

01,05,13

Особенности перемагничивания двухслойной пленочной структуры ЖИГ/FeNi

© А.В. Свалов¹, В.Е. Иванов¹, В.Н. Лепаловский¹, А.А. Фещенко¹, А.Н. Горьковенко¹, И.А. Макарошкин¹, В.О. Васьяковский^{1,2}, Г.В. Курляндская¹

¹ Институт естественных наук и математики, Уральский федеральный университет им. Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

² Институт физики металлов им. М.Н. Михеева РАН, Екатеринбург, Россия

E-mail: E-mail: andrey.svalov@urfu.ru

Поступила в Редакцию 29 апреля 2022 г.

В окончательной редакции 29 апреля 2022 г.

Принята к публикации 12 мая 2022 г.

Представлены результаты магнитооптических и магнитометрических измерений, проведенных на двухслойных пленочных структурах ЖИГ/FeNi. Пленки ЖИГ были выращены методом жидкофазной эпитаксии, а пленки FeNi осаждены методом магнетронного распыления. Установлено, что в системе ЖИГ/FeNi имеет место межслойная магнитная связь, которая обусловлена, в основном, магнитостатическим взаимодействием.

Ключевые слова: железиттриевый гранат, пермаллой, межслойная связь, магнитостатическое и обменное взаимодействие, магнитная доменная структура.

DOI: 10.21883/FTT.2022.09.52796.04NN

1. Введение

Пленки ЖИГ, интерес к которым много лет назад был обусловлен их применением в технике магнитных цилиндрических доменов (ЦМД) [1], в настоящее время вновь являются предметом активного внимания как часть структур, используемых в устройствах магноники и других приложениях, основанных на особенностях магнитодинамики материалов [2–3]. Как в ЦМД устройствах, так и в элементах СВЧ-электроники и спинтроники пленки ЖИГ могут находиться в контакте с ферромагнитными металлическими пленками, что приводит к возникновению магнитного взаимодействия между ними [1,4–6]. Однако в литературе нет однозначного ответа относительно природы этой связи. Часть исследователей говорит о наличии обменного взаимодействия в таких двухслойных структурах, не конкретизируя механизм обмена [1,4,7,8], другие предполагают прямой обмен [5,9] или сверхобмен [9], третьи объясняют межслойную связь магнитостатическим взаимодействием [6].

Если обменное взаимодействие в такой двухслойной системе присутствует, она может оказаться интересным модельным объектом при условии существования перпендикулярной магнитной анизотропии в пленке ЖИГ. Вопрос о механизме обмена в пленочных системах с ортогональной ориентацией намагниченностей остается до настоящего времени открытым [10–12]. В данной работе исследованы особенности перемагничивания двухслойных пленочных структур ЖИГ/FeNi и ЖИГ/Ta/FeNi.

2. Методика исследований

Пленки легированного железиттриевого граната (ЖИГ) толщиной $5\ \mu\text{m}$ были выращены методом жидкофазной эпитаксии на подложке гадолиний-галлиевого граната толщиной $500\ \mu\text{m}$, ориентация поверхности которой совпадала с плоскостью (111). Пленки пермаллоя $\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}$ (FeNi) толщиной $10\text{--}40\ \text{nm}$ были осаждены

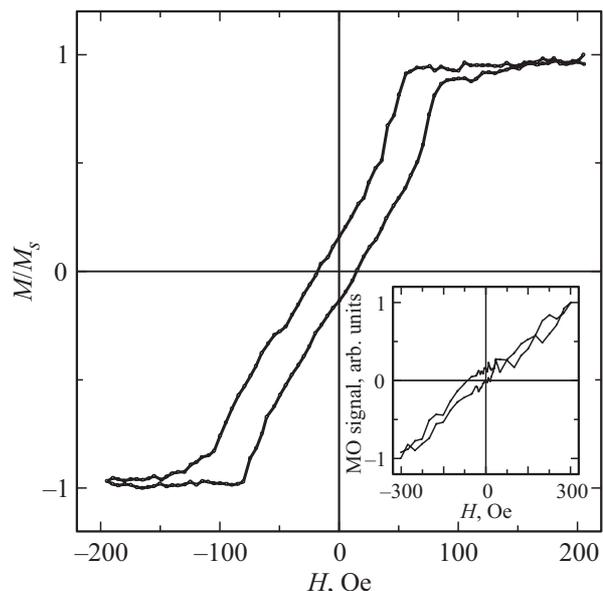


Рис. 1. Магнитооптические петли гистерезиса пленки ЖИГ, измеренные в геометрии полярного эффекта Керра при ориентации магнитного поля перпендикулярно плоскости образца и в плоскости образца (вставка).

