

Неколлинеарные магнитные структуры в пленке Fe/Si/Fe с ферромагнитным межслойным обменным взаимодействием

А. Б. Чижик, С. Л. Гнатченко

*Физико-технический институт низких температур им. Б. И. Веркина НАН Украины
пр. Ленина, 47, г. Харьков, 61103, Украина
E-mail: chizhik@ilt.kharkov.ua*

M. Baran, K. Fronc, R. Szymczak, and R. Zuberek

Institute of Physics, Polish Academy of Sciences, Al. Lotnikow 32/46, 02-668 Warsaw, Poland

Статья поступила в редакцию 22 января 2002 г.

Представлены результаты магнитных и магнитооптических исследований магнитных конфигураций в трехслойной пленке Fe(30Å)/Si(14Å)/Fe(30Å), в которой наблюдается ферромагнитный и биквадратный обмен между слоями железа, а также кубическая и одноосная анизотропия. Исследования проводились при температурах 300 и 10 К. Обнаружено, что в изученной системе в отсутствие магнитного поля наблюдается неколлинеарная магнитная структура, которая меняет свой вид с температурой. Проведен расчет устойчивых неколлинеарных конфигураций на основе модели, в которой предполагалось изменение с температурой как констант обменного взаимодействия, так и констант кубической и одноосной анизотропии в слоях железа. В результате сравнительного анализа экспериментальных данных и расчета определены величины углов, характеризующих направление намагниченности в слоях железа в устойчивых неколлинеарных конфигурациях. Показано, что в исследованной системе с температурой меняется как угол между направлениями намагниченности в двух слоях железа, так и направление легкой оси всей системы.

Представлено результати магнітних і магнитооптичних досліджень магнітних конфігурацій у трьохшаровій плівці Fe(30Å)/Si(14Å)/Fe(30Å), в якій спостерігається феромагнітний та биквадратний обмін між шарами заліза, а також кубічна та одноосна анізотропія. Дослідження проведено при температурах 300 та 10 К. Виявлено, що у системі, що вивчалася, у відсутності магнітного поля існує неколінеарна магнітна структура, яка змінює свій вигляд з температурою. Проведено розрахунок стійких неколінеарних конфігурацій на базі моделі, в якій припускалось зміну з температурою як констант обмінної взаємодії, так і констант кубічної та одноосної анізотропії у шарах заліза. У результаті порівняльного аналізу експериментальних даних та розрахунку визначено величини кутів, які характеризують напрямки намагніченості у шарах заліза у стійких неколінеарних конфігураціях. Показано, що у системі, що досліджувалася, з температурою змінюється як кут між напрямками намагніченості у двох шарах заліза, так і напрямком легкої осі всієї системи.

PACS: 75.70.Cn, 75.30.Et, 75.30.Kz

В последние годы [1–7] достаточно интенсивно проводится исследование неколлинеарных магнитных структур в слоистой системе Fe/Si. Это связано с многообразием как самих устойчивых конфигураций, так и фазовых переходов ме-

жду ними, которые наблюдаются в магнитном поле или при изменении температуры. Как известно, это многообразие определяется существованием билинейного и биквадратного обменного взаимодействия между слоями железа, конкурен-

цией между этими обманами, а также между обменом и магнитной анизотропией. К настоящему времени достаточно широко изучены слоистые структуры данного типа, в которых одновременно существуют антиферромагнитный и биквадратный обмен. Что касается слоистых структур Fe/Si, в которых наряду с биквадратным присутствует ферромагнитный обмен, то ранее магнитные структуры таких систем экспериментально практически не изучались. В связи с этим, представляют интерес результаты работы [8], в которой трехслойная пленка Fe(30Å)/Si(14Å)/Fe(30Å) была исследована с помощью ферромагнитного резонанса (ФМР) при температурах 300 и 4,2 К. Анализ угловых зависимостей ФМР, представленный в этой работе, показал наличие в системе ферромагнитного билинейного и биквадратного обменов. Было показано также наличие кубической и одноосной анизотропии в слоях железа, причем легкие оси одноосной анизотропии имели различные направления в этих двух слоях. Было обнаружено, что константы кубической и одноосной анизотропии имеют различные температурные зависимости в двух слоях железа, что связано с различием температурных коэффициентов расширения материалов пленки (Fe, Si) и подложки (GaAs).

Целью настоящей работы было проведение магнитных и магнитооптических исследований магнитных конфигураций в трехслойной пленке Fe(30Å)/Si(14Å)/Fe(30Å), в которой существуют ферромагнитный и биквадратный обмен, а также кубическая и одноосная анизотропия.

