В заключение следует отметить, что при взаимодействии полиэлектролитных сеток с противоположно заряженными ПАВ соотношение объемов геля и воды определяет как положение, так и характер коллапса. Наблюдаемые экспериментальные закономерности находятся в хорошем согласии с предсказаниями теории.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 93-03-4187) и Международного научного фонда по гранту М6Т000.

ЛИТЕРАТУРА

- Стародубцев С. Г., Рябина В. Р., Хохлов А. Р.//Высокомолек. соедине-ния. А. 1990. 32, № 5. С. 969.
 Кhokhlov А. R., Kramarenko E. Yu., Makhaeva E. E., Starodub-tsev S. G.//Macromolecules. 1992. 25. Р. 4779.
- 3. Khokhlov A. R., Starodubtsev S. G., Vasilevskaya V. V.//Adv. in Po-lymer Sci. 1993. 109. P. 123-171.
- 4. Ле Минь Тхань, Махаева Е. Е., Стародубцев С. Г.//Высокомолек. со-единения. А. 1993. 35, № 4. С. 408.
- 5. Хандурина Ю. В., Дембо А. Т., Рогачева, В. Б. и др.//Там же. 1994. 36, № 2. С. 235.
- 6. Хандурина Ю. В., Рогачева В. Б., Зезин А. Б., Кабанов В. А.//Там же. С. 229.
- 7. Василевская В. В., Крамаренко Е. Ю., Хохлов А. Р.//Там же. 1991. **33.** № 5. C. 1062.

Поступила в редакцию 11.01.95

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3, ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1995. Т. 36, № 5

УДК 537.632; 538.975

магнитооптическое исследование УЛЬТРАТОНКИХ пленок железа и кобальта

Е. Е. Шалыгина, В. Л. Козловский, Ду Сяньбо

(кафедра магнетизма)

Приведены результаты исследования магнитных и магнитооптических свойств ультратонких пленок железа и кобальта, а также влияния на указанные характеристики толщины и состава немагнитного слоя (Си и Та) между пленкой и подлож-кой. Установлена сильная зависимость магнитных и магнитооптических свойств пленок железа и кобальта от их толщины. Впервые дано объяснение зависимости экваториального эффекта Керра в ферромагнитных пленках от их толщины на основе расчетов глубины формирования магнитооптического сигнала.

Фазовые переходы в двухразмерных (2Д) ферромагнетиках являются объектом исследования физиков-теоретиков в течение последних 50 лет. Работа Онсагера [1] оказалась поворотной вехой в теоретической физике. В отличие от позже выполненных расчетов [2] в [1, 3, 4] было доказано, что в 2Д-изотропных гейзенберговских системах возможно существование дальнего и ближнего порядка при конечных температурах. Экспериментальное исследование 2Д-ферромагнетиков и соответственно проверка теоретических предсказаний о физических эффектах, появляющихся при существенном уменьшении толщины магнетика t [5-7] (например, поведение намагниченности с изменением t). стали возможными лишь в последние годы, когда были разработаны методы получения ультратонких (вплоть до одного монослоя) пленок Зд-переходных металлов. Появление тонкопленочных устройств (в ча-

51

стности, магниторезистивных датчиков, магнитооптических сред для перпендикулярной магнитной записи) стимулировало изучение физических свойств ультратонких пленок, в том числе многослойных магнитных структур, представляющих собой чередование магнитных и немагнитных слоев субмикронной толщины (сверхрешеток).

В настоящей работе экспериментально исследованы магнитные и магнитооптические свойства ультратонких пленок железа и кобальта, напыленных на стеклянные и кремниевые подложки, а также изучено влияние на указанные характеристики толщины и состава немагнитного слоя (Си и Та), нанесенного между пленкой и подложкой.

