

А. Л. Нікитенко, В. І. Костенко, В. І. Григорук, В. Ф. Романюк

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

64, вул. Володимирська, Київ, 01033, Україна

E-mail: art.nikitenko@gmail.com

ТОВЩИННІ ЗАЛЕЖНОСТІ ХАРАКТЕРИСТИК ВИСОКОЧАСТОТНОГО МАГНІТНОГО ГІСТЕРЕЗИСУ В МОНОКРИСТАЛІЧНОМУ БАРІЄВОМУ ГЕКСАФЕРИТІ

Предметом даного дослідження є характеристики гістерезису частотно-польової залежності феромагнітного резонансу в зразках барієвого гексафериту. Мета полягає в експериментальному дослідженні характеристик високочастотного магнітного гістерезису в широкому діапазоні зміни товщини зразків.

Експериментальне дослідження проведене методом НВЧ-спектроскопії. Для створення циліндричної доменної структури використано польовий метод.

Встановлено, що у зразках завтовшки понад 100 мкм перехід у насичений (однодомений) стан відбувається при менших значеннях зовнішнього магнітного поля H_s , більш того, залежність цього поля від товщини близька до лінійної. Аналогічна залежність властива полю H_{br} – переходу зразка в багатодомений стан. Чіткої залежності величини гістерезису від зміни товщини зразків не спостерігається.

Виявлено зсув частотно-польової залежності феромагнітного резонансу у високочастотну область при насиченому стані товстих зразків барієвого гексафериту. Встановлено, що кожен окремий досліджений зразок можна охарактеризувати деяким середнім значенням величини гістерезису, відмінним від інших. Лл. 4. Бібліогр.: 10 назв.

Ключові слова: барієвий гексаферит, монокристал, феромагнітний резонанс, високочастотний гістерезис.

Зростаючий інтерес до барієвого гексафериту M -типу ($BaFe_{12}O_{19}$), чистого і заміщеного, зумовлений його потенційним використанням у пристроях магнітного запису з високою щільністю, для побудови функціональних пристроїв міліметрового (мм) діапазону і як складової радіопоглинальних матеріалів [1]. Барієвому гексафериту притаманні унікальні магнітні властивості, такі як велике поле магнітокристалографічної анізотропії ($H_a \approx 17$ кЕ), відносно велика намагніченість насичення ($M_s = 375$ Гс) і висока температура Кюрі ($T_C = 723$ К). Разом з тим, цей матеріал вирізняється високою корозійною стійкістю і доступною ціною [2].

Дослідження характеристик високочастотного магнітного гістерезису цікаве як із наукової, так і практичної точок зору, адже величини гістерезисних параметрів фактично визначають область техніки, де використовується той чи інший матеріал [3]. Зокрема, в роботі [4] запропоновано ідею використання явища гістерезису частотно-польової залежності (ЧПЗ) феромагнітного резонансу (ФМР) у монокристалічних гексаферитах для створення імпульсно-перемікального резонатора мм діапазону, принцип дії якого полягає у швидкій зміні частоти гексаферитового резонатора завдяки зміні його магнітного стану.

У роботі [5] дано фізичну інтерпретацію плавної зміни частот ФМР при переході епітаксійної плівки $BaFe_{12}O_{19}$ з насиченого (однодоменого) стану в багатодомений. Автори припускають, що плівка не являє собою однозв'язну магнітну область, а може складатися з окремих блоків, в яких доменна структура (ДС) зароджується за

