

05

## Магнитооптические и магниторезистивные свойства спин-клапанных структур на основе Co, Cu и Au

© И.В. Чешко, С.И. Проценко, Л.В. Одиногорец, Р. Shifalovich

Сумський державний університет, Суми, Україна

E-mail: protsenko@aph.sumdu.edu.ua

Поступило в Редакцию 23 апреля 2009 г.

Предложена методика формирования функционального элемента спин-клапанной структуры путем послойной конденсации наноразмерных Co, Cu, Au и Cr с определенной последовательностью температурной обработки в процессе конденсации. Исследованы магниторезистивные и магнитооптические свойства и установлена их корреляция со структурно-фазовым состоянием полученных структур и их составляющих.

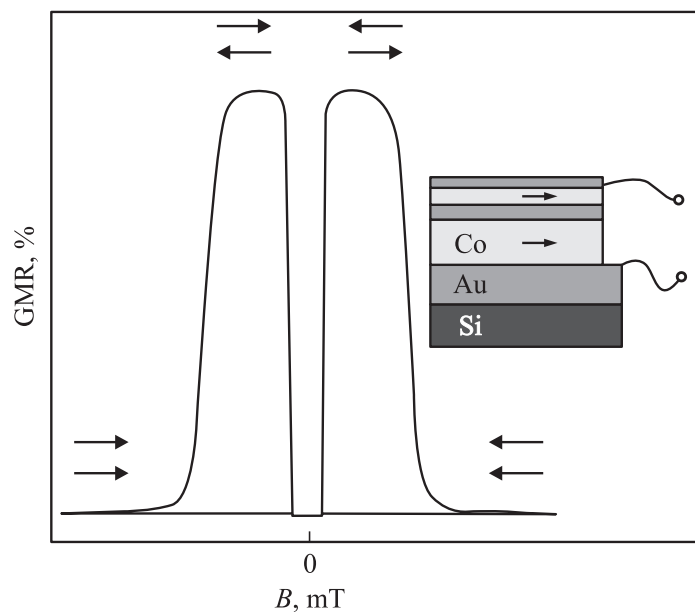
PACS: 75.47.De, 73.21.Ac, 61.16.Bg

Материалы со спин-зависимым рассеиванием электронов на основе Co и Cu или Au в виде мультислоев, пленочных гранулированных сплавов и спин-клапанных структур широко применяются в современном микроприборостроении и сенсорной технике [1]. Особенно перспективным является использование таких материалов при создании накопителей большой емкости. Относительная простота изготовления таких структур и широкий спектр возможностей их применения объясняет заинтересованность в экспериментальном и теоретическом исследовании физических процессов в данных пленочных структурах. Однако методики изготовления спин-клапанных структур ряда авторов (см. например, [2,3]) базируются лишь на результатах исследований их магнитотранспортных свойств, а вопросу изучения особенностей структурно-фазового состояния и диффузионных процессов в них и их связи с магниторезистивными свойствами уделено достаточно мало внимания.

По результатам исследования особенностей структурного и фазового состояния двухслойных пленочных систем на основе материалов со спин-зависимым рассеиванием электронов на основе Cu(Au, Ag)

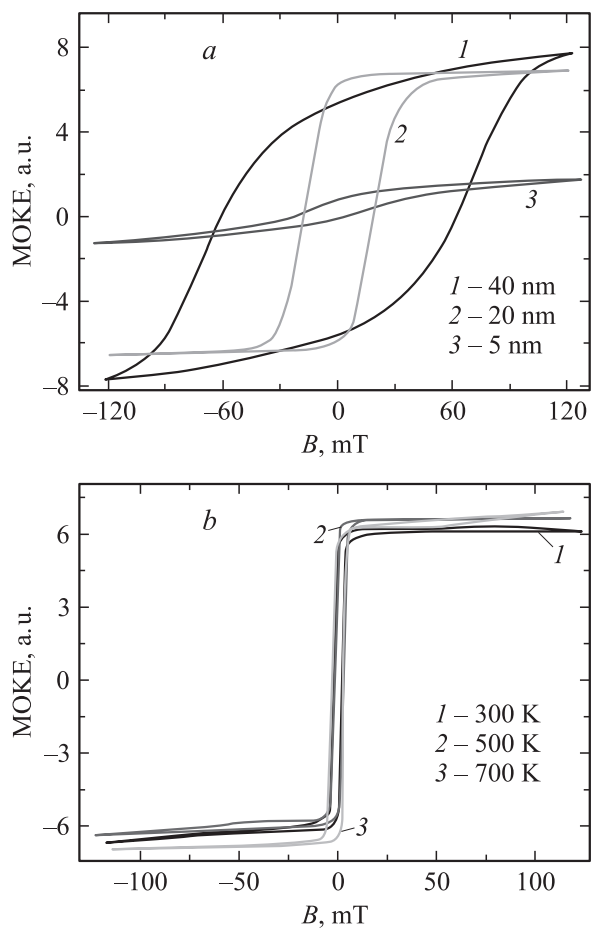
и Co [4] нами была выбрана конфигурация функционального элемента спин-клапанной структуры в виде многослойной пленочной системы Au(3)/Co(3)/Au(Cu)(6)/Co(20)/Au(40)/Cr(3)Sub (Sub — подложка) по аналогии с работой [5].

