Физика низких температур, 1997, т. 23, № 4, с. 469–472

Письма редактору

Неколлинеарная спиновая конфигурация, индуцированная полем в поверхностном слое гадолиния многослойных пленок Gd/Fe

С. Л. Гнатченко, А. Б. Чижик, Д. Н. Меренков, В. В. Еременко

Физико-технический институт низких температур им. Б. И. Веркина НАН Украины, Украина, 310164, г. Харьков, пр. Ленина, 47
E-mail: gnatchenko@ilt.kharkov.ua

Г. Шимчак, Р. Шимчак, К. Фронц, Р. Жуберек

Institute of Physics, Polish Academy of Sciences, Al. Lotnikow 32/46, 02-668 Warsaw, Poland
E-mail: szymh@gamma1.ifpan.edu.pl

Статья поступила в редакцию 25 декабря 1996 г.

Из сопоставления полевых зависимостей меридионального эффекта Керра и намагниченности сделан вывод об образовании в магнитном поле неколлинеарного неоднородного магнитного состояния в поверхностном слое гадолиния в многослойных пленках Gd/Fe. Экспериментальные результаты описываются в рамках предложенной теоретической модели, предсказывающей образование в поверхностном гадолиниевом слое неколлинеарной спиновой конфигурации в результате спин-ориентационного фазового перехода, индуцированного магнитным полем.

Із порівняння польових залежностей меридіонального ефекту Керра і намагніченості зроблено висновок про утворення в магнітному полі неколінеарного неоднорідного магнітного стану в поверхневому шарі гадолінію в багатошаруватих плівках Gd/Fe. Експериментальні результати описуються в межах запропонованої теоретичної моделі, яка передбачає утворення в поверхневому гадолініевому шарі неколінеарної спінової конфігурації внаслідок спін-орієнтаційного фазового переходу, індукованого магнітним полем.

PACS: 75.25.+z, 75.70.–i

Хорошо известно, что в многослойных тонких пленках Gd/Fe, в которых магнитные моменты слоев Gd и Fe упорядочены ферримагнитно и располагаются в плоскости пленки, магнитное поле, ориентированное параллельно плоскости слоев, может индуцировать фазовый переход в неколлинеарное состояние [1]. Под воздействием поля коллинеарность магнитных моментов слоев Gd и Fe нарушается вследствие конкуренции магнитного поля, стремящегося установить спины вдоль своего направления, и антиферромагнитного обменного взаимодействия на поверхности раздела слоев. Поле перехода в неколлинеарное состояние такого типа мало вблизи точки компенсации магнитных моментов слоев Gd и Fe, но по мере удаления по температуре от этой точки [1] оно увеличивается.

В настоящей работе сообщается об обнаружении в многослойных пленках Gd/Fe неколлинеарного состояния другого типа. В пленках, в которых магнитные моменты слоев Gd меньше магнитных моментов слоев Fe при низких температурах и которые вследствие этого не имеют точки компенсации, магнитное поле индуцирует неколлинеарное неоднородное состояние в поверхностном слое Gd. Это состояние возникает в результате конкуренции внешнего поля со слабым внутрислойным обменным взаимодействием Gd–Gd сначала только в поверхностном слое Gd, в котором спины верхних атомных слоев не фиксированы обменным взаимодействием Gd–Fe. При этом магнитные моменты слоев Fe остаются параллельными, а магнитные моменты других слоев Gd — антипараллельными внешнему полю. Неколлинеарная спиновая конфигурация (НСК) в поверхностном слое Gd образуется в малых полях, сравнимых с полями насыщения (H_s) пленок Gd/Fe. Наиболее четко процесс образования НСК в поверхностном слое

© С. Л. Гнатченко, А. Б. Чижик, Д. Н. Меренков, В. В. Еременко, Г. Шимчак, Р. Шимчак, К. Фронц, Р. Жуберек, 1997

