

Ю.О.Мамалуй, Ю.А. Сірюк

Поведінка доменної структури поблизу точки компенсації та спінової переорієнтації

*Донецький національний університет
83055, Донецьк, вул. Університетська, 24, E-mail: uam@mail.donbass.com*

Експериментально досліджено поведінку доменної структури поблизу температури компенсації та спінової переорієнтації у плівках з різною величиною одновісної анізотропії. Спін-переорієнтаційний фазовий перехід та температура компенсації реєструвалися за зміною кольору доменної структури

У плівці $(\text{TmBi})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$ з температурою компенсації 120 К в області температур 185-160 К спостерігався спін-переорієнтаційний фазовий перехід від вісьової до кутової фази та від кутової до площинної. При цьому існує область співіснування вісьової та кутової фаз приблизно в 25 градусів. Зародком утворення кутової фази є 180-градусна доменна межа. Ріст зародків відбувається без утворення межі між новою та старою фазами, що підтверджується експериментально при візуальному спостереженні завдяки ефекту Фарадея.

У плівці $(\text{YBi})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$ з малою величиною одновісної анізотропії спостерігалася зміна кольору доменів та доменних меж, яка пов'язана з переходами між різними кутовими фазами. В області 212К мала місце монодоменність та спостерігалася зміна кольору монодоменності, по якій можна було судити про зміну напрямку вектора намагніченості насичення.

Ключові слова: доменна структура (ДС), температура магнітної компенсації (T_K), спінова переорієнтація (СП), фазовий перехід (ФП), ґратка циліндричних магнітних доменів (ГЦД), доменна межа (ДМ), фарадееве обернення, анізотропія.

Стаття постуила до редакції 07.03.2006; прийнята до друку 15.09.2006

Вступ

Поведінка доменної структури (ДС) поблизу температури магнітної компенсації (T_K) та спінової переорієнтації (СП) незмінно приваблює дослідників, тому що тут ДС дуже чутлива як до зміни намагніченості насичення, так і до зміни виду анізотропії, що дозволяє спостерігати особливості СП, реєструючи переходи у ДС. В [1] поблизу T_K була досліджена неколінеарність підґраток та існування ДС у високих полях підмагнічування, в [2] вивчені орієнтаційні переходи та існування магнітних фаз у кубічному рідкоземельному ферімагнетіку, в [3] теоретично вивчені закономірності зміни характеристик ДС поблизу T_K . В [4,5] спін-переорієнтаційний фазовий перехід (СПФП) спостерігався у лабиринтній ДС при зміні температури плівки та реєструвався завдяки дифракційній картині, що була одержана від регулярної ДС. Було виявлено, що переорієнтація намагніченості у доменах веде до скокуподібного збільшення періоду ДС; СПФП від анізотропії типу „легка вісь” до анізотропії типу „легка площина” відбувається безгістерезисно, але супроводжується в інтервалі температур коло 3К співіснуванням

двох фаз.

Найбільш цікава ситуація спостерігається тоді, коли температури СПФП та T_K близькі або співпадають. В [6,7] досліджена ДС у інтервалі температур, в який входить область T_K та СПФП, як при відсутності зовнішнього магнітного поля (спонтанні переходи), так і у магнітних полях (індуковані переходи).

В [6] ДС була вивчена за допомогою магнітооптичного ефекту Фарадея з ідентифікацією фаз за методом кольорового контрасту. В [7] при вивченні ДС встановлено, що для $\text{Er}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ температура СПФП першого роду між фазами з орієнтацією намагніченості вздовж $\langle 111 \rangle$ та вздовж $\langle 100 \rangle$ співпадає з T_K . В [6] для заміщеного ербієвого гранату також встановлено, що інтервали магнітної компенсації накладаються один на одного. В [8] була досліджена поведінка ґратки циліндричних магнітних доменів (ГЦД) поблизу T_K . Було виявлено два види ФП першого роду у ГЦД, індукованих температурою.

У даній роботі поставлена задача дослідити поведінку ДС поблизу T_K та СП у плівках з різною величиною одновісної анізотропії.