різних значень зовнішнього магнітного поля H_0 . Результати експериментальних досліджень гістерезису ЧПЗ ФМР у монокристалічних зразках $BaFe_{12}O_{19}$ вперше представлені в роботі [6]. Також у цій роботі виконано співставлення параметрів високочастотного гістерезису $f_r = f(H_0)$ з нормованою статичною петлею намагніченості $M/M_s = f(H_0)$. Показано, що на відміну від плівок, у монокристалічних зразках $BaFe_{12}O_{19}$ відбувається стрибкоподібна зміна частоти ФМР при переході гексафериту в багатодомений стан. Дослідженню величини підмагнічувального поля – поля зриву H_{br} , в якому відбувається такий перехід, присвячено роботу [7]. Показано, що H_{br} зменшується при збільшенні величини максимального постійного поля підмагнічування H_{0max} до певної величини H_{0i} , після якої H_{br} залишається практично незмінним і визначається лише розмагнічувальними полями та магнітними параметрами кристалу. Аналіз і узагальнення особливостей магнітного гістерезису ЧПЗ ФМР в монокристалічному $BaFe_{12}O_{19}$ представлено у роботі [8]. У деяких зразках монокристалічного $BaFe_{12}O_{19}$ зафіксовано зародки доменів зворотної намагніченості в насиченому стані і це не призводить до переходу в ДС.

Ця робота присвячена експериментальному дослідженню характеристик високочастотного магнітного гістерезису в одновісних монокристалічних зразках $BaFe_{12}O_{19}$ різних виробників у широкому діапазоні зміни їх товщини.

1. Методика і деталі експериментального дослідження. Експериментальні дослідження ЧПЗ ФМР проводилися методом надвисокочастотної (НВЧ) спектроскопії з використанням

скалярного панорамного вимірювача коефіцієнта стоячої хвилі за напругою (КСХН) та ослаблення у складі індикатора Я2Р-67 та генератора Р2-68. Робочий частотний діапазон використовуваного панорамного вимірювача становив 37,5...53,57 ГГц, відносна похибка вимірювання частоти складала 1,5 %. Магнітне поле H_0 створювалося за допомогою постійного електромагніту, а його величина визначалася вимірювачем магнітної індукції Ш1-8. Відносна похибка вимірювання H_0 складала 1,5 %.

В експерименті вимірювалася частотна залежність модуля коефіцієнта відбиття S_{11} зразків $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$, розташованих на короткозамикачі вимірювальної секції прямокутного хвилеводу, розміщеного між полюсами магніту. Поле H_0 було спрямовано по нормалі до поверхні зразків $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ і змінювалось у діапазоні 0...6,5 кЕ. Вісь легкого намагнічування (ВЛН) гексаферитів орієнтована нормально до площини зразків. Частота ФМР відповідала центральній частоті f_r низькочастотного піку S_{11} і становила предмет дослідження. Перед початком вимірювань зразки перемагнічувались під кутом $\varphi = 2^\circ 22'$ між полем $H_0 \approx 21$ кЕ і поверхнею пластинки, що у випадку тонких зразків відповідає утворенню в них циліндричної ДС.

Експериментальне дослідження характеристик гістерезису ЧПЗ ФМР виконано на чотирьох зразках монокристалічного $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ таких розмірів і товщин (t):

- №1 $a \times b = 1,85 \times 2,10$ мм², $t = 22 \dots 474$ мкм;
- №2 $a \times b = 2,05 \times 4,10$ мм², $t = 17 \dots 733$ мкм;
- №3 $a \times b = 1,70 \times 3,95$ мм², $t = 20 \dots 450$ мкм;
- №4 диск діаметром $d = 2,40$ мм, $t = 150 \dots 430$ мкм.

Товщина зразків зменшувалась довільно шляхом шліфування їх поверхні.

2. Результати дослідження і їх обговорення. На рис. 1 представлена ЧПЗ ФМР у зразку №2 товщиною $t = 45$ мкм в області існування гістерезису. Крива ω_1 відповідає основній моді ФМР у доменній області, яка при полях намагнічування, що перевищують поле насичення H_s , переходить в моду ω_0 . Стрілками показано напрямки зсуву частоти ФМР при прямому та зворотному напрямках зміни поля H_0 .

Теоретичний розрахунок частот ФМР гілки ω_1 виконано за формулою [9]:

$$\omega_1^2 = \frac{\gamma^2}{2} \left(\rho - \left[\rho^2 - 4(A^2 - B^2)(AC - BD) \right]^{1/2} \right), \quad (1)$$

де $\rho = A^2 + B^2 + BD + AC$; A, B, C, D – коефіцієнти, що залежать від H_0 та товщини гексафериту t ; γ – гіромагнітне відношення.

