

ЛОКАЛЬНЫЕ МАГНИТНЫЕ СОСТОЯНИЯ И СВЕРХТОНКИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В МАГНИТНЫХ СВЕРХРЕШЕТКАХ Fe/Ti

П.Н.Стеценко, С.Д.Антипов, Г.Е.Горюнов, Г.В.Смирницкая,
А.Л.Колумбаев*

*Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова
119899 Москва, Россия*

**Институт физической химии РАН
117334 Москва, Россия*

Поступила в редакцию 14 января 1997 г.

Методом напыления в разряде с осциллирующими электронами синтезированы многослойные пленки Fe/Ti. Проведены измерения статических петель гистерезиса и спектров ядерного гамма-резонанса на ядрах Fe⁵⁷. Рассчитаны функции распределения сверхтонких магнитных полей. Установлено, что величина спонтанной намагниченности магнитных сверхрешеток Fe/Ti в зависимости от толщины слоев Ti испытывает очень сильные осцилляции. На функциях распределения сверхтонких полей отмечаются три группы пиков, соответствующих трем неэквивалентным состояниям ионов Fe, в одном из которых эти ионы лишены собственного магнитного момента. Эти результаты соответствуют также данным измерений температурной зависимости намагниченности в слабых магнитных полях. Для некоторых значений толщин прослоек Ti величина намагниченности насыщения в пересчете на содержание Fe значительно превосходит намагниченность насыщения массивного Fe.

PACS: 75.70.Ch, 76.80.+y

1. Многослойные магнитные пленки и синтезированные на их основе магнитные сверхрешетки (МСР) дают возможность осуществить экспериментальные исследования ряда фундаментальных проблем современной физики магнитных явлений, таких как возможность существования магнитного упорядочения в двумерных системах, особенность формирования локальных атомных магнитных моментов в поверхностных слоях и межфазных областях, механизмы косвенных обменных взаимодействий между магнитными слоями и др. Замечательными особенностями отличаются также кинетические свойства МСР, прежде всего гигантское магнитное сопротивление, наблюдающееся в этих системах.

При вариациях толщин немагнитных прослоек многие важные магнитные параметры МСР, такие как спонтанная намагниченность, магнитосопротивление, температура Кюри, константы магнитной анизотропии и др., проявляют осциллирующее поведение [1,2]. Это, по-видимому, обусловлено пространственными осцилляциями спиновой плотности делокализованных электронов в немагнитных слоях, посредством чего осуществляется косвенное обменное взаимодействие между магнито-упорядоченными слоями. Механизм этого взаимодействия может быть описан либо в терминах приближения РККИ, либо в модели Фриделя [3]. В последнее время получили развитие представления, интерпретирующие осцилляционный характер ряда магнитных параметров в МСР как следствие интерференционных эффектов при частичном отражении электронных волн от границ разделов в периодических структурах МСР [4].

МСР являются, по сути, композитными материалами и представляют собой существенно неоднородные системы, в силу чего исследование их интеграль-

ных параметров не всегда является достаточно информативным и необходимо применение экспериментальных методов, позволяющих получать информацию о локальных магнитных состояниях. К таким методам могут быть отнесены те или иные способы наблюдения сверхтонких взаимодействий (СТВ) и, в частности ядерный гамма-резонанс (ЯГР), ядерный магнитный резонанс, $\gamma-\gamma$ угловая корреляция, μ SR-спектроскопия и др.

2. Синтез многослойных магнитных пленок для настоящего исследования осуществлялся методом катодного распыления в газовом разряде с осциллирующими электронами в атмосфере очищенного Кг. Давление остаточного газа составляло $10^{-7} - 10^{-8}$ торр, давление рабочего инертного газа - 10^{-5} торр. Содержание Кг в синтезированных пленках не превышало 0.15 ат.%. Были синтезированы две серии МСР Fe/Ti. В одной из них толщина слоев Fe составляла $\sim 6 \text{ \AA}$ и поддерживалась постоянной, а толщина слоев Ti изменялась от 8.4 до 83 \AA . Во второй серии толщина слоев Fe изменялась от 6 до 32.4 \AA при постоянной толщине прослоек Ti $\sim 40 \text{ \AA}$. Количество слоев Fe и Ti достигало 580. Проведенный рентгеновский анализ МСР позволил установить их сильно текстурированную оцк-структуру.

