

МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ MNST MODELLING AND DESIGNING OF MNST

УДК 535.016

DOI: 10.17587/nmst.20.521-527

А. А. Дедкова, вед. инженер, e-mail: my_name9999@mail.ru, В. Ю. Киреев, д-р техн. наук, ст. науч. сотр.,
вед. инженер, e-mail: valerikireev@mail.ru, Н. С. Мазуркин, канд. техн. наук, вед. инженер,
e-mail: edenlab@mail.ru
Национальный исследовательский университет "МИЭТ", Москва

АНАЛИЗ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ПЛЕНОК С ПОМОЩЬЮ СИСТЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЯ МАГНИТООПТИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА КЕРРА И СПЕКТРАЛЬНОГО ЭЛЛИПСОМЕТРА

Поступила в редакцию 26.03.2018

Проведены исследования образца ферромагнитной пленки $Fe_{10}Ni_{74}Co_{16}$ толщиной 30 нм после ее осаждения и двух размагничивающих полчасовых вакуумных отжигов при температурах 400 и 600 °С. Характеристики пленки, в том числе коэрцитивная сила и поле анизотропии, а также их изменения после отжигов определяли с помощью системы исследования магнитооптического эффекта Керра и спектрального эллипсометра. Показано, что сигнал спектрального эллипсометра I_s реагирует на структуру пленки $Fe_{10}Ni_{74}Co_{16}$, изменяющуюся при вакуумном отжиге. Причем изменение сигнала I_s на длинах волн λ , равных 450 и 650 нм, практически в два раза больше, чем на длинах волн λ , равных 550 и 750 нм.

Ключевые слова: ферромагнитная пленка $Fe_{10}Ni_{74}Co_{16}$, коэрцитивная сила, поле анизотропии, система исследования магнитооптического эффекта Керра, спектральный эллипсометр

Введение

Магнитооптический эффект Керра заключается во вращении плоскости поляризации света, отраженного от намагниченного ферромагнетика. В зависимости от взаимного расположения вектора намагниченности $\mathbf{M}$, плоскости ферромагнитного зеркала (поверхности ферромагнитной пленки) и плоскости поляризации света может осуществляться полярное, меридиональное и экваториальное намагничивание образца и, соответственно, наблюдаться полярный, меридиональный и экваториальный эффекты Керра (рис. 1) [1].

Эксперимент

В настоящей работе исследовали образец ферромагнитной пленки $Fe_{10}Ni_{74}Co_{16}$ толщиной 30 нм. Пленка осаждалась на подложку, представляющую собой пластину монокристаллического кремния КДБ-12(100) диаметром 150 мм со слоями термического оксида (SiO_2) толщиной 0,6 мкм и высокотемпературного нитрида кремния (Si_3N_4) толщиной 0,13 мкм, на установке магнетронного распы-

ления PHASE II J компании AJA International Inc. (США) в подмагничивающем поле $H_0 = 40$ Э.

Были использованы следующие операционные параметры процесса осаждения: температура подложки $T_s = 270$ °С; остаточное давление газов в камере $p_r = 10^{-5}$ Па; мощность, подаваемая на магнетрон $W_m = 160$ Вт; рабочее давление аргона $p = 0,5$ Па.

Образец пленки $Fe_{10}Ni_{74}Co_{16}$ исследовали сразу после получения и после двух полчасовых размагничивающих вакуумных отжигов при температурах $T_1 = 400$ °С и $T_2 = 600$ °С на системе для локального исследования магнитооптического эффекта Керра ВН-PI7892-MI производства компании NEOARC Corp. (Япония) и с помощью спектрального эллипсометра Auto SE компании Horiba Jobin Yvon (Япония).

В отсутствие внешнего магнитного поля $\mathbf{H}$ вектор спонтанной намагниченности $\mathbf{M}$ ферромагнитной пленки направлен по оси легкого намагничивания (ОЛН), совпадающего с направлением подмагничивающего поля $\mathbf{H}_0$. Перпендикулярно ОЛН в плоскости ферромагнитной пленки лежит

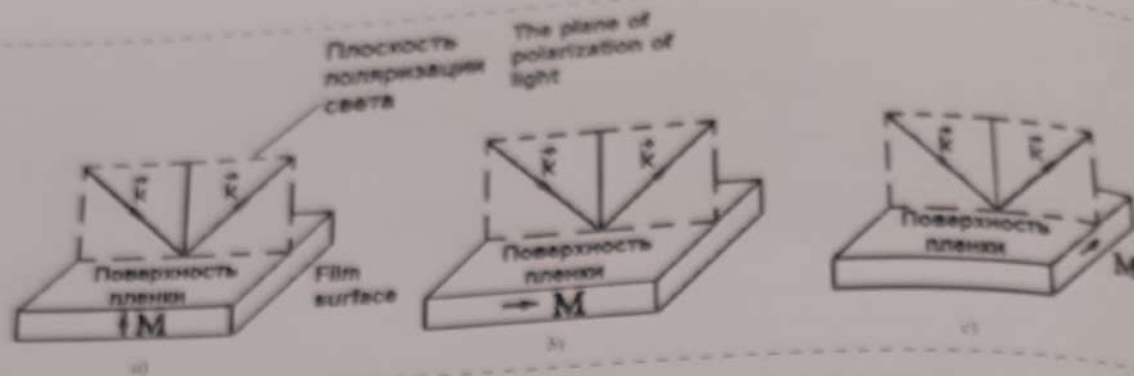


Рис. 1. Взаимное расположение вектора намагниченности M , плоскости ферромагнитного зеркала (поверхности ферромагнитной пленки) и плоскости поляризации (падения) света в случае полярного (а), меридионального (б) и экваториального (в) эффекта Керра (k — вектор распространения световой волны). Система координат выбирается так, что ось Z всегда направлена вдоль вектора намагниченности образца M

Fig. 1. The mutual arrangement of the magnetization vector M , the plane of the ferromagnetic mirror (the surface of the ferromagnetic film) and the plane of polarization (incidence) of light in the case of polar (a), meridional (b) and equatorial (c) effects of Kerr (k — propagation vector of the light wave). The coordinate system is selected so that Z axis is always directed along the magnetization vector of sample M

ось трудного намагничивания (ОТН). При приложении внешнего магнитного поля H вектор намагниченности M поворачивается, приближаясь к направлению поля с возрастанием его значения, т. е. существует зависимость $M = f(H)$ [2].

