

05;11;12

Исследование статических магнитных характеристик неоднородных по толщине CoNi пленок

© Инби Дун, В.Е. Зубов, Н.С. Перов

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

(Поступило в Редакцию 18 августа 1995 г. В окончательной редакции 28 ноября 1995 г.)

С помощью метода, основанного на использовании меридианального интенсивностного магнитооптического эффекта, исследованы петли гистерезиса на разных сторонах тонких кобальт-никелевых пленок, напыленных под изменяющимся углом на подложку из полиэтилентерефталата. На основе сравнения магнитных свойств пленок на их разных сторонах и в объеме установлено, что эти свойства непрерывно изменяются по толщине. Коэрцитивная сила всегда выше на той стороне пленок, на которой угол напыления больше. Различие магнитных характеристик на разных сторонах пленок усиливается при увеличении их толщины.

Введение

Перспективными носителями информации для высокоплотной продольной магнитной записи в настоящее время считаются металлизированные CoNi пленки, приготовленные напылением под углом на движущуюся подложку [1,2]. Непрерывное изменение угла напыления приводит к изгибанию кристаллитов в процессе роста пленок [3]. Неоднородность кристаллической структуры пленок по их толщине должна приводить также к неоднородности по толщине магнитных свойств (коэрцитивной силы, магнитной анизотропии и др.), которые определяются, в частности, формой и ориентацией кристаллитов. Изменение магнитных свойств CoNi пленок по толщине наблюдалось в работе [4], в которой с помощью магнитооптического экваториального эффекта Керра (ЭЭК) модуляционным методом измерялись кривые намагничивания на обеих сторонах пленок путем их перемагничивания в переменном магнитном поле. Метод позволяет оценить, в частности, величину коэрцитивной силы, поле насыщения и другие магнитные параметры приповерхностного слоя пленок. Более полную информацию о магнитных характеристиках поверхности дает измерение петель гистерезиса.

В настоящей работе проведено исследование распределения магнитных свойств CoNi пленок по толщине с помощью нового метода измерения петель гистерезиса на поверхности магнетиков, основанного на использовании магнитооптических эффектов в отраженном свете — меридианального (МИЭ) и полярного (ПИЭ) интенсивностных эффектов.

Образцы и методика эксперимента

Образцы представляли собой пленки состава Co-30% Ni толщиной (d) от 300 до 5300 Å, напыленные под углом на подложку из полиэтилентерефталата методом электронного испарения. Исследованы две

группы образцов, приготовленных путем напыления на движущуюся подложку при изменении угла напыления от большего к меньшему (группа 1) и от меньшего к большему (группа 2). Угол напыления (α) отсчитывается от нормали к плоскости пленки. В пленках первой группы начальный угол напыления составлял 90° , конечный изменялся от 57 до 70° . В пленках второй группы начальный угол составлял 53° , конечный — 90° . Кроме того, исследована используемая в магнитной записи пленка "Ангром", состоящая из трех слоев CoNi по 1000 \AA , разделенных пленками алюминия [5]. Параметры исследованных пленок представлены в таблице.

Исследование магнитных свойств на поверхности пленок проводилось на обычной спектральной магнитооптической установке [6], которая была модернизирована с целью измерения петель гистерезиса с использованием МИЭ и ПИЭ. Способ измерения статических кривых намагничивания с помощью МИЭ и ПИЭ с использованием модуляции угла между плоскостью поляризации падающего на образец света и p -поляризацией был предложен в работе [7] и основан на том, что МИЭ и ПИЭ нечетны относительно угла отклонения плоскости поляризации падающего света (θ) относительно p -компоненты, а также пропорциональны намагниченности образца. Новым элементом, введенным в установку, является магнитооптический модулятор, с помощью которого производится качание плоскости поляризации падающего на образец света на звуковой частоте. В качестве модулятора использована висмутсодержащая феррит-гранатовая пленка с перпендикулярной анизотропией, помещенная в переменное магнитное поле, создаваемое небольшими катушками с током. Вращение плоскости поляризации света, осуществляется благодаря наличию в пленке большого эффекта Фарадея [8]. При перемагничивании пленки в перпендикулярном к ее поверхности поле от $-I_s$ до $+I_s$ (I_s — намагниченность насыщения) угол поворота плоско-

