

Зависимость магнитных свойств и магнитополевого поведения тонкопленочных трехслойных систем Co/Gd/Co от температуры

А. М. Харламова^{1,*}, А. В. Макаров¹, Е. Е. Шалыгина¹, 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, 620002, Екатеринбург, ул. Мира, д. 19
(Статья поступила 30.09.2020; подписана в печать 17.11.2020)

В работе представлены результаты исследования зависимости магнитных свойств и магнитополевого поведения тонкопленочных трехслойных Co/Gd/Co систем от температуры в диапазоне от 100 до 300 К. Изучаемые образцы получены методом ионно-плазменного магнетронного распыления. Толщина слоев кобальта равна 5.0 нм, а слоев Gd, t_{Gd} , изменялась от 3.0 до 9.0 нм. Объемные магнитные характеристики образцов измерены на вибрационном магнитометре при ориентации внешнего магнитного поля параллельно плоскости образцов. Обнаружено влияние температуры на магнитные характеристики и магнитополевого поведение изучаемых тонкопленочных систем. В частности, форма петель гистерезиса зависит от толщины Gd-слоя и температуры. Найдена зависимость магнитного момента и коэрцитивной силы от температуры. При изменении температуры от 100 до 300 К наблюдается увеличение значений магнитного момента образцов, а также уменьшение с ростом толщины гадолиния. Обнаружено уменьшение значений коэрцитивной силы с увеличением температуры от 100 до 300 К. Найдена точка магнитной компенсации для образца с $t_{Gd} = 9$ нм при $T = 150$ К.

PACS: 75.70.-i; 75.75.+a УДК: 537.622.

Ключевые слова: магнитные свойства, магнитополевого поведение, низкотемпературные измерения, редкоземельные металлы, тонкопленочные структуры.

ВВЕДЕНИЕ

Исследование тонких пленок, содержащих 3d-переходные металлы (ПМ) и редкоземельные металлы (РЗМ) и их сплавы, является актуальным в области физики магнитных явлений и прикладного магнетизма. Интерес к этим системам обусловлен высокими значениями магнитных моментов РЗМ и, как следствие этого, перспективой их широкого практического применения [1]. Многообразие магнитных свойств, наблюдаемых в многослойных ПМ/РЗМ структурах, предопределяет их использование, например, в качестве материалов в магнитооптических записывающих устройствах [2]. Кроме того, ферромагнитные мультислойные РЗМ/ПМ системы представляют собой интерес в качестве модельных образцов при изучении обменного взаимодействия между РЗМ (Gd, Dy, Tb и т.д.) и ПМ (Co, Fe) слоями, магнитное состояние которых определяется конкуренцией межфазной обменной энергии и энергии Зеемана. Такие многослойные системы характеризуются антиферромагнитной (АФМ) межслойной связью и представляет собой искусственный ферримагнетик с различными основными состояниями. Накопленный объем экспериментальных и теоретических данных значительно расширил представления о низкоразмерных магнитных материалах. В частности установлено, что качество и свойство поверх-

ности ферромагнитных материалов существенно влияют на их магнитные характеристики [3]. Кроме того, обнаружена сильная зависимость магнитных свойств ультратонких магнитных пленок, в частности, Co от их толщины, а также от толщины и состава немагнитного слоя, напыленного между пленкой и подложкой [4]. Наконец среди наиболее интересных объектов исследования можно выделить тонкопленочные системы на основе кобальта и редкоземельного гадолиния. Ранее было установлено, что межслойное обменное взаимодействие в многослойных системах РЗМ/ПМ подобно взаимодействию, существующему в РЗМ-ПМ сплавах между магнитными моментами атомов РЗМ и ПМ [1, 5]. При этом следует иметь в виду, что магнитное упорядочение в РЗМ металлах обусловлено дальнедействующим косвенным обменным взаимодействием, осуществляющимся через электроны проводимости. Поэтому магнитные свойства РЗМ существенно зависят от структурного состояния реальных объектов [6]. Для изучения тонкопленочного состояния редкоземельных элементов чаще выбирают слоистые металлические структуры, обладающие высокими температурами магнитного упорядочения. Среди РЗМ гадолиний имеет самую высокую температуру магнитного упорядочения (температура Кюри — $T_C = 293$ К) и является коллинеарным ферромагнетиком во всем температурном диапазоне ниже T_C . При понижении температуры (T) ниже точки Кюри возникает ферромагнитная структура с ориентацией магнитного момента вдоль c -оси кристаллической решетки, которая сохраняется до 240 К. При $T < 240$ К происходит отклонение ориентации магнитного момента от c -оси на некоторый

