

05

Особенности магнитных свойств тонкопленочных Co/Fe/Ni магнитных систем

© Е.Е. Шалыгина, Е.В. Перепелова, Л.В. Козловский,
Е. Таманис, М.А. Мукашева, А.Н. Шалыгин

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Россия
Даугавпилсский университет, Латвия

Поступило в Редакцию 1 ноября 2006 г.

Магнитные свойства Co/Fe/Ni тонкопленочных структур, полученных методом магнетронного распыления, были изучены с помощью магнитооптического метода. Рентгеноструктурные исследования показали, что все образцы имеют нанокристаллическую структуру. Кривые намагничивания и петли гистерезиса для изучаемых образцов были измерены с помощью экваториального эффекта Керра при двух ориентациях внешнего магнитного поля. Установлено, что Co/Fe/Ni тонкопленочные структуры характеризуются плоскостной магнитной анизотропией. Обнаружено, что на магнитное поведение исходных Co/Fe/Ni неоднородных систем существенное влияние оказывают поля рассеивания, создаваемые соседними слоями, что обуславливает появление петель гистерезиса сложной формы. Найдено, что отожженные в вакууме при температуре $T = 500^\circ\text{C}$ Co/Fe/Ni тонкопленочные структуры становятся более магнито жесткими по сравнению с исходными. Полученные экспериментальные данные объяснены микроструктурными особенностями образцов.

PACS: 75.70.Ak

В последнее время большое внимание уделяется изучению физических свойств ультратонких магнитных пленок $3d$ -переходных металлов и полученных на их основе многослойных тонкопленочных структур, представляющих собой чередование магнитных и немагнитных слоев субмикронной толщины. При этом одной из наиболее важных проблем является получение новых тонкопленочных систем, характеризующихся высокой индукцией насыщения ($B_S \sim 2\text{ Т}$), большой величиной электросопротивления (порядка $50\ \Omega/\text{см}$), имеющих высокую антикоррозийную устойчивость и термоустойчивость при нагреве до 200°C . Анализ

существующих данных показал, что Co/Ni/Fe тонкопленочные системы могут проявлять перечисленные выше свойства. Целью данной работы является магнитооптическое исследование магнитных свойств исходных и отожженных в вакууме при температуре $T = 500^\circ\text{C}$ Co/Fe/Ni тонкопленочных магнитных систем.

Тонкопленочные [Co/Fe/Ni] n ($n = 1-7$) структуры были получены с помощью магнетронного распыления при базовом давлении в вакуумной камере порядка 10^{-8} Торг и давлении рабочего газа (аргона) $1 \cdot 10^{-3}$ Торг. Толщина Co, Fe и Ni слоев была соответственно равна 2, 1 и 0.5 nm. Таким образом, при $n = 1-7$ тонкопленочные структуры имели соответственно толщину 3.5, 7.0, 10.5, 14, 17.5, 21 и 24.5 nm. Наличие периодических структур (четко выраженных границ раздела) в [Co/Fe/Ni] n образцах было подтверждено данными рентгеноструктурного анализа. В результате отжига описанных выше систем в вакууме при температуре $T = 500^\circ\text{C}$ были получены пленки $\text{Co}_{59}\text{Fe}_{26}\text{Ni}_{15}$ сплавов с указанными выше толщинами и индукцией насыщения $B_S \sim 1.9$ Т.

Исследования микроструктуры, выполненные с помощью рентгеновского дифракционного (XRD) анализатора, показали, что все изучаемые образцы имеют нанокристаллическую структуру. Петли гистерезиса и кривые намагничивания для тонкопленочных систем были измерены на магнитооптическом магнетометре с помощью экваториального эффекта Керра (ЭЭК). Величина ЭЭК δ определялась из соотношения: $\delta = (I - I_0)/I_0$, где I и I_0 — интенсивность света, отраженного от намагниченного и ненамагниченного образца соответственно. Фактически в данной работе измерялись зависимости $\delta(H)/\delta_S \propto M(H)/M_S$, где δ_S — значение ЭЭК при $M = M_S$, M_S — намагниченность насыщения образца. Подробное описание экспериментальной установки приведено в работе [1]. Здесь следует отметить, что магнитооптический метод исследования магнитных свойств описанных выше тонкопленочных систем, учитывая их толщины, является наиболее доступным и эффективным. Измерения петель гистерезиса и кривых намагничивания были выполнены при двух ориентациях внешнего магнитного поля H . В одном случае направление H совпадало с ориентацией магнитного поля, приложенного параллельно подложке в процессе напыления пленок (направление D1), а в другом — было перпендикулярно D1 (направление D2).

