

5. В. И. Ерошкин, С. Н. Мальченко, В. В. Болдырев, А. В. Семешко, В. И. Горунюв. Изучение селективности проявления светочувствительных систем на основе хлористого палладия.— «ЖНИПФИК», 1974, т. 19, № 4, с. 258.
6. Г. Беллио. Явление поляризации и скрытое изображение.— В кн.: Физические основы фотографической чувствительности. М., Изд-во иностр. лит., 1953, с. 248.

Поступила в редакцию 27 февраля 1975 г.

УДК 538.61

В. Г. ЖДАНОВ, В. К. МАЛИНОВСКИЙ

(Новосибирск)

### ИЗМЕРЕНИЕ МАГНИТООПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И СЧИТЫВАНИЕ ИНФОРМАЦИИ, ЗАПИСАННОЙ НА ТОНКИЕ МАГНИТНЫЕ ПЛЕНКИ (ТМП)

1. Технологические проблемы создания ТМП с перпендикулярной анизотропией ( $MnVi$ ,  $FePt$ ,  $FePd$ ,  $CoFe_2O_3$ ) в настоящее время практически решены, поэтому наиболее актуальна задача улучшения характеристик считывания записанной на ТМП информации.

Известно [1], что оптические и магнитооптические свойства тонких магнитных пленок с перпендикулярной анизотропией полностью определяются величинами комплексных показателей преломления для право (+) и лево (—) циркулярно-поляризованных волн  $\hat{n}_+ = n_+ + ik_+$  и  $\hat{n}_- = n_- + ik_-$ . Магнитооптические свойства ТМП также характеризуют магнитное круговое двулучепреломление  $\Delta n = n_+ - n_-$  и магнитный круговой дихроизм  $\Delta k = k_+ - k_-$ . Знание комплексных показателей преломления магнитной среды достаточно для полного описания ее голографических характеристик.

Линейно-поляризованный свет при прохождении через намагниченную пленку или при отражении от нее становится эллиптически-поляризованным, и азимут эллипса поляризации поворачивается на угол  $\phi$  относительно поляризации падающего луча. Измерение состояния поляризации отраженного и прошедшего через образец с ТМП света позволяет определить оптические и магнитооптические свойства ТМП.

В традиционных схемах считывания битовой информации вклад в информационный сигнал  $I_s$  дает поворот плоскости поляризации  $\phi$ , а эллиптичность  $\epsilon$  является мешающим фактором, определяющим уровень фона.

Ниже рассмотрено решение задачи о способе визуализации эллиптичности и увеличении полезного сигнала при считывании записанной на ТМП информации.

2. Если на пути эллиптически-поляризованного света поместить компенсатор со сдвигом фаз  $\Delta$  и определенным образом сориентировать ось компенсатора относительно оси эллипса, то после компенсатора можно получить линейно-поляризованный свет, который исключается анализатором.

Решим обратную задачу. Пусть через компенсатор проходит линейно-поляризованный свет с азимутом  $\psi$  относительно оси компенсатора (рис. 1). После компенсатора получим эллиптически-поляризованный свет с параметрами  $\tan \phi = E_y/E_x$  и  $\delta = \delta_y - \delta_x = \Delta$ . Оси  $x$  и  $y$  совпадают с осями компенсатора.

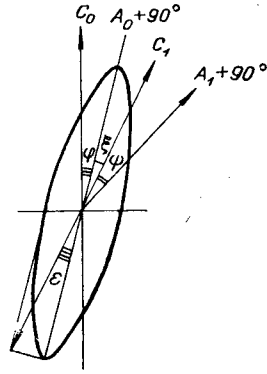


Рис. 1. Прохождение линейно-поляризованного света через компенсатор.

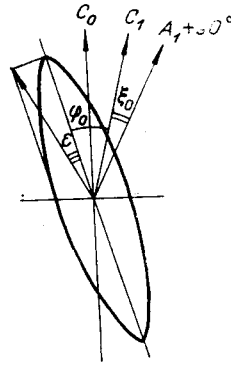


Рис. 2. Прохождение эллиптически-поляризованного света через произвольно ориентированные компенсатор и анализатор.

Большая ось этого эллипса повернута на угол  $\xi$  относительно оси компенсатора, и его эллиптичность  $\varepsilon$ . Причем [2]

$$\operatorname{tg} 2\xi = \operatorname{tg} 2\psi \cos \delta; \quad (1)$$

$$\sin 2\varepsilon = \sin 2\psi \sin \delta. \quad (2)$$

Из решения ясно, под каким углом  $\xi$  необходимо расположить компенсатор со сдвигом фаз  $\Delta$ , чтобы скомпенсировать эллиптичность  $\varepsilon$ . Если  $\Delta = 90^\circ$ , то  $\xi = 0$ ,  $\varepsilon = \psi$ .