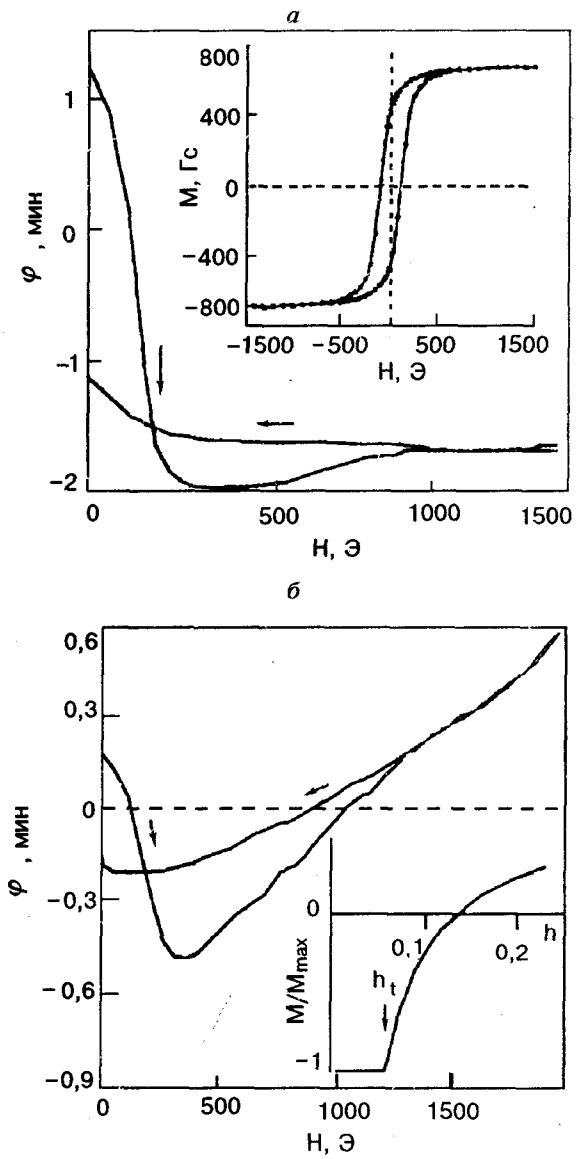

Рис. 1. Полевые зависимости керровского вращения, измеренные при $T = 25$ K для пленки (Gd20 Å/Fe20 Å) × 40 в случаях *p*-поляризации света (вектор **E** световой волны лежит в плоскости падения) (*а*) и *s*-поляризации (вектор **E** перпендикулярен плоскости падения) (*б*). Вставки — полевая зависимость намагниченности, измеренная для этой пленки при той же температуре (*а*) и расчетная зависимость намагниченности поверхностного слоя Gd (*б*).

Gd может быть выделен из общего процесса намагничивания пленок при низких температурах, где намагниченность Gd максимальна и максимальны поля образования НСК, которые в этой температурной области могут превысить поля насыщения.

Процесс намагничивания многослойных пленок Gd/Fe исследовался с помощью меридионального эффекта Керра и измерений намагниченности на СКВИД магнитометре. Изучались пленки (Gd20 Å/Fe20 Å)×40 (1),(Gd40 Å/Fe40 Å)×20(2), (Gd60 Å/Fe60 Å)×15 (3) и (Gd100 Å/Fe100 Å)×10 (4), отличающиеся толщиной и количеством слоев. Пленки были нанесены на подложки GaAs ориентации (001) методом магнетронного распыления (условия получения и свойства исследуемых пленок описаны в [2]). На поверхностный слой Gd наносился защитный слой Si толщиной 50 Å.

На рис. 1 приведены полевые зависимости керровского вращения $\varphi(H)$, измеренные для *p*- и *s*-поляризаций света с длиной волны $\lambda = 0{,}63$ мкм для пленки 1. Зависимости $\varphi(H)$ измерялись в интервале полей -2 кЭ$\lesssim H \lesssim 2$ кЭ. На рисунке приведены только участки кривых $\varphi(H)$ для $H > 0$ (при $H < 0$ эти зависимости такие же с учетом изменения знака вращения). На вставке к рис. 1,*а* показана полевая зависимость намагниченности $M(H)$, измеренная для той же пленки. Как видно из рис. 1,*а*, при намагничивании пленки в случае *p*-поляризации керровское вращение вначале достигает насыщения в тех же полях, что и намагниченность, но затем начиная с некоторого поля величина φ уменьшается. При обратном ходе рост вращения на кривой $\varphi(H)$ не наблюдается. Таким образом, на зависимости $\varphi(H)$ имеется дополнительный гистерезис, который отсутствует на зависимости $M(H)$. В случае *s*-поляризации (рис. 1,*б*) насыщение на зависимости $\varphi(H)$ не достигается во всем исследовавшемся полевом интервале и также наблюдается дополнительный гистерезис.