Для исследуемых образцов в виде тонких ферромагнитных пленок характерен меридиональный эффект Керра, состоящий в повороте плоскости поляризации на угол Керра, обозначаемый как θ_k (далее Theta k на графиках рис. 3, см. вторую сторону обложки), и появлении эллиптичности отраженного света при намагничивании пленки.

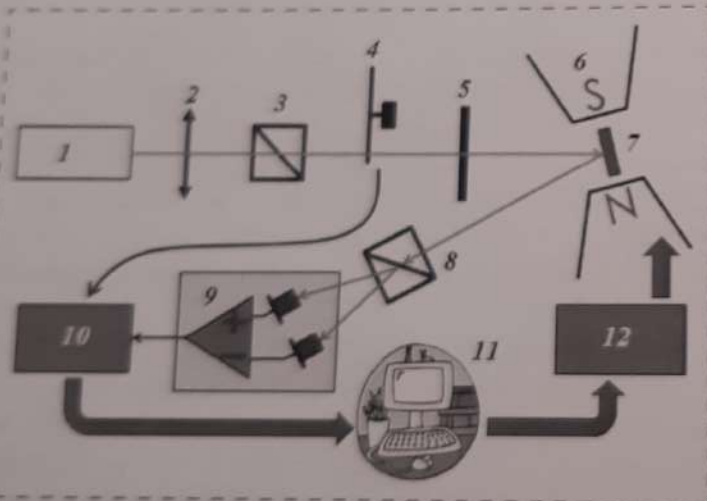


Рис. 2. Схема системы для локального исследования магнитооптического эффекта Керра BH-PI7892-M1: 1 — лазер; 2 — собирающая линза; 3 — поляризатор; 4 — модулятор; 5 — полуволновая пластинка; 6 — электромагнит; 7 — образец ферромагнитной пленки; 8 — анализатор; 9 — фотодетектор; 10 — синхронный детектор; 11 — компьютер; 12 — блок питания электромагнита

Fig. 2. Circuit of BH-PI7892-M1 system for a local study of the magneto-optical effect of Kerr: 1 — laser; 2 — converging lens; 3 — polarizer; 4 — modulator; 5 — half-wave plate; 6 — electromagnet; 7 — ferromagnetic film sample; 8 — analyzer; 9 — photodetector; 10 — synchronous detector; 11 — computer; 12 — power supply unit for the electromagnet

Коэрцитивную силу H_c и поле анизотропии H_a полученного образца ферромагнитной пленки измеряли в системе для локального исследования магнитооптического эффекта Керра BH-PI7892-M1 производства компании NEOARC Corp. (Япония), схема измерения которой представлена на рис. 2.

Монохроматический пучок света, излучаемый лазером 1 с длиной волны $\lambda = 408$ нм, формируемый оптическими элементами 2, 4 и 5, проходя через поляризатор 3, приобретает линейную поляризацию. Линейно поляризованный пучок света диаметром около 3 мкм направляется на образец ферромагнитной пленки 7 практически перпендикулярно ее поверхности (угол падения пучка света β , отсчитываемый от нормали к поверхности пленки, близок к 0° , т. е. $\beta \approx 0^\circ$).

После отражения от поверхности ферромагнитной пленки 7, находящейся во внешнем магнитном поле ($S-N$), создаваемом электромагнитом 6 с блоком питания 12, поляризация света становится эллиптической. Затем пучок света падает на анализатор 8, в качестве которого используется призма Волластона (Wollaston), разделяющая свет на два пучка ортогональной поляризации. Вышедшие из призмы два пучка попадают на фотодиоды фотодетектора 9 с призмой Глана — Томпсона (Glan — Thompson prism), где оптические сигналы превращаются в электрические сигналы, разность которых модулируется и детектируется синхронным детектором 10 и поступает для обработки в компьютер 11, управляющий также работой всей системы [3].

При этом согласно работе [4] угол поворота Керра θ_k (Theta k на графиках рис. 3, см. вторую сторону обложки) пропорционален намагниченности M ферромагнитной пленки, поэтому кривые намагничивания и петли перемагничивания

ферромагнитных пленок в системе ВН-PI7892-М1 получаются не как зависимости $M = f(H)$, а как зависимости $\Theta = f(H)$ (рис. 3, см. вторую сторону обложки). При получении кривых намагничивания и петли перемагничивания ферромагнитных пленок система ВН-PI7892-М1 обеспечивает точность вращения образцов по углу α в горизонтальной плоскости на уровне 1° .

Полученные на осажденных и отожженных образцах пленок $Fe_{10}Ni_{74}Co_{16}$ из графиков на рис. 3 (см. вторую сторону обложки) значения коэрцитивной силы H_c и поля анизотропии H_n приведены в табл. 1.

