

Особенности магнитооптических спектров гибридных мультислоев Co/SiO_2

© Е.А. Ганьшина, А.Б. Грановский, Б. Диени*, Р.Ю. Кумаритова, А.Н. Юрасов

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
119899 Москва, Россия

* CEA, Departement de Recherche Fondamentale sur la Matiere Condensee, SP2M/NM,
38054 Grenoble Cedex 9, France

E-mail: granov@magn.phys.msu.su

(Поступила в Редакцию 24 февраля 2000 г.)

В спектральном диапазоне 1.5–4.0 eV измерены магнитооптические спектры бислоев $\text{Co}(x)/\text{SiO}_2(y)$ и гибридных мультислоев $[\text{Co}(x)/\text{SiO}_2(y)]_n$ (x, y — толщины слоев), в которых ультратонкие ферромагнитные слои не являются сплошными, а состоят из эллипсоидальных наночастиц Co с концентрацией вблизи порога перколяции. Обнаружено, что а) знак, величина и спектральная форма магнитооптического сигнала сильно зависят от размера частиц Co ; б) величина сигнала для мультислоев $[\text{Co}(1.6 \text{ nm})/\text{SiO}_2(3.0 \text{ nm})]_6$ при 3.0 eV составляет рекордное для структур на основе Co значение $3 \cdot 10^{-2}$, что примерно в 5 раз превышает соответствующее значение для массивного Co и в 50 раз больше, чем для однородной пленки Co эквивалентной толщины; в) магнитооптический сигнал мультислоев нелинейно зависит от числа периодов, а также от толщины диэлектрического слоя y ; г) зависимость сигнала бислоев и мультислоев с $x = 1.3$ и 1.6 nm от длины волны немонотонна и характеризуется четко выраженными экстремумами. Полученные данные для бислоев связываются с сильным влиянием перколяции на оптические и магнитооптические параметры структуры и интерпретируются в рамках метода эффективной среды и макроскопической френелевской магнитооптики.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 00-02-17797) и НАТО (грант № 973279).

В данной работе представлены результаты экспериментального исследования магнитооптических спектров гибридных мультислоев Co/SiO_2 , схема поперечного сечения которых дана на рис. 1. В гибридных мультислоях "металл-диэлектрик" ферромагнитные слои не являются сплошными, а представляют собой ультратонкие пленки нанокомпозитов с концентрацией ферромагнитных частиц вблизи порога перколяции. Гибридные мультислои сочетают преимущества традиционных мультислоев и гранулированных систем, а именно большую величину магнитосопротивления (в рассматриваемом случае туннельное магнитосопротивление достигает 10% [1]), отсутствие гистерезиса, сравнительно низкие поля насыщения, простоту технологии, а наличие случайных контактов между отдельными гранулами соседних слоев не является критичным для туннельного магнитосопротивления всей структуры.

В силу того что магнитные слои металла состоят из гранул, разделенных диэлектрической прослойкой, для таких систем следует ожидать проявления в оптических и магнитооптических свойствах особенностей, связанных с эффектами перколяции, размерными эффектами, поверхностными плазмонами, усилением локального электрического поля и т.д. Принципиальным отличием от объемных нанокомпозитов является квазидвумерный характер магнитных слоев и периодическое их расположение.

Измерения магнитооптических спектров проводилось в видимом диапазоне спектра в геометрии экваториального эффекта Керра на p -поляризованном свете при угле падения $\varphi = 70^\circ$. Методика изготовления образ-

цов и их структурные свойства подробно описаны в работе [1]. В качестве подложек использовался кристаллический кремний с напыленным на нем буферным слоем SiO_2 толщиной 20 nm (рис. 1). Исследовались бислои $\text{Co}(x)/\text{SiO}_2(y)$ с $y = 2 \text{ nm}$ и $x = 1.3, 1.6$ и 1.8 nm (через x и y обозначены толщины соответствующих слоев) и мультислои $[\text{Co}(x)/\text{SiO}_2(y)]_n$ с количеством бислоев $n = 6, 8$ и 20 . Согласно данным электронной микроскопии [1], гранулы Co представляют собой сплюснутые эллипсоиды со средним размером большим, чем номинальная толщина x . Металлическая проводимость в плоскости слоев наблюдалась при $x \approx 2.0 \text{ nm}$.

Результаты измерений магнитооптических спектров для бислоев и мультислоев представлены на рис. 2 и 3 соответственно. На рис. 3, б для сравнения также показан измеренный в той же геометрии магнитооптический спектр пленки Co с толщиной, превышающей глубину формирования магнитооптического сигнала ($D \approx 50 \text{ nm}$). Как видно из этих данных, спектры как для бислоев, так и для мультислоев носят аномальный характер, который ранее не наблюдался ни для металлических гранулированных сплавов на основе Co [2], ни для нанокомпозитов $\text{Co}_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{1-x}$ с туннельным магнитосопротивлением [3], ни для мультислоев. К таким аномалиям следует отнести следующие.

