

Влияние магнитного поля на межслоевое взаимодействие в пленках $(\text{Co}/\text{Si}/\text{Gd}/\text{Si})_n$

Г. С. Патрин^{*1)}, В. О. Васьковский⁺, Д. А. Великанов[□], А. В. Свалов⁺

^{*} Красноярский государственный университет, 660041 Красноярск, Россия

⁺ Уральский государственный университет, 620083 Екатеринбург, Россия

[□] Институт физики им. Л. В. Киренского Сибирского отделения РАН, 660036 Красноярск, Россия

Поступила в редакцию 26 декабря 2001 г.

На температурных зависимостях намагниченности многослойных пленок $(\text{Co}/\text{Si}/\text{Gd}/\text{Si})_{20}$ в окрестности температуры компенсации обнаружена особенность, чувствительная к внешнему магнитному полю. Обсуждаются возможные механизмы, ответственные за необычное поведение намагниченности.

PACS: 68.65.+g, 73.40.Sx, 75.70.Fr

В классе многослойных магнитных пленок значительный интерес представляют структуры с полупроводниковой прослойкой, поскольку в этом случае можно управлять магнитным состоянием всей системы, изменяя концентрацию носителей электрического заряда в полупроводнике, либо варьированием температуры, либо внедрением легирующих примесей, либо путем оптического облучения. До недавнего времени основное внимание при исследовании пленок такого рода было сосредоточено на системах, содержащих магнитные слои из железа и немагнитные промежуточные слои из кремния или его сплава с другими элементами. В этом случае основной эффект, отличающий эти пленки от пленок с металлической прослойкой, состоит в зависимости межслоевого обмена от температуры, при этом может иметь место как температурно-индуцированное усиление межслоевого обменного взаимодействия [1, 2], так и смена его знака при изменении температуры, например, когда в качестве материала прослойки выступает полупроводник $\alpha\text{-ZnSe}$ [3]. Можно также отметить обнаруженный в пленках $\text{Fe}/\text{Si}/\text{Fe}$ эффект фотоиндуцированного изменения магнитного состояния [4, 5].

Можно ожидать, что включение в слоистую структуру слоя редкоземельного металла наряду со слоем $3d$ -металла за счет механизмов конкурирующих взаимодействий расширит многообразие наблюдаемых эффектов. Так, в системе Gd/Co [6] в зависимости от технологии приготовления пленок и периода структуры на температурной кривой намагниченности может наблюдаться точка компенсации

(T_k), что вообще-то типично для однородных (не слоистых) $4f$ – $3d$ -сплавов [7]. Однако и в случае, когда слои Co и Gd разделены небольшой кремниевой прослойкой, наблюдается точка компенсации по намагниченности [8]. Ясно, что в области температур, где из-за конкуренции взаимодействий происходит почти полная компенсация вкладов от различных магнитных слоев, можно путем небольших внешних воздействий существенно влиять на свойства всей системы.

В настоящей работе мы сообщаем об обнаружении влияния магнитного поля на межслоевое обменное взаимодействие в пленках $(\text{Co}/\text{Si}/\text{Gd}/\text{Si})_n$.

Исследованные пленки были получены методом ионного радиочастотного распыления [6]. В качестве материала подложки использовалось стекло. Образцы представляли собой последовательность двадцати блоков $(\text{Co}/\text{Si}/\text{Gd}/\text{Si})$ и были сверху и снизу защищены кремнием толщиной $t_{\text{Si}} = 200 \text{ \AA}$. Толщина каждого из слоев кобальта составляла $t_{\text{Co}} = 30 \text{ \AA}$, гадолиния – $t_{\text{Gd}} = 75 \text{ \AA}$, а толщина кремниевой прослойки менялась в интервале $t_{\text{Si}} = 0\text{--}10 \text{ \AA}$. Все толщинные параметры задавались по времени напыления соответствующих слоев при известных скоростях осаждения разных материалов. С помощью методики малоуглового рентгеновского рассеяния зафиксирован слоистый характер пленок и подтверждены номинальные значения периода структуры (с погрешностью $\pm 2 \text{ \AA}$). Кроме того, рентгеновские и электронномикроскопические исследования пленок показали, что по своей структуре они близки к аморфным. Измерения намагниченности были выполнены на опсанном в работе [9] СКВИД-магнетометре. При выполнении температурных и полевых измерений перед

¹⁾ e-mail: pat@iph.krasnoyarsk.su

охлаждением образец помещался в демагнетизатор и затем охлаждался в нулевом магнитном поле. Магнитное поле лежало в плоскости образца.

