

МАГНИТНЫЕ И МАГНИТООПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА Fe/Pt и Fe/Pt/Fe ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ МАГНИТНЫХ СТРУКТУР

Е.Е.Шалыгина¹⁾, Н.И.Цидаева, М.А.Карсанова,

*Физический факультет МГУ им. М.В.Ломоносова
119899 Москва, Россия*

Поступила в редакцию 16 ноября 1999 г.

Представлены результаты исследования магнитных и магнитооптических свойств Fe/Pt двухслойных и Fe/Pt/Fe трехслойных тонкопленочных магнитных структур. Обнаружено сильное влияние Pt-слоя на магнитные свойства изучаемых образцов. Установлено, что поле насыщения трехслойных магнитных структур осциллирует по величине при изменении толщины Pt-слоя; период этих осцилляций зависит от толщины Fe-слоя. Полученные данные объяснены наличием обменного взаимодействия между Fe-слоями через Pt-слой. Обнаружено сильное влияние Pt на спектральные зависимости экваториального эффекта Керра в исследуемых тонкопленочных структурах.

PACS: 75.50.Rr, 75.70.-i, 78.20.Ls

В последние годы изучению магнитной анизотропии, процессов перемagnичивания, кинетических и магнитооптических свойств тонкопленочных магнитных структур (ТПМС) посвящено огромное количество экспериментальных и теоретических работ. Обусловлено это обнаружением в конце 80-х – начале 90-х годов в этих образцах ряда новых явлений таких, как гигантское магнитосопротивление [1], осциллирующее обменное взаимодействие между ферромагнитными (Φ) слоями через немагнитный слой (НМС) [2], квантовые размерные эффекты [3]. Результаты уже проведенных исследований оказались чрезвычайно полезными при решении ряда 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 ТПМС. Вместе с тем, по-прежнему заслуживающей внимания проблемой является изучение влияния толщины и состава магнитных и немагнитных слоев на указанные свойства ТПМС. Следует отметить, что результаты этих исследований имеют и прикладное значение, поскольку могут быть использованы при разработке новых тонкопленочных систем для современной спиновой микроэлектроники. Очевидно, что первый шаг при корректном решении этой проблемы должен состоять в изучении двухслойных и трехслойных образцов, представляющих собой чередование магнитных и немагнитных слоев.

Целью данной работы является исследование влияние толщины магнитных и немагнитных слоев на магнитные и магнитооптические свойства Fe/Pt и Fe/Pt/Fe тонкопленочных структур.

Изучаемые образцы были получены с помощью магнетронного распыления. После адгезии при температуре $T = 150^\circ\text{C}$ базовое давление в вакуумной камере было равно 10^{-9} торр. Рабочим газом служил аргон. Давление рабочего газа было

¹⁾ e-mail: shal@magn.phys.msu.su

$\sim 10^{-4}$ торр. В качестве подложек использовалось стекло. В двухслойных структурах толщина магнитного слоя t_{Fe} изменялась от 2 до 100 нм, а немагнитного слоя t_{Pt} , нанесенного между магнитной пленкой и подложкой, – от 0 до 20 нм. В трехслойных структурах t_{Fe} и t_{Pt} варьировались от 2.5 до 10 нм и от 0.4 до 4 нм, соответственно. Чтобы избежать окисления, образцы были покрыты слоем углерода 10 нм. Структурные особенности исследуемых образцов были изучены с помощью рентгеновского дифрактометра. Данные дифракционного рассеяния рентгеновских лучей свидетельствовали о наличии четко выраженных границ раздела между магнитными и немагнитными слоями.

Измерения магнитных характеристик (петель гистерезиса, поля насыщения, коэрцитивной силы) изучаемых образцов были выполнены на магнитооптическом магнитометре с помощью экваториального эффекта Керра (ЭЭК) δ . Здесь $\delta = (I - I_0)/I_0$, где I и I_0 – интенсивности света, отраженного от намагниченного и ненамагниченного образца, соответственно. Внешнее магнитное поле прикладывалось в плоскости образца перпендикулярно плоскости падения света. Исследование магнитооптических свойств изучаемых ТПМС было выполнено на магнитооптической установке, собранной на базе двойного монохроматора ДМР-4. Дисперсионные зависимости ЭЭК были измерены в области энергий квантов падающего света $1.5 < \hbar\omega < 4.2$ эВ. Угол падения света на образец был равен 65° . Подробное описание установок дано в [4, 5]. Все измерения были выполнены при комнатной температуре на открытом воздухе.

