

О.В. Безус, Ю.О. Мамалуй, Ю.А. Сірюк

Індукований спін-переорієнтаційний фазовий перехід у двошаровій ферит-гранатовій плівці

Донецький національний університет,
83055, Донецьк, вул. Університетська, 24,
E-mail: coyote@skif.net, julia@sktel.com.ua.

Проведені експериментальні дослідження поведінки доменної структури (ДС) при зміні температури у двошаровій плівці фериту-гранату, яка має в одному із шарів точку компенсації (T_K), та в одношарових плівках-“свідках”. Досліджено декілька фазових переходів (ФП) у ДС, що обумовлені поворотом вектора намагніченості в одному з шарів під впливом підмагнічуючого поля іншого шару. При наближенні до T_K (охолодження) виявлено спін-переорієнтаційний фазовий перехід (СПФП), що відбувається завдяки спільній дії намагніченості рідкісноземельної підґратки та підмагнічуючих полів шарів плівки. Виявлено утворення кільцевих доменів при обов'язковій умові існування кризних доменів. Для пояснення експериментальних результатів використана концепція магнітостатичного тиску (P) у ДС.

Ключові слова: доменна структура (ДС), температура магнітної компенсації (T_K), фазовий перехід (ФП), спін-переорієнтаційний фазовий перехід (СПФП), циліндричний магнітний домен (ЦМД), смугова доменна структура (СДС), намагніченість (M), магнітостатичний тиск (P).

Стаття постуила до редакції 16.04.2008; прийнята до друку 15.06.2009.

Вступ

Поведінка доменної структури (ДС) у двошаровій ферит-гранатовій плівці, що має в одному з шарів точку магнітної компенсації (T_K), викликає особливу цікавість, тому що на ДС у двошаровій плівці впливає не тільки кубічна та наведена одновісна анізотропія, але й взаємодія шарів. Між шарами існує як магнітостатична, так і обмінна взаємодія. Ця взаємодія залежить від співвідношення намагніченості у шарах і змінюється з температурою. Завдяки оптичній прозорості плівки можна візуально спостерігати результат впливу всіх дій на ДС. У [1] обмінна взаємодія описується введенням додаткових доменних меж, паралельних поверхні розділу шарів і розділяючих деякі домени верхнього і нижнього шарів. Експериментально було встановлено, що обмінна взаємодія ферит-гранатових плівок мінімальна, якщо їх відповідні залізни підґратки паралельні. В [2] вивчені орієнтаційні фазові переходи (ФП) у двошаровій плівці, індуковані полем зміщення. В [3] експериментально досліджено поведінку ДС при зміні температури плівки, що має в одному з шарів T_K . Поблизу T_K знайдено спін-переорієнтаційний фазовий перехід (СПФП). Запропоновані моделі ДС, що реалізуються

в дослідженому температурному інтервалі. В [4-6] вивчені поблизу T_K СПФП в одношарових плівках з різною величиною одновісної анізотропії. Було показано, що спін-переорієнтаційним фазовим переходам в цих плівках відповідають різні механізми повороту вектора намагніченості. Дана робота є продовженням досліджень [3-6].

У роботі поставлена задача вивчити поведінку рівноважної ДС при зміні температури (T) як в двошаровій плівці, в одному з шарів якої є T_K , так і в одношарових плівках-“свідках” та зробити пояснення за допомогою концепції магнітостатичного тиску.

I. Опис експериментальних результатів

Плівки вирошені методом рідинно фазної епітаксії на гадоліній-галієвому гранаті з наведеною одновісною анізотропією уздовж осі $\langle 111 \rangle$, перпендикулярно поверхні плівки. Верхній шар плівки складу $(YEu)_3(FeGa)_5O_{12}$ не має T_K , нижній шар $-(YGdTm)_3(FeGa)_5O_{12}$ має T_K поблизу 120 К. Дослідження проводили на магнітооптичній установці, де можна було змінювати температуру у