Поляризационные элементы — компенсатор, поляризатор и анализатор — жестко связаны с угломерными устройствами. Начальные азимуты поляризатора  $P_0$  и компенсатора  $C_0$  — ось вдоль  $P_0$ , анализатора  $A_0$  — ось перпендикулярна  $P_0$ . Эллиптически-поляризованный свет можно подавить поворотом компенсатора на угол  $C_1 - C_0$  и поворотом анализатора на угол  $A_1 - A_0$ . Из рис. 1 видно, что при этом

$$\xi = (C_1 - C_0) - \varphi; \quad (3)$$

$$\psi = (A_1 - A_0) - (C_1 - C_0). \quad (4)$$

Подставляя (3), (4) в (1) и (2), получим основные соотношения, связывающие магнитооптические параметры  $\varphi$  и  $\varepsilon$  с углами поворота компенсатора и анализатора:

$$\operatorname{tg} 2[(C_1 - C_0) - \varphi] = \operatorname{tg} 2[(A_1 - A_0) - (C_1 - C_0)] \cos \Delta; \quad (5)$$

$$\sin 2\varepsilon = \sin 2[(A_1 - A_0) - (C_1 - C_0)] \sin \Delta. \quad (6)$$

Если компенсатор четвертьволновой, т. е.  $\Delta = 90^\circ$ , то  $C_1 - C_0 = \varphi$ ;  $(A_1 - A_0) - (C_1 - C_0) = \varepsilon$ .

Таким образом, при одном направлении намагничённости в ТМП можно полностью погасить сигнал на детекторе, соответствующим образом повернув компенсатор и анализатор. Перемагничивание ТМП приводит к повороту азимута эллипса относительно  $P_0$  на угол  $-\varphi$ , величина эллиптичности остается такой же  $\varepsilon$ , а направление вращения меняет знак.

3. При перемагничивании ТМП свет, прошедший компенсатор и анализатор, является полезным сигналом  $I_s$ . Свяжем величину  $I_s$  с магнитооптическими параметрами ТМП  $\varphi$  и  $\varepsilon$ . Для этого решим задачу о прохождении эллиптически-поляризованного света через произвольно ориентированные компенсатор и анализатор (рис. 2).

Эллиптически-поляризованный свет в прямоугольной системе координат  $x, y$  может характеризоваться либо параметрами  $\psi$  и  $\delta$  ( $\operatorname{tg} \psi = E_y/E_x$  — отношение проекций вектора  $\mathbf{E}$  на оси  $x$  и  $y$ ;  $\delta = \delta_y - \delta_x$  — сдвиг фаз между  $E_y$  и  $E_x$ ), либо  $\varphi$  и  $\varepsilon$  ( $\varphi$  — азимут эллипса относительно оси координат,  $\operatorname{tg} \varepsilon = b/a$  — отношение полуосей).

Эллипс в системе компенсатора (см. рис. 2) имеет параметры  $\psi_0$  и  $\delta_0$ . Причем [3]

$$\cos 2\psi_0 = \cos 2\varphi_0 \cos 2\varepsilon_0; \quad (7)$$

$$\operatorname{tg} \delta_0 = \operatorname{tg} 2\varepsilon_0 / \sin 2\varphi_0. \quad (8)$$

После прохождения компенсатора формируется новый эллипс с параметрами  $\varphi_1, \varepsilon_1, \psi_1$  и  $\delta_1$ :

$$\operatorname{tg} 2\varphi_1 = \operatorname{tg} 2\psi_1 \cos \delta_1; \quad (9)$$

$$\sin 2\varepsilon_1 = \sin 2\psi_1 \sin \delta_1; \quad (10)$$

$$\psi_1 = \psi_0; \quad (11)$$

$$\delta_1 = \delta_0 + \Delta. \quad (12)$$

В системе анализатора этот же эллипс имеет параметры  $\psi_2$  и  $\delta_2$ :

$$\cos 2\psi_2 = \cos 2(\varphi_1 + \xi_0) \cos 2\varepsilon_1; \quad (13)$$

$$\operatorname{tg} \delta_2 = \operatorname{tg} 2\varepsilon_1 / \sin 2(\varphi_1 + \xi_0). \quad (14)$$

Величина сигнала  $I_s$  пропорциональна  $\sin^2 \psi_2$ . Из решения системы уравнений (7) — (14) можно получить  $\psi_2$  в явном виде. В приближении малых углов и если  $\Delta = 90^\circ$ , решение выглядит довольно просто:

$$I_s \sim \psi_2^2 \approx (\varphi_0^2 + \varepsilon_0^2) + \xi_0^2 + 2\xi_0(\varphi_0^2 + \varepsilon_0^2)^{1/2} \sin\left(\operatorname{arctg} \frac{\varepsilon_0}{\varphi_0}\right). \quad (15)$$

