

© 2014 р. І.М. Фодчук¹, В.В. Довганюк¹, І.І. Гуцуляк¹,
А.О. Коцюбинський¹, П.М. Литвин², Н.В. Сафрюк², В.П. Кладько²,
І.М. Сиворотка³, О.Ю. Бончик⁴, М.С. Солодкий¹

¹Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, Чернівці

²Інститут фізики напівпровідників імені В.Є. Лашкарьова НАНУ, Київ

³Науково-виробниче підприємство "Карат", Львів

⁴Інститут прикладних проблем механіки і математики НАНУ, Львів

ЗАЛЕЖНІСТЬ МАГНІТНОЇ ДОМЕННОЇ СТРУКТУРИ ГРАНАТОВИХ СПЛУК ВІД СТРУКТУРНИХ ПАРАМЕТРІВ

Використовуючи високороздільну X-хвильову дифрактометрію, скануючу атомно- та магнітно-силову мікроскопію та метод моделювання зображень оберненого простору, досліджено кристалічну та магнітну доменну структуру плівок гранатів різного складу та товщини. Встановлено, що смугова доменна структура сильно залежить від багатьох параметрів плівок, зокрема від товщини, структурної досконалості поверхні та зразка в цілому. Оцінено оптимальне значення товщини вирощування ферогранатів, при якій домени є найбільш впорядкованими. Результати досліджень є важливими в розумінні структурних особливостей тонких плівок та мають вагомое практичне значення для отримання гарантів з наперед заданими властивостями.

Ключові слова: X-хвильова дифрактометрія, магнітно-силова мікроскопія, магнітна доменна структура, епітаксійні плівки, ферогранати.

Используя высокоразрешающую рентгеновскую дифрактометрию, сканирующую атомно- и магнитно-силовую микроскопию и метод моделирования изображений обратного пространства, исследована кристаллическая и магнитная доменная структура пленок гранатов различного состава и толщины. Установлено, что полосовая доменная структура сильно зависит от многих параметров пленок, в частности от толщины, структурного совершенства поверхности и образца в целом. Оценено оптимальное значение толщины выращивания, при которой домены будут наиболее упорядоченными. Результаты исследований важны в понимании структурных особенностей пленок и имеют важное практическое значение при их выращивании.

Ключевые слова: рентгеновская дифрактометрия, магнитно-силовая микроскопия, магнитная доменная структура, эпитаксиальные пленки, ферогранаты.

Crystal and magnetic domain structure of garnet films of different composition and thickness were studied using high-resolution X-wave diffractometry, scanning atomic and magnetic force microscopy and method of reciprocal space images modeling. The strong dependence of domain structure on many films parameters, including the thickness, surface and structural perfection of the sample in whole was established. Optimal thicknesses of growth of film with the most ordered domains was evaluated. The results of research are important in understanding the structural characteristics of thin garnet films and have significant practical importance for its growing with predetermined properties.

Keywords: X-wave diffractometry, magnetic force microscopy, magnetic domain structure, epitaxial film, ferrogranet.

Епітаксійні плівки зі структурою гранатів впродовж багатьох років знаходять широке застосування в сучасній надвисокочастотній техніці та мікроелектроніці, зокрема в сенсорних пристроях візуалізації розподілу магнітного поля, надвисокочастотних смугопр пропускаючих фільтрах, твердотільних лазерах, системах енергонезалежної магнітної пам'яті [1-3]. Також з'явля-

ються найсучасніші розробки, в яких ферогранатові плівки використовуються у приладах нового покоління спінової наноелектроніки на надвисоких частотах [4,5].

Втім розробка та виготовлення згаданих пристроїв неможлива без використання в них гранатів з наперед заданими технічними параметрами і, відповідно, без ґрунтовного дослідження епітаксійних плівок

ферогранатів (ЕПФГ). Багато робіт присвячено вивченню структурних, магнітооптичних, температурних та інших властивостей [6,7], проте вивчення локальних магнітних характеристик ЕПФГ, зокрема в залежності від структурних параметрів, є неповним. В роботі [8] автори говорять про значну залежність магнітних характеристик гранатових плівок від їх структурної досконалості, а в [9] показано, що гранати володіють великою структурною досконалістю, але в них виникають мікрона пруги за рахунок різниці сталих ґратки плівки та підкладки. Окрім того, виготовлені плівки відтворюють дефекти, що існували на поверхні підкладки [10].

