

ВЛИЯНИЕ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА МАГНИТНЫЙ РЕЗОНАНС В ТРЕХСЛОЙНЫХ ПЛЕНКАХ Fe/Si/Fe

Г.С.Патрин¹⁾, Н.В.Волков⁺, В.П.Кононов⁺

Красноярский государственный университет
660041 Красноярск, Россия

⁺ Институт физики им.Л.В.Киренского СО РАН
660036 Красноярск, Россия

Поступила в редакцию 3 июля 1998 г.

В трехслойных пленках системы Fe/Si/Fe обнаружено фотоиндуцированное изменение параметров магнитного резонанса. Исследованы зависимости сдвигов резонансного поля, а также характер межслоевого взаимодействия от температуры, освещенности пленок и толщины кремниевой прослойки. Установлено, что при низких температурах фотоиндуцированный вклад в константу обменного взаимодействия между слоями железа является антиферромагнитным.

PACS: 75.70.-i, 76.50.+g, 78.20.Ls

Создание многослойных магнитных пленок открыло широкие перспективы для конструирования магнитных материалов с заданными свойствами. Возможность варирования различными химическими компонентами, а также толщинами и способами их укладки приводит подчас к неожиданным эффектам. В многослойных металлических пленках с немагнитной прослойкой главными особенностями являются гигантское магнитосопротивление и осциллирующий характер обменного параметра в зависимости от толщины немагнитной прослойки [1]. Характерный период пространственных вариаций для этих пленок составляет 10 – 20 Å, а величина осцилляций зависит от материала прослойки, то есть, по сути, от особенностей функции плотности состояний электронов проводимости. Разнообразие наблюдаемых эффектов еще более обогащается при использовании комбинированных способов воздействия на вещество. Весьма заманчивым в этом плане представляется изучение систем с полупроводниковой прослойкой, поскольку здесь можно управлять концентрацией носителей электрического заряда либо изменением температуры, либо внедрением легирующих примесей, либо путем оптического облучения.

В настоящей работе сообщаются результаты исследований по изменению магнитного состояния в пленочной системе Fe/Si/Fe при оптическом облучении, регистрируемого методом электронного магнитного резонанса.

Трехслойные пленки Fe/Si/Fe были получены методом молекулярно-лучевой эпитаксии на установке "Ангара", модернизированной для напыления магнитных материалов [2]. В одном цикле напыления приготавливалось четыре образца с различными толщинами кремниевой прослойки (t_{Si}). Во всех исследованных образцах толщина слоя железа составляла 50 Å. Контроль толщины осуществлялся с помощью кварцевого измерителя толщины и скорости роста пленок. В каждом цикле напыления изготавливалась одна эталонная пленка с толщиной железа $t_{Fe} = 100$ Å. Все эти пленки сравнивались между собой также по интенсивности СВЧ поглощения на предмет различия массы магнитоактивного вещества. Исходя из параметров

¹⁾ e-mail: pat@iph.krasnoyarsk.su

магнитного резонанса, наилучшие пленки получались на слюдяной подложке. Измерения параметров магнитного резонанса проводились на установке, описанной в [3]. Частота СВЧ излучения была $f = 35$ ГГц. Магнитное поле лежало в плоскости пленки. Источником оптического излучения служил Ag-лазер, генерирующий в области $\lambda = 0.49 - 0.514$ мкм.

Из данных по прямому измерению намагниченности на СКВИД-манитометре и магнитооптического эффекта Керра установлено [4], что ферромагнитные слои железа при комнатной температуре взаимодействуют антиферромагнитно, при охлаждении до $T \geq 80$ К они становятся практически не связанными и вся система показывает ферромагнитное поведение. Облучение лазером ($\lambda = 0.5145$ мкм) приводит к тому, что система вновь проявляет признаки антиферромагнитной связи между слоями железа.

Поскольку условия магниторезонансного поглощения определяются эффективными внутренними полями, то по сдвигу резонансного поля пленки с полупроводниковой прослойкой относительно пленки без прослойки можно судить о величине и знаке константы обменной связи [5] как при оптическом облучении, так и без него.

Рис.1 иллюстрирует температурное поведение параметров магнитного резонанса эталонной пленки (кривые 1, 3) и пленки с толщиной кремниевой прослойки $t_{Si} = 20$ Å (кривые 2, 4). Видно, что наличие кремниевого слоя приводит к заметному изменению резонансных условий. С ростом температуры растет разница величин резонансных полей этих двух пленок, что можно интерпретировать как увеличение взаимодействия между слоями железа. Различие ширин линий магниторезонансных пиков, наоборот, уменьшается, что, по-видимому, связано с уменьшением напряжений в пленках на границах железо – кремний.

