

Магнитные свойства трехслойных тонкопленочных систем на основе кобальта с промежуточным слоем гадолиния

А. М. Харламова^{1,*}, Е. Е. Шалыгина^{1,†}, С. Л. Ефремова¹, А. В. Свалов²

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра магнетизма
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

²Уральский Федеральный Университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина
Россия, 620083, Екатеринбург, пр-т Ленина, 51

(Статья поступила 25.06.2019; Подписана в печать 24.10.2019)

В работе представлены результаты исследования структурных и магнитных характеристик тонкопленочных Co/Gd/Co систем, полученных методом ионно-плазменного магнетронного распыления. Толщина слоев кобальта была равна 5.0 нм, а Gd слоя изменялась от 0.5 до 10.0 нм. Обнаружено, что магнитополевое поведение изучаемых образцов зависит от толщины слоя Gd. В частности, поле насыщения, H_S , осциллирует по величине с изменением толщины Gd слоя. Этот факт объяснен влиянием магнитостатического взаимодействия между магнитными слоями, обусловленного различием значений коэрцитивной силы верхнего и нижнего слоев Co, а также изменением прямого обменного и магнитостатического взаимодействия между слоями Co с вариацией толщины слоя Gd.

PACS: 75.70.-i; 75.75.+a

УДК: 537.622.

Ключевые слова: магнитные свойства, магнитооптический эффект, процессы перемангничивания, редкоземельные металлы, тонкопленочные структуры.

ВВЕДЕНИЕ

Тонкие магнитные пленки 3d-переходных металлов и тонкопленочные многослойные структуры субмикронной толщины, характеризующиеся уникальными физическими свойствами, являются объектом интенсивных исследований в области физики магнитных явлений и прикладного магнетизма. В частности с середины 80-х годов активно ведется изучение свойств магнитных материалов, содержащих редкоземельные металлы и их сплавы. Обусловлено это высокими значениями магнитных моментов этих материалов и перспективой их широкого практического применения [1–3]. Существенное улучшение способов получения и методов изучения тонкопленочных систем с хорошо контролируемыми толщинами слоев нанометрового диапазона способствовали росту экспериментальных исследований вышеуказанных образцов [4]. При этом особое внимание уделяется изучению обменного взаимодействия между переходными и редкоземельными металлами в многослойных системах ПМ/РЗМ (ПМ — переходные металлы Co, Fe; РЗМ — редкоземельные металлы Gd, Dy, Tb и т.д.). Существенно то, что разнообразие магнитных свойств, наблюдаемых в структурах ПМ/РЗМ, делает их перспективными для практических приложений, например, в качестве материалов в магнитооптических записывающих устройствах [5].

Среди наиболее интересных объектов исследования можно выделить тонкопленочные системы на основе кобальта и редкоземельного гадолиния. Следует отметить, что изучение многослойных систем ти-

па [Co/Gd] $_n$ было начато почти полвека назад [6]. Ранее было установлено, что межслойное обменное взаимодействие в многослойных системах с РЗМ подобно взаимодействию, существующему между РЗМ и магнитными металлами (Co, Fe) [1, 2, 7]. В настоящее время накоплен достаточно большой объем экспериментальных и теоретических данных, которые существенно расширили представления о низкоразмерных магнитных материалах. Доказано, что магнитные характеристики ферромагнитных материалов в значительной степени определяются качеством и свойствами их поверхности [8]. Кроме того, обнаружена сильная зависимость магнитных свойств ультратонких магнитных пленок железа и кобальта от их толщины, а также от толщины и состава немагнитного слоя, напыленного между пленкой и подложкой [9]. При этом следует иметь в виду, что магнитное упорядочение в редкоземельных металлах обусловлено дальнедействующим косвенным обменным взаимодействием, осуществляющимся через электроны проводимости. Поэтому магнитные свойства РЗМ существенно зависят от структурного состояния реальных объектов [10]. Для изучения тонкопленочного состояния редкоземельных элементов чаще выбирают слоистые металлические структуры, обладающие высокими температурами магнитного упорядочения. Среди РЗМ, таких как Gd, Dy, Tb гадолиний имеет наибольшую температуру Кюри ($T_C = 293$ K) и является коллинеарным ферромагнетиком во всем температурном диапазоне ниже T_C . Было установлено также, что в случае многослойных РЗМ/Co(Fe) образцов существенная роль в формировании магнитного состояния принадлежит межслойному обмену, которое наиболее ярко проявляется в низкоразмерных тонкопленочных системах [11]. Детальное изучение этого явления, безусловно, заслуживает внимания. Вместе с тем следует отметить, что ранние

*E-mail: anna-h-m@mail.ru

†E-mail: shal@magn.ru

исследования систем с Gd прослойкой были посвящены в основном изучению многослойных структур [12–14]. При этом наличие большого числа интерфейсов в ранее изучаемых системах, как правило, усложняло интерпретацию экспериментальных данных. Эта проблема в данной работе была решена путем детального изучения трехслойных Co/Gd/Co образцов. Результаты исследования магнитных характеристик систем с РЗМ прослойкой могут быть полезны при разработке новых слоистых структур для практического применения в современных устройствах микро- и нанoeлектроники. Следует также отметить, что на сегодняшний день гадолиний остается наиболее перспективным материалом, как в объемном, так и в тонкопленочном состоянии, при изготовлении устройств магнитного охлаждения [15, 16].

Цель данной работы — изучение структурных и магнитных характеристик трехслойных Co/Gd/Co тонкопленочных систем с изменением толщины слоя гадолиния.

1. ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

1.1. Изучаемые образцы

Изучаемые в данной работе тонкопленочные образцы были получены при комнатной температуре методом ионно-плазменного магнетронного распыления на неохлаждаемые стеклянные подложки Corning 2845 с использованием Ta, Co и Gd мишеней. Перед процедурой напыления все подложки очищались последовательно в ультразвуковой ванне ацетоном, этанолом и деионизированной водой, а затем сушились при температуре 100°C. Шероховатость поверхности подложки была порядка 0.5 нм. В качестве буферного подслоя и верхнего слоя, защищающего образцы от окисления, наносились слои тантала (Ta) толщиной 5.0 нм. Базовое давление в вакуумной камере было 4.0×10^{-7} мбар. Давление аргона в процессе напыления пленки достигало 3.8×10^{-3} мбар. Изготовление образцов осуществлялось при наличии магнитного поля, приложенного параллельно плоскости подложки параллельно длинной стороне образца, $H_{\text{подл}} = 250 \text{ Э}$, что способствовало формированию одноосной магнитной анизотропии. Толщина Co слоя, t_{Co} , во всех трехслойных Co/Gd/Co образцах была равна 5.0 нм. Толщина слоев Gd изменялась от 0.5 до 10.0 нм. Толщина слоев была определена по скорости (11.0, 2.6, и 2.8 нм/мин для Ta, Co, и Gd, соответственно) и времени напыления для каждого материала. Кроме того, скорость напыления слоев была оценена с помощью атомной силовой микроскопии (АСМ). Разница значений толщины слоев, полученных обеими методиками, не превышала 5%.

1.2. Методика эксперимента

Микроструктура Co/Gd/Co образцов была изучена рентгеновским методом с использованием $\text{CuK}\alpha$ излучения. Морфология поверхности образцов была исследована с помощью атомной силовой микроскопии (АСМ). Полученные АСМ изображения для Co/Gd/Co систем были обработаны с использованием математических операций и фильтров программы «Nova», представленной изготовителями АСМ [17]. Программа позволяет определить среднее арифметическое значение шероховатости поверхности, R_a , изучаемых образцов. Намагниченность насыщения, M_S , реперных однослойных пленок Co толщиной 5.0 и 10.0 нм, а также объемные магнитные характеристики Co/Gd/Co трехслойных образцов были измерены на высокочувствительном вибрационном магнитометре «Lake Shore VSM 7400» с чувствительностью 10^{-5} Гс·см³. Принцип работы магнитометра подробно описан в работе [18].

Измерения магнитных характеристик исследуемых образцов были выполнены на магнитооптическом Керр-магнитометре [19], созданном на основе поляризационного микроскопа Carl Zeiss, позволяющем проводить измерения петель гистерезиса и одновременно визуализировать изменения доменной структуры (ДС) в процессе перемагничивания образцов. Принцип получения контрастного изображения с помощью указанного микроскопа состоит в следующем. Вначале регистрируется исходное изображение образца. Наличие разных оттенков контраста соответствует тому, что вектора намагниченности \mathbf{M} в этих областях имеют разные направления. Обработка изображений требует усиления контраста. В связи с этим регистрируется изображение топографического контраста, то есть фоновое изображение образца, в магнитном поле, превышающем поле насыщения. Компьютерная обработка этих данных позволяет получить разностное изображение, которое содержит только контраст, обусловленный доменной структурой образца. Магнитооптические измерения были выполнены в геометрии меридионального эффекта Керра, пропорционального компоненте намагниченности, параллельной поверхности образца и плоскости падения света. Измерения петель гистерезиса исследуемых Co/Gd/Co образцов были выполнены на магнитооптическом и вибрационном магнитометрах при двух направлениях внешнего магнитного поля, \mathbf{H} . В одном случае, \mathbf{H} было параллельно ориентации магнитного поля, приложенного в процессе напыления образцов (направление D_1), а в другом перпендикулярно D_1 (направление D_2). В данной работе все измерения были выполнены при комнатной температуре.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты рентгеноструктурных исследований свидетельствовали о том, что слои кобальта во всех образцах имеют нанокристаллическую структуру. Исследо-

вания, проведенные с помощью АСМ, показали, что средняя шероховатость поверхности, R_a , изучаемых трехслойных систем не превышает 0.5 нм, что свидетельствовало о высоком качестве образцов. Следует отметить, что значение R_a практически не зависит от толщины Gd слоя. Это означало, что изменение толщины слоя гадолиния не влияет на свойства поверхности исследуемых образцов, а, следовательно, шероховатость поверхности не должна существенно влиять на

магнитные характеристики Co/Gd/Co тонкопленочных систем.

Ниже приводятся результаты магнитных измерений изучаемых образцов. Было найдено, что значения намагниченности насыщения, M_S , реперных однослойных Co пленок толщиной 5.0 и 10.0 нм, измеренных с помощью высокочувствительного вибрационно-го магнитометра соответственно равны 970 и 1200 Гс (рис. 1).

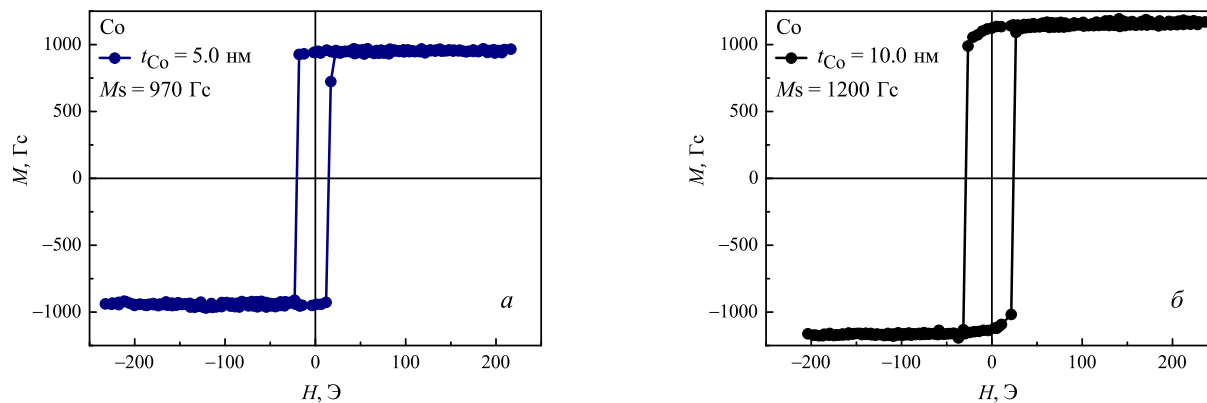


Рис. 1: Петли гистерезиса реперных однослойных Co пленок толщиной 5.0 нм (а) и 10.0 нм (б), измеренные в магнитном поле, параллельном направлению D_1 , с помощью вибрационного магнитометра