Параметры исследованных CoNi пленок и значения коэрцитивной силы в пленках на свободной поверхности ($H_c^{св}$) и на поверхности, прилегающей к подложке (H_c^n), а также в объеме ($H_c^{об}$)

Номер пленки	$d, \text{Å}$	$\alpha, \text{град}$	$H \parallel \text{ЛО}$			$H \perp \text{ЛО}$		
			$H_c^{св}, \text{Oe}$	$H_c^{об}, \text{Oe}$	H_c^n, Oe	$H_c^{св}, \text{Oe}$	$H_c^{об}, \text{Oe}$	H_c^n, Oe
1	700	90–57	186	205	273	114	127	251
2	300	90–70	1013	1030		469	500	
3	1100	90–63	663	704	1413	385	389	
4	3300	90–63	263	443	1065	178	270	
5	650	90–63	705	725	742	350	390	
6	500	55–90	254	250	244	112	97	86
7	800	55–90	591	255	130	467	148	83
Ангром	3×1000		682	560		442	400	

сти поляризации света, прошедшего через пленку, изменяется от $-\theta$ до $+\theta$. Рабочий диапазон длин волн света (λ) модулятора составляет 0.5–0.6 мкм. Угол θ изменяется от $\theta = 10$ (при $\lambda = 0.6$ мкм) до $\theta = 35^\circ$ (при $\lambda = 0.5$ мкм). Измерения проводились на двух сторонах CoNi пленок (измерения со стороны подложки оказались возможны благодаря прозрачности подложки из полиэтилентерефталата) в рабочем спектральном диапазоне модулятора при частоте модуляции 900 Гц и угле падения света на образец, равном 45° . Образец помещался в постоянное магнитное поле напряженностью до 3 кОе, создаваемое электромагнитом. Описанный модуляционный метод обеспечивает чувствительность измерения магнитооптических эффектов $\delta = J_-/J_0$ (J_- , J_0 — переменная, пропорциональная намагниченности, и постоянная составляющие интенсивности отраженного света соответственно), на 2–3 порядка большую, чем статический метод. Измерения проводились с использованием МИЭ. Чувствительность измерений МИЭ составляла $\delta \sim 10^{-5}$. Толщина исследуемого магнитооптическим методом приповерхностного слоя магнетика определяется глубиной формирования отраженного света, которая, согласно современным представлениям, в металлах определяется глубиной проникновения света и составляет 100–300 Å [9,10]. Исследование объемных магнитных характеристик проведено с помощью вибрационного анизометра [11].

Результаты эксперимента

Измерение петель гистерезиса в исследованных пленках проводилось в двух направлениях — в магнитном поле, параллельном (H_{\parallel}) и перпендикулярном (H_{\perp}) плоскости напыления пленок. В поле H_{\parallel} величина коэрцитивной силы (H_c) и наклон петель гистерезиса при $|H| = H_c$ во всех пленках на их обеих сторонах были больше, чем в поле H_{\perp} . Отсюда следует, что в плоскости пленок существует одноосная магнитная анизотропия с легкой осью (ЛО), параллельной плоскости напыления, и трудной осью (ТО),

перпендикулярной к ней. Этот результат согласуется с магнитооптическими исследованиями CoNi пленок, проведенными в переменном магнитном поле [4].

На рис. 1 приведены петли гистерезиса, измеренные на свободной поверхности и на поверхности, прилегающей к подложке, а также в объеме CoNi пленки толщиной 700 Å (пленка 1 в таблице), напыленной при изменении угла α от большего к меньшему, в поле H_{\parallel} (рис. 1,а) и H_{\perp} (рис. 1,б). Из рисунка видно, что величина коэрцитивной силы (H_c) на поверхности, прилегающей к подложке, выше, чем на свободной поверхности как вдоль ЛО, так и вдоль ТО. Значение H_c в объеме лежит между значениями H_c на поверхностях. В целом ситуация для всех пленок из первой группы такая же, как в случае пленки 1: H_c на поверхности, прилегающей к подложке, больше, чем на свободной поверхности. Измеренные значения H_c для различных пленок на поверхности и в объеме приведены в таблице. Видно, что с ростом толщины различие в значениях H_c на разных поверхностях пленок увеличивается. Так, в пленке 5 ($d = 650 \text{ Å}$) это различие при намагничивании вдоль ЛО составляет около 5%, в пленке 1 (700 Å) — 35%, а в пленке 4 (3300 Å) значения H_c на сторонах пленки различаются в 4 раза.