Было обнаружено, что кривые намагничивания изучаемых [Co/Fe/Ni] n тонкопленочных систем в поле, приложенном вдоль D1

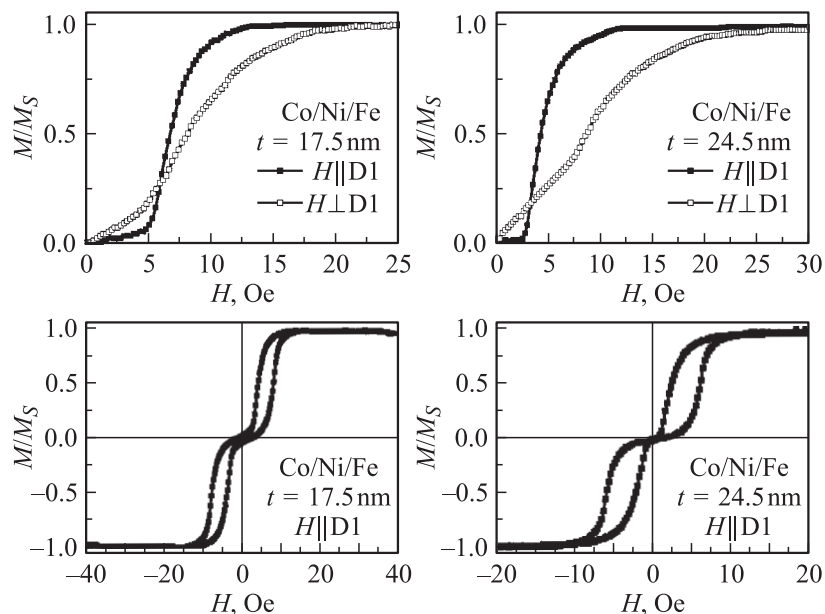


Рис. 1. Кривые намагничивания, наблюдаемые для $[\text{Co}-\text{Fe}-\text{Ni}]_n$ систем с $n = 5$ и 7 в магнитном поле, приложенном вдоль направлений D1 и D2, и петли гистерезиса, наблюдаемые в магнитном поле, приложенном вдоль D1.

и D2, сильно различаются, что свидетельствует о наличии в этих образцах плоскостной магнитной анизотропии (см. приведенный для иллюстрации рис. 1). Из рисунка можно видеть, что в магнитном поле H , приложенном вдоль направления D2 при $H < H_S$ (H_S — поле насыщения образца) наблюдается практически линейная зависимость намагниченности от величины H , а при другой ориентации поля (направление D1) эта зависимость более сложная. В частности, на начальном участке значение ЭЭК (соответственно изменение намагниченности) практически равно нулю. Затем наблюдается резкое возрастание ЭЭК, а в области больших полей, начиная с некоторого поля, ЭЭК имеет постоянное значение. Из проведенного нами анализа магнитооптических сигналов [1] следует, что поле, при котором наблюдается резкое возрастание ЭЭК, соответствует коэрцитивной силе образца H_C ,

а поле, начиная с которого ЭЭК имеет постоянное значение, соответствует полю насыщения H_S . Обнаруженное поведение намагниченности с ростом поля вдоль направлений D1 и D2, согласно существующим представлениям [2], возможно при перемагничивании образцов вдоль легкой (D1) и трудной (D2) осей намагничивания. Причиной появления плоскостной магнитной анизотропии в изучаемых системах является наличие внешнего магнитного поля $H \sim 70$ Ое, приложенного параллельно плоскости подложки в процессе изготовления образцов. Благодаря этому полю в указанных образцах возникает наведенная магнитная анизотропия. В настоящее время доказано, что основным механизмом, обуславливающим появление наведенной магнитной анизотропии, является парное упорядочение атомов [3]. Кроме того, анализ полученных экспериментальных данных показал, что коэрцитивная сила $[Co/Fe/Ni]_n$ тонкопленочных структур не превышает 6 Ое, т.е. изучаемые тонкопленочные системы можно отнести к магнитомягким материалам.