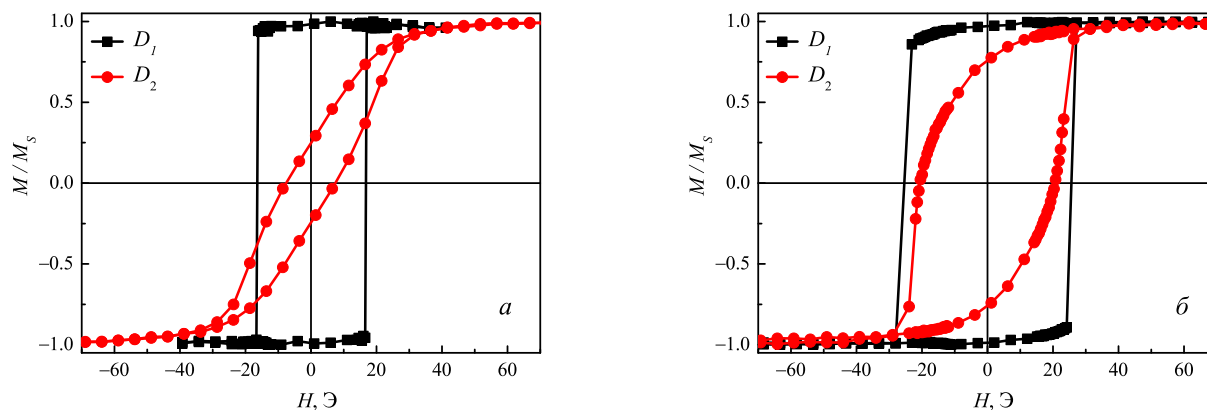


Рис. 2: Петли гистерезиса реперных однослойных Co пленок толщиной 5.0 нм (а) и 10.0 нм (б), измеренные на магнитооптическом Керр-магнитометре в магнитном поле, приложенном параллельно D_1 и D_2 направлениям

Найденные экспериментально значения M_S для вышеуказанных пленок кобальта меньше $M_S = 1400$ Гс объемного кобальта, но хорошо согласуются с литературными данными о зависимости M_S пленок Co, полученных методом ионно-плазменного магнетронного распыления, с изменением их толщины.

Измерения локальных петель гистерезиса изучаемых трехслойных Co/Gd/Co образцов были выполнены на магнитооптическом Керр-магнитометре. Локальные петли гистерезиса были измерены для различных участков поверхности диаметром 0.5 мм в центральной области Co/Gd/Co тонкопленочных систем,

чтобы исключить влияние краевых эффектов. Анализ полученных результатов показал, что исходные образцы характеризуются достаточно высокой однородностью локальных магнитных характеристик. В частности, различия локальных значений поля насыщения, $H_S^{\text{лок}}$, и коэрцитивной силы, $H_C^{\text{лок}}$, исследуемых образцов, измеренных в магнитном поле, приложенном параллельно как D_1 , так и D_2 направлению, не превышают 5%. В связи с этим в дальнейшем приводятся петли гистерезиса, наблюдаемые при однократном измерении в магнитном поле, приложенном параллельно D_1 или D_2 направлению, для центральной области образцов.