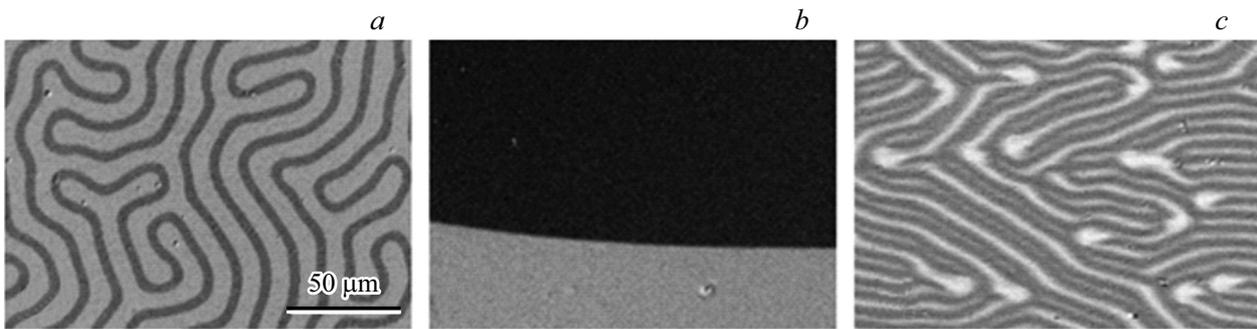


Рис. 2. Изображения магнитной доменной структуры ЖИГ (а), пленки FeNi на стеклянной подложке (b) и пленки FeNi, напыленной на ЖИГ (с), полученные в геометрии полярного (а) и продольного (b, c) эффекта Керра.

методом магнетронного распыления на стеклянные подложки и на пленку ЖИГ как непосредственно, так и через промежуточный слой Ta толщиной до 10 nm. Процесс напыления пленок осуществлялся в присутствии технологического постоянного магнитного поля напряженностью 250 Oe, ориентированного в плоскости подложки. Рентгенографические исследования образцов были выполнены на дифрактометре D8-Advance. Измерения магнитных свойств пленок были проведены с помощью вибрационного магнетометра и Керр-микроскопа Evico Magnetics при комнатной температуре.

3. Полученные результаты

Рентгенографические исследования образцов не выявили зависимости структурных особенностей слоев FeNi от материала подложки и наличия подслоя Ta. Средний размер кристаллитов FeNi, определенный с помощью формулы Шеррера, для всех образцов составил 15 nm.

Намагниченность пленок граната составляла 20 G. Пленки ЖИГ, судя по характерным петлям гистерезиса (рис. 1), обладали перпендикулярной магнитной анизотропией. В плоскости они были изотропными, о чем свидетельствует наличие типичной лабиринтной магнитной доменной структуры (ДС) (рис. 2, a). Кроме того, внешнее магнитное поле, приложенное в плоскости пленки ЖИГ с амплитудой 300 Oe, не изменяло конфигурацию ДС. Таким образом, можно предполагать, что и во время осаждения слоя FeNi в присутствии технологического поля величиной 250 Oe в пленке ЖИГ присутствовала лабиринтная доменная структура.

Пленки пермаллоя различной толщины, осажденные на стеклянные подложки (Corning) в присутствии технологического постоянного магнитного поля напряженностью 250 Oe, обладали наведенной одноосной магнитной анизотропией. Ось легкого намагничивания (ОЛН) была ориентирована в плоскости пленки и совпадала с осью приложения технологического поля (рис. 3), что нашло отражение в характерной доменной структуре (рис. 2, b).

