

УДК 535.32/34

Л. В. Поперенко, В. Г. Кравец
(Киев, Украина)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ
РЕГИСТРИРУЮЩИХ МЕТАЛЛОАМОРФНЫХ СРЕД

Измерением эллипсометрических параметров отраженного от аморфной пленки света вне магнитного поля и при его приложении перпендикулярно ее плоскости в двух противоположных направлениях (геометрия поляриного эффекта Керра) определены оптические и магнитооптические характеристики металлических сплавов, обогащенных либо Co, либо Fe, и по результатам сравнения этих характеристик сделано заключение о предпочтительности выбора в качестве материала для регистрирующих сред сплава на основе кобальта.

Аморфные материалы системы Co—Fe—B—Si широко применяются в качестве магнитных головок для записи и считывания цифровой и звуковой информации. Пленки этих материалов характеризуются относительно низкой коэрцитивной силой и довольно большой относительной магнитострикцией $2 \cdot 10^{-5}$ [1].

Исследовались изменения оптических свойств аморфных металлических пленок на основе Co—Si (с добавками Fe и B) под действием лазерного излучения. В результате установлено, что под воздействием коротких импульсов лазерного излучения с длиной волны, равной 1,06 мкм, коэффициент отражения аморфных пленок увеличивается на 25 %, а коэффициент поглощения — почти в 1,5 раза. С помощью лазерного излучения можно также восстановить материал. Такого типа оптическая запись информации представляется перспективной, так как она обладает высокой стабильностью и относительно низкой стоимостью исходного материала.

К недостаткам следует отнести то, что такой процесс связан с плавлением материала в облучаемой области, а сама запись достаточно высокоэнергетична. В связи с этим важно определить, в какой мере изменяются оптические свойства аморфных толстых пленок системы Co—Fe—B—Si в результате фазового превращения из аморфного в кристаллическое состояние.

Кроме того, пленки на основе кобальта являются магнитными, поэтому необходимо выяснить, каково влияние магнитного поля на оптические свойства этих сплавов.

1. Методика эксперимента. В данной работе измерены оптические характеристики аморфных сплавов $Co_{71}Fe_8B_9Si_{12}$ и $Fe_{51}Co_{28}B_9Si_{12}$ спектроэллипсометрическим методом. Наиболее подходящим для этой цели оказался метод Битти [2]. В этом методе измеряются интенсивности света, прошедшего через систему поляризатор—образец—анализатор (ПОА) при трех определенных азимутах анализатора Ψ_a и фиксированном азимуте поляризатора $\Psi_n = 45^\circ$. Интенсивность света, прошедшего через систему ПОА, представляется в общем виде:

$$I(\Psi_a, \Psi_n) = I_r(\cos^2\Psi_n \cdot \cos^2\Psi_a + \operatorname{tg}^2\Psi \cdot \sin^2\Psi_n \cdot \sin^2\Psi_a + \\ + 0,5\operatorname{tg}\Psi \cdot \sin 2\Psi_n \cdot \sin 2\Psi_a \cdot \cos\Delta), \quad (1)$$

где I — интенсивность света на входе системы ПОА; $\text{tg}\Psi = |r_p|/|r_s|$ — отношение модулей коэффициентов отражения p - и s -компонент световой волны; $\Delta = \delta_p - \delta_s$ — сдвиг фаз между этими компонентами после отражения от образца.

