

МАГНИТООПТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ФЕРРОМАГНЕТИКА РАЗНОЙ ТОЛЩИНЫ

© Дун Инби, В.Е.Зубов

Московский государственный университет им.М.В.Ломоносова,
119899 Москва, Россия
(Поступила в Редакцию 21 июня 1995 г.)

Магнитооптическим методом исследованы магнитные свойства на двух поверхностях тонких пленок CoNi , напыленных в вакууме на движущуюся подложку из полиэтилентерефталата. Установлено, что кривые намагничивания приповерхностных слоев пленок, измеренные с помощью экваториального эффекта Керра (ЭЭК), зависят от длины волны света λ . Наблюдающийся эффект объяснен зависимостью глубины формирования ЭЭК l в пленках от λ . Величина l , согласно современным представлениям [7], определяется либо параметром $Z_0 = \lambda/8n$, либо $L = \lambda/4\pi k$ (n, k — показатели преломления и поглощения света). На основании проведенного анализа сделан вывод о том, что величина l определяется параметром L , который увеличивается с ростом λ . Поскольку магнитные свойства исследованных пленок неоднородны по толщине, то изменение l приводит к изменению кривых намагничивания приповерхностного слоя, измеряемых с помощью ЭЭК.

Наиболее перспективными для высокоплотной магнитной записи являются металлизированные косонапыленные пленки, среди которых наибольшее распространение получили пленки CoNi [1,2]. Основным способом их изготовления является напыление под углом на движущуюся подложку [3]. Вследствие изменения угла падения атомов Co и Ni в процессе напыления кристаллическая структура таких пленок изменяется по толщине. Возможны два способа напыления: при изменении угла напыления от большего к меньшему и от меньшего к большему [3]. Электронно-микроскопические исследования пленок CoNi , напыленных под изменяющимся углом, показали, что они состоят из столбчатых кристаллитов, причем угол наклона кристаллитов меняется в зависимости от расстояния до поверхности пленок. Рассчитанный профиль кристаллитов из работы [4] для пленок, приготовленных путем напыления от большего угла к меньшему при разных значениях конечного угла, представлен на вставке к рис. 1,а.

При магнитооптическом исследовании с разных сторон пленок CoNi , напыленных на подложку из полиэтилентерефталата, установлено, что магнитные свойства пленок по толщине распределены неоднородно [5]. Измерения проводились на белом свете с использованием

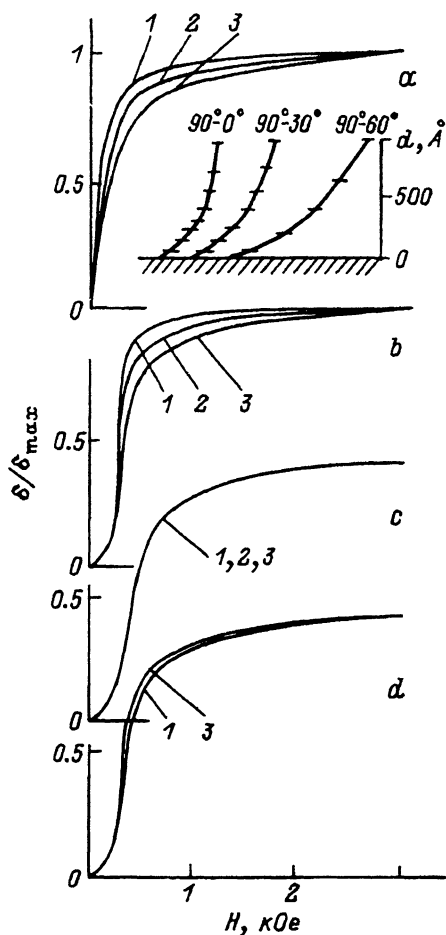


Рис. 1. Кривые намагничивания на поверхности пленки CoNi толщиной 700 Å, напыленной при изменении угла напыления от большего к меньшему, измеренные с помощью ЭЭК (δ) при различных λ .

λ (μm): 1 — 0.33, 2 — 0.50, 3 — 0.83. a, b — на свободной поверхности пленки в поле $\mathbf{H} \perp \text{ЛО}$ и $\mathbf{H} \parallel \text{ЛО}$ соответственно, c, d — на поверхности, прилегающей к подложке при $\mathbf{H} \perp \text{ЛО}$ и $\mathbf{H} \parallel \text{ЛО}$. На вставке (a) — рассчитанный профиль кристаллитов для пленки толщиной 1000 Å, напыленной способом 1 при начальном значении угла напыления, равном 90° , и различных значениях конечного угла напыления [4]; подложка представлена заштрихованной областью в нижней части.