1. Методики измерения. Изучаемые образцы

Измерения магнитных характеристик (поля насыщения Н_s, коэрцитивной силы H_c, поля анизотропии) изучаемых образцов были выполнены на магнитооптической установке, собранной на базе микроскопа МИС-11 (магнитооптическом магнитометре). В работе использовался модуляционный метод регистрации магнитооптических эффектов, заключающийся в модуляции интенсивности линейно-поляризованного света, отраженного от образца при перемагничивании его переменным магнитным полем. При этом регистрируется относительное изменение интенсивности отраженного света $\delta = \Delta I/I_0$, где I_0 — постоянная составляющая интенсивности отраженного света в отсутствие магнитного поля, а ΔI — переменная, пропорциональная глубине модуляции света за счет магнитооптического эффекта. Описанный способ измерения позволяет регистрировать относительное изменение интенсивности отраженного от перемагничиваемого образца света вплоть до 10-5. Более подробное описание установки дано в [8]. Исследование магнитооптических свойств изучаемых образцов было проведено на магнитооптической установке, собранной на базе двойного монохроматора ДМР-4. Здесь также использовался модуляционный метод регистрации магнитооптических эффектов. Подробное описание установки дано в [9]. Структурные особенности исследуемых пленок были изучены с помощью рентгеновского дифрактометра ДРОН-4.

Для получения пленок использовалась сверхвысоковакуумная установка УСУ-4. Предварительный вакуум ~10⁻⁴ мм рт. ст. создавался с помощью адсорбционного циолитового насоса, охлаждаемого жидким азотом. С помощью магниторазрядного насоса достигался вакуум порядка 10-9 мм рт. ст. Для нанесения пленок использовалось магнетронное распылительное устройство. В качестве рабочего инертного газа применялся ксенон при давлении 7×10⁻⁴ мм рт. ст. Подложками служили кремний и стекло. Температура подложек была комнатной. Толщина t пленок Fe и Co определялась по времени напыления и скорости осаждения пленок и изменялась от 5 до 2000 А. Для определения скорости осаждения измерялся вес пленки известных размеров. Материалом для немагнитного слоя между пленкой и подложкой служили медь и тантал. Толщина этого слоя была равна 400 А. Для предотвращения окисления пленки Fe и Co были покрыты 100 Å слоем углерода.

2. Результаты измерений и их обсуждение

На магнитооптическом магнетометре с помощью экваториального эффекта Керра (ЭЭК) (при этом внешнее магнитное поле параллель-

но поверхности пленки и перпендикулярно плоскости падения света) на изучаемых образцах были измерены кривые намагничивания для двух взаимно-перпендикулярных направлений (1 и 2). В случае 1 направление *H* совпадало с ориентацией поля в плоскости подложки в процессе изготовления пленки. На рис. 1 *а* и б представлены соответст-



Рис. 1. Типичные кривые намагничивания для пленок железа (a) и кобальта (б) толщиной t < 200 Å, измеренные для двух взаимно-перпендикулярных направлений. На вставках приведены зависимости коэрцитивной силы H_c от толщины соответствующих пленок $t: a - H_c(t)$ для образцов с Та-слоем (1), с Си-слоем (2), для пленок железа, напыленных непосредственно на подложку (3); $\delta - H_c(t)$ для образцов с Та-слоем (1), для пленок кобальта, напыленных непосредственно на подложку (2), пунктирная кривая — зависимость $H_s(t)$ для Со-пленок на стекле



Рис. 2а

Рис. 26



венно типичные зависимости $\delta(H)/\delta_s \sim M(H)/M_s$ (здесь δ_s — значение ЭЭК при $M=M_s$, M_s — намагниченность насыщения) для Fe и Co толщиной t<200 Å. Видно, что кривые 1 и 2 существенно различаются. В частности, кривые 1 имеют начальный участок, на котором ЭЭК практически равен нулю. В некотором поле $H=H_c$ наблюдается резкое возрастание ЭЭК. В области $H>H_c$ регистрируется слабое изменение ЭЭК, а начиная с некоторого поля (поля насыщения образца H_s), величина ЭЭК в пределах ошибки эксперимента не изменяется. Форма петли гистерезиса в этом случае близка к прямоугольной (коэффициент прямоугольности равен 0,95—0,98). Кривые 2 в большом интервале полей характеризуются линейной зависимостью ЭЭК от величины. внешнего магнитного поля.