В случае магнитооптического считывания  $\varphi_0 = 2\varphi, \varepsilon_0 = \varepsilon, \xi_0 = \varepsilon$ :

$$I_s \sim \psi_2^2 \approx 4\varphi^2 + 2\varepsilon^2 + 2\varepsilon(4\varphi^2 + \varepsilon^2)^{1/2} \sin\left(\operatorname{arctg} \frac{\varepsilon}{2\varphi}\right). \quad (16)$$

Зависимость величины полезного сигнала  $I_s$  от  $\varphi$  и  $\varepsilon$  такова, что при малых  $\varphi$  и  $\varepsilon$   $I_s \sim 4\varphi^2 + 4\varepsilon^2$ . Эллиптичность  $\varepsilon$  и угол вращения плоскости поляризации  $\varphi$  входят в выражение для полезного сигнала  $I_s$  равноправным образом.

Возможность визуализации эллиптичности обязана противоположным направлениям вращения эллипсов поляризации при перемагничивании.

4. Экспериментальная установка (рис. 3) включает в себя следующие основные элементы: 1 — He-Ne лазер,  $\lambda = 0,63$  мк, 2 — модулятор, 3 — поляризатор (призма Глана), 4 — электромагнит, 5 — образец ТМГ

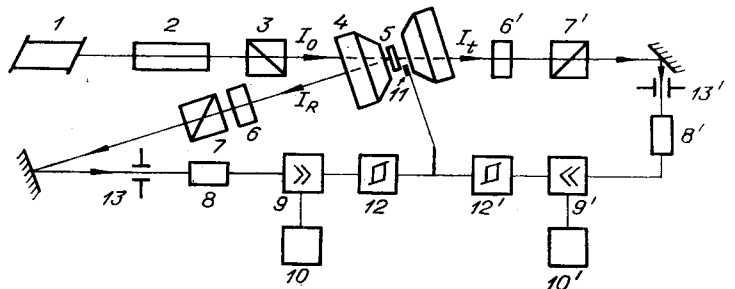


Рис. 3. Схема экспериментальной установки.

и юстировочная система, 6, 6' — четвертьволновые компенсаторы, 7, 7' — анализаторы (призмы Глана), 8, 8' — ФЭУ, 9, 9' — селективные усилители, 10, 10' — осциллографы, 11 — датчик Холла, 12, 12' — двух-координатные самописцы, 13, 13' — диафрагмы.

Поляризационные элементы — призмы и компенсаторы — заключены в угломерные головки с ценой деления 1'. Электромагнит позволяет по-лучать в зазоре 15 мм поля до 20 кЭ.

Первоначально производится юстировка схемы; вместо образца ТМП используется стеклянная плоскопараллельная пластинка. Азимут поляризатора  $P_0$ , оси компенсаторов ориентируются вдоль  $P_0$  и имеют свои азимуты  $C_{k0}$  и  $C_{\phi 0}$ . Анализаторы выставляются перпендикулярно  $P_0$  и исключают свет на ФЭУ, их азимуты соответственно  $A_{k0}$  и  $A_{\phi 0}$  (индекс  $k$  соответствует отраженному свету,  $\phi$  — проходящему). Далее вместо стеклянной пластинки вставляется ТМП и юстировочной системой отраженный поток заводится в центр диафрагмы перед ФЭУ; ТМП намагничивается до насыщения. Замеряются падающий  $I_0$ , отраженный  $I_R$  и прошедший  $I_t$  потоки. Одновременным вращением компенсатора и анализатора устанавливается минимальный уровень сигнала на ФЭУ. Замеряются показания угломеров  $C_1$  и  $A_1$ . После перемагничивания пленки через систему проходит полезный сигнал  $I_s$ , величина которого измеряется.

Вращением компенсатора и анализатора добиваемся минимального сигнала на ФЭУ. Снимаем показания  $C_2$  и  $A_2$ . Если юстировка произведена правильно, то  $(C_2 - C_0) = -(C_1 - C_0)$ ;  $(A_2 - A_0) = -(A_1 - A_0)$ , т. е. показания симметричны относительно нулевых положений. После этого по формулам (5), (6) производится вычисление магнитооптических параметров  $\varphi_k$ ,  $\varepsilon_k$ ,  $\varphi_\phi$ ,  $\varepsilon_\phi$ .