Природа и возможные механизмы возникновения данной так называемой *M*-наведенной анизотропии в поликристаллических пленках 3D-металлов и их сплавов хорошо изучены [13]. Величины коэрцитивной силы и поля анизотропии пленок FeNi составляли 1.1 ± 0.1 Oe и 5 ± 1 Oe, соответственно.

В пленках FeNi, осажденных на ЖИГ, также наблюдалась лабиринтная ДС (рис. 2, c). Период этой структуры, измеренный в отсутствии внешнего магнитного поля, составлял $11 \pm 1 \mu\text{m}$ для всех образцов ЖИГ/FeNi вне зависимости от толщины слоя пермаллоя и наличия или отсутствия прослойки Ta и совпадал с периодом ДС пленки ЖИГ в пределах точности измерений. Отметим, что после воздействия импульса вертикального магнитного поля, величина которого превышала величину поля насыщения пленки ЖИГ, в нулевом внешнем поле конфигурация лабиринтной ДС в пленке пермаллоя

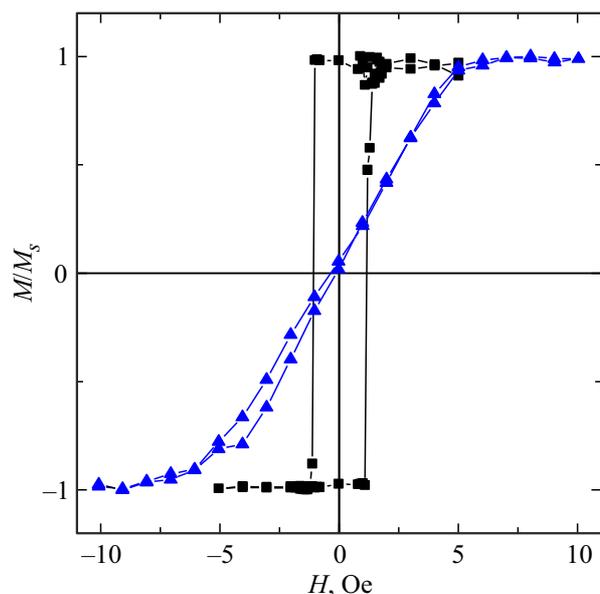


Рис. 3. Магнитооптические петли гистерезиса пленки FeNi(10 nm), измеренные в геометрии продольного эффекта Керра вдоль (квадратики) и перпендикулярно (треугольники) оси технологического магнитного поля.