Наибольшее внимания с точки зрения практических приложений заслуживают результаты измерений петель гистерезиса на исходных $[Co/Fe/Ni]_n$ образцах. Было найдено, что петли гистерезиса, измеренные в магнитном поле, приложенном вдоль D1, имеют сложную форму (см. рис. 1). Объяснение обнаруженных петель гистерезиса может состоять в следующем. Исследуемые $[Co/Fe/Ni]_n$ системы состоят из слоев различной толщины и разного состава, а следовательно, они имеют различающиеся магнитные характеристики, в частности различающиеся значения константы магнитной анизотропии K и намагниченности насыщения M_S . В этом случае на магнитно-полевую зависимость каждого слоя оказывают влияние поля рассеивания, создаваемые соседними слоями. Эти поля рассеивания имеют противоположное направление по сравнению с внешним приложенным к образцу магнитным полем. В теоретической работе [4] показано, что для такого типа неоднородных магнитных систем благодаря магнитостатическому взаимодействию между слоями возможно наблюдение петель гистерезиса сложной формы. Наши экспериментальные данные подтверждают эти расчеты.

Измерения магнитных характеристик пленок $Co_{59}Fe_{26}Ni_{15}$ показали, что плоскостная магнитная анизотропия в указанных образцах сохраняется, но петли гистерезиса в поле, приложенном вдоль D1, имеют обычную форму (см. рис. 2). Вместе с тем коэрцитивная сила H_C и поле насыщения H_S этих тонкопленочных образцов увеличиваются по

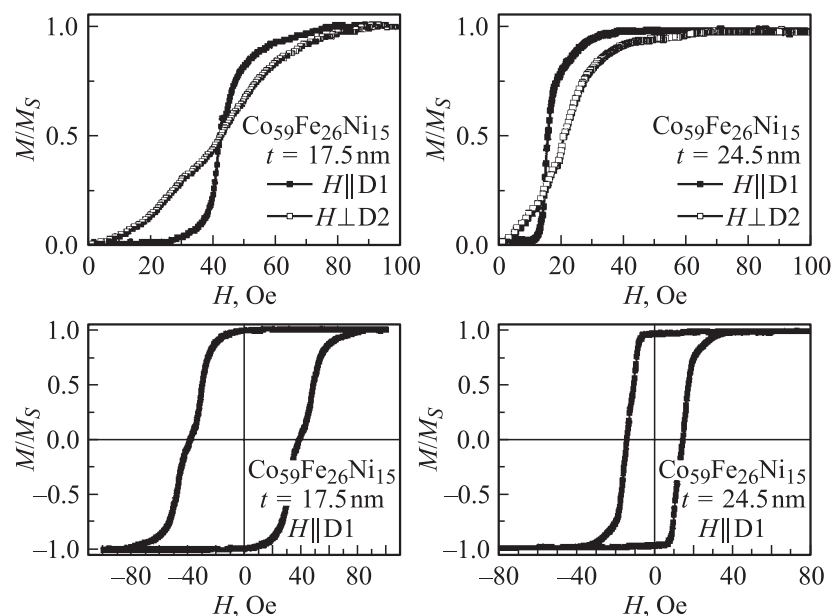


Рис. 2. Кривые намагничивания, наблюдаемые для $\text{Co}_{59}\text{Fe}_{26}\text{Ni}_{15}$ тонкопленочных образцов в магнитном поле, приложенном вдоль направлений D1 и D2, и петли гистерезиса, наблюдаемые в магнитном поле, приложенном вдоль D1.

