

ОСЦИЛЛЯЦИИ ТЕМПЕРАТУРЫ КЮРИ И КРИТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В МУЛЬТИСЛОЙНЫХ ПЛЕНКАХ Co/Cu

П.Д.Ким¹⁾, Ю.Х.Чен²⁾, И.А.Турпанов, В.К.Мальцев, Л.А.Ли,
Т.Н.Исаева, А.Я.Бетенькова, М.М.Карпенко, Л.Е.Быкова, Е.С.Полуян

Институт физики, Сибирское отделение РАН
660036 Красноярск, Россия

Поступила в редакцию 22 июля 1996 г.

Исследованы мультислойные структуры Co/Cu с ультратонкими слоями Co. Обнаружены осцилляции намагниченности насыщения и температуры Кюри при изменении толщины промежуточного проводящего слоя Cu. Изучено поведение намагниченности вблизи точки фазового перехода второго рода и определены критические индексы намагниченности.

PACS: 05.70.Jk, 78.20.Ls.

В последнее время широко исследуется природа взаимодействия магнитных слоев в мультислойных структурах с магнитными и немагнитными материалами.

Нами было обнаружено [1], что намагниченность насыщения слоя Co при комнатной температуре существенно зависит от толщины проводящего слоя Cu. Мультислойные пленки с ультратонкими слоями Co, разделенными проводящими слоями Cu толщиной от 2 до 15 Å, магнитоупорядочены. Намагниченность насыщения в них уменьшается от намагниченности массивного Co до нуля при увеличении толщины Cu. Мультислойные пленки Co, разделенные диэлектриком, немагнитны.

В настоящей работе исследуются намагниченность насыщения, температура Кюри и критические явления в мультислойной пленке Co/Cu с ультратонкими слоями Co при различных толщинах промежуточного слоя Cu.

Мультислойные структуры Co/Cu были приготовлены методом ионноплазменного распыления на стеклянные подложки при комнатной температуре. Все образцы напылялись с постоянной толщиной магнитного слоя ($d_{Co} = 3.5 \pm 0.5 \text{ \AA}$).

Толщины слоев измерялись методом рентгеновской флуоресценции. Магнитные свойства изучались на вибрационном магнитометре при комнатной температуре и при температуре жидкого азота.

На рис.1 представлены характерные для мультислойных пленок Co/Cu петли гистерезиса при изменении толщины проводящего слоя Cu. В работах [2,3] показано, что такие петли гистерезиса обусловлены антиферромагнитным взаимодействием магнитных слоев. Петли гистерезиса свидетельствуют о том, что мультислойная пленка Co/Cu с ультратонкими слоями Co состоит из различных фаз: ферромагнитной, антиферромагнитной и парамагнитной. По остаточной намагниченности (M_r) и намагниченности насыщения (M_s) петли гистерезиса, учитывающей парамагнитное намагничивание, можно грубо оценить доли ферро- и антиферромагнитной фаз. Соотношение между двумя

¹⁾ e-mail: kim@iph.krasnoyarsk.su

²⁾ Y.H.Jeong, Dep. of Physics, Pohang Univ. of Sci. and Tech., Korea.

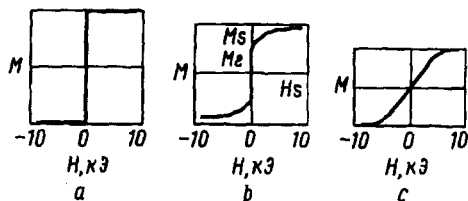


Рис.1. Типичные петли гистерезиса мультислойных пленок $[\text{Co}(3.5\text{\AA})/\text{Cu}(d_{\text{Cu}})]_{120}$ при различных d_{Cu}

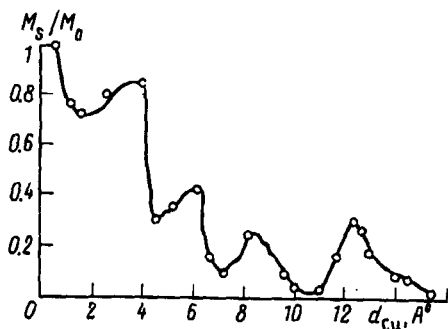


Рис.2. Зависимость намагниченности насыщения пленок $[\text{Co}(3.5\text{\AA})/\text{Cu}(d_{\text{Cu}})]_{120}$ от d_{Cu} при температуре 77 К

фазами в мультислойной структуре Co/Cu при постоянной толщине магнитного слоя определяется толщиной проводящего слоя Cu .