В реализованном варианте метода Битти в условиях линейной световой характеристики регистрирующей системы значения фототоков соответствуют интенсивностям: $I_1 = I(0; 45^\circ)$; $I_2 = I(90; 45^\circ)$; $I_3 = I(45; 45^\circ)$; $I_4 = I(-45; 45^\circ)$. По этим четырем измеренным значениям фототоков вычисляли два эллипсометрических параметра отраженного света:

$$\cos\Delta = \frac{I_3 - I_4}{4(I_1 I_2)^{1/2}} \left(1 + \frac{I_1 + I_2}{I_3 + I_4} \right), \quad (2)$$

$$\text{tg}\Psi = (I_1/I_2)^{1/2} = |r_p|/|r_s|. \quad (3)$$

Зная эти параметры, можно определить главные показатели преломления n и поглощения κ металлических пленок по формулам [3]:

$$n = \sin\varphi \cdot \text{tg}\varphi \frac{\cos 2\Psi}{1 + \sin 2\Psi \cdot \cos\Delta}, \quad (4)$$

$$\kappa = \sin\varphi \cdot \text{tg}\varphi \frac{\sin 2\Psi \cdot \sin\Delta}{1 + \sin 2\Psi \cdot \cos\Delta}, \quad (5)$$

где φ — угол падения света на зеркальную поверхность образца. На основе n и κ можно рассчитать действительную ϵ_1 и мнимую ϵ_2 части комплексной диэлектрической проницаемости $\epsilon = \epsilon_1 - i\epsilon_2$ среды:

$$\epsilon_1 = n^2 - \kappa^2 + \sin^2\varphi, \quad (6)$$

$$\epsilon_2 = 2n\kappa. \quad (7)$$

Для аморфных пленок на основе Co—Fe—B—Si проведен также анализ магнитооптических свойств. Основу анализа составили измерения спектральных зависимостей параметров эллипса поляризации Ψ и Δ для двух случаев: при выборе положительного (+) и отрицательного (−) направлений магнитного поля, приложенного к пленке, в геометрии полярного эффекта Керра (магнитное поле ориентировано перпендикулярно поверхности образца).

Согласно результатам работы [4], основное уравнение эллипсометрии можно представить в виде

$$\rho(\pm) = r'_p/r'_s = f(\pm M) \quad (8)$$

с учетом функциональной зависимости параметра ρ от M (M — намагниченность образца, возникшая под действием приложенного магнитного поля). Амплитудные коэффициенты для p - и s -компонент отраженной волны в таком случае можно представить соотношениями:

$$r'_p(\pm) = r_p + k_p F_s / E_p, \quad (9)$$

$$r'_s(\pm) = r_s \pm k_s E_p / E_s, \quad (10)$$

где $r'_p(r_p)$ и $r'_s(r_s)$ — амплитудные коэффициенты отражения света при приложении поля (в отсутствие поля); E_s и E_p — амплитуды составляющих вектора электрического поля падающей волны; k_s и k_p — недиагональные компоненты комплексной матрицы отражения света Френеля для среды, анизотропия в которой наводится магнитным полем.

По аналогии с работой [5], учитывая, что в методе Битти поляризатор ориентирован под углом $\Psi_n = 45^\circ$ к плоскости падения, получаем $E_s = E_p$. Тогда уравнения (9) и (10) можно записать в виде

$$\rho(+) = \frac{r_p + k_p}{r_s + k_s}, \quad (11)$$

$$\rho(-) = \frac{r_p - k_p}{r_s - k_s}. \quad (12)$$

Из соотношений (11), (12) определяем величину k_p :

$$k_p = \frac{r_p[\rho(-) + \rho(+)] - 2r_s\rho(+)\rho(-)}{\rho(+)-\rho(-)}. \quad (13)$$

Согласно результатам работы [3], угол вращения Керра θ_k находится как реальная часть отношения k_p/k_s :

$$\operatorname{Re}\left\{\frac{k_p}{k_s}\right\} = \operatorname{Re}\left\{\frac{\rho[\rho(-) + \rho(+)] - 2\rho(+)\rho(-)}{2\rho - [\rho(+)+\rho(-)]}\right\} = \theta_k, \quad (14)$$

где отношение $\rho = r_p/r_s$ определено в отсутствие магнитного поля.

Следовательно, измеряя эллипсометрические параметры отраженного от аморфной пленки света без магнитного поля и при приложении магнитного поля перпендикулярно плоскости образца в двух противоположных направлениях, можно определить основные оптические и магнитооптические характеристики металлических сплавов на основе Co—Fe—B—Si.