Данные, полученные при измерении магнитных характеристик, свидетельствовали о том, что все изучаемые образцы характеризуются плоскостной магнитной анизотропией (легкая ось намагничивания лежит в их плоскости). Петли гистерезиса вдоль легкой оси намагничивания для двухслойных образцов имели почти прямоугольную форму. Отношение остаточной намагниченности к намагниченности насыщения (M_R/M_S) было равно 0.95–0.98. Значение M_R/M_S увеличивалось с уменьшением толщины слоя железа.

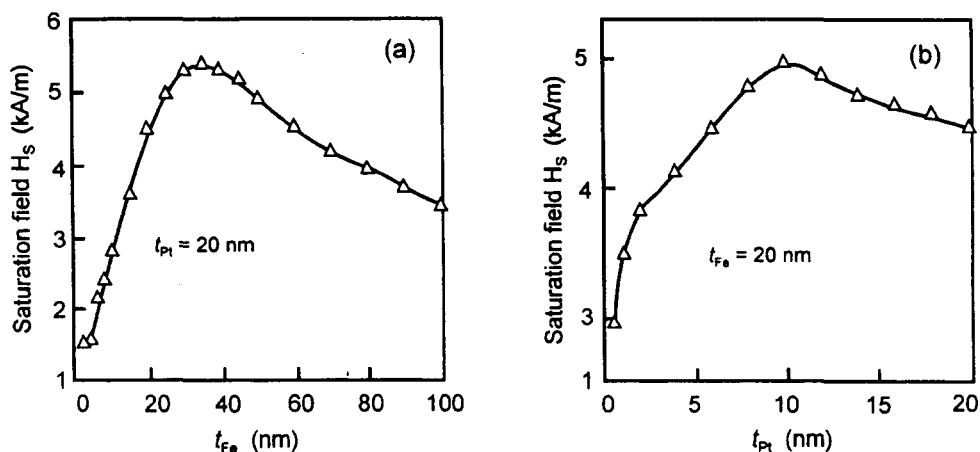


Рис.1. Зависимость поля насыщения H_S двухслойных Fe/Pt образцов от толщины пленки Fe (а) и Pt-слоя, нанесенного между пленкой и подложкой (б), при фиксированных толщинах немагнитного и магнитного слоев, соответственно. Энергия квантов падающего света фиксирована ($\hbar\omega = 2.0$ эВ).

На рис.1 приведены зависимости поля насыщения H_S изучаемых двухслойных образцов от толщины пленки Fe t_{Fe} (a) и Pt-слоя t_{Pt} (b) при фиксированном значении t_{Pt} и t_{Fe} , соответственно. На рис.2 представлены типичные зависимости поля насыщения H_S от толщины немагнитного слоя при фиксированных значениях t_{Fe} для Fe/Pt/Fe трехслойных структур. Из рис.1a видно, что при фиксированном значении t_{Pt} величина H_S растет с увеличением t_{Fe} вплоть до 35 нм, а затем уменьшается при изменении t_{Fe} от 40 до 100 нм. При фиксированной толщине Fe-слоя величина поля насыщения H_S имеет максимум при $t_{Pt} \approx 10$ нм (b). Следует отметить, что характер поведения коэрцитивной силы H_C от t_{Fe} и t_{Pt} двухслойных образцов совпадает с зависимостями $H_S(t_{Fe})$ и $H_S(t_{Pt})$. Полученные результаты можно объяснить, используя данные структурного анализа образцов. Рентгеноструктурные исследования показали, что изучаемые двухслойные образцы имеют поликристаллическую структуру с преимущественной $\{111\}$ текстурой, параллельной поверхности образца. Было установлено, что степень текстурированности образцов зависит как от толщины пленки Fe, так и от толщины Pt-слоя. Известно [6], что более текстурированные образцы характеризуются бóльшей величиной поля насыщения и коэрцитивной силы. Именно такое соотношение между магнитными и структурными свойствами изучаемых Fe/Pt двухслойных образцов наблюдалось нами.