Результаты обработки большого количества образцов, полученных из 80 партий напыления показывают, что намагниченность насыщения слоя Co мультислойной пленки Co/Cu носит осцилляционный характер в зависимости от толщины слоя Cu (рис.2). Разброс экспериментальных данных (рис.2) отражает сильное влияние d_{Cu} на M_s и, с другой стороны, определяется недостаточной воспроизводимостью мультислойной структуры с ультратонкими слоями. Несмотря на эти обстоятельства, на графике зависимости M_s от d_{Cu} всегда четко проявляются осцилляции M_s , амплитуда которых намного превосходит возможные ошибки измерения. Значение толщин d_{Cu} , при которых достигаются экстремумы M_s , могут быть определены с точностью не более 1Å.

Полученные результаты, видимо, можно объяснить взаимодействием типа Рудемана-Киттеля-Касуа-Иосида (РККИ) [4-6]. Взаимодействие локализованного момента с электронами проводимости создает пространственную осциллирующую поляризацию спиновой плотности вблизи этого момента. Данный магнитный момент связан с последовательно удаленными моментами попеременно ферро- и антиферромагнитно. В случае мультислойных пленок взаимодействие магнитных атомов соседних слоев в зависимости от толщины проводящей прослойки Cu может быть ферро- или антиферромагнитным. Однако из-за конечности толщины магнитных слоев (даже в случае ультратонких слоев) взаимодействие магнитных моментов через проводящую прослойку постоянной толщины может быть и ферро- и антиферромагнитным. Это приводит к существованию двух фаз в мультислойной пленке. Наиболее сильно этот эффект проявляется при толщинах d_{Cu} , сравнимых с толщиной d_{Co} .

Из рис.2 видно, что период осцилляций составляет около $d_0 = (3 \div 4)\text{\AA}$. Экспериментальные значения осцилляций, полученные из данных по гигантскому магнитосопротивлению, в 3-4 раза превышают d_0 . В теории РККИ период осцилляций задается волновым числом поверхности Ферми $d_0 = \pi/k_F$ (k_F - волновое число). Для Cu $1/k_F = 0.74\text{\AA}$, $d_0 = 2.32\text{\AA}$. Это значение удовлетворительно согласуется с нашими экспериментальными данными.

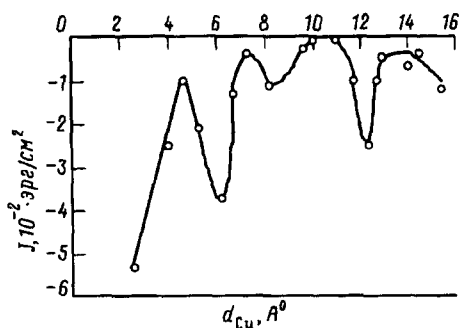


Рис.3. Зависимость межслойного обменного взаимодействия в пленках $[\text{Co}(3.5\text{Å})/\text{Cu}(d_{\text{Cu}})]_{120}$ от d_{Cu}