Измерения кривых перемагничивания проводилось в статическом режиме с помощью полностью компьютеризованного вибрационного магнитометра во внешних полях до $\pm 15 \text{ кЭ}$. Чувствительность магнитометра составляла 10^{-7} э.м.е. Магнитотермические измерения проводились в слабых переменных полях с помощью индукционного магнитометра.

Спектры ядерного гамма-резонанса на ядрах Fe^{57} измерялись при комнатной температуре на спектрометре с постоянным ускорением в режиме пропускания. Нелинейность закона движения электродинамического вибратора не превышала 0.3%, источником гамма-излучения служил Co^{57} в Rh. Для математической обработки спектров ЯГР и восстановления функций распределения плотности вероятности сверхтонкого магнитного поля H_{hf} на ядрах Fe^{57} использовалась оригинальная математическая программа [5], в которой искомый функционал представлялся в аналитическом виде как сумма определенного числа лоренцианов с последующей эффективной программой минимизации.

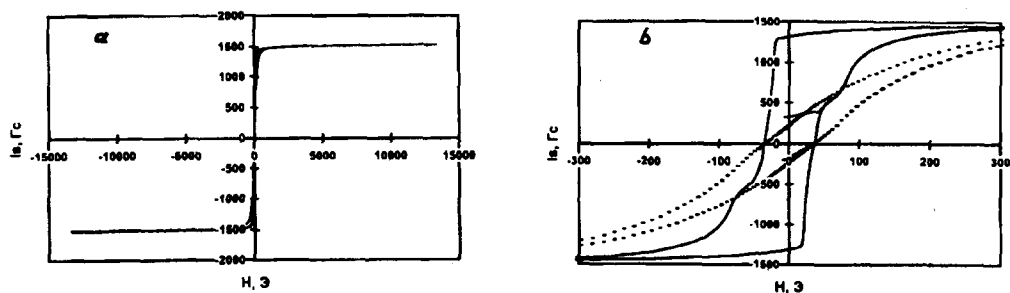


Рис.1. Петли гистерезиса для МСР [Fe(7 \AA)/Ti(8.4 \AA)]-400 для ориентации внешнего поля в плоскости пленки: а) петли гистерезиса в максимальном поле; б) центральные участки этих же петель. Точки - внешнее магнитное поле при измерениях совпадает по направлению с внешним магнитным полем при напылении пленок; сплошные кривые - внешнее магнитное поле при измерениях перпендикулярно предыдущей ориентации

3. На рис.1 приведены петли гистерезиса для МСР [Fe(7 \AA)/Ti(8.4 \AA)]-400 при ориентации внешнего магнитного поля в плоскости пленки. На рис.1а

приведены полные петли в максимальном поле ± 15 кЭ. Характерными особенностями являются малые значения восприимчивости парапроцесса и высокая степень прямоугольности петель. Рис.1b представляет центральную часть этих же петель в поле до ± 300 Э для двух взаимноперпендикулярных направлений. Трудное направление совпадает с направлением внешнего магнитного поля при напылении пленки. Характерны высокая степень магнитной анизотропии в плоскости пленки, обусловленная наличием внешнего магнитного поля при их напылении, а также аномальная "перетянутая" форма петли для легкого направление, что может быть обусловлено особенностями доменной структуры пленки, связанной с отмеченной выше анизотропией и с особенностями косвенных обменных взаимодействия между магнитными слоями.

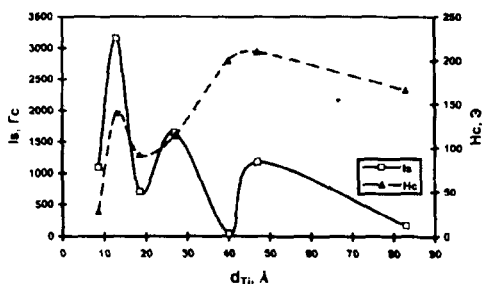


Рис.2. Зависимость спонтанной намагниченности I_s (\square) и коэрцитивной силы H_c (Δ) МСР Fe/Ti от толщины слоев Ti. Толщина слоев Fe ~ 6 Å

Зависимость рассчитанных по этим кривым значений спонтанной намагниченности и коэрцитивной силы МСР от толщины слоев Ti представлена на рис.2. Как видно из рисунка, основной особенностью этой зависимости является ее резко выраженный осциллирующий характер. Увеличение спонтанной намагниченности от минимального значения до максимального превышает два порядка! Аналогичным образом изменяется с толщиной прослоек Ti также и коэрцитивная сила. Столь резкие изменения магнитных параметров с ростом толщины слоев Ti свидетельствуют о четко выраженных границах между слоями Fe и Ti.