На рис. 2 приведены петли гистерезиса на двух сторонах пленки 6 вдоль ЛО, характерные для пленок из группы 2. В этой группе пленок ситуация обратная: на свободной поверхности пленок H_c больше, чем на поверхности, прилегающей к подложке. Из таблицы видно, что с ростом толщины пленок различие в значениях H_c на их разных сторонах возрастает.

Измерение петель гистерезиса на поверхности, прилегающей к подложке, удалось провести не на всех пленках либо из-за малой величины МИЭ, либо из-за его отсутствия ("Ангром").

Для оценки величины нормальной составляющей намагниченности в пленках CoNi был измерен полярный эффект Керра (α^n), пропорциональный этой составляющей намагниченности [12]. Измерение проводилось модуляционным методом путем намагничива-

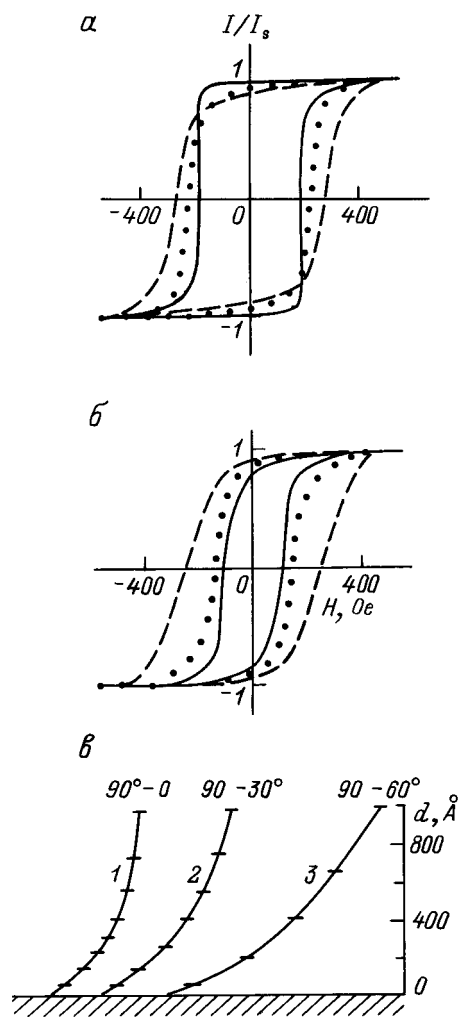


Рис. 1. а — петли гистерезиса, измеренные в поле $H \parallel \text{ЛО}$ в CoNi пленке толщиной 700 Å, приготовленной при изменении угла напыления (α) от большего к меньшему ($90^\circ - 55^\circ$): сплошные кривые — на свободной поверхности, штриховые — на поверхности, прилегающей к подложке, точки — петля гистерезиса в объеме; б — то же в поле $H \perp \text{ЛО}$; в — рассчитанный профиль кристаллитов в пленке толщиной $d = 1000 \text{ Å}$, приготовленной при изменении угла напыления от большего к меньшему (из работы [14]: плоскость сечения пленки параллельна плоскости напыления; подложка обозначена заштрихованной областью: 1-3 — профили кристаллитов для пленок, в которых начальный угол напыления (вблизи подложки) составлял $\alpha_{\text{нач}} = 90^\circ$, конечный угол (на свободной поверхности) $\alpha_{\text{кон}} = 0, 30$ и 60° соответственно.