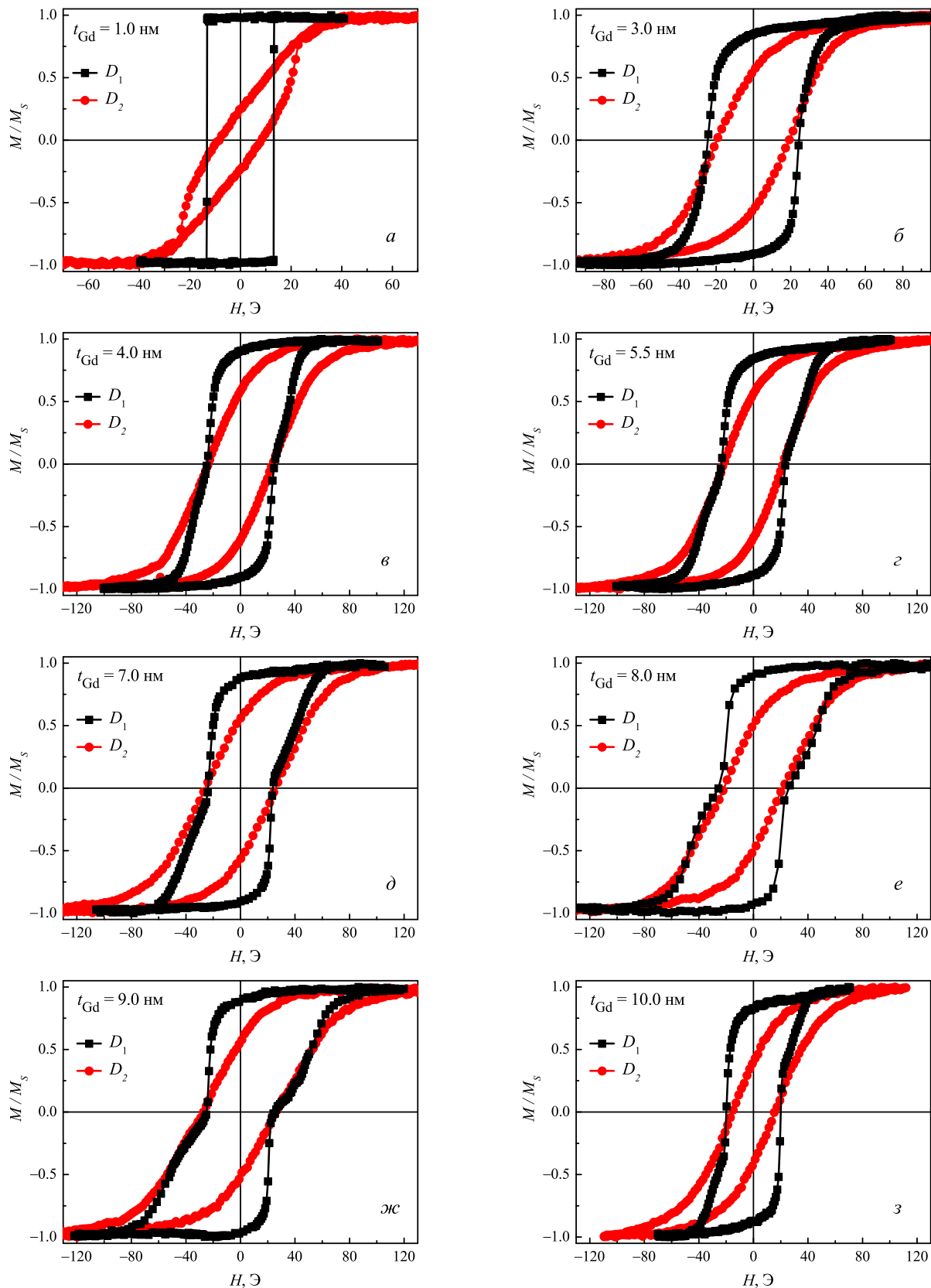


Рис. 3: Петли гистерезиса Co/Gd/Co трехслойных образцов с различной толщиной Gd слоя, t_{Gd} , измеренные на магнитооптическом Керр-магнитометре в магнитном поле, приложенном параллельно D_1 и D_2 направлениям

Значения H_S и $H_S^{\text{ЛОК}}$ определялись из петель гистерезиса по величине приложенного магнитного поля, при котором намагниченность образца порядка 98% M_S (M_S — намагниченность насыщения образца). Результаты измерений петель гистерезиса, полученные на магнитооптическом Керр-магнитометре, представлены на рис. 2, 3.

Анализ полученных данных показал, что петли гистерезиса, наблюдаемые для изучаемых тонкопленочных систем, измеренные в магнитном поле, параллельном направлениям D_1 и D_2 направлениям, различаются (рис. 2, 3). Этот факт свидетельствовал о наличии наведенной магнитной анизотропии с осью легкого намагничивания, параллельной направлению магнитного поля, приложенного в процессе изготовления образцов. Появление плоскостной магнитной анизотропии в изучаемых системах обусловлено внешним магнитным полем $H_{\text{подл}} = 250$ Э, приложенным параллельно плоскости подложки в процессе напыления образцов. В настоящее время основной причиной появления наведенной магнитной анизотропии принято считать парное упорядочением атомов [20].

Для всех образцов при ориентации магнитного поля \mathbf{H} параллельно D_2 направлению при $H < H_S$ наблюдается практически линейная зависимость намагниченности от величины H (рис. 2, 3). При этом форма петель гистерезиса для всех исследуемых образцов имеет наклонную форму. Согласно существующим представлениям [21, 22], в этом случае перемагничивание образцов осуществляется за счет вращения вектора намагниченности.

Было найдено, что форма петель гистерезиса Co/Gd/Co образцов в магнитном поле, приложенном параллельно D_1 направлению, зависит от толщины Gd слоя, t_{Gd} . В частности, было обнаружено, что образцы с $t_{Gd} < 2.0$ нм характеризуются практически прямоугольными петлями гистерезиса (рис. 3,а). Известно [23], что прямоугольные петли гистерезиса, наблюдаемые для однодоменных пленок в магнитном поле, приложенном параллельно оси легкого намагничивания (направление D_1), свидетельствуют о том, что процессы перемагничивания этих образцов осуществляются за счет необратимого роста зародыша перемагничивания и мгновенного движения доменной границы. По аналогии, наблюдаемые прямоугольные петли гистерезиса для Co/Gd/Co тонкопленочных структур позволяют утверждать, что перемагничивание этих образцов также осуществляется за счет необратимого роста зародыша перемагничивания и мгновенного движения доменной границы. Это предположение было подтверждено экспериментально с помощью Керр-магнитометра путем измерения петель гистерезиса при изменении магнитного поля от $-H$ до $+H$ ($|H| > H_S$) и одновременной визуализации изменения доменной структуры (ДС) в процессе перемагничивания образцов.

На рис. 4 и 5 приведены типичные видоизменения доменной структуры, наблюдаемые с помощью Керр-магнитометра для образцов с $t_{Gd} < 2.0$ нм при его перемагничивании магнитным полем, приложенном параллельно направлениям D_2 и D_1 , соответственно.

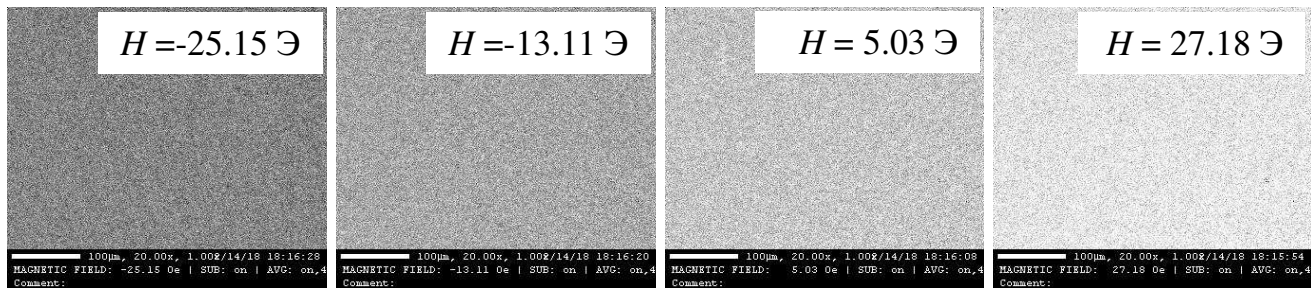


Рис. 4: Видоизменение доменной структуры Co/Gd/Co образца с $t_{Gd} = 0.5$ нм, наблюдаемое при изменении магнитного поля от $-H$ до $+H$ ($|H| > H_S$), приложенном параллельно направлению D_2

