

Аномальная температурная зависимость магнито-сопротивления в мультислоях Co/Cu

© П.Д. Ким, Д.Л. Халяпин, И.А. Турпанов, Л.А. Ли, А.Я. Бетенькова, С.В. Кан

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

E-mail: kim@post.krascience.rssi.ru

(Поступила в Редакцию 18 февраля 2000 г.)

Экспериментально установлен аномальный характер температурной зависимости магнито-сопротивления (МС) мультислойных пленок Co/Cu с толщиной магнитной прослойки $\sim 3 \text{ \AA}$. Показано, что температура максимума МС T_{\max} соответствует температуре Нееля. Изменение T_{\max} в зависимости от толщины прослойки Cu имеет осциллирующий характер.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 99-02-17816).

Мультислойные пленки, представляющие собой последовательность ферромагнитных и немагнитных слоев, являются одной из наиболее интенсивно исследуемых магнитных систем в последние годы. Повышенное внимание к магнитным мультислоям прежде всего обусловлено прикладным значением этих систем (в частности, возможностью использования в магнитных устройствах хранения информации). В то же время подобные структуры являются хорошей модельной системой для изучения фундаментальных физических закономерностей.

Нами исследованы магнитные и магниторезистивные свойства мультислойных пленок Co/Cu с ультратонкими слоями Co толщиной порядка 3 \AA . Как было показано ранее [1,2], данное значение для толщины магнитного слоя является предельным, при котором возможно магнитное упорядочение. Исследовались температурные зависимости магнито-сопротивления мультислойных пленок Co/Cu. Все образцы получены методом магнетронного распыления последовательным напылением слоев Co и Cu на стеклянные подложки в атмосфере Ar при комнатной температуре. Каждый образец содержал 120 би-слоев Co/Cu. Толщина слоя Co и период модуляции мультислойной системы по Cu вычислялись по данным рентгеновской флуоресценции. Все образцы имели поликристаллическую структуру.

Для исследования температурной зависимости величины МС использовалась методика, описанная в [2]: постоянный ток I пропусклся по образцу, который перемагничивался переменным магнитным полем $H = H_a \cos(\omega t)$ по нормали к плоскости пленки с частотой $f = \omega/2\pi = 37 \text{ Hz}$. При таком перемагничивании M пропорционально H в широком интервале полей и доменная структура образца не влияет на измеряемое МС. Как было показано ранее, $\Delta R \sim M^2$ [2], поэтому

$$\Delta R \sim H_a^2 \cos^2(\omega t) = \frac{1}{2} H_a^2 (1 + \cos(2\omega t)).$$

Поскольку ток через образец постоянен, то на образце возникает переменное напряжение на частоте $2f = 74 \text{ Hz}$ с амплитудой, пропорциональной величине

МС: $U_a = \Delta R I / 2$, где $\Delta R = R_0 - R_{\min}$, R_0 — сопротивление образца в отсутствие поля, R_{\min} — сопротивление образца в поле H_a . Напряжение усиливалось селективным усилителем. Зависимость R_0 от температуры измерялась отдельно. Величина МС определялась как $MR = \Delta R / R_0$. Исследования проводились в температурном диапазоне 77–300 К в режиме нагрева и в магнитных полях до 500 кОе.

Нами обнаружено, что температурные зависимости магнито-сопротивления пленок с ультратонкими слоями Co имеют аномальный характер: для каждой зависимости наблюдается ярко выраженный максимум (пик магнито-сопротивления) ниже комнатной температуры (рис. 1). Отсутствие максимума МС для некоторых образцов, по-