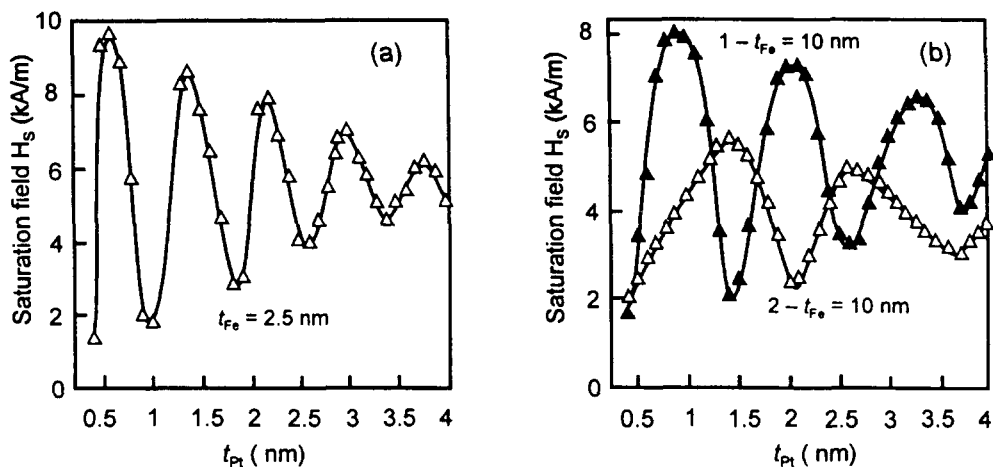


Рис.2. Зависимости поля насыщения H_S трехслойных Fe/Pt/Fe образцов от толщины Pt-слоя: а) $t_{Fe} = 2.5$ нм; б) $t_{Fe} = 5$ и 10 нм (кривые 1 и 2, соответственно)

Из рис.2 можно видеть, что поле насыщения Fe/Pt/Fe трехслойных образцов осциллирует как функция t_{Pt} , причем период этих осцилляций Λ зависит от t_{Fe} . В частности, Λ равно 0.8; 1.2 и 2 нм при $t_{Fe} = 2.5$; 5 и 10 нм, соответственно. С ростом толщины как пленок Fe, так и платинового разделительного слоя поле насыщения изучаемых образцов уменьшается. Полученные данные можно объяснить существованием обменного взаимодействия между ферромагнитными слоями через немагнитный слой и его осцилляционным поведением с изменением толщины немагнитного слоя [7, 8]. Полученные экспериментально достаточно высокие значения Λ свидетельствуют о том, что теоретические оценки этого параметра должны быть выполнены с учетом квантового размерного эффекта [3], то есть должно быть принято во внимание изменение электронной структуры ультратонкого слоя (появление

так называемых Quantum Well States) по сравнению с объемным материалом. Как показано в [8], в этом случае Λ отличается от значения π/κ_F (κ_F – волновой вектор Ферми), которое для большинства металлов ~ 0.3 нм. Прямым экспериментальным методом наблюдения (Quantum Well States) в ультратонких пленках является метод фотоэлектронной фотоэмиссии. К сожалению, насколько нам известно, фотоэмиссионные исследования платиновых слоев на магнитных и немагнитных подложках не проводились. В результате, нам не удалось сравнить полученные значения Λ с данными других исследований. Что касается изменения Λ с увеличением толщины магнитного слоя, то можно указать следующее. Выполненные в последние годы расчеты [9] показали, что значение Λ должно увеличиваться с ростом толщины магнитного слоя. Мы действительно экспериментально наблюдали такое изменение Λ . Уменьшение значений H_S с ростом t_{Fe} и t_{Pt} обусловлено уменьшением обменного взаимодействия между магнитными слоями.

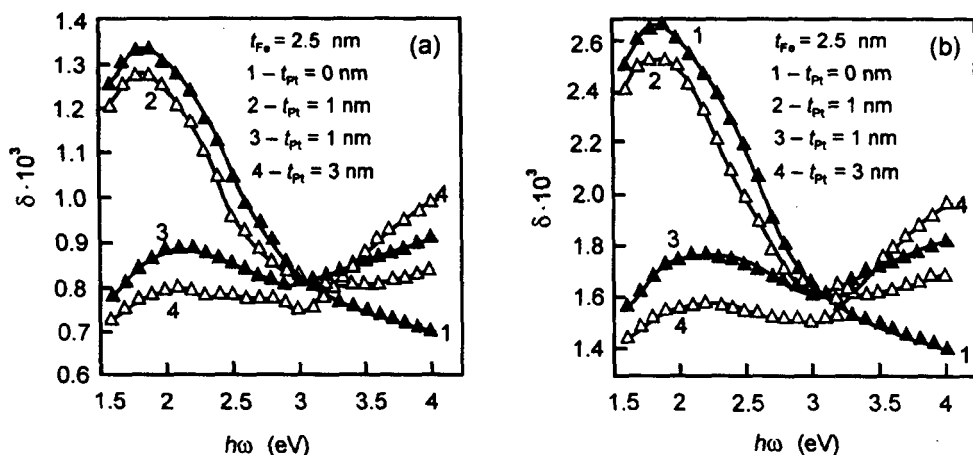


Рис.3. Дисперсионные зависимости ЭЗК для Fe/Pt (a) и Fe/Pt/Fe (b) тонкопленочных структур при фиксированных толщинах Fe-слоя и различных толщинах Pt-слоя