Ранее было показано [6], что в пленках Gd/Co, близких по соотношению толщин слоев к образцам, исследуемым в данной работе, температура компенсации существенно зависит от величины периода многослойной структуры, и для температур $T < 200$ К компенсация наблюдается лишь при условии $t_{\text{Gd}} + t_{\text{Co}} \geq 130$ Å. В нашем случае при периоде структуры 105 Å этой особенности нет, что и видно на рис.1а. Создание же кремниевой прослойки толщи-

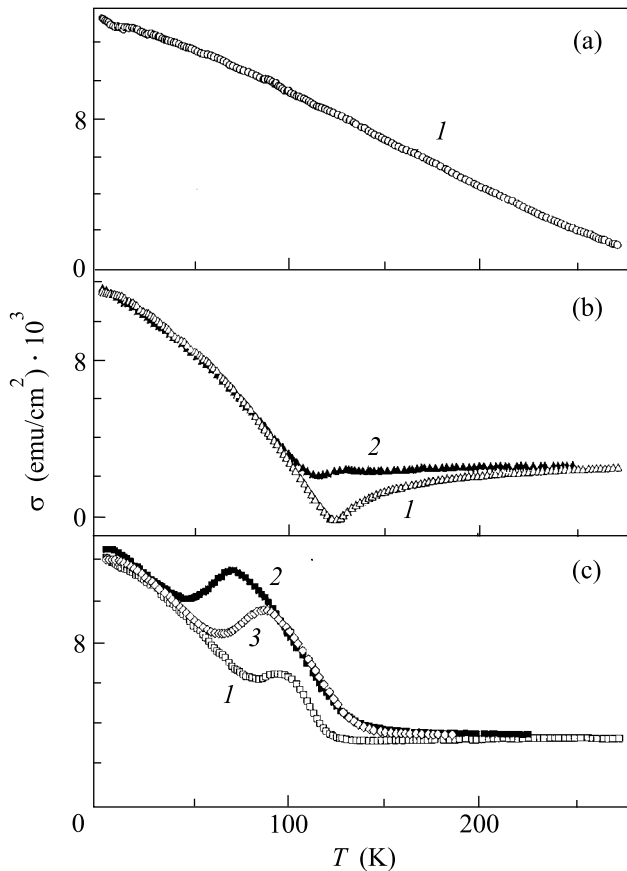


Рис.1. Температурные зависимости намагниченности многослойных пленок $(\text{Gd}/\text{Si}/\text{Co}/\text{Si})_{20}$: (a) – $t_{\text{Si}} = 0$ Å, (b) – $t_{\text{Si}} = 5$ Å, (c) – $t_{\text{Si}} = 10$ Å. Кривые сняты в полях (Э): 1 – $H = 200$, 2 – $H = 1000$, 3 – $H = 500$. Для всех пленок $t_{\text{Co}} = 35$ Å, $t_{\text{Gd}} = 70$ Å

ной в единицы ангстрем приводит в этом случае к появлению точки компенсации (рис.1b, кривая 1). Однако неожиданным оказалось то, что поведение намагниченности в окрестности температуры компенсации существенно зависит от магнитного поля, хотя величина магнитного поля достаточно мала. Так, в поле $H = 1$ кЭ для пленки с $t_{\text{Si}} = 5$ Å температура

компенсации в традиционном понимании отсутствует, а температурная зависимость намагниченности принимает вид, приведенный на рис.1b, кривая 2. Здесь следует обратить внимание на образование небольшого максимума на температурной зависимости и сдвиг минимума намагниченности в область низких температур. Ситуация в большей степени нетривиальной оказалась для пленки с $t_{\text{Si}} = 10$ Å (см. рис.1c). На этой пленке минимум намагниченности (но не до нуля), который можно связать с точкой компенсации, наблюдался до полей порядка 100 Э. Видно, что с увеличением магнитного поля растет максимум на температурной зависимости намагниченности, и он смещается в область низких температур.

