

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ ТОНКИХ ПЛЕНОК LA-CO СО СТОЛБЧАТОЙ МИКРОСТРУКТУРОЙ

Деньгина Е.Ю., Болячкин А.С., Васьковский В.О.

УрФУ, Екатеринбург, Россия
dengina.ekaterina@urfu.ru

Аннотация. В статье представлено исследование магнитных гистерезисных свойств, доменной структуры и микроструктуры тонких магнитных пленок La-Co. Установлено, что в интервале составов от 9 до 20 ат. % La наблюдается скошенный вид петель гистерезиса в плоскости пленок и доменная страйп-структура, характерные для закритического состояния и перпендикулярной магнитной анизотропии. Наша работа направлена на демонстрацию того, что столбчатая микроструктура таких пленок сама по себе приводит к формированию страйп-доменов, что может быть интерпретировано как возникновение структурно-обусловленной перпендикулярной магнитной анизотропии. Для этих целей разработана микромагнитная модель пленок, получено качественное соответствие расчетов с экспериментальными данными.

Ключевые слова: магнитные пленки, страйп домены, закритическое состояние, столбчатая микроструктура, микромагнитное моделирование.

INVESTIGATION OF MAGNETIC PROPERTIES OF La-Co FILMS WITH COLUMNAR MICROSTRUCTURE

Dengina E., Bolyachkin A., Vas'kovskiy V.

UrFU, Yekaterinburg, Russia

Abstract. In this paper we presented the study of magnetic hysteretic properties, domain structure and microstructure of thin magnetic La-Co films. In the composition range from 9 to 20 at. % La, a beveled hysteresis loops in the plane of the films and stripe domain structure were observed, which are characteristic features of perpendicular magnetic anisotropy. In our work we demonstrated that the columnar microstructure of such films leads itself to the formation of stripe domains, which can be interpreted as the appearance of structure-induced perpendicular magnetic anisotropy. For these purposes, a computer micromagnetic model of the films was

developed, and a qualitative agreement between the simulation results and experimental data was obtained.

Key words magnetic films, stripe domains, columnar microstructure, micromagnetic modelling.

1. ВВЕДЕНИЕ

Долгая история изучения тонких магнитных пленок привела к открытию большого разнообразия магнитных структур, таких как скирмионы, периодические страйпы, неупорядоченные лабиринтарные домены и др., для которых характерны доменные стенки различных видов и возможны разного рода топологические дефекты [1]. Практическая значимость тонких пленок в спинтронике и магнитной записи информации обуславливает необходимость глубокого понимания того, как микроструктурные особенности и микромагнитные параметры пленок определяют их доменную структуру. Рассмотрим эту проблему далее для конкретной доменной структуры – страйп-доменов.

Для страйп-доменов характерны периодические осцилляции намагниченности с выходом из плоскости пленок [2]. Они возникают выше критической толщины пленок D_{cr} и обычно индуцируются магнитной анизотропией с осью легкого намагничивания, перпендикулярной плоскости пленок. Одно из первых теоретических описаний страйп-доменов в однородных пленках предложил Киттель [3]. Модель Киттеля позволила продемонстрировать переход от однородной намагниченности в плоскости пленок к выходу намагниченности из плоскости при D_{cr} . В дальнейшем подход Киттеля для однородных пленок получил развитие в работе [4], где рассмотрено асимптотическое поведение ширины страйп-доменов вблизи критического поля, а также в работах [5,6]. Начиная с новаторской работы Мюллера по решению микромагнитной задачи нуклеации страйп-доменов [7], численный микромагнитный подход и особенно компьютерное моделирование стали одними из основных инструментов для анализа доменных страйп-структур [8-12].

В настоящее время интерес для исследователей представляют не только однородные магнитные пленки [12–14], большое внимание уделяется также анализу страйп-доменов в пленках, имеющих неоднородности различного типа, например, в многослойных магнитных пленках [9,15,16]. Для них была представлена возможность оценки взаимодействия Дзялошинского-Мория по параметрам страйп-доменов [15,16]. Другой пример неоднородной пленки –

пленка с градиентом константы перпендикулярной магнитной анизотропии по толщине, что приводит к асимметрии страйп-доменов [10].

В данной работе проведено исследование магнитных пленок La-Co со столбчатой микроструктурой. Цель работы заключается в демонстрации того, что такая неоднородная структура может приводить к страйп-доменам даже при отсутствии перпендикулярной магнитной анизотропии. Для подтверждения гипотезы используется компьютерное микромагнитное моделирование.