1) Знак, величина и спектральная форма магнитооптического сигнала сильно зависят от размера частиц Co . В частности, при изменении толщины x дисперсного слоя Co с 1.6 и 1.8 nm сигнал изменяется на порядок и становится отрицательным (рис. 2).

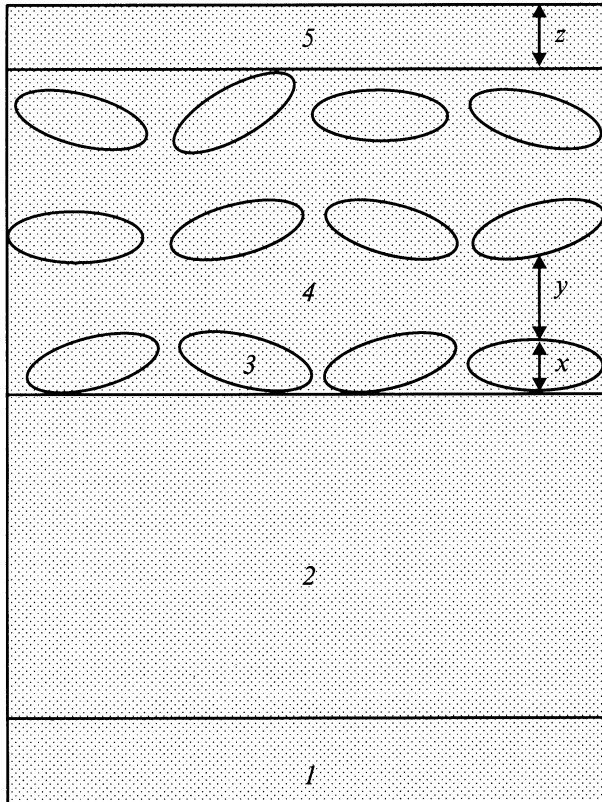


Рис. 1. Схематическое изображение поперечного сечения гибридных мультислоев [Co(x)/SiO₂(y)]_n: 1 — подложка из кристаллического кремния; 2 — буферный слой SiO₂; 3 — слой из эллипсоидальных частиц Co толщиной x (nm); 4 — прослойки диэлектрика SiO₂; 5 — слой SiO₂ толщиной z = 2.0 nm.

2) Величина сигнала для мультислоев [Co(1.6)/SiO₂(3.0)]₆ при 3.0 eV составляет рекордное для структур на основе Co значение $3 \cdot 10^{-2}$, что примерно в 5 раз превышает соответствующее значение для массивного Co (рис. 3, b) и в 50 раз больше, чем для однородной пленки Co эквивалентной толщины (объемная доля Co в монослое порядка 0.5, поэтому для шести таких слоев с $x = 1.6$ nm эквивалентная толщина $d \approx 5$ nm в 10 раз меньше глубины формирования D магнитооптического сигнала). Величина сигнала для бислойных систем (рис. 2) в максимумах также в несколько раз больше соответствующего значения для сплошных пленок Co эквивалентной толщины.

3) Магнитооптический сигнал мультислоев нелинейно зависит от числа периодов (рис. 3, a, b), а также от толщины диэлектрического слоя y .

4) Зависимость сигнала бислоев и мультислоев с $x = 1.3$ и 1.6 nm от длины волны немонотонна и характеризуется четко выраженными экстремумами.

Для интерпретации экспериментальных данных нами выполнены расчеты магнитооптических спектров бислойных структур в рамках макроскопической френелевской магнитооптики с использованием модифицированного метода эффективной среды [3]. Сначала по описан-

ной в работе [3] методике рассчитывались диагональные и недиагональные компоненты тензора диэлектрической проницаемости слоя ферромагнитных частиц, который рассматривался как нанокомпозит, причем варьировался фактор заполнения и фактор формы частиц. Затем, используя результаты работы [4] для магнитооптики многослойных систем, рассчитывался магнитооптический отклик системы SiO₂/нанокомпозит Co-SiO₂/буферный слой SiO₂/Si (рис. 1) с учетом отражений от границ раздела и поглощения в подложке. Использование метода эффективной среды для квазидвумерного ферромагнитного слоя и макроскопической френелевской магнитооптики для ультратонких слоев носит исключительно качественный характер, но тем не менее выполненные расчеты позволяют воспроизвести основные черты поведения магнитооптических спектров бислоев и понять, что наблюдаемые аномалии связаны в основном с близостью состава ферромагнитных слоев к порогу перколяции. Вблизи порога перколяции сильно изменяются оптические параметры системы, которые определяют магнитооптический отклик. Следует подчеркнуть, что нам не удалось получить правильное соотношение амплитуд максимумов и глубины минимумов в спектре, а кроме того, порог перколяции ($x = 1.8$ nm) оказывается несколько заниженным по сравнению с экспериментом ($x = 2.0$ nm). По-видимому, это связано с указанными выше недостатками метода вычислений.