У насиченій області розрахунок частоти ω_0 проводився за формулою [9]:

$$\omega_0 = \gamma(H_a - 4\pi M + H_0). \quad (2)$$

При розрахунку використані наступні параметри гексафериту: $H_a = 16,95$ кЕ, $4\pi M = 4,71$ кГс. Як бачимо, експериментальна крива при зростанні H_0 добре узгоджується з результатом розрахунку.

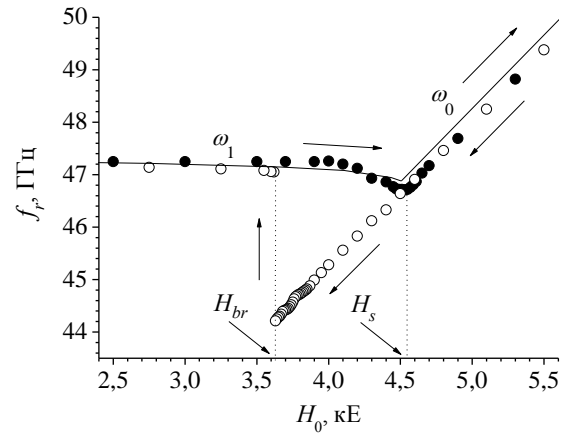


Рис. 1. ЧПЗ ФМР у зразку №2 товщиною $t = 45$ мкм. Точки відповідають експериментальним даним (• – при зростанні H_0 ; ○ – при спаданні), суцільна лінія – результат розрахунку

На рис. 2 і 3 представлено залежності полів H_s і H_{br} відповідно від товщини гексафериту для різних зразків.

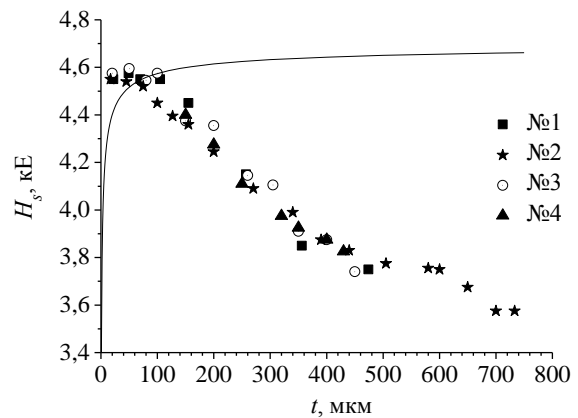


Рис. 2. Графіки залежності поля насичення H_s від товщини гексафериту для різних зразків. Позначки відповідають експериментальним даним, суцільна лінія – результат розрахунку

Залежність $H_s(t)$ можна умовно поділити на дві принципово відмінні області: при товщинах гексафериту до 100 мкм, де залежність від t відсутня, і понад 100 мкм, де спостерігається майже лінійне зменшення H_s . Суцільна лінія на рис. 2 – це результат розрахунку H_s з використанням наведених вище формул (1) і (2). Як бачимо, кореляція експериментальних даних і розрахунку відповідно до використаної теоретичної моделі [9] в цілому спостерігається лише для товщин $t \approx 100$ мкм. Слід зазначити, що ця модель допускає існування в гексафериті лише наскрізних до-

менів з намагніченістю, спрямованою паралельно або антипаралельно напрямку ВЛН. Разом з тим, відомо [10], що у випадку збільшення товщини гексафериту в таких доменах утворюються внутрішні субдомени клиноподібної форми, намагніченість в яких протилежна намагніченості головних доменів. Ця обставина повинна бути врахована в теоретичній моделі для опису ЧПЗ ФМР у товстих зразках. Таким чином, зсув частот ФМР у височастотну область за умов насичення в зразках з $t > 100$ мкм потребує подальшого теоретичного аналізу.