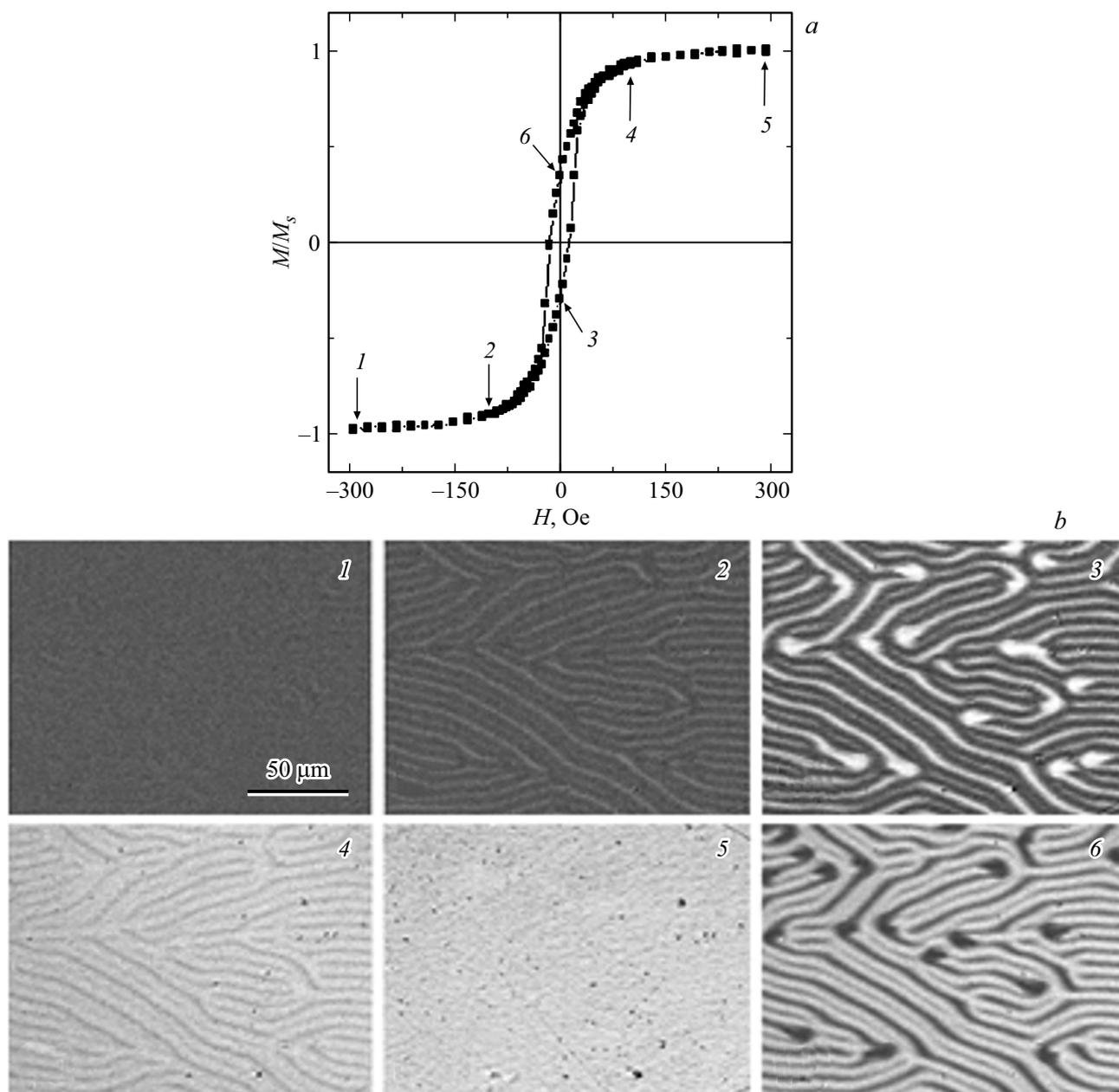


Рис. 4. Магнитооптическая петля гистерезиса пленки FeNi(40 nm), осажденной на ЖИГ, измеренная в геометрии продольного эффекта Керра вдоль оси технологического магнитного поля (а), и изображения магнитной доменной структуры, соответствующие участкам петли гистерезиса, обозначенным цифрами.

изменяется. Это свидетельствует о том, что в процессе осаждения на ЖИГ слоя FeNi не происходит стабилизации доменных границ в слое пермаллоя.

Магнитооптические (МО) петли гистерезиса пленок FeNi, осажденных на ЖИГ, заметно отличаются от петель пленок пермаллоя, осажденных на стеклянные подложки как формой, так и повышенной коэрцитивной силой ($H_c = 9 \pm 2$ Oe). На рис. 4 показаны МО петли гистерезиса образца ЖИГ/FeNi(40 nm), ось перемагничивания совпала с осью приложения технологического поля, и соответствующие изображения ДС.

При абсолютной величине поля 300 Oe пленка FeNi намагничена до насыщения. Домены обратной фазы появляются в поле зрения до смены направления внешнего поля и при использованных условиях наблюдения становятся различимы при уменьшении поля примерно до 150 Oe. Как уже отмечалось выше, период этой ДС совпадает с периодом ДС ЖИГ. При этом общий вид ДС при воздействии внешнего поля сохраняется, а изменяются только количество и ширина доменов разных фаз. Все это свидетельствует о том, что ДС в слое FeNi формируется в первую очередь под влиянием