Различие кривых 1 и 2 свидетельствует о наличии магнитной анизотронии в плоскости пленок. Согласно существующим представлениям. (см., напр., [10]) кривая 1 и соответственно прямоугольная петля гистерезиса наблюдаются при перемагничивании тонкой, однодоменной пленки вдоль оси легкого намагничивания, а кривая 2 — вдоль трудного. В первом случае перемагничивание образцов при $H < H_s$ может осуществляться за счет необратимого роста зародышей перемагничивания, а во втором — за счет вращения вектора намагниченности пленки. Причиной появления магнитной анизотропии в пленках с t < <200 А является наличие внешнего магнитного поля в процессе изготовления образцов (поле в плоскости подложки ~110 Э). Аналогичные измерения показали, что на пленках железа и кобальта с $t{>}200~{
m \AA}$ кривые 1 и 2 не различаются и совпадают с кривыми 1 для образцовс t<200 Å. При измерении полярного эффекта Керра (ПЭК) на изучаемых образцах было установлено, что ПЭК в полях вплоть до 1 кЭ в пределах ошибки эксперимента отсутствует. Это позволило сделать. вывод о том, что в исследуемых пленках вектор намагниченности ориентирован в плоскости пленок. Таким образом, подтвержден основной вывод работ [1, 3, 4], состоящий в том, что анизотропия, появляющаяся из-за нарушения трансляционной симметрии, даже в пленках монослойного диапазона толщин (t<100 Å) не приводит к перпендикулярной относительно их плоскости ориентации спинов.

Остановимся теперь на следующем экспериментальном факте. Согласно [11] поле, при котором наблюдается резкое возрастание магнитооптического сигнала (в частности, ЭЭК), соответствует коэрцитивной силе образца H_c . Для изучаемых образцов были найдены зависимости $H_c(t)$. Анализ зависимостей коэрцитивной силы H_c от толщины изучаемых пленок показал следующее. Для всех образцов с t<250 Å значение H_c падает с уменьшением t, а при 400 Å < t<2000 Å H_c уменьшается с ростом t (см. вставки на рис. 1). Поле насыщения H_s имеет аналогичную зависимость от t (см. приведенную для примера на вставке к рис. 1, δ пунктирную кривую). Кроме того, было установлено, что пленки железа с Та-слоем имеют H_c в 2—3 раза выше, чем с медным, и в 3—4 раза выше, чем образцы, в которых пленка железа была напылена непосредственно на подложку. Состав подложки (стекло или кремний) слабо влияет на величину H_c .

В случае пленок кобальта наличие немагнитного слоя оказывает существенное влияние на величину H_c начиная с t > 100 Å.

При объяснении описанных выше результатов были приняты во внимание данные о структурных особенностях изучаемых образцов. Вероятно, одной из главных причин обнаруженного различия величины H_c на образцах с немагнитным слоем и без него является то, что Таи Си-слои, а также Fe- и Со-пленки текстурированы, причем степень текстурированности Fe- и Со-пленок при наличии немагнитных слоев значительно выше, чем пленок, напыленных непосредственно на кремниемые и стеклянные подложки. На величину H_c может также оказывать существенное влияние различие энергии взаимодействия между магнитной пленкой и, соответственно, Та, Си, Si, стеклом (см., напр., [12]).

Вид же кривых $H_c(t)$, по-видимому, обусловлен следующим. Рентгеноструктурный анализ изучаемых образцов показал, что размер кристаллитов, формирующих массив пленки, порядка ее толщины. Ранее в работе [13] было установлено; что значение H_c с ростом от 10 до 300 Å среднего размера ферромагнитных частиц (Fe, Co и др.) увеличивается, а при больших значениях уменьшается. Практически такая же зависимость H_c от размеров кристаллитов получена и нами.

Магнитооптические свойства изучаемых образцов были исследованы на спектральной установке, собранной на базе монохроматора ДМР-4. Спектральные зависимости ЭЭК $\delta(\hbar\omega)$ были измерены в области энергии квантов падающего света 1,6—4,2 эВ при угле падения света на образец φ =65°. На рис. 2 приведены для примера дисперсионные зависимости $\delta(\hbar\omega)$, полученные на образцах со следующими структурными формулами: подложка/400 Å Ta/t Å Fe/100 Å C, подложка/400 Å Ta/t Å Co/100 Å C. Анализ этих данных, а также полученных на других образцах позволил сделать следующие выводы.

Кривые $\delta(\hbar\omega)$ для образцов с $t_{\rm Ee} > 250$ Å и с $t_{\rm Co} > 200$ Å в пределах ошибки эксперимента совпадают. Кроме того, эти кривые совпали с зависимостями $\delta(\hbar\omega)$, полученными нами ранее для монокристаллического железа и кобальта. При $t_{\rm Fe} < 250$ Å и $t_{\rm Co} < 200$ Å величина ЭЭК падает с уменьшением толщины пленки t. На образцах с t < 10 Å ЭЭК (а также ПЭК) не был обнаружен.