Те же образцы осажденных и отожженных пленок $Fe_{10}Ni_{74}Co_{16}$ исследовали на спектральном эллипсометре Auto SE, имеющем диапазон длин волн $\lambda = 440...850$ нм, фиксированный угол падения $\beta = 70^\circ$ с использованием размера области измерения 500×500 мкм [5]. Оптическая схема эллипсометра показана на рис. 4 (см. вторую сторону обложки).

В приборе Auto SE источником излучения является галогенная лампа мощностью 5 Вт и голубой светодиод. Автоматический затвор используется для выявления и подавления шума. Плечо излучателя состоит из источника света, поляризатора и модулятора на жидких кристаллах, объединенных в оптический блок.

На исследуемый образец пленки падает линейно (плоско) поляризованная волна света, которая после отражения становится в общем случае эллиптически поляризованной. После отражения от образца луч идет через жидкокристаллический модулятор и поляризатор. В завершении выходящий свет анализируется на спектрометре. Измерение выполняется на ПЗС-детекторе (детекторе на основе прибора с зарядовой связью) в диапазоне длин волн $440...850$ нм.

В основе эллипсометрических исследований лежит определение отношения комплексных коэффициентов отражения R_p/R_s для двух типов поляризации световой волны: в плоскости падения (p) и перпендикулярно к ней (s). Это отношение принято выражать через эллипсометрические параметры Ψ и Δ , которые характеризуют относительное изменение амплитуд для p - и s -поляризаций и сдвиг фаз между ними [6]:

$$\operatorname{tg} \Psi \exp(i\Delta) = R_p/R_s. \quad (1)$$

Действительно физический смысл эллипсометрических параметров, иногда называемых поляризационными параметрами, простой: $\operatorname{tg} \Psi$ показывает отношение амплитуд коэффициентов отражения для p - и s -волн, а параметр Δ равен разности между фазовыми скачками этих волн при отражении.

Комплексные коэффициенты отражения зависят от оптических свойств исследуемой ферромагнитной пленки, а также от угла падения света β и его длины волны λ . Если число параметров, подлежащих определению, больше двух, то можно провести измерения при сканировании длины волны света по спектру (спектральная эллипсометрия) и, тем самым, увеличить число уравнений.

Эллипсометрический эксперимент предполагает последовательное выполнение следующих шагов [6]:

- проведение необходимого числа измерений (определение левой части уравнений вида (1));
- выбор адекватной оптической модели, описывающей отражающие свойства исследуемого образца (моделирование правой части уравнения (1));
- численное решение системы уравнений и определение искомых параметров модели;
- интерпретация полученных числовых результатов на языке физических характеристик исследуемого объекта.

Спектральный эллипсометр Auto SE не измеряет напрямую эллипсометрические параметры Ψ и Δ , они определяются в результате анализа спектра, измеренного на детекторе, при различных положениях жидких кристаллов. Зато эллипсометр определяет связанные с ними характеристики I_s и I_c [5]:

$$I_s = \sin 2\Psi \cdot \sin \Delta; \quad (2)$$

$$I_c = \sin 2\Psi \cdot \cos \Delta. \quad (3)$$

Таблица 1
Table 1

Результаты измерений магнитных параметров образца пленки $Fe_{10}Ni_{74}Co_{16}$ с помощью системы для локального исследования магнитооптического эффекта Керра ВН-PI7892-М1 с $\lambda = 408$ нм при $\beta = 0^\circ$

Results of measurements of the magnetic parameters of the sample of $Fe_{10}Ni_{74}Co_{16}$ film by means of ВН-PI7892-М1 system for the local research of the magneto-optical Kerr effect with $\lambda = 408$ nm at $\beta = 0^\circ$

Угол ориентации образца пленки $Fe_{10}Ni_{74}Co_{16}$ в горизонтальной плоскости $\alpha = 35^\circ$ (по направлению оси легкого намагничивания (ОЛН)) Angle of orientation of the sample of $Fe_{10}Ni_{74}Co_{16}$ film in the horizontal plane $\alpha = 35^\circ$ (in the direction of the axis of easy magnetization (AEM))	Угол ориентации образца пленки $Fe_{10}Ni_{74}Co_{16}$ в горизонтальной плоскости $\alpha = 125^\circ$ (по направлению оси трудного намагничивания (ОТН)) Angle of orientation of $Fe_{10}Ni_{74}Co_{16}$ in the horizontal plane $\alpha = 125^\circ$ (in the direction of the axis of hard magnetization (AHM))
Коэрцитивная сила H_c , Э Coercive force H_c , Oe 2,9 5,7 4,6	Поле анизотропии H_n , Э Field of anisotropy H_n , Oe 25,9 17,3 6,4

Результаты измерений магнитных параметров образца пленки $\text{Fe}_{10}\text{Ni}_{74}\text{Co}_{16}$ с помощью спектрального эллипсометра Auto SE при $\beta = 70^\circ$
 Results of measurements of the magnetic parameters of the sample of $\text{Fe}_{10}\text{Ni}_{74}\text{Co}_{16}$ film by means of Auto SE spectral ellipsometer at $\beta = 70^\circ$