2. ДЕТАЛИ ЭКСПЕРИМЕНТА

В работе проводилось исследование тонких магнитных пленок La-Co/Ti толщиной 100 нм с содержанием лантана от 0 до 35 ат. %, которые являются ферромагнитными при комнатной температуре. Образцы были получены методом магнетронного ионного распыления мозаичных мишеней. Состав пленок варьировался за счет изменения относительной площади покрытия основной мишени кобальта кусочками лантана. Образцы покрывались защитным слоем немагнитного металла Ti толщиной около 10 нм в вакуумной камере с целью предотвращения окисления.

Исследование гистерезисных магнитных свойств проводилось с помощью СКВИД-магнитометра при комнатной температуре в плоскости пленок, изображения доменной структуры были получены на магнитно-силовом микроскопе, а микроструктура пленок изучалась с помощью просвечивающего электронного микроскопа. Микромагнитное моделирование проводилось в программных пакетах Matlab и Mumax3.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

По магнитным петлям гистерезиса (рис. 1) установлено, что намагниченность насыщения пленок снижается с увеличением содержания лантана от 1350 Гс при $x = 0$ ат. % до 200 Гс при $x = 35$ ат. %. До 20 ат. % лантана наблюдается рост коэрцитивной силы до значений около 140 Э, после чего происходит резкий спад до 2 – 4 Э. Это может говорить об изменении типа перемагничивания образцов. При малых (до 6 ат. %) и больших (25-35 ат. %) концентрациях лантана перемагничивание осуществляется преимущественно за счет движения доменных стенок. При этом край образца служит дефектом, на котором образуется зародыш обратной магнитной фазы. В интервале составов от 9 до 20 ат. % La происходят более сложные процессы нуклеации доменов с формированием доменной структуры.

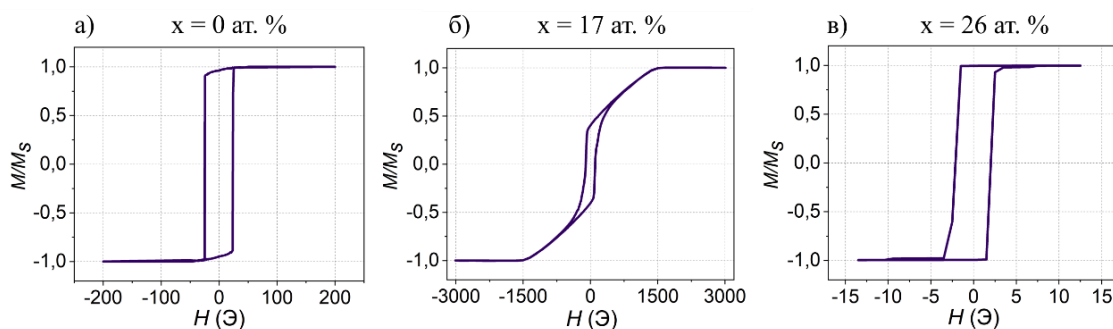


Рисунок 1 – Петли магнитного гистерезиса пленок $\text{La}_x\text{Co}_{100-x}$, измеренные в плоскости пленок

Об этом же свидетельствует вид петель магнитного гистерезиса. Низкокоэрцитивные петли гистерезиса имеют практически прямоугольный вид (рис. 1 а, в), в то время как петли гистерезиса при $x = 9 - 20$ ат. % имеют «скошенный» вид (рис 1, б), который может являться свидетельством «закритического» состояния и формирования доменной страйп-структуры.

На изображениях магнитно-силовой микроскопии образцов в состоянии остаточной намагниченности страйп-структура была обнаружена в интервале $x=9-20$ ат. % La (рис 2, а, б). На рисунках, описывающих амплитуду колебаний зонда, участки светлого цвета можно трактовать как области образца с компонентой намагниченности, ориентированной перпендикулярно плоскости к наблюдателю, а участки темного цвета – от наблюдателя. Средняя ширина страйпов по данным микроскопии составляет около 100 нм. Для сравнения на рисунке 2, в приведены результаты, полученные для образца $\text{La}_{26}\text{Co}_{74}$. В состоянии остаточной намагниченности данный образец можно считать однородно намагниченным.

