

Магнитные свойства трехслойных пленок Fe/Si/Fe

© Г.С. Патрин^{*,**}, С.Г. Овчинников^{*,**}, Д.А. Великанов^{**}, В.П. Кононов^{**}

* Красноярский государственный университет,
660041 Красноярск, Россия

** Институт физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук,
660036 Красноярск, Россия

E-mail: pat@iph.krasnoyarsk.su

(Поступила в Редакцию 10 января 2001 г.)

Представлены экспериментальные результаты исследования низкотемпературного поведения намагниченности трехслойных пленок Fe/Si/Fe. Обнаружено, что при $T < 30$ К ход кривых намагниченности зависит от терромагнитного состояния системы. Обсуждаются возможные механизмы взаимодействия между слоями железа.

Настоящие исследования ведутся при финансовой поддержке научной программы "Университеты России — фундаментальные исследования".

Интерес к многослойным магнитным системам обусловлен тем, что искусственным способом удастся создавать материалы с заданными свойствами [1]. Это достигается подбором материалов "основного магнитного" и промежуточного слоев, их толщин, а также способами укладки. Ситуация, когда в качестве промежуточного слоя берется полупроводниковый материал, отличается тем, что появляются возможности управления свойствами промежуточных слоев путем внешних воздействий (примеси, различные виды излучений, температура, поля и т. д.).

Пленки с кремниевой прослойкой (толщиной t_{Si}) выделяются тем, что их можно относительно просто получать различными методами, а главное они обладают необычными свойствами в легко достижимом диапазоне управляющих параметров. Ранее [2] было обнаружено, что при температурах $T > 40$ К имеет место температурно-зависимое изменение параметра обменного взаимодействия; методом эффекта Керра было зарегистрировано фотоиндуцированное изменение межслоевого обменного параметра [3,4]. Методом электронного магнитного резонанса [5] было исследовано изменение внутреннего эффективного магнитного поля в зависимости от толщины кремниевой прослойки и показано, что при $T \geq 80$ К для пленок с $t_{Si} > 10$ Å фотоиндуцированный вклад в магнитное взаимодействие носит антиферромагнитный характер.

В данной работе приведены результаты исследований низкотемпературного поведения намагниченности пленок Fe/Si/Fe в малых магнитных полях с помощью СКВИД-техники.

Трехслойные пленки Fe/Si/Fe были получены методом молекулярно-лучевой эпитаксии на установке "Ангара", модернизированной для напыления магнитных материалов [6]. В одном цикле напыления приготавливались четыре образца с различными толщинами кремниевой прослойки. Во всех исследованных образцах толщина слоя железа (t_{Fe}) составляла 50 Å. Контроль толщины осуществлялся с помощью кварцевого измерителя

толщины и скорости роста пленок. В каждом цикле напыления изготавливалась одна эталонная пленка толщиной $t_{Fe} = 100$ Å. Пленки сравнивались между собой также по интенсивности СВЧ поглощения на предмет различия массы магнитоактивного вещества. Измерения намагниченности проводились на СКВИД-магнетометре, описанном в работе [7]. Магнитное поле лежало в плоскости пленки.

При проведении всех предыдущих измерений [2–4] использовались магнитные поля порядка 1 кОе, при этом основной механизм, который считался ответственным за наблюдаемый эффект, связывался с изменением концентрации носителей тока в полупроводниковой прослойке, будь то изменения либо с температурой, либо при оптическом облучении. При температуре жидкого азота в равновесных условиях все электроны проводимости в кремнии вымерзали, и регистрировался сигнал от слоев железа, которые показывали практически независимое ферромагнитное поведение. Как нами ранее было получено из измерений параметров магнитного резонанса [5], вследствие зависимости от толщины кремниевой прослойки имеет место сдвиг величины резонансного поля (рис. 1), связанный с осциллирующей параметром обменного взаимодействия между слоями железа. В области $t_{Si} < 10$ Å слои железа взаимодействуют ферромагнитно, а в области $t_{Si} > 10$ Å они связаны антиферромагнитно. Эти результаты воспроизводились как при $T = 300$ К, так и при $T = 80$ К, хотя в последнем случае эффект был значительно меньше по величине, но все основные особенности повторялись.

