

## Магнитооптические свойства трехслойных тонкопленочных систем на основе кобальта с промежуточным слоем гадолиния

А. В. Макаров,\* Е. Е. Шалыгина, Е. А. Ганьшина

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

(Статья поступила 30.09.2020; подписана в печать 17.11.2020)

В работе представлены результаты исследования магнитооптических свойств тонкопленочных Co/Gd/Co систем, полученных методом ионно-плазменного магнетронного распыления. Толщина слоев кобальта во всех образцах была равна 5.0 нм, а слоя гадолиния изменялась от 0.1 до 9.0 нм. Обнаружено, что вид спектральных зависимостей экваториального эффекта Керра изучаемых образцов практически идентичен и подобен магнитооптическим спектрам, наблюдаемым для пленок кобальта. Вместе с тем величина магнитооптического эффекта зависит от толщины слоя Gd. В частности, она уменьшается при увеличении толщины слоя Gd. Этот факт объяснен уменьшением вклада слоя кобальта в магнитооптический сигнал с ростом толщины слоя Gd.

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

Ключевые слова: магнитооптические свойства, магнитооптический эффект, редкоземельные металлы, тонкопленочные структуры.

### ВВЕДЕНИЕ

Тонкопленочные многослойные системы, состоящие из чередующихся слоев ферромагнитных  $3d$ -переходных металлов и  $4f$ -редкоземельных металлов (РЗМ/ПМ), представляют большой интерес для физики магнитных явлений благодаря их уникальным свойствам. Важнейшей особенностью указанных выше систем, предопределяющей специфику их магнитополевого поведения, является сильное антиферромагнитное обменное взаимодействие на границах слоев между различными металлами [1, 2]. Это обуславливает эффекты, характерные для ферримагнетиков, в частности, компенсацию магнитного момента при определенной температуре [3, 4], спин-флоп переход при высоких полях [5, 6], а также наблюдение явлений, характерных исключительно для многослойных систем. Примерами таких эффектов являются неоднородное намагничивание слоя редкоземельного металла [7, 8] и фазовые переходы в приповерхностных слоях [9, 10]. Кроме того, следует отметить, что чувствительность магнитных свойств РЗМ/ПМ к условиям получения, в частности, к морфологии системы [4, 11], количеству и толщине слоев [12, 13] позволяет создавать системы с заранее заданными характеристиками. Изучение этих систем востребовано с практической точки зрения, поскольку вышеуказанные свойства могут быть полезны при разработке устройств наноэлектроники, например, сенсоров магнитного поля или устройств для магнитооптической записи [14, 15].

В качестве редкоземельного металла в многослойных системах РЗМ/ПМ наиболее часто используется гадолиний (Gd). В случае объемных образцов он обладает высокой температурой Кюри, рав-

ной 293 К, которая в тонких пленках может снижаться [16, 17], а также большим магнитным моментом, равным  $7.5 \mu_B$ /атом. Это позволяет изучать свойства систем на основе Gd вблизи комнатной температуры. Заслуживающей внимания особенностью Gd является также нулевой орбитальный момент. Благодаря этому его взаимодействие с внутрискристаллическим полем и, соответственно, анизотропия имеют достаточно малые значения. Кроме того, как показали некоторые исследования, в пленках ПМ/Gd отсутствует перпендикулярная магнитная анизотропия [18].

К настоящему времени накоплен большой объем информации о свойствах многослойных систем. Однако интерес к их изучению не ослабевает. В основном это обусловлено недостаточно полным изучением магнитооптических свойств этих образцов. Анализ существующих данных показал, что большая часть выполненных экспериментальных работ посвящена исследованиям тонкопленочных систем с количеством слоев больше 5, что затрудняло интерпретацию полученных данных. Вместе с тем системы с малым количеством слоев могут способствовать получению более подробной информации о магнитных характеристиках таких образцов. Учитывая этот факт, в данной работе изучались трехслойные Co/Gd/Co образцы. Все измерения были выполнены при комнатной температуре. Следует указать, несмотря на то, что промежуточный слой Gd является парамагнетиком, между Co и Gd сохраняется антиферромагнитное обменное взаимодействие порядка  $-1.7 \times 10^{-15}$  эрг [19], которое влияет на слой гадолиния вблизи границы раздела толщиной примерно 0.45 нм, значительно увеличивая его температуру Кюри по сравнению с внутренней областью слоя [20]. Поскольку магнитооптическая спектроскопия эффективна для изучения электронной и магнитной структуры однородных и неоднородных ферромагнитных материалов [21, 22], то с ее помощью можно установить, каким образом слой гадолиния различной толщины влияет на