Вище сказане говорить про те, що дослідження структурних параметрів та залежність від них доменної структури (ДС) ЕПФГ є необхідним для розробки механізмів спрямованої модифікації процесу їх вирощування. Тому метою даної роботи було дослідження магнітної ДС феритгранатів та її залежність від товщини плівок та їх структурної досконалості.

Об'єкти та методи досліджень

Епітаксійні плівки ферогранатів вирощувались в НВП "Карат" методом рідинно-фазної епітаксії (РФЕ) на підкладки галій-гадолінієвого гранату (ГГГ) орієнтації [111]. Вирощування проводилось за допомогою модернізованої п'ятитонної установки «Garnet-3» (LPAI, Франція) методом ізотермічної рідинно-фазної епітаксії з переохолодженого розчину-розплаву гранатовтворюючих компонент, оскільки цей метод є найбільш придатним для виробництва ЕПФГ для потреб електронної техніки [11]. Відтворюваність фізичних параметрів забезпечувалася підтримкою перенасиченого розчину та його гомогенізацією шляхом рівномірного обертання підкладки, розміщен-

ної горизонтально, та одночасного рівномірного витягування підкладки з розчину-розплаву. В якості підкладок слугували кристали галій-гадолінієвого гранату (ГГГ) $Gd_3Ga_5O_{12}$ з кристалографічною орієнтацією вхідної поверхні (111). Зразок №1 номінального складу $Lu_{2.1}Bi_{0.9}Fe_5O_{12}$ було одержано з розчин-розплаву на основі Bi_2O_3 , №2 та №3 складу $Y_{2.93}La_{0.07}Fe_5O_{12}$ – з розчин-розплаву на основі $PbO-B_2O_3$ (Таблиця 1). Детальний процес вирощування одержаних плівок наведено в [12, 13].

Склад епітаксійних плівок підбирався таким чином, що би мінімізувати різницю параметрів кристалічної ґратки підкладки та плівки. Товщина плівок розраховувалась методом зважування. Також, для оцінки впливу підкладки, досліджувався зразок ГГГ аналогічний за параметрами до матеріалу підкладок.

Структурні дослідження гранатів було проведено із використанням дво- та трикристалльної дифракції Х-хвиль на високороздільному Х-хвильовому дифрактометрі X'Pert PRO MRD з набором Х-хвильових оптичних компонент для використання в стандартній компланарній схемі дифракції, який знаходиться в Інституті фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАНУ (Київ, Україна). Для зйомки використовувалася установка з високою роздільною здатністю: параболічне дзеркало Гегеля, розміщене за Х-хвильовою трубкою, за яким слідує чотирьокристалльний монохроматор Бартельса ($4 \times Ge220$) та точковий детектор з трикратним кристалом-аналізатором ($3 \times Ge220$). Розбіжність первинного пучка установки дифрактометра та кутове прийняття кристала-аналізатора, який використовувався перед детектором, були $\Delta\alpha_{i,f} \approx 12$ кутових секунд.

Таблиця 1. Параметри росту ЕПФГ.

№ зразка	Номінальний склад	Товщина, мкм	Температура росту, °С	Швидкість росту, мкм/хв	Розчинник
1	$(Lu,Bi)_3Fe_5O_{12}$	2,3	814	0,23	Bi_2O_3
2	$(Y,La)_3Fe_5O_{12}$	6,4	945	0,64	$PbO-B_2O_3$
3	$(Y,La)_3Fe_5O_{12}$	94,4	950	0,59	$PbO-B_2O_3$

Ці значення визначають ширини $\Delta q_x \Delta q_z$ функції роздільної здатності приладу в площині розсіювання $q_x q_z$ в напрямках, перпендикулярних до первинного та дифрагованого пучків, відповідно. Крізь площину розсіювання (тобто вздовж напрямку q_y у оберненому просторі), розбіжність первинного пучка та кутова роздільна здатність детектора були приблизно $0,05^\circ$. З цієї величини слідує, що роздільна здатність Δq_y в оберненому просторі крізь площину розсіювання набагато більша, ніж ширина дифракційного максимуму. Цей факт дозволяє враховувати розподіл інтенсивності, інтегрований в нескінченному діапазоні вздовж осі q_y , що було враховано у функції роздільної здатності приладу.