Ситуация существенно осложняется в случае мультислоев. Хотя и для них влияние перколяции и влияние оптических параметров на вид спектра и амплитуду сигнала в достаточно очевидно, тем не менее нет кор-

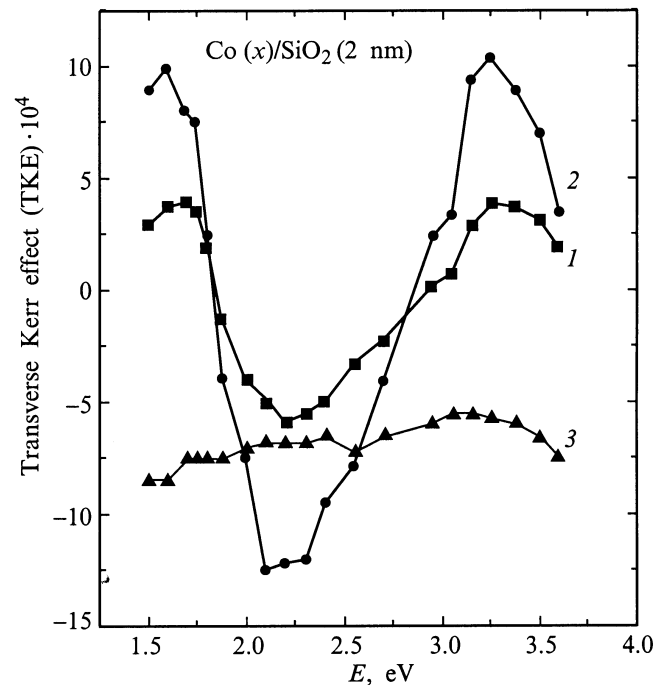


Рис. 2. Магнитооптические спектры бислоев Co(x)/SiO₂(y) с $y = 2.0$ nm: 1 — $x = 1.3$ nm; 2 — $x = 1.6$ nm; 3 — $x = 1.8$ nm.

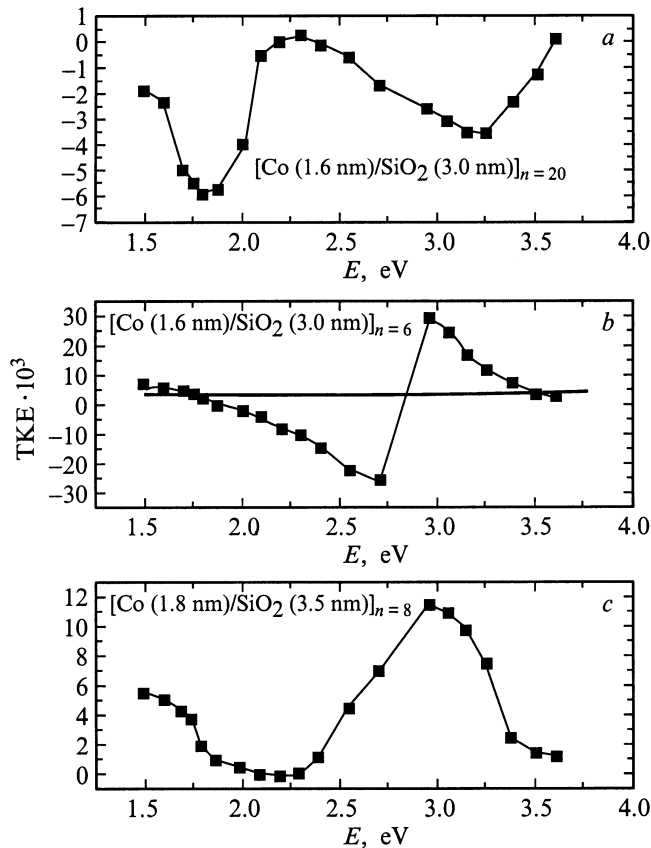


Рис. 3. Магнитооптические спектры мультислоев $[\text{Co}(x)/\text{SiO}_2(y)]_n$. *a*: $x = 1.6 \text{ nm}$, $y = 3.0 \text{ nm}$, $n = 20$. *b*: $x = 1.6 \text{ nm}$, $y = 3.0 \text{ nm}$, $n = 6$. Горизонтальной линией показан магнитооптический спектр толстых пленок Co. *c*: $x = 1.8 \text{ nm}$, $y = 3.5 \text{ nm}$, $n = 8$.

