

Влияние немагнитного слоя Zr на магнитные и магнитооптические свойства тонкопленочных систем Fe/Zr и Fe/Zr/Fe

Е. Е. Шалыгина^{1а}, Г. В. Максимова^{1б}, А. Н. Шалыгин^{1с}, Л. В. Козловский²

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра магнетизма. 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2. ²Даугавпилсский университет, физический факультет. Латвия, 5401, Даугавпилс. E-mail: ^аshal@magn.ru, ^бgalina@mail.ru, ^сshalygin@magn.ru

Магнитооптическим методом исследованы магнитные и магнитооптические свойства нанокристаллических тонкопленочных систем Fe/Zr и Fe/Zr/Fe. Обнаружено сильное влияние толщины слоя Zr, t_{Zr} , на магнитные свойства образцов Fe/Zr. Найдено, что поле насыщения систем Fe/Zr/Fe осциллирует по величине как функция t_{Zr} , что объяснено осцилляционным поведением обменного взаимодействия между ферромагнитными слоями через Zr прослойку с изменением t_{Zr} . Обнаружено, что значения экваториального эффекта Керра зависят от толщины как магнитного, так и немагнитного слоев.

PACS: 75.70.Cp; 78.20.Ls.

Ключевые слова: магнитооптические эффекты, магнитные свойства, тонкие магнитные пленки.

Статья поступила 20.02.2008, подписана в печать 26.06.2008.

Введение

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. Обусловлено это обнаружением в этих образцах в конце 1980-х — начале 1990-х гг. ряда новых явлений, таких как антиферромагнитное взаимодействие между магнитными слоями через немагнитный разделительный слой [1], гигантское магнетосопротивление [2], осцилляционное магнитное взаимодействие между ферромагнитными слоями (Fe, Co) через немагнитную прослойку (Cr, Cu, Ag, Au, Mo и т.д.) [3], квантовые размерные эффекты. Результаты уже проведенных исследований ультратонких пленок и многослойных систем позволили решить ряд проблем физики магнитных явлений. В частности, существенно расширились представления о влиянии границы раздела между магнитной пленкой и подложкой, а также между магнитными и немагнитными слоями на формирование кинетических, магнитных и магнитооптических свойств тонкопленочных магнитных структур. Исследовано влияние микроструктуры подложки (морфологии ее поверхности и ориентации кристаллографических осей зерен) на магнитные свойства тонких пленок. Однако по-прежнему заслуживающей внимания проблемой является изучение влияния толщины и состава магнитных и немагнитных слоев на магнитные и магнитооптические свойства тонкопленочных магнитных структур. Проведение этих исследований способствует решению фундаментальных задач физики магнитных явлений, в частности установлению особенностей магнитной анизотропии в указанных системах и влияния на их свойства неферромагнитной подложки или немагнитных слоев между магнитными слоями (или магнитной пленкой и подложкой). Помимо чисто научного интереса тонкопленочные магнитные структуры привлекают к себе внимание и перспективами их практического использования. В частности, они используются в качестве сред для высокоплотной магнитной записи, в том числе и магнитооптической. На их основе создаются датчики магнитных полей, превосходящие по целому ряду характеристик (особенно в области малых полей) другие датчики. Одной из разновидностей таких

датчиков являются миниатюрные, тонкопленочные магнитные головки для записи-считывания высокоплотной магнитной записи.

Цель настоящей работы состоит в магнитооптическом исследовании магнитных и магнитооптических свойств ранее не изучаемых тонкопленочных систем Fe/Zr и Fe/Zr/Fe.

Эксперимент

Исследуемые образцы Fe/Zr и Fe/Zr/Fe были получены с помощью магнетронного распыления при базовом давлении в вакуумной камере, равном 10^{-8} торр, и давлении рабочего газа (аргона) порядка 10^{-3} торр. В образцах Fe/Zr немагнитный слой Zr был напылен между железной пленкой и стеклянной подложкой. Толщина магнитного пленки t_{Fe} была равна 20 нм, а толщина немагнитного слоя t_{Zr} изменялась от 0.5 до 10 нм. В образцах Fe/Zr/Fe значение t_{Fe} было равно 2.5 нм, а t_{Zr} изменялось от 0.2 до 3.5 нм.

