

Оптические свойства магнитных квази-2D наноконпозитов в ИК-области спектра

© А.Н. Драченко*, А.Н. Юрасов**, И.В. Быков***, Е.А. Ганьшина**, А.Б. Грановский**, В.В. Рыльков****, Д.В. Смирнов*,*****, J. Leotin*, B. Dieny*****

* LPMC and SNCMP, Complexe Scientifique de Rangueil INSA, 31077 Toulouse Cedex, France

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

*** Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского Российской академии наук, 117975 Москва, Россия

**** Российский научный центр "Курчатовский институт", 123182 Москва, Россия

***** Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, 194021 Санкт-Петербург, Россия

***** CEA/Dep. de Recherche Fondamentale sur la Matiere Condensee, 38054 Grenoble, France

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

(Поступила в Редакцию 10 октября 2000 г.)

Исследованы спектры оптического поглощения магнитных квази-2D островковых пленок Co, а также гибридных мультислоев (Co/SiO₂), в которых островковые пленки Co были отделены слоями SiO₂. Установлено, что при маскировании пленки Co тонким слоем SiO₂ поглощение заметно возрастает, превышая 0,8, причем в ситуации, когда содержание Co заведомо меньше критического, отвечающего перколяционному переходу. Более того, максимальная величина поглощения в этом случае слабо зависит как от эффективной толщины пленок, так и от количества слоев Co. Численный анализ показывает, что обнаруженные особенности спектров поглощения в структурах на основе квази-2D гранулированных пленок Co существенным образом связаны со своеобразием интерференционных эффектов, имеющих место в данных системах.

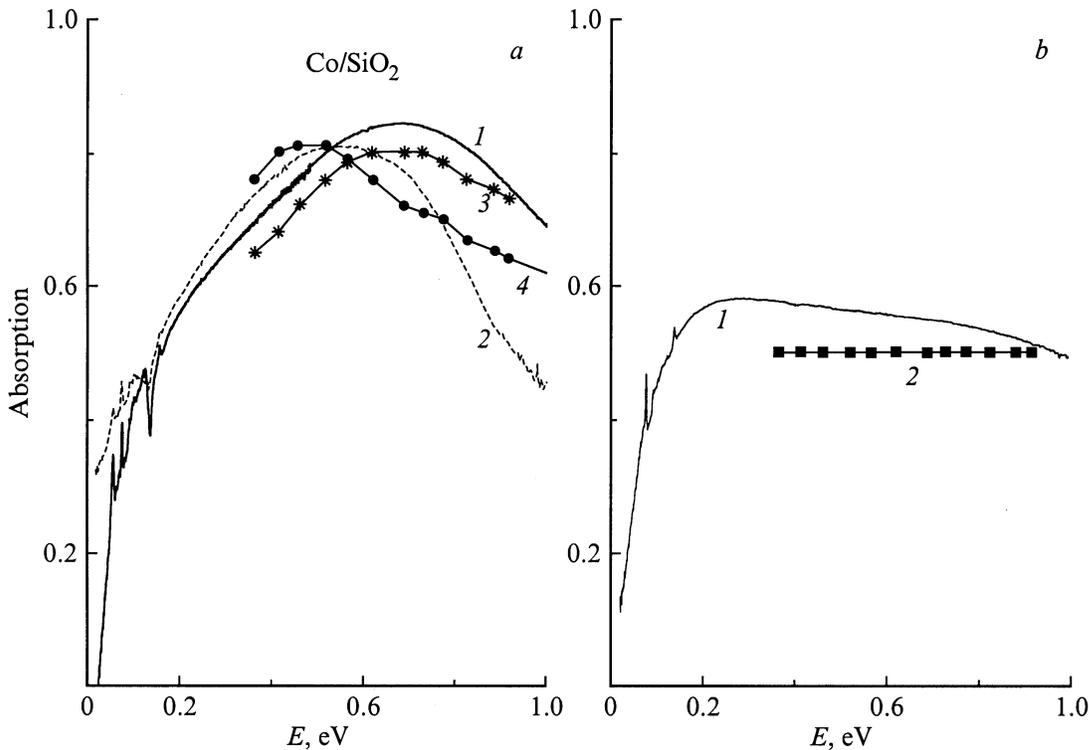
Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 00-02-17191 и 00-02-17797), Российско-французского фонда PICS (98-02-22037) и Межотраслевой научно-технической программы "Физика твердотельных наноструктур" (97-1081).

