

## Влияние толщины ферромагнитного слоя на межслоевое взаимодействие в пленках Fe/Si/Fe

Г. С. Патрин<sup>+\*1)</sup>, Н. В. Волков<sup>+</sup>, С. Г. Овчинников<sup>+</sup>, Е. В. Еремин<sup>+</sup>, М. А. Панова<sup>\*</sup>, С. Н. Варнаков<sup>+</sup>

<sup>+</sup>Институт физики им. Л. В. Киренского Сибирского отделения РАН, 660036 Красноярск, Россия

<sup>\*</sup>Красноярский госуниверситет, 660041 Красноярск, Россия

Поступила в редакцию 19 августа 2004 г.

Представлены экспериментальные результаты исследования трехслойных магнитных пленок Fe/Si/Fe методом магнитного резонанса. Обнаружен эффект влияния толщины ферромагнитного слоя на величину межслоевого взаимодействия. Обсуждается механизм, позволяющий объяснить наблюдаемые экспериментальные зависимости.

PACS: 75.70.Fr, 76.50.+g

Пленки системы (Fe/Si) интересны тем, что в них обнаружен ряд интересных явлений, обусловленных наличием полупроводниковой прослойки. В зависимости от условий синтеза реализуется либо ферромагнитный обмен [1], либо антиферромагнитный обмен между магнитными слоями [2, 3]. Также обнаружено, что обменное взаимодействие между слоями железа может носить осциллирующий характер при изменении толщины кремния ( $t_{\text{Si}}$ ) и оно усиливается при увеличении температуры [4]. К тому же, в этих пленках обнаружено фотоиндуцированное изменение обменного взаимодействия [5, 6].

До настоящего времени остается нерешенной до конца проблема формирования магнитного состояния в многослойной системе. Здесь на первом месте стоит изучение механизмов спин-зависимого электронного транспорта через немагнитную прослойку, поскольку от его особенностей зависит характер межслоевого обменного взаимодействия. Ясно, что эффективность спин-зависимого переноса электронов должна зависеть как от материала немагнитной прослойки, так и от магнитного состояния слоев. Для многослойных систем с немагнитной металлической прослойкой имеются теоретические разработки [7], указывающие на то, что величина межслоевого взаимодействия между магнитными слоями может зависеть от толщины магнитного слоя, а также экспериментальные подтверждения такой зависимости [8], причем эта зависимость носит осцилляционный характер. В случае немагнитной немагнитной прослойки, когда промежуточный слой представляется в виде потенциального барьера, также существуют теоретические разработки [9, 10], предсказывающие за-

висимость межслоевого взаимодействия от толщины магнитного слоя.

В настоящей работе мы приводим результаты исследований экспериментально обнаруженного влияния толщины ферромагнитного слоя на межслоевое взаимодействие в трехслойных пленках с полупроводниковой прослойкой Fe/Si/Fe.

Исследовались два набора пленок. Один – без кремниевой прослойки, а другой – с прослойкой кремния  $t_{\text{Si}} = 2$  нм (которая соответствует максимальному антиферромагнитному межслоевому взаимодействию в ранее исследованных пленках [1, 6]). Толщина железного слоя  $t_{\text{Fe}}$  изменялась от 2 нм до 10 нм с шагом в 1 нм. Пленки были получены методом термического испарения при базовом давлении  $P = 10^{-7}$  Па на установке “Ангара”. На стеклянную подложку сначала наносился буферный слой кремния толщиной около 10 нм, затем собственно трехслойная магнитная структура, а сверху вся система покрывалась защитным слоем кремния 10 нм. Для каждой толщины железного слоя в той же самой серии и технологическом цикле изготавливалась контрольная пленка железа без прослойки кремния. Электронно-микроскопические исследования показали, что пленки имеют практически аморфную структуру. В качестве метода исследования был выбран электронный магнитный резонанс как метод, чувствительный к изменению внутренних молекулярных полей. Частота СВЧ излучения была  $\omega_{\text{УНФ}} = 28.75$  ГГц, диапазон температур  $T = 78 \div 300$  К. Магнитное поле лежало в плоскости пленки.

При наблюдении магнитного резонанса в трехслойных пленках Fe/Si/Fe установлено, что форма линии СВЧ поглощения практически для всех пленок (за исключением реперных, без кремния) имеет

<sup>1)</sup>e-mail: patrin@iph.krasn.ru

асимметричный вид. Никакой анизотропии в плоскости пленок не обнаружено. Ширина линии магнитного резонанса имела величину порядка  $\Delta H \approx 200$  Э. Сначала были сняты зависимости резонансного поля для реперных пленок (см. рис.1), из которых