Кривые $\delta(\hbar\omega)$ были использованы для построения зависимостей $\delta(t)$ при фиксированных значениях энергии квантов падающего света $\hbar\omega$ (рис. 3). Из рис. 3 видно, что начальный участок имеет линейную

зависимость δ от t, а при $t_{\rm Fe}$ > 250 Å и $t_{\rm Co}$ > 200 Å δ = const. Из кривых $\delta(t)$ можно найти критическую толщину $t_{\rm cr}$, начиная с которой ЭЭК не изменяется по величине. Оценить $t_{\rm cr}$ целесообразно по точке пересечения прямых $\delta \sim t$ и δ = const. Оказалось, что при $\hbar \omega$ =1,7 и 3,4 эВ для Со-пленок $t_{\rm cr}$ равна соответственно ~ 200 и 140 Å, а для пленок железа — 240 и 210 Å.





При обсуждении этого результата необходимо напомнить, что магнитооптическое исследование ультратонких магнитных пленок другими авторами в основном осуществляется с помощью продольных эффектов Керра (ЭК) (полярного и меридионального). В связи с этим анализ полученных данных проводится с учетом возможного вклада от эффекта Фарадея (ЭФ), который испытывает свет, проходя в пленку и отражаясь от границы пленка/подложка. Так, в [14] было показано, что ЭК определяет значения регистрируемого сигнала Ψ для толстопленочных образцов, а ЭФ — для ультратонких. Кроме того, была выделена область промежуточных значений t, где ЭК и ЭФ равновелики, что обусловливало появление пика на кривой $\Psi(t)$. Это затрудняло оценку t_{cr} . Толстопленочными считались образцы, толщина которых превышала глубину проникновения света в среду $t_{pen} = \lambda/(4\pi k)$ (λ — длина волны падающего света, k — коэффициент поглощения среды). Расчеты, выполненные позже в [15], подтвердили выводы работы [14]. Однако в [15] вместо t_{pen} была введена новая физическая величина — «магнитооптическая информационная глубина» — $t_0 = \lambda/(8n)$ (*n* — показатель преломления света в среде), соответствующая толщине приноверхностного слоя образца, формирующего магнитооптический сигнал. Следует отметить, что глубина проникновения света в среду и глубина формирования отраженной волны анализировались и сопоставлялись во многих работах. Так, в [16] для гематита было экспериментально определено значение t_0 , которое оказалось сильно отличающимся от рассчитанной величины t_{pen} , но соотношение, позволяющее рассчитать t_0 , было получено только в [15].

Описанные выше результаты были получены с помощью поперечного ЭЭК. В этом случае вклад от ЭФ исключается. Следовательно, оценка $t_{\rm cr}$ является более надежной. Поскольку наиболее изученным является железо (известны оптические постоянные массивных кристаллов и тонких пленок), то сравнение $t_{\rm pen}$ и t_0 проведем здесь для пленок железа. В таблице приведены экспериментально найденные зна-

ћω, эВ	n	k	t ₀ , Å	t _{реп} , Å	t _{cr} , Å
1,7	3,2	4,1	285	140	240
3,4	1,8	3,0	252	97	210

чения t_{cr} (см. рис. 3) и рассчитанные по приведенным выше формулам для t_0 и t_{pen} (*n* и *k* взяты из работы [17]). Из таблицы видно, что значения t_{cr} и t_{pen} различаются примерно в 2 раза, а t_0 и t_{cr} — на 10%. Это можно считать экспериментальным доказательством основного положения работы [15], состоящего в том, что в магнитооптике должна. приниматься во внимание новая физическая величина, а именно «магнитооптическая информационная глубина» — $t_0 = \lambda/(8n)$.

И наконец, остановимся еще на одном результате. При измерении спектральных зависимостей ЭЭК на пленках железа и кобальта с Та (или Cu) слоем и без него было установлено, что при $t>t_{cr}$ кривые $\delta(\hbar\omega)$ количественно и качественно совпадают во всей спектральной области, а при $t< t_{cr}$ — различаются. По аналогии с [18] этот факт был объяснен влиянием на величину магнитооптического сигнала свойств среды, граничащей с ферромагнитной пленкой. Существенным здесь является то, что несмотря на различие значений δ , линейная зависимость δ от t при $t< t_{cr}$ сохраняется для всех изучаемых образцов, причем само значение t_{cr} изменяется незначительно (не более чем на 15%).