Аналіз отриманих мап оберненого простору проводився з використанням стандартної кінематичної теорії Кривоглаза [14], яка добре описує дифузне розсіювання Х-хвиль на дефектах. Оскільки кристалічній структурі ЕПФГ притаманна колонкова структура [15], при моделюванні в якості домінуючих дефектів використовувалися дислокації, перпендикулярні до поверхні, через що в рамках даної теорії інтенсивність розсіяного випромінювання не може бути обчислена безпосередньо. В даному випадку треба враховувати релаксації напружень поверхні, що робить формули для поля зміщень складними для чисельної оцінки. Для уникнення даних труднощів обчислення проводилися з використанням методу Монте-Карло [16].

Для дослідження структурних параметрів поверхні гранатових плівок шляхом отримання та аналізу атомно-силових зображень (АСМ), а також для отримання магнітно-силових зображень (МСМ) магнітної доменної структури ЗІГ, використовувався скануючий зондовий мікроскоп "NanoScope IIIa Dimension 3000" (Інститут фізики напівпровідників) з застосуванням коливної методики – режим картографування градієнту магнітного поля. Для виключення впливу рельєфу на результат МСМ використовувалась двохпрохідна методика вимірювань. Під-

бір оптимальної висоти зонда над поверхнею здійснювався дослідним шляхом. Також враховувалося, що ДС досліджуваних плівок ферит-гранатів дуже чутлива навіть до слабких магнітних полів, тому МСМ зонди для досліджень підбирались такими, що забезпечують практичну відсутність взаємного впливу з поверхнею.

Аналіз результатів досліджень

Плівки гранатів, вирощені на підкладці ГГГ з площиною зрізу (111), мають ромбоєдричну структуру [17]. Гранати належать до кубічної сингонії, просторова група $O_h^{10} - Ia3d$. Іони заліза Fe^{3+} займають октаї та тетраедричні позиції в співвідношенні 2:3 та формують дві магнітні підгратки з протилежно спрямованими спінами. Параметр гратки підкладки складає $a_{ГГГ} = 12,383 \text{ \AA}$. При вирощуванні епітаксійних структур з ненульовою різницею сталих гратки плівки та підкладки, плівки ростуть деформованими, повторюючи в площині росту трансляцію структури підкладки, що також супроводжується появою значної кількості дислокацій невідповідності.

Під час Х-хвильових досліджень гранатів були отримані мапи оберненого простору (МОП), наведені на рис. 1-3. Для зразка №1 на МОП спостерігається значний вплив кристала підкладки та перехідного шару, обумовлений дуже малою товщиною вирощеної плівки (рис. 1а). Чітко спостерігається два піки від плівки та підкладки, що свідчить про значний вклад в дифракційну картину останньої. Уширення дифракційної картини в області піку вздовж осі qx не спостерігається, структура плівки не є достатньо сформованою, наявне значне розупорядкування через надто малу товщину. Це підтверджується даними АСМ плівки та підкладки (рис. 4). На зображенні рельєфу поверхні підкладки спостерігаються характерні лінії, які є результатом післяростових механічної обробки та хімічного травлення. Такі ж лінії видно на АСМ-зображенні поверхні зразка №1. Шорсткість рельєфу обох зразків співмірна, проте дефектність поверхні сильно впливає на

магнітну ДС. Згідно даних [18], лише при товщині плівки від 2,9 мкм та більше її кристалічна ґратка перестає бути zdeформованою підкладкою та набуває характерної для ЕПФГ форми. Для зразків №2 та №3 вплив рельєфу підкладки не спостерігається, він повністю нівелюється товщиною плівки.

Зразок №2 характеризується добре сформованою кристалічною структурою, про що свідчить, згідно МОП (рис. 2а), симетрична дифракційна картина, а також дані МСМ (рис. 5). На мапі вздовж осі q_z в області піку в обох напрямках основний рефлекс є майже симетричним, за виключенням наявності додаткового максимуму інтенсивності. Імовірно, що другий пік отримується від перехідного шару плівка-підкладка і, зокрема, не може бути піком від підкладки, оскільки відстань вздовж осі q_z між піками вдвічі менша за аналогічну на рис. 1а, а глибина екстинкції для гранатових структур для відбивання (444) є близькою за значенням до товщини плівки [19].