\*E-mail: andrey6257@gmail.com

свойства трехслойных Co/Gd/Co образцов. Следует отметить, что магнитные характеристики Co/Gd/Co систем были исследованы ранее в нашей лаборатории и опубликованы [23].

Цель данной работы — изучение магнитооптических свойств тонкопленочных трехслойных систем Co/Gd/Co с фиксированной толщиной слоев кобальта и различной толщиной Gd, полученных методом ионно-плазменного напыления при комнатной температуре.

## 1. ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

### 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  $4.0 \times 10^{-7}$  мбар. Давление аргона в процессе напыления пленки достигало  $3.8 \times 10^{-3}$  мбар. Изготовление образцов размером  $8 \times 10$  мм осуществлялось при наличии магнитного поля,  $H_{\text{подл}} = 250$  Э, приложенного параллельно плоскости подложки и параллельно длинной стороне образца, что способствовало формированию одноосной магнитной анизотропии. Толщина Co слоя,  $t_{\text{Co}}$ , во всех трехслойных Co/Gd/Co образцах была равна 5.0 нм, а слоев Gd — 0.1 нм, 1 нм, 3 нм, 4.6 нм, 6 нм и 9 нм. Толщина слоев была определена по скорости напыления (равной для Ta, Co и Gd, соответственно 11.0, 2.6, и 2.8 нм/мин) и времени напыления для каждого материала. Кроме того, общая толщина образцов была оценена с помощью атомной силовой микроскопии (АСМ). Разница значений толщины слоев, полученных обеими методиками, не превышала 5 %.

### Методика эксперимента

Магнитооптические свойства описанных выше образцов изучались путем измерения спектральных зависимостей экваториального эффекта Керра (ЭЭК) при комнатной температуре в диапазоне энергий квантов падающего света 0.5–4.2 эВ. Магнитное поле  $\mathbf{H}$  было приложено параллельно в плоскости тонкопленочных систем и параллельно их длинной стороне. Значение  $\mathbf{H}$  превышало поле насыщения,  $H_s$ , образцов. Измерения ЭЭК осуществлялись с помощью квазидинамического метода регистрации магнитооптических сигналов. В этом случае образец перемагничивается переменным

магнитным полем низкой частоты, что обуславливало модуляцию значения ЭЭК. Это позволяет использовать методику синхронного детектирования магнитооптических сигналов и существенно повышает чувствительность установки.

Суть методики заключалась в следующем. Свет, источником которого является галогеновая лампа, проходит через двойной монохроматор ДМР-4, на котором с помощью барабана устанавливается длина волны проходящего света. Барабан монохроматора соединен с многооборотным потенциометром, сопротивление которого изменяется при его вращении. При этом каждому положению барабана соответствует определенное значение сопротивления потенциометра, что позволяет путем измерения сопротивления потенциометра определить длину волны света. После монохроматора свет проходит через поляризатор (призму Глана). Исследуемый образец перемагничивается с помощью электромагнита переменным магнитным полем, приложенным перпендикулярно плоскости падения света и параллельно отражающей поверхности образца. Частота переменного тока в электромагните задается генератором звуковой частоты ГЗ-48 через усилитель мощности 100У-101. Перемагничивание образца обуславливает модуляцию интенсивности отраженного света с той же частотой, с которой изменяется магнитное поле (30 Гц). Интенсивность поляризованного света, отраженного от образца, фиксируется с помощью фотоприемника, в качестве которого используется фотоэлектронный умножитель ФЭУ со спектральной областью чувствительности в интервале 1.5–4.5 эВ. Для увеличения чувствительности экспериментальной установки в области энергий падающего света 0.5–1.7 эВ в качестве фотоприемника используется фотосопротивление PbS. При измерениях с помощью PbS пучок света модулируется механическим прерывателем с частотой 30 Гц. Регистрация интенсивности отраженного света проводится с использованием усилителя УПИ-2, опорный сигнал на который подается с фотодиода, расположенного перед входной щелью монохроматора. Питание лампы осуществляется от двух последовательно соединенных стабилизированных выпрямителей ТЭС, а ФЭУ и PbS — от источника постоянного тока Б5-24 и Б5-49 соответственно.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Спектральные зависимости экваториального эффекта Керра были измерены для трехслойных тонкопленочных систем Co/Gd/Co с толщиной Co слоя, равной 5 нм, а Gd — 0.1 нм, 1 нм, 3 нм, 4.6 нм, 6 нм и 9 нм. Выбор указанных толщин был обусловлен особенностями зависимости поля насыщения изучаемых образцов от толщины Gd-слоя. В частности, при толщинах  $t_{\text{Gd}} = 3$  нм, 6 нм и 9 нм поле насыщения имеет максимальные значения, а при  $t_{\text{Gd}} = 1$  нм и 4.6 нм — минимальные [23].