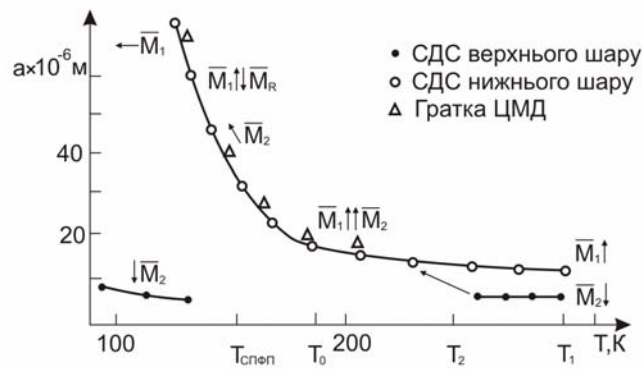


Рис. 1. Температурна залежність періоду ДС при охолодженні.

діапазоні від 90 К до температури Нееля та діяти на плівку двома видами магнітних полів: імпульсним моно полярним магнітним полем, перпендикулярним площині плівки, та полем зміщення. Завдяки ефекту Фарадея ДС можна було спостерігати візуально та фотографувати. СПФП та T_K реєструвалися за зміною кольору ДС. При кожній T на ДС діяли імпульсним магнітним полем, а потім його вимикали. Таким чином створювалася рівноважна ДС.

1. Поведінка ДС при зниженні температури

При кімнатній T у плівці спостерігалися два види смугової доменної структури (СДС) з різними періодами (a), які зберігалися у інтервалі температур $T_1 - T_2$ (рис. 1). При T_2 з'явилася кризна ДС. При подальшому зниженні T можна було створити окрім СДС циліндричні магнітні домени (ЦМД) і навіть ґратку ЦМД. При T_0 спостерігалися кільцеві домени. Параметри ДС поступово збільшувалися. При $T_{СПФП}$ колір ДС різко змінився із оранжевого на темно-коричневий, тобто відбувся СПФП. ЦМД набули форми еліпсу. При наближенні до T_K нижнього шару

відбулося роз'єднання ДС: у нижньому шарі спостерігалася монодоменність, у верхньому – смугова ДС оранжевого кольору.

2. Поведінка ДС при підвищенні температури

При 90 К спостерігалися оранжевого кольору СДС верхнього шару та монодоменність нижнього шару (рис. 2). При віддаленні від T_K виникли оранжевого кольору смугові домени нижнього шару, потім ЦМД і ґратка ЦМД. Поблизу T_0 спостерігалися кризні кільцеві домени та кризна смугова ДС, яка зберігалася до T_2 . При T_2 відбулося роз'єднання СДС: утворилися смугові домени з різними періодами. При нагріванні плівки СПФП не спостерігався.

У одношарових плівок-“свідків” температурні залежності періодів ДС мали монотонний характер. У поведінці ДС двошарової плівки при порівнянні зі “свідками” є чотири відмінності: зміна кольору ДС при наближенні до T_K (охолодження); наявність кризної ДС при середніх температурах; роз'єднання ДС верхнього та нижнього шарів при високій T ; спостерігається кільцевий домен.

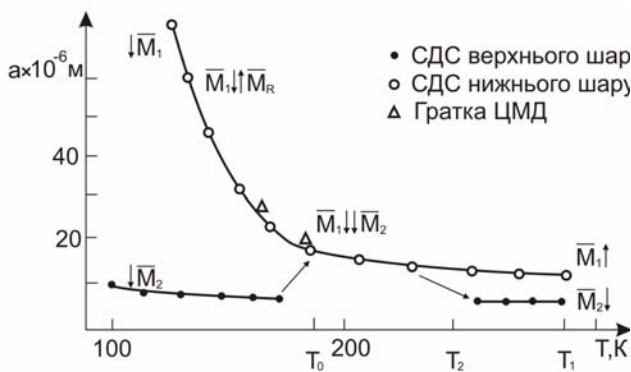


Рис. 2. Температурна залежність періоду ДС при нагріванні.