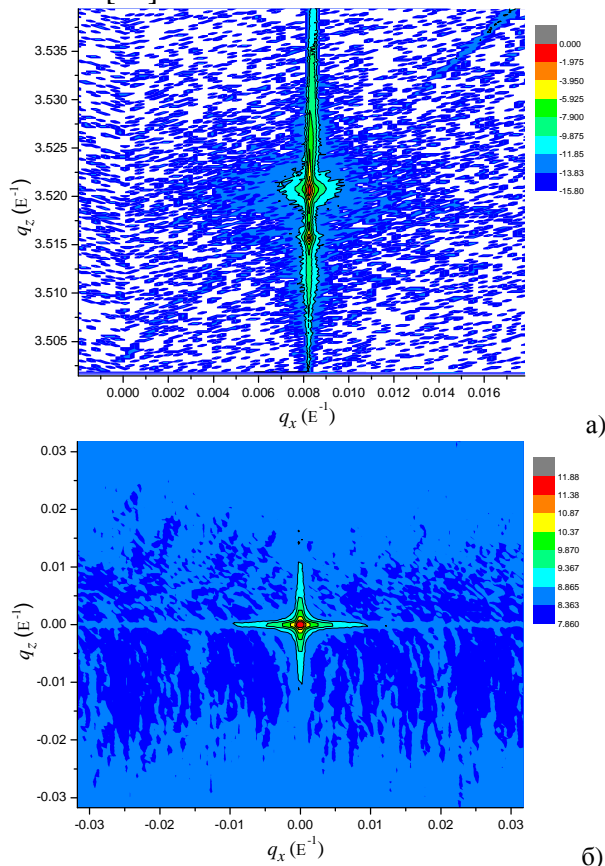


Рис. 1. МОП, зразок №1, $t=2,3$ мкм, відбивання (444), CuK_α -випромінювання: експеримент (а), моделювання (б).

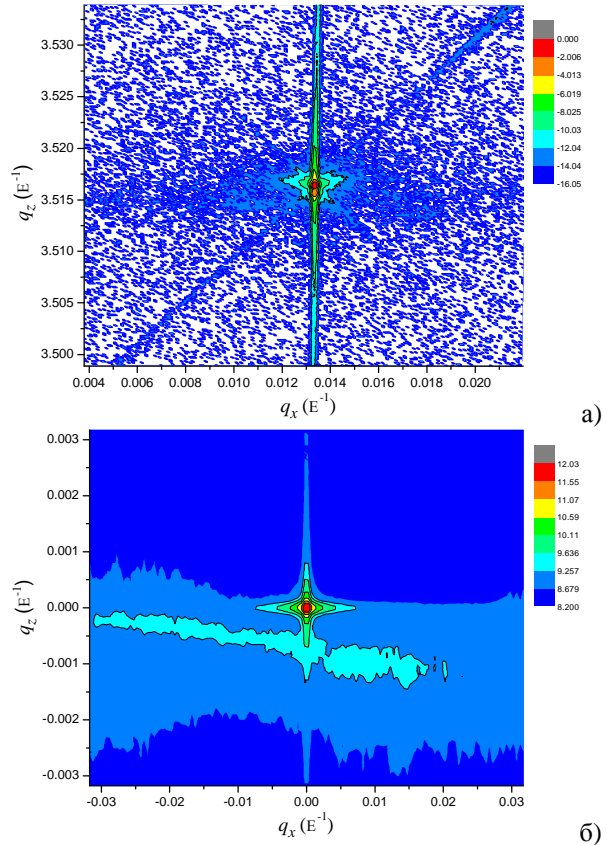


Рис. 2. МОП, зразок №2, $t=6,41$ мкм, відбивання (444), CuK_α -випромінювання: експеримент (а), моделювання (б).

Вздовж осі q_x мапа асиметрична, що говорить про незначну наявність дефектів вакантного типу з орієнтацією в площині (100). Для об'єму плівки характерна наявність включень додатних деформацій, можливо комплексів з киснем. Дані МСМ (рис. 5), зокрема відсутність розривів магнітних ліній та їх однорідність, свідчать про впорядкованість кристалічної структури.