I. Опис експериментальних результатів

Вивчення ДС було проведене у тонких плівках феритів-гранатів, що були вирощені за методом рідиннофазної епітаксії на гадоліній-галієвому гранаті. Були вибрані дві плівки, що відрізнялися за величиною одновісної анізотропії, складу $(\text{TmBi})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$ та $(\text{YBi})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$. Дослідження проводили на магнітооптичній установці, де можна було змінювати температуру у діапазоні від 90 К до температури Нееля та діяти на взірць двома видами магнітних полів: імпульсним магнітним полем, перпендикулярним площині плівки, та полем зміщення ($H_{\text{зм}}$). Завдяки ефекту Фарадея ДС можна було спостерігати візуально та фотографувати. СПФП та T_K реєструвалися за зміною кольору ДС.

1. Поведінка ДС поблизу T_K та СП у плівці $(\text{TmBi})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$.

У цій плівці одновісна анізотропія наведена вздовж вісі $[111]$. Гексагональна гратка ЦМД формувалася імпульсним магнітним полем при $H_{\text{зм}}=0$, а потім поле відключалось. Введемо характеристики гратки: a – період ГЦД, d – діаметр ЦМД, густина упаковки $y = \frac{d}{a}$. Така гратка при температурі формування є рівноважною [9], її параметр $y = 0,74$, а температурні залежності $a(T)$ та $d(T)$ – плавні криві. Якщо сформувати рівноважну ГЦД (рис. 1,a), а потім змінювати температуру плівки, то ГЦД зберігається у деякому температурному інтервалі, на обох кінцях якого відбувається в гратці ФП першого роду. В [8] було показано, що в гратці спостерігаються два види ФП першого роду: при наближенні до T_K – ФП зі зменшенням числа часток (рис. 1,b); при віддаленні від T_K – ФП зі збереженням числа часток (рис. 2,e). На температурному інтервалі, що вивчається, таких ФП у гратці спостерігається декілька (рис. 1-3).

СПФП спостерігався в області температур 185 - 160 К, поблизу T_K , де намагніченість насичення зменшується.

Розглянемо поведінку ДС при охолодженні плівки. ГЦД була сформована при 215 К (рис. 1,a). При цьому у плівці спостерігались дві колінеарні магнітні фази, вектори намагніченості яких перпендикулярні площині плівки: $\Phi_1 <111>$ – оранжевого кольору ЦМД та $\Phi_2 <\bar{1}\bar{1}\bar{1}>$ – коричневе поле. При $T_1 = 185$ К деякі ділянки поля повільно змінювали колір з коричневого на зелений, а деякі ЦМД – з оранжевого на білий, що свідчило про початок процесу спінової переорієнтації та появу двох нових фаз, вектори намагніченості яких спрямовані під кутом до площини плівки: $\Phi_3 <1\bar{1}\bar{1}>$ – білий колір ЦМД та $\Phi_4 <\bar{1}11>$ – зелене поле. При 172 К гратка ЦМД колапсувала (рис. 1,d). Імпульсним полем знову створювалася гратка з більшими параметрами (рис. 1,e, рис. 3) та з широкою дуже контрастною

доменною межею (ДМ). При цьому скоком змінювався розмір ЦМД: діаметр виріс у 3 рази в порівнянні з його величиною при 185К, а ширина ДМ – у 5 разів (рис. 4). Спостерігалися усі чотири фази, причому площа Φ_3 та Φ_4 дорівнювала площині Φ_1 та Φ_2 (рис. 5). При зниженні температури співвідношення площин змінювалося на користь фаз Φ_3 та Φ_4 , зелена компонента все більше заповнювала поле, витискуючи коричневий колір, а майже всі ЦМД стали білими. При $T_2 = 160$ К на яскраво-зеленому полі спостерігалися великого розміру ізольовані ЦМД яскраво-білого кольору з різко вираженою широкою темною ДМ, тобто були присутні тільки дві кутові фази Φ_3 та Φ_4 (рис. 1,f). При 158 К ЦМД зробилися нестійкими та дрейфували, змінюючи форму (рис. 1, g). При цьому ширина ДМ на різних ділянках домену була різною. При подальшому зниженні температури контрастність погіршилась внаслідок зменшення фарадеевого обертання, і при 150 К видимість зникла. Це свідчить про появу площинної анізотропії, тобто появу лише магнітної фази Φ_5 .