Установленные нами зависимости магнитных и магнитооптических свойств изучаемых пленок от их толщины, а также обнаруженное влияние на указанные характеристики немагнитного слоя между пленкой и подложкой могут быть приняты во внимание при моделировании многослойных структур, применяющихся в качестве магниторезистивных датчиков и магнитооптических сред для магнитной записи. В частности, одним из способов получения высокого значения магниторезистивного сигнала в многослойных структурах является наличие магнитомягкого и магнитожесткого слоев. Полученные нами данные свидетельствуют о том, что путем вариаций состава разделительных немагнитных слоев можно решить эту проблему.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 95-02-05601) и Международного научного фонда (грант Ј9С100).

ЛИТЕРАТУРА

- 1. Onsager L.//Phys. Rev. 1944. 65, N 3 and 4. P. 117.
- Mermin N. D., Wagner H./Phys. Rev. Lett. 1966. 17, N 22. P. 1133.
 Kaufman B., Onsager L./Phys. Rev. 1949. 76, N 8. P. 1244.
 Yang C. N./Phys. Rev. 1952. 85, N 5. P. 808.

- 5. Fu C. L., Freeman A. J., Oguchi T.//Phys. Rev. Lett. 1985. 54, N 25. P. 2700.. 6. Richter R., Gray T. G., Smith J. R://Phys. Rev. Lett. 1985. 54, N 25. P. 2704.. 7. Blugel S., Weinert M., Dederichs P. H.//Ibid. 1988. 60, N 11. P. 1077.. 8. Кринчик Г. С., Чепурова Е. Е., Ахматова О. П., Пономарев Б. К., Wuroph A. H.//ФТ. 1986. 38 С. 2862
- Жуков А. П.//ФТТ. 1986. 28. С. 2862.
- 9. Кринчик Г. С., Чепурова Е. Е., Эгамов Ш. В.//ЖЭТФ. 1978. 74, № 2. С. 714.
- 10. Вонсовский С. В. Магнетизм. М., 1971.
- 11. Кринчик Г. С., Чепурова Е. Е., Парсанов А. П.//ФТТ. 1969. 11. № 7.. C. 2029.
- 12. Gautier F., Stoeffler D.//J. Magn. and. Magn. Mat. 1991. 93. P. 10. 13. Luborsky F. E., Morelock C. R.//J. Appl. Phys. 1964. 35, N 7-8. P. 2055. 14. Moog E. R., Liu C., Bader S. D., Zak J.//Phys. Rev. 1989. B39, N 10.
- P. 6949, 15. Traeger G., Wensel L., Hubert A.//Phys. Stat. Solidi (a). 1991. 131.
- P. 201.
- 16. Кринчик Г. С., Зубов В. Е., Лысков В. А.//Опт. и спектр. 1983. 55, № 1. C. 204.
- 17. Кринчик Г. С., Нурмухамедов Г. М.//ЖЭТФ. 1965. 48, № 1. С. 34. 18. Кринчик Г. С., Чепурова Е. Е., Краева Т. И.//ЖЭТФ. 1985. 89, № 7.
- C. 277.

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3, ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1995. Т. 36, № 5

ГЕОФИЗИКА

УДК 551.515.3:551.8

турбулентная структура интенсивного конвективного вихря ВЛАЖНОГО ТИПА (лабораторное моделирование)

Е. П. Анисимова, С. С. Матхеев, Л. И. Милехин, А. А. Сперанская

(кафедра физики моря и вод суши)

Приводятся результаты инструментального исследования турбулентной структуры модельных интенсивных конвективных вихрей влажного типа, подобных центральной части нижней тропосферы тропических циклонов. Получены параметризации дисперсий пульсаций горизонтальных составляющих скорости и вертикального турбулентного потока импульса; выявлены механизмы генерации турбулентности в различных районах вихревой системы.

Существуют различные виды лабораторного моделирования природных интенсивных конвективных вихрей (ИКВ). Экспериментальная установка, созданная на физическом факультете, позволяет моделировать воздушные ИКВ влажного типа, подобные природным тропическим циклонам (ТЦ), и детально изучить их кинематическую, динамическую и турбулентную структуру.

Поступила в редакцию.

08.02.95