Зважаючи на значну товщину плівки, для зразка №3 характерна сформованість кристалічної структури плівки, що підтверджується чітким основним піком від ґратки плівки на МОП (рис. 3а). Таке припущення підтверджується також симетричністю мапи в напрямках q_x та q_z в області піка. Наявність в додатній частині q_x значного вкладу дифузної розсіяної інтенсивності з її неперервним спаданням при наростанні q_x свідчить про наявність мікрodefektів, що створюють додатну деформацію [20]. Зокрема, це можуть бути протяжні мікрodefekти з вкрапленнями

іншої фази, мікровключення матеріалу тигля, оксиди грататуотворюючих компонент [21].

В процесі моделювання X-хвильових зображень було отримано змодельовані мапи оберненого простору (рис 1б-3б), які добре корелюють з експериментальними. Параметри дефектної структури, що використовувалися при моделюванні, наведено в таблиці 2. Для кожного зі зразків підбиралися параметри двох типів дислокацій, що відрізняються напрямком вектора Бюргерса.

У загальному випадку плівки ЕПФГ можна охарактеризувати змішаною одновісною та кубічною магнітною анізотропією. В залежності від величини константи одновісної анізотропії K_u та намагніченості насичення M_s в них виникає два типи магнітної анізотропії [22]. При $K_u/2\pi M_s^2 \gg 1$ одновісна анізотропія перевищує власну кубічну анізотропію гранату і вісь легкого намагнічування напрямлена вздовж нормалі до поверхні плівки (111).

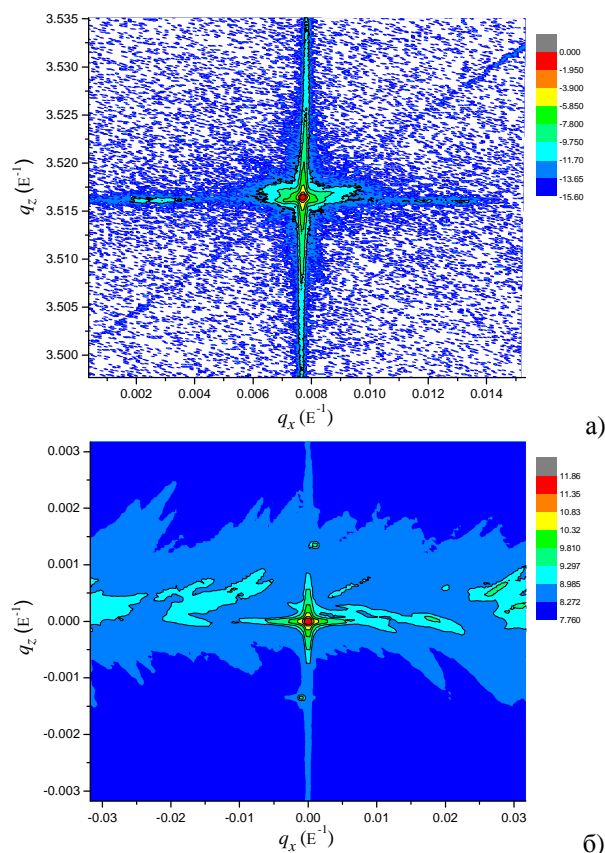


Рис. 3. МОП, зразок №3, $t=94,4$ мкм, відбивання (444), SuK_{α} -випромінювання: експеримент (а), моделювання (б).

Таблиця 2. Розміри та концентрації дислокацій.

Зразок	Розмір, мкм	Концентрації, $см^{-2}$
№1 (2,3 мкм)	1,96	$1,1 \cdot 10^8$
	2,05	$2,05 \cdot 10^7$
№2 (6,41 мкм)	2,25	$3,26 \cdot 10^7$
	2,05	$3,92 \cdot 10^5$
№3 (94,4 мкм)	2,6	$3,26 \cdot 10^7$
	2,48	$3,92 \cdot 10^5$