сравнению с исходными. Из рисунка видно, что в поле, приложенном вдоль D1, для исходных образцов, имеющих толщину 17.5 и 24.5 nm, H_S соответственно равно 15 и 12 Oe, а для отожженных образцов, имеющих такую же толщину, H_S равно 90 и 40 Oe. Увеличение значений H_S в отожженных образцах можно объяснить их микроструктурными изменениями. Было обнаружено, что в XRD спектрах, полученных для изучаемых систем, наблюдаются только {111} линий, что свидетельствует о преимущественной (111) ориентации кристаллитов параллельно поверхности образца. Было найдено также, что для отожженных образцов интенсивность линий {111} возрастает, что свидетельствует об усилении текстуры этих образцов по сравнению с исходными. Известно [5], что в более (111) текстурированных образцах (при прочих равных условиях) значение коэрцитивной силы и поля

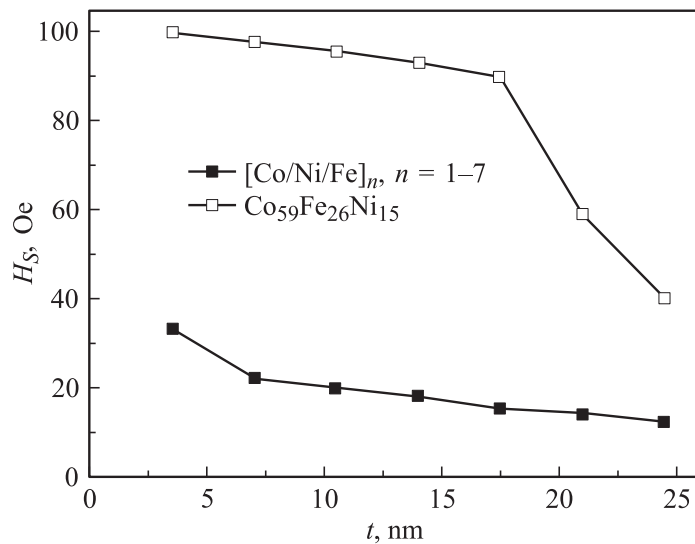


Рис. 3. Зависимость поля насыщения $[Co-Fe-Ni]_n$ ($n = 1-7$) и $Co_{59}Fe_{26}Ni_{15}$ тонкопленочных образцов от их толщины.

насыщения увеличивается. Такая корреляция между магнитными и микроструктурными свойствами изучаемых систем наблюдалась нами (см. рис. 3).

В заключение, с помощью магнитооптического метода экспериментально установлено, что неоднородные тонкопленочные $Co/Fe/Ni$ структуры характеризуются достаточно низкими значениями коэрцитивной силы и поля насыщения. На магнитополевое поведение этих неоднородных систем существенное влияние оказывают поля рассеивания, создаваемые соседними слоями, что обуславливает появление петель гистерезиса сложной формы. Полученные в результате отжига $Co/Fe/Ni$ структур $Co_{59}Fe_{26}Ni_{15}$ пленки становятся более магнито жесткими по сравнению с исходными системами, что объяснено микроструктурными особенностями образцов.

Данная работа была выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 05-02-16293).

Список литературы

- [1] *Шалыгина Е.Е., Комарова М.А., Молоканов В.В.* // ЖЭТФ. 2002. Т. 122. № 3 (9). С. 593–599.
- [2] *Кринчик Г.С.* // Физика магнитных явлений. М.: Изд. МГУ, 1985.
- [3] *Chikazumi S.* // Physics of Ferromagnetism / Oxford University Press, Oxford, 1997.
- [4] *Aharoni A.* // J. Appl. Phys. 1994. V. 76. N 10. P. 6977–6979.
- [5] *Lin C.J., Gorman G.L., Lee C.H., Farrow R.F.C., Marinero E.E., Do H.V., Notarys H.* // J. Magn. Magn. Mater. 1991. V. 93. P. 194–206.