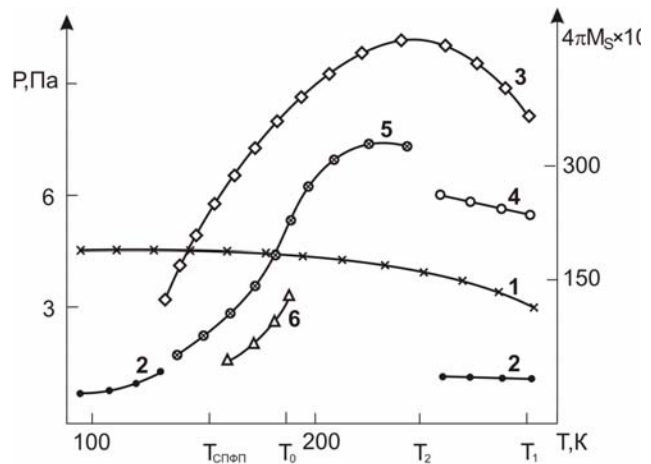


Рис. 3. Температурні залежності намагніченості насичення $4\pi M_S$ та магнітостатичного тиску P при охолодженні: 1,2 – верхнього шару; 3,4 – нижнього шару; 5,6 – P кризних СДС та ґратки ЦМД.

II. Обговорення результатів

Для пояснення експериментальних результатів було застосовано термодинамічний підхід з використанням концепції магнітостатичного тиску P в ДС. Тиск рівноважної смугової ДС був розрахований з енергії СДС [7] за формулою:

$$P = \frac{8M_s^2}{\pi} \left[2 \operatorname{arctg} \frac{\pi h}{a} + \frac{a}{\pi h} \ln \frac{a^2}{a^2 + \pi^2 h^2} \right],$$

де M_s – намагніченість насичення, a – період СДС, h – товщина плівки.

При охолодженні в інтервалі $T_1 - T_2$ вектори намагніченості обох шарів антипаралельні ($\vec{M}_1 \uparrow \downarrow \vec{M}_2$). Оскільки M_1 нижнього шару більше M_2 верхнього шару (рис. 3), то при зниженні T підмагнічуюче поле примусило повернутися \vec{M}_2 паралельно \vec{M}_1 . Якщо $\vec{M}_1 \uparrow \uparrow \vec{M}_2$, то може існувати кризна ДС, яка спостерігається при $T < T_2$. Як було показано у [3], при таких температурах це енергетично вигідна структура. При цьому слід враховувати тільки магнітостатичну взаємодію [1]. При T_2 спостерігався стрибок тиску (рис. 3). Це говорить про те, що відбувся ФП у ДС верхнього шару, оскільки саме там відбулося обертання \vec{M}_2 на 180° . При подальшому зниженні T , коли магнітостатичний тиск СДС став дорівнювати тиску ґратки ЦМД, з'явилася можливість створити імпульсним полем кризну ґратку ЦМД. Ґратка ЦМД існувала у тому інтервалі температур, в якому ще не виникла намагніченість рідкісноземельної підґратки (\vec{M}_R) в нижньому шарі, де є T_K . Намагніченість рідкісноземельної підґратки виникає у напрямку, протилежному напрямку \vec{M}_1 залізної підґратки нижнього шару. Вона діє як розмагнічуюче поле на ЦМД, оскільки намагніченість в середині ЦМД має напрямок, протилежний \vec{M}_1 та \vec{M}_2 залізних підґраток обох шарів. Намагніченість нижнього шару стала менше ніж верхнього, тому з'явилася необхідність повороту вектора намагніченості ЦМД. Вектор M ЦМД утворив кут з вертикальною віссю, з'явилася кутова фаза, в наслідок чого змінився колір доменів з оранжевого на темно-коричневий. Таким чином, у двошаровій плівці відбувся СПФП із осьової фази в кутову фазу завдяки сумарній дії рідкісноземельної підґратки нижнього шару та підмагнічуючого поля верхнього шару. При наближенні до T_K , коли \vec{M}_R компенсується \vec{M}_1 залізної підґратки, у верхньому шарі створюються домени з тією орієнтацією \vec{M}_2 , яка була при високій T (рис. 1, рис. 3), тобто вигідною для верхнього шару. Вплив підмагнічуючого поля верхнього шару на утворення кутової фази підтверджує спостереження поведінки ДС в одношаровій плівці-“свідку” $(Y\text{Gd}\text{Tm})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$. У тому інтервалу температур, де орієнтуються спіни рідкісноземельної

підґратки, у “свідка” не спостерігається кутова фаза. СПФП не відбувається. Отже, дії однієї рідкісноземельної підґратки без підмагнічуючого поля (що надавав верхній шар) недостатньо.