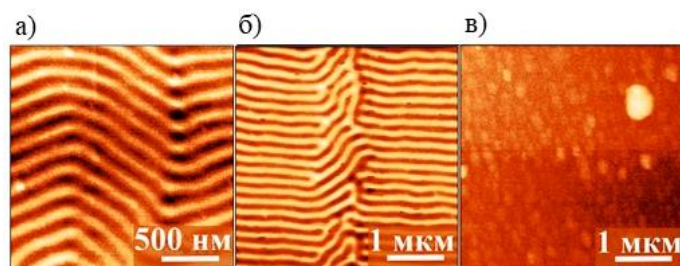


Рисунок 2 – Результаты проведения магнитно-силовой микроскопии поверхности образцов (а) $\text{La}_9\text{Co}_{91}$, (б) $\text{La}_{17}\text{Co}_{83}$, (в) $\text{La}_{26}\text{Co}_{74}$

Изображения с электронного просвечивающего микроскопа дали информацию о столбчатой микроструктуре пленок (рис. 3), диаметр столбцов около 4 нм. Такая микроструктура объясняет механизм возникновения перпендикулярной магнитной анизотропии. В отдельном столбце

предпочтительная ориентация намагниченности устанавливается вдоль оси столбца, в то время как в тонкой однородной пленке намагниченность ориентирована в плоскости, что минимизирует энергию в размагничивающем поле. В случае пленки со столбчатой микроструктурой эти две тенденции начинают конкурировать, что приводит к намагниченности, которая выходит из плоскости пленки.

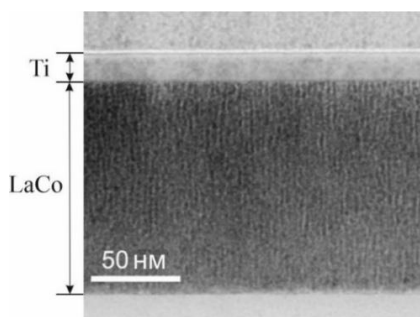


Рисунок 3 – Изображение пленки $\text{La}_{18}\text{Co}_{82}$ в сечении, полученное на просвечивающем электронном микроскопе

Для верификации выдвинутых гипотез о формировании страйп-структуры была создана компьютерная микромагнитная модель. Для этого была разработана столбчатая микроструктура пленок в виде столбцов с более высокими значениями магнитных параметров и матрицей, окружающей столбцы, со сниженными магнитными свойствами (рис. 4). Такая структура была построена с использованием многогранников Вороного на основе гексагональной сетки точек с небольшим смещением по нормальному закону распределения и последующей гомотетии полученных многогранников. Характерный размер столбцов в модели сопоставим с экспериментальными данными и составлял 5,3 нм. Исходя из экспериментальных данных и модели окружения [17] для столбцов намагниченность насыщения и константа обменного взаимодействия составляли 1160 кА/м и 14 пДж/м. Для матрицы, разделяющей столбцы, они были равны соответственно 180 кА/м и 1 пДж/м. Константа магнитной анизотропии для пленок не вводилась. В модели были учтены периодические граничные условия.

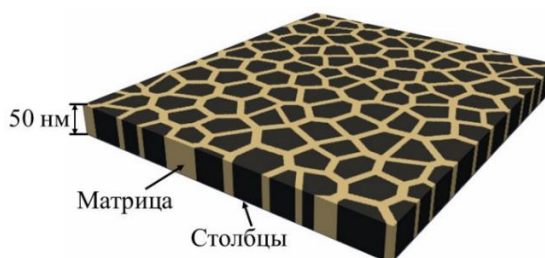


Рисунок 4 – Масштабированная компьютерная модель тонкой магнитной пленки со столбчатой микроструктурой

Полученная в модели микромагнитная структура в состоянии остаточной намагниченности представлена на рисунке 5. Ее можно охарактеризовать как доменную страйп-структуру. Таким образом, наблюдается качественное соответствие результатов компьютерной модели с данными эксперимента. Ширина расчетных страйпов составила около 40 нм, что меньше ширины доменов, полученных на эксперименте в виду существенно меньшей ширины моделируемой пленки, а также могут быть не оптимальны микромагнитные константы. Дальнейшее исследование будет развиваться по пути достижения количественного соответствия, что позволит охарактеризовать эффективную перпендикулярную магнитную анизотропию, обусловленную столбчатой структурой.