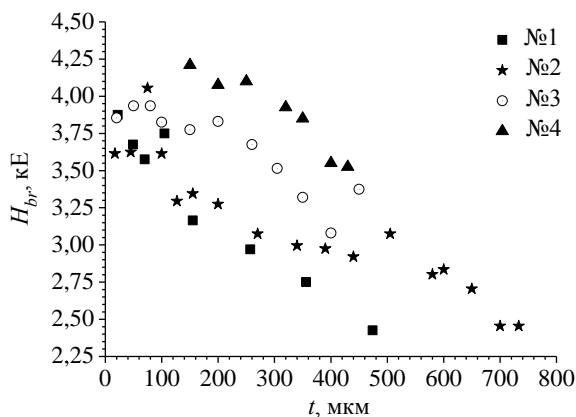


Рис. 3. Графіки залежності поля зриву H_{br} від товщини гексафериту для різних зразків

Хід залежності H_{br} (рис. 3) в цілому повторює H_s . Різниця між полями переходу гексафериту в насичений стан H_s при збільшенні поля H_0 і полем переходу зразка в доменний стан H_{br} при зворотному напрямку зміни H_0 складає величину гістерезису $\delta H_{s-br} = H_s - H_{br}$, яка для досліджуваних зразків представлена на рис. 4.

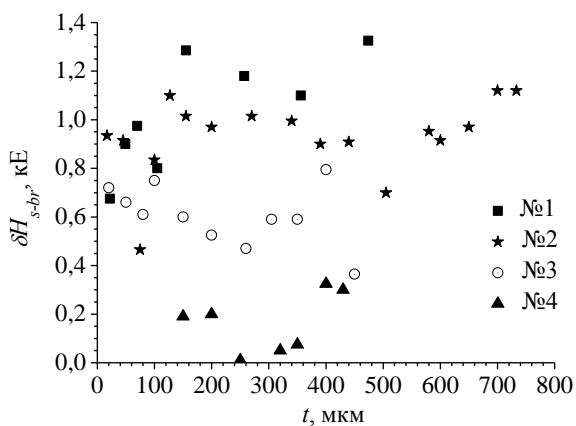


Рис. 4. Залежність величини гістерезису δH_{s-br} від товщини гексафериту для різних зразків

Як видно з рис. 4, чіткої залежності величини δH_{s-br} від товщини зразка не спостерігається, однак очевидно, що для різних зразків середнє значення цієї величини суттєво відрізняється.

Зміна величини гістерезису для одного і того ж зразка може бути викликана нерівномірністю обробки їх поверхні при певних товщинах.

Висновки. Проведено дослідження характеристик гістерезису ЧПЗ ФМР за умов зміни товщини барієвого гексафериту. Виявлено експериментальний факт зсуву ЧПЗ ФМР у височастотну область у зв'язку зі зменшенням величини H_s для товстих зразків ($t > 100$ мкм). Разом з тим, залежність H_{br} підпорядковується зміні H_s і в цілому має аналогічний характер.

Чіткої залежності величини гістерезису δH_{s-br} від зміни товщини зразка не виявлено. Проте кожен окремий зразок можна охарактеризувати деяким середнім значенням цієї величини, відмінним від інших. Ця обставина може вказувати на різницю в якості матеріалів, тобто різну кількість дефектів (магнітних неоднорідностей).