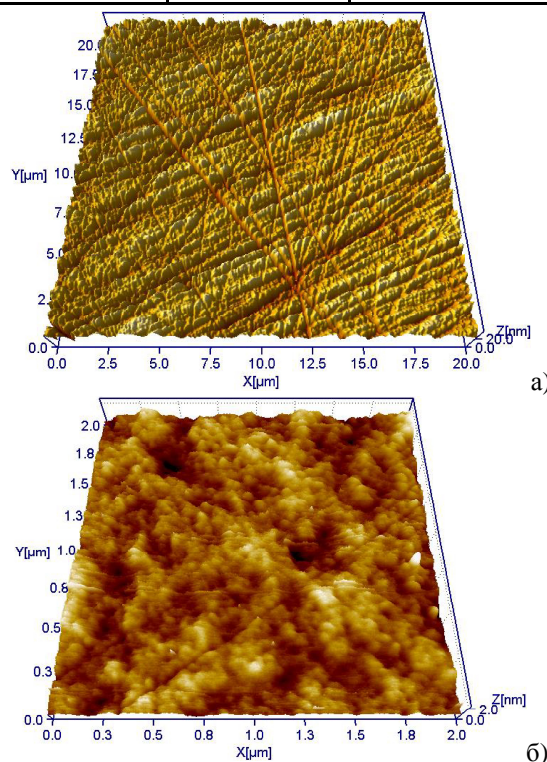


Рис. 4. Зображення АСМ: підкладка (а), зразок №1 (б).

Такими характеристиками володіють плівки з циліндричними магнітними доменами (наприклад, $(YSmLuCa)_3(FeGeSi)_5O_{12}$). Якщо ж $K_u/2\pi M_s^2 \ll 1$, то, за рахунок власної кубічної анізотропії, вектор намагніченості відхиляється на малий кут від площини плівки. До плівок із такими характеристиками належить залізо-ітрієвий гранат $Y_3Fe_5O_{12}$.

Коли в замикаючих доменах виникає нормальна до поверхні складова намагніченості, яка осцилює відносно площини плівки, утворюються смугові магнітні домени, або так звані страйп-структури. Причиною їх появи може бути колонкова мікроструктура, що утворюється при вирощуванні плівок [23]. Колонкова структура обумовлює поперечну до поверхні компоненту анізотропії, K_{\perp} , тоб-

то так звану анізотропію форми. Співвідношення між перпендикулярною до поверхні плівки компонентою магнітної анізотропії, K_{\perp} і намагніченістю насичення визначає можливу мікромагнітну структуру тонкої плівки. В нашому випадку це співвідношення задається товщиною плівки та величиною і напрямом вектора намагніченості відносно поверхні.

Зображення магнітно-силової мікроскопії досліджуваних плівок наведено на рис.5. Для всіх трьох зразків характерна смугова ДС, проте в кожному окремому випадку вона має унікальні відмінності. На МСМ зразка №1 чітко видно смугові домени однієї товщини ~ 1 мкм, які проте є неупорядкованими, супроводжуються частими розривами та круглими поверхневими магнітними доменами. Така структура магнітних ліній та їх розриви спричинені значним впливом перехідного шару, який, в зв'язку з малою товщиною плівки, відіграє вагомий роль у формуванні структури та магнітної мікроструктури ЗІГ.

Магнітна ДС зразка №2 є найбільш впорядкованою серед досліджуваних, на зображенні спостерігаються чіткі паралельні смуги без розривів (рис.5б). Деяке спотворення смуг в нижній лівій частині екрану імовірно викликано структурним дефектом, що утворився на кінцевій стадії вирощування. Періодичність смуг в середньому складає ~ 11 мкм,

проте наявна суттєва неоднорідність смуг за товщиною, що викликано все ж надто малою товщиною вирощеної плівки, тобто недостатньо сформованою кристалічною структурою, а також імовірною неоднорідністю структури плівки за товщиною. Проте, враховуючи результати роботи [24], можна припустити, що, в залежності від ряду факторів, серед яких досконалість підкладки, процесу вирощування та особливості подальшої обробки, значення товщини плівок, яким буде притаманна досконала смугова ДС, має бути співмірним порядку кількох значень довжини екстинкції.

Дані МСМ третьої плівки свідчать про наявність значної розупорядкованості кристалічної структури матеріалу, оскільки смугові домени, на відміну від попередніх зразків, мають хаотичну нерівномірну структуру та є неоднорідними по товщині (частковий випадок страйп-структур). Подібна магнітна доменна структура є характерною для гранатових плівок, в яких сформувалася колонкова структура.

