залізо-ітрієвого гранату // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Електроніка. – 2001. – № 430. – С. 17-21.

[3]. Федорив В.Д. Влияние ионной имплантации и отжига на формирование кристаллической и магнитной структуры феррит-гранатовых пленок, содержащих ЦМД. Диссертация на соиск. кандидата физ.-мат. наук. Киев, И-тут металлофизики. – 1990. – 172 с.

[4]. Элементы и устройства на цилиндрических магнитных доменах. Справочник. Под ред. Евтихеева Н.Н., Наумова Б.Н., М.: Радио и связь, – 1987. – 488 с.

[5]. Руткин О.Г., Агеев А.Н., Духовская Е.Л., Саксонов Ю.Г., Шер Н.С. Деформация кристаллической решетки эпитаксиальных пленок итрий-железного граната, выращенных на плоскости (111) подложки из гадолиний-галиевого граната // Письма в ЖТФ. – 1982. – Т. 52. – № 12. – С. 82-86.

[6]. Родриг Г.П. Этапы развития ферритовой аппаратуры диапазона СВЧ // ТИИЭР. – 1988. – Т. 76. – № 2. – С. 29-50.

[7]. Конаков С.П., Ткалич А.К., Шупегин М.Л. Структурные неоднородности эпитаксиальных магнитных гранатов, содержащих ионы висмута // Межвузовский сборник: Материалы электронной техники. – Москва, 1989. – С. 83-88.

Структура и физические свойства твердого тела. Под ред. Палатника Л.С. М.: Вища школа, 1983. – 264 с.

[8]. Остафийчук Б.К., Олейник В.А., Пылыпив В.М., Семен Б.Т., Смеркло Л.М., Яворский Б. И., Кравец В. И., Коваль И. В. Кристаллическая и магнитная структура имплантированных слоев монокристаллических пленок железо-итриевого граната. – К.: 1991. – 70 с. (Препр. /АН Украины. Институт металлофизики; 1.91).

[9]. Ющук С.И. Слоистая структура эпитаксиальных пленок железо-итриевого граната // ЖТФ. – 1999. – Т. 69. – Вып. 12. – С. 62-64.