Эллиптичность, которая возникает при отражении линейно поляризованного света от металлической пленки, находящейся в магнитном поле, будет определяться как

$$\operatorname{Im}\{k_p/k_s\} = \xi_k. \quad (15)$$

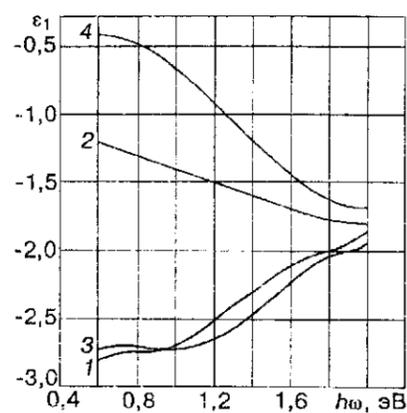
Изменения главных показателей преломления и поглощения, которые вызваны действием приложенного магнитного поля к металлической аморфной пленке, определяются выражениями [6]:

$$\Delta n = 2nk\theta_k - (1 - n^2 + \kappa^2)\xi_k, \quad (16)$$

$$\Delta\kappa = (1 - n^2 + \kappa^2)\theta_k + 2nk\xi_k. \quad (17)$$

2. Результаты и их обсуждение. На рис. 1 представлены зависимости действительной части $\epsilon_1(h\omega)$ диэлектрической проницаемости в области энергий фотонов 0,5—2 эВ. Как видно из представленных зависимостей, аморфные сплавы, обогащенные кобальтом, характеризуются аномальным поведением действительной части $\epsilon_1(h\omega)$ функции диэлектрической проницаемости в области энергий фотонов 0,5—2 эВ. Эта величина растет при уменьшении

Рис. 1. Дисперсионная зависимость действительной части $\epsilon_1(h\omega)$ диэлектрической проницаемости пленок аморфных сплавов в отсутствие (1, 2) и при приложении (3, 4) магнитного поля:
1, 3 — $\text{Fe}_{51}\text{Co}_{28}\text{B}_9\text{Si}_{12}$; 2, 4 — $\text{Co}_{71}\text{Fe}_8\text{B}_9\text{Si}_{12}$

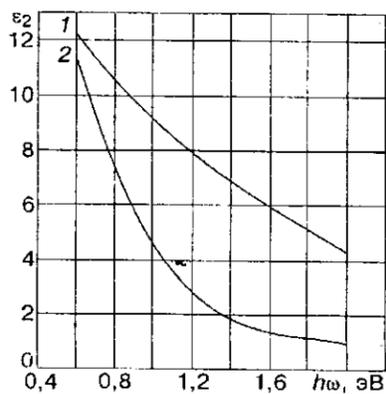


энергии зондирующих фотонов (см. рис. 1, кривая 2). В аморфном сплаве $\text{Fe}_{51}\text{Co}_{28}\text{B}_9\text{Si}_{12}$ наблюдается типичная для металлов дисперсионная зависимость $\epsilon_1(h\omega)$. Ход экспериментальной кривой $\epsilon_1(h\omega)$ аморфного сплава $\text{Co}_{71}\text{Fe}_8\text{B}_9\text{Si}_{12}$ при приложении магнитного поля величиной $H = 4$ кЭ перпендикулярно поверхности аморфной пленки имеет более выраженный аномальный характер по отношению к известным зависимостям для металлов (см. рис. 1, кривая 4).