	Угол ориентации образца пленки $\text{Fe}_{10}\text{Ni}_{74}\text{Co}_{16}$ в горизонтальной плоскости $\alpha = 35^\circ$ (по направлению оси легкого намагничивания (ОЛН)) Angle of orientation of the sample of $\text{Fe}_{10}\text{Ni}_{74}\text{Co}_{16}$ film in the horizontal plane $\alpha = 35^\circ$ (in the direction of the axis of easy magnetization (AEM))				Угол ориентации образца пленки $\text{Fe}_{10}\text{Ni}_{74}\text{Co}_{16}$ в горизонтальной плоскости $\alpha = 125^\circ$ (по направлению оси трудного намагничивания (ОТН)) Angle of orientation of the sample of $\text{Fe}_{10}\text{Ni}_{74}\text{Co}_{16}$ film in the horizontal plane $\alpha = 125^\circ$ (in the direction of the axis of hard magnetization (AHM))			
	450	550	650	750	450	550	650	750
Длина волны λ , нм Wavelength λ , nm								
Сигнал до отжига I_{s1} Signal before annealing I_{s1}	0,882	0,705	0,616	0,562	0,880	0,702	0,614	0,559
Сигнал после первого отжига при I_{s2} $T_1 = 400^\circ\text{C}$ Signal after the first annealing at I_{s2} $T_1 = 400^\circ\text{C}$	0,816	0,672	0,555	0,525	0,821	0,676	0,564	0,531
Сигнал после второго отжига при I_{s3} $T_2 = 600^\circ\text{C}$ Signal after the second annealing at I_{s3} $T_2 = 600^\circ\text{C}$	0,781	0,658	0,527	0,504	0,782	0,657	0,524	0,506
Разность сигналов $ I_{s3} - I_{s1} $ Difference of signals $ I_{s3} - I_{s1} $	0,101	0,048	0,089	0,057	0,099	0,045	0,091	0,053
Разность сигналов $ I_{s3} - I_{s2} $ Difference of signals $ I_{s3} - I_{s2} $	0,066	0,033	0,061	0,037	0,060	0,026	0,050	0,029

При этом значения характеристики I_s составляют первичный набор данных, определяющей параметры образца пленки $\text{Fe}_{10}\text{Ni}_{74}\text{Co}_{16}$, и являются ключевыми элементами спектра, используемого для моделирования.

Образец пленки $\text{Fe}_{10}\text{Ni}_{74}\text{Co}_{16}$ на столике спектрального эллипсометра Auto SE вращали в горизонтальной плоскости вручную, по этой причине точность выставления угла α составляла $\pm 5^\circ$. Данные на осажденных и отожженных образцах пленок $\text{Fe}_{10}\text{Ni}_{74}\text{Co}_{16}$ снимали при углах $\alpha = 35^\circ$ и $\alpha = 125^\circ$ на четырех длинах волн λ : 450, 550, 650 и 750 нм. Для каждого образца, угла и длины волны значения характеристики I_s снимали по 3 раза, чтобы учесть возможные флуктуации, вызванные аппаратными ошибками, а затем усредняли и заносили в табл. 2.

Хотя следует отметить, что наибольшие вариации характеристики I_s неотожженного образца пленки $\text{Fe}_{10}\text{Ni}_{74}\text{Co}_{16}$ наблюдали при углах $\alpha = 90^\circ$ и $\alpha = 270^\circ$.

Заключение

На основании проведенных экспериментов можно сделать следующие выводы:

1. Образец пленки $\text{Fe}_{10}\text{Ni}_{74}\text{Co}_{16}$ не размагнитился после первого вакуумного отжига при температуре $T_1 = 400^\circ\text{C}$ в течение 30 мин, так как пет-

ли перемагничивания относительно оси легкого намагничивания (ОЛН) под углом $\alpha = 35^\circ$ (см. рис. 3, позиции *a* и *b*) практически не изменились. Это свидетельствует о том, что точка Кюри для исследуемой пленки лежит выше 400°C .

2. После второго вакуумного отжига при температуре $T_2 = 600^\circ\text{C}$ в течение 30 мин образец пленки $\text{Fe}_{10}\text{Ni}_{74}\text{Co}_{16}$ размагнитился, что определяется по исчезновению оси трудного намагничивания (ОТН) под углом $\alpha = 125^\circ$ (см. рис. 3, позиция *e*, см. вторую сторону обложки). В процессе остывания образца поле Земли навело анизотропию под углом $\alpha \approx 70^\circ$, что было зафиксировано экспериментально. Для того чтобы поле анизотропии не навело, пластину нужно вращать в процессе остывания.

3. Сигнал спектрального эллипсометра I_s реагирует на структуру пленки $\text{Fe}_{10}\text{Ni}_{74}\text{Co}_{16}$, изменяющуюся в процессе вакуумного отжига. Причем изменение сигнала I_s на длинах волн $\lambda = 450$ нм и $\lambda = 650$ нм практически в два раза больше, чем на длинах волн $\lambda = 550$ нм и $\lambda = 750$ нм (см. табл. 2).

4. Проблема тарировки сигнала спектрального эллипсометра I_s для измерения значений коэрцитивной силы H_c и поля анизотропии H_n ферромагнитных пленок нуждается в дополнительных исследованиях.

Список литературы

1. Tumanski S. Thin Film Magnetoresistive Sensors. London: IOP Publishing Ltd, 2001. 441 p.
2. Шемякин С. Компонентные AMR-датчики положения и угла поворота от компании Honeywell // Компоненты и технологии. 2012. № 11. С. 24–30.
3. Система по изучению магнитооптического эффекта Керра BH-P17892-M1 производства NEOARK CORPORATION (Япония). Техническая документация.
4. Argyres P. N. Theory of the Faraday and Kerr Effects in Ferromagnetics // Physical Review. 1955. Vol. 97, N. 2. P. 334–345.
5. Спектральный эллипсометр Auto SE производства компании Horiba Jobin Yvon (Япония). Техническая документация.
6. Швец В. А., Спесивцев Е. В., Рыхлинский Е. В. и др. Эллипсометрия — прецизионный метод контроля тонкопленочных структур с субнанометровым разрешением // Российские нанотехнологии. 2009. Т. 4, № 3–4. С. 72–84.