Как известно, подобные осцилляции магнитных параметров, по-видимому, обусловлены изменениями знака косвенного обменного взаимодействия между магнитно-упорядоченными слоями, осуществляемого посредством поляризации спиновой плотности делокализованных электронов немагнитных прослоек.

Чаще всего делаются попытки интерпретировать эти взаимодействия либо в рамках приближения РККИ, либо в терминах фриделевских осцилляций, хотя при этом имеются большие трудности с объяснением наблюдающихся экспериментально периодов осцилляций. То обстоятельство, что в нашем случае значения результирующей спонтанной намагниченности для некоторых толщин слоев Ti оказываются очень малыми, свидетельствует о почти полной компенсации намагниченности отдельных слоев и, следовательно, о 180-градусной ориентации намагниченности соседних слоев Fe.

Необходимо отметить, что при некоторых толщинах слоев Ti значения спонтанной намагниченности МСР в расчете на содержание Fe значительно превышают величины, характерные для ионов Fe в чистом Fe. Возможность такого увеличения была показана теоретически [6] и подтверждена экспериментально [7]. Очень высокие значения среднего атомного магнитного момента μ_{Fe} при комнатной температуре $-\mu_{Fe} = 3.5\mu_B$ были измерены в монокристаллических

пленках Fe_{16}N_2 с помощью вибрационного магнитометра и резерфордского обратного рассеяния [8]. Существенным фактором при этом является уменьшение координационных чисел у ионов Fe, находящихся на поверхности, что приводит к сужению d -зоны и росту атомных моментов, а также дополнительные вклады от орбитальных моментов, связанные с изменениями локальной симметрии окружения ионов Fe, и вклады от поляризованной спиновой плотности нелокализованных электронов в немагнитных слоях, участвующих в процессах косвенного обмена.

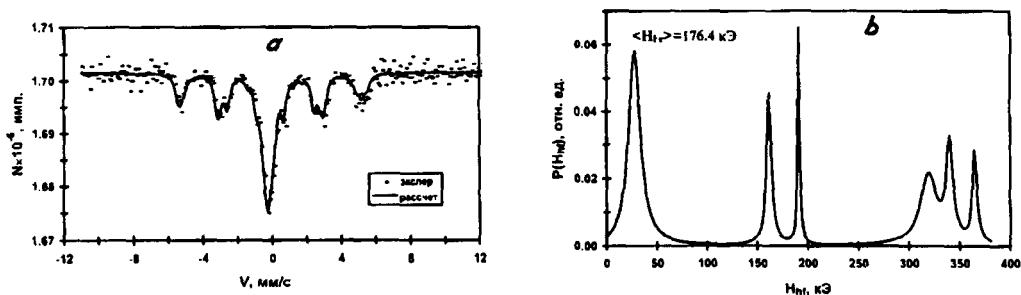


Рис.3. а) Спектр ЯГР МСР $[\text{Fe}(5.2 \text{ \AA})/\text{Ti}(47 \text{ \AA})] \cdot 550$; б) функция распределения вероятности H_{hf} той же МСР

На рис.3а представлен спектр ЯГР на ядрах Fe^{57} для МСР $[\text{Fe}(5.2 \text{ \AA})/\text{Ti}(47 \text{ \AA})] \cdot 550$, а на рис.3б приведена функция распределения плотности вероятности на этих ядрах, восстановленная по этому спектру. Как следует из вида функции распределения, максимумы вероятности расположены в трех группах, которые соответствуют трем неэквивалентным локальным состояниям ионов Fe. Для одной из этих групп значения H_{hf} составляет 30 кЭ, что свидетельствует о том, что в данных локальных состояниях ионы Fe лишены собственного магнитного момента и H_{hf} обусловлено поляризацией электронной спиновой плотности на ядрах ионами окружения. Эти локальные состояния могут соответствовать определенным положениям ионов Fe в межфазных областях. Группа пиков, соответствующая максимальным значениям H_{hf} (до 380 кЭ), по-видимому, обусловлена ионами Fe с высокими значениями атомных магнитных моментов и расположенными в поверхностных слоях.

Эти предположения согласуются с результатами измерений температурной зависимости намагниченности в слабых магнитных полях, представленных на рис.4. Аномалии, наблюдающиеся на этой зависимости, могут быть обусловлены магнитными переходами ионов Fe в соответствующих локальных состояниях. Максимум в районе 750°C обусловлен, по-видимому, эффектом Гопкинсона в высокотемпературной магнитной фазе.