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

угол, значение которого увеличивается при дальнейшем понижении температуры [6]. Как было указано выше, большинство ранних исследований были посвящены в основном изучению многослойных структур. Наличие в них повторяющихся периодов является дополнительным фактором, который приходится учитывать при интерпретации полученных экспериментальных данных. Однако ранее было установлено, что для некоторых прикладных задач целесообразно использовать трехслойные тонкопленочные системы, в частности, системы с гадолинием [7]. На сегодняшний день Gd остается наиболее перспективным материалом, как в объемном, так и в тонкопленочном состоянии, при использовании его в практических применениях [8, 9]. Следует отметить, что исследований влияния температуры на магнитные свойства и магнитополовое поведение трехслойных Co/Gd/Co систем ранее не проводилось, что, безусловно, является новизной данной работы и заслуживает внимания. Важность исследования магнитных характеристик систем с РЗМ прослойкой, в частности Co/Gd/Co систем, объясняется также необходимостью получения данных, требуемых при разработке новых слоистых структур в современных устройствах микро- и нанoeлектроники. Принимая во внимание все вышеприведенные факты, можно утверждать, что исследования Co/Gd/Co систем является актуальным и важным как с фундаментальной, так и практической точки зрения.

Цель данной работы — исследование зависимости магнитных свойств и магнитополового поведения тонкопленочных трехслойных систем Co/Gd/Co от температуры в диапазоне от 100 до 300 К.

1. ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Изучаемые образцы

Изучаемые в данной работе трехслойные Co/Gd/Co 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, $H_{\text{подл}} = 250$ Э, что способствовало формированию одноосной магнитной анизотропии. Толщина Co слоя, t_{Co} , во всех трехслойных Co/Gd/Co образцах была рав-

на 5.0 нм, а слоев Gd, t_{Gd} — 3.0, 4.6, 6.0, 7.0 и 9.0 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, общая толщина образцов была оценена с помощью атомной силовой микроскопии (АСМ). Разница значений толщины, полученных обеими методиками, не превышала 5%. Все образцы, вырезанные из исходной пленки для измерений на вибрационном магнитометре, имели квадратную форму с линейными параметрами не превышающими значений 5 мм × 5 мм.

Методика эксперимента

Объемные магнитные характеристики Co/Gd/Co трехслойных образцов были измерены на вибрационном магнитометре «Lake Shore VSM 7400» с чувствительностью 10^{-5} Гс × см³. Внешнее перемагничивающее магнитное поле прикладывалось параллельно плоскости образца. Методы измерений магнитных характеристик изучаемых образцов на вибрационном магнитометре подробно описаны в работе [10]. Установка позволяет проводить измерения намагниченности в широком диапазоне температур с использованием различных температурных приставок. Для проведения низкотемпературных измерений используется продувочной криостат. Принцип действия приставки основан на продуве хладагента через объем, в котором находится исследуемый образец. В данной работе в качестве хладагента использовались пары жидкого азота. Измерения петель гистерезиса были выполнены в температурном диапазоне от 100 до 300 К. Стабильность температуры при выполнении измерений выбиралась в программе в интервале 0.1–1.0 К и определялась из соотношения - необходимая точность/длительность измерений. Исследуемый образец крепился на шток из стекловолокна («fiberglass») при помощи медицинского клея. Этот способ вносит крайне малый вклад диамагнитного сигнала в суммарный магнитный момент и позволяет работать в диапазоне температур от 4.2 К до 450 К [11].