A. A. Dedkova, Leading Engineer, my_name9999@mail.ru, V. Yu. Kireev, D. Sci., Leading Engineer, valerikireev@mail.ru, N. N. Mazurkin, Ph. D., Leading Engineer, edenlab@mail.ru, National Research University of Electronic Technology "MIET", Moscow, Zelenograd, 124498, Russian Federation

Corresponding author:

Kireev Valeriy Yu., Leading Engineer, National Research University of Electronic Technology "MIET", Moscow, Zelenograd, 124498, Russian Federation, valerikireev@mail.ru

Analysis of the Parameters of the Ferromagnetic Films by Means of the System for Research of the Magneto-optical Effect of Kerr and a Spectral Ellipsometer

Received on March 26, 2018

Accepted on May 17, 2018

A sample of $\text{Fe}_{10}\text{Ni}_{74}\text{Co}_{16}$ ferromagnetic film of 30 nm thickness was investigated after its deposition and two demagnetizing half-hour vacuum annealings at the temperatures of 400 °C and 600 °C. The magnetic parameters of the film, namely, the coercive force and the anisotropy field, as well as their changes after the annealings, were determined using a system for studying of the magneto-optical effect of the Kerr and a spectral ellipsometer. A sample of the $\text{Fe}_{10}\text{Ni}_{74}\text{Co}_{16}$ film was not demagnetized after the first vacuum annealing at the temperature of $T_1 = 400$ °C during 30 minutes, since the magnetic loop relative to the axis of easy magnetization (AEM) at angle $\alpha = 35^\circ$ did not change. This means that the Curie point for the studied film lies above 400 °C. It is shown that the signal of the spectral ellipsometer reacts to the change of the magnetic parameters of the $\text{Fe}_{10}\text{Ni}_{74}\text{Co}_{16}$ film changing during a vacuum annealing. Moreover, the response range at the wavelengths of $\lambda = 450$ nm and $\lambda = 650$ nm is almost twice as large, than at the wavelengths of $\lambda = 550$ nm and $\lambda = 750$ nm. The problem of calibration of the signal of the spectral ellipsometer I_s for measuring of the values of the coercive force H_c and the anisotropy field H_n of the ferromagnetic films needs additional research.

Keywords: $\text{Fe}_{10}\text{Ni}_{74}\text{Co}_{16}$ ferromagnetic film, coercive force, anisotropy field, system for research of the magneto-optical effect of Kerr, spectral ellipsometer

For citation:

Dedkova A. A., Kireev V. Yu., Mazurkin N. N. Analysis of the Parameters of the Ferromagnetic Films by Means of the System for Research of the Magneto-optical Effect of Kerr and a Spectral Ellipsometer, *Nano- i Mikrosistemnaya Tekhnika*, 2018, vol. 20, no. 9, pp. 521–527.

DOI: 10.17587/nmst.20.521-527

Introduction

The magneto-optical effect of Kerr consists in rotation of the plane of polarization of the light reflected from a magnetized ferromagnetic. Depending on the relative positioning of the vector of magnetization of $\mathbf{M}$, the plane of a ferromagnetic mirror (the surface of the ferromagnetic film) and the plane of polarization of light, a polar, meridional and equatorial magnetization of the sample can be carried out, and, accordingly, the polar, meridional and equatorial effects of Kerr can be observed (fig. 1) [1].

Experiment

We investigated a sample of a ferromagnetic film of $\text{Fe}_{10}\text{Ni}_{74}\text{Co}_{16}$ with thickness of 30 nm. The film was deposited on a substrate, which was a wafer of KDB-12 (100) monocrystal silicon with diameter of 150 mm with layers of thermal oxide (SiO_2) of 0.6 μm thickness and high-temperature silicon nitride (Si_3N_4) with thickness of 0.13 μm . Process deposition of a film was implemented on magnetron sputtering tool PHASE II J, AJA International Inc. (USA) under magnetic bias field near substrate of $H_0 = 40$ Oe.

The following operational parameters were used: temperature of the substrate — $T_s = 270^\circ\text{C}$; residual pressure of gases in the chamber — $p_r = 10^{-5}$ Pa; power submitted to the magnetron — $W_m = 160$ W; working pressure of argon — $p = 0.5$ Pa.

A sample of $\text{Fe}_{10}\text{Ni}_{74}\text{Co}_{16}$ film was investigated after its deposition and two half-hour demagnetizing vacuum annealings at $T_1 = 400^\circ\text{C}$ and $T_2 = 600^\circ\text{C}$ on BH-PI7892-MI system manufactured by NEOARC Corp. (Japan), for the local research of the magneto-optical Kerr effect and by means of Auto SE spectral ellipsometer from Horiba Jobin Yvon (Japan).

In absence of the external magnetic field $\mathbf{H}$, the vector of the spontaneous magnetization of $\mathbf{M}$ of the ferromagnetic film is directed along the axis of easy magnetization (AEM), coinciding with the direction of the magnetic bias field $\mathbf{H}_0$. In the plane of the ferromagnetic film, perpendicularly to AEM, there is the axis of hard magnetization (AHM). When the external magnetic field $\mathbf{H}$ is applied, the vector of magnetization $\mathbf{M}$ turns, coming nearer to the direction of the field with an increase of its value, i.e. there is a dependence $\mathbf{M} = f(\mathbf{H})$ [2].

For the investigated samples in the form of thin ferromagnetic films the meridional Kerr effect is characteristic. It consists in a turn of the plane of polarization by Kerr angle, designated as θ_k and occurrence of ellipticity of the reflected light during the film magnetization.