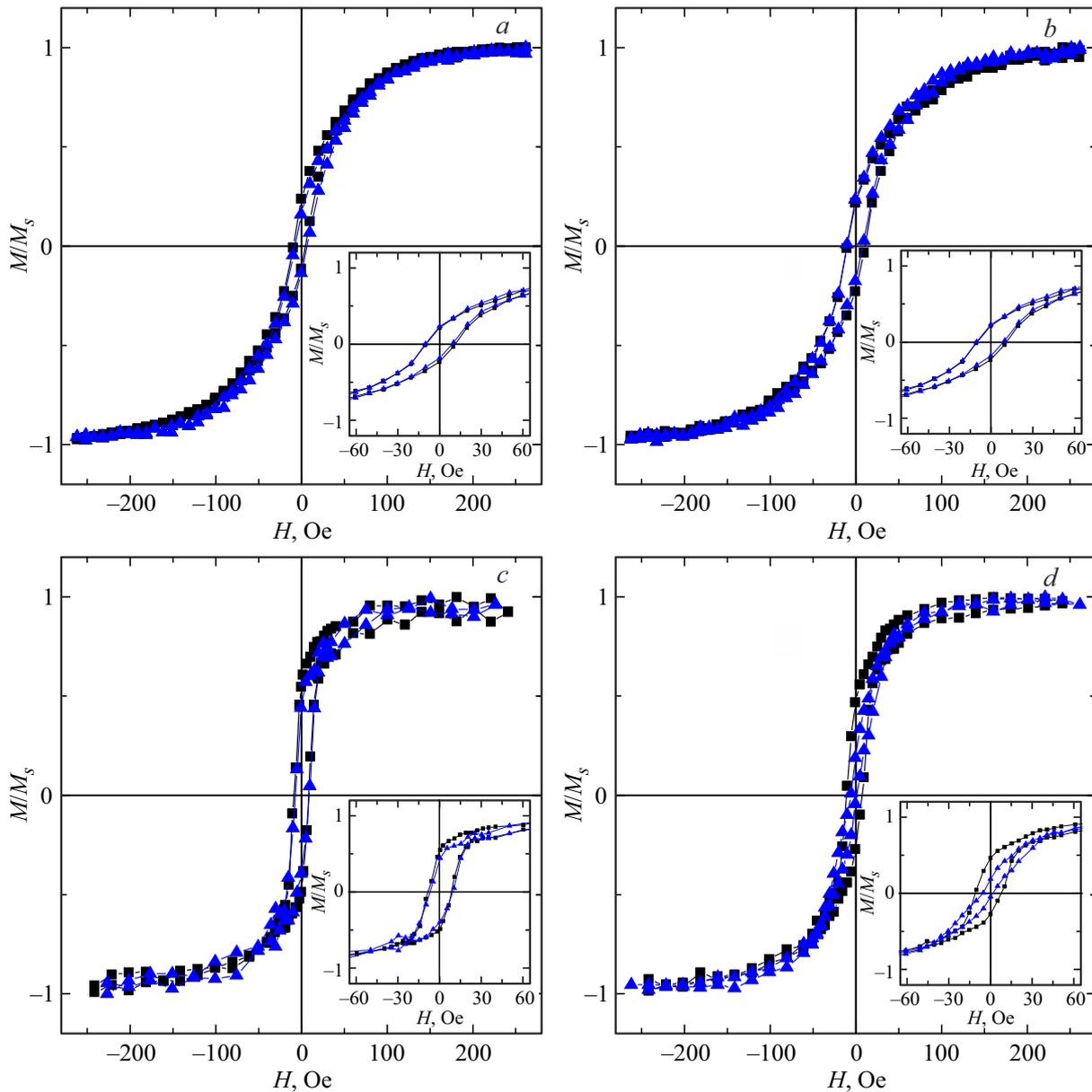


Рис. 5. Магнитооптические петли гистерезиса пленок FeNi толщиной 10 nm (*a, b*) и 40 nm (*c, d*), осажденных на ЖИГ (*a, c*) и ЖИГ/Ta(10 nm) (*b, d*), измеренные в плоскости образца в геометрии продольного эффекта Керра вдоль (квадратики) и перпендикулярно (треугольники) оси технологического поля. На вставках показаны части петель в увеличенном масштабе.