На рис.3 представлены дисперсионные зависимости ЭЗК двухслойных Fe/Pt (a) и трехслойных Fe/Pt/Fe (b) образцов с $t_{Fe} = 2.5$ нм и различной толщиной Pt-слоя. На рис. 4 приведены дисперсионные зависимости ЭЗК двухслойных Fe/Pt образцов с $t_{Fe} = 5$ нм (a) и 10 нм (b) с $t_{Pt} = 0$ и 2 нм. Из рис.3 видно, что с увеличением t_{Pt} пик $\delta(\hbar\omega)$ в области энергии квантов падающего света 1.8–1.9 эВ, характерный для спектральной зависимости ЭЗК объемного железа, уменьшается, а в ультрафиолетовой области появляется новый пик. Видоизменение этих спектров по сравнению с объемным железом может быть объяснено влиянием Pt на магнитооптические свойства изучаемых тонкопленочных структур. Из нейтронографических исследований известно [10], что в сплавах, например, с кобальтом Pt может иметь магнитный момент $\sim 0.3 - 0.4 \mu_B$. Спин-орбитальная энергия $5d$ -состояний платины достаточно высокая. В результате на границе соседних Fe и Pt слоев существует перекрытие электронных волновых функций $3d$ - и $5d$ -состояний Fe и Pt. Этот электронный интерфейсный эффект ($3d - 5d$ гибридизация) обуславливает обменно-наведенную спиновую поляризацию платины, что приводит к значительному вкладу платины

в недиагональную компоненту тензора диэлектрической проницаемости изучаемых образцов. Следствием этого и является сильное видоизменение дисперсионных зависимостей ЭК в Fe/Pt и Fe/Pt/Fe структурах по сравнению с объемным железом. Согласно существующим данным [11], наиболее сильно влияние платины на магнитооптические свойства многослойных тонкопленочных структур и сплавов с Pt должно проявляться в ближней ультрафиолетовой области. Это подтверждают и наши результаты. Следует отметить, что присутствие спин-поляризованной платины фактически обуславливает осцилляционные зависимости поля насыщения и коэрцитивной силы трехслойных образцов при изменении t_{Pt} .

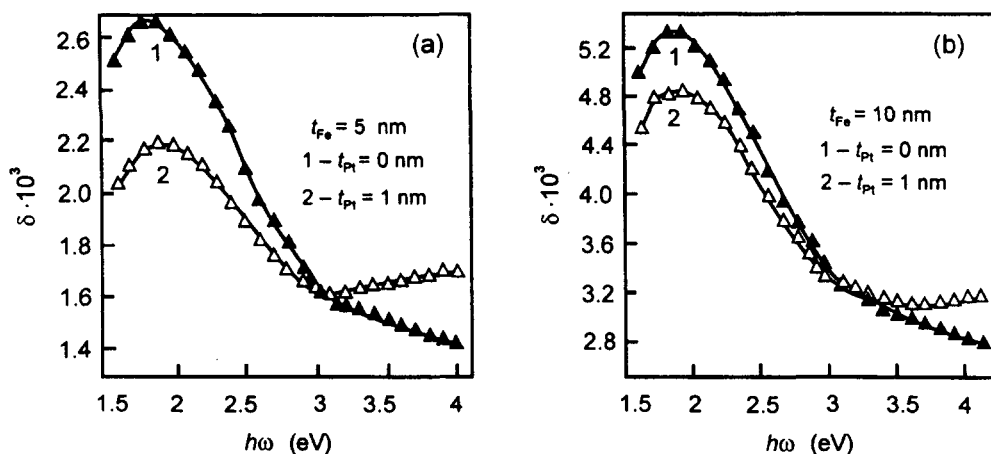


Рис.4. Дисперсионные зависимости ЭК для Fe/Pt двухслойных образцов с $t_{Fe} = 5$ нм (а) и $t_{Fe} = 10$ нм (б); $t_{Pt} = 0$ и 2 нм

