

УДК 539.216.2:537.624

ТОЛЩИННЫЕ ЗАВИСИМОСТИ КОЭРЦИТИВНОЙ СИЛЫ ТРЕХСЛОЙНЫХ МАГНИТНЫХ ПЛЕНОК, ПОЛУЧЕННЫХ ХИМИЧЕСКИМ ОСАЖДЕНИЕМ

© 2025 г. А. В. Чжан^{1,2,*}, В. А. Орлов^{2,3}, Ж. М. Мороз⁴

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Красноярский государственный аграрный университет», Красноярск, Россия

²Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет», Красноярск, Россия

³Институт физики имени Л. В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук — обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», Красноярск, Россия

⁴Красноярский институт железнодорожного транспорта — Филиал Федерального государственного бюджетного учреждения высшего образования «Иркутский государственный университет путей сообщения», Красноярск, Россия

*E-mail: avchz@mail.ru

Поступила в редакцию 15.11.2024 г.

После доработки 14.12.2024 г.

Принята к публикации 30.12.2024 г.

Представлены результаты исследований коэрцитивной силы трехслойных магнитных пленок, полученных химическим осаждением. Определены особенности ее изменений от толщины образующих слоев. Они связываются со спецификой перемангничивания исследуемой системы, вызванной небольшим отличием значений коэрцитивных сил магнитных слоев. Проведен расчет энергии размагничивающего поля, на основе которого получено выражение критического поля для перемангничивания пленки, которое хорошо описывает экспериментально наблюдаемую линейную зависимость коэрцитивной силы от толщины магнитных слоев.

Ключевые слова: многослойные магнитные пленки, коэрцитивная сила, межслоевое взаимодействие, размагничивающее поле.

DOI: 10.31857/S0367676525040048, EDN: GSXKPG

ВВЕДЕНИЕ

Интересным с физической и прикладной точек зрения является эффект значительного уменьшения коэрцитивной силы, который обнаруживается в многослойных пленках, разделенных немагнитной прослойкой. Физические механизмы наблюдаемых изменений коэрцитивной силы H_c в основном связываются с взаимодействием доменных границ, разделяющих домены в соседних магнитных слоях. Это приводит к понижению общей энергии доменных стенок и уменьшению H_c . Впервые уменьшение коэрцитивной силы в слоистых структурах при наличии немагнитной прослойки наблюдалось в поликристаллических пленках, в которых слои Ni разделены Cu [1]. Подобный эффект был обнаружен в трехслойных пленках, содержащих два слоя $Ni_{80}Fe_{20}$, которые разделены немагнитной прослойкой либо из кремния [2], либо из окиси кремния [3].

Механизмы уменьшения H_c в трехслойных пленках в основном рассматривают магнитостатическое взаимодействие доменных стенок в магнитных слоях через немагнитную прослойку (модель Нееля) [4,5].

Целью настоящей работы является выяснение физических механизмов изменения коэрцитивной силы трехслойных пленок, полученных химическим осаждением, в зависимости от толщины немагнитной прослойки и магнитных слоев.

Показано, что наблюдаемые изменения коэрцитивной силы в исследуемых системах связаны с особенностями обменной связи и магнитостатического взаимодействия между магнитными слоями.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Трехслойные пленки, полученные химическим осаждением [6, 7], содержали магнитные слои

одинаковой толщины из аморфного сплава Co-P, и промежуточный слой из немагнитного аморфного сплава Ni-P.

Толщину слоев определяли по времени осаждения при скорости, которая устанавливалась с помощью рентгеноспектрального анализа, для аморфного Co-P составляла 6Å/с, Ni-P – 2Å/с, кристаллического Co-P – 5Å/с. Толщина магнитных слоев менялась от 10 до 180 нм, немагнитной прослойки от 0 до 10 нм. Осаждение слоев производилось в однородном магнитном поле с напряженностью $H = 1$ кЭ, посредством которого создавалась одноосная анизотропия.

Значение коэрцитивной силы устанавливалось с помощью меридионального магнитооптического эффекта Керра на частоте 0.01 Гц, а также вибрационного магнитометра при комнатной температуре. Размеры пленок составляли 5×5 мм².

Особенностью исследуемых образцов является небольшое отличие коэрцитивных сил между магнитными слоями, что проявляется на смещении петли гистерезиса при перемагничивании пленки в небольших полях [8]. С ростом толщины прослойки t величина поля смещения H_b растет до 4 Э, затем уменьшается и в области $t \approx 2$ нм падает до 0 и меняет знак на отрицательный (рис. 1).