Пленочные образцы получались методом термического испарения в условиях сверхвысокого вакуума ( $10^{-8}$  Pa). В качестве подложек использовались монокристаллы Si(001). Рабочие магнитные слои Co, которые разделены немагнитной прослойкой из Cu или Au толщиной 6 nm, отличаются по толщине: толщина верхнего „мягкого“ слоя составляет приблизительно 15% от толщины нижнего „жесткого“ слоя (3 и 20 nm соответственно). Такое сочетание обеспечивает функционирование в магнитном поле всего спин-клапана в соответствии со схемой, представленной на рис. 1. Верхний слой Co более чувствительный к изменению величины магнитного поля, и процесс перемагничивания его доменной структуры начинается при меньших значениях поля, в то время как нижний слой имеет большее сопротивление к перемагничиванию. Явление гигантского магнитосопротивления (ГМС) как раз и проявляется в интервале  $\Delta B = B_1 - B_2$ , где  $B_1$  и  $B_2$  — индукция поля начала перемагничивания нижнего и верхнего слоя соответственно. Вспомогательными слоями в нашей структуре выступают нижний слой Cr, который имеет большую адгезию и не смешивается со слоем Au (40 nm), выполняющим функции нижнего электрического контакта. Верхний тонкий слой Au (3 nm) также исполняет роль электроконтакта и функцию защитного слоя всей структуры. Выбор промежуточного слоя был осуществлен с учетом того, что в системах с фрагментами Cu/Co или Au/Co наблюдаются наивысшие значения ГМС. Согласно предложенной нами схеме, разница в коэрцитивности нижнего „жесткого“ и верхнего „мягкого“ слоев Co обеспечивается разницей в толщинах. Усилить разницу в магнитных характеристиках слоев можно с помощью дополнительной термообработки. Нами было предложено получать слои Co при разных температурах подложки. Нижний, более толстый слой, получался при температуре подложки 950 K, а верхний — при комнатной. Основой для этого послужили исследования магнитооптического эффекта Керра (МОКЕ) в однослойных пленках Co, полученных при разных температурах подложек. Так, коэрцитивность пленки, полученной при высокой температуре подложки, приблизительно в 5–6 раз больше, чем у пленки, полученной при комнатной температуре.



**Рис. 1.** Устройство спин-клапана Au(3)/Co(3)/Au(Cu)(6)/Co(20)/Au(40)/Cr(3)/Sub и схема его функционирования в магнитном поле. Стрелками указаны направления векторов намагниченности в верхнем и нижнем магнитных слоях.

Были детально изучены магнитные характеристики однослойных необработанных и отожженных при разных температурах однослойных пленок Co, которые имеют анизотропию коэрцитивности. Максимальная анизотропия наблюдается при начальных низких температурах отжига  $T_{an} = 350\text{--}500$  К. Это можно объяснить особенностями изменения кристаллической структуры однослойных пленок Co. На начальной стадии при низких температурах в пленках Co начинается процесс залечивания дефектов, что приводит к улучшению доменной структуры пленки, которое выражается в увеличении магнитной анизотропии образца. Существенные изменения в структуре можно наблюдать при температурах  $T_{an} \geq 600$  К, когда происходит переход к ГЦК фазе, что сопровождается резким увеличением среднего размера кристаллитов, коэрцитивности и потерей выраженной магнитной анизотропии.