Представлены результаты исследования пленки Fe(30Å)/Si(14Å)/Fe(30Å), приготовленной

методом магнитронного распыления на подложке из монокристалла GaAs, вырезанной параллельно плоскости (001). Эксперименты проводили с помощью магнитооптической установки, в которой использовался меридиональный эффект Керра, и SQUID-магнитометра MPMS-5 Quantum Design для температур 300 и 10 К. В ходе магнитооптических экспериментов плоскополяризованный свет от He-Ne-лазера отражался от поверхности пленки, проходил через анализатор и попадал на фотоэлектронный умножитель. Внешнее магнитное поле прикладывалось одновременно в плоскости падения света и плоскости пленки (плоскость (001)). В результате экспериментов получены полевые зависимости угла вращения плоскости поляризации Φ отраженного от образца света для различных направлений магнитного поля в плоскости пленки. Величина угла вращения Φ в данной геометрии эксперимента пропорциональна проекции намагниченности системы M^* на направление магнитного поля. При проведении экспериментов на SQUID-магнитометре магнитное поле также прикладывалось в плоскости пленки. В результате магнитных измерений получены полевые зависимости M^* для различных направлений магнитного поля в плоскости пленки. Магнитооптические и магнитные полевые зависимости нормированы на величину угла вращения в состоянии насыщения Φ_S и на намагниченность насыщения M_S соответственно.

На рис. 1 показаны примеры полевых зависимостей Φ/Φ_S и M^*/M_S для двух направлений магнитного поля. Угол отсчитывали от направления [100]. Задачей настоящих исследований

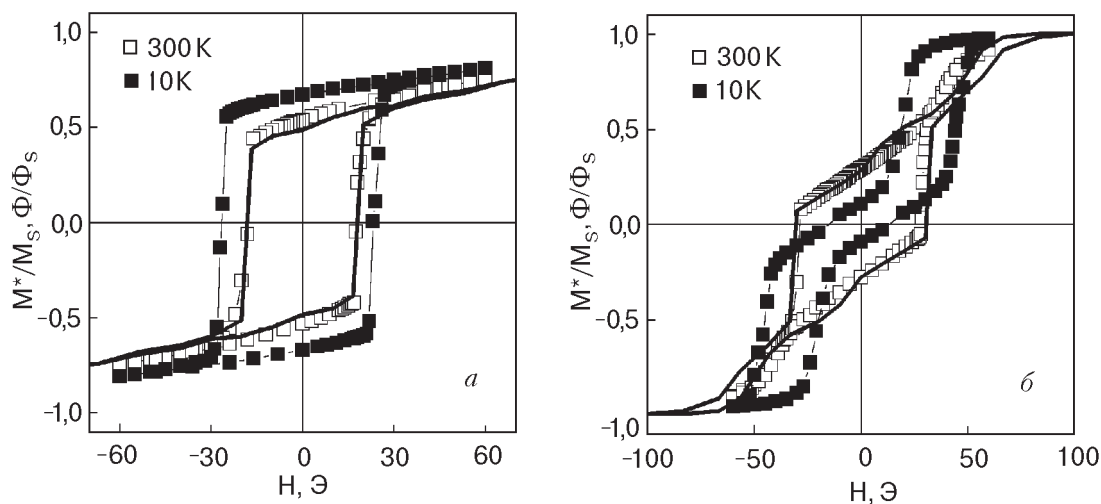


Рис. 1. Полевые зависимости проекции намагниченности на направление магнитного поля (точки) и угла вращения плоскости поляризации отраженного света (линии) для двух направлений магнитного поля в плоскости пленки: 0° (а); 90° (б). Магнитооптические зависимости измерены при $T = 300$ К.

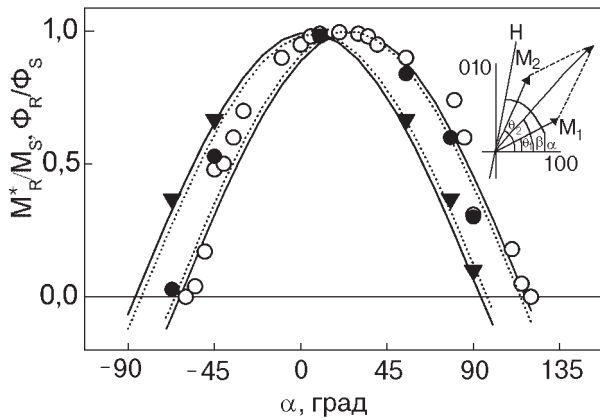


Рис. 2. Экспериментальные угловые зависимости M_R^*/M_S для температуры 300 К (○) и M_R^*/M_S для температур 300 К (●) и 10 К (▼). Пунктирные линии – аппроксимация экспериментальных результатов функцией $a \cos(\alpha - \beta)$. Сплошные линии – расчетные угловые зависимости проекции намагниченности устойчивого состояния системы на направление магнитного поля для 300 и 4,2 К.