Узагальнюючи аналіз МСМ та МОП, можна припустити, що для плівки характерна блочна структура, що пояснює неупорядкованість магнітних смуг та, згідно даних МОП, наявність протяжних дефектів, якими є границі розділу колонок.

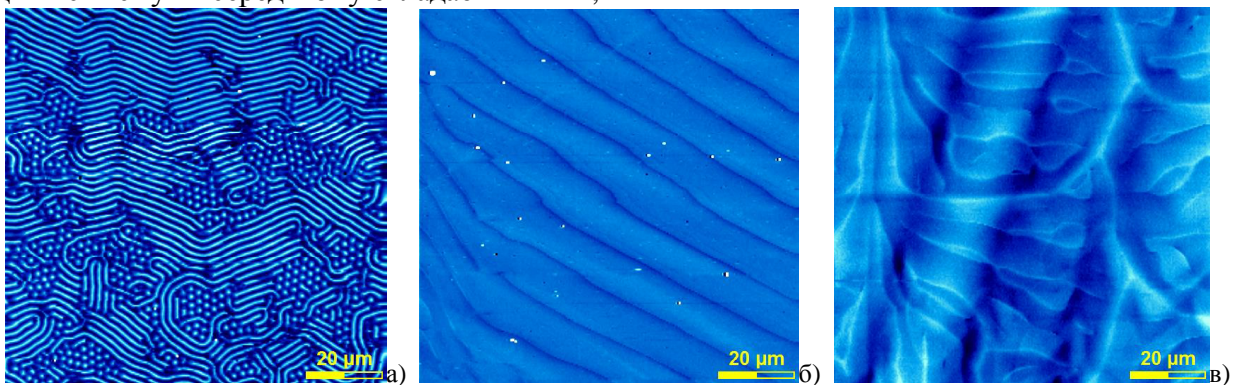


Рис. 5. Магнітно-силові зображення ЗІГ: зразок №1; №2; №3.

Висновки

В результаті досліджень кристалічної структури та магнітної мікроструктури серії плівок ферогранатів було встановлено, що при малій товщині плівки 2,3 мкм значний вплив на кристалічну структуру плівки має

дефектність підкладки, що, в свою чергу, веде до значного порушення магнітної доменної структури. Зразок №2 характеризується найбільш впорядкованою ДС, яка проте все ж неоднорідна через недостатню товщину та можливу неоднорідність плівки за товщиною. В зразка №3 домени мають хаотичну нерів-