По мере увеличения толщины слоев в пленках 2, 3 и 4 происходила трансформация зависимостей $\varphi(H)$ от кривых типа показанных на рис. 1 до обычных гистерезисных петель, хорошо согласующихся с полевой зависимостью намагниченности. Для пленки 2 зависимости $\varphi(H)$ для *p*- и *s*-поляризаций качественно не отличались от приведенных на рис. 1. Для пленки 3 зависимости $\varphi(H)$ для обеих поляризаций имеют вид обычных петель гистерезиса, но на них еще можно обнаружить остатки особенностей, имеющихся в случае пленок 1 и 2. При этом ширина гистерезиса на полевых зависимостях керровского вращения существенно больше, чем на зависимости $M(H)$, измеренной для этой же пленки. Две гистерезисные петли, наблюдаемые в экспериментах с пленками 1 и 2 (рис. 1), сливаются в одну широкую петлю. Для пленки 4 зависимости $\varphi(H)$ для обеих поляризаций не отличаются по виду и ширине гистерезиса от зависимости $M(H)$.

Отличие полевых зависимостей эффекта Керра от полевых зависимостей намагниченности свидетельствует о том, что процессы намагничивания поверхностных и внутренних слоев многослойных пленок Gd/Fe протекают по-разному. Наблюдае-

мые особенности поведения керровского вращения находят объяснение в рамках модели, учитывающей образование в поверхностном слое Gd НСК, индуцированной магнитным полем. Рассмотрим спиновую конфигурацию поверхностного слоя Gd в магнитном поле. Энергию этого слоя в расчете на один атом Gd при $T = 0$ можно представить в виде [1]

$$E = -1/2\, JS^2 \sum_{i=1}^{n-1} \cos\psi_i + g\mu_B SH \Big(\sum_{i=2}^{n} \cos\varphi_i + 1\Big),$$

$$\varphi_i = \sum_{k=1}^{i-1} \psi_k, \qquad (1)$$

где $J = J^{GdGd}$; S — спин атома Gd; g — фактор Ланде; μ_B — магнетон Бора; H — внешнее поле; ψ_i — угол между спинами S_i и S_{i+1} i-го и $(i+1)$-го атомных слоев; $\varphi_i = 180° - \theta_i$; θ_i — угол между направлением спинов в i-м атомном слое и внешним полем. Принимая во внимание соотношение между обменными константами $|J^{GdGd}| << |J^{GdFe}|$ [3], полагаем, что спины ближайшего к слою Fe атомного слоя Gd ориентированы антипараллельно спинам атомов Fe и не изменяют свое направление в магнитном поле (приближение $J^{GdFe} \to \infty$). Минимизируя с учетом сделанного предположения энергию (1) и численно решая полученную систему уравнений, находим равновесные значения углов ψ_i, φ_i и θ_i для каждого атомного слоя в поверхностном слое Gd при разных толщинах последнего, соответствующих исследовавшимся пленкам 1–4. Рассчитываем также зависимость намагниченности поверхностного слоя Gd от внешнего поля. Полученная зависимость $M(H)$ для поверхностного слоя пленки 1 приведена на вставке к рис. 1,б.

Выполненные расчеты позволили прийти к следующим заключениям. В полях $h < h_t$ ($h = 2g\mu_B H/JS$) магнитная структура поверхностного слоя Gd остается коллинеарной с ориентацией спинов антипараллельно направлению внешнего поля. В поле $h = h_t$ в этом слое возникает неоднородная неколлинеарная магнитная структура. Спины в атомных слоях образуют угол θ_i с направлением внешнего поля, который уменьшается по мере приближения атомного слоя к поверхности пленки. Величина h_t уменьшается с увеличением толщины поверхностного слоя. При $T = 0$ для слоев Gd с толщинами 20, 40, 60 и 100 Å значения полей перехода H_t равны соответственно 1 100, 270, 110 и 40 Э. Переход в неколлинеарное состояние происходит достаточно резко, и можно ожидать, что он будет сопровождаться гистерезисом.