ния образца в переменном магнитном поле. Переменное магнитное поле было ориентировано параллельно плоскости пленки. α^n не превышал 10^{-5} рад во всем исследованном спектральном диапазоне. Величина α^n в насыщении (α_s^n), согласно расчетам, составляет $\alpha_s^n = 3 \cdot 10^{-3}$ рад. Расчет α_s^n был произведен по формуле для полярного эффекта Керра [12] с использованием компонент тензора диэлектрической прони-

цаемости CoNi, которые были определены из угловых зависимостей ЭЭЖ в исследованных CoNi пленках по методике, описанной в работе [13]. Следовательно, величина нормальной составляющей в пленках не превышает $0.003I_s$, т. е. практически отсутствует.

Обсуждение

Наблюдающееся различие магнитных свойств на разных сторонах пленок и различие этих свойств для пленок из двух групп можно объяснить наличием особенностей в кристаллической структуре пленок, обусловленных различием методов получения пленок из указанных групп. Рассчитанный в работе [14] профиль кристаллитов для пленок из группы 1 при разных величинах минимального угла α показан на рис. 1, в. Видно, что угол наклона кристаллитов, отсчитываемый от нормали к пленке, вблизи подложки больше, чем на свободной поверхности. В пленках второй группы зависимость угла наклона кристаллитов по толщине должна быть обратной: вблизи подложки угол наклона кристаллитов меньше, чем на свободной поверхности. В целом такая картина согласуется с результатами электронно-микроскопических исследований, проведенных в CoNi пленках [3].

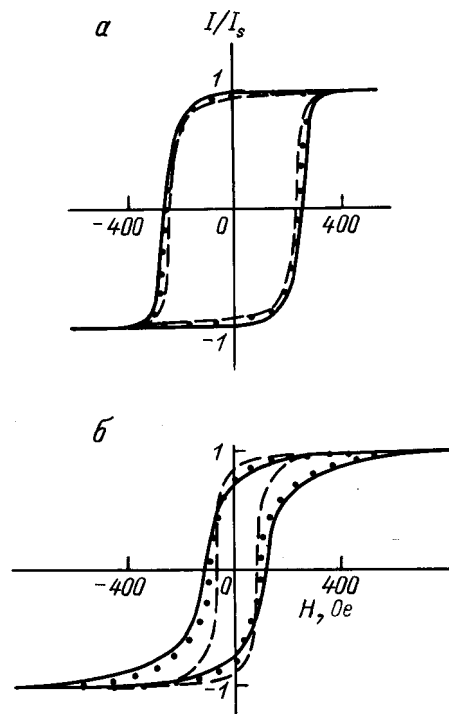


Рис. 2. Петли гистерезиса в CoNi пленке толщиной 500 Å, приготовленной при изменении угла напыления от меньшего к большему ($50^\circ - 90^\circ$). Сплошная кривая — на свободной поверхности, штриховая — на поверхности, прилегающей к подложке, точки — в объеме; а — при $H \parallel \text{ЛО}$, б — $H \perp \text{ЛО}$.

В пенках CoNi, напыленных под углом, при $\alpha > 60^\circ$ ЛО лежит в плоскости напыления и величина эффективного поля одноосной магнитной анизотропии (H_k), а вместе с ним и величина H_c при намагничивании в поле $H_{||}$ растут при увеличении α [1,2]. При увеличении α растет угол между длинной осью кристаллитов и нормалью к плоскости пленки. Сказанное позволяет понять причину различия H_k и H_c на разных сторонах пленок, а также понять качественное различие в поведении пленок из двух групп.

Уменьшение различия в величине H_c на разных сторонах пленок при уменьшении их толщины можно объяснить влиянием обменного взаимодействия, которое стремится сделать спины на разных сторонах пленок параллельными друг другу. Параметром, характеризующим расстояние, на котором распространяется действие обменного взаимодействия, является ширина доменной границы (Δ). В CoNi пленках с $H_k \sim 500$ Ое, $\Delta \sim 700 \text{ \AA}$ [4]. Это приводит к тому, что различие в величинах H_c на разных гранях при уменьшении толщины пленок спадает. Особенно ярко это проявляется в пленке $d = 300 \text{ \AA}$, в которой различие в значениях H_c на свободной поверхности и в объеме составляет 2%.