номірну структуру та є неоднорідними по товщині, вони утворюють магнітні страйп-структури, спричинені колонковою структурою самої плівки. В залежності від ряду факторів, серед яких важливу роль відіграють досконалість кристалу підкладки, процес вирощування та особливості подальшої обробки, значення товщини плівок, яким буде притаманна досконала смугова ДС, має бути співмірним порядком кількох значень довжини екстинкції.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Ubizskii S.B.* Orientation states of magnetisation in epitaxial (111)-oriented iron garnet films // *J. Magn. Magn. Mat.* – 1999. – **195**. – P. 575-582.
2. *Рандошкин В.В., Червоненкис А.Я.* Прикладная магнитооптика – М.: Энергоатомиздат. – 1990. – 320 с.
3. *Гласс Х.Л.* Ферритовые пленки для СВЧ-устройств // Труды института инженеров по электронике и радиоэлектронике. – 1988. – **76**, №2. – С. 64-72.
4. *Kajiwara Y., Harii K., Takahashi S., Ohe J., Uchida K. et al.* Transmission of electrical signals by spin-wave interconversion in a magnetic insulator // *Nature*. – 2010. – **464**. – P. 262-266.
5. *Uchida K., Xiao J., Adachi H., Ohe J., Takahashi S., et al.* Spin Seebeck insulator // *Nature Materials*. – 2010. – **9**. – P. 894-897.
6. *Кринчик Г.С., Кучера М., Горбунова В.Д., Гуцин В.С.* Тонкая структура линий поглощения Fe^{3+} в одноподрешеточных ферритах-гранатах // *ФТТ*. – 1981. – **23**, вып. 2. – С. 405-412.
7. *Wemple S.H., Blank S.L., Seman J.A., Biolsi W.A.* Optical properties of epitaxial iron garnet thin films // *Phys. Rev. B*. – 1974. – **9**, № 5. – P. 2134-2144.
8. *Ющук С.І., Юр'єв С.О., Николайчук В.Й., Осипушин 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.
9. *Немошкаленко В.В., Остафійчук Б.К., Олейник В.А., Федорив В.Д., Гринченко А.Ю., Скакун Н.А.* Степень структурного и магнитного разупорядочения в феррит-гранатовых пленках, имплантированных ионами бора // *Физика твердого тела*. – **32**, № 3. – 1990. – С. 707-713.
10. *Элементы и устройства на цилиндрических магнитных доменах.* Справочник. / под ред. Н.Н. Евтихеева, Б.Н. Наумова. – Радио и связь, 1987. – 488 с.
11. *Балбашиов А.М., Червоненкис А.Я.* Магнитные материалы для микроэлектроники – М.: Энергия. – 1979. – 217 с.
12. *Syvorotka I.I., Syvorotka I.M. and Ubizskii S.B.* Growth Peculiarities and Magnetic Properties of $(LuBi)_3Fe_5O_{12}$ Films by LPE Method // *Solid State Phenom.* – **200**. – 2013. – P. 256-260.
13. *Syvorotka I.I., Syvorotka I.M. and Ubizskii S.B.* Thick Epitaxial YIG Films with Narrow FMR Linewidth // *Solid State Phenom.* – **200**. – 2013. – P. 250-255.
14. *Krivoglaz M.A.* X-Ray and Neutron Diffraction in Nonideal Crystals – Berlin: Springer. – 1996. – 466 p.
15. *Филиппов Б.Н., Танкеев А.П.* Динамические эффекты в ферромагнетиках с доменной структурой – М.: Наука. – 1987. – 216 с.
16. *Kaganer V.M., Brandt O., Riechert H. and Sabelfeld K.K.* X-ray diffraction of epitaxial films with arbitrarily correlated dislocations: Monte Carlo calculation and experiment // *Phys. Rev. B*. – **80**, 033306. – 2009. – P. 033306-1-033306-4.
17. *Руткин О.Г., Агеев А.Н., Духовская Е.Л., Саксонов Ю.Г., Шер Н.С.* Деформация кристаллической решетки эпитаксиальных плёнок итрий-железного граната, выращенных на плоскости (111) подложки из гадолиний-галиевого граната // Письма в ЖТФ. – 1982. – **52**(12). – С. 82-86.
18. *Остафійчук Б.К., Яремій І.П., Кравець В.І., Клюка С.Я., Яремій С.І.* Вплив кристалічної структури епітаксійних плівок ЗІГ на профілі деформації // *Фізика і хімія твердого тіла*. – 2006. – **7**, №3. – С. 436-441.
19. *Остафійчук Б.К., Яремій І.П., Томин У.О., Яремій С.І., Фодчук І.М., Гуцуляк І.І.* Врахування ефектів анізотропії в орієнтації радіаційних дефектів під час розрахунку стагичного фактора Дебая-Валлера та коефіцієнта екстинкції // *Науковий вісник Чернівецького університету. Фізика. Електроніка*. – 2012. – **2**, вип. 1. – С. 93-102.
20. *Бублик В.Т., Мацнев С.Ю., Щербачев К.Д. и др.* Исследование особенностей образования микродефектов в термически обработанных бездислокационных пластинах кремния большого диаметра методом диффузного рассеяния рентгеновских лучей // *Физика твердого тела*. – 2003. – **45**, вып. 10. – С. 1825-1832.
21. *Блистанов А.А.* Кристаллы квантовой и нелинейной оптики. Учебное пособие для вузов – М.: МИСИС. – 2000. – 432 с.
22. *Ubizskii S.B.* Orientational states of magnetization in(111)-oriented iron garnet films // *J. Magn. & Magn. Mat.* – 1999. – **195**. – P. 575-582.
23. *Чеченин Н.Г.* Магнитные наноструктуры и их применение – М.: Грант Виктория ТК. – 2006. – 166 с.
24. *Fodchuk I.M., Gutsuliak I.I., Zaplitniy R.A., Balovsyak S.V., Yaremiy I.P., Bonchuk O.Yu., Savitskiy G.V., Syvorotka I.M., Lytvyn P.M.* Magnetic force microscopy of YLaFeO films implanted by high dose of nitrogen ions // *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*. – 2013. – **16**, №3. – P. 246-252.