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты ранее проведенных рентгеноструктурных исследований свидетельствовали о том, что слои кобальта во всех образцах имеют нанокристаллическую структуру. Кроме того, исследования, проведенные с помощью атомного силового микроскопа (АСМ), показали, что средняя шероховатость поверхности, R_a , изучаемых трехслойных систем не превышает 0.5 нм [12]. Это 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 образ-

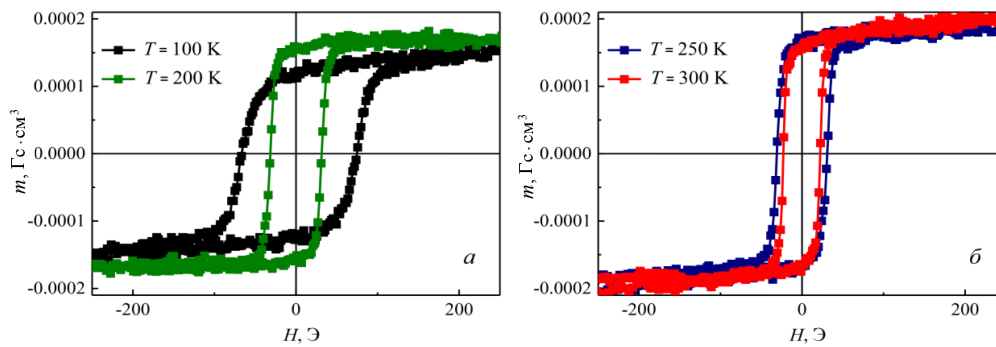


Рис. 1: Петли гистерезиса, измеренные в магнитном поле, параллельном оси легкого намагничивания, для образца с $t_{\text{Gd}} = 3.0$ нм при $T = 100$ К и 200 К (а) и $T = 250$ К и 300 К (б)

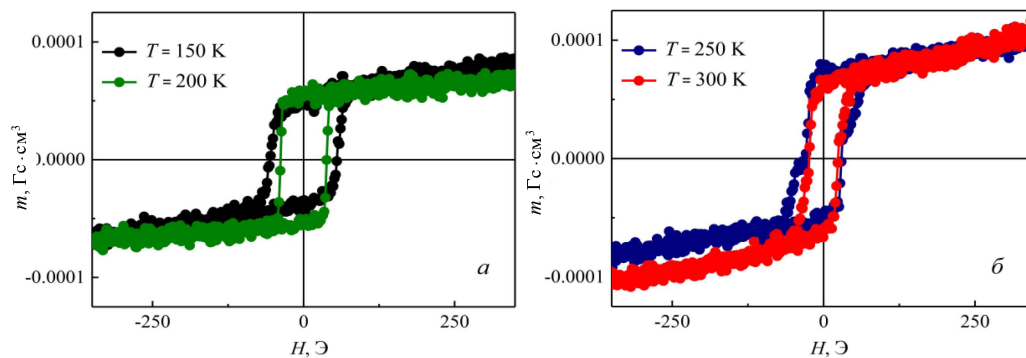


Рис. 2: Петли гистерезиса, измеренные в магнитном поле, параллельном оси легкого намагничивания, для образца с $t_{\text{Gd}} = 4.6$ нм при $T = 150$ К и 200 К (а) и $T = 250$ К и 300 К (б)

цов, а, следовательно, шероховатость поверхности не должна существенно влиять на магнитные характеристики Co/Gd/Co тонкопленочных систем.

Петли гистерезиса для изучаемых образцов были измерены на вибрационном магнитометре в температурном диапазоне от 100 до 300 К. Ранее нами было обнаружено, что аналогичные измерения при комнатной температуре в магнитном поле, ориентированном в двух взаимно-перпендикулярных направлениях в плоскости образца, различаются [12]. Этот факт свидетельствовал о наличии наведенной магнитной анизотропии (МА) с осью легкого намагничивания (ОЛН), параллельной направлению магнитного поля, приложенного в процессе изготовления образцов. Согласно существующим данным [13], основным механизмом, обуславливающим наведенную МА, является парное упорядочение атомов. Кроме того, ранее было обнаружено, что форма петель гистерезиса, наблюдаемая в магнитном поле, приложенном параллельно ОЛН, зависит от t_{Gd} [12]. Учитывая этот факт, измерения петель гистерезиса были выполнены в магнитном поле, приложенном параллельно ОЛН, в температурном диапазоне от 100 до 300 К.