Микроструктура изучаемых образцов была исследована методом рентгеновской дифракции. Измерения $\theta - 2\theta$ дифрактограмм были выполнены на установке ДРОН-4 с использованием $CuK\alpha$ -излучения. Полученные данные обрабатывались с помощью специальных компьютерных программ. Наличие периодических структур (четко выраженных границ раздела) в исследуемых образцах было подтверждено данными малоуглового рентгеноструктурного анализа. Толщина слоев определялась как по скорости их напыления, так и из спектров малоугловых дифрактограмм.

Изучение магнитных и магнитооптических свойств описанных выше тонкопленочных систем было выполнено с помощью экваториального эффекта Керра (ЭЭК) на магнитооптическом магнетометре [4] и магнитооптическом спектрометре. Величина ЭЭК определялась из соотношения $\delta = (I - I_0)/I_0$, где I и I_0 — интенсивности света, отраженного от намагниченного и ненамагниченного образцов. Магнитное поле H было приложено параллельно поверхности образцов и перпендикулярно плоскости падения света. Петли гистерезиса были измерены при двух ориентациях внешнего магнитного поля H . В одном случае H было параллельно направлению магнитного поля, приложенного в процессе напыления тонкопленочных систем (обозначено как D_1), а в другом

H было перпендикулярно D_1 (обозначено как D_2). Спектральные зависимости ЭЭК были измерены при $H > H_S$ (H_S — поле насыщения исследуемого образца) в области энергии квантов падающего света, изменяющейся от 1.4 до 4.5 эВ. Угол падения света на образец был равен 65° . Все измерения были выполнены на открытом воздухе при комнатной температуре.

Результаты и обсуждение

Было обнаружено, что петли гистерезиса, измеренные в магнитном поле, ориентированном вдоль D_1 и D_2 , сильно различаются, что свидетельствовало о наличии плоскостной магнитной анизотропии в исследуемых образцах. Легкая ось намагничивания совпадала с направлением D_1 . Согласно существующим представлениям [5], причиной появления плоскостной магнитной анизотропии в изучаемых системах является внешнее магнитное поле $H \sim 70$ Э, приложенное параллельно плоскости подложки в процессе изготовления образцов. Для тонкопленочных систем Fe/Zr в поле, параллельном D_1 , наблюдаются практически прямоугольные петли гистерезиса, а в поле, параллельном D_2 , — так называемые безгистерезисные петли, характеризующиеся практически нулевыми значениями остаточной намагниченности и коэрцитивной силы. Для всех образцов Fe/Zr отношение остаточной намагниченности M_R к намагниченности насыщения M_S , равное M/M_S при $H = 0$, в поле, параллельном D_1 , было порядка 0.95–0.98. Для иллюстрации этого факта на рис. 1 представлены типичные петли гистерезиса, наблюдаемые для систем Fe/Zr. Проведенные измерения петель гистерезиса для образцов Fe/Zr позволили получить зависимости поля насыщения H_S и коэрцитивной силы H_C от толщины слоя Zr (рис. 2). Из рис. 2 можно видеть, что с ростом t_{Zr} вплоть до 4 нм значения H_S и H_C увеличиваются, а при $t_{Zr} > 4$ нм они уменьшаются. Найденные зависимости $H_S(t_{Zr})$ и $H_C(t_{Zr})$ можно объяснить, используя данные микроструктурного исследования образцов Fe/Zr. Анализ рентгеноструктурных данных показал, что тонкопленочные системы Fe/Zr имеют нанокристаллическую структуру. В измеренных рентгеновских спектрах наблюдались только линии {111}, что свидетельствовало о (111) преимущественной ориентации кристаллитов параллельно поверхности образцов. Размер кристаллитов, оцененный из ширины линий {111}, был порядка толщины магнитного слоя.

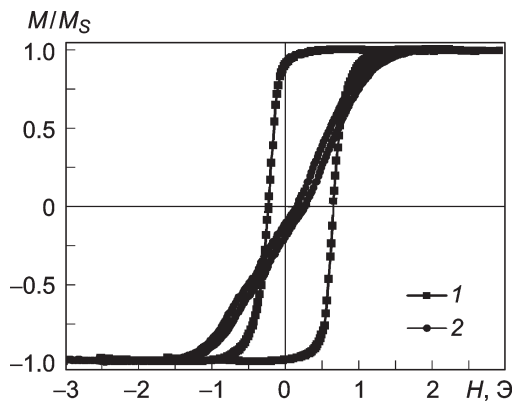


Рис. 1. Типичные петли гистерезиса, наблюдаемые для образцов Fe/Zr при ориентациях магнитного поля D_1 и D_2 : кривые 1 и 2 соответственно. Приведенные петли были получены для Fe/Zr с $t_{Zr} = 0.7$ нм