Мы сняли полевые зависимости намагниченности в гелиевых температурах. На рис.2 видно, что

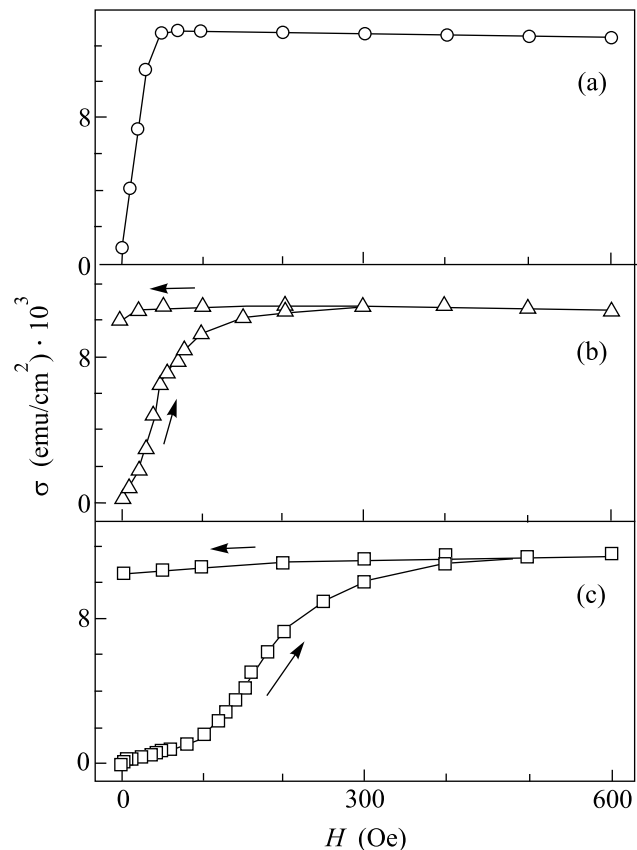


Рис.2. Полевые зависимости намагниченности пленок $(\text{Gd}/\text{Si}/\text{Co}/\text{Si})_{20}$: (a) – $t_{\text{Si}} = 0$ Å, (b) – $t_{\text{Si}} = 5$ Å, (c) – $t_{\text{Si}} = 10$ Å, $T = 4.2$ К. Стрелками указаны направления изменения магнитного поля

при низких температурах у пленок с $t_{\text{Si}} = 0$ Å и $t_{\text{Si}} = 5$ Å характер намагничивания имеет вид, подобный ферромагнетику, при этом поля насыщения равны $H_s \approx 100$ Э и $H_s \approx 300$ Э, соответственно. В

случае пленки с $t_{Si} = 10 \text{ \AA}$ на кривой намагничивания имеет место излом в окрестности $H \cong 100 \text{ Э}$, а поле насыщения равно $H_s \approx 500 \text{ Э}$. Для этой пленки обратный ход намагниченности почти не отклоняется от прямой линии. Если теперь сопоставить эти результаты с температурным поведением намагниченности, то нельзя не заметить, что в области температуры компенсации особенность намагниченности, индуцированная магнитным полем наиболее ярко проявляется в полях, превосходящих поле насыщения, а именно в той области, где, казалось бы, уже не должно быть каких-либо изменений. Как видно из рис.1 и рис.2, значения намагниченностей насыщения при низких температурах для пленок как с кремниевой прослойкой, так и для пленки Gd/Co с хорошей степенью точности совпадают, что свидетельствует об одинаковом вкладе редкоземельной подсистемы ниже температуры особенности, который в этой области является доминирующим. Для области температур $T > 120 \text{ K}$, где преобладает вклад кобальтовой подсистемы, для пленок с $t_{Si} = 5 \text{ \AA}$ и $t_{Si} = 10 \text{ \AA}$ (рис.1) намагниченности также практически совпадают.