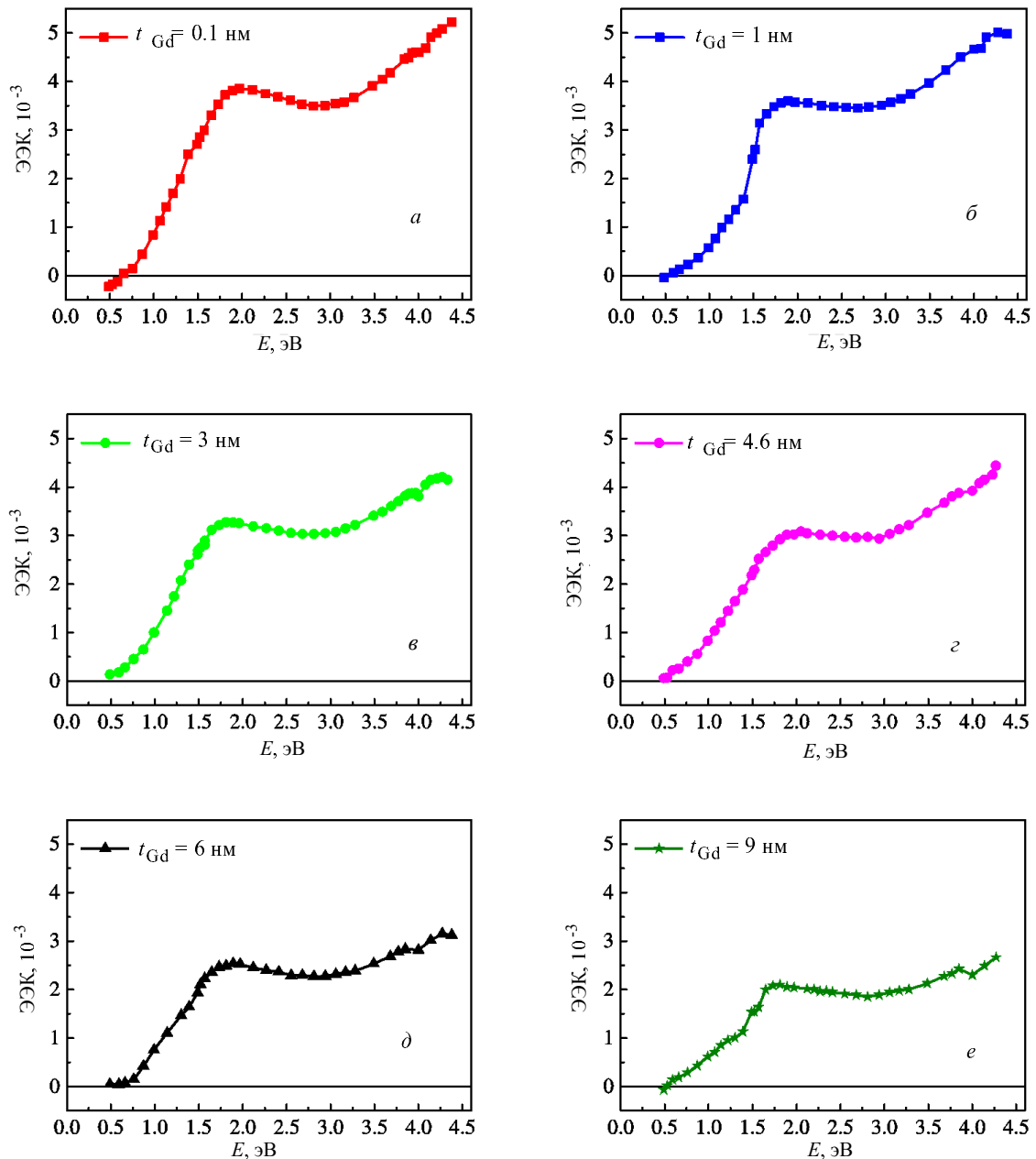


Рис. 1: Спектральные зависимости ЭЖ Co/Gd/Co для образцов с различной толщиной слоя Gd (a–e)

Следует отметить, что образец с толщиной гадолиния, равной 0.1 нм, был изготовлен и включен в систему изучаемых образцов из-за предполагаемого наличия в нем островковой структуры. Согласно существующим данным [24, 25], процесс роста пленок происходит следующим образом. На начальном этапе пленка формируется в виде островков, и ее реальная толщина может превышать номинальную толщину слоя. Затем размер островков увеличивается, и пленка становится сплошной. Толщина, при которой происходит образование сплошного слоя Gd, зависит от условий получения образцов. В [24] было найдено, что эта толщина поряд-

ка 1–2 нм. Эти данные были подтверждены результатами измерений магнитных характеристик, таких как температура Кюри [25, 26] и форма петли гистерезиса [25]. Таким образом, изложенное выше, позволяет утверждать, что слой гадолиния толщиной 0.1 нм имеет островковую структуру.

Остановимся на результатах измерений ЭЖ, полученных для изучаемых трехслойных тонкопленочных Co/Gd/Co образцов. Спектральные зависимости ЭЖ для каждого Co/Gd/Co образца приведены на рис. 1.

На рис. 2 для сравнения приведены спектральные зависимости ЭЖ, наблюдаемые для Co/Gd/Co образцов

с различной толщиной слоя Gd.

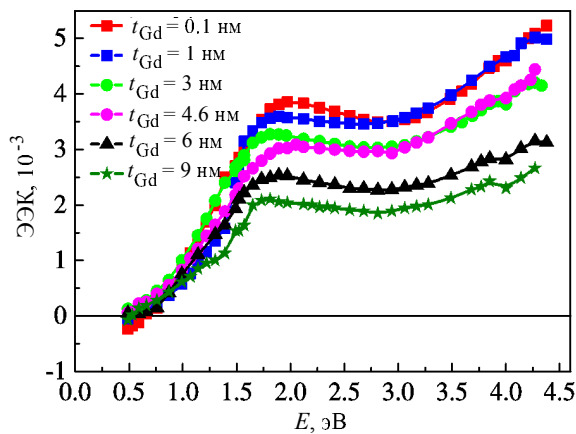


Рис. 2: Сравнение спектральных зависимостей ЭЭК Co/Gd/Co для образцов с различной толщиной слоя Gd

Анализ данных, приведенных на рис. 2, показал следующее. Значения ЭЭК для образцов с толщиной Gd слоя, равной 0.1 нм и 1 нм, практически одинаковые. Учитывая выше приведенные данные, можно утверждать, что слой гадолиния толщиной 1 нм имеет также островковую структуру.

Максимальные и минимальные значения ЭЭК для всех образцов наблюдаются соответственно при энергии квантов падающего света 1.9 и 2.8 эВ. Эти данные согласуются с результатами магнитооптических исследований, выполненных в работах [27, 28].