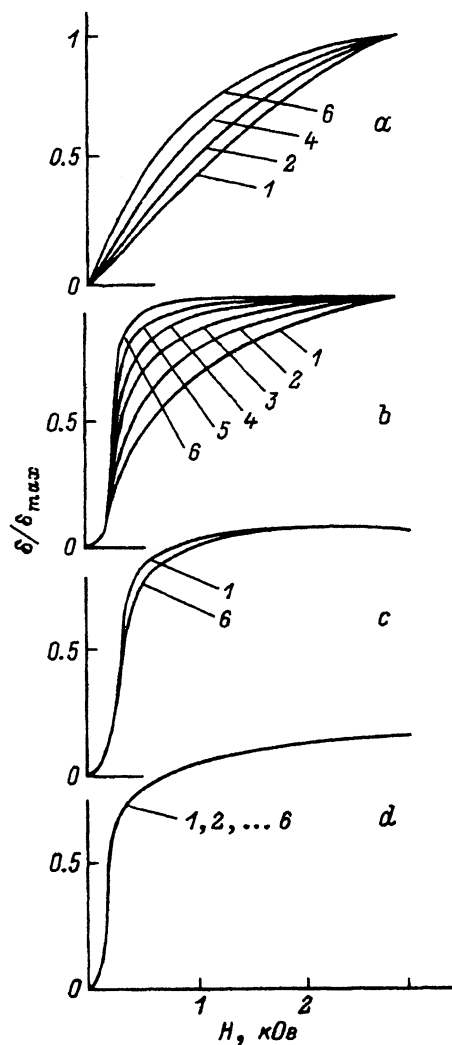


Рис. 2. Кривые намагничивания на поверхности пленки CoNi толщиной 650 Å, напыленной при изменении угла напыления от меньшего к большему, измеренные с помощью ЭЭК (δ) при различных λ .

λ (μm): 1 — 0.33, 2 — 0.35, 3 — 0.41, 4 — 0.50, 5 — 0.62, 6 — 0.83. a, b — на свободной поверхности при $\mathbf{H} \perp \text{ЛО}$ и $\mathbf{H} \parallel \text{ЛО}$, c, d — на поверхности, прилегающей к подложке при $\mathbf{H} \perp \text{ЛО}$ и $\mathbf{H} \parallel \text{ЛО}$.

экваториального эффекта Керра (ЭЭК). Толщина исследуемого приповерхностного слоя образца определяется глубиной формирования магнитооптического сигнала, которая практически совпадает с глубиной формирования отраженного света [6]. В работе [6] было экспериментально показано, что в области слабого поглощения l существенно меньше глубины проникновения света в кристалл. В результате расчетов, проведенных в работе [7], был сделан вывод о том, что значение l определяется либо параметром L (L — глубина проникновения света в кристалл) — в случае сильного поглощения, либо параметром Z_0 — в случае слабого поглощения. Этот вывод согласуется с результатами работы [6]. В работе [8] при исследовании ультратонких пленок железа с помощью ЭЭК было установлено, что существует критическая толщина пленок, выше которой ЭЭК от толщины не зависит. Эта критическая толщина была отождествлена с l . Величина l должна зависеть от длины волны света λ , это предполагает возможность магнитооптического исследования магнитных свойств ферромагнетика в приповерхностных слоях разной толщины путем изменения λ . В настоящей работе с помощью ЭЭК проведено исследование приповерхностных магнитных свойств пленок CoNi, напыленных под углом на подложку из полиэтилентерефталата, при различных значениях λ .

1. Образцы и методика измерений

Исследованы пленки CoNi толщиной d от 300 до 700 Å, напыленные в вакууме под углом на движущуюся подложку. Угол в процессе напыления изменялся как от большего к меньшему (способ 1), так и от меньшего к большему (способ 2). Угол напыления α отсчитывается от нормали к плоскости пленки. Начальный и конечный углы напыления для пленок, приготовленных способом 1, составляли 90 и 57° ($d = 700$ Å, пленка № 1) и 90 и 70° ($d = 300$ Å, пленка № 2). Для пленок № 3–5, приготовленных по способу 2, начальный и конечный углы составляли 55° и 90° ($d = 500, 650$ и 800 Å для пленок № 3–5 соответственно). Плотность полученных пленок составляет примерно 80% от плотности исходного материала, что согласуется с данными других авторов [9].