При нагріванні плівки від 155 К з'явився велетенський смуговий домен білястого кольору (рис. 2,a). Під дією імпульсного поля при 160 К утворилися нестійкі ізольовані ЦМД білого кольору на зеленому фоні, тобто з'явилися фази Φ_3 та Φ_4 , при цьому спостерігалась незначна присутність оранжевого та коричневого кольору (Φ_1 та Φ_2) (рис. 2 в, с). При 172 К ЦМД втрачали свою форму, перетворюючись у страйпи (рис. 2,d). Імпульсним полем при 172 К формувалась гратка ЦМД з меншими параметрами та вузькими ДМ. При подальшому зростанні температури було видно, як на деяких білих ЦМД з'являлись плями оранжевого кольору, а зелене поле почастково приймало коричневий колір, площа фаз Φ_1 та Φ_2 збільшувалась. При 185 К кутові фази Φ_3 та Φ_4 зникли. ЦМД втрачали свою форму, гратка ЦМД руйнувалась. Знов сформована гратка мала вже тільки фази Φ_1 та Φ_2 .

З приведених результатів можна зробити такі висновки. При $T > T_1$ (рис. 5) існують дві магнітні колінеарні фази $\Phi_1 <111>$ та $\Phi_2 <\bar{1}\bar{1}\bar{1}>$. Це область, де формується гексагональна гратка ЦМД з параметром рівноваги $y = 0,74$ та вузькими блохівськими ДМ. В області температур $T_1 - T_2$ існують чотири магнітні фази: колінеарні $\Phi_1 <111>$, $\Phi_2 <\bar{1}\bar{1}\bar{1}>$ та кутові $\Phi_3 <1\bar{1}\bar{1}>$, $\Phi_4 <\bar{1}11>$. При $T_{\text{СПФП}} = 172$ К відсоткове співвідношення фаз однакове. При цьому відбувається скок фазового об'єму в гратці ЦМД внаслідок зміни параметрів a і d . Параметр рівноваги гратки змінюється від величини 0,74 до 0,45. В області $T_1 - T_{\text{СПФП}}$ ширина ДМ повільно зростає, а при $T_{\text{СПФП}}$ відбувається скок ширини ДМ: блохівська ДМ переходить у ДМ типу Нееля. При наяві тільки кутових фаз Φ_3 та Φ_4 (температура T_2) гратка ЦМД не утворюється: спостерігаються

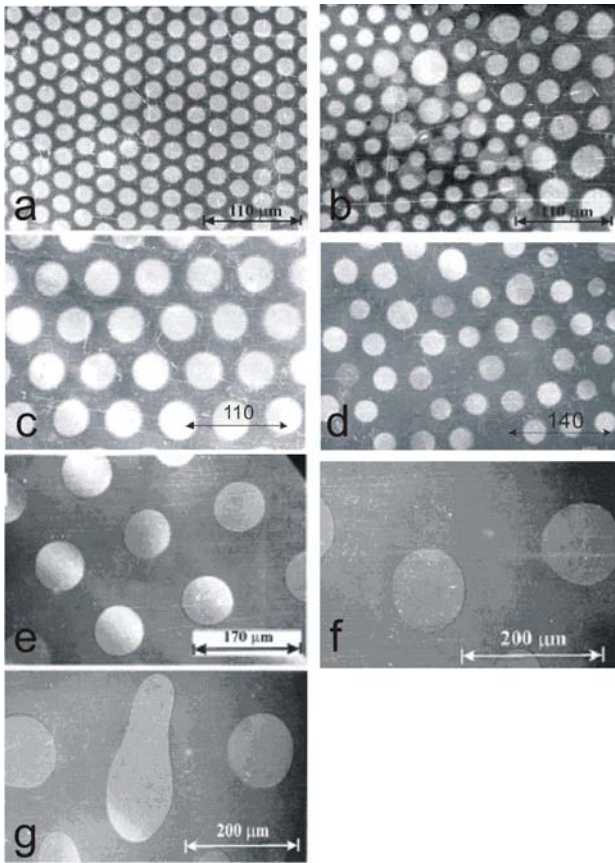


Рис. 1. Види ДС у плівці $(\text{TmBi})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$ при різних температурах (охолодження): а – 215 К, б – 175 К, с – 175 К, д – 172 К, е – 172 К, ф – 160 К, г – 158 К.