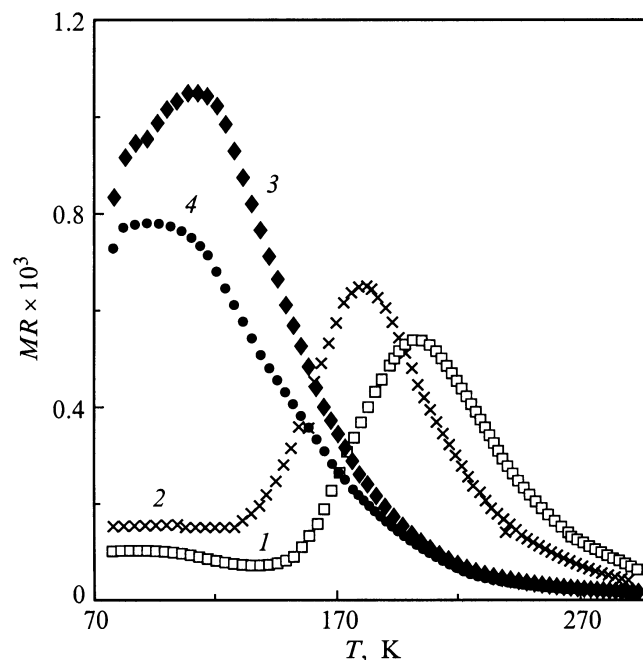


Рис. 1. Характерные температурные зависимости МС мультислойных пленок Co/Cu при различных толщинах Cu-слоя в поле 500 Ое. $d_{\text{Cu}}, \text{ \AA}$: 14 (1), 15 (2), 18.5 (3), 21.5 (4).

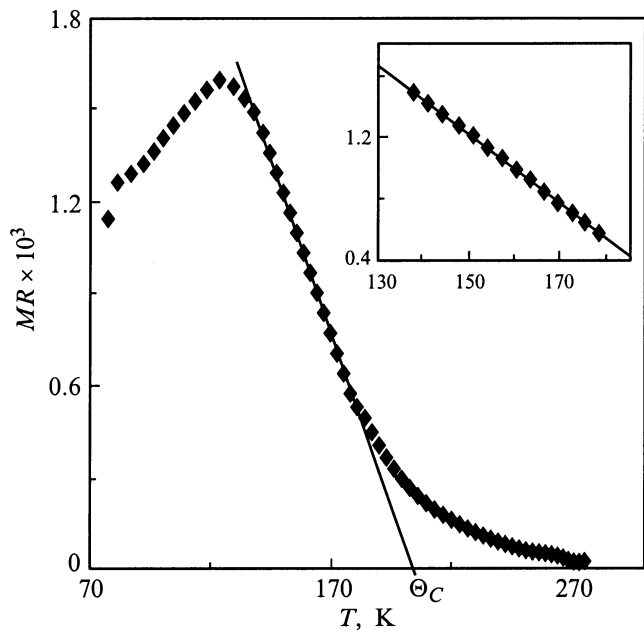


Рис. 2. Определение температуры Кюри Θ_C (на примере образца с $d_{Cu} = 16 \text{ \AA}$).

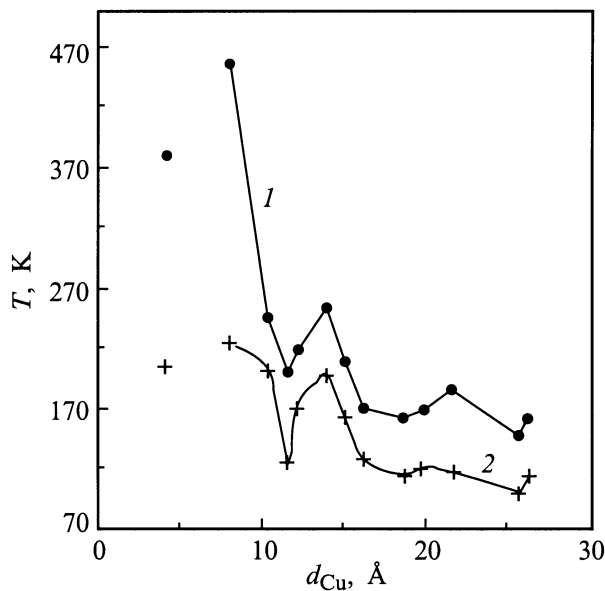


Рис. 3. Зависимости температуры Кюри Θ_C (1) и T_{max} (2) от d_{Cu} .

видимому, связано со сдвигом температуры максимума T_{max} в область ниже 77 К.

Данный способ измерения магнитосопротивления был предложен нами в работе [2] для оценки температуры Кюри Θ_C непосредственно из магниторезистивных измерений. На кривой магнитосопротивления мультислойных пленок Co/Cu в области температур выше T_{max} существует линейный участок. Для этого участка выполняется закон $M \sim (\Theta_C - T)^{1/2}$, так как $\Delta R \sim M^2$ [3]. Экстраполяция линейного участка позволяет определить