При нагріванні від T_K \vec{M} залізних підґраток обох шарів спрямовані паралельно тому, що поле верхнього шару підмагнічує нижній шар з T_K . \vec{M}_1 залізної підґратки під впливом підмагнічуючого поля верхнього шару набуло напрямку результуючої намагніченості верхнього шару, \vec{M}_R рідкісноземельної підґратки спрямована антипаралельно. Кутова фаза не з'являється, оскільки дії тільки рідкісноземельної підґратки недостатньо, про що говорилось раніше. При нагріванні СПФП не спостерігається. Поблизу T_0 , коли M_R наближається до нуля, з'являється кризна смугова ДС, відбувається стрибок магнітостатичного тиску, тобто відбувається ФП у ДС. При більш високих T , коли намагніченість нижнього шару набуває більшої величини, \vec{M}_1 залізної підґратки нижнього шару перевертається і стає антипаралельним \vec{M}_2 верхнього шару. Доменні структури роз'єднуються. Відбувається ФП у ДС та спостерігається стрибок тиску (T_2 , рис. 2, рис. 4).

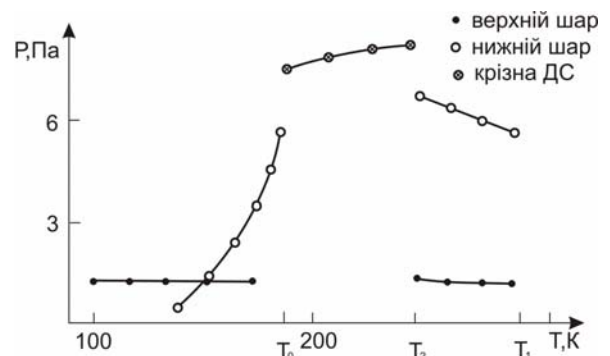


Рис. 4. Температурні залежності магнітостатичного тиску при нагріванні.

Отже, при зміні T у рівноважній ДС спостерігалось декілька індукованих підмагнічуючих полями шарів плівки ФП та один СПФП. Оскільки механізми ФП у двошаровій плівці відрізняються від ФП у ДС, які ми раніше розглядали у роботах [8,9], то є потреба обговорити їх докладніше. При охолодженні поблизу T_2 у ДС відбувається ФП шляхом оберту на 180° вектора \vec{M}_2 верхнього шару під впливом підмагнічуючого поля нижнього шару. Наслідком цього є утворення кризної смугової ДС та стрибок магнітостатичного тиску. При нагріванні плівки поблизу T_0 відбувається ФП завдяки зникненню протидіючого поля рідкісноземельної підґратки. Як наслідок – утворення кризної СДС та стрибок тиску. Поблизу T_2 відбувається ФП шляхом оберту на 180° вектора \vec{M}_1 нижнього шару завдяки росту з температурою власної намагніченості.

У одношарових плівках, як було показано нами у роботах [8,9], ФП першого роду супроводжувався

стрибком магнітостатичного тиску ДС. При ФП другого роду тиск змінювався повільно. Отже, зважаючи на це, можна сказати, що у двошарової плівки відбувалися ФП першого роду. Окрім того, ФП двошарової плівки були спонтанними, адже вони відбувалися при зміні T без дії зовнішніх магнітних полів, але в той же час вони були індуковані залежними від температури підмагнічуючими полями шарів плівки.

Поблизу T_0 , де орієнтуються спіни рідкісноземельної підґратки, спостерігається кільцевий домен. Це два коаксіальних ЦМД з антипаралельною орієнтацією векторів намагніченості. Поява кільцевих доменів можлива тільки при умові утворення кризних доменів. Два діаметра кільцевих доменів визначаються різною величиною M_1 та M_2 обох шарів.