Коэрцитивная сила также испытывает немонотонную зависимость от толщины прослойки. При ее изменении от 0 до 2 нм, значение H_c уменьшается от 9.5 до 1.4 Э, затем растет и при $t \approx 8$ нм достигает 3.3 Э (рис. 1).

Дальнейшее уменьшение коэрцитивной силы такой структуры можно достичь с помощью увеличения толщины магнитных слоев (рис. 2). Ее значение с ростом d уменьшается по линейному закону и при толщине магнитного слоя ≈ 200 нм достигает ≈ 0.05 Э (толщина прослойки составляла ~ 2 нм).

На этом же рисунке для сравнения приведена толщинная зависимость коэрцитивной силы однослойных пленок CoP. Наблюдаемый макси-

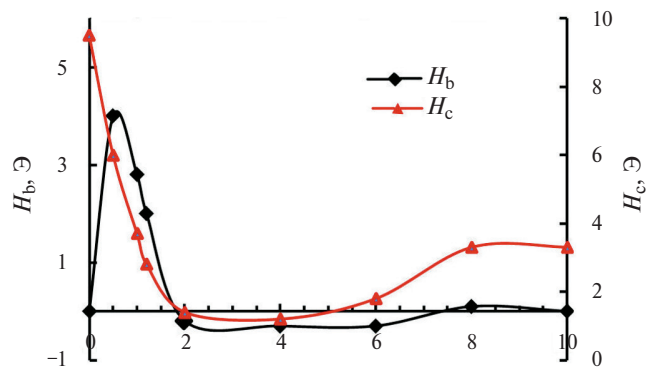


Рис. 1. Зависимость поля смещения и коэрцитивной силы от толщины прослойки. Толщина магнитного слоя ≈ 100 нм.

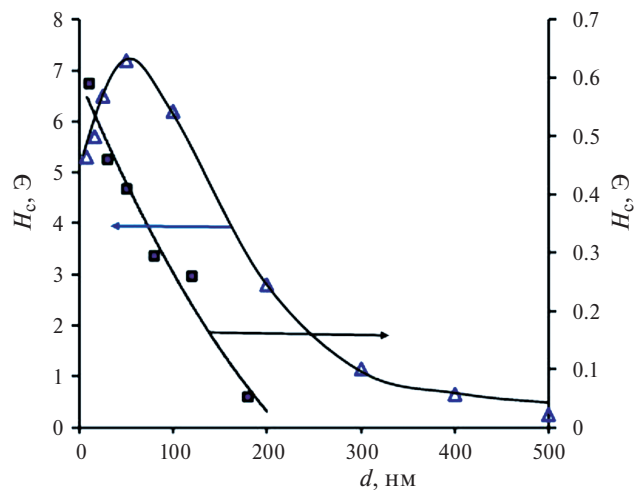


Рис. 2. Зависимость коэрцитивной силы от толщины магнитных слоев для трехслойных (■) и однослойных (△) пленок на основе CoP.

мум ее значений при толщинах пленки в области 60 нм, очевидно, связан с переходом структуры доменных границ от неелевского к блоховскому типу, как и в случае пленок пермаллоя.

ОБСУЖДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ И ИХ ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ

Представленные результаты отличаются от ранее сообщавшихся изменений коэрцитивной силы в трехслойных системах [8], в которых наблюдалась немонотонная зависимость коэрцитивной силы от толщины магнитных слоев. Как следует из этой работы, в области малых толщин прослойки большое влияние на конфигурацию доменных границ и их энергию оказывает несовершенство прослойки по площади пленки, что приводит к немонотонной зависимости коэрцитивной силы от толщины прослойки.

Как отмечалось выше, особенностью наших образцов являются небольшие отличия в значениях коэрцитивных сил магнитных слоев, что хорошо отражается на петле гистерезиса (рис. 3). Вблизи поля насыщения на ней видна ступенька, которая связана с дополнительным полем, необходимым для перемагничивания более высококоэрцитивного слоя. Это указывает на то, что перемагничивание пленки происходит в два этапа; на начальном этапе в менее коэрцитивном слое возникают домены обратной намагниченности и их последующий рост. Окончательное перемагничивание пленки заканчивается переворотом намагниченности в более высококоэрцитивном слое. Такой механизм находит подтверждение в трехслойных пленках с магнитными слоями из CoP, значительно отличающимися величиной коэрцитивной силы [7]. Изменение коэрцитивной силы от толщины прослойки в та-