The coercive force $\mathbf{H}_c$ and the field of anisotropy $\mathbf{H}_n$ of the received sample of the ferromagnetic film was measured in BH-PI7892-MI system manufactured by NEOARC Corp. (Japan) for the local research of the magneto-optical Kerr effect. The measurement circuit this system is shown on fig. 2.

A monochromatic beam of light radiated by laser 1 with the wavelength $\lambda = 408$ nm, formed by optical elements 2, 4 and 5, passing through polarizer 3, acquires a linear polarization. The linearly polarized beam of light with diameter of about $3\ \mu\text{m}$ is directed to the sample of the ferromagnetic film 7 practically perpendicularly to its surface (the incidence angle of the beam of light β , counted from a normal to the film surface, is close to 0° , i.e. $\beta \approx 0^\circ$).

After reflection from the surface of the ferromagnetic film 7, which is in the external magnetic field ($S - N$), created by the electromagnet 6 with a power unit 12, the light polarization becomes elliptic. Then, the beam of light falls on the analyzer 8, the role of which is played by the Wollaston prism, which divides light into two beams of orthogonal polarization. The two beams coming from the prism get to the photodiodes of the photodetector 9 with Glan — Thompson prism, where the optical signals turn into the electric signals, the difference of which is modulated and detected by the syn-

chronous detector 10 and arrives for processing in computer 11, which controls operation of all the system [3].

At that, according to [4], Kerr angle of turn θ_k (Theta k on diagrams of fig. 3, see the 2nd side of cover) is proportional to magnetization $\mathbf{M}$ of the ferromagnetic film, therefore, the curves of the magnetization and the loops of the magnetic reversal of the ferromagnetic films in BH-PI7892-MI system turn out not as $\mathbf{M} = f(\mathbf{H})$ dependences, but as dependences of Theta $k = f(\mathbf{H})$ (fig. 3, see the 2nd side of cover). During reception of the curves of magnetization and the loops of magnetic reversal of the ferromagnetic films, BH-PI7892-MI system ensures accuracy of rotation of the samples by angle α in the horizontal plane at the level of 1° .

The values of the coercive force $\mathbf{H}_c$ and field of anisotropy $\mathbf{H}_n$, received on the deposited and annealed samples of $\text{Fe}_{10}\text{Ni}_{74}\text{Co}_{16}$ films from diagrams in fig. 3 (see the 2nd side cover) are presented in table 1.

The same samples of the deposited and annealed films of $\text{Fe}_{10}\text{Ni}_{74}\text{Co}_{16}$ were investigated on Auto SE spectral ellipsometer with the range of the wavelengths λ (440 — 850) nm, fixed incidence angle $\beta = 70^\circ$ with the use of the size of the area of measurement (500×500) μm [5]. The optical circuit of the ellipsometer is shown in fig. 4, see the 2nd side of cover.

In Auto SE device the source of radiation is a halogen lamp with power of 5 W and a blue light-emitting diode. For detection and suppression of noise an automatic shutter is used. The radiator shoulder consists of a light source, a polarizer and a modulator on the liquid crystals integrated in the optical unit.

A polarized wave of light falls linearly (plainly) on the investigated sample of a film, which after its reflection becomes elliptically polarized. After the reflection from the sample the beam goes through the liquid crystal modulator and the polarizer. In the end, the outgoing light is analyzed in the spectrometer. Measurement is carried out on a CCD detector (the detector based on a charge-coupled device) within the range of the wavelengths of 440...850 nm.

The ellipsometric research is based on determination of the relation of the complex reflection coefficients R_p/R_s for two types of polarization of a light wave: in the plane of incidence (p) and in the one which is perpendicular to it (s). This relation is usually expressed through the ellipsometric parameters Ψ and Δ , which characterize the relative variation of the amplitudes for p - and s -polarizations and the phase shift between them [6]:

$$\text{tg}\Psi \exp(i\Delta) = R_p/R_s. \quad (1)$$

Indeed, the physical meaning of the ellipsometric parameters, which are sometimes called polarizing parameters, is simple: $\text{tg}\Psi$ shows the relation of the am-

plitudes of the wave while the parameter Δ shows the phase jump.

The complex reflection coefficient of the film, and a wavelength of the light are subject to the same conditions (try) and the same conditions.

The ellipsometric method is a non-destructive method.

— can be used for the kind of the material.

— see the reflection (model) of the material.

— a series of measurements; the results are the same.

— the same results; the same results; the same results.

the same results; the same results; the same results.

the same results; the same results; the same results.

set of parameters; the same results; the same results.

the same results; the same results; the same results.

plitudes of the reflection coefficients for p - and s -waves, while the parameter Δ is equal to the difference between the phase jumps of these waves during the reflection.

The complex reflection coefficients depend on the optical properties of the investigated ferromagnetic film, and also on the incident angle of light β and its wavelength λ . If the number of the parameters, which are subject to determination, is more than two, it is possible to make measurements during scanning of the light wavelength by the spectrum (spectral ellipsometry) and thus increase the number of the equations.

The ellipsometric experiment envisages a consecutive implementation of the following steps [6]:

- carrying out of the necessary number of measurements (determination of the left part of the equations of the kind (1));

- selection of an adequate optical model describing the reflecting properties of the investigated sample (modeling of the right part of the equation (1));

- a numerical solution to the system of the equations and determination of the required model parameters;

- interpretation of the received numerical results in the language of the physical characteristics of the investigated object.