**Рис. 2.** МОКЕ для систем: *a* — Au(15)/Co/Sub с разной толщиной слоя Co после отжига при  $T_{an} = 700$  К; *b* — Au(5)/Co(3)/Cu(6)/Co(20)/Au(40)/Cr(3)/Sub при разных температурах отжига; *c* — Au(5)/Co(3)/Au(6)/Co(20)/Au(40)/Cr(3)/Sub при разных температурах отжига; *d* — Au(5)/Co(3)/Cu(6)/Co(20)/Au(40)/Cr(3)/Sub при разных температурах отжига (нижний слой Co получен при температуре подложки  $T_{sub} = 950$  К).

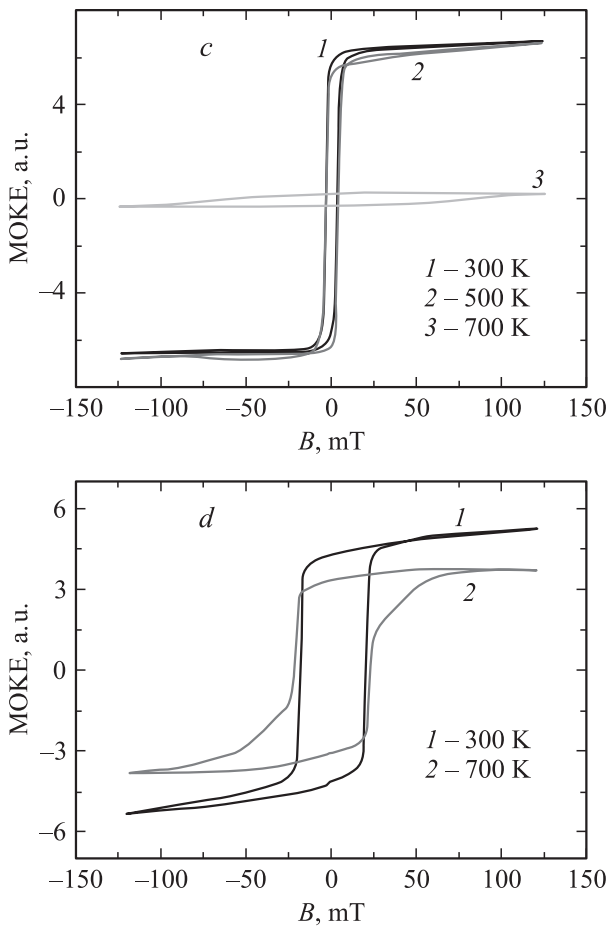
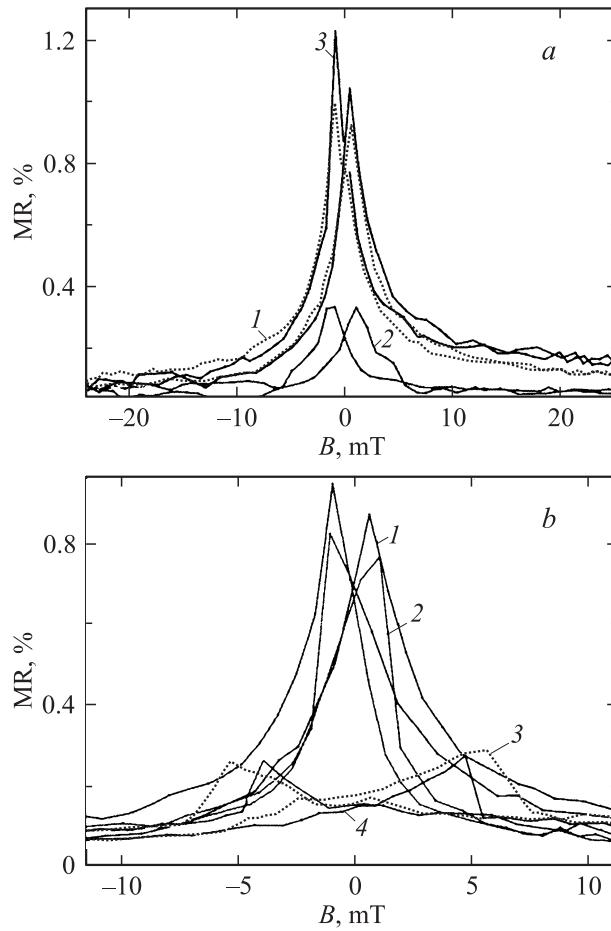


Рис. 2 (продолжение).