Бібліографічний список

- Mosleh Z., Kameli P., Poorbaferani A., Ranjbar M., Salamati H. Structural, magnetic and microwave absorption properties of Ce-doped barium hexaferrite. *J. Magn. Magn. Mater.* 2016. Vol. 397. P. 101–107. DOI: 10.1016/j.jmmm.2015.08.078
- Baykal A., Auwal I. A., Guner S., Sozeri H. Magnetic and optical properties of Zn²⁺ ion substituted barium hexaferrites. *J. Magn. Magn. Mater.* 2017. Vol. 430. P. 29–35. DOI: 10.1016/j.jmmm.2016.11.062
- Кандаурова Г. С., Природа магнітного гістерезиса. *Соросовский образовательный журнал.* 1997. № 1. С. 100–106.
- Сорочак А. М., Костенко В. И., Чамор Т. Г., Чевнюк Л. В. Импульсно-переключаемый СВЧ-резонатор на монокристаллическом гексаферрите. *Изв. вузов. Радиоэлектроника.* 2011. Т. 54, № 8. С. 13–17. DOI:10.20535/S0021347011080024
- Зависяк И. В., Костенко В. И., Чамор Т. Г., Чевнюк Л. В. Ферромагнитный резонанс в эпитаксиальных пленках одноосных бариевых гексаферритов. *Журн. техн. физ.* 2005. Т. 75, № 4. С. 128–130.
- Костенко В. И., Сорочак А. М., Чамор Т. Г., Чевнюк Л. В. Гистерезис частотно-полевых зависимостей и процессы перемагничивания в бариевом гексаферрите. *Журн. техн. физ.* 2008. Т. 78, № 10. С. 132–134.
- Костенко В. И., Нечипорук О. Ю., Сорочак А. М., Чамор Т. Г., Чевнюк Л. В. Экспериментальне дослідження височастотних властивостей магнітного гістерезису одноосних монокристалічних гексаферритів. *Вісник Київського нац. ун. імені Тараса Шевченка. Серія: фіз.-мат. наук.* 2011. № 1. С. 249–252.
- Костенко В. И., Чевнюк Л. В., Нікитенко А. Л., Григорук В. И., Сорочак А. М. Особенности магнитного гистерезиса в монокристаллических одноосных гексаферритах М-типа. *Журн. техн. физ.* 2017. Т. 87, № 3. С. 390–393. DOI: 10.21883/JTF.2017.03.44244.2002
- Kostenko V. I., Sigal M. A. Magnetostatic waves in a thin uniaxial platelet with stripe domains magnetized along the easy axis. *Phys. Status Solidi B.* 1992. Vol. 170, Iss. 2. P. 569–584. DOI: 10.1002/pssb.2221700222
- Kaczer J., Gemperle R. The thickness dependence of the domain structure of magnetoplumbite. *Czech. J. Phys.* 1960. Vol. 10, Iss. 7. P. 505–510. DOI: 10.1007/BF01557359

REFERENCES

- Mosleh, Z., Kameli, P., Poorbaferani, A., Ranjbar, M., Salmati, H., 2016. Structural, magnetic and microwave absorption

- properties of Ce-doped barium hexaferrite. *J. Magn. Magn. Mater.*, **397**, pp. 101–107. DOI: 10.1016/j.jmmm.2015.08.078
2. Baykal, A., Yuwal, I. A., Guner, S., Sozeri, H., 2017. Magnetic and optical properties of Zn^{2+} ion substituted barium hexaferrites. *J. Magn. Magn. Mater.*, **430**, pp. 29–35. DOI:10.1016/j.jmmm.2016.11.062
 3. Kandaurova, G. S., 1997. The nature of magnetic hysteresis. *Sorosovskiy obrazovatel'nyy zhurnal*, **1**, pp. 100–106 (in Russian).
 4. Sorochak, A. M., Kostenko, V. I., Chamor, T. G., Chevnyuk, L. V., 2011. Pulse-switchable microwave resonator on a basis of monocrystal hexaferrite. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Radioelektron.*, **54**(8), pp. 13–17. DOI: 10.20535/S0021347011080024 (in Russian).
 5. Zavislyak, I. V., Kostenko, V. I., Chamor, T. G., Chevnyuk, L. V., 2005. Ferromagnetic resonance in epitaxial films of uniaxial barium hexaferrites. *Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki*, **75**(4), pp. 128–130 (in Russian).
 6. Kostenko, V. I., Sorochak, A. M., Chamor, T. G., Chevnyuk, L. V., 2008. Hysteresis of frequency-field dependences and magnetization reversal in barium hexaferrite. *Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki*, **78**(10), pp. 132–134 (in Russian).
 7. Kostenko, V. I., Nechiporuk, O. Yu., Sorochak, A. M., Chamor, T. G., Chevnyuk, L. V., 2011. Experimental research of magnetic hysteresis high-frequency properties in uniaxial single-crystal hexaferrites. *Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Ser. Physics & Mathematics*, **1**, pp. 249–252 (in Ukrainian).
 8. Kostenko, V. I., Chevnyuk, L. V., Nikytenko, A. L., Grygoruk, V. I., Sorochak, A. M., 2017. Specific features of magnetic hysteresis in single-crystalline uniaxial M-type hexaferrites. *Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki*, **87**(3), pp. 390–393. DOI: 10.21883/JTF.2017.03.44244.2002 (in Russian).
 9. Kostenko, V. I., Sigal, M. A., 1992. Magnetostatic waves in a thin uniaxial platelet with stripe domains magnetized along the easy axis. *Phys. Status Solidi B*, **170**(2), pp. 569–584. DOI: 10.1002/pssb.2221700222
 10. Kaczer, J., Gemperle, R., 1960. The thickness dependence of the domain structure of magnetoplumbite. *Czech. J. Phys.*, **10**(7), pp. 505–510. DOI: 10.1007/BF01557359