Кроме того, с ростом толщины гадолиниевого слоя значения ЭЭК уменьшаются. Для наглядности на рис. 3 приведены зависимости ЭЭК, наблюдаемые при фиксированных значениях энергии падающего света, в частности, при  $E = 1.9$  эВ и  $E = 2.8$  эВ, при которых наблюдаются соответственно первый максимум и минимум на зависимостях ЭЭК( $E$ ) (рис.2).

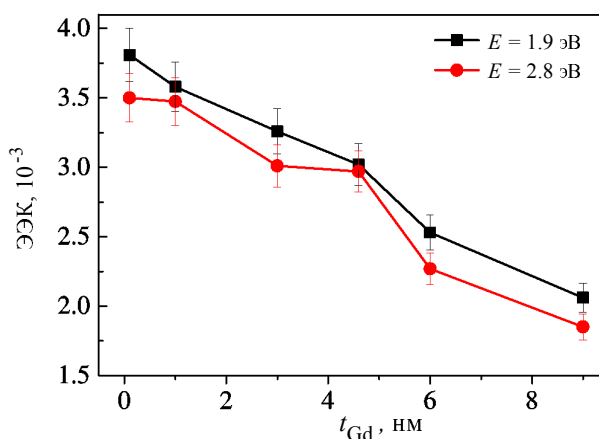


Рис. 3: Зависимости значений ЭЭК от толщины Gd-слоя

Наблюдаемое уменьшение ЭЭК с ростом толщины

Gd-слоя можно объяснить, если принять во внимание результаты исследований тонкопленочных систем, опубликованные в работе [29]. Экспериментально было доказано, что ЭЭК увеличивается линейно с ростом толщины магнитной пленки,  $t_M$ , если значение  $t_M$  меньше глубины формирования магнитооптического сигнала ( $t_{инф} = \lambda/8n$ ,  $n$  — показатель преломления света в среде), соответствующей толщине приповерхностного слоя образца, определяющей величину магнитооптического сигнала. Было найдено, что в области энергии квантов падающего света 0.5–4.0 эВ в случае кобальта  $t_{инф}$  порядка 20–24 нм. В изучаемых в данной работе образцах при толщине Gd-слоя порядка 1–2 нм полная толщина образца с учетом буферных слоев Ta порядка 21–22 нм, таким образом, в этом случае регистрируется практически максимальное значение магнитооптического сигнала. Вместе с тем с ростом толщины Gd-слоя вклад нижнего слоя кобальта в магнитооптический сигнал уменьшается. Это сопровождается уменьшением величины ЭЭК. Полученные данные согласуются с результатами магнитооптических исследований магнитных пленок (в частности, пленок кобальта различной толщины), опубликованных в работах [27, 30, 31].

Следует также отметить, что выполненные в рамках данной работы исследования свидетельствовали о том, что магнитооптические спектры трехслойных Co/Gd/Co систем и изучаемых в работе [31] пленок кобальта подобны. В частности, первый максимум на спектральной зависимости ЭЭК для пленок кобальта наблюдается при энергии падающего света, равной 1.7 эВ, а для образцов Co/Gd/Co — 1.9 эВ. При этом положения минимума наблюдаются для пленок кобальта и Co/Gd/Co систем соответственно при 3.0 и 2.8 эВ. Эти данные свидетельствуют о том, что слой гадолиния практически не влияет на вид магнитооптических спектров Co/Gd/Co образцов, наблюдаемых при комнатной температуре.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования спектральных зависимостей экваториального эффекта Керра для трехслойных тонкопленочных систем Co/Gd/Co с толщиной слоев кобальта 5 нм, а гадолиния — 0.1 нм, 1 нм, 3 нм, 4.6 нм, 6 нм и 9 нм, показали, что максимальные и минимальные значения ЭЭК для всех изучаемых образцов наблюдаются соответственно при энергии квантов падающего света 1.9 и 2.8 эВ.