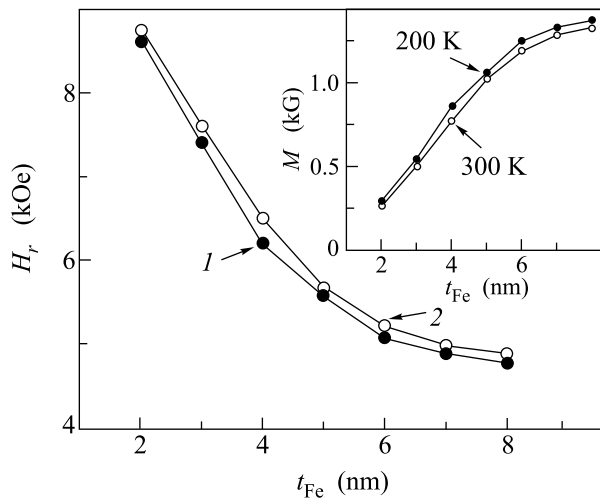


Рис.1. Зависимости резонансного поля для реперных железных пленок от толщины. На вставке приведены зависимости намагниченности от толщины пленки: 1 –  $T = 200$  К, 2 –  $T = 300$  К

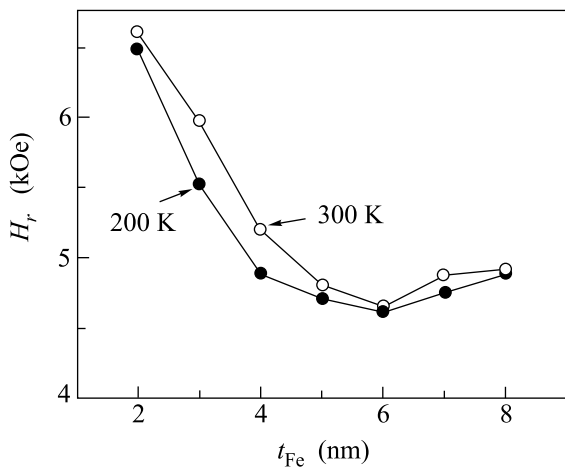


Рис.2. Зависимости резонансного поля для пленок с кремниевой прослойкой  $t_{Si} = 2$  нм от толщины ферромагнитного слоя. 1 –  $T = 200$  К, 2 –  $T = 300$  К

по формуле Киттеля (см. ниже выражение (2)) [11] определялась намагниченность собственно железного слоя (см. вставка на рис.1). На рис.2 приведены зависимости резонансного поля от  $t_{Fe}$  для пленок с  $t_{Si} = 2$  нм. Мы получили эти зависимости при температурах  $T = 200$  и  $300$  К, где предположитель-

но ожидалась существенная зависимость константы межслоевого взаимодействия от температуры.

Для обработки экспериментальных данных мы воспользовались результатами расчета спектра магнитного резонанса в трехслойной магнитной пленке, приведенными в работе [12]. Применительно к нашему случаю выражение для свободной энергии на единицу площади имеет вид

$$E = -J \cdot \cos(\varphi_1 - \varphi_2) -$$

$$-t_{Fe} \cdot [\mathbf{H} \cdot (\mathbf{M}_1 + \mathbf{M}_2) + 4 \cdot \pi \cdot (M_{1Z}^2 + M_{2Z}^2)], \quad (1)$$

где  $J$  – константа межслоевого взаимодействия,  $\mathbf{H}$  – внешнее магнитное поле,  $\mathbf{M}_i$  – намагниченность  $i$ -го ферромагнитного слоя,  $\varphi_i$  – угол намагниченности в плоскости, отсчитываемый от направления внешнего магнитного поля,  $i = 1, 2$  – нумерует магнитные слои,  $t_{Fe}$  – толщина магнитного слоя, а ось  $Z$  направлена перпендикулярно плоскости пленки. В расчетах предполагается, что справедливо условие  $(t_{Fe} \cdot \mathbf{H} \cdot \mathbf{M}) \gg J$  и пленка находится в насыщенном состоянии. В этом случае  $\varphi_i \cong \varphi_H = 0$ . Также считается, что оба ферромагнитных слоя идентичные. При этих условиях резонансные частоты даются выражениями

$$(\omega_1/\gamma)^2 = H \cdot (H + H_M), \quad (2)$$

$$(\omega_2/\gamma)^2 = H \cdot (H + H_M) + 2 \cdot (2 \cdot H + H_M) \cdot H_J + 4 \cdot H_J^2, \quad (3)$$

где

$$H + M = 4 \cdot \pi \cdot M \text{ и } H_J = J / (t_{Fe} \cdot M). \quad (4)$$

При известных величинах  $\omega, H$  и  $M$  выражение (3) позволяет просто вычислить значение  $H_J$ , а затем, с использованием (4), легко находится и константа межслоевого взаимодействия  $J$ . Мы получили два набора  $H_J$ . Один из них,  $H_{J1}$ , лежит в диапазоне от  $-6$  кЭ до  $-14$  кЭ, что не удовлетворяет сделанным приближениям и не соответствует экспериментальным данным. Поэтому далее мы это решение не рассматриваем. Использование другого набора,  $J_{J2}$ , дает результаты для  $J(t_{Fe})$ , приведенные на рис.3. Видно, что зависимость  $J(t_{Fe})$  носит немонотонный характер, причем значения  $J$  в области ее максимальных значений согласуются с данными других исследователей [4]. В пределах ошибки измерений в исследованной области температур зависимость от температуры практически отсутствует. Отметим, что такого рода зависимости величины межслоевого взаимодействия от толщины магнитного слоя ни одна из существующих теорий не описывает.