При переходе к двухслойным системам Cu/Co или Au/Co изменяется внешний вид сигнала МОКЕ, который подтверждает вывод ряда работ, и в частности [3,4], об образовании твердых растворов (ТР) (Cu, Co) и (Au, Co). Так, для систем Au/Co с разной концентрацией атомов Co после термообработки при  $T_{an} = 700$  К во всех случаях имеет место



**Рис. 3.** MR функциональных элементов спин-клапанных структур: *a* — Au(5)/Co(3)/Cu(6)/Co(20)/Au(40)/Cr(3)/Sub при разных температурах отжига (1 —  $T_n = 300$  К,  $T_{om} = 300$  К; 2 —  $T_n = 300$  К,  $T_{om} = 700$  К; 3 —  $T_n = 950$  К,  $T_{om} = 300$  К); *b* — Au(5)/Co(3)/Cu(*x*)/Co(20)/Au(40)/Cr(3)/Sub с разной толщиной прослойки *x* (1 — 6 nm, 2 — 8 nm и 3 — 12 nm).

нормальный характер зависимости МОКЕ в виде петли гистерезиса, что отвечает случаю образованию гранулированного состояния Co в матрице TP. В случае системы Cu/Co петля гистерезиса по форме существенно не изменяется во время отжигания образцов при температурах  $T_{an} < 800$  К, что связано с образованием TP уже в процессе конденсации. На рис. 2, *a* представлено сравнение формы сигнала МОКЕ для отожженных при 700 К двухслойных систем Au(15)/Co(*x*)/Sub, где  $x = 5, 20$  и 40 nm, что отвечает разной концентрации атомов Co.

В спин-клапанных структурах с прослойкой Cu или Au (рис. 2, *b, c*) зависимость МОКЕ определяется нижним „жестким“ слоем Co. Отжиг систем со слоем Cu не приводит к существенным изменениям, поскольку процесс образования TP состоялся при конденсации. Значительные изменения зависимости МОКЕ от индукции магнитного поля наблюдаются при отжиге спин-клапана со слоем Au при температуре 700 К. Это, очевидно, происходит в результате образования TP (Au, Co) по всему объему пленки. Доказательством этого может быть приведенная на рис. 2, *d* зависимость для системы Au(5)/Co(3)/Cu(6)/Co(20)/Au(40)/Cr(3)/Sub. После отжига при  $T_{an} = 700$  К форма петли гистерезиса становится „ступенькоподобной“, что свидетельствует о быстродействии функционального элемента в магнитном поле, которое может обеспечить, например, его работу в диодном режиме или в режиме переключений.

На рис. 3, *a* приведена зависимость магнитосопротивления  $MR = (R(H) - R(0)) \cdot 100\% / R(0)$  для функциональных элементов Au(5)/Co(3)/Cu(6)/Co(20)/Au(40)/Cr(3)/Sub, отожженных при разных температурах. При комнатной температуре величина  $MR = 1-1.2\%$ , что дает возможность утверждать о наличии признаков ГМС в данном функциональном элементе. На рис. 3, *b* представлены зависимости MR для спин-клапанных структур с разной толщиной прослойки Cu. При ее толщине в 6 nm наблюдается максимальное значение MR в узком диапазоне магнитных полей. Это может быть связано с осцилляционной зависимостью MR от толщины немагнитной прослойки.

Авторы выражают искреннюю благодарность доктору наук Е. Майковой за участие в обсуждении результатов исследований.

Работа выполнена в рамках общего проекта о научно-техническом сотрудничестве между Сумским государственным университетом и Институтом физики Словацкой академии наук (Г. Братислава).

## Список литературы

- [1] *Tanaka M.* // J. Crystal Growth. 2005. V. 278. P. 25–37.
- [2] *Diery B., Speriosu V.S., Gurney B.A.* // J. Magn. Magn. Mater. 1998. V. 93. P. 101–104.
- [3] *Морозов А.И., Морохов И.А.* // ФТТ. 2008. Т. 50. В. 10. С. 1846–1852.
- [4] *Проценко С.И., Чешко И.В., Великодный Д.В.* и др. // Успехи физ. мет. 2007. Т. 8. № 4. С. 247–278.
- [5] *Pinnetier-Lecoeur M., Fermon C., de Vismes A.* // J. Magn. Magn. Mater. 2007. V. 316. P. 246–248.