Очевидно, что описанный выше электронный интерфейсный эффект должен зависеть от толщины как Fe-, так и Pt-слоя. При этом необходимо учитывать также следующий факт. Известно [12], что магнитооптический сигнал (в частности, ЭК) может зависеть от толщины образца t , если $t < t_{inf}$, где t_{inf} – информационная глубина магнитооптического сигнала (глубина формирования магнитооптического сигнала). В работе [13] было экспериментально показано, что для железа t_{inf} равна 15–20 нм в области энергий падающего света $1.5 < \hbar\omega < 4.2$ эВ. Полная толщина изучаемых нами двух- и трехслойных образцов меньше, чем t_{inf} . Таким образом, при одинаковой толщине Fe-слоя величина ЭК должна быть больше (примерно в 2 раза) в трехслойных структурах, чем в двухслойных. Данные рис.3 подтверждают этот вывод. Количественное сравнение значений ЭК для двух- и трехслойных образцов показывает, что влияние Pt-слоя на ЭК во втором случае больше, чем в первом, то есть необходимо учитывать наличие двух Fe/Pt-границ раздела (интерфейсов) в трехслойных структурах.

Сопоставление данных, полученных для двухслойных структур (рис.3а и 4), показывает, что значения $\delta_{Fe}(t_{Pt} = 0) - \delta_{Fe/Pt}(t_{Pt} = 2 \text{ нм})$ практически одинаковы для $t_{Fe} = 2.5, 5$ и 10 нм, в то время как абсолютные величины ЭК увеличиваются с ростом толщины пленки Fe. Аналогичные результаты были получены для образцов с другой толщиной Pt-слоя. Вместе с тем, из рис.3 и 4 видно, что влияние Pt-слоя

на ЭЭК усиливается с ростом его толщины. Было установлено, что это усиление сохраняется вплоть до $t_{Pt} \approx 4$ нм.

Итак, были исследованы магнитные и магнитооптические свойства Fe/Pt и Fe/Pt/Fe тонкопленочных структур. Обнаружена осциллирующая зависимость поля насыщения H_S трехслойных образцов от толщины Pt-слоя. Найдено, что период осцилляций H_S зависит от толщины пленки Fe. Полученные данные были объяснены наличием в трехслойных системах обменного взаимодействия между ферромагнитными слоями через немагнитный слой.

Обнаружено сильное влияние Pt-слоя на дисперсионные зависимости ЭЭК в Fe/Pt и Fe/Pt/Fe тонкопленочных структурах. Этот факт был объяснен обменно-наведенной ($3d - 5d$ гибридизация) спиновой поляризацией платины. Установлено, что видоизменение спектров ЭЭК изучаемых образцов усиливается с ростом толщины платинового слоя вплоть до $t_{Pt} \approx 4$ нм, причем в трехслойных образцах влияние Pt примерно в два раза больше, чем в двухслойных.

Данная работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант # 99-02-16595).

-
1. M.N.Baibich, J.M.Broto, A.Fert et al., Phys. Rev. Lett. **61**, 2472 (1988).
 2. S.S.P.Parkin, N.More, and K.P.Roche, Phys. Rev. Lett. **64**, 2304 (1990).
 3. J.E.Ortega, F.J.Himpsel, G.J.Mankey et al., Phys. Rev. **B47**, 1540 (1993).
 4. Г.С.Кринчик, Е.Е.Чепурова, Б.Н.Пономарев и др., ФТТ **28**, 2862 (1987).
 5. Г.С.Кринчик, Е.Е.Чепурова, Ш.В.Эгамов, ЖЭТФ **74**, 714 (1978).
 6. C.J.Lin, G.L.Gorman, C.H.Lee et al., J. Magn. Magn. Mat. **93**, 194 (1991).
 7. S.P.Parkin, R.Bhadra, and K.P.Roche, Phys. Rev. Lett. **66**, 2152 (1991).
 8. P.Bruno, Phys. Rev. **B52**, 411 (1995).
 9. L.Nordstrom, P.Lang, R.Zeller et al., Phys. Rev. **B50**, 13058 (1994).
 10. K.H.J.Buschow, P.G. van Engen, R.Jongebreur, J. Magn. Magn. Mat. **38**, 1 (1983).
 11. D.Weller, W.Reim, and K.Spröl, J. Magn. Magn. Mat. **93**, 183 (1991).
 12. G.Traeger, L.Wensel, and A.Hubert, Phys. Stat. Solidi (a) **131**, 201 (1991).
 13. Е.Е.Шалыгина, Л.В.Козловский, Ду Сяньбо, Вестник МГУ, сер.3 **36**, № 5, 51 (1995).