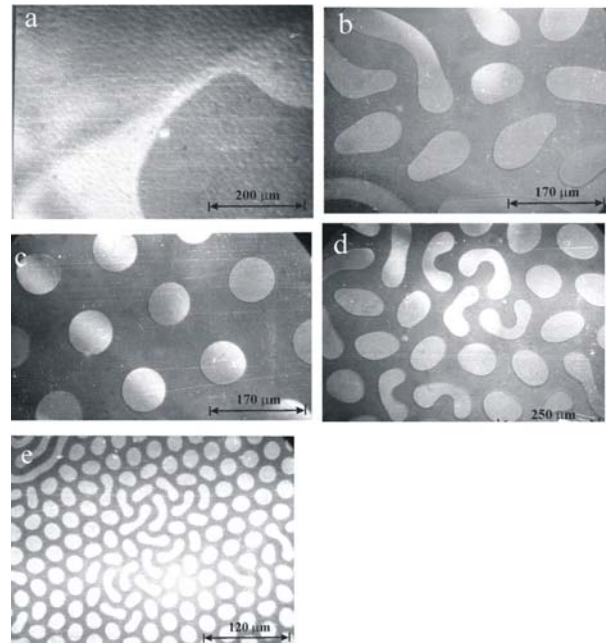


Рис. 2. Види ДС у плівці $(\text{TmBi})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$ при різних температурах (нагрівання): а – 155 К, б – 160 К, с – 160 К, д – 172 К, е – 205 К.

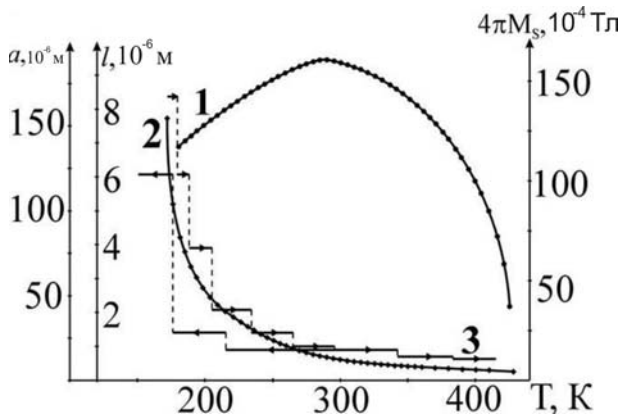


Рис. 3. Температурні залежності характеристик плівки $(\text{TmBi})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$:
1 – намагніченість насичення;
2 – характеристична довжина;
3 – період ґратки.

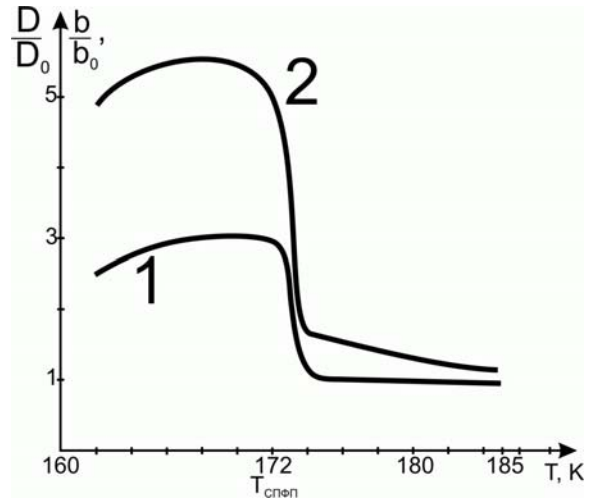


Рис. 4. Температурні залежності плівки $(\text{TmBi})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$:
1 - діаметр ЦМД;
2 - ширина доменної межі.