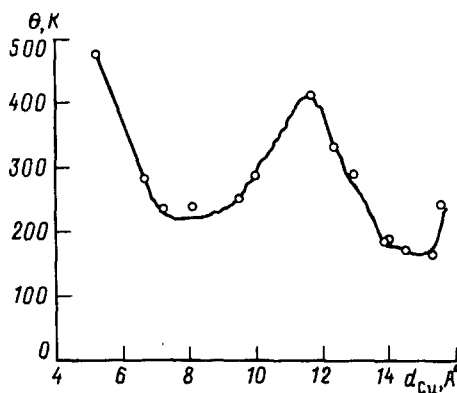


Рис.4. Зависимость температуры Кюри от толщины слоя Cu

Из характеристик петель гистерезиса (см. рис.1b) может оценить антиферромагнитное взаимодействие между магнитными слоями [3]:

$$J = -M_s H_s d_{\text{Co}} / 4 \{ (M_s - M_r) / M_s \}.$$

Зависимость межплоскостного антиферромагнитного взаимодействия J от толщины d_{Cu} представлена на рис.3. Кривая демонстрирует дальнедействующий осциллирующий характер обменного взаимодействия магнитных слоев, разделенных немагнитной проводящей прослойкой.

Одной из физических величин, которая отражает обменное взаимодействие, приводящее к магнитному упорядочению, является температура Кюри (Θ). Большинство экспериментальных методов определения температуры Кюри являются экстраполяционными. В магнитных методах для определения хода намагниченности насыщения от температуры и точки Кюри необходимо применить магнитное поле, которое "размывает" область фазового перехода. Поэтому для корректного определения необходимо учитывать степень влияния магнитного поля на температуру Кюри.

В данной работе мы попытались определить критическую температуру, используя магниторезистивный эффект. Несмотря на то, что магниторезистивный эффект в исследованных мультислойных структурах с ультратонкими слоями в тысячу раз меньше, чем в мультислойных пленках с гигантским магнитосопротивлением, величина полезного сигнала оказалась достаточной для детального изучения критической области.

Постоянный ток (I) пропусклся по образцу, который перемагничивался по нормали к плоскости пленки переменным магнитным полем с частотой 17Гц. Переменное напряжение, пропорциональное изменению сопротивления, усиливалось селективным усилителем на удвоенной частоте. Установлено, что изменение сопротивления, равное U/I , пропорционально квадрату амплитуды магнитного поля H .

В то же время, опыт показывает, что намагниченность M по нормали к плоскости пленки пропорциональна H . Таким образом, изменение сопротивления пропорционально M^2 .

Сняты зависимости ΔR от температуры при различных амплитудах. Характерными особенностями этих кривых является наличие четко выраженного линейного участка. Этому участку соответствует $M \sim (\Theta - T)^{1/2}$, так как $\Delta R \sim M^2$. Экстраполяция этого линейного участка дает температуру Кюри для данного магнитного поля. Зная зависимость от величины H , экстраполяцией можно найти температуру Кюри в нулевом поле.

Зависимость температуры Кюри в мультислойной структуре от толщины слоя меди показана на рис.4. Необходимо отметить, что температура Кюри при толщине Cu около 14\AA уменьшилась в 10 раз. Другой важной чертой этой зависимости является осцилляция точки Кюри в зависимости от толщины Cu . Однако осцилляции намагниченности и температуры Кюри не совпадают.

Отсутствие магнитного упорядочения в мультислойных Co/SiO_2 -структурах ультратонкими слоями Co при различных толщинах SiO_2 свидетельствует о решающей роли электронов проводимости в межслойном обменном взаимодействии в мультислойной структуре Co/Cu . Теория РККИ естественным образом может объяснить осциллирующий характер температуры Кюри в зависимости от d_{Cu} .

В физике фазовых переходов и критических явлений теория опережает эксперимент. Причина этого связана, главным образом, со значительными трудностями в постановке прецизионных экспериментов в непосредственной окрестности критической точки и дефицитом подходящих объектов исследования. С этой точки зрения, нам кажется, что исследуемые мультислойные структуры являются хорошими модельными объектами для изучения критических явлений. Возможность изменения пространственной структуры системы, приводящая к изменению взаимодействия, позволяет исследовать критические явления в различных ситуациях.