На рис. 2 приведены температурные зависимости разностей намагниченности $\delta\sigma(T) = \sigma(T, 0) - \sigma(T, t_{Si})$ эталонной и исследуемой пленок системы Fe/Si/Fe, полученные при измерении в поле 250 Ое в режиме отогрева образца, но при разных толщинах кремния и разных условиях охлаждения образца. Величины магнитного поля 250 Ое было достаточно для того, чтобы образец находился в насыщенном состоянии при всех температурах. Во-первых, следует обратить внимание на то, что во всем

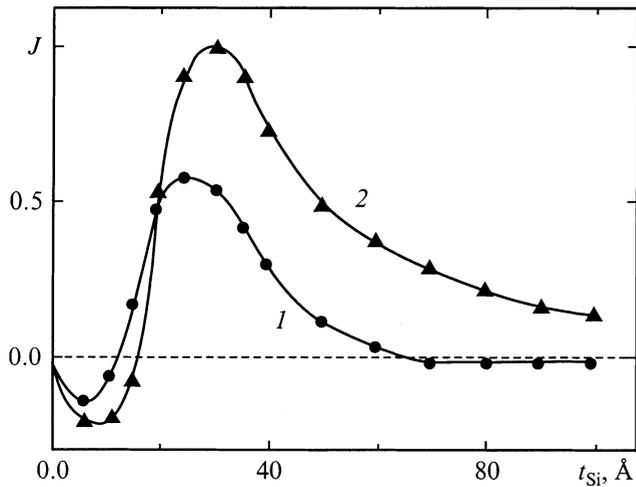


Рис. 1. Нормированный сдвиг величины молекулярного поля в зависимости от толщины кремниевой прослойки в пленке Fe/Si/Fe. $T = 80$ (1) и 300 К (2).

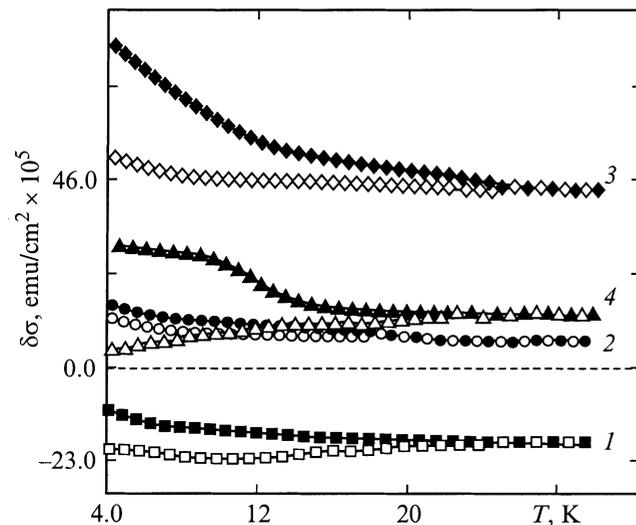


Рис. 2. Температурные зависимости изменения намагниченности на единицу площади $\delta\sigma(T, t_{\text{Si}}) = \sigma(T, 0) - \sigma(T, t_{\text{Si}})$ при разных толщинах кремниевой прослойки. t_{Si} : 5 (1), 10 (2), 20 (3) и 30 Å (4). Светлые значки — охлаждение в поле $H = 0$ Ое, темные значки — в поле $H = 250$ Ое.