было экспериментальное определение магнитной конфигурации системы в отсутствие магнитного поля. В связи с этим в ходе анализа полученных экспериментальных результатов наше внимание было направлено на изучение того, каким образом изменялась с углом α величина нормированной проекции намагниченности M_R^*/M_S и нормированного угла вращения плоскости поляризации Φ_R/Φ_S , измеренные в нулевом магнитном поле для двух исследованных температур.

На рис. 2 представлены зависимости от угла α M_R^*/M_S для температуры 300 К и M_R^*/M_S для 300 и 10 К. Экспериментальные угловые зависимости достаточно хорошо описываются функцией $a \cos(\alpha - \beta)$ (пунктирные линии на рис. 2). Для 300 К $a = 0,99$ и $\beta = 26^\circ$, а для 10 К $a = 0,99$ и $\beta = 7^\circ$. Анализируя экспериментальные результаты в предположении, что магнитные моменты внутри двух слоев железа упорядочены ферромагнитно и намагниченность в первом и втором слоях железа составляет углы ϕ_1 и ϕ_2 с направлением [100] (см. вставку на рис. 2), можно сделать следующий вы-

вод. То, что экспериментальные зависимости хорошо описываются функцией $a \cos(\alpha - \beta)$ свидетельствует о том, что для каждой температуры экспериментальные точки соответствуют проекциям намагниченности только одной устойчивой неколлинеарной конфигурации. В общем случае в исследуемой системе в отсутствие магнитного поля, в зависимости от того, в каком направлении прикладывалось магнитное поле при перемагничивании, может реализовываться одна из нескольких устойчивых (стабильных или метастабильных) угловых конфигураций [4]. В этом случае угловая зависимость проекции намагниченности не описывалась бы простой функцией \cos , так как в нулевом магнитном поле после перемагничивания в различных направлениях могли реализовываться различные угловые конфигурации.

Устойчивая угловая конфигурация в исследованной пленке описывается парой углов ϕ_1 и ϕ_2 , определяющих направления магнитных моментов в двух слоях железа. Для 300 К $(\phi_1 + \phi_2)/2 = 26^\circ$, а для 10 К $(\phi_1 + \phi_2)/2 = 7^\circ$. Таким образом, можно сделать вывод, что с уменьшением температуры устойчивая неколлинеарная структура поворачивается на угол 19° в плоскости (001).

Анализ полученных экспериментальных результатов проведен в рамках теоретической модели, в которой в соответствии с результатами работы [8] учитывалось ферромагнитное и биквадратное обменное взаимодействие между двумя магнитными слоями железа, а также кубическая и одноосная анизотропия в слоях железа.

Выражение для энергии рассматриваемой системы может быть записано в следующем виде:

$$E = I_1 \cos(\phi_1 - \phi_2) + I_2 \cos^2(\phi_1 - \phi_2) + K_{C1} d \cos^2 \phi_1 \sin^2 \phi_1 + K_{C2} d \cos^2 \phi_2 \sin^2 \phi_2 + K_{U1} d \sin^2(\phi_1 - \phi_1) + K_{U2} d \sin^2(\phi_2 - \phi_2), \quad (1)$$

где I_1 и I_2 – константы билинейного (ферромагнитного) и биквадратного обменного взаимодействия; K_{C1} и K_{C2} – константы кубической анизотропии в двух слоях железа; K_{U1} и K_{U2} – константы

Таблица

Величины констант, использованных в расчетах

T, К	K_{C1} , эрг/см ³	K_{C2} , эрг/см ³	K_{U1} , эрг/см ³	K_{U2} , эрг/см ³	I_1 , эрг/см ²	I_2 , эрг/см ²	ϕ_1 , град	ϕ_2 , град
300	53000	12000	282000	110000	0,3	0,003	45	22
4,2	80000	107000	268000	304000	0,31	0,008	45	25

одноосной анизотропии в двух слоях железа; d – толщина слоя железа; α_1 и α_2 – углы, которые определяют направления легких осей одноосной анизотропии в слоях железа (отсчитывались от направления [100]). При проведении расчетов использованы значения констант, полученные в работе [8] для температур 300 и 4,2 К (см. таблицу).

Численный анализ уравнения (1) показал, что в рассматриваемой системе существуют устойчивые магнитные конфигурации, которые описываются следующим набором углов, определяющих направления магнитных моментов в двух слоях железа: для 300 К $\alpha_1 = 30^\circ$ и $\alpha_2 = 24^\circ$ (соответственно $\beta_1 = (\alpha_1 - \alpha_2)/2 = 27^\circ$, $\beta_2 = \alpha_1 - \alpha_2 = 6^\circ$); для 4,2 К $\alpha_1 = 10^\circ$ и $\alpha_2 = 2^\circ$ (соответственно $\beta_2 = (\alpha_1 - \alpha_2)/2 = 4^\circ$, $\beta_1 = \alpha_1 - \alpha_2 = 12^\circ$). Таким образом, расчет показал, что с уменьшением температуры происходит разворот устойчивой конфигурации в плоскости (001) и увеличение угла между направлениями магнитного момента в двух слоях железа. Это может быть связано как с более сильным ростом константы биквадратного обмена по сравнению с ростом константы билинейного обмена с уменьшением температуры, так и с тем, что константы кубической и одноосной анизотропии имеют различные температурные зависимости в двух слоях железа.