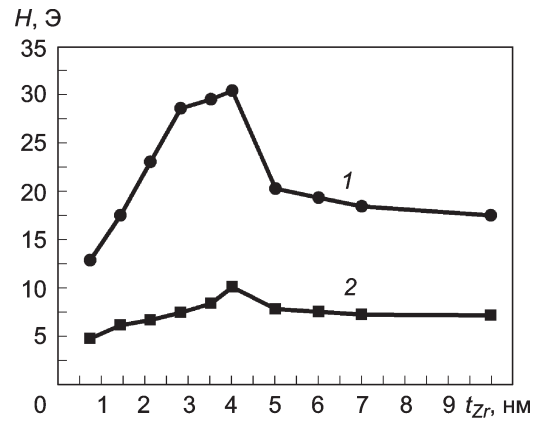


Рис. 2. Зависимости поля насыщения H_S и коэрцитивной силы H_C от толщины слоя Zr, полученные для двухслойных систем Fe/Zr при ориентации магнитного поля D_1 : кривые 1 и 2 соответственно

Значения линий {111}, наблюдаемые для образцов Fe/Zr с различной толщиной слоя Zr

t_{Zr} , нм	2.8	3.5	4.0	5.0	6.0
Интенсивность, отн. ед.	4500	4800	5000	4900	4700

Вместе с тем интенсивность линий {111} зависела от толщины слоя Zr, что, согласно существующим данным [6], свидетельствует об изменении текстуры образцов. Для иллюстрации этого факта в таблице приведены значения линий {111}, наблюдаемые для тонкопленочных систем Fe/Zr с различным значением t_{Zr} . Известно [6], что более (111) текстурированные образцы (при прочих равных условиях, например толщины и состава) характеризуются наибольшими значениями H_S и H_C . Мы действительно наблюдали такую корреляцию между магнитными и микроструктурными свойствами двухслойных пленок Fe/Zr.

Было обнаружено, что петли гистерезиса всех трехслойных образцов Fe/Zr/Fe в магнитном поле, приложенном вдоль направления D_2 , имеют безгистерезисную форму, аналогичную наблюдаемой для двухслойных систем, а вид петель, измеренных в магнитном поле, параллельном D_1 , зависит от толщины слоя Zr. В частности, при одних значениях t_{Zr} наблюдаются прямоугольные, а при других — сложные петли гистерезиса с достаточно высокими значениями поля насыщения (рис. 3). Измерения петель гистерезиса образцов Fe/Zr/Fe позволили получить зависимость поля насыщения от толщины слоя Zr при D_1 ориентации магнитного поля (рис. 4). Из рис. 4 можно видеть, что значение H_S осциллирует с изменением t_{Zr} . Период этих осцилляций Δ равен примерно 1 нм, а их амплитуда уменьшается с ростом t_{Zr} . Найденную зависимость $H_S(t_{Zr})$ можно объяснить наличием обменного взаимодействия между ферромагнитными слоями через немагнитную прослойку и его осцилляционным поведением с изменением толщины немагнитного слоя (переход от ферромагнитного (Ф) к антиферромагнитному (АФ) взаимодействию). В результате в изучаемых трехслойных системах возможна параллельная (Ф-упорядочение) и антипараллельная (АФ-упорядочение) ориентация намагниченности в соседних слоях железа. В случае Ф-обмена между магнитными слоями процессы перемагничивания трехслойных тонкопленочных структур в целом аналогичны процессам перемагничивания тонких пленок