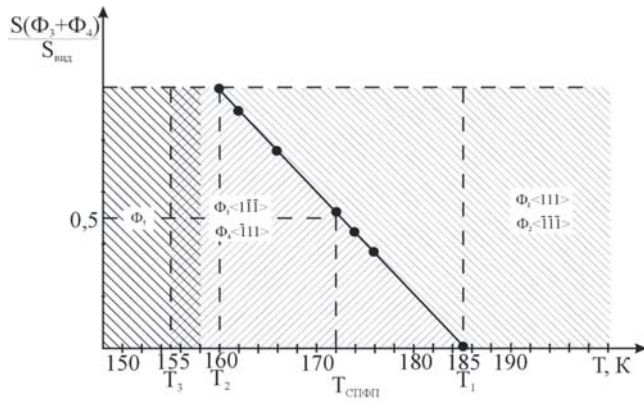


Рис. 5. Температурна залежність між площами, що займають вісьові та кутові фази.

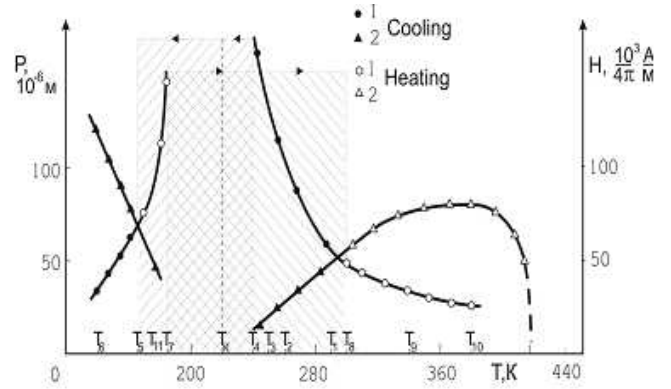


Рис. 6. Температурні залежності параметрів плівки $(YBi)_3(FeGa)_5O_{12}$.

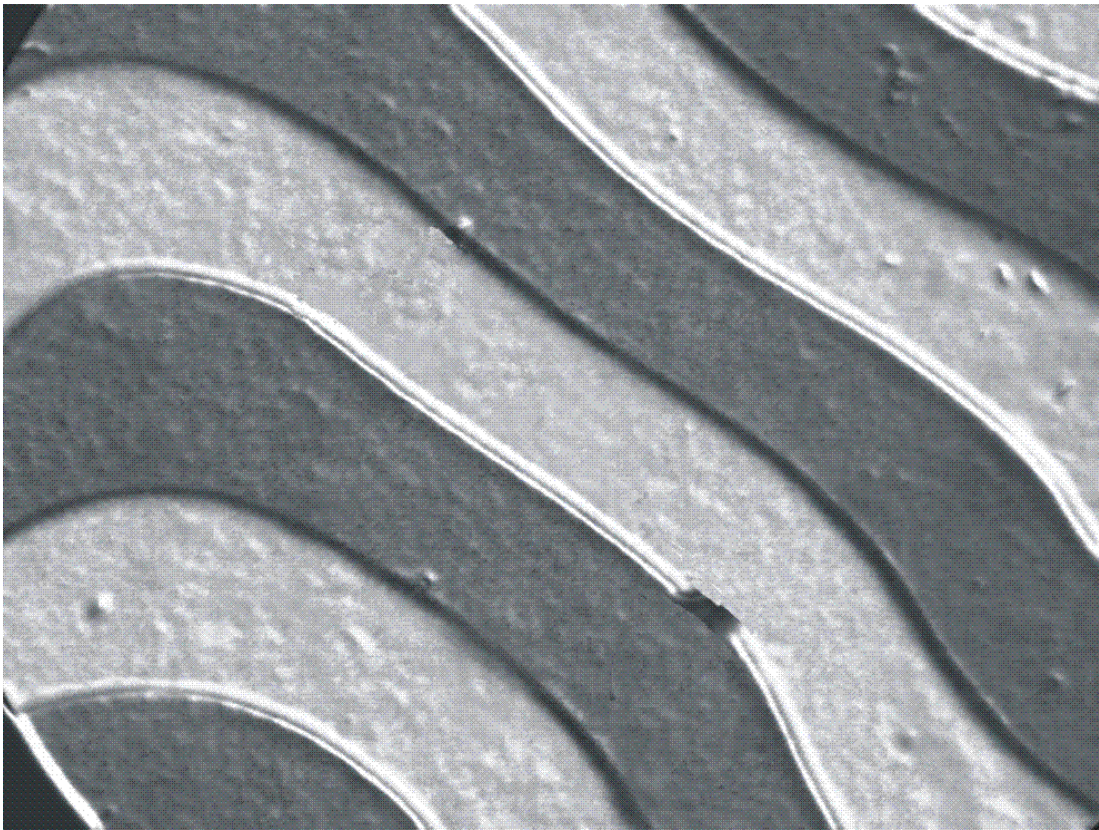


Рис. 7. ДС та ДМ плівки $(YBi)_3(FeGa)_5O_{12}$ в інтервалі температур T_2-T_3 .