Исследование магнитных свойств на поверхности пленок проводилось с помощью магнитооптической спектральной установки, описанной в [10]. ЭЭК, пропорциональный намагниченности приповерхностного слоя образца, измерялся на обеих поверхностях пленок. Измерения со стороны подложки оказались возможными благодаря прозрачности полиэтилентерефталата. Угол падения света на образец составлял 45°. Для повышения чувствительности в установке используется модуляционный метод измерения эффектов Керра, при котором исследуемый образец помещается в переменное магнитное поле. Установка позволяет измерять кривые намагничивания $M(H)$ в относительных единицах. Кривые $M(H)$ проходят через вершины динамических петель гистерезиса и при низких частотах соответствуют начальным кривым намагничивания. Измерения проводились на частоте 130 Гц. Максимальная величина магнитного поля, создаваемого электромагнитом, составляла 3 кОе. Определение оптических констант пленок

CoNi проведено с помощью измерения угловых зависимостей ЭЭК (метод описан в работе [11]). Определение оптических констант было выполнено на пленке CoNi толщиной 300 Å, поскольку в этой пленке слабо выражена анизотропия физических свойств, в том числе оптических и магнитооптических (см. далее). Влияние второй грани пленки в экспериментах в отраженном свете пренебрежимо мало, так как интенсивность проходящего света ослабляется в этой пленке более чем на порядок.

2. Эксперимент

На рис. 1 приведены кривые намагничивания при различных значениях λ на обеих поверхностях пленки № 1, измеренные с помощью ЭЭК, для двух направлений намагничивания в плоскости пленки: в поле, параллельном (H_{\parallel}) и перпендикулярном (H_{\perp}) плоскости напыления. Аналогичные кривые для пленки № 4 приведены на рис. 2. Из рисунков видно, что ось легкого намагничивания пленок (ЛО) направлена параллельно плоскости напыления, трудная ось (ТО) направлена перпендикулярно к этой плоскости (наиболее отчетливо это проявляется на свободной поверхности). Аналогичные результаты получены и для других исследованных пленок. Из рисунков видно также, что при изменении λ кривые намагничивания на свободной поверхности пленок изменяются как в H_{\parallel} , так и в H_{\perp} . Кривые намагничивания на поверхности, прилегающей к подложке, от λ практически не зависят. Изменения кривых намагничивания при возрастании λ в пленках, напыленных способами 1 и 2, качественно различаются, а именно: в пленке № 1 с ростом λ кривые намагничивания становятся более пологими (рис. 1, *a, b*), т.е. намагничивание исследуемых приповерхностных слоев протекает в полях большей величины. В пленке № 4, напротив, при возрастании λ кривые намагничивания становятся круче. Для пленок № 3 и 5 результаты аналогичны тем, которые получены для пленки № 4. В пленке № 2 изменение кривых намагничивания с ростом λ не наблюдалось.

Угловые зависимости ЭЭК измерены в диапазоне изменения λ от 0.33 до 0.62 μm . Полученные из этих зависимостей значения n и k приведены в таблице. Там же даны значения параметров L и Z_0 , которые используются при обсуждении полученных результатов. Вне диапазона измерения величины n и k определены путем экстраполяции их зависимостей от λ .

Значения показателей преломления и поглощения исследованных пленок CoNi, полученные из угловых зависимостей ЭЭК, и параметров $L = \lambda/4\pi k$ и $Z_0 = \lambda/8n$

$\lambda, \mu\text{m}$	n	k	$L, \text{Å}$	$Z_0, \text{Å}$
0.33	1.55	1.20	220	265
0.41	1.85	1.40	230	280
0.50	2.0	1.55	255	310
0.62	2.30	1.65	300	340
0.83	2.75	2.10	315	380

3. Обсуждение

Полученные экспериментальные результаты можно объяснить с учетом двух факторов: 1) кристаллические и магнитные свойства различных слоев исследованных пленок зависят от глубины их залегания, что обусловлено способом приготовления этих пленок; 2) глубина формирования отражательных магнитооптических эффектов меняется при изменении λ .