Auto SE spectral ellipsometer does not measure directly the ellipsometric parameters of Ψ and Δ , they are determined as a result of an analysis of the spectrum, measured by the detector at different positions of the liquid crystals. However, the ellipsometer determines the characteristics of I_s and I_c [5] connected with them:

$$I_s = \sin 2\Psi \cdot \sin \Delta, \quad (2)$$

$$I_c = \sin 2\Psi \cdot \cos \Delta. \quad (3)$$

At that, the values of characteristic I_s are the initial set of the data, which determine the parameters of the sample of $\text{Fe}_{10}\text{Ni}_{74}\text{Co}_{16}$ film and are the key elements of the spectrum used for modeling.

The sample of $\text{Fe}_{10}\text{Ni}_{74}\text{Co}_{16}$ film was rotated in a horizontal plane manually on a little table of Auto SE spectral ellipsometer, for this reason the accuracy of setting of angle α was $\pm 5^\circ$. The data on the deposited and annealed samples of $\text{Fe}_{10}\text{Ni}_{74}\text{Co}_{16}$ films were recorded at angles $\alpha = 35^\circ$ and $\alpha = 125^\circ$ on the wavelengths of λ : 450, 550, 650 and 750 nm. For each sample, angle and wavelength the values of characteristic I_s were taken 3 times in order to consider the possible fluctuations caused by the hardware errors, and then they were averaged and brought into table 2.

Although it is necessary to point out, that the greatest variations of characteristic I_s of the unannealed sample of $\text{Fe}_{10}\text{Ni}_{74}\text{Co}_{16}$ film was observed the at angles $\alpha = 90^\circ$ and $\alpha = 270^\circ$.

Conclusion

On the basis of the experiments it is possible to draw the following conclusions:

1. The sample of $\text{Fe}_{10}\text{Ni}_{74}\text{Co}_{16}$ film was not demagnetized after the first vacuum annealing at $T_1 = 400^\circ\text{C}$ during 30 min., because the loops of the magnetic reversal practically did not change in relation to the axis of easy magnetization (AEM) at angle $\alpha = 35^\circ$ (fig. 3, positions a and b , see the 2nd side of cover). This testifies to the fact that the Curie point for the investigated film is above 400°C .

2. After the second vacuum annealing at $T_2 = 600^\circ\text{C}$ during 30 min. the sample of $\text{Fe}_{10}\text{Ni}_{74}\text{Co}_{16}$ film became demagnetized, which was defined by the disappearance of the axis of hard magnetization (AHM) at angle $\alpha = 125^\circ$ (fig. 3, position e , see the 2nd side of cover). In the course of cooling of the sample, the field of the Earth induced anisotropy at angle $\alpha \sim 70^\circ$, which was recorded experimentally. In order to avoid the field anisotropy, the plate should be rotated in the course of cooling.

3. The signal of the spectral ellipsometer I_s reacts to the structure of $\text{Fe}_{10}\text{Ni}_{74}\text{Co}_{16}$ film, which changes in the course of the vacuum annealing. At that, the change of signal I_s on the wavelengths of $\lambda = 450$ nm and $\lambda = 650$ nm is practically twice is more than on the wavelengths of $\lambda = 550$ nm and $\lambda = 750$ nm (see the table).

4. The problem of calibration of the signal of spectral ellipsometer I_s for measurement of the values of the coercive force H_c and fields of anisotropy H_n of the ferromagnetic films requires an additional research.

The work was performed on the equipment of MIET Core facilities center "Microsystem technique and the bases of electronic components", supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (state contract No. 14.594.21.0012, unique identifier of the project RFMEFI59417X0012).

References

1. Tumanski S. *Thin Film Magnetoresistive Sensors*, London, IOP Publishing Ltd, 2001, 441 p.
2. Shemyakin S. Komponentnye AMR-datchiki polozheniya i ugla povorota ot kompanii "Honeywell", *Komponenty i tehnologii*, 2012, no. 11, pp. 24–30 (in Russian).
3. Technical documentation for "System for the study of magneto-optical effect of Kerr BH-PI7892-MI manufactured by NEOARK CORPORATION (Japan)".
4. Aroyres P. N. Theory of the Faraday and Kerr Effects in Ferromagnetics, *Physical Review*, 1955, vol. 97, No 2, pp. 334–345.
5. Technical documentation for "Auto SE Spectral ellipsometer manufactured by Horiba Jobin Yvon (Japan)".
6. Shvets V. A., Spesivtsev E. V., Rychlicki E. V. et al. Ellipsometriya — precisionnyi metod kontrolya tonkoplennokh struktur s subnanometrovym razresheniem, *Rossiyskie nanotekhnologii*, 2009, vol. 4, no. 3–4, pp. 72–84 (in Russian).

А. А. Dedkova, V. Yu. Kireev, N. N. Mazurkin

«ANALYSIS OF THE PARAMETERS OF THE FERROMAGNETIC FILMS BY MEANS
OF THE SYSTEM FOR RESEARCH OF THE MAGNETO-OPTICAL EFFECT OF KERR
AND A SPECTRAL ELLIPSOMETERS»