Из кривой зависимости ΔR от T в окрестности точки Кюри легко можно найти критический индекс по намагниченности:

$$\Delta R = AM^2, \quad M = B(1 - T/\Theta)^\beta = Bt^\beta$$

или

$$\Delta R = AB^2(1 - T/\Theta)^{2\beta} = Dt^{2\beta},$$

$$\ln(\Delta R) = \ln D + 2\beta \ln t.$$

На рис.5 представлены зависимости $\ln(\Delta R)$ от $\ln t$. Для всех изученных мультислойных пленок эти зависимости представляют прямую в широком интервале t .

Критические индексы намагниченности в мультислойных пленках в зависимости от d_{Cu} имеют осциллирующий характер так же, как намагниченность насыщения и температура Кюри. Величина критического индекса колеблется от 0.41 до 0.62. По теории молекулярного поля и по термодинамической теории критический индекс равен 0.5. Теоретические расчеты по модели Изинга и Гейзенберга дают значение $\beta = 0.3 \div 0.33$.

Сигнал ЯМР (спинового эха) наблюдается на мультислоях в случаях, если толщина медных слоев не больше 3\AA . На рис.6 приведена зависимость времени ядерной спин-спиновой релаксации T_2 для мультислойных структур с толщиной

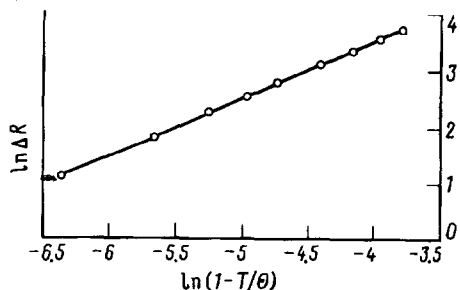


Рис.5. Зависимость $\ln(\Delta R)$ от $\ln t$, $(t = t - T/\theta)$

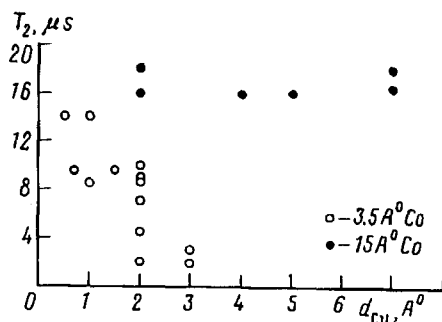


Рис.6. Зависимость времени релаксации T_2 от d_{Cu}

Со 3.5 \AA и 15 \AA от толщины Cu. Времена T_2 мультислоев с толщиной Со 3.5 \AA на порядок меньше, чем аналогичные времена для массивного Со и мультислоев с толщиной Со 15 \AA . Возможно, это связано с взаимодействием РККИ. Рудеман и Киттель показали, что это взаимодействие приводит к уширению линии поглощения ЯМР.

Следует заметить, что корректное сопоставление экспериментальных результатов с выводами многочисленных работ [6–10] по взаимодействиям РККИ в мультислойных пленках и нахождение фундаментальных характеристик в настоящее время нам представляется невозможным. Это связано, прежде всего, с отсутствием структурных данных исследуемых пленок.

Авторы выражают глубокую благодарность Г.В.Бондаренко за помощь в работе.

1. E.Mushailov, V.Maltsev, I.Turpanov et al., J. Magn. Magn. Mater. **138**, 207 (1994).
2. S.S.P.Parkin, R.Bhadra, K.P.Roche, Phys. Rev. Lett. **66**, 2152 (1991).
3. M.Jimbo, T.Kanda, S.Goto et al., Jpn. J. Appl. Phys. **31**, L1348 (1992).
4. M.Ruderman and C.Kittel, Phys. Rev. **96**, 99 (1954).
5. T.Kasuya, Prog. Theor. Phys. **16**, 45 (1956).
6. K.Yosida, Phys. Rev. **106**, 893 (1957).
7. B.A.Jones and C.B.Hanna, Phys. Rev. Lett. **71**, 4253 (1993).
8. L.Nordstrom, P.Lang, R.Zeller et al., Phys. Rev. **B50**, 13058 (1994).
9. J.Barnas, J.Mag. Magn. Mater. **128**, 171 (1994).
10. B.Lee and Y.C.Chang, Phys. Rev. **B51**, 316 (1995).