Действительно, в пленках CoNi, напыленных под углом, при $\alpha > 60^\circ$ ЛО лежит в плоскости напыления и величина эффективного поля односторонней магнитной анизотропии H_K (а вместе с ней и величина коэрцитивной силы H_c при намагничивании в поле H_{\parallel}) растет при возрастании α [2,9]. Возрастание H_K связано с тем, что по мере увеличения α растет угол между длинной осью кристаллитов и нормалью к плоскости пленки. При напылении на движущуюся подложку угол α изменяется, поэтому кристаллиты в разных слоях пленок наклонены под разными углами к поверхности пленки. Это должно приводить к зависимости величины полей H_K и H_c для различных слоев от их расстояния до поверхности. В работе [5] установлено, что в пленках, приготовленных способом 1, на поверхности, прилегающей к подложке, величина H_c значительно больше, чем на свободной поверхности. Таким образом, в пленках, напыленных способом 1, H_K и H_c должны изменяться по толщине пленки и уменьшаться при переходе от поверхности, прилегающей к подложке, к свободной поверхности. В пленках, приготовленных способом 2, наоборот, указанные поля при переходе от подложки к свободной поверхности должны возрастать.

Кривые намагничивания приповерхностных слоев пленок CoNi, измеренные с помощью ЭЭК при различных λ и представленные на рис. 1 и 2, могут быть объяснены в предположении о том, что глубина формирования отражательных магнитооптических эффектов увеличивается с ростом λ . Поясним это на примере кривых, представленных на рис. 1. Кривые намагничивания на свободной поверхности пленки в поле H_{\perp} (рис. 1,а) становятся более пологими при увеличении λ , т.е. эффективное значение H_K , соответствующее кривым намагничивания при разных λ , возрастает с ростом λ . Если величина l с ростом λ возрастает, то по мере увеличения λ мы исследуем приповерхностные слои, толщина которых растет. Поскольку величина H_K для пленок, приготовленных способом 1, уменьшается по мере приближения к свободной поверхности, то, следовательно, с ростом λ кривые намагничивания должны становиться более крутыми. Аналогичные рассуждения справедливы для кривых, представленных на рис. 2,а, с учетом того факта, что при переходе от свободной поверхности к подложке в пленке, приготовленной способом 2, H_K уменьшается.

Обратимся теперь к таблице. Величина l материала определяется тем параметром (L или Z_0), который при данном λ имеет минимальное значение. Из таблицы видно, что в исследованных пленках CoNi при $0.33 \leq \lambda \leq 0.83 \mu\text{m}$ параметр Z_0 больше, чем L . Следовательно, l в нашем случае совпадает с L , причем при возрастании λ от 0.33 до 0.83 μm глубина формирования возрастает в полтора раза. Таким образом, предположение о росте l с увеличением λ справедливо, и, следовательно, справедливы выводы относительно поведения кривых намагничивания, представленных на рис. 1,а и 2,а. Отсутствие зависи-

мости кривых намагничивания от λ в пленке толщиной $d = 300 \text{ \AA}$ (№ 2) можно объяснить тем, что при всех значениях λ в нашем эксперименте $d \sim l$. Следовательно, при всех λ с помощью ЭЭК мы получаем информацию о магнитных свойствах пленки, усредненных по ее толщине.

Поведение кривых намагничивания в зависимости от λ в поле H_{\parallel} , представленных на рис. 1, *b* и 2, *b*, можно объяснить в предположении о том, что в исследованных пленках при переходе от слоев с меньшей анизотропией к слоям с большей анизотропией уменьшается коэффициент прямоугольности петель гистерезиса. Уменьшение коэффициента прямоугольности петель гистерезиса приводит к затягиванию кривых намагничивания. Справедливость данного вывода следует из сравнения кривых на рис. 1, *a* и *b*, а также на рис. 2, *a* и *b*. Например, в случае кривых, представленных на рис. 1, *a*, при увеличении λ мы зондируем более глубокие слои пленки с большей величиной H_K . При намагничивании вдоль ЛО более глубоким слоям отвечают большие значения H_c . В то же время, как видно из рис. 1, *b*, с ростом глубины залегания слоев усиливается затягивание кривых намагничивания. Уменьшение прямоугольности петель гистерезиса в ферромагнетиках обычно наблюдается при возрастании их коэрцитивности [3].