ізольовані ЦМД.

2. Поведінка ДС поблизу T_K у плівці $(YBi)_3(FeGa)_5O_{12}$.

Було проведено два види досліджень. При дослідженні 1) на ДС діяли почергово полями H_{zm} та імпульсним при кожній температурі; при дослідженні 2) магнітними полями не діяли.

При 1) були виміряні температурні залежності плівки (рис. 6). При $T > T_1$ та $T < T_5$ спостерігалася жовта та зелена ДС з відростками, спрямованими вздовж трьох вісей, що являють собою проєкції [111] на площину плівки. При наближенні до T_K відростки зникали. Поблизу T_K спостерігалася

монодоменність. При T_K колір монодоменності змінювався. Монодоменність зберігалась при охолодженні в інтервалі T_4-T_5 (рис. 6), при нагріванні - в T_7-T_8 , тобто спостерігався гістерезис. В інтервалі T_1-T_4 ДМ червоного кольору, широка, але неоднакової ширини по всій довжині домена. В інтервалі T_2-T_3 широка ДМ зникала через кожний період домена, а на її місці була тонка контрастна ДМ темного кольору (рис. 7). При $T > T_1$ та $T < T_7$ ДМ вузька, коричневого кольору. При T_6 відбувся обмін кольору між доменами, при обміні кольорів змінювалася і ширина ДМ. ЦМД могли формуватись тільки при $T > T_9$.

При дослідженні 2) область монодоменності звужується, майже перестає існувати, тобто при T_K можна спостерігати домени. Колір домена та поля змінюється при T_K . В інтервалі T_3 - T_1 жовті та зелені домени набувають рожевого відтінку. ДМ змінюється також, як і при дослідженні 1). В інтервалі T_6 - T_7 жовті та зелені домени набувають лимонного відтінку. При охолодженні у районі T_{11} спостерігався цікавий кольоровий обмін. Зелені домени набувають жовтого кольору оточуючого поля, і на суцільному жовтому полі видно тільки коричневу ДМ. Потім ті домени, що раніше були жовтими, набувають зеленого кольору. Отже, відбувся такий же обмін кольорами між доменами, як і при T_6 у дослідженні 1). Але тоді обмін відбувався швидко і був незворотнім, а тут він відбувається повільно, і при нагріванні плівки повторюється у зворотному порядку.

Аналізуючи результати експерименту, можна зробити такі висновки. Далеко від T_K при $T > T_9$ та $T < T_6$ існують дві колінеарні магнітні фази. При наближенні до T_K спостерігається злам магнітних підградек [1,2]. В інтервалі T_4 - T_8 та T_7 - T_6 спостерігаються дві неколінеарні фази, що підтверджується зміною кольору ДС та виглядом ДМ.