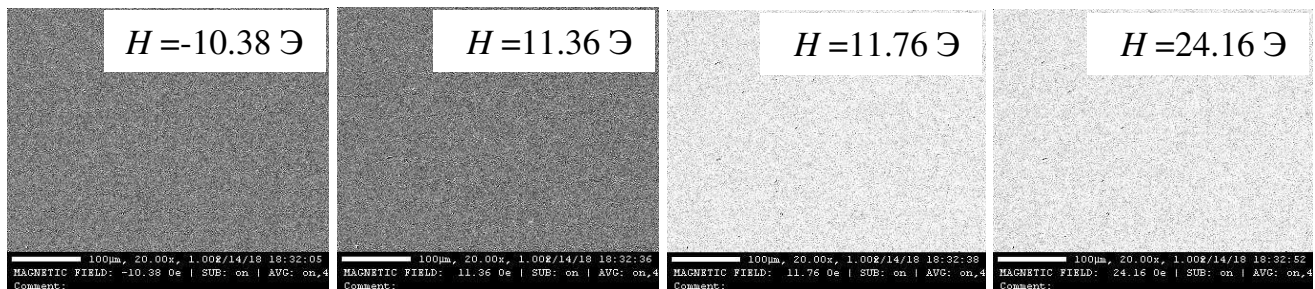


Рис. 5: Видоизменение доменной структуры Co/Gd/Co образца с $t_{Gd} = 0.5$ нм, наблюдаемое при изменении магнитного поля от $-H$ до $+H$ ($|H| > H_S$), приложенном параллельно направлению D_1

Из рис. 4 видно, в магнитном поле, приложенном параллельно D_2 направлению, наблюдается постепенное изменение контраста при изменении магнитного поля от от $-H$ до $+H$ ($|H| > H_S$). Это означает, что перемагничивание образца осуществляется за счет вращения вектора намагниченности.

Резкое изменение контраста при изменении магнитного поля от от $-H$ до $+H$ ($|H| > H_S$), приложенном параллельно D_1 направлению (рис. 5) свидетельствует о том, что в этом случае процессы перемагничивания образцов осуществляются за счет необратимого роста зародыша перемагничивания и мгновенного движения доменной границы.

При $t_{Gd} > 2.0$ нм форма петель гистерезиса, измеренных в магнитном поле, приложенном параллельно D_1 направлению, отличается от прямоугольной (рис. 3, б, в, г, д, е, ж, з). Это можно объяснить наличием доменной структуры в образцах, перемагничивание которых обычно на начальном этапе осуществляется за счет смещения доменных границ, затем смещения доменных границ и вращения вектора намагниченности и завершается вращением вектора намагниченности. В этом случае при изменении магнитного поля от $-H$ до $+H$ ($|H| > H_S$) должно наблюдаться постепенное изменение контраста, например, от темного к светлому. Рис. 6 подтверждает это факт.

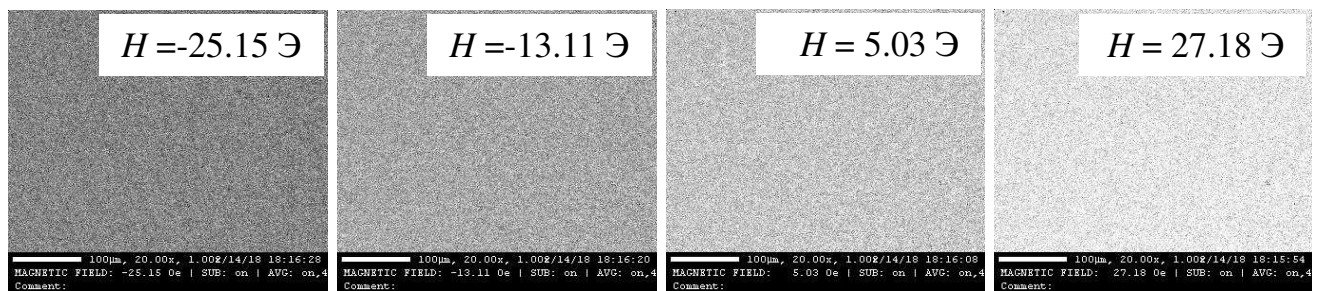


Рис. 6: Видоизменение доменной структуры Co/Gd/Co образца с $t_{Gd} = 3.0$ нм, наблюдаемое при изменении магнитного поля от $-H$ до $+H$ ($|H| > H_S$), приложенном параллельно направлению D_1

Для трехслойных образцов с $t_{Gd} > 2.0$ нм наблюдается рост значений H_S . В частности, H_S образца с $t_{Gd} = 3.0$ нм (рис. 3, б) практически в 5 раз больше H_S образца с $t_{Gd} = 2.0$ нм. Петли гистерезиса при $t_{Gd} > 3.0$ нм имеют сложную форму (рис. 3, в, г, д, е, ж, з). Было сделано предположение, что этот резуль-

тат может быть следствием условий осаждения слоев Co. Для проверки этого факта были дополнительно получены и исследованы двухслойные тонкопленочные системы Co/Gd и Gd/Co с толщиной Co слоя 5.0 нм и Gd слоя — 3.0 нм (рис. 7).