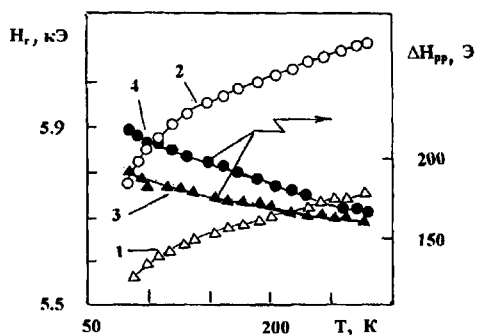


Рис.1. Температурные зависимости параметров магнитного резонанса: 1, 3 – эталонная пленка, 2, 4 – с кремниевой прослойкой $t_{Si} = 20$ Å, ΔH_{PP} – ширина линии магнитного резонанса

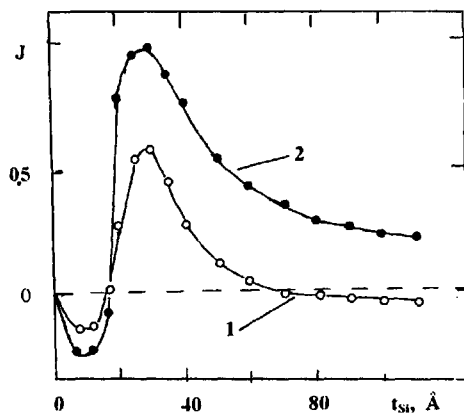


Рис.2. Зависимость нормированного сдвига резонансного поля от толщины кремниевой прослойки: $J = \delta H_r / \delta H_r^{max}$; кривая 1 – $T = 80$ К, 2 – $T = 300$ К

Изменение сдвига резонансного поля (δH_r) в зависимости от толщины кремниевого слоя приведено на рис.2. Обращает на себя внимание усиление ферромагнитного взаимодействия (отрицательный сдвиг δH_r) при малых толщинах кремния ($t_{Si}^* \leq 15$ Å). При прослойках кремния $t_{Si}^* > 70 - 80$ Å знак обменного взаимодействия

зависит от температуры. В области $t_{Si}^* \leq t_{Si} \leq t_{Si}^0$ взаимодействие слоев имеет антиферромагнитный характер при всех исследованных температурах.

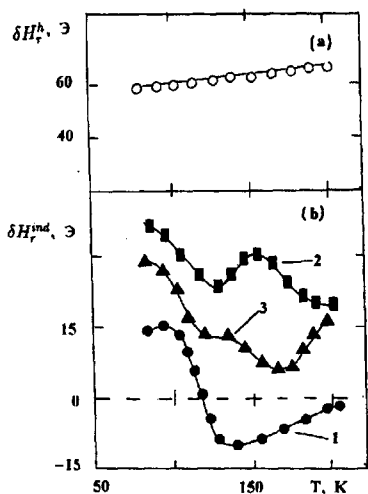


Рис.3. Температурные зависимости фотоиндуцированного сдвига резонансного поля: а – эталонная пленка, б – пленки Fe/Si/Fe, кривая 1 – $t_{Si} = 5 \text{ \AA}$, 2 – $t_{Si} = 10 \text{ \AA}$, 3 – $t_{Si} = 20 \text{ \AA}$; $S_{opt} = 2.8 \text{ Вт/см}^2$

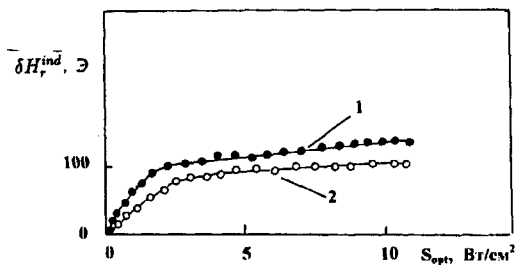


Рис.4. Зависимости сдвига резонансного поля пленок Fe/Si/Fe от освещенности: кривая 1 – $t_{Si} = 10 \text{ \AA}$, 2 – $t_{Si} = 20 \text{ \AA}$; $T = 80 \text{ K}$

В случае промежуточного слоя, изготовленного из полупроводникового материала, очевидно, что знаки сдвигов резонансного поля при оптическом облучении, за счет возникновения в зоне проводимости фотоэлектронов, и тривиальном нагреве должны совпадать. При поглощении света в подложке и слоях железа часть энергии оптического излучения рассеивается в виде тепла. Поэтому на эталонном образце нами был измерен сдвиг резонансного поля, вызванный нагревом (δH_r^h), в зависимости от температуры (рис.3а). В дальнейшем он вычитался из величины интегрального сдвига резонансного поля образца при облучении. Оставшаяся часть $\delta H_r^{ind} = \delta H_r - \delta H_r^h$ приписывается воздействию света на полупроводниковый материал. Температурные зависимости фотоиндуцированных сдвигов резонансного поля δH_r^{ind} для образцов с разными толщинами кремния приведены на рис.3б. Здесь налицо немонотонный характер изменения δH_r^{ind} . В области температур $T \cong 80 - 100 \text{ K}$ при малых толщинах кремния, а именно, когда $t_{Si} < t_{Si}^*$, фотоиндуцированный сдвиг резонансного поля увеличивается по мере увеличения t_{Si} , а при $t_{Si} > t_{Si}^*$ наблюдается его некоторое уменьшение. При бóльших толщинах полупроводниковой прослойки ($t_{Si} > t_{Si}^0$) эффект практически полностью можно приписать тепловому механизму воздействия излучения.