Ниже на рисунках 1–4 приведены результаты измерений петель гистерезиса, наблюдаемые для изучаемых Co/Gd/Co образцов с различной толщиной Gd-

слоя при указанных на рисунках температурах.

Анализ полученных данных показал следующее. Образцы перемагничиваются как единое целое. При этом на петлях гистерезиса отсутствуют характерные изломы, сопровождающие возникновение неколлинеарной фазы. Магнитополевое поведение образцов зависит от температуры.

Измеренные петли гистерезиса позволяют определить значения объемных магнитных характеристик изучаемых тонкопленочных систем, в частности, коэрцитивной силы, H_C , и магнитного момента, m , при $H = 0$ и поля насыщения, H_S .

В случае образца с $t_{\text{Gd}} = 3.0$ нм (рис. 1) в интервале температур от 100 до 300 К при $T = 100$ К наблюдается наклонная петля гистерезиса, а при 200, 250 и 300 К — практически прямоугольные петли. Значения H_C при $T = 100, 200, 250$ и 300 К соответственно равны 70, 32, 31, 22 Э, то есть при увеличении температуры значения H_C уменьшаются. При этом значения m при выше указанных температурах увеличиваются и соответственно равны $123, 155, 167, 170 \times 10^{-6}$ Гс·см³.

Для образца с $t_{\text{Gd}} = 4.6$ нм (рис. 2) в интервале температур от 150 до 300 К форма петель гистерезиса подобна закритической. Значения H_C при $T = 150, 200, 250$ и 300 К уменьшаются с увеличением температуры и соответственно равны 55, 38, 29, 24 Э, а значения m

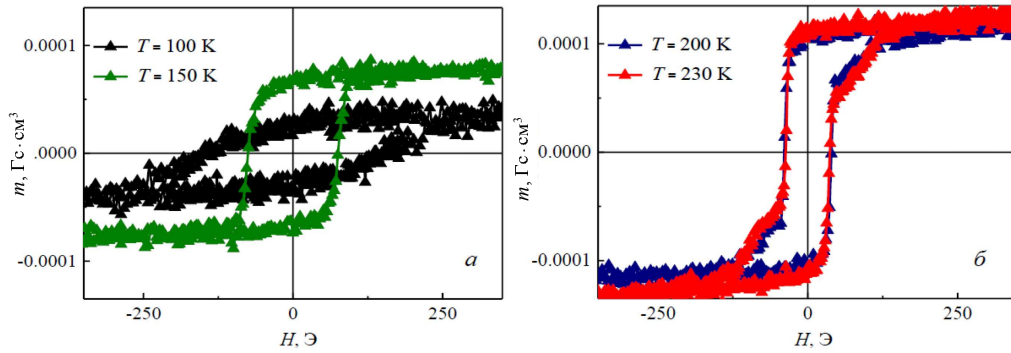


Рис. 3: Петли гистерезиса, измеренные в магнитном поле, параллельном оси легкого намагничивания, для образца с $t_{Gd} = 6.0$ нм при $T = 100$ К и 150 К (а) и $T = 200$ К и 230 К (б)