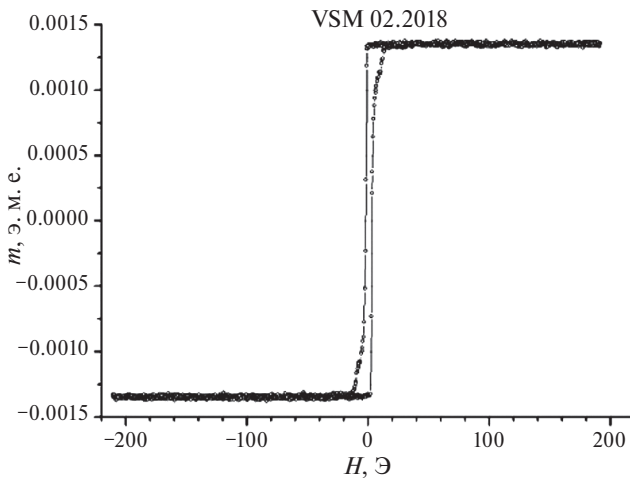


Рис. 3. Петля гистерезиса трехслойной пленки на основе CoP.

ких пленках происходит аналогичным образом, как и в исследуемых здесь образцах.

Полную энергию трехслойной системы в геометрии, показанной на рис. 4, можно определить в виде:

$$W = W_Z + W_f + W_M, \quad (1)$$

где W_Z , W_f , W_M – энергии Зеемана, обменного ферромагнитного и магнитостатического взаимодействия между магнитными слоями. Вклад ферромагнитного взаимодействия и его изменение от толщины парамагнитной прослойки рассмотрен ранее в работе [9].

Для теоретического обоснования изменений коэрцитивной силы от толщины магнитных слоев найдем размагничивающую энергию в двух случаях: а) намагниченности магнитных слоев антипараллельны, б) параллельны друг другу.

В первом случае на торцах пленки, которые совпадают с плоскостью Ox , возникают маг-

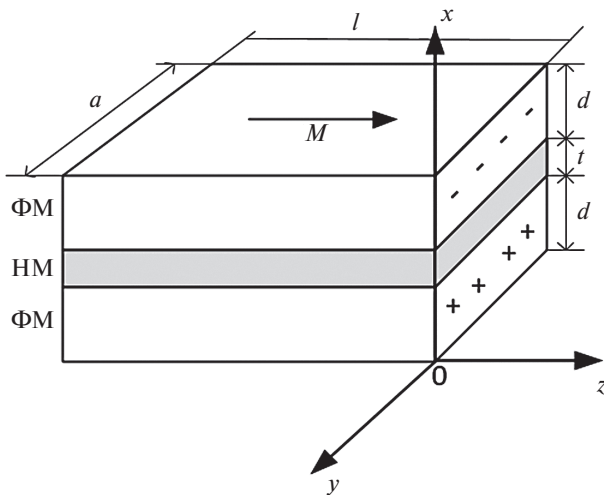


Рис. 4. Ориентация намагниченности и магнитных зарядов в трехслойной пленке. Ось легкого намагничивания параллельна Oz .

нитные заряды с поверхностной плотностью $\pm\sigma$ (рис. 4).

Среднюю поверхностную плотность магнитостатической энергии можно оценить из уравнения:

$$W_M = \frac{1}{2d} \int_0^{2d+t} \sigma\phi(x, z) dx, \quad (2)$$

где $\phi(x, z)$ – потенциал, созданный магнитными зарядами.

Фактически задача для определения W_M сводится к определению зависимости $\phi(x, z)$ [10].

Подробности расчетов этой функции в случаях антипараллельной и параллельной ориентаций магнитных моментов приведены в приложении.

Энергия размагничивающего поля с учетом полученных выражений для $\phi(x, z)$ при антипараллельной ориентации намагниченностей магнитных слоев представляется в виде:

$$W_1 = \frac{2d\sigma^2(2+t')^2}{\pi^2 d} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^3} \left[\cos^2\left(\frac{\pi n}{2}\right) \times \sin^2\left(\frac{\pi n}{2} \frac{1+t'}{2+t'}\right) \sin^2\left(\frac{\pi n}{2} \frac{1}{2+t'}\right) \right]. \quad (3)$$

Для параллельной ориентации:

$$W_2 = \frac{2d\sigma^2(2+t')^2}{\pi^2 d} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^3} \left[\sin^2\left(\frac{\pi n}{2}\right) \times \cos^2\left(\frac{\pi n}{2} \frac{1+t'}{2+t'}\right) \sin^2\left(\frac{\pi n}{2} \frac{1}{2+t'}\right) \right], \quad (4)$$

где d – толщина магнитного слоя, t – толщина прослойки, $t' = t/d$.