диапазоне температур $T = 30\text{--}300$ К температурные срезы величины $\delta\sigma(T = \text{const})$ в зависимости от t_{Si} коррелируют с зависимостями, приведенными на рис. 1. Эти результаты не зависят от того, в поле или без поля охлаждался образец. Во-вторых, при $T < 30$ К наблюдается заметное различие хода кривых, полученных в разных условиях охлаждения. Также обращает на себя внимание тот факт, что при фиксированной температуре величина $\delta\sigma(H_c = 250 \text{ Ое}) - \delta\sigma(H_c = 0 \text{ Ое})$ (здесь H_c — поле охлаждения) в зависимости от t_{Si} коррелирует с зависимостями на рис. 1.

Для пленки с $t_{\text{Si}} = 20 \text{ \AA}$, у которой антиферромагнитная связь между слоями железа максимальна, на рис. 3 приведены кривые намагничивания, полученные при $T = 4.2$ К как при увеличении магнитного поля (кривая 1), так и при уменьшении его (кривая 2). В этом эксперименте сначала измерялся сигнал от пленки на подложке, затем магнитная пленка удалялась, измерялся сигнал от подложки и в качестве намагниченности бралась разность этих кривых. Видно, что при увеличении магнитного поля проявляются два характерных поля: $H_1 \approx 160$ Ое, где имеет место излом начального хода кривой, и $H_2 \approx 240$ Ое, где кривая выходит на насыщение. При движении по полю в обратном направлении особенность при значении поля H_1 не проявляется. Поскольку в данной геометрии эксперимента намагниченность должна лежать в плоскости пленки, кривая 1 может реализоваться в случае, если присутствует магнитная кристаллографическая анизотропия, которая конкурирует с анизотропией формы. Такое поведение при рассмотрении в рамках модели двухподрешеточного антиферромагнетика возможно в случаях, либо когда ось анизотропии перпендикулярна плоскости пленки, либо при наличии внутрислойной анизотропии. Тогда поле H_1 можно рассматривать как поле спин-флопа, а поле H_2 — как поле после схлопывания подрешеток. Обратный ход намагниченности можно интерпретировать как индуцированный магнитным полем ферромагнетизм или как индуцирование магнитным полем метастабильного состояния, когда для проявления магнитной анизотропии необходимо преодолеть некоторый энергетический барьер.

Все эти экспериментальные факты кажутся неожиданными при предположении, что носителями взаимодействия между слоями железа являются только электроны проводимости из объема кремниевой прослойки, поскольку при низких температурах переносчиков взаимодействия практически не должно быть.

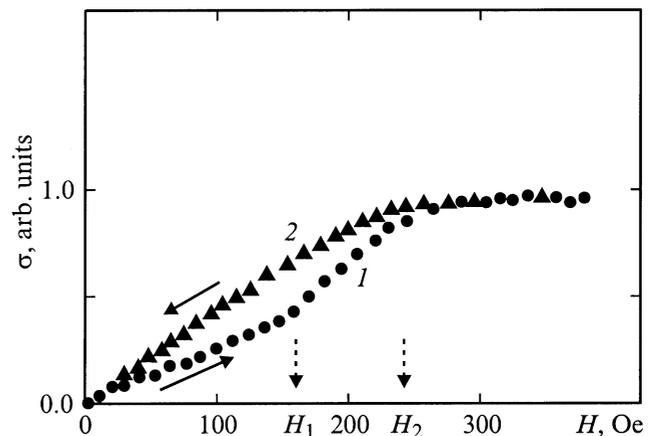


Рис. 3. Зависимости приведенной намагниченности от магнитного поля. 1 — при увеличении магнитного поля, 2 — при уменьшении магнитного поля. $T = 4.2$ К.