Висновки

У ДС двошарової плівки відбувається декілька ФП першого роду при зміні T . ФП обумовлені поворотом вектора намагніченості в одному з шарів

під впливом підмагнічуючого поля іншого шару. При ФП відбуваються стрибки магнітостатичного тиску в ДС. Спостерігається енергетично вигідна кризна ДС при паралельній орієнтації \vec{M}_1 і \vec{M}_2 обох шарів. При віддаленні від T_K (нагрівання), тільки після розорієнтації спінів рідкісноземельної підґратки, відбувається ФП та з'являються кризні домени.

Поблизу T_K нижнього шару спостерігається результат сумарної дії намагніченості рідкісноземельної підґратки та підмагнічуючи полів. При наближенні до T_K (охолодження), завдяки цій дії, з'являється кутова фаза та відбувається індукований СПФП.

Безус О.В. – аспірант;

Мамалуй Ю.О. – доктор фізико-математичних наук, професор;

Сірюк Ю.А. – кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, докторант.

- [1] A.H. Bobeck, S.L. Blank, H.J. Levinstein. Multilayer Epitaxial Garnet Films for Magnetic Bubble Device. Hard Bubble Suppression // *Bell. Syst. Techn. J.*, **51**(6), pp. 1431-1435 (1972).
- [2] А.И. Беляева, О.В. Милославская, В.П. Юрьев, В.А. Потакова. Ориентационные переходы в двухслойной феррит-гранатовой пленке, индуцируемые полем смещения // *ФТТ*, **26**(1), сс. 3250-3254 (1984).
- [3] А.В. Безус, Ю.А. Мамалуй, Ю.А. Сірюк. Доменная структура двухслойных магнитных пленок с различными характеристиками слоев // *Функциональные материалы*, **11**(3), сс. 491-495 (2004).
- [4] Ю.О. Мамалуй, Ю.А. Сірюк. Поведінка доменної структури поблизу точки компенсації та спінової переорієнтації // *Фізика і хімія твердого тіла*, **7**(4), сс. 650-655 (2006).
- [5] Я.И. Грановский, А.А. Леонов, Ю.А. Мамалуй, Ю.А. Сірюк. Доменные границы в пленках с угловой доменной структурой // *Известия РАН. Серия физическая*, **70**(7), сс. 956-958 (2006).
- [6] Ja.I. Granovskii, A.A. Leonov, Ju.A. Mamalui, Ju.A. Siryuk. Energy and orientation of Bloch type domain walls in magnetics with mixed anisotropy // *J. "Functional materials"*, **13**(3), pp. 1-5 (2006).
- [7] А.Н Богданов, Д.А. Яблонский. К теории доменной структуры ферримагнетиков // *ФТТ*, **22**(3), сс. 680-687 (1980).
- [8] Ю.А. Мамалуй, Ю.А. Сірюк, А.В. Безус. Решетка цилиндрических магнитных доменов вблизи точки компенсации // *ФТТ*, **45**(9), сс. 1645-1652 (2003).
- [9] Ю.А. Мамалуй, Ю.А. Сірюк, Э.А. Завадский. Термодинамический подход при изучении фазовых переходов в решетках цилиндрических магнитных доменов // *Известия РАН. Серия физическая*, **69**(7), сс. 1023-1026 (2005).

A.V. Bezus, Ju.A. Mamalui, Ju.A. Siryuk

Induced Spin-Reorientation Phase Transition in Two-Layer Ferrite-Garnet Film

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

The behaviour of domain structure (DS) under temperature change in single- and two-layer ferrite-garnet films with T_K in one layer has been experimentally investigated. The investigations have shown that for the phase transitions (PT) in the films occurs by magnetization vector rotation in one layer under the influence of bias field from the other layer. Near T_K , the result of combined action of rare-earth sublattice magnetization and bias field of another layer is observed. As a result, when T_K (cooling) is approached, there spin-reorientation phase transition (SRPT) takes place. It has been found that the creation of ring-shaped domains can be possible on the necessarily assumption of through domains existence. The experimental results are explained by the view of the existence of magnetostatic pressure (P) in DS.