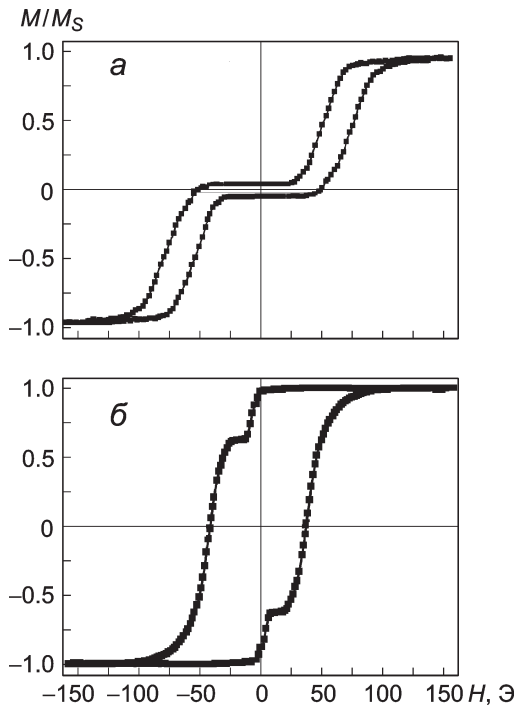


Рис. 3. Петли гистерезиса, наблюдаемые для образцов Fe/Zr/Fe с $t_{Zr} = 1.2$ (а) и 3 нм (б) при ориентации магнитного поля D_1

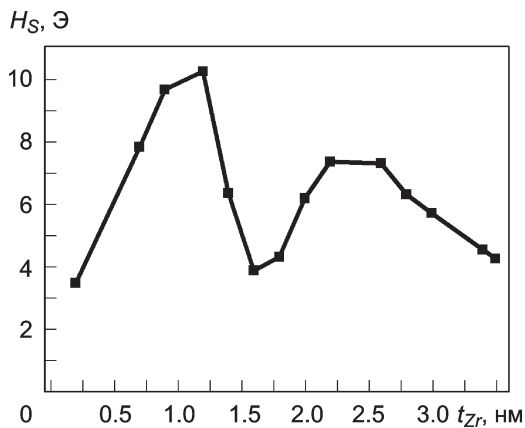


Рис. 4. Зависимость поля насыщения H_S от толщины слоя Zr, наблюдаемая для образцов Fe/Zr/Fe при ориентации магнитного поля D_1

и могут осуществляться, например, за счет необратимого роста зародышей перемангничивания. В случае АФ-обмена между магнитными слоями векторы намагниченности в соседних пленках железа при $H = 0$ разнонаправлены, т.е. рассматриваемая тонкопленочная структура подобна одноосному антиферромагнетнику. В образцах с АФ-обменом поле насыщения H_S значительно больше, чем H_S в образцах с Ф-обменом, что обусловлено дополнительными затратами энергии на преодоление АФ-обмена между магнитными слоями [7, 8]. Вместе с тем следует иметь в виду, что в трехслойных образцах возможны ориентации намагниченности в соседних слоях, отличные от 0° (Ф-обмен) и 180° (АФ-обмен), которые обычно обозначаются как неколлинеарные структуры. Именно благодаря этому мы наблюдали для образцов с АФ-обменом петли гистерезиса, приведенные на рис. 3, а, в последнем случае — петли, приведенные на рис. 3, б.

Что касается экспериментально найденного периода осцилляций поля насыщения, то оказалось, что он имеет достаточно большое значение. В настоящее время изучено много многослойных систем таких, как Fe/Cu [9], Fe/Mo [10], Fe/Cr [11], Co/Cu [3], в которых обнаружены изменения магнитных свойств с периодичностью порядка 1 нм, обусловленные осцилляционным поведением обменного взаимодействия между ферромагнитными слоями через немагнитную прослойку при увеличении ее толщины. Согласно существующим представлениям [12, 13], в случае, если обмен между слоями осуществляется через взаимодействие Рудермана–Киттеля–Касуйи–Йосиды, Λ должно быть порядка π/k_F (k_F — волновой вектор Ферми), которое для большинства металлов равно 0.3–0.4 нм. В нашем случае Λ больше, чем π/k_F . Это свидетельствует о том, что теоретические оценки этого параметра должны быть выполнены с учетом квантового размерного эффекта [8, 14], т.е. должно быть принято во внимание изменение электронной структуры ультратонкого магнитного слоя (появление так называемых quantum well states (QWSs)) по сравнению с объемным материалом. В этом случае период осцилляций Λ должен быть равен $\pi/[k_{BZ} - k_F]$, где k_{BZ} — значение волнового вектора к границе зоны Бриллюэна в направлении, перпендикулярном поверхности пленки, и рассчитанное значение Λ равно 1–1.2 нм. Вместе с тем следует отметить, что короткий период осцилляции поля насыщения ($\Lambda \sim 0.3$ –0.4 нм) был обнаружен в образцах Fe/Mo/Mo [15] и Fe/Au, Al/Fe [16], полученных с помощью метода молекулярно-лучевой эпитаксии.