Для объяснения низкотемпературных результатов по намагниченности пленок Fe/Si/Fe необходимо ответить на два вопроса: что является переносчиком взаимодействия и каков механизм этого взаимодействия. Как известно [8], на границе металл–полупроводник образуется переходная область типа силицид металла–кремний. По данным электронной оже-спектроскопии для контакта кремния с *d*-элементами эта переходная область может составлять от единиц до двух десятков ангстрем (например, для Ni она составляет 7–14 Å, а для Pd — приблизительно 3 Å). По данным [9], соединение FeSi является почти ферромагнитным полупроводником (плохой металл по величине, но полупроводник по температурной зависимости электропроводности). Для того чтобы это соединение проявило действительно ферромагнитное поведение, плотность состояний у него недостаточно велика. Однако на границе с металлом со стороны полупроводника образуется обогащенная электронами область за счет оттока электронов из области металла. Нетрудно оценить [8], что при суммарной толщине прослойки порядка 10 Å весь ее объем будет состоять из перекрывающихся переходных областей на границах с обоими слоями железа. При этом электронной плотности оказывается достаточно для возникновения ферромагнитного порядка в системе. Если в системе порядок образуется по схеме волны спиновой плотности, то дальнейшее увеличение толщины прослойки приведет к смене магнитного порядка. Видимо, $t_{Si} \sim 20 \text{ Å}$ можно рассматривать как период осцилляций в системе с низкой плотностью электронных состояний. При дальнейшем увеличении t_{Si} дальний порядок в системе начинает разрушаться из-за недостаточной плотности состояний.

Нельзя исключать и возможность осуществления при низких температурах межслоевой связи через состояния "хвостов" зон в полупроводнике. Как отмечается в работе [2], кремниевая прослойка, полученная по технологии испарения, находится в аморфном состоянии и область ближнего порядка составляет около 16 Å. Если реализуется такой сценарий, то кремний содержит большое количество дефектов и при рассмотрении электронных процессов необходимо учитывать состояния "хвостов" зон [10]. В аморфном кремнии обнаруживается увеличение подвижности носителей тока при температурах $T < 30 \text{ К}$. Установлено, что для этих процессов энергии активации находятся в интервале 1–2 meV. В такой ситуации перенос взаимодействия может осуществляться через состояния "хвостов" зон. При понижении температуры эффект уменьшения концентрации переносчиков взаимодействия может компенсироваться за счет увеличения длины свободного пробега. Этот механизм может обеспечить сохранение памяти о спиновом состоянии слоя, который этот электрон покинул. Для установления конкретного механизма, обеспечивающего установление дальнего порядка в трехслойной системе, необходимы более детальное исследование электронных свойств на границе раздела железо–кремний и определение роли хвостов зон состояний в процессах переноса носителей тока.

Список литературы

- [1] P. Grunberg, R. Schreiber, Y. Pang, M.N. Brodsky, H. Sowers. Phys. Rev. Lett. **57**, 2442 (1986).
- [2] S. Toscano, B. Briner, H. Hopster, M. Landolt. J. Magn. Mater. **114**, L6 (1992).
- [3] J.E. Mattson, S. Kummar, E.E. Fullerton, S.R. Lee, C.H. Sowers, M. Grimsdith, S.D. Bader, F.T. Parker. Phys. Rev. Lett. **71**, 185 (1993).
- [4] J.E. Mattson, E.E. Fullerton, S. Kumar, S.R. Lee, C.H. Sowers, M. Grimsditch, S.D. Bader. J. Appl. Phys. **75**, 6169 (1994).
- [5] Г.С. Патрин, Н.В. Волков, В.П. Кононов. Письма ЖЭТФ **68**, 287 (1998).
- [6] Е.Г. Елисева, В.П. Кононов, В.М. Попел, Е.В. Тепляков, А.Е. Худяков. ПТЭ **2**, 141 (1986).
- [7] Г.С. Патрин, Д.А. Великанов, Г.А. Петраковский. ЖЭТФ **103**, 234 (1993).
- [8] Б. Бехштедт, Р. Эндерлайн. Поверхности и границы раздела полупроводников. Мир, М. (1990). 484 с.
- [9] M. Imada, A. Fujimori, Y. Tokura. Rev. Mod. Phys. **70**, 1039 (1998).
- [10] В. Спир. В кн.: Аморфный кремний и родственные материалы / Под ред. Х. Фришше. Мир, М. (1991). С. 315.