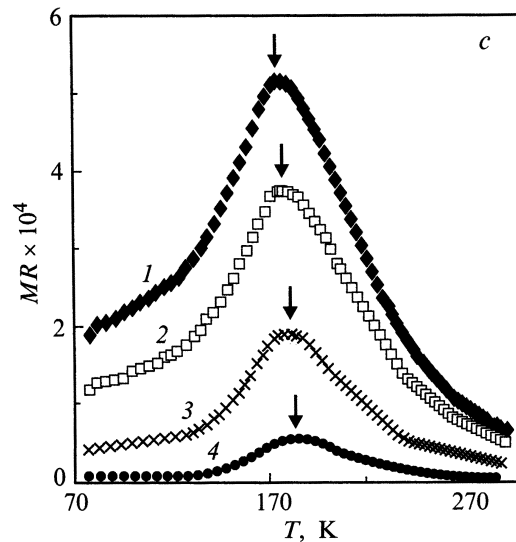
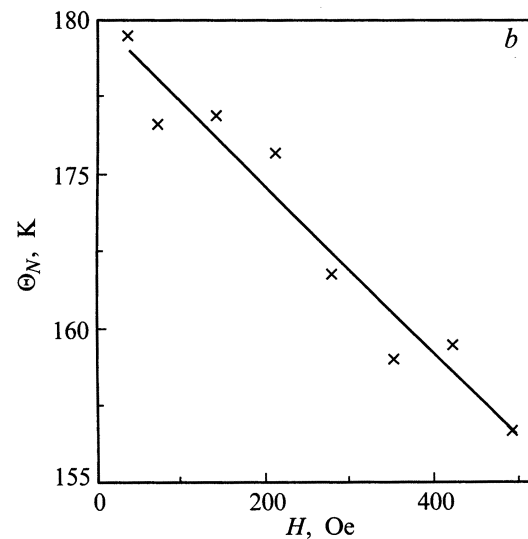
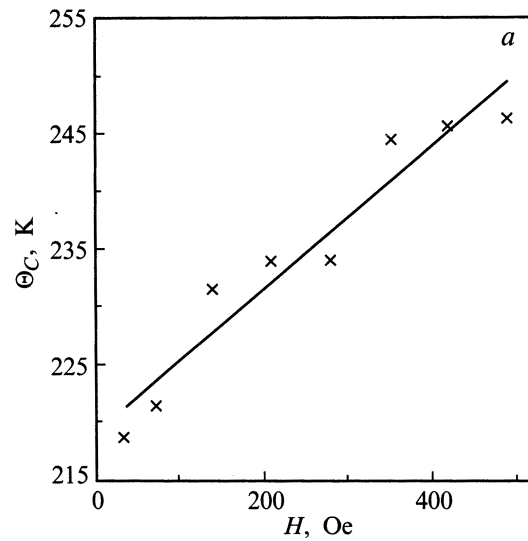


Рис. 4. Зависимости температур Кюри (a) и Нееля (b) от величины приложенного магнитного поля H для образца с $d_{Cu} = 12 \text{ \AA}$. Характер кривых магнитосопротивления в различных полях (c). Стрелками показан максимум МС. H , Oe: 490 (1), 420 (2), 280 (3), 140 (4).

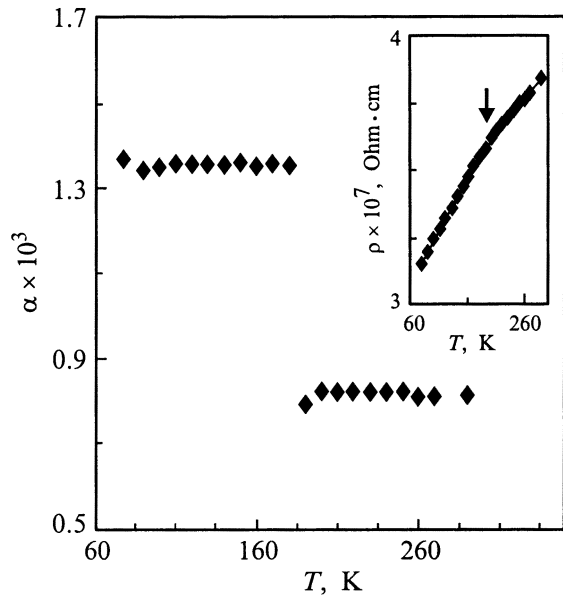


Рис. 5. Зависимость температурного коэффициента сопротивления α образца с $d_{Cu} = 14 \text{ \AA}$ от температуры T . На врезке — температурный ход сопротивления ρ . Стрелкой показана T_{max} для этого образца.

температуру Кюри (Θ_C) пленки при данном значении приложенного магнитного поля H (рис. 2). Зная зависимость Θ_C от H , можно определить значение Θ_C в нулевом поле.