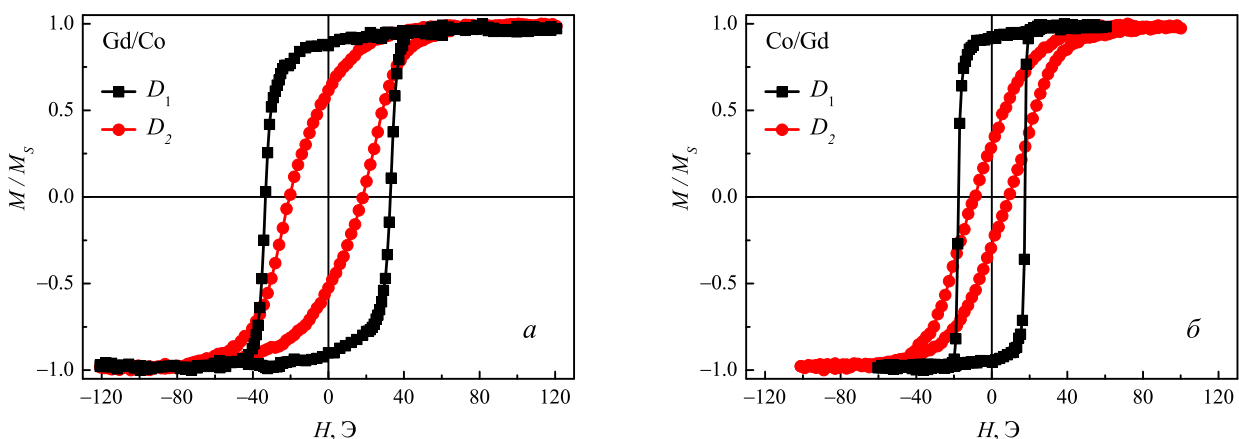


Рис. 7: Петли гистерезиса Gd/Co (а) и Co/Gd (б) двухслойных образцов с $t_{Gd} = 5.0$ нм и $t_{Gd} = 3.0$ нм, измеренные на магнитооптическом Керр-магнитометре в магнитном поле, приложенном параллельно D_1 и D_2 направлениям

Анализ приведенных на рис. 7 данных показывает, что магнитное поведение двухслойных образцов

отличается. В частности, образец, в котором слой Co напылялся на слой Gd (рис. 7, а), характеризуется бо-

лее высокими значениями коэрцитивной силы и поля насыщения по сравнению с образцом, в котором Gd напылялся на слой Co (рис. 7,б). Это означает, что в первом случае формируется более магнитотвердый слой кобальта, а во втором — более магнитомягкий.

Для изучаемых трехслойных Co/Gd/Co тонкопленочных систем были также измерены объемные магнитные характеристики на вибрационном магнитометре. Петли гистерезиса, измеренные в магнитном поле, приложенном параллельно направлению D_1 , представлены на рис. 8.

Петли гистерезиса, измеренные в магнитном поле, приложенном параллельно направлению D_1 , представлены на рис. 8.

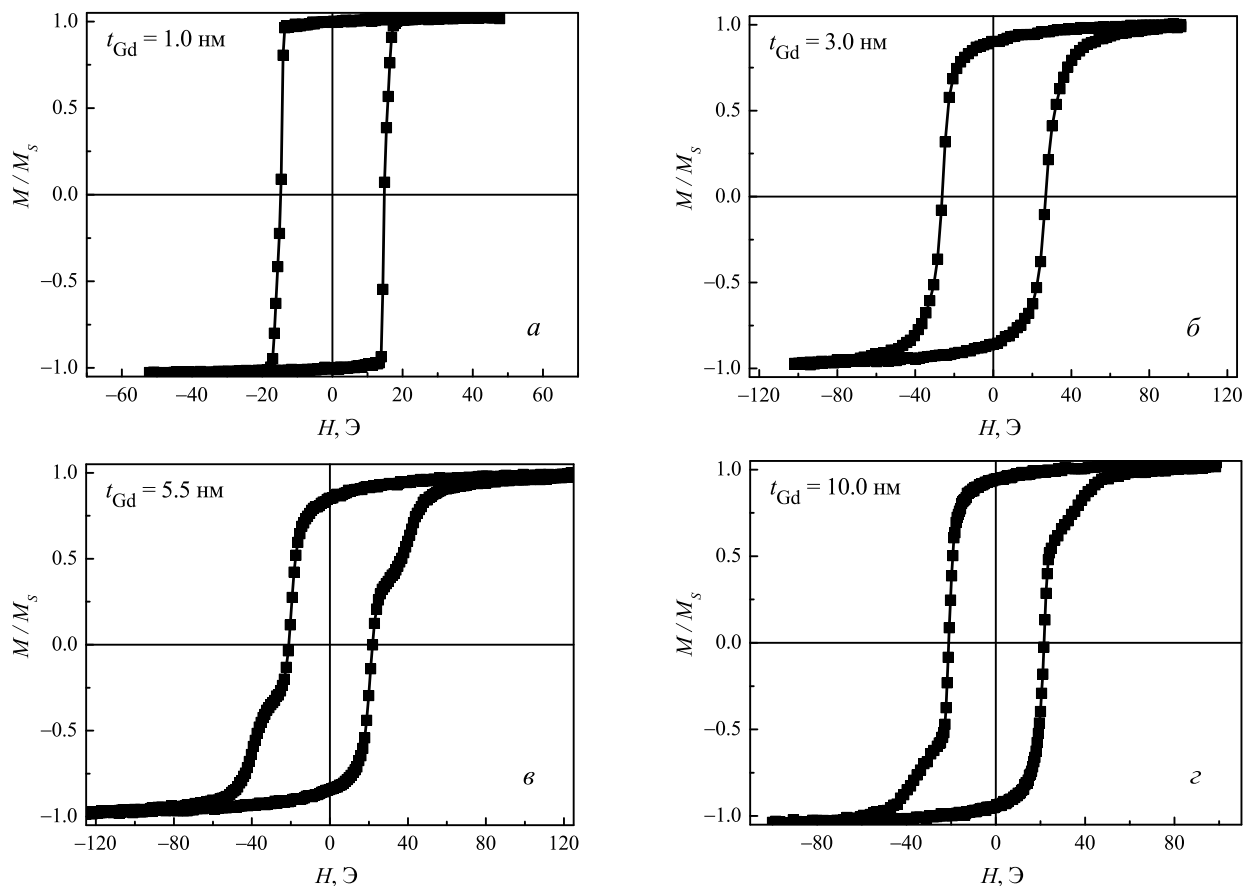


Рис. 8: Петли гистерезиса Co/Gd/Co трехслойных образцов с различной толщиной Gd слоя, t_{Gd} , измеренные на вибрационном магнитометре в магнитном поле, параллельном направлению D_1