С ростом толщины гадолиниевого слоя значения ЭЭК уменьшаются. Этот результат был объяснен влиянием глубины формирования магнитооптического сигнала,  $t_{инф}$ , на измеряемый магнитооптический сигнал. Именно благодаря этому значение магнитооптического сигнала при малой толщине гадолиния (0.1, 1 нм) определяется вкладом обоих слоев кобальта и значения ЭЭК для образцов с  $t_{Gd} = 0.1$  и 1 нм практически сов-

падают. С ростом толщины гадолиния вклад нижнего слоя кобальта падает, а значение ЭЭЖ уменьшается

Обнаружено, что магнитооптические спектры трехслойных Co/Gd/Co систем и пленок кобальта подобны. Это позволяет утверждать, что слой гадолиния практически не влияет на вид магнитооптических спектров Co/Gd/Co образцов.

Авторы выражают благодарность сотрудникам отдела магнетизма твердых тел НИИ ФМП Уральского Фе-

дерального Университета доктору физ.-мат. наук, ст. науч. сотруднику Свалову А. В. и канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотруднику Лепаловскому В. Н. за получение тонкопленочных образцов и полезные консультации.

Работа выполнена при финансовой поддержке из госбюджета, раздел 0110 (для тем по госзаданию) в рамках НИР «Фундаментальные проблемы физики магнитных наносистем».

- [1] *Taborelli M., Allenspach R., Boffa G., Landolt M.* // Phys. Rev. Lett. 1986. **56**. N 26. P. 2869.
- [2] *Anilturk O. S., Koymen A. R.* // Phys. Rev. B. 2003. **68**. N 2. P. 022430-1.
- [3] *Choi Y., Haskel D., Cady A., Lang J. C., Lee D. R., Srajer G., Jiang J. S., Bader S. D.* // Phys. Rev. B. 2006. **73**. N 17. P. 174401-1.
- [4] *Basha M. A., Prajapat C. L., Gupta M., Bhatt H., Kumar Y., Ghosh S. K., Karki V., Basu S., Singh S.* // Phys. Chem. Chem. Phys. 2018. **20**. N 33. P. 21580.
- [5] *Baczewski L. T., Kalinowski R., Wawro A.* // J. Magn. Magn. Mater. 1998. **177**. P. 1305.
- [6] *Takanashi K., Kamiguchi Y., Fujimori H., Motokawa M.* // J. Phys. Soc. Jpn. 1992. **61**. N 10. P. 3721.
- [7] *Hosoi N., Hashizume H., Ishimatsu N.* // J. Phys. Soc. Jpn. 2002. **14**. N 21. P. 5289.
- [8] *Kravtsov E., Haskel D., te Velthuis S. G. E., Jiang J. S., Kirby B. J.* // Phys. Rev. B. 2009. **79**. N 13. P. 134438-1.
- [9] *Gnatchenko S. L., Chizhik A. B., Merenkov D. N., Eretenko V. V., Szymczak H., Szymczak R., Fronc K., Zuberek R.* // J. Magn. Magn. Mater. 1998. **186**. N 1-2. P. 139.
- [10] *Haskel D., Choi Y., Lee D. R., Lang J. C., Srajer G., Jiang J. S., Bader S. D.* // J. Appl. Phys. 2003. **93**. N 10. P. 6507.