полей рассеяния лабиринтной ДС ЖИГ. Иными словами, слой пермаллоя выступает в качестве индикаторной пленки [14,15], реагирующей на поля рассеяния магнитной системы, образованной доменами ЖИГ, в которых намагниченность ориентирована перпендикулярно плоскости образца. Вертикальная компонента полей рассеяния над доменами в такой структуре составляет порядка $2\pi M_s$ или примерно 120 Oe для использованного в настоящей работе типа ЖИГ. Известно, что касательная компонента поля рассеяния над стенкой Блоха в полосовой доменной структуре открытого типа может заметно превосходить эту величину [16]. Это может быть

причиной того, что при размагничивании исследуемых здесь образцов ДС в слое пермаллоя „проявляется“ уже во внешнем поле величиной около 150 Oe, т.е. много раньше, чем в однослойной пленке пермаллоя.

В работе [7] исследовались пленки Fe, также осажденные на ЖИГ, обладающий перпендикулярной магнитной анизотропией. На основе измерений, проведенных с помощью магнитосиловой микроскопии, авторы делают вывод о том, что в пленках Fe толщиной менее 20 nm, намагниченность имеет перпендикулярную компоненту, а при большей толщине ориентирована в плоскости пленки. Данные настоящего исследования свидетель-

ствуют о том, что даже для слоев FeNi(10 nm) намагниченность оказывается ориентирована в плоскости образца.

Вид и количественные параметры петель гистерезиса, измеренных вдоль и перпендикулярно оси технологического поля (рис. 5, *a, b*), указывают на то, что в двухслойных пленочных структурах ЖИГ/FeNi слой пермаллоя ведет себя как магнитоизотропный. Этот факт также находит логичное объяснение в рамках предположения о том, что перемагничивание слоя FeNi происходит, в первую очередь, под влиянием полей рассеяния ДС пленки ЖИГ, много превосходящих характерную величину поля наведенной магнитной анизотропии, наводимой в пленках пермаллоя при напылении в присутствии внешнего магнитного поля. При этом направления полей рассеяния ДС ЖИГ равновероятно распределены в плоскости образцов в силу специфической конфигурации лабиринтной ДС ЖИГ.

Серия образцов, в процессе напыления которых между ЖИГ и FeNi волилась прослойка Ta, была приготовлена с целью вычленивать роли возможного обменного взаимодействия и магнитостатической межслойной связи. Известно, что введение немагнитной прослойки толщиной несколько нанометров между магнитными слоями приводит к исчезновению межслойного обменного взаимодействия между слоями [17]. В системе ЖИГ/(металлическая магнитная пленка) это происходит при толщине прослойки не более 5 nm [9,18]. В наших образцах введение прослойки Ta толщиной 10 nm между гранатом и пленкой пермаллоя практически не отразилось на свойствах образца с пленкой FeNi(10 nm): форма петель гистерезиса, величина H_c остались такими же, как и для образца без прослойки Ta (рис. 5, *a, b*). При этом для образца ЖИГ/Ta(10 nm)|FeNi(40 nm) введение прослойки Ta(10 nm) частично восстанавливает магнитную анизотропию в плоскости пленки пермаллоя (рис. 5, *c, d*).

Влияние прослойки Ta на магнитную анизотропию слоя FeNi проявляется и в особенностях ДС, наблюдаемой в отсутствие поля после намагничивания образцов до насыщения в направлении технологического поля и перпендикулярно ему (рис. 6).

Зависимость магнитной анизотропии слоя FeNi от его толщины может быть обусловлена особенностями формирования осаждаемой пленки под одновременным воздействием как полей рассеяния ДС граната, так и внешнего технологического поля. Приведенная выше оценка величины полей рассеяния показывает их сравнимость с величиной технологического поля. С учетом лабиринтной формы ДС граната представляется логичным предположение о формировании локальных осей магнитной анизотропии, угол дисперсии которых близок к 180° , что в итоге должно привести к потере результирующей анизотропии слоя FeNi. Однако растущая на гранате пленка FeNi становится своего рода магнитным шунтом для полей рассеяния ДС граната. Внешние слои осаждаемой пленки пермаллоя испытывают меньшее