Мнимая часть $\epsilon_2(h\omega)$ диэлектрической проницаемости отражает в главных чертах плотность электронных состояний в области энергий, близких к уровню Ферми. Рост величины $\epsilon_2(h\omega)$ для этих сплавов при уменьшении энергии зондирующих фотонов от 2 до 0,5 эВ указывает на возрастающий вклад в $\epsilon_2(h\omega)$ внутрizonных переходов наряду с межзонными. Аморфные сплавы, обогащенные кобальтом, характеризуются большим значением величины $\epsilon_2(h\omega)$ по сравнению со сплавом $\text{Fe}_{51}\text{Co}_{28}\text{B}_9\text{Si}_{12}$ (рис. 2). При приложении магнитного поля $H = 4$ кЭ перпендикулярно поверхности пленки происходит увеличение $\epsilon_2(h\omega)$ для сплава $\text{Co}_{71}\text{Fe}_8\text{B}_9\text{Si}_{12}$ и почти не отмечаются изменения этой величины для сплава $\text{Fe}_{51}\text{Co}_{28}\text{B}_9\text{Si}_{12}$.

Анализ оптических свойств аморфных сплавов $\text{Fe}_{79-x}\text{Co}_x\text{B}_9\text{Si}_{12}$ ($x = 28, 71$ ат. %) показал, что атомы железа и кобальта сохраняют индивидуальные особенности и энергетический спектр плотности электронных состояний изменяется в основном вблизи уровня Ферми. В сплавах системы Fe—Co—B—Si интенсивный рост функции $\epsilon_2(h\omega)$ в низкоэнергетической области 0,6—1,1 эВ имеет, по-видимому, ту же природу, что и максимум оптического поглощения в кристаллическом кобальте. Энергетическая зависимость $\epsilon_2(h\omega)$ сплава, обогащенного кобальтом, существенно не изменяется и при фазовом переходе из аморфного в кристаллическое состояние, что свидетельствует об устойчивости энергетического спектра электронов этого сплава по отношению к структурным превращениям. Ход дисперсионных зависимостей $\epsilon_2(h\omega)$ аморфных сплавов системы Fe—Co—B—Si в области энергий $h\omega = 1,4-1,8$ эВ, согласно данным [7], обусловлен переходами электронов между парами обменно расщепленных зон с направлением спина по намагниченности и против нее. Электронные переходы происходят между зонами с антипараллельной проекцией спинов, которые становятся разрешенными вследствие значительного спин-орбитального взаимодействия атомов Co и Fe и высокой межзонной плотности состояний. Плотность электронных состояний вблизи уровня Ферми в сплавах, обогащенных кобальтом, выше, чем в сплавах на основе Fe, что усиливает

Рис. 2. Дисперсионная зависимость мнимой части $\epsilon_2(h\omega)$ диэлектрической проницаемости пленок аморфных сплавов:
1 — $\text{Co}_{71}\text{Fe}_8\text{B}_9\text{Si}_{12}$; 2 — $\text{Fe}_{51}\text{Co}_{28}\text{B}_9\text{Si}_{12}$



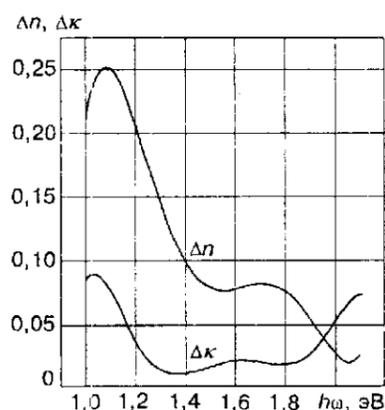


Рис. 3. Дисперсионные зависимости изменения оптических постоянных n и κ при приложении магнитного поля сплава $\text{Co}_{71}\text{Fe}_8\text{B}_9\text{Si}_{12}$

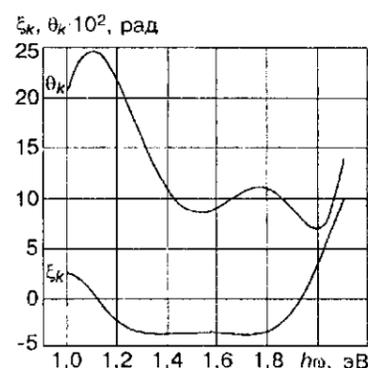


Рис. 4. Дисперсионные зависимости магнито-оптических характеристик θ_k и ξ_k аморфной пленки $\text{Co}_{71}\text{Fe}_8\text{B}_9\text{Si}_{12}$