Приведенные на рис. 8 результаты измерений объемных магнитных характеристик подтверждают, что форма петель гистерезиса, измеренных в магнитном поле, параллельном направлению D_1 , зависит от толщины Gd слоя. Полученные экспериментальные данные позволили получить зависимость значений поля насыщения, H_S , для изучаемых Co/Gd/Co образцов от толщины слоя Gd (рис. 9).

При построении зависимости $H_S(t_{Gd})$, использовались результаты только магнитооптических измерений петель гистерезиса в магнитном поле, приложенном параллельно направлению D_1 , поскольку они практически совпадали с данными, полученными на вибрационном магнитометре.

Из рис. 9 видно, что зависимость поля насыщения, H_S , изучаемых тонкопленочных Co/Gd/Co образцов от толщины гадолиниевого слоя при $t_{Gd} > 2.0$ нм имеет осциллирующий характер. Максимальные значения H_S наблюдаются при $t_{Gd} = 3.0, 6.0$ и 9.0 нм. Причем значения H_S увеличиваются с ростом t_{Gd} . Этот факт можно объяснить, если принять во внимание результаты ранее проведенных в нашей лаборатории исследований. Было найдено, что с ростом толщины магнитного образца, напыленного на тантал, его текстурированность повышается, что сопровождается увеличением значения поля насыщения. Таким образом, наличие слоя тантала между подложкой и слоем кобальта может обуславливать увеличение значений H_S тонкопленочных Co/Gd/Co образцов при $t_{Gd} = 3.0, 6.0$ и 9.0 нм.

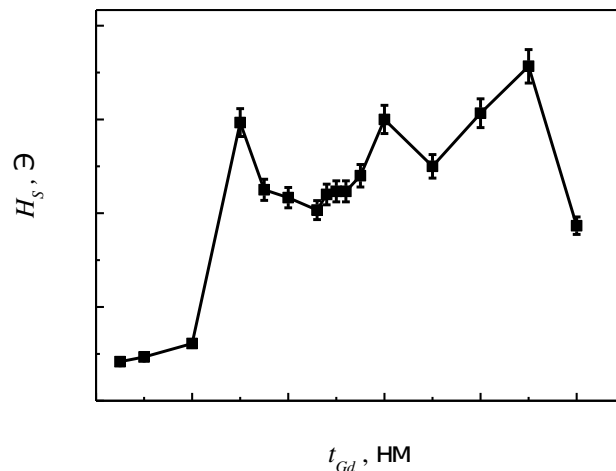


Рис. 9: Зависимость значений поля насыщения, H_s , от толщины Gd слоя, t_{Gd} , наблюдаемая для Co/Gd/Co образцов

Кроме того, при $t_{Gd} > 3.0$ нм петли гистерезиса имеют более сложную форму (рис. 3, в, г, д, е, ж, з). Этот факт можно объяснить, если учесть результаты, полученные ранее в теоретической работе А. Аharoni [24]. Выполненный им расчет магнитополевого поведения трехслойных тонкопленочных образцов, в которых магнитомягкий слой находится под влиянием размагничивающего поля магнитотвердых слоев, показал, что в этом случае должны наблюдаться петли гистерезиса сложной, двухступенчатой формы, обусловленные магнитостатическим взаимодействием между магнитными слоями. В связи с этим были приняты во внимание приведенные выше результаты исследования двухслойных образцов, свидетельствующие о том, что при напылении кобальта на гадолиний кобальт характеризуется большей коэрцитивной силой по сравнению с образцом, в котором Gd напыляется на слой Co. Таким образом, сложные петли гистерезиса в изучаемых трехслойных Co/Gd/Co системах при $t_{Gd} > 3.0$ нм можно объяснить влиянием магнитостатического взаимодействия между магнитными слоями, обусловленного различием значений коэрцитивной силы верхнего и нижнего слоев Co.

На магнитополовое поведение Co/Gd/Co образцов могут также влиять изменения свойств Gd слоя с ростом его толщины. В частности, при малых толщинах Gd в области интерфейсов возможно появление слабомангнитных Gd-Co соединений. Дальнейший рост t_{Gd} сопровождается появлением сплошного Gd слоя. Изменение толщины промежуточного Gd слоя будет также влиять на магнитостатическое взаимодействие слоев кобальта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые проведено экспериментальное исследование низкоразмерных тонкопленочных систем Co/Gd/Co, состоящих из двух одинаковых по толщине кобальтовых слоев и редкоземельной гадолиниевой прослойки разной толщины. Найдено, что толщина слоев гадолиния, t_{Gd} , влияет на магнитные свойства и магнитополовое поведение изучаемых образцов. В частности, форма петель гистерезиса Co/Gd/Co систем в магнитном поле, приложенном параллельно оси легкого намагничивания (D_1 направление), зависит от t_{Gd} . При $t_{Gd} > 3.0$ нм наблюдаются петли гистерезиса более сложной формы. Зависимость $H_s(t_{Gd})$ имеет осциллирующий характер. Максимальные значения H_s наблюдаются при $t_{Gd} = 3.0, 6.0$ и 9.0 нм. Сложная форма петель гистерезиса Co/Gd/Co образцов объяснена влиянием магнитостатического взаимодействия между магнитными слоями, обусловленного различием значений коэрцитивной силы верхнего и нижнего слоев Co, а осцилляционная зависимость $H_s(t_{Gd})$ — изменением прямого обменного и магнитостатического взаимодействия между слоями Co с вариацией толщины слоя Gd.