Измерения зависимости спонтанной намагниченности МСР Fe/Ti от толщины слоев Fe проводились на серии, где толщина слоев Ti поддерживалась постоянной вблизи значения 40 Å, а толщина слоев Fe варьировалась от 6 до 32.2 Å. Толщина слоев Ti 40 Å соответствовала минимальному значению спонтанной намагниченности в серии с постоянной толщиной слоев Fe. На рис.5 приведены зависимости спонтанной намагниченности и коэрцитивной силы МСР этой серии от толщины слоев Fe. Как видно из рисунка, в этом случае указанные параметры не испытывают осциллирующих изменений.

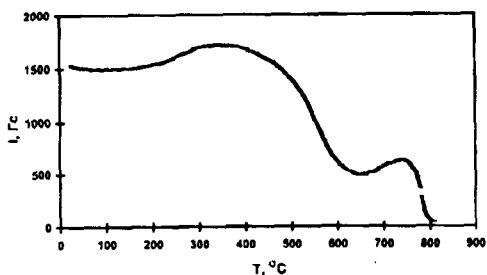


Рис.4. Температурная зависимость намагниченности I_{MSP} [Fe(6.2 Å)/Ti(8.6 Å)]₅₈₀ в слабых переменных полях

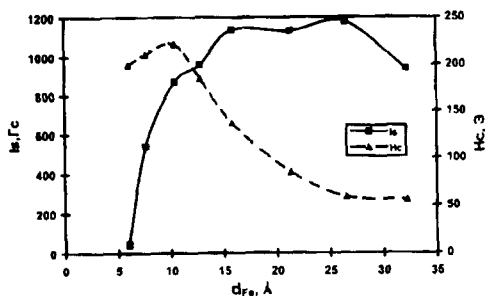


Рис.5. Зависимость спонтанной намагниченности I_S (□) и коэрцитивной силы H_c (Δ) МСР Fe/Ti в зависимости от толщины слоев Fe. Толщина слоев Ti ~ 40 Å

4. На МСР Fe/Ti, синтезированных методом катодного распыления в разряде с осциллирующими электронами, проведены измерения магнитных свойств и сверхтонких магнитных полей на ядрах Fe^{57} в зависимости от толщины слоев Ti и Fe. Обнаружена осциллирующая зависимость спонтанной намагниченности и коэрцитивной силы МСР от толщины слоев Ti. Величина спонтанной намагниченности изменяется при этом более чем на два порядка. Для некоторых значений толщины слоев Ti величина спонтанной намагниченности МСР значительно превосходит соответствующее значение для чистого Fe. Функция распределения H_{hf} на ядрах Fe^{57} в МСР Fe/Ti, восстановленная по экспериментальным спектрам ЯГР, содержит три группы пиков, соответствующих трем типам неэквивалентных локальных магнитных состояний ионов Fe. Для тех состояний, которые соответствуют минимальным значениям H_{hf} (25–50 кЭ), ионы Fe, по-видимому, лишены собственных магнитных моментов. Эти предположения согласуются с результатами измерений температурной зависимости намагниченности в слабых переменных полях.

В тех случаях, когда в МСР Fe/Ti толщина слоев Ti оставалась постоянной, а изменялась толщина слоев Fe, величины спонтанной намагниченности и коэрцитивной силы не испытывали осциллирующих изменений.

Работа выполнялась при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 96-02-18141).

1. S.S.P.Parkin, N.Moore, and K.P.Roche, Phys. Rev. Lett. **64**, 2304 (1990).
2. G.Bayreuther, F.Bensch, and V.Kottler, J. Appl. Phys. **79**, 4509 (1996).
3. L.Nordström and D.J.Singh, J. Appl. Phys. **79**, 4515 (1996).
4. P.Bruno, Phys. Rev. **B52**, 411 (1995).
5. S.D.Antipov, G.E.Gorjunov, P.N.Stetsenko et al., Hyperfine Interact. **78**, 391 (1993).
6. A.J.Freeman and C.L.Fu, J. Appl. Phys. **61**, 3356 (1987).
7. J.A.C.Bland, C.Daboo, B.Heinrich et al., JMMM **148**, 85 (1995).
8. J.Sugita, H.Takahashi, M.Komuro et al., J. Appl. Phys. **79**, 5567 (1996).