ет интенсивность переходов между обменно расщепленными зонами. По-видимому, спин-орбитальное взаимодействие атомов Co и Fe в сплавах $\text{Fe}_{79-x}\text{Co}_x\text{B}_9\text{Si}_{12}$ ($x = 28, 71$ ат. %) приводит к аномальному поведению зависимостей $\epsilon_1(\hbar\omega)$ и $\epsilon_2(\hbar\omega)$ при приложении внешнего магнитного поля в геометрии полярного эффекта Керра.

На рис. 3 представлены зависимости изменения оптических постоянных при приложении магнитного поля к поверхности металлической пленки в геометрии полярного эффекта Керра. Как видно, изменения показателя преломления при приложении магнитного поля более существенны по сравнению с таковыми для показателя поглощения. После экспериментального определения изменений оптических постоянных n и κ при приложении магнитного поля к поверхности аморфной пленки $\text{Co}_{71}\text{Fe}_8\text{B}_9\text{Si}_{12}$ на основании соотношений (14) и (15) рассчитан угол вращения Керра θ_k и эллиптичность ξ_k , спектральные зависимости которых представлены на рис. 4.

Вычисленные значения магнитооптических параметров аморфных пленок на основе Co имеют все же несколько меньшие значения по сравнению с параметрами уже применяемых для магнитооптической записи информации мультислоев Co/Pt и Co/Pd [6].

Однако несмотря на это все же предпочтительнее использовать аморфные пленки на основе Co для записи информации, если изменения их оптических свойств вызваны фазовыми превращениями. Повышение эффективности записи на основании упомянутого принципа может быть достигнуто при приложении магнитного поля. Этому утверждению соответствуют результаты работы [8], где оптические свойства аморфных пленок существенно изменялись при отжиге их в магнитном поле, направленном перпендикулярно поверхности пленок. При этом и фазовые превращения происходили при температурах отжига, существенно меньших тех температур, что выбирались в отсутствие магнитного поля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карпенков С. Н. Свойства материалов, используемых для перпендикулярной магнитной записи // Зарубеж. радиоэлектрон. 1991. № 11. С. 3.
2. Beattie J. R. Optical constants of metals in the infrared — Experimental methods // Phil. Mag. 1955. 46. P. 235.

3. Борбат А. М., Горбань И. С., Охрименко Б. А. и др. Оптические измерения. Киев: Техника, 1967.
4. Tiwald Th. E., Wollam J. A., Sellmyer D. J. Ellipsometric and magneto-optic properties of sputtered dysprosium-iron multilayers // J. Appl. Phys. 1988. 63, N 8. P. 3215.
5. Емельяненко А. М., Войнович Л. В. Эллипсометрия многослойных свободных пленок. Анизотропные планарные слои // Эллипсометрия: теория, методы, приложение: Сб. науч. тр. Новосибирск: Наука, 1991.
6. Hashimoto S., Ochiai Y., Aso K. Film thickness dependence of magneto-optical and magnetic properties in Co/Pt and Co/Pd multilayers // J. Appl. Phys. 1990. 67, N 9. P. 4429.
7. Анохина И. Н., Егорушкин В. Е., Кулькова С. Е., Фадин В. П. Изменение электронной энергетической структуры и оптических свойств сплава FeCo при переходе порядок—беспорядок // ФТТ. 1981. 21, № 10. С. 2971.
8. Belyi M. U., Poperenko L. V., Shaikovich I. A. et al. Magneto-optical study of the electronic structure of the Fe-based amorphous alloys at the phase transition // Proc. II Intern. Symp. Magn.-Opt. (ISMO'91). 1992. 18, N S1. P. 265.

Поступила в редакцию 14 декабря 1996 г.