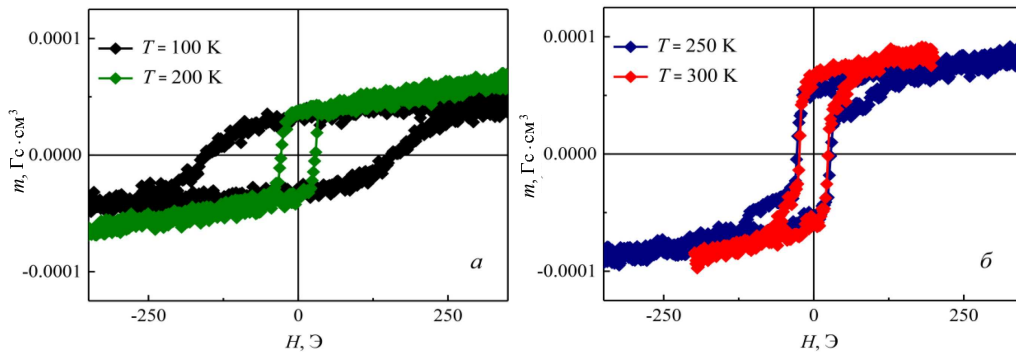


Рис. 4: Петли гистерезиса, измеренные в магнитном поле, параллельном оси легкого намагничивания, для образца с $t_{Gd} = 9.0$ нм при $T = 100$ К и 200 К (а) и $T = 250$ К и 300 К (б)

увеличиваются и равны $43, 54, 62, 63 \times 10^{-6} \text{ Гс} \times \text{см}^3$.

В случае образца с $t_{Gd} = 6.0$ нм (рис. 3) в интервале температур от 100 до 230 К наблюдаются как почти прямоугольные, так и более сложные петли гистерезиса. Значения H_C при $T = 100, 150, 200$ и 230 К соответственно равны $180, 75, 40, 37$ Э, то есть с увеличением температуры значения H_C уменьшаются, а значения m также увеличиваются и соответственно равны $28, 67, 106, 110 \times 10^{-6} \text{ Гс} \times \text{см}^3$.

Для образца с $t_{Gd} = 9$ нм (рис. 4) при $T = 100, 200, 250$ и 300 К наблюдаются наклонные петли гистерезиса. При этом значения H_C при $T = 100, 200, 250$ и 300 К соответственно равны $155, 29, 28, 24$ Э. Значения m также увеличиваются и соответственно равны $33, 36, 55, 63 \times 10^{-6} \text{ Гс} \times \text{см}^3$.

В целом, анализ полученных данных показал следующее. Для всех изучаемых образцов значения магнитного момента m с ростом температуры от 100 до 300 К увеличиваются. Вместе с тем, при увеличении толщины гадолиниевого слоя больше 3.0 нм значения m уменьшаются. Однако характер уменьшения m не является монотонным. В частности, m для образца с $t_{Gd} = 6.0$ нм больше, чем для образца с $t_{Gd} = 4.6$ нм. Это можно объяснить осциллирующей зависимостью магнитных характеристик, в частности, поля насыщения, от толщины слоя гадолиния при комнатной темпе-

ратуре, обнаруженной нами ранее [12]. Максимальные значения H_S наблюдались при $t_{Gd} = 3.0, 6.0$ и 9.0 нм.

Измерение петель гистерезиса позволили также получить зависимости $H_C(T)$ и $H_S(T)$ для образцов с различной толщиной гадолиния t_{Gd} . Было найдено, что характер зависимости $H_S(T)$ практически совпадает с зависимостью $H_C(T)$. В связи с этим на рис. 5 приведена для информации только зависимость коэрцитивной силы от температуры.

Анализ приведенных на рис. 5 данных показал следующее. Для всех изучаемых образцов с увеличением температуры от 100 до 300 К наблюдается уменьшение значений H_C . Обнаруженный характер изменения коэрцитивной силы в исследованном интервале температур подобен наблюдаемым в работах Fe/Gd [14] и Co/Gd [15]. Согласно существующим данным [14, 15] обнаруженная зависимость $H_C(T)$ свидетельствует о ферромагнитном характере трехслойной системы, обусловленном значительным изменением суммарного магнитного момента при вариации температуры [15].