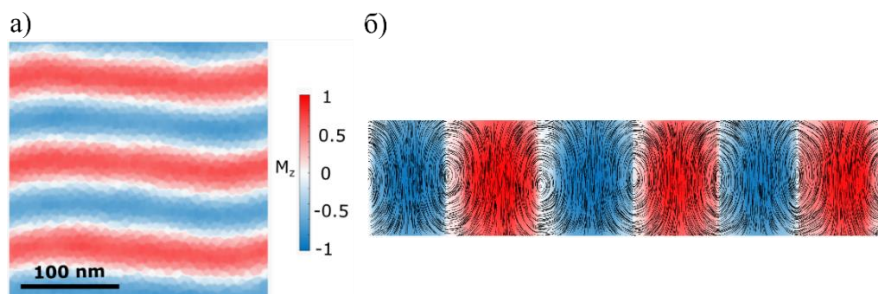


Рисунок 5 – Расчетная страйп-доменная структура (а) вид сверху и (б) в поперечном сечении. Цветовая шкала соответствует проекции намагниченности на ось Z , перпендикулярную плоскости пленки

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, установлено, что пленки La-Co со столбчатой микроструктурой демонстрируют наличие «закритического» состояния и доменной страйп-структуры в интервале $x=9-20$ ат. % La. В разработанной микромагнитной модели мы показали, что неоднородная структура пленок приводит к формированию доменной структуры без введения перпендикулярной магнитной анизотропии, когда основные магнитные и микроструктурные параметры, присущие модели, взяты в соответствии с экспериментальными данными.

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда, проект № 18-72-10044.

Библиографический список

1. Yu X., Mostovoy M., *et al.* Magnetic stripes and skyrmions with helicity reversals // PNAS. 2012. Vol. 109(23). P. 8856-8860.

2. Hubert A., Schäfer R. *Magnetic Domains: the Analysis of Magnetic Microstructures*. Springer, 2009.
3. Kittel C. Theory of the structure of ferromagnetic domains in films and small particles // *Phys. Rev.* 1946. Vol. 70(11-12). P. 965-971.
4. Johansen T.H., Pan A.V., Galperin Y.M. Exact asymptotic behavior of magnetic stripe domain arrays // *Phys. Rev. B.* 2013. Vol. 87. 060402.
5. Yafet Y., Gyorgy E. M. Ferromagnetic strip domains in an atomic monolayer // *Phys. Rev. B.* 1988. Vol. 38. P. 9145-9151.
6. Virot F., *et al.* Theory of magnetic domains in uniaxial thin films // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2012. Vol. 45. 405003.
7. Muller M.W. Distribution of the magnetization in a ferromagnet // *Phys Rev.* 1961. Vol. 122(5). P. 1485-1489.
8. Moon K.-W., *et al.* Measuring the Magnetization from the Image of the Stripe Magnetic Domain // *Phys. Rev. Appl.* 2019. Vol. 12(3). 034030.
9. Chesnel K., *et al.* Morphological stripe-bubble transition in remanent magnetic domain patterns of Co/Pt multilayer films and its dependence on Co thickness // *Phys. Rev. B.* 2018. Vol. 98(22). 224404.
10. McCord J., *et al.* Revisiting magnetic stripe domains — anisotropy gradient and stripe asymmetry // *J. of Appl. Phys.* 2013. Vol. 113(7). 073903.
11. Talapatra A., Arout Chelvane J., Mohanty J. Observation of magnetic domains in Gd-Fe thin films with complementary microscopy techniques // *J. Magn. Magn. Mat.* 2019. Vol. 489. 165469.
12. Pianciola B., *et al.* Magnetoresistance in Fe_{0.8}Ga_{0.2} thin films with magnetic stripes: The role of the three-dimensional magnetic structure // *Phys. Rev. B.* 2020. Vol. 102(5). 054438.
13. Stelhorn A., *et al.* Control of the stripe domain pattern in L10-ordered FePd thin films // *J. Magn. Magn. Mat.* 2019. Vol. 476, P. 483-486.
14. Brandenburg J., *et al.* Domain structure of epitaxial Co films with perpendicular anisotropy // *Phys. Rev. B.* 2009. Vol. 79. 054429.
15. Lemesh I., Büttner F., Beach G. S. D. Accurate model of the stripe domain phase of perpendicularly magnetized multilayers // *Phys. Rev. B.* 2017. Vol. 95. 174423.
16. Agrawal P., *et al.* Measurement of interfacial Dzyaloshinskii-Moriya interaction from static domain imaging // *Phys. Rev. B.* 2019. Vol. 100. 104430.
17. Dengina E., Bolyachkin A., Vas'kovoskiy V. Micromagnetic Modelling of Stripe Domains in Thin Films with a Columnar Microstructure // *AIP Advances*, *to be published*.