Металл-диэлектрические композиты (гранулированные пленки) представляют собой совокупность хаотически расположенных малых металлических включений размером 1–10 nm и диэлектрика, заполняющего промежутки между ними. Существует некоторое критическое содержание металла $x = x_c$ (порог протекания), выше которого эти материалы обладают металлическими свойствами. Ниже порога проводимость композита определяется туннельными переходами электронов между отдельными гранулами металла и подобна прыжковой проводимости легированных полупроводников. С физической и практической точек зрения наибольший интерес представляет ряд уникальных явлений, наблюдаемых в этих материалах при содержании металла, близком к порогу протекания, в частности аномальное поглощение и рассеяние излучения, нелинейные оптические явления [1,2], а в случае магнитных наноконпозитов — магнитооптические и магниторефрактивные эффекты, гигантское отрицательное магнитосопротивление и гигантский аномальный эффект Холла [3–5].

В настоящее время на примере квази-2D гранулированных пленок на основе немагнитных металлов типа Au [6,7] установлено, что максимальная величина аномального поглощения в данных системах достигается вблизи перколяционного перехода и не превышает

0,5, что согласуется с результатами теоретических расчетов [1]. В данной работе приводятся результаты экспериментального исследования спектров оптического поглощения магнитных квази-2D островковых пленок Co, а также гибридных мультислоев (Co/SiO₂), в которых островковые пленки Co были отделены слоями SiO₂. Установлено, что при маскировании пленки Co тонким слоем SiO₂ поглощение заметно возрастает, превышая 0,8, причем это происходит в случае, когда содержание Co заведомо меньше критического, отвечающего перколяционному переходу. Более того, максимальная величина поглощения в этом случае слабо зависит как от эффективной толщины пленок, так и от количества слоев Co.

Квази-2D структуры были получены путем напыления островковой пленки Co с эффективной толщиной 1,0–1,25 nm на Si-подложку, покрытую 300 nm буферным слоем SiO₂. Однородность пленок достигалась за счет вращения кремниевой подложки, при этом ее температура поддерживалась равной 300 K. Мультислои получались чередованием островковых пленок Co и слоя SiO₂ толщиной 3–5 nm. Результаты структурных исследований образцов приведены в [4]. Перколяционный переход в данных системах наблюдался при эффективной толщине Co ≈ 2.0 nm [4]. Были исследованы два



Спектры поглощения гибридных систем Co/SiO₂. *a*) Экспериментальные спектры системы SiO₂ (50 nm)/наноккомпозит Co-SiO₂/буферный слой SiO₂ (300 nm)/Si: 1 — бислоем Co (1.3 nm)/SiO₂, 2 — мультислоем [Co (1.8 nm)/SiO₂ (3 nm)]_{n=8}, 3, 4 — теоретические спектры системы SiO₂ (50 nm)/наноккомпозит Co-SiO₂/буферный слой SiO₂ (300 nm)/Si ($x = 0.4$, $L = 0.8$) для толщин наноккомпозита 5 и 30 nm соответственно. *b*) Экспериментальный спектр системы наноккомпозит Co-SiO₂/буферный слой SiO₂ (300 nm)/Si: 1 — бислоем Co (1.8 nm)/SiO₂, 2 — теоретический спектр системы наноккомпозит Co-SiO₂/буферный слой SiO₂ (300 nm)/Si, толщина наноккомпозита 5 nm, $x = 0.4$, $L = 0.8$.

типа структур: с внешним маскирующим слоем SiO₂ толщиной ≈ 50 nm, предохраняющим пленки Co от воздействия окружающей среды, а также без данного покрытия.

Поглощение A в структурах определялось из измерений их пропускания T и отражения R : $A = 1 - T - R$. Измерения были выполнены с помощью Фурье-спектрометра Bruker IFS 113 в диапазоне длин волн $\lambda = 1.2-70 \mu\text{m}$ при температуре 300 K. Результаты исследований представлены на рисунке.

Прежде всего отметим, что в квази-2D структурах без маскирующего слоя SiO₂ с содержанием металла, близким к точке перколяционного перехода (эффективная толщина Co 1.8 nm), величина поглощения A близка к 0.5 и практически не зависит от энергии квантов на частотах выше некоторой, определяемой обратным временем релаксации электронов, как и предсказывается в [1]. В диэлектрических пленках Co-SiO₂ с толщиной Co 1.3-1.6 nm обнаружен максимум поглощения. Энергия максимума $\hbar\omega \approx 0.67$ eV существенно меньше энергии возбуждения поверхностных плазмонов $\hbar\omega_{sp}$ в изолированных частицах Co (для сферических частиц Co в SiO₂ по оценке $\hbar\omega_{sp} \approx 1.3$ eV при величине плазменной частоты $\hbar\omega_p = 3.7$ eV). Отметим также, что поглощение в максимуме достигает аномальной величины

0.84, заметно превышающей теоретический предел для двумерных гранулированных пленок, причем в среднем ИК-диапазоне форма спектра практически не изменяется при увеличении толщины пленки (от 1.3 до 1.6 nm). Интересно, что для мультислоев (количество бислоев Co/SiO₂ составляет восемь) с маскирующим покрытием поглощение также достигает 0.8, однако его максимум наблюдается не при 0.62 eV, как для бислоев, а при 0.5 eV (см. рисунок).