Была обнаружена точка магнитной компенсации при $T = 150$ К для образца с $t_{Gd} = 9.0$ нм. При этой температуре наблюдается резкий рост значений H_C (рис. 5) и минимальное значение магнитного момента, $m = 5 \times 10^{-6} \text{ Гс} \times \text{см}^3$. Следует отметить, что для образцов с толщиной слоя Gd $3.0, 4.6$ и 6.0 нм в темпе-

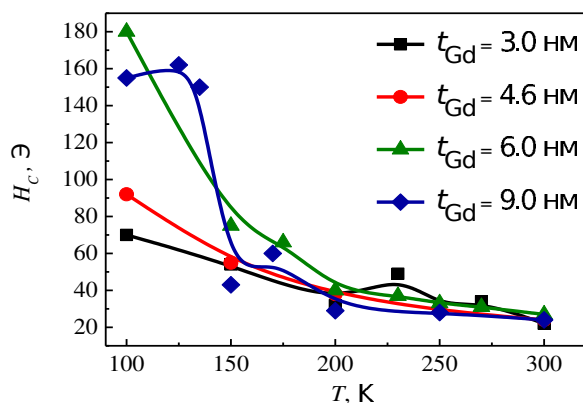


Рис. 5: Зависимость коэрцитивной силы H_C от температуры, наблюдаемая для образцов с различной толщиной Gd-слоя в магнитном поле, параллельном ОЛН

ратурном диапазоне от 100 до 300 К состояние магнитной компенсации отсутствует. Обнаруженный экспериментальный факт обусловлен уменьшением толщины слоя Gd. Предварительно полученные экспериментальные данные позволяют предположить, что точка магнитной компенсации для данных образцов лежит ниже 100 К.

В заключении необходимо отметить следующий важный результат. Известно, что согласно существующим данным [16], изменение значений магнитного момента кобальта при увеличении температуры в диапазоне от 100 до 300 К не превышает 10%. Это факт означает, что обнаруженное экспериментально уменьшение магнитного момента Co/Gd/Co изучаемых образцов с ростом толщины гадолиния определяется его вкладом в суммарный магнитный момент образцов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено экспериментальное исследование зависимости магнитных свойств и магнитополевого

поведения низкоразмерных тонкопленочных систем Co/Gd/Co, состоящих из двух одинаковых по толщине кобальтовых слоев и редкоземельной гадолиниевой прослойки разной толщины, от температуры в диапазоне от 100 до 300 К. Были получены следующие результаты. Магнитополевое поведение образцов зависит от температуры. Для всех изучаемых тонкопленочных систем наблюдается увеличение значений магнитного момента, m , при увеличении температуры от 100 до 300 К, а также уменьшение значений m с ростом толщины слоя Gd. Этот факт объяснен влиянием Gd на суммарный магнитный момент образцов. Значения коэрцитивной силы, H_C , уменьшаются с увеличением температуры от 100 до 300 К. Изменение H_C в исследованном интервале температур свидетельствует о ферромагнитном характере трехслойной системы. Температура $T = 150$ К для образца с $t_{Gd} = 9.0$ нм является точкой магнитной компенсации. В температурном диапазоне от 100 до 300 К для образцов с толщиной слоя Gd 3.0, 4.6 и 6.0 нм состояние магнитной компенсации отсутствует, что обусловлено уменьшением толщины слоя Gd.

Результаты проведенных исследований могут быть востребованы при разработке новых тонкопленочных систем на основе переходных и редкоземельных металлов для практических применений в современных устройствах микро- и нанoeлектроники, а также спинтроники.

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 из государственного бюджета, раздел 0110 (для тем по госзаданию) в рамках НИР «Фундаментальные проблемы физики магнитных наносистем».