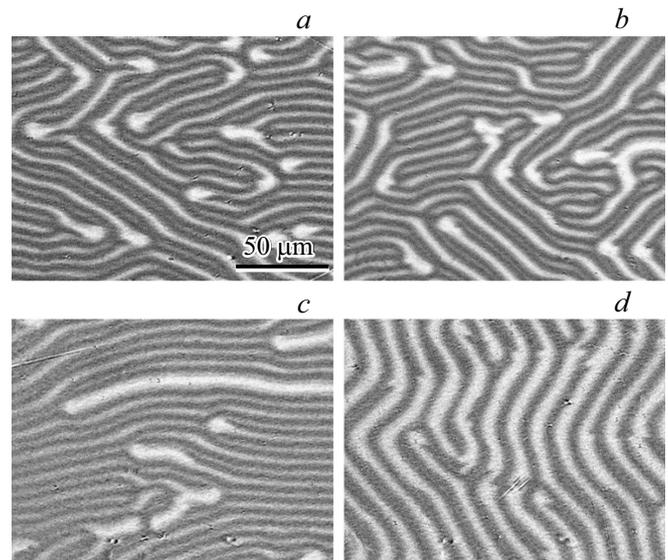


Рис. 6. Изображения ДС пленки FeNi(40 nm) в составе систем ЖИГ/FeNi (*a, b*) и ЖИГ/Ta/FeNi (*c, d*), полученные в нулевом поле после намагничивания образцов до насыщения вдоль (*a, c*) и перпендикулярно (*b, d*) оси технологического поля. Ось приложения поля измерения параллельна горизонтальным сторонам изображений ДС.

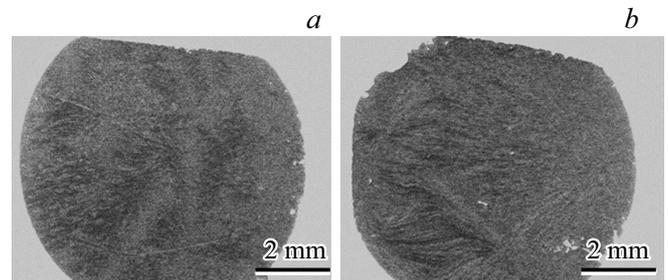


Рис. 7. Изображения ДС образцов ЖИГ/FeNi(40 nm) (*a*) и ЖИГ/Ta(10 nm)/FeNi(40 nm) (*b*).

влияние полей рассеяния ДС граната, в результате чего возрастает относительная роль технологического поля. Таким образом, по толщине пленка пермаллоя формируется неоднородная наведенная магнитная анизотропия.

Косвенным подтверждением предложенного сценария могут служить результаты измерения МО-петель и наблюдения ДС слоев FeNi, осуществленные при малом оптическом увеличении, которое не позволяет различить лабиринтную ДС. Петли гистерезиса образцов ЖИГ/FeNi(10 nm) и ЖИГ/Ta(10 nm)/FeNi(10 nm), измеренные в плоскости образца, оказались аналогичны тем, что показаны на рис. 5, *a, b*, при этом МО-изображение плавно изменяло контраст при изменении внешнего поля. Для образцов ЖИГ/FeNi(40 nm) и ЖИГ/Ta(10 nm)/FeNi(40 nm), петли гистерезиса также аналогичны тем, что были измерены при большем увеличении (рис. 5, *c, d*). Однако на МО-изображениях

вблизи поля коэрцитивной силы наблюдаются крупные домены (рис. 7). Конфигурация этих ДС свидетельствует о большой дисперсии локальных ОЛН как в случае образца без прослойки Та, так и при ее наличии.

4. Заключение

В работе продемонстрировано, что в двухслойных пленочных структурах ЖИГ/FeNi, в которых пленка ЖИГ обладает перпендикулярной магнитной анизотропией, существует магнитная связь между слоями. Ее следствием является, в частности, лабиринтная магнитная доменная структура, наблюдаемая в пленках пермаллоя, увеличение коэрцитивной силы, а также отсутствие проявления наведенной магнитной анизотропии в плоскости пленок FeNi, осажженных на ЖИГ в присутствии технологического магнитного поля, ориентированного в плоскости пленки. Представленные результаты, а также отсутствие смещения петель гистерезиса пленок пермаллоя, свидетельствуют о том, что магнитостатическое взаимодействие вносит основной вклад в межслойное магнитное взаимодействие пленок ЖИГ и FeNi.