Для сравнения результатов расчета с результатами эксперимента были построены угловые зависимости проекции суммарной намагниченности устойчивого состояния системы по формуле $[\cos(\alpha_1) \cos(\alpha_2)]/2$ для двух температур, для которых проводился расчет (сплошные линии на рис. 2). При низких температурах результаты эксперимента, полученные для 10 К, сравнивались с результатами расчета, полученными для 4,2 К, так как константы, необходимые для проведения расчетов, были получены в работе [8] только для температур 4,2 и 300 К. Достаточно хорошее соответствие угловых экспериментальных и расчетных зависимостей свидетельствует о том, что вид неколлинеарных конфигураций в исследованной слоистой системе близок к тем, что были получены в результате расчетов. Наблюдаемые в эксперименте особенности адекватно отражают конкретный вид устойчивой угловой конфигурации, а также ее изменение и поворот с температурой, которые были получены в расчете.

В заключение необходимо отметить следующее. В настоящей работе проведены экспериментальные исследования устойчивых конфигураций в трехслойной структуре Fe/Si/Fe с ферромагнитным и биквадратным обменом. Впервые изучалась слоистая структура, в которой ферромагнит-

ный и биквадратный обмены сосуществуют со сложной системой кубической и одноосной анизотропий. На основе модели, в которой предполагалось изменение с температурой как констант обменного взаимодействия, так и констант кубической и одноосной анизотропий в слоях железа, был проведен расчет устойчивых неколлинеарных конфигураций. Сравнение результатов расчета с экспериментом показало, что в исследованной системе в отсутствие магнитного поля существует неколлинеарная структура, которая меняется с температурой как угол между направлениями намагниченности в двух слоях железа, так и направление легкой оси всей системы.

Статья посвящается 70-летию юбилею Виктора Валентиновича Еременко.

1. E. E. Fullerton and S. D. Bader, *Phys. Rev.* **B53**, 5112 (1996).
2. Y. Saito, K. Inomata, and K. Yusu, *Jpn. J. Appl. Phys.* **35**, L100 (1996).
3. J. Kohlhepp, F. J. A. den Broeder, M. Valker, and A. van der Graaf, *J. Magn. Magn. Mater.* **165**, 431 (1997).
4. A. B. Chizhik, K. Fronc, S. L. Gnatchenko, D. N. Merenkov, and R. Zuberek, *J. Magn. Magn. Mater.* **213**, 19 (2000).
5. А. Б. Чижик, Д. Н. Меренков, С. Л. Гнатченко, *ФНТ* **27**, 886 (2001).
6. G. J. Strijkers, J. T. Kohlhepp, H. J. M. Swagten, and W. J. M. de Jonge, *Phys. Rev. Lett.* **84**, 1812 (2000).
7. R. R. Gareev, D. E. Burgler, M. Buchmeier, D. Oliggs, R. Schreiber, and P. Grunberg, *Phys. Rev. Lett.* **87**, 157202 (2001).
8. R. Zuberek, M. Gutowski, K. Fronc, E. Mosiniewicz-Szablewska, W. Paszkowicz, E. Molins, A. Roig, and H. Szymczak, *Mater. Sc. Forum* **373**, 141 (2001).

Noncollinear magnetic structures in Fe/Si/Fe film with ferromagnetic interlayer exchange interaction

A. B. Chizhik, S. L. Gnatchenko, M. Baran, K. Fronc, R. Szymczak, and R. Zuberek

The results of magnetic and magneto-optical studies of the magnetic configurations in the three-layer Fe(30Å)/Si(14Å)/Fe(30Å) film are presented. Ferromagnetic and biquadratic exchanges between the layers of iron, and also cubic and uniaxial anisotropy take place in the film. The research was carried out at the temperatures 300 and 10 K. It is revealed that in the structure investigated in the absence of a

magnetic field there is a noncollinear magnetic structure, which changes with temperature. The magnetic configuration is calculated using the model, in which both the constants of interlayer exchange interaction and the constants of cubic and uniaxial anisotropy in the layers of iron were assumed to change with temperature. From the comparative analysis of experimental and calculated results the angles describing

magnetization directions in the iron layers are determined in the steady noncollinear configurations. It is shown that the angle between the magnetization directions in two layers of iron and the direction of the easy axis of the system varies with temperature in the system investigated.