- [1] Morishita T., Togami Y., Tsushima K. // J. Phys. Soc. Jpn. 1985. **54**, N 1. P. 37
- [2] Pelka J. B., Paszkowicz W., Wawro A., Baczewski L. T., Seeck O. // J. of Alloys and Compounds. 2001. **328**, N 1-2. P. 253.
- [3] Shalyguina E. E., Bekoeva L. M., Tsidaeva N. I. // Sensors&Actuators: A Physical. 2000. **81**, N 1-3. P. 216.
- [4] Шалыгина Е. Е., Козловский Л. В., Корендяев А. А. // Письма в ЖТФ. 1994. **20**. С. 42.
- [5] Baczewski L. T., Piecuch M., Durand J., Marchal G., Delecroix P. // Phys. Rev. B. 1989. **40**, N 16. P. 11237.
- [6] Никитин С. А. Магнитные свойства редкоземельных металлов и их сплавов. М.: Изд-во МГУ, 1989.
- [7] Воробьев С. И., Шутылева О. В., Пазуха И. М., Черноус А. Н. // ЖТФ. 2014. **84**, № 11. С. 66.
- [8] Tishin A. M., Spichkin Y. I. // Bristol.: Institute of Physics. 2003. P. 1
- [9] Miller C. W., Williams D. V., Bingham N. S., Srikanth H. // J. Appl. Phys. 2010. **107**, N 9. P. 09A903-1.
- [10] 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.
- [11] Родионов И. Д. Магнитные, магнитокалорические и магнитотранспортные свойства сплавов на основе Ni-Mn-In. 2019.
- [12] Харламова А. М., Свалов А. В., Лепаловский В. Н., Шалыгина Е. Е. // ФТТ. 2019. **61**, № 3. С. 460.
- [13] Chikazumi S. Physics of Magnetism. 2001.
- [14] Demirtas S., Koumen A. R. // J. Appl. Phys. 2004. **95**, N 9. P. 4949.

- [15] Chizhik A. B., Gnatchenko S. L., Merenkov D. N., Baczewski L. T., Wawro A., Szymczak H., Camari-Seale H. // J. Appl. Phys. 1998. **84**, N 9. P. 5105.
- [16] Bloemen P. J. H., de Jonge W. J. M., den Broeder F. J. A. // J. Magn. Magn. Mater. 1991. **93**. P. 105.

Temperature dependence of magnetic properties and magnetic-field behavior of three-layer thin-film Co/Gd/Co systems

A. M. Kharlamova^{1,a}, A. V. Makarov¹, E. E. Shalygina¹, A. V. Svalov²

¹Department of Magnetism, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University
Moscow 119991, Russia

²Ural Federal University. Ekaterinburg, 620002, Russia
E-mail: ^aanna-h-m@mail.ru

The results of the investigation of the dependence of the magnetic properties and magnetic-field behavior of thin-film three-layer Co/Gd/Co systems on temperature in the range from 100 to 300 K are presented. The samples were obtained by ion-plasma magnetron sputtering. The thickness of the Co layers is 5.0 nm, and Gd layers, t_{Gd} , varied from 3.0 to 9.0 nm. The volume magnetic characteristics were studied using a vibrating sample magnetometer with the field oriented parallel to the plane of the samples. It is found the temperature influence on the magnetic characteristics and magnetic field behavior of the samples. In particular, the shape of the hysteresis loops depends on the thickness of the Gd layer and the temperature. The dependences of the magnetic moment and coercive force on temperature are found. As the temperature changes from 100 to 300 K, an increase in the values of the magnetic moment of the samples is observed, as well as a decrease with an increase in t_{Gd} . It is discovered that the values of the coercive force decrease with an increase in temperature from 100 to 300 K. It is found that the magnetic compensation point for a sample with $t_{\text{Gd}} = 9$ nm is $T = 150$ K.

PACS: 75.70.-i; 75.75.+a

Keywords: low temperature measurements, magnetic properties, magnetic field behavior, magnetization reversal processes, rare-earth metals, thin-film structures.

Received 30 September 2020.

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. Макаров Андрей Владимирович — аспирант; e-mail: andrey6257@gmail.com.
3. Шалыгина Елена Евгеньевна — доктор физ.-мат. наук, профессор, гл. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-24-35, e-mail: shal@magn.ru.
4. Свалов Андрей Владимирович — доктор физ.-мат. наук., ст. науч. сотрудник; тел.: (343) 389-97-06; e-mail: andrey.svalov@urfu.ru.