Рукопис надійшов 29.06.2017.

A. L. Nikytenko, V. I. Kostenko, V. I. Grygoruk,
V. F. Romaniuk

THICKNESS DEPENDENCES OF HIGH-FREQUENCY MAGNETIC HYSTERESIS PROPERTIES IN SINGLE-CRYSTAL BARIUM HEXAFERRITE

In this work we study the properties of hysteresis of ferromagnetic resonance frequency-field dependence in the samples of barium hexaferrite. The purpose of the study is the experimental investigation into the properties of high-frequency magnetic hysteresis within the wide range of the samples thickness.

The experimental investigation was carried out using EHF-spectroscopy technique. The field method is used to obtain a cylindrical domain structure.

It was found that in thick samples ($t > 100 \mu\text{m}$) the transition to a saturated (single-domain) state occurs at lower values of the external magnetic field H_s , moreover, the dependence of this field on the thickness is close to the linear one. Furthermore, a similar dependence is observed for the field H_{br} of the sample transition to a multi-domain state. At the same time, there is no strict dependence of the hysteresis value on the change in the thickness of the samples.

The shift of the frequency-field dependence of the ferromagnetic resonance in the high-frequency region under the saturated state of thick samples of barium hexaferrite was detected. It was found that each investigated sample can be characterized by some average value of hysteresis different from the others.

Key words: barium hexaferrite, single-crystal, ferromagnetic resonance, high-frequency hysteresis.

А. Л. Никитенко, В. И. Костенко, В. И. Григоруку,
В. Ф. Романюк

ТОЛЩИННЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК ВЫСОКОЧАСТОТНОГО МАГНИТНОГО ГИСТЕРЕЗИСА В МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОМ БАРИЕВОМ ГЕКСАФЕРРИТЕ

Предметом данного исследования являются характеристики гистерезиса частотно-полевой зависимости ферромагнитного резонанса в образцах бариевого гексаферрита. Цель состоит в экспериментальном исследовании характеристик высокочастотного магнитного гистерезиса в широком диапазоне изменения толщины образцов.

Экспериментальное исследование проведено методом СВЧ-спектроскопии. Для создания цилиндрической доменной структуры использован полевой метод.

Установлено, что в толстых образцах ($t > 100 \mu\text{м}$) переход в насыщенное (однодоменное) состояние происходит при меньших значениях внешнего магнитного поля H_s , более того, зависимость этого поля от толщины близка к линейной. Вместе с тем, аналогичная зависимость характерна для поля H_{br} – перехода образца в доменное состояние. При этом четкой зависимости величины гистерезиса при изменении толщины образцов не наблюдается.

Обнаружен сдвиг частотно-полевой зависимости ферромагнитного резонанса в высокочастотную область при насыщенном состоянии толстых образцов бариевого гексаферрита. Установлено, что каждый отдельный исследованный образец можно охарактеризовать некоторым средним значением величины гистерезиса, отличным от других.

Ключевые слова: бариевый гексаферрит, монокристалл, ферромагнитный резонанс, высокочастотный гистерезис.