Финансирование работы

Результаты были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России FEUZ-2020-0051.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] R. Suzuki, M. Takahashi, T. Kobayashit, Y. Sugita. Appl. Phys. Lett. **26**, 342 (1975).
- [2] С.А. Никитов, Д.В. Калябин, И.В. Лисенков, А.Н. Славин, Ю.Н. Барабаненков, С.А. Осокин, А.В. Садовников, Е.Н. Бегинин, М.А. Морозова, Ю.П. Шараевский, Ю.А. Филимонов, Ю.В. Хивинцев, С.Л. Высоцкий, В.К. Сахаров, Е.С. Павлов. УФН **185**, 1099 (2015).
- [3] A.R.L. Sousa, M. Gamino, A. Ferreira, A.B. de Oliveira, F. Vaz, F. Bohn, M.A. Correia. Sensors **21**, 6145 (2021).
- [4] Т.А. Шайхулов, Г.А. Овсянников, К.И. Константиныч, А.А. Климов, В.В. Демидов, К.Л. Станкевич, N. Tiercelin, P. Pernod, С.А. Никитов. ФТТ **62**, 1488 (2020).
- [5] N. Vukadinovic, J. Ben Youssef, V. Castel, M. Labrune. Phys. Rev. B **79**, 184405 (2009).
- [6] M. Pashkevich, A. Stupakiewicz, A. Kirilyuk, A. Maziewski, A. Stognij, N. Novitskii, A. Kimel, Th. Rasing. J. Appl. Phys. **111**, 023913 (2012).
- [7] Y.S. Chun, K.M. Krishnan. J. Appl. Phys. **95**, 6858 (2004).
- [8] S. Klingler, V. Amin, S. Geprägs, K. Ganzhorn, H. Maier-Flaig, M. Althammer, H. Huebl, R. Gross, R.D. McMichael, M.D. Stiles, S.T.B. Goennenwein, M. Weiler. Phys. Rev. Lett. **120**, 127201 (2018).
- [9] В.В. Krichevtsov, A.M. Korovin, S.V. Gastev, S.M. Suturin, K.V. Mashkov, M. Sawada, N.S. Sokolov. J. Magn. Magn. Mater. **502**, 166542 (2020).
- [10] Г.И. Фролов, В.Ю. Яковчук, В.А. Середкин, Р.С. Исхаков, С.В. Столяр, В.В. Поляков. ЖТФ **75**, 69 (2005).
- [11] K. Chen, A. Philippi-Kobs, V. Lauter, A. Vorobiev, E. Dyadkina, V.Yu. Yakovchuk, S. Stolyar, D. Lott. Phys. Rev. Appl. **12**, 024047 (2019).
- [12] A.V. Svalov, V.N. Lepalovskij, A.N. Gorkovenko, I.A. Makarochkin, E.A. Stepanova, A. Larrañaga, G.V. Kurlyandskaya, V.O. Vas'kovskiy. IEEE Trans. Magn. **58**, 2100605 (2022).
- [13] А.Г. Лесник. Наведенная магнитная анизотропия в поликристаллических пленках. Наук. думка, Киев (1976). 163 с.
- [14] V.E. Ivanov. J. Magn. Magn. Mater. **324**, 2572 (2012).
- [15] В.Е. Иванов, А.В. Ковешников, С.В. Андреев. ФММ **118**, 772 (2017).
- [16] В.Н. Самофалов, В.Д. Белозоров, А.Г. Равлик. УФН **183**, 287 (2013).
- [17] E. Shalygina, A. Kharlamova, S. Efremova, A. Makarov, G. Kurlyandskaya, A. Svalov. J. Phys. Conf. Ser. **1389**, 012021 (2019).
- [18] Y.S. Chun, H. Ohldag, K.M. Krishnan. IEEE Trans. Magn. **43**, 3004 (2007).

Редактор Д.В. Жуманов