- [11] *Vorobiov S., Lytvynenko I., Hauet T., Hehn M., Derecha D., Chornous A.* // Vacuum. 2015. **120**. P. 9.
- [12] *Morishita T., Togami Y., Tsushima K.* // J. Phys. Soc. Jpn. 1985. **54**. N 1. P. 37.
- [13] *Andrés J. P., Chiko L., Colino J., Riveiro J. M.* // Phys. Rev. B. 2002. **66**. N 9. P. 094424-1.
- [14] *Mangin S., Gottwald M., Lambert C.-H., Steil D., Uhler V., Pang L., Hehn M., Alebrand S., Cinchetti M., Malinowski G.* et al. // Nature Mater. 2014. **13**. N 3. P. 286.
- [15] *Xu C., Ostler T. A., Chantrell R. W.* // Phys. Rev. B. 2016. **93**. N 5. P. 054302-1.
- [16] *Heys A., Donovan P. E.* // J. Magn. Magn. Mater. 1993. **126**. N 1-3. P. 326.
- [17] *Jiang J. S., Chien C. L.* // J. Appl. Phys. 1996. **79**. N 8. P. 5615.
- [18] *Mibu K., Shinjo T.* // Hyperfine interactions. 1998. **113**. N 1-4. P. 287.
- [19] *Vas'kovskii V. O., Svalov A. V., Yuvochenko A. A., Kataeva E. A.* // The Physics of Metals and Metallography. 2006. **101**. N 1. P. S84.
- [20] *Lalieu M. L. M., Peeters M. J. G., Haenen S. R. R., Lavrijsen R., Koopmans B.* // Phys. Rev. B. 2017. **96**. N 22. P. 220411-1.
- [21] *Gan'shina E. A., Granovsky A. B., Orlov A. F., Perov N. S., Vshuk M. V.* // J. Magn. Magn. Mater. 2009. **321**. N 7. P. 723.
- [22] *Gan'shina E. A., Granovsky A. B., Dienu B., Kumaritova M., Yurasov A.* // Phys. B: Condens. Matter. 2001. **299**. N 3-4. P. 260.
- [23] *Харламова А. М., Свалов А. В., Лепаловский В. Н., Шальгина Е. Е.* // Физика твердого тела. 2019. **61**. N 3. С. 460.
- [24] *Васьковский В. О., Савин П. А., Лепаловский В. Н., Кандаурова Г. С., Ярмошенко, Ю. М.* // ФММ. 1995. **79**. N 3. С. 70.
- [25] *Svalov A. V., Vas'kovskiy V. O., Barandiaran J. M., Balytov K. G., Sorokin A. N., Orue I., Larranaga A., Schegoleva N. N., Kurlyandskaya G. V.* // Solid State Phenomena. 2010. **168**. P. 281.
- [26] *Farle M., Baberschke K., Stetter U., Aspelmeier A., Gerhardter F.* // Phys. Rev. B. 1993. **47**. N 17. P. 11571.
- [27] *Шальгина Е. Е., Козловский В. Л., Сяньбо Д.* // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1995. **36**. N 5. С. 51.
- [28] *Guo, G. Y., Ebert H.* // Phys. Rev. B. 1994. **50**. N 14. P. 10377-1.
- [29] *Shalyguina E. E., Shin K. H.* // J. Magn. Magn. Mater. 2000. **220**. N 2-3. P. 167.
- [30] *Shalyguina E. E., Tsidaeva N. I., Khudayakova S. V., Iskhakov R. S., Moroz J. M.* // J. Magn. Soc. Jpn. 1997. **21**. N. S2. P. 181.
- [31] *Shalygina E. E., Kharlamova A. M., Kurlyandskaya G. V., Svalov A. V.* // J. Magn. Magn. Mater. 2017. **440**. P. 136.