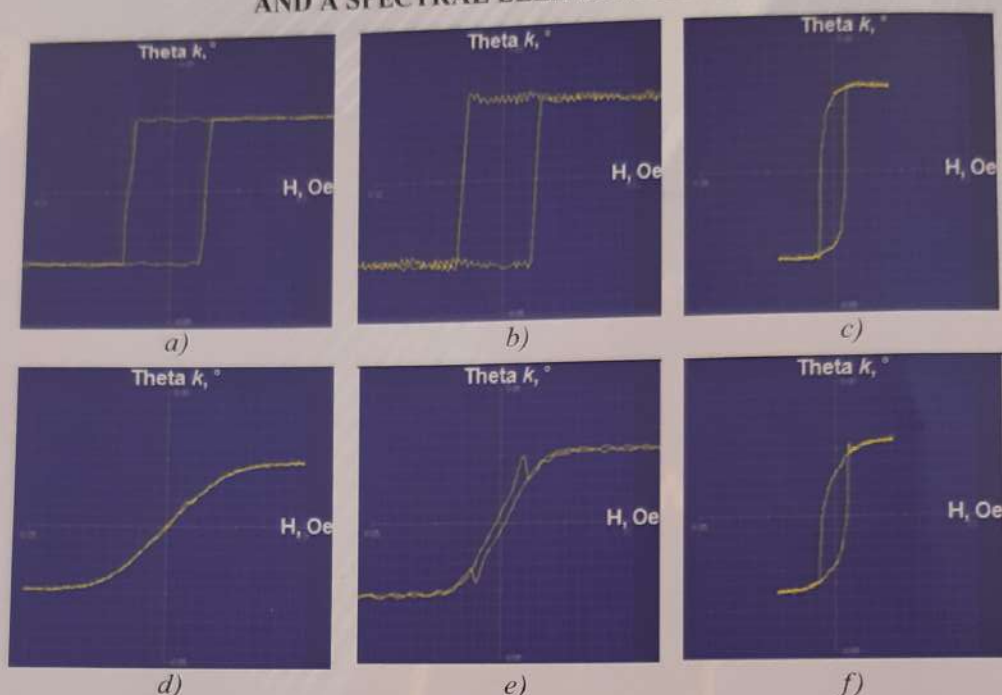


Рис. 3. Петли перемагничивания образцов пленки $\text{Fe}_{10}\text{Ni}_{74}\text{Co}_{16}$ вдоль направления оси легкого намагничивания (ОЛН) при угле $\alpha = 35^\circ$ (a, b, c) и кривые намагничивания вдоль направления оси трудного намагничивания (ОТН) при угле $\alpha = 125^\circ$ (d, e, f), полученные в системе ВН-PI7892-MI:

a, d – образцы пленки после осаждения; b, e – образцы пленки после первого отжига при $T_1 = 400^\circ\text{C}$;
c, f – образцы пленки после второго отжига при $T_2 = 600^\circ\text{C}$

Fig. 3. Loops of magnetization reversal of the samples of $\text{Fe}_{10}\text{Ni}_{74}\text{Co}_{16}$ film along the direction of the axis of easy magnetization (AEM) at angle $\alpha = 35^\circ$ (a, b, c) and the curves of magnetization along the direction of the axis of hard magnetization (AHM) at angle $\alpha = 125^\circ$ (d, e, f), obtained in BH-PI7892-MI system:

a, d – samples of the film after the deposition; b, e – samples of the film after the first annealing at $T_1 = 400^\circ\text{C}$;
c, f – samples of the film after the second annealing at $T_2 = 600^\circ\text{C}$

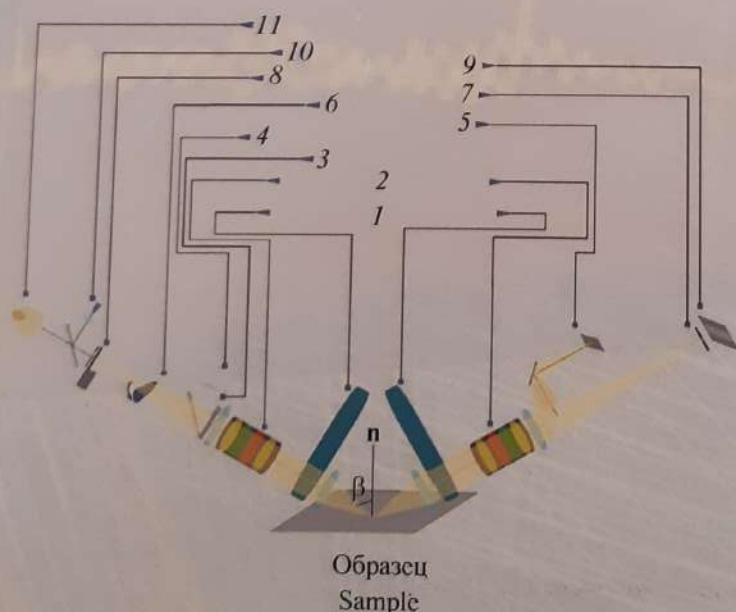


Рис. 4. Оптическая схема спектрального фазового эллипсометра Auto SE:

образец – пленка $\text{Fe}_{10}\text{Ni}_{74}\text{Co}_{16}$; n – нормаль к поверхности пленки; $\beta = 70^\circ$ – угол падения светового пучка на поверхность пленки;

1 – калибровочные колеса; 2 – оптические блоки;
3 – УФ фильтр; 4 – светодиод для освещения образца;
5 – ПЗС камера (камера на основе прибора со связанным зарядом); 6 – затвор; 7 – выбор щели;
8 – автоматизированная апертура; 9 – спектрометр;
10 – голубой светодиод; 11 – галогеновая лампа

Fig. 4. Optical circuit of Auto SE spectral phase ellipsometer: sample - $\text{Fe}_{10}\text{Ni}_{74}\text{Co}_{16}$ film;
n – normal to the surface of the film;
 $\beta = 70^\circ$ – angle of incidence of the light beam on the surface of the film; 1 – calibration wheels;
2 – optical units; 3 – UV filter; 4 – white LED for sample illumination; 5 – CCD(charge coupled device) camera; 6 – shutter; 7 – slit selection;
8 – automated pinhole; 9 – spectrometer;
10 – blue LED; 11 – halogen lamp