Таким образом, для мультислойных пленок Co/Cu существует критическая температура T_{max} , при которой магнитосопротивление максимально. Эта температура существенным образом зависит от толщины немагнитного слоя Cu, и ее зависимость, так же как и зависимость Θ_C от d_{Cu} , носит осциллирующий характер (рис. 3).

Величина приложенного магнитного поля также оказывает заметное влияние на измеряемые значения Θ_C и T_{max} : увеличение амплитуды поля в большинстве случаев ведет к понижению T_{max} и увеличению Θ_C (рис. 4).

В исследованных мультислойных пленках взаимодействие магнитных атомов через немагнитную прослойку может носить как ферромагнитный, так и антиферромагнитный характер [2]. Для объяснения наблюдаемых экспериментальных данных следует принять во внимание существование антиферромагнитного взаимодействия в данных пленках.

Известно, что характерным признаком антиферромагнитного упорядочения является существование максимума восприимчивости в точке Нееля Θ_N [3]. Структуру пленок можно представить следующим образом: магнитный слой Co состоит из большого числа ферромагнитных спиновых кластеров, которые упорядочены между собой антиферромагнитно, или же смешанным образом: часть ферромагнитно, часть — антиферромагнитно. Пик магнитосопротивления соответствует максимуму восприимчивости пленки при $T_{max} = \Theta_N$. Подобная температурная зависимость восприимчивости была теоретически

рассмотрена Ландау в 1933 г. [4] для материалов, состоящих из ферромагнитно упорядоченных слоев.

Эта модель подтверждается характером изменения Θ_C и Θ_N с увеличением внешнего магнитного поля. Магнитное поле ориентирует спины в одном направлении, "помогая" ферромагнитному упорядочению и "мешая" антиферромагнитному. Поэтому разрушение антиферромагнитного порядка в присутствии поля происходит при более низких температурах, а ферромагнитного — при более высоких.

В антиферромагнитных системах в точке Нееля наблюдаются аномалии немагнитных свойств, например проводимости. На рис. 5 показана зависимость температурного коэффициента сопротивления α от температуры (для образца с $d_{Cu} = 14 \text{ \AA}$). В температурном интервале между 180 и 190 К α претерпевает скачкообразное изменение. Температура Нееля Θ_N для данного образца, определенная экстраполяцией T_{max} к нулевому полю, имеет значение ≈ 180 К. Этот факт является косвенным подтверждением предложенной модели.

Температурные кривые магнитосопротивления пленок, лежащих по d_{Cu} в интервале 8–12 \AA , имеют более сложный характер и состоят из двух-трех пиков, что объясняется более сложной структурой данных образцов. Вероятнее всего, для них реализуется многофазная система, каждая фаза которой имеет свою температуру Кюри и точку Нееля.

Подобные температурные аномалии, характеризующиеся максимумом магнитосопротивления, наблюдались ранее для пленок Ni/Cu с более толстыми магнитными слоями ($\sim 15 \text{ \AA}$) (в геометрии, когда магнитное поле приложено в плоскости пленки) [4,5]. Однако этот эффект в них менее выражен — изменение МС имеет плавный характер, максимум наблюдается не для всех образцов. Авторы данной работы объясняют аномалии температурной зависимости МС значительным увеличением магнитной анизотропии в области низких (меньше T_{max}) температур.

Таким образом, экспериментально обнаружен аномальный пик магнитосопротивления мультислойных пленок Co/Cu с ультратонкими слоями Co, который объясняется существованием антиферромагнитного упорядочения и соответствует точке Нееля. Обнаружено, что зависимость температуры пика от d_{Cu} носит осциллирующий характер.

Список литературы

- [1] E.S. Mshailov, V.K. Maltsev, I.A. Turpanov, P.D. Kim. *J. Magn. Magn. Mater.* **138**, 207 (1994).
- [2] П.Д. Ким, Ю.Х. Чен, И.А. Турпанов, В.К. Мальцев, Л.А. Ли, Т.Н. Исаева, А.Я. Бетенькова, М.М. Карпенко, Л.Е. Быкова, Е.С. Полуян. *Письма в ЖЭТФ* **64**, 5, 341 (1996).
- [3] С.В. Вонсовский. *Магнетизм*. Наука, М. (1971).
- [4] Л.Д. Ландау. *Phys. Zs. Sovjet.* **4**, 675 (1933).
- [5] H. Kubota, M. Sato, T. Miyazaki. *J. Magn. Magn. Mater.* **167**, 1, 12 (1997).