Остановимся еще на одном важном факте. Несмотря на то что в пленках наблюдается хорошо выраженная одноосная анизотропия, форма петель перемагничивания отличается от чисто прямоугольной вдоль ЛО и наблюдается гистерезис вдоль ТО. Согласно работе [15], основной причиной этого является угловая дисперсия локальных осей анизотропии. Пользуясь результатами расчетов, проведенных в [15], можно сделать заключение о том, что среднеквадратичное отклонение локальных ЛО от направления усредненной по поверхности или объему пленки ЛО составляет $20\text{--}30^\circ$.

Величина H_c верхнего слоя CoNi в пленке "Ангром" оценивалась в работе [4] путем измерения ЭЭК в переменном магнитном поле. Прямое измерение петель гистерезиса на поверхности "Ангром", проведенное в настоящей работе, подтвердило вывод, сделанный в работе [4], о том, что коэрцитивная сила на поверхности больше ее среднего значения в объеме (см. таблицу). Такая структура носителя способствует повышению плотности записи информации и повышению уровня записываемого и воспроизводимого сигналов.

Таким образом, с помощью нового метода измерения петель гистерезиса, основанного на использовании интенсивных магнитооптических эффектов, измерены петли гистерезиса на двух поверхностях CoNi пленок, напыленных под углом на движущуюся подложку при изменении угла напыления как от большего к меньшему, так и от меньшего к большему. Величина H_c больше на той стороне пленок, на которой угол напыления больше, т.е. в пленках первой группы H_c на поверхности пленок, прилегающей к

подложке, больше, чем на свободной поверхности. В пленках второй группы ситуация обратная.

Выражаем благодарность Л.И. Зелениной и С.С. Субботину за предоставленные образцы CoNi пленок.

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 95-02-05601).

Список литературы

- [1] Zebel S.L., Silvain J.F., Re M.E. et al. // J. Appl. Phys. 1987. Vol. 61. N 8. P. 3804–3806.
- [2] Васильева Н.И., Касаткин С.И., Плотникова Н.В. и др. // Зарубежная электронная техника. 1992. № 7, 8. С. 3–38.
- [3] Nakamura K., Ohta Y., Itoh A. et al. // IEEE Trans. Magn. 1982. Vol. 18. N 6. P. 1077–1079.
- [4] Зеленина Л.И., Зубов В.Е., Мацкевич С.И. и др. // ЖТФ. 1994. Т. 64. Вып. 4. С. 51–56.
- [5] Ясиневичус Р. Радио. 1985. № 1. С. 28–31.
- [6] Зубов В.Е., Криничик Г.С., Лысков В.А. // ЖЭТФ. 1981. Т. 81. Вып. 4 (10). С. 1489–1497.
- [7] Криничик Г.С., Чепурова Е.Е. // Тр. Междунар. конф. по магнетизму. М., 1973. С. 134–139.
- [8] Рандошкин В.В., Червоноенжис А.Я. Прикладная магнитооптика. М.: Энергоатомиздат, 1990. 320 с.
- [9] Кизель В.А. Отражение света. М.: Наука, 1973. 352 с.
- [10] Traeger G., Wenzel L., Hubert A. // Phys. Stat. Sol. (a). 1992. Vol. 131. P. 201–227.
- [11] Шпиньков Н.И. // Физика твердого тела / Под ред. А.А.Кацнельсона, Г.С.Криничика. М.: Изд-во МГУ, 1982. С. 285–302.
- [12] Криничик Г.С. Физика магнитных явлений. М.: Изд-во МГУ, 1985. 336 с.
- [13] Архипов К.Г., Зубов В.Е. // Опт. и спектр. 1992. Т. 73. Вып. 5. С. 952–957.
- [14] Feuerstein A.S., Mayr M. // IEEE Trans. Magn. 1984. Vol. 20. N 1. P. 51–56.
- [15] Козлов В.И., Мешалкин В.И., Телеснич Р.В. и др. // Изв. АН СССР. 1972. Т. 36. № 6. С. 1175–1177.