Как видно из рис. 1, 2 кривые намагничивания на поверхности пленок, прилегающих к подложке, практически не зависят от λ . Отсюда можно сделать вывод о том, что на расстоянии $\sim 300 \text{ \AA}$ от подложки, соответствующем глубине формирования отраженного света, поле анизотропии в пленках практически постоянно. По-видимому, форма кристаллитов вблизи подложки отличается от той, которая описывается теоретическими кривыми, представленными на вставке к рис. 1, *a*. На то, что кристаллическая структура вблизи подложки изменяется, указывают также эксперименты по исследованию магнитных свойств пленок CoNi в зависимости от их толщины. Действительно, в пленках толщиной менее 300 \AA , приготовленных как способом 1, так и способом 2, наблюдается значительное уменьшение H_c , а следовательно, и H_K [3]. Кроме того, в работе [12] в результате исследования тонких пленок CoNi толщиной $\sim 300 \text{ \AA}$, приготовленных при изменении угла напыления как от большего к меньшему, так и от меньшего к большему, был сделан вывод о том, что в обоих случаях кристаллиты ориентированы перпендикулярно поверхности пленки. Этот вывод согласуется с нашими результатами: кривые намагничивания пленок на поверхности, прилегающей к подложке, в поле H_{\parallel} и H_{\perp} по форме близки друг к другу (рис. 1, *c, d* и 2, *c, d*), т.е. одноосной анизотропии на этой поверхности практически не наблюдается. Приведенные рассуждения могут служить дополнительным объяснением того, почему в пленке с $d = 300 \text{ \AA}$ не наблюдается зависимости от λ кривых намагничивания, измеренных с помощью ЭЭК.

Таким образом, с помощью ЭЭК при различных λ измерены кривые намагничивания вдоль ТО и ЛО на двух поверхностях пленок CoNi толщиной от 300 до 700 \AA , напыленных под изменяющимся углом на подложку из полиэтилентерефталата. Установлено, что форма кривых намагничивания зависит от λ . Обнаруженный эффект объяснен тем, что магнитные свойства исследованных пленок неоднородны по толщине, а при изменении λ меняется толщина исследуемого в магнитооптическом эксперименте приповерхностного слоя магнетика. Определе-

ны оптические константы пленок и с их использованием установлено, что глубина формирования магнитооптических отражательных эффектов (другими словами, глубина формирования отраженного света) в изучаемых пленках определяется глубиной проникновения света. При изменении λ от 0.33 до 0.83 μm l возрастает почти в полтора раза. На основании проведенных экспериментов сделан вывод о том, что структура кристаллитов в слое пленок CoNi толщиной $\sim 300 \text{ \AA}$, прилегающем к подложке, отличается от структуры, предсказываемой теорией.

Полученные результаты показывают, что отражательные магнитооптические эффекты могут использоваться для изучения магнитных свойств тонких слоев ферромагнетика в зависимости от их расстояния до поверхности с помощью варьирования глубины формирования отраженного света при изменении λ . Объектами исследования могут быть приповерхностные слои ферромагнитных кристаллов с магнитными свойствами, отличающимися от объемных, т.е. поверхностный магнетизм, а также тонкопленочные магнитные носители информации, тонкопленочные магнитные головки, приповерхностная область магнитопровода массивных головок и другие элементы магнитной электроники.

Приносим благодарность Л.И.Зелениной и С.С.Субботину за предоставленные пленки CoNi.

Работа выполнена при частичной поддержке Международного научного фонда (грант № J9S100).

Список литературы

- [1] Арнольдуссен Т.К. ТИИЭР 74, 11, 62 (1986).
- [2] Васильева Н.П., Касаткин С.И., Плотникова Н.В., Фиошкина О. Зарубеж. электрон. техн. 7-8, 3 (1992).
- [3] Nakamura K., Ohta Y., Itoh A., Hayashi S. IEEE Trans. Magn. 18, 6, 1077 (1982).
- [4] Feuerstein A., Mayr M. IEEE Trans. Magn. 20, 1, 51 (1984).
- [5] Зеленина Л.И., Зубов В.Е., Мацкевич С.И., Субботин С.С. ЖТФ 64, 4, 51 (1994).
- [6] Кринчик Г.С., Зубов В.Е., Лысков В.А. Опт. и спектр. 55, 1, 204 (1983).
- [7] Traeger G., Wenzel L., Hubert A. Phys. Stat. Sol. (a) 131, 201 (1992).
- [8] Чепурова Е.Е., Козловский Л.В., Ду Сяньбо, Ливенцов А.М. Письма в ЖТФ 20, 20, 42 (1994).
- [9] Zeder S.L., Silvain J.F., Re M.E., Kryder M.H., Bayer C.L. J. Appl. Phys. 61, 8, 3804 (1987).
- [10] Зубов В.Е., Кринчик Г.С., Лысков В.А. ЖЭТФ 81, 4(10), 1489 (1981).
- [11] Архипов К.Г., Зубов В.Е. Опт. и спектр. 73, 5, 952 (1992).
- [12] Зеленина Л.И., Субботин С.С. В сб. «Технология и свойства материалов для записи информации». М. (1992). 180 с.