реляции в положении экстремумов для мультислоев и бислоев, а также для мультислоев с разным числом периодов. По-видимому, периодическое расположение перколяционных слоев оказывает сильное влияние на магнитооптические спектры, что требует дальнейшего экспериментального и теоретического исследований.

Сравнение спектров для бислоев и мультислоев позволяет отметить также два важных обстоятельства. Во-первых, не обнаружено проявление квантовых размерных эффектов в магнитооптических свойствах исследованных образцов. По аналогии с ультратонкими слоями [5,6] квантование электронного спектра в наночастицах должно приводить к осцилляции магнитооптического отклика при изменении как размера частиц, так и частоты света. Такие осцилляции магнитооптического сигнала от толщины пленок действительно наблюдались недавно для пленок Fe и Co [6]. Казалось бы, что наблюдаемые два максимума в магнитооптических спектрах бислоев при 1.5 и 3.0 eV и сильная зависимость их амплитуд от размера частиц указывают также на проявление квантовых размерных эффектов. Однако характер зависимостей сигнала эффекта Керра от размера

частиц и частоты света для бислоев (рис. 2) и выполненные расчеты показывают, что эти закономерности отнюдь не связаны с квантованием электронного спектра. Наиболее убедительным доказательством этого является и отсутствие аналогичных максимумов при тех же частотах в магнитооптических спектрах мультислоев (рис. 3). По-видимому, неизбежная для гранулированных систем дисперсия гранул по размерам подавляет проявление квантовых размерных эффектов, по крайней мере при комнатной температуре. Поскольку магнитооптические свойства являются частотными аналогами аномального эффекта Холла, то отсюда можно заключить, что квантовый размерный эффект не является основной причиной гигантского аномального эффекта Холла в наноконпози-тах [7].

Во-вторых, следует обратить внимание на глубокий минимум в спектрах бислоев при 2.0 eV, который связан с плазменными колебаниями. Действительно, частота плазменных колебаний для малых сферических частиц в среде с диэлектрической проницаемостью ϵ в $(2\epsilon + 1)^{1/2}$ раз меньше частоты объемных плазменных колебаний (для Co $\omega_p \approx 3.91 \text{ eV}$) [8], так что для гранулированной системы Co–SiO₂ частота плазменных колебаний приходится на видимый диапазон спектра. Это подтверждается и прямыми измерениями оптических свойств бислоев. Отсутствие аналогичного минимума при такой же или близкой частоте для мультислоев свидетельствует о сильном взаимодействии между слоями ферромагнитных частиц и о возможном влиянии туннелирования между слоями на плазменные колебания. Это взаимодействие сильно зависит как от размера частиц x , так и толщины прослоек y и оказывает влияние на формирование оптических, а как следствие этого, и магнитооптических свойств гибридных мультислоев.

В заключение подчеркнем, что обнаруженное значительное усиление магнитооптических эффектов в гибридных мультислоях открывает новые возможности для поиска материалов с повышенным магнитооптическим сигналом.

Список литературы

- [1] B. Dieny, S. Sankar, M.R.Mc. Cartney, D.J. Smith, P. Bayle-Guillemaud, A.E. Berkowitz. *J. Magn. Magn. Mater.* **185**, 3, 283 (1998).
- [2] E. Ganshina, A. Granovsky, V. Gushin, M. Kuzmichov, P. Podrugin, A. Kravetz, E. Shipil. *Physica A* **241**, 45 (1997).
- [3] A. Granovsky, M. Kuzmichov, J.P. Clerc. *J. Magn. Soc. Jap.* **23**, 382 (1999).
- [4] В.М. Маевский. *ФММ* **59**, 213 (1985).
- [5] A. Vedayev, N. Ryzhanova, S. Young, B. Dieny. *Phys. Lett.* **A215**, 317 (1996).
- [6] E.E. Shalyguina, I.A. Pogrebnaya, O.A. Shalyguina, Kyung-HoShin. *Proceedings of MISM'99. M.* (1999). Part 1, P. 337.
- [7] A.B. Pakhomov, X. Yan, N. Wang, X.N. Jing, B. Zhao, K.K. Fung, J. Xhic, T.F. Hung, S.K. Wong. *Physica A* **241**, 344 (1997).
- [8] Ю. Петров. *Физика малых частиц*. Наука, М. (1982).