Разница в значениях энергий (3) и (4), которая приводит к размагничиванию системы, имеет вид:

$$\Delta W = \frac{2d\sigma^2(2+t')^2}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^3} \sin^3\left(\frac{\pi n}{2} \frac{1}{2+t'}\right) \times \sin\left(\frac{\pi n(3+2t')}{2+t'}\right). \quad (5)$$

Величину коэрцитивной силы трехслойной пленки, с учетом (1), можно определить:

$$H_c = H_{c1} + \Delta H_f - \Delta H_M. \quad (6)$$

Величина H_{c1} соответствует коэрцитивной силе однослойной пленки, добавочные значения ΔH_f , ΔH_M – связаны с ферромагнитным и магнитостатическим взаимодействием между магнитными слоями.

Вклад магнитостатического взаимодействия в (6) можно оценить из соотношения:

$$V \cdot M_S \cdot \Delta H_M = \Delta W \cdot S, \quad (7)$$

где $V = adl$, $S = ad$ – объем и площадь поперечного сечения магнитного слоя, как показано на рис. 4.

Тогда из (5) находим:

$$\Delta H_M = \frac{2dM_S(2+t/d)^2}{\pi^2 \ell} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^3} \sin^3 \left(\frac{\pi n}{2} \frac{1}{2+t/d} \right) \times \sin \left(\frac{\pi n}{2} \frac{3+2t/d}{2+t/d} \right). \quad (8)$$

С учетом конечного значения ряда для случая $t \ll d$ находим:

$$\Delta H_M \approx \frac{4.2 \cdot M_S d}{\pi^2 l}. \quad (9)$$

Тогда

$$H_c \approx H_{c1} - \frac{4.2 M_S d}{\pi^2 l}. \quad (10)$$

Из представленного выражения следует, что зависимость коэрцитивной силы от толщины магнитного слоя меняется по линейному закону, что качественно согласуется с экспериментальными результатами (см. рис. 2).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из полученных экспериментальных и теоретических результатов можно сделать вывод, что наблюдаемая линейная зависимость уменьшения коэрцитивной силы от толщины немагнитной прослойки в трехслойных пленках, полученных химическим осаждением, может быть связана с небольшим отличием в значениях коэрцитивных сил магнитных слоев, что приводит к неодновременному перемагничиванию магнитных слоев: вначале перемагничивается менее, а затем более коэрцитивный слой. Следует отметить, что данный механизм уменьшения коэрцитивной силы в низкокоэрцитивных трехслойных пленках представляет возможность получения магнитных материалов с низкой коэрцитивной силой.

ПРИЛОЖЕНИЕ

$$W = \frac{1}{2d} \int_0^{2d+t} \sigma \varphi dx. \quad (11)$$

Потенциал φ удовлетворяет уравнению Лапласа:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0. \quad (12)$$

С граничными условиями:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial z_{z=0}} - \frac{\partial \varphi}{\partial z_{z=0}} = -\sigma \quad \text{или} \quad \frac{\partial \varphi}{\partial z_{z=0}} = \frac{\sigma}{2}. \quad (13)$$

Решение уравнения (12) разумно представить в виде ряда Фурье:

$$\varphi(x, z) = \sum_{n=1}^{\infty} \varphi_{0n} \sin \left(\frac{\pi n}{2d+1} x \right) e^{\frac{\pi n}{2d+1} z}. \quad (14)$$

Это уравнение тождественно удовлетворяет (1). Постоянные φ_{0n} определяются из граничных условий:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial z_{z=0}} = \sum_{n=1}^{\infty} \varphi_{0n} \frac{\pi n}{2d+1} \sin \left(\frac{\pi n}{2d+1} x \right) e^{\frac{\pi n}{2d+1} z} \rightarrow \begin{cases} \frac{\sigma}{2} & \text{при } 0 < x < d, \\ 0 & \text{при } d < x < d+t, \\ -\frac{\sigma}{2} & \text{при } d+t < x < 2d+t. \end{cases} \quad (15)$$

Примем (15) в виде:

$$\varphi(x, z) = \sum_{n=1}^{\infty} \varphi_{0n} n \sin \left(\frac{\pi n}{2d+1} x \right) = 0; \quad \frac{\sigma(2d+t)}{2\pi n}; \quad f(x). \quad (16)$$