Все эти экспериментальные результаты не укладываются в обычную схему описания двухподрешеточного ферримагнетика, имеющего точку компенсации. Наличие максимума в окрестности ожидаемой температуры компенсации можно было бы объяснить, предположив, например, что во взаимодействии редкоземельных слоев с соседними слоями кобальта через слой кремния существует вклад, который приводит к образованию не строго антиферромагнитной конфигурации, а к скошенной магнитной структуре. Тогда в целом магнитная структура представляет собой конус магнитных моментов слоев редкоземельной подсистемы, суммарный момент которого направлен антипараллельно суммарному магнитному моменту слоев кобальта. При увеличении температуры, на фоне уменьшающегося суммарного момента редкоземельной подсистемы, сначала происходит “выключение” этого взаимодействия и, как результат, схлопывание конуса редкоземельной подсистемы, а затем процесс идет по хорошо известному сценарию. Такое поведение для многослойных пленок является вполне реальным. Как известно [10], учет биквадратичного обменного взаимодействия (J_2) наряду с билинейным обменом (J_1) может привести к возникновению скошенной магнитной структуры. В многослойных пленках механизм, определяющий появление биквадратичного вклада в обменном взаимодействии, может быть связан с флуктуационным изменением толщины промежуточного немагнитного слоя [11]. Также находит

свое объяснение и предполагаемое различие в температурных зависимостях обоих обменных параметров [12], причем для многослойных магнитных пленок величины J_1 и J_2 могут быть сравнимы по величине.

В нашем случае наблюдаемые экспериментально особенности естественно связать с межслоевым взаимодействием между магнитными слоями и здесь сильная зависимость этого взаимодействия от магнитного поля остается пока необъясненной. Ясно, что эффект не может быть связан с магнитной кристаллографической анизотропией материалов, образующих магнитные слои. Во-первых, эти слои находятся в структурном аморфном состоянии, а во-вторых, в металлическом состоянии Co и Gd обладают сильной локальной магнитной анизотропией [7] и используемых магнитных полей явно недостаточно для перестройки их магнитной структуры. Можно предположить, что константа J_2 обязана своим происхождением появлению полупроводниковой прослойки и именно J_2 является магниточувствительным параметром. Для выяснения этого вопроса будет проведено более полное исследование.

Настоящее исследование выполнено при частичной поддержке Award # RES-005 of the U.S. Civilian Research & Development Foundation for the Independent States of the Former Soviet Union (CRDF) и Федеральной программы “Интеграция”.

1. S. Toscano, B. Briner, H. Hopster, and M. Landolt, *JMMM* **117**, L301 (1992).
2. E. E. Fullerton and S. D. Bader, *Phys. Rev.* **B53**, 5112 (1996).
3. P. Walser, M. Hunziker, T. Speck, and M. Landolt, *Phys. Rev.* **B60**, 4082 (1999).
4. J. E. Mattson, E. E. Fullerton, S. Kumar et al., *J. Appl. Phys.* **75**, 6169 (1994).
5. Г. С. Патрин, Н. В. Волков, В. П. Кононов, *Письма в ЖЭТФ* **103**, 287 (1998).
6. В. О. Васьковский, Д. Гарсия, А. В. Свалов и др., *ФММ* **86**, 48 (1988).
7. K. N. R. Taylor and M. I. Darby, *Physics of Rare Earth Solids*, Chapman and Hall Ltd, London, 1972.
8. Д. Н. Меренков, А. Б. Чижик, С. Л. Гнатченко и др., *ФНТ* **27**, 188 (2001).
9. Г. С. Патрин, Д. А. Великанов, Г. А. Петраковский, *ЖЭТФ* **103**, 234 (1993).
10. Э. Л. Нагаев, *Магнетика со сложными обменными взаимодействиями*, М.: Наука, 1988.
11. J. S. Slonczewski, *Phys. Rev. Lett.* **67**, 3172 (1991).
12. Jun-Zhong Wang, Bo-Zang Li, and Zhan-Ning Hu, *Phys. Rev.* **B62**, 6570 (2000).