При $T \leq 120 \text{ K}$ фотоиндуцированные изменения обменного взаимодействия носят исключительно антиферромагнитный характер и лишь для очень тонких прослоек кремния (рис.3б, кривая 1) наблюдается смена знака обменного параметра в области $T \approx 120 \text{ K}$. В последнем случае при дальнейшем увеличении температуры фотоиндуцированные изменения в магнитной системе стремятся к нулю. Как функция энергетической освещенности образца (S_{opt}) фотоиндуцированный сдвиг резонанс-

ного поля выходит на насыщение, например, для $t_{Si} = 10 \text{ \AA}$ – при $S_{opt} = 2 \text{ Вт/см}^2$, а для $t_{Si} = 20 \text{ \AA}$ – при $S_{opt} = 3.5 \text{ Вт/см}^2$ (см. рис.4).

Мы не связываем наблюдаемые свойства в слоистых структурах Fe/Si/Fe с образованием соединений Fe-Si, так как известно [6], что легирование железа кремнием всегда приводит к понижению магнитного момента и ослаблению обменного взаимодействия. Мы же имеем увеличение эффективного внутреннего поля, что можно объяснить, предположив усиление обменной связи между слоями железа.

В настоящее время для описания магнитных свойств мультислойных магнитных структур наиболее широкое распространение получила модель "квантовой ямы" [7, 8]. В рамках этой модели осцилляции параметра обменного взаимодействия в случае металлической прослойки определяются осцилляциями спектральной плотности электронных состояний, зависящей от числа плоскостей промежуточного слоя. Применительно к нашему случаю ситуацию следует подправить, поскольку, скорее всего, для данного технологического режима кремниевая прослойка имеет аморфную структуру. А это значит, что в прослойке только приблизительно сохраняется ближний порядок и спектральная плотность электронных состояний не обязательно периодична [9]. Здесь характерная толщина прослойки кремния, при которой наблюдается максимальное взаимодействие слоев железа, должна быть связана с длиной свободного пробега электронов в аморфном кремнии. Этим фактом и может быть объяснено отсутствие четко выраженных осцилляций обменного параметра и, следовательно, сдвига резонансного поля от толщины полупроводника. Знак обменного параметра (фаза осцилляций) в начале зависимости от толщины прослойки определяется как типом экстремума на поверхности Ферми, так и характером сопряжения зон на поверхностях раздела [8].

Изменение магнитного состояния при облучении, прежде всего, связано с изменением в полупроводнике концентрации носителей тока, которые являются переносчиками взаимодействия между магнитоактивными слоями, и перестройкой функции плотности электронных состояний. При этом еще раз отметим, что при низких температурах фотоиндуцированный вклад всегда является антиферромагнитным. Температурные изменения магнитных свойств в системе Fe/Si/Fe можно понять, предполагая зависимость химического потенциала от температуры.

Авторы выражают благодарность Г.В.Бондаренко за рентгеновский анализ исследованных образцов.

Настоящие исследования ведутся при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 96-02-16546-а), а также в рамках программы "Интеграция".

1. P.Grunberg, R.Schreiber, Y.Pang et al., Phys. Rev. Lett. **57**, 2442 (1986).
2. Е.Г.Елисеева, В.П.Кононов, В.М.Попел и др., ПТЭ **2**, 141 (1997).
3. Н.В.Волков, Г.С.Патрин, препринт №635Ф, ИФ СО АН СССР, Красноярск, 1990.
4. J.E.Mattson, E.E.Fulerton, S.Kumar et al., J.Appl. Phys. **75**, 6169 (1994).
5. A.Laude, JMMM **92**, 143 (1990).
6. Е.П.Елсуков, Автореферат докторской диссертации, МГУ, Москва, 1994.
7. D.M.Edwards, J.Mothon, R.V.Muniz, and M.S.Pan, J. Phys.: Condens. Matter. **3**, 4941 (1991).
8. Дж.Мэзон, М.Виллерт, Д.М.Эдвардс, Р.В.Муниз, ФММ **79**, 9 (1995).
9. Н.Мотт, Э.Дэвис, *Электронные процессы в некристаллических веществах*, М.: Мир, 1974. (N.F.Mott and E.A.Davis, *Electronic Processes in Non-Crystalline Materials*, Clarendon Press, 1971.)