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

**A. V. Makarov<sup>a</sup>, E. E. Shalygina, E. A. Gan'shina**

<sup>1</sup>*Department of Magnetism, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia  
E-mail: <sup>a</sup>andrey6257@gmail.com*

The results of the investigation of the magneto-optical properties of thin-film Co/Gd/Co systems obtained by ion-plasma magnetron sputtering are presented. The thickness of the Co layers was 5.0 nm, and the Gd one varied from 0.1 to 9.0 nm. It was found that the shape of the spectral dependencies of the equatorial Kerr effect of the studied samples is almost identical and similar to the magneto-optical spectra observed for cobalt films. With that, the magnitude of the magneto-optical effect depends on the thickness of the Gd-layer. In particular, it decreases with increasing thickness of the Gd-layer. This fact is explained by a decrease in the contribution of the cobalt layer to the magneto-optical signal with rising thickness of the Gd-layer.

PACS: 75.70.-i; 75.75.+a

*Keywords:* magneto-optical properties, magneto-optical effect, rare-earth metals, thin-film structures.

*Received 30 September 2020.*

### **Сведения об авторах**

1. Макаров Андрей Владимирович — аспирант; e-mail: andrey6257@gmail.com.
2. Шалыгина Елена Евгеньевна — доктор физ.-мат. наук, профессор, гл. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-24-35, e-mail: shal@magn.ru.
3. Ганьшина Елена Александровна — доктор физ.-мат. наук, профессор, вед. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-40-43, e-mail: eagan@mail.ru.