В правой части этого уравнения стоит кусочная функция, которую разлагаем в ряд по синусам. Коэффициенты $\varphi_{0n} \cdot n$ перед синусами в левой части (16) являются коэффициентами ряда Фурье, которые определяем по стандартной методике:

$$\begin{aligned} \varphi_{0n} \cdot n &= \frac{1}{\pi} \cdot \left[\int_0^d \frac{\sigma(2d+t)}{2\pi} \sin \left(\frac{\pi n}{2d+1} \cdot y \right) dy - \right. \\ &\quad \left. - \frac{\sigma(2d+t)}{2\pi} \int_{d+t}^d \sin \left(\frac{\pi n}{2d+1} \cdot y \right) dy \right] = \frac{\sigma(2d+t)}{2\pi n} \times \\ &\quad \times \left[\cos \left\{ \frac{\pi n}{2d+1} y \right\} \Big|_d^0 - \cos \left\{ \frac{\pi n}{2d+1} y \right\} \Big|_{2d+t}^{d+t} \right] = \\ &= \frac{\sigma(2d+t)}{2\pi n} \left[1 - \cos \left\{ \frac{\pi n}{2d+1} \right\} - \right. \\ &\quad \left. - \cos \left\{ \frac{\pi n(d+t)}{2d+1} \right\} + \cos(n\pi) \right]; \\ \varphi_{0n} &= \frac{d\sigma(2d+t')}{2\pi n^2} \left[1 - \cos \left\{ \frac{\pi n}{2d+t'} \right\} - \right. \\ &\quad \left. - \cos \left\{ \frac{\pi n(1+t')}{2+t'} \right\} \cos \{ \pi n \} \right], \end{aligned} \quad (17)$$

где $t' = t/d$. С учетом (17) для потенциала (14) можно записать:

$$\varphi(x, z) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{d\sigma(2d + t')}{2\pi n^2} \left[1 + \cos\{\pi n\} - \cos\left\{\frac{\pi n}{2 + t'}\right\} - \cos\left\{\frac{\pi n(1 + t')}{2 + t'}\right\} \right] \sin\left\{\frac{\pi n x'}{2 + t'}\right\} e^{\frac{\pi n z'}{2 + t'}}. \quad (18)$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Clow H. // Nature. 1962. V. 194. P. 1035.
2. Herd S.R., Ahn K.Y. // J. Appl. Phys. 1979. V. 50. P. 2384.
3. Friedlander F.J., Silva L.F. // J. Appl. Phys. 1965. V. 36. No. 3. P. 946.
4. Kools J.C.S., Kula W., Mauri D., Lin T. // J. Appl. Phys. 1999. V 85. P. 4466.
5. Gayen A., Umadevi K., Chelvane A. et al. // J. Mater. Sci. Eng. 2018. V. 7. P.1.
6. Чжан А.В., Подорожняк С.А., Громилов С.А. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2022. Т. 86. № 5. С. 730; Chzhan A.V., Podorozhnyak S.A., Gromilov S.A. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2022. V. 86. No. 5. P. 614.
7. Chzhan A.V., Podorozhnyak S.A., Shahov A.N. et al. // J. Phys. Conf. Ser. 2019. V. 1389. P. 1.
8. Васильковский В.О., Савин П.А., Лепаловский и др. // ФММ. 1995. Т. 79. № 3. С. 70.
9. Чжан А.В., Орлов В.А., Волочаев М.Н. // ФММ. 2023. Т. 124. № 10. С. 904; Chzhan A.V., Orlov V.A., Volochaev M.N. // Phys. Metals Metallog. 2023. V. 124. No. 10. P. 961.
10. Kittel Ch. // Rev. Modern Phys. 1949. V. 21. No. 4. P. 541.

Thickness dependencies of the coercivity of three-layer magnetic films obtained by chemical deposition

A. V. Chzhan^{a,b,*}, V. A. Orlov^{b,c}, Zh. M. Moroz^d

^aKrasnoyarsk State Agrarian University, Krasnoyarsk, Russia

^bSiberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

^cL.V. Kirensky Institute of Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Federal Research Center Krasnoyarsk Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk, Russia

^dIrkutsk State Transport University, Krasnoyarsk Institute of Railway Transport, Krasnoyarsk, Russia

*e-mail: avchz@mail.ru

The results of the study of the coercivity of three-layer magnetic films obtained by chemical deposition are presented. The features of its changes from the thickness of the forming layers are determined. They are associated with the specificity of the magnetization reversal of the studied system, caused by a small difference in the values of the coercivity of the magnetic layers. The energy of the demagnetizing field is calculated, since an expression for the critical field for the magnetization reversal of the film is obtained, which describes well the experimentally observed linear dependence of the coercivity on the thickness of the magnetic layers.

Keywords: multilayer magnetic films, coercivity, interlayer interaction, demagnetizing field