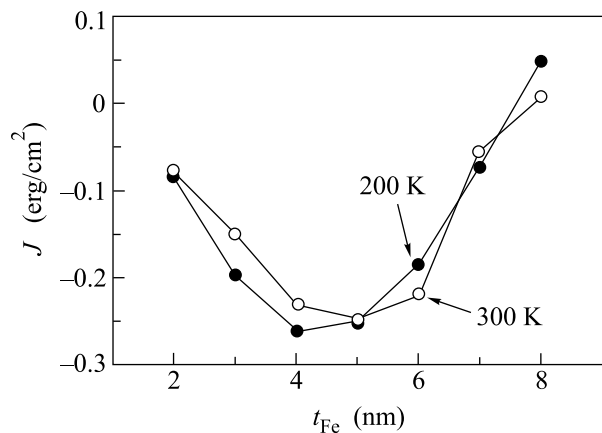


Рис. 3. Зависимости энергии межслоевого взаимодействия от толщины ферромагнитного слоя для пленок с кремниевой прослойкой  $t_{Si} = 2$  нм. 1 –  $T = 200$  К, 2 –  $T = 300$  К

Наблюдаемое изменение средней намагниченности собственно магнитного слоя в зависимости от его толщины является типичным. Такое поведение объясняется тем, что при малых толщинах  $t_{Fe}$  области интерфейсов занимают довольно заметный слой, создавая “мертвые области”, и при этом относительная роль внутренних (“объемных”) областей невелика. При увеличении толщины слоя растет объемная доля, тогда как ширина интерфейса не меняется. При введении фиксированной кремниевой прослойки электроны из одного ферромагнитного слоя, участвующие во взаимодействии и переносящие “информацию” о магнитном состоянии своего слоя, проникают без потери этой информации на конечную глубину в другой слой. По сути, этим определяются эффективные объемы взаимодействующих областей в каждом из магнитных слоев. Если этот сценарий справедлив, то при увеличении толщины  $t_{Fe}$  величина  $\sim 5$  нм является той глубиной, на которую проникает электрон-переносчик взаимодействия. В случае малых  $t_{Fe}$  увеличение толщины магнитного слоя ведет, наряду с увеличением намагниченности, к увеличению объема, вовлеченного во взаимодействие магнитных слоев и, как следствие, происходит рост величины межслоевого взаимодействия. При дальнейшем увеличении толщины, когда  $t_{Fe} > 5$  нм, взаимодействия внутри каждого магнитного слоя начинают превалировать и относительная роль межслоевого взаимодействия уменьшается. Эти рассуждения ка-

чественно объясняют зависимости на рис. 3. Следует отметить, что полученные результаты не связываются с образованием соединений силицидов железа в переходной области. Ранее [13] специально проведенные исследования показали, что следы соединения  $\epsilon$ -FeSi преимущественно обнаруживаются только при условии, что железная пленка состоит из кристаллитов крупных размеров.

В заключение заметим, что помимо чисто научной значимости, связанной с изучением закономерностей формирования магнитных структур в многослойных магнитных пленках, установленные закономерности следует учитывать при исследовании эффектов гигантского магнитосопротивления (ГМС) в многослойных пленках. Из наших результатов следует, что для получения наибольшего ГМС необходимо подбирать оптимальные толщины не только немагнитного промежуточного слоя, но и магнитоактивных слоев.

Настоящие исследования ведутся при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант # 02-02-17224-а).

1. S. Toscano, B. Briner, H. Hopster, and M. Landolt, *JMMM* **114**, L6 (1992).
2. E. E. Fullerton, J. E. Mattson, S. R. Lee et al., *JMMM* **117**, L301 (1992).
3. Г. С. Патрин, С. Г. Овчинников, Д. А. Великанов, В. П. Кононов, *ФТТ* **43**, 1643 (2001).
4. B. Briner, U. Ramsperger, and M. Landolt, *Phys. Rev.* **B51**, 7303 (1995).
5. J. E. Mattson, S. Kumar, E. E. Fullerton, and S. R. Lee, *Phys. Rev. Lett.* **78**, 3023 (1997).
6. Г. С. Патрин, Н. В. Волков, В. П. Кононов, *Письма ЖЭТФ* **68**, 287 (1998).
7. P. Bruno, *Europhys. Lett.* **23**, 615 (1993).
8. P. J. H. Bloemen, M. T. Johnson, M. T. H. Vorst et al., *Phys. Rev. Lett.* **72**, 764 (1994).
9. J. Z. Wang and B. Z. Li, *Phys. Rev.* **B59**, 6283 (1999).
10. J. Z. Wang, B. Z. Li, and Z. N. Hu, *Phys. Rev.* **B62**, 6570 (2000).
11. А. Г. Гуревич, *Магнитный резонанс в ферритах и антиферромагнетиках*, М.: Наука, 1974.
12. A. Layadi, *Phys. Rev.* **B65**, 104422 (2002).
13. J. Decoster, H. Bemelmans, S. Degroote et al., *J. Appl. Phys.* **81**, 5349 (1997).