Для анализа обнаруженных особенностей были выполнены численные расчеты спектров поглощения. Расчет проводился в рамках обобщенной модели эффективной среды с учетом анизотропии формы частиц [8]. Сначала в симметризованном приближении Максвелла-Гарнетта [8] мы рассчитывали диагональные компоненты тензора эффективной диэлектрической проницаемости слоя ферромагнитных частиц, считая его наноккомпозитом Co_x-(SiO₂)_{1-x}, причем варьировали фактор заполнения x и фактор формы частиц L . Далее по формулам Френеля рассчитывалось поглощение системы SiO₂/наноккомпозит Co-SiO₂/буферный слой SiO₂/Si с учетом отражений от границ раздела и поглощения в подложке. Мы предложили, что частицы (их размер 1-2 nm [4]) в среднем имеют изотропную форму, однако при промежуточных концентрациях они кластеризуются,

причем в силу их магнитных свойств возникающие образования (в частности, цепочки из гранул) имеют анизотропную форму [9]. Результаты расчета также представлены на рисунке. Как видно из рисунка, расчеты, выполненные с учетом того, что в образце наблюдаются вытянутые образования — ”эллипсоиды” с соотношением осей, достигающим 1 к 5, удовлетворительно описывают спектр образцов с эффективной толщиной S_0 , равной 1.3 nm. Если взять сферические частицы, то поглощение будет меньше 0.8, но главным условием такой величины и максимума поглощения является интерференция, которая учитывается при расчетах по формулам Френеля. Для мультислоев получаются правильное положение и величина максимума поглощения, но остальная часть спектра отличается от экспериментального из-за того, что мультислойная система рассчитывалась в приближении эффективной среды и не была учтена периодичность слоев, т. е. мультислойная система рассматривалась как гранулированный сплав. Необходимо также подчеркнуть, что описание квази-2D слоя $Co-SiO_2$ в рамках теории эффективной среды для трехмерного случая тоже может привести к дополнительной погрешности, особенно непосредственно вблизи порога перколяции [10].

Таким образом, численный анализ показывает, что обнаруженные особенности спектров поглощения в структурах на основе квази-2D гранулированных пленок Co существенно связаны со своеобразием интерференционных эффектов, имеющих место в данных системах. При этом заметную роль также играет и анизотропия формы кластеров из Co , обусловленная ферромагнитными свойствами металла. Отметим также, что достаточно высокий уровень поглощения бислоев Co/SiO_2 с активационной проводимостью свидетельствует о принципиальной возможности их использования при создании высокочувствительных болометрических датчиков ИК-излучения, в которых поглощающий элемент одновременно является измерителем температуры.

Авторы выражают благодарность за обсуждение работы и ценные советы Б.А. Аронзону.

Список литературы

- [1] A.K. Sarychev, D.J. Bergman, Y. Yagil. Phys. Rev. **B51**, 8, 5366 (1995); V.M. Shalaev, A.K. Sarychev. Phys. Rev. **B57**, 20, 13 265 (1998).
- [2] F. Brouers, S. Blacher, A.K. Sarychev. Phys. Rev. **B58**, 23, 15 897 (1998).
- [3] А.Б. Грановский, М.В. Кузьмичев, Ж.П. Клерк. ЖЭТФ **11**, 1762 (1999).
- [4] B. Dieny, S. Sankar, M.Me. Carthey, D. Smith, P. Baylle-Guillemend, A. Berkowitz. J. Magn. Magn. Mater. **185**, 283 (1998).

- [5] Б.А. Аронзон, Д.Ю. Ковалев, А.Н. Лагарьков, Е.З. Мейлихов, В.В. Рыльков, М.А. Седова, Н. Негре, М. Гойран, Дж. Леотин. Письма в ЖЭТФ **70**, 2, 87 (1999).
- [6] Y. Yagil, P. Gadenne, C. Julien, G. Deutscher. Phys. Rev. **B46**, 4, 2503 (1992).
- [7] S. Berthier, J. Peiro, S. Fagnent, P. Gadenne. Physica **A241**, 1–2, 1 (1997).
- [8] A. Granovsky, M. Kuzmichev, J.P. Clerc. J. Magn. Soc. Jap. **23**, 382 (1999).
- [9] Ю.И. Петров. Физика малых частиц. Наука, М. (1982).
- [10] A.P. Vinogradov, I.G. Busanov, O.P. Posudnevsky, V.E. Romanenko. J. Phys.: Condens. Matter. **6**, 4351 (1994).