Магнитооптические свойства тонкопленочных систем Fe/Zr и Fe/Zr/Fe были исследованы так же. Результаты измерений спектральных зависимостей ЭЭК представ-

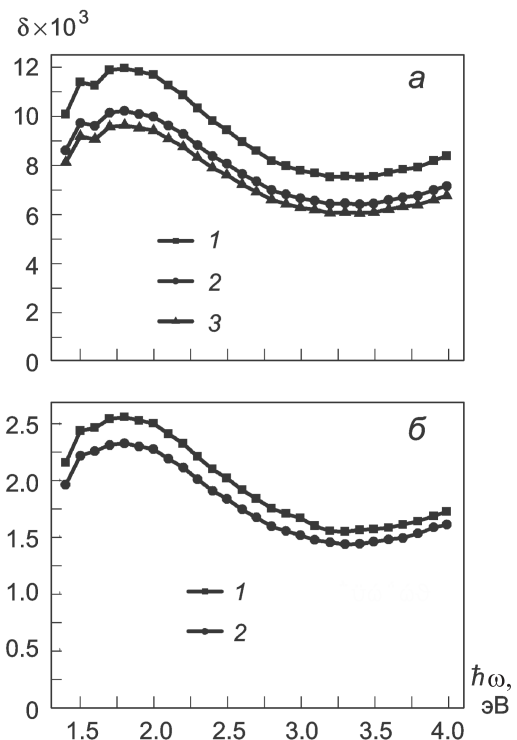


Рис. 5. Спектральные зависимости ЭЭК, наблюдаемые для объемного железа (кривая 1) и образцов Fe/Zr с $t_{Zr} = 0.5$ и 5 нм (кривые 2 и 3 соответственно) (а). Спектральные зависимости ЭЭК, наблюдаемые для образцов Fe/Zr/Fe с $t_{Zr} = 0.5$ и 3.5 нм (кривые 1 и 2 соответственно) (б)

лены на рис. 5. Для лучшего понимания полученных данных на этом же рисунке приведена спектральная зависимость ЭЭК, наблюдаемая для объемного железа. Можно видеть, что все спектры ЭЭК имеют одинаковый вид, но величина ЭЭК зависит от толщины как магнитного, так и немагнитного слоя. Ранее нами экспериментально было установлено, что значение ЭЭК линейно увеличивается с ростом толщины магнитной пленки t_{MF} , если значение t_{MF} меньше информационной глубины магнитооптического сигнала t_{inf} [17]. Было найдено, что значение t_{inf} в области энергии квантов падающего света $1.5 < \hbar\omega < 4.5$ эВ порядка 22–24 нм. В образцах Fe/Zr и Fe/Zr/Fe толщина железного слоя равна 20 и 2.5 нм соответственно, что меньше величины t_{inf} . Вследствие этого для указанных систем мы наблюдаем уменьшение ЭЭК по сравнению с объемным железом. Анализ показал, что при $t_{Zr} = 0.5$ нм значение ЭЭК в образце Fe/Zr в четыре раза больше, чем в Fe/Zr/Fe, что подтверждает ранее полученный нами результат [18]. Кроме того, значение ЭЭК уменьшается с ростом толщины слоя Zr. В частности, для образцов Fe/Zr с $t_{Zr} = 0.5$ и 5 нм величина ЭЭК меньше в 1.17 и 1.25 раза ЭЭК объемного железа (см. рис. 5, а). В образцах Fe/Zr/Fe наблюдается также уменьшение ЭЭК с ростом t_{Zr} (см. рис. 5, б). Эти данные можно объяснить влиянием интерфейсов Fe/Zr на величину ЭЭК, а в случае Fe/Zr/Fe — уменьшением с ростом t_{Zr} вклада в ЭЭК нижнего (относительно поверхности образца) слоя Fe.

Выводы

Обнаружено сильное влияние немагнитного Zr слоя на магнитные и магнитооптические свойства тонкопленочных систем Fe/Zr и Fe/Zr/Fe. Показано, что найденные зависимости $H_S(t_{Zr})$ и $H_C(t_{Zr})$ для образцов Fe/Zr обусловлены их микроструктурными особенностями. Установлено, что поле насыщения систем Fe/Zr/Fe осциллирует по величине с ростом толщины слоя Zr. Этот экспериментальный результат был объяснен наличием обменного взаимодействия между ферромагнитными слоями через немагнитную прослойку и его осцилляционным поведением с ростом t_{Zr} . Установлено, что

период осцилляции H_S равен 1 нм. Такого же порядка значения Λ были получены в теоретических работах, выполненных с учетом квантовых размерных эффектов, проявляющихся в изменении электронной структуры ультратонких пленок по сравнению с объемными материалами. Обнаружено, что спектральные зависимости экваториального эффекта Керра для образцов Fe/Zr и Fe/Zr/Fe имеют идентичный вид и подобны спектрам ЭЭК объемного железа, но их величина зависит как от толщины магнитного, так и немагнитного слоев.