Авторы выражают благодарность канд. физ.-мат. наук ст. науч. сотруднику отдела магнетизма твердых тел НИИ ФМП Уральского Федерального Университета Лепаловскому В. Н. за получение тонкопленочных образцов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 17-32-50020 «мол_нр».

- [1] Morishita T., Togami Y., Tsushima K. // J. Phys. Soc. Jpn. 1985. **54**. P. 37.
[2] Okuno H., Sakaki Y., Sakurai Y. // J. Phys. D: Appl.

- Phys. 1986. **19**, N 5. P. 873.
[3] Sato N., Habu K. // J. Appl. Phys. 1987. **61**, N 8. P. 4287.
[4] Овчинников С. Г. // УФН. 1999. **169**(8). С. 869.

- [5] *Pelka J. B., Paszkowicz W., Wawro A., Baczewski L. T., Seeck O.* // *J. of Alloys and Compounds*. 2001. **328**. P. 253.
- [6] *Йелон А.* // *Физика тонких пленок*. 1973. **6**, С.228.
- [7] *Baczewski L. T., Piecuch M., Durand J., Marchal G., Delecroix P.* // *Phys. Rev. B*. 1989. **40**. P. 11237.
- [8] *Shalygina E. E., Bekoeva L. M., Tsidaeva N. I.* // *Sensors & Actuators: A Physical*. 2000. **81**, N 1–3. P. 216.
- [9] *Шалыгина Е. Е., Козловский Л. В., Корендяев А. А.* // *Письма в ЖТФ*. 1994. **20**. С. 42.
- [10] *Никитин С. А.* *Магнитные свойства редкоземельных металлов и их сплавов*. М.: Изд-во МГУ, 1989.
- [11] *Свалов А. В., Васьковский В. О., Курляндская Г. В.* *Магнетизм наносистем на основе редкоземельных и 3d-переходных металлов* // Изд-во Урал. ун-та, 2008. С. 60.
- [12] *Heys A., Donovan P. E.* // *J. Magn. Magn. Mater.* 1993. **126**, N 1–3. P. 326.
- [13] *Jiang J. S., Chien C. L.* // *J. Appl. Phys.* 1996. **79**, N 5. P. 5615.
- [14] *Свалов А. В.* *Влияние размерного и структурного факторов на магнетизм многослойных пленок на основе 3d- и 4f-металлов*. 2017.
- [15] *Tishin A. M., Spichkin Y. I.* // *Bristol: Institute of Physics*. 2003. P. 1
- [16] *Miller C. W., Williams D. V., Bingham N S., Srikanth H.* // *J. Appl. Phys.* 2010. **107**. P. 09A903-1.
- [17] URL: <http://www.ntmtd.ru> (Изготовитель оборудования АСМ — компания «НТ-МДТ»).
- [18] *Перов Н. С., Родионова В. В., Прудникова М. В., Грановский А. Б., Прудников В. Н.* // *Физический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова*. 2016. С. 1–32.
- [19] *Evico magnetics company User instruction for evico magnetics combined overview/high-resolution Kerr Microscope & Magnetometer* P. 1–57.
- [20] *Chikazumi S.* *Physics of Magnetism*. 2001.
- [21] *Кринчик Г. С.* *Физика магнитных явлений*. 1985.
- [22] *Вонсовский С. В.* *Магнетизм, магнитные свойства диа-, пара-, ферро антиферро- и ферримагнетиков*. 1971.
- [23] *Казаков В. Г.* // *Соросовский образовательный журнал*. 1997. N 11. С. 90.
- [24] *Aharoni A.* // *J. Appl. Phys* 1994. **76**. P. 6977.

Magnetic properties of three-layer thin-film systems based on cobalt with an intermediate layer of gadolinium

A. M. Kharlamova^{1,a}, E. E. Shalygina^{1,b}, S. L. Efremova¹, A. V. Svalov²

¹*Department of magnetism, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia*

²*Ural Federal University. Ekaterinburg, 620083, Russia*

E-mail: ^aanna-h-m@mail.ru, ^bshal@magn.ru

The results of the investigation of the structural and magnetic characteristics of thin-film Co/Gd/Co systems obtained by the method of ion-plasma magnetron sputtering are presented. The thickness of the Co layers was 5.0 nm, and the Gd one varied from 0.5 to 10.0 nm. It was found that the magnetic-field behavior of the studied samples depends on the thickness of the Gd layer, t_{Gd} . In particular, the saturation field, H_S , oscillates in magnitude with increasing the Gd layer thickness. This fact was explained by the influence of the magnetostatic interaction between the magnetic layers due to the difference of the coercive force values of the upper and lower Co layers and also by the changes of the direct exchange and magnetostatic interactions between the Co layers with a variation of the Gd layer thickness.

PACS: 75.70.-i; 75.75.+a.

Keywords: magnetic properties, magneto-optical effect, magnetization reversal processes, rare-earth metals, thin-film structures.
Received 25 June 2019.

Сведения об авторах

1. Харламова Анна Михайловна — канд. физ.-мат. наук, мл. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-24-35, e-mail: anna-h-m@mail.ru.
2. Шалыгина Елена Евгеньевна — доктор физ.-мат. наук, профессор, гл. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-24-35, e-mail: shal@magn.ru.
3. Ефремова Светлана Леонидовна — магистр 1 года обучения, e-mail: svetlana.efr96@gmail.com.
4. Свалов Андрей Владимирович — доктор физ.-мат. наук., ст. науч. сотрудник; тел.: (343) 389-97-06; e-mail: andrey.svalov@urfu.ru.