Сопоставление полученных экспериментальных результатов с теоретическими позволяет сделать вывод об образовании в магнитном поле НСК в поверхностном слое Gd в исследовавшихся многослойных пленках Gd/Fe. В пленках 1 и 2 поле перехода поверхностного слоя Gd в неколлинеарное состояние превышает поле насыщения. Начало перемагничивания поверхностного слоя с образованием НСК и уменьшением намагниченности сопровождается (см. рис. 1) уменьшением абсолютной величины керровского вращения (при одинаковой ориентации магнитных моментов знаки вращения для Fe и Gd противоположны). В случае s-поляризации вклад в эффект Керра поверхностного слоя является определяющим, что приводит к изменению знака вращения с ростом магнитного поля (рис. 1,*б*) в соответствии с изменением ориентации магнитного момента этого слоя (вставка к рис. 1,б). Различие зависимостей $\varphi(H)$ в случаях p- и s-поляризаций связано с тем, что угол падения света α (около 75°) был близок к углу Брюстера. Эксперименты, проведенные при комнатной температуре, показали, что при уменьшении угла α вклад поверхностного слоя Gd в керровское вращение уменьшается, а зависимость $\varphi(H)$ для s-поляризации становится подобной зависимости $\varphi(H)$ для p-поляризации. Гистерезис на кривых $\varphi(H)$ в полях меньших H_s, который хорошо согласуется по ширине с гистерезисом на зависимостях $M(H)$, связан с процессом перемагничивания пленки путем образования и движения доменных границ. Гистерезис, наблюдаемый в бо́льших полях и отсутствующий на зависимостях $M(H)$, обусловлен образованием и изменением в поле неоднородной НСК в поверхностном слое Gd.

Для пленки 3 поля H_t и H_s близки по величине. Поэтому оба гистерезиса сливаются на зависимостях $\varphi(H)$ в одну широкую петлю, а особенности, связанные с образованием НСК в поверхностном слое Gd, менее четко проявляются на фоне перемагничивания пленки путем зарождения и движения доменных границ. В пленке 4 поле H_t значительно меньше поля коэрцитивности. Поэтому уже в процессе образования доменов энергетически выгодной фазы при перемагничивании поверхностный слой Gd в этих доменах находится в неколлинеарном состоянии. В этом случае на зависимостях $\varphi(H)$ имеется обычный гистерезис, хорошо согласующийся с наблюдаемым на полевых зависимостях намагниченности.

Работа частично поддержана грантом NATO HTECH. LG 951449.

1. R. E. Camley and R. L. Stamps, *J. Phys. :Condens. Matter* **5**, 3727 (1993).
2. R. Zuberek, K. Fronc, H. Szymczak, A. Nabialek, T. Stobiecki, and J. Sokulski, *J. Magn. Magn. Mater.* **139**, 157 (1995).
3. K. Takanashi, Y. Kamiguchi, H. Fujimori, and M. Motokawa, *J. Phys. Soc. Jpn.* **61**, 3721 (1992).

Noncollinear spin configuration induced by magnetic field in surface gadolinium layer of multilayer Gd/Fe films

S. L. Gnatchenko, A. B. Chizhik, D. N.Merenkov, V.V.Eremenko, H. Szymczak, R. Szymczak, K. Fronc, and R. Zuberek

The comparison between the field dependences of the longitudinal Kerr effect and magnetization allows us to conclude that the noncollinear nonuniform magnetic state in the surface gadolinium layer of thin Gd/Fe multilayered films is formed by the magnetic field. The experimental results are deacribed in the framework of the theoretical model predicting the formation of a noncollinear spin configuration in the surface gadolinium layer as a result of the field-induced spin reorientation phase transition.