Список литературы

1. Grünberg P., Schreiber R., Pang Y. et al. // Phys. Rev. Lett. 1986. **57**. P. 2442.
2. Babich N., Broto J.M., Fert A. et al. // Phys. Rev. Lett. 1988. **61**. P. 2472.
3. Parkin S.P., More N., Roche K.P. // Phys. Rev. Lett. 1990. **64**. P. 2304.
4. Шалыгина Е.Е., Комарова М.А., Молоканов В.В. // ЖЭТФ. 2002. **122**, № 3. С. 593.
5. Chikazumi S. Physics of Ferromagnetism. Oxford, 1997.
6. Lin C.J., Gorman G.L., Lee C.H. et al. // J. Magn. Magn. Mater. 1991. **93**. P. 194.
7. Parkin S.P., Bhadra R., Roche K.P. // Phys. Rev. Lett. 1991. **66**. P. 2152.
8. Bruno P. // Phys. Rev. 1995. **52**. P. 411.
9. Bennett W.R., Schwarzscher W., Egelhoff W.F. // Phys. Rev. Lett. 1990. **65**. P. 3169.
10. Brubaker M.E., Mattson J.E., Sowers C.H., Bader S.D. // Appl. Phys. Lett. 1991. **58**. P. 2304.
11. Wang Y., Levy P.M., Fry J.L. // Phys. Rev. Lett. 1990. **65**. P. 2732.
12. Yafet Y. // Phys. Rev. 1987. **36**. P. 3948.
13. Coehoorn R. // Phys. Rev. 1991. **44**. P. 9331.
14. Stiles M.D. // Phys. Rev. 1993. **48**. P. 7238.
15. Qji Z.Q., Pearson J., Berger A., Bader S.D. // Phys. Rev. Lett. 1992. **68**. P. 1398.
16. Fuss A., Demokritov S., Grunberg P., Zinn W. // J. Magn. Magn. Mater. 1992. **103**. P. L221.
17. Shalyguina E.E., Shin K.H. // J. Magn. Magn. Mater. 2000. **220**. P. 167.

The influence of the nonmagnetic Zr layer on magnetic and magneto-optical properties of Fe/Zr and Fe/Zr/Fe thin-film systems

E. E. Shalyguina^{1a}, G. V. Maksimova^{1b}, A. N. Shalygin^{1c}, L. V. Kozlovskii²

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

²Department of Physics, Daugavpils University, Daugavpils 5401, Latvia.

E-mail: ^ashal@magn.ru, ^bgalina@mail.ru, ^cshalygin@magn.ru.

The magnetic and magneto-optical properties of nanocrystalline Fe/Zr and Fe/Zr/Fe thin-film systems were investigated using magneto-optical methods. The strong influence of the Zr layer thickness, t_{Zr} , on the magnetic properties of Fe/Zr samples was revealed. The saturation field of the Fe/Zr/Fe systems was found to oscillate as a function of t_{Zr} . This fact was explained by the presence of the exchange coupling between Fe layers and its oscillatory behavior as a function of the nonmagnetic Zr thickness. The magnitudes of the transverse Kerr effect were revealed to depend on both the nonmagnetic and magnetic layer thickness.

PACS: 75.70.Cn; 78.20.Ls.

Keywords: magneto-optical effect; magnetic properties; thin magnetic films.

Received 20 February 2008.

English version: *Moscow University Physics Bulletin* 1(2009)

Сведения об авторах

1. Шалыгина Елена Евгеньевна — д. ф.-м. н., профессор, гл. научн. сотр.; тел.: 939-24-35, e-mail: shal@magn.ru.
2. Максимова Галина Валерьевна — студентка; тел.: 939-24-35, e-mail: galina@mail.ru.
3. Шалыгин Александр Николаевич — д. ф.-м. н., доцент, доцент; тел.: 939-24-35, e-mail: shalygin@magn.ru.
4. Козловский Леонид Валентинович — к. ф.-м. н., доцент, доцент; тел.: 939-24-35.