Висновки

1. У плівці $(TmBi)_3(FeGa)_5O_{12}$ в області

- [1] Ф.В. Лисовский, В.И. Шаповалов Неколлинеарность подрешеток и существование доменной структуры в высоких полях подмагничивания в $Dy_3Fe_5O_{12}$ вблизи точки магнитной компенсации // *Письма в ЖЭТФ*, **20**(2), сс. 128-132 (1974).
- [2] Н.Ф. Харченко, В.В. Еременко, С.А. Гнатченко. Исследование ориентационных переходов и сосуществование магнитных фаз в кубическом ферритмагнетике $GdIG$ // *ЖЭТФ*, **69**(5), pp. 1697-1709 (1975).
- [3] А.Н. Богданов, Д.А. Яблонский. К теории доменной структуры ферритмагнетиков // *ФТТ*, **22**(3), pp. 680-687 (1980).
- [4] А.И. Беляева, А.В. Антонов, Г.С. Егиазарян, В.П. Юрьев. Визуальное исследование доменной структуры в области спиновой переориентации для эпитаксиальных пленок $(BiTm)_3(FeGa)_5O_{12}$ // *ФТТ*, **22**(6), pp. 1621-1628 (1980).
- [5] А.И. Беляева, А.В. Антонов, Г.С. Егиазарян, В.П. Юрьев. Спин-переориентационные фазовые переходы в магнитном поле для эпитаксиальных пленок $(BiTm)_3(FeGa)_5O_{12}$ со смешанной анизотропией // *ФТТ*, **24**(7), сс. 2191-2200 (1982).
- [6] Г.С. Кандаурова, Л.А. Памятных. Структура доменных границ в кристаллах-пластинах (111) феррита-граната в области компенсации и спиновой переориентации // *ФТТ*, **31**(8), сс. 132-138 (1989).
- [7] А.И. Беляева, В.П. Юрьев, В.А. Потакова. Магнитные состояния (110)-пластины $Eu_3(FeGa)_5O_{12}$ в интервале температур 4,2-300К. Совпадение температур спиновой переориентации и компенсации // *ЖЭТФ*, **83**(3(9)), сс. 1104-1112 (1982).
- [8] Ю.А. Мамалуй, Ю.А. Сірюк, А.В. Безус. Решетки цилиндрических магнитных доменов вблизи точки компенсации // *ФТТ*, **45**(9), сс. 1645-1652 (2003).
- [9] В.Г. Барьяхтар, Э.А. Завадский, Ю.А. Мамалуй, Ю.А. Сірюк. Термодинамический анализ фазовых переходов в решетке ЦМД // *ФТТ*, **26** (8), сс. 2381-2386 (1984).

температур 185-160 К спостерігався СПФП від вільної до кутової фази та від кутової до площинної. При цьому існує область співіснування вільної та кутової фаз приблизно в 25 градусів. Зародком утворення кутової фази є 180-градусна доменна межа. Ріст зародків відбувається без утворення межі між новою та старою фазами, що підтверджується експериментально при візуальному спостереженні завдяки ефекту Фарадея.

2. У плівці $(YBi)_3(FeGa)_5O_{12}$ з малою величиною одновісної анізотропії спостерігалася зміна кольору доменів та ДМ, яка пов'язана з переходами між різними кутовими фазами. В області $T_K = 212$ К мала місце монодоменність та спостерігалася зміна кольору монодоменності, по якій можна було судити про зміну напрямку вектора намагніченості насичення (M_s).

Таким чином, метод спостереження ДС є точним інформаційним методом, що дає можливість судити про наяву зміни орієнтації вектора \vec{M}_s як у доменах, так і в ДМ.

Мамалуй Ю.А. – д. фіз.-мат. н., професор кафедри загальної фізики та дидактики фізики;
Сірюк Ю.А. – канд. фіз.-мат. н. старший науковий співробітник.

Yu.A. Mamalui, Yu.A. Siryuk

The Behavior of Domain Structure Near to the Temperature of Compensation and Spin Reorientation

*Donetsk National University;
Donetsk, 83055, Universitetskaya str., 24; Ukraine*

The behavior of domain structure near to the temperature of compensation and spin reorientation in films with different magnitude of uniaxial anisotropy is experimentally investigated. Spin – reorientation phase transition and temperature of compensation were registered on change of domain structure color.

In the film $(\text{TmBi})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$ with temperature of compensation 120K in the temperature area 185-160K the spin – reorientation phase transition from axial to the angular phase and from angular to plane one was observed. In this case area of axial and angular phase coexistence is 25° . Domain wall of 180° type is the nucleus of new phase. Growth of nuclei is carried out without formation of the wall between new and old phases that proves to be true experimentally at the visual observation due to the Faraday effect.

In the film $(\text{YBi})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$ with a small magnitude of uniaxial anisotropy change of domain color and domain boundaries color was observed that is connected with transitions between different angular phases. At 212K single domain state occurred and change of color on which it was possible to conclude a veering of a vector of a saturation magnetization was observed.