5. Преимущества разработанной схемы считывания перед стандартными отчетливо выявились при исследовании пленок MnBi. Сравним результаты измерений для одной из пленок, параметры которой  $d = 50$  нм,  $\varphi_\phi = 4^\circ 2'$ ,  $\varepsilon_\phi = 2^\circ 25'$ ,  $\varphi_k = 1^\circ 46'$ ,  $\varepsilon_k = 2^\circ 5'$ . Пленка MnBi защищена покрытием из SiO толщиной 720 нм;  $I_0 = 1$ ,  $I_t = 0,038$ ,  $I_R = 0,081$ .

Измерения производились со стороны защитного покрытия. Полезный сигнал  $I'_s$  при обычной методике считывания:

$$I'_{s\phi} \approx I_t (4\varphi_\phi^2 + \varepsilon_\phi^2) = 8,5 \cdot 10^{-4};$$

$$I'_{sk} \approx I_R (4\varphi_k^2 + \varepsilon_k^2) = 4 \cdot 10^{-4}.$$

Остаточный сигнал  $I'_{ост}$ :

$$I'_{ост.\phi} \approx I_t \varepsilon_\phi^2 = 7 \cdot 10^{-5};$$

$$I'_{ост.k} \approx I_R \varepsilon_k^2 = 1,1 \cdot 10^{-4}.$$

При визуализации эллиптичности полезный сигнал  $I_s$ :

$$I_{s\phi} \approx I_t (4\varphi_\phi^2 + 4\varepsilon_\phi^2) = 10^{-3};$$

$$I_{sk} \approx I_R (4\varphi_k^2 + 4\varepsilon_k^2) = 7,3 \cdot 10^{-4}.$$

Остаточный сигнал  $I_{ост}$ :

$$I_{ост.\phi} \approx 0, \quad I_{ост.k} \approx 0.$$

По измеренным величинам  $\varphi_\phi$  и  $\varepsilon_\phi$  можно сделать элементарную оценку  $n_+ - n_-$  и  $\kappa_+ - \kappa_-$  в виде [1]

$$(n_+ - n_-) \pi d / \lambda \approx \varphi_\phi;$$

$$(\kappa_+ - \kappa_-) \pi d / \lambda \approx \varepsilon_\phi.$$

Для пленки, параметры которой приведены выше,  $n_+ - n_- = 0,27$ ;  $\kappa_+ - \kappa_- = 0,16$ ;  $\lambda = 632$  нм.

Величина  $\bar{\kappa}$  может быть определена, если учесть, что коэффициент отражения образца со стороны подложки равен 0,4. Тогда для прошедшего света запишем

$$I_t \sim 0,6(I_0 - I_R) \exp(-\bar{\kappa}4\pi d/\lambda).$$

Откуда  $\bar{\kappa} = 2,7$ , т. е. величина дихроизма составляет  $\approx 6\%$  для пленок MnVi.

Из приведенных экспериментальных данных видно, что предложенная схема позволяет свести к минимуму, определяемому качеством поляризационных элементов, остаточный сигнал при считывании. Возможность визуализации эллиптичности повышает уровень информационного сигнала и позволяет решить задачу оптимизации многослойных структур из тонких диэлектрических слоев и ТМП с целью нахождения максимума функций  $I_R/I_0(\varphi_k^2 + \epsilon_k^2)$  и  $I_t/I_0(\varphi_\Phi^2 + \epsilon_\Phi^2)$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А. В. Соколов. Оптические свойства металлов. М., Физматгиз, 1961.
2. Л. В. Семенов, К. К. Свитаев, А. И. Семенов. Оптический поляризационный метод исследования поверхности полупроводников.— В кн.: Некоторые проблемы физики и химии поверхности полупроводников. Новосибирск, «Наука», 1972.
3. М. М. Горшков. Эллипсометрия. М., «Сов. радио», 1974.

Поступила в редакцию 22 октября 1975 г.

УДК 538.61

В. Г. ЖДАНОВ, Ю. Н. СЛЕСАРЕВ, В. Г. ЧУБАРОВ  
(Новосибирск)

#### ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИЕ КРИВЫЕ ОБРАЗЦОВ MnVi ПЛЕНОК

Одним из применений MnVi пленок является использование их для записи магнитных голограмм. Основная задача при этом — выбор режима записи, т. е. получение максимальной дифракционной эффективности (ДЭ) в восстановленном изображении при заданном уровне нелинейных искажений.

В данной работе проанализирована зависимость дифракционной эффективности от геометрии и условий записи и сделана попытка описания регистрирующих свойств MnVi пленок с помощью частотно-контрастной характеристики и характеристической кривой.

В работе [1] показано, что дифракционная эффективность описывается формулой

$$\eta \approx (4/\pi^2) \exp(-\alpha h) \sin^2(\pi C/D) \sin^2\varphi, \quad (1)$$

где  $h$  — толщина пленки;  $\alpha$  — коэффициент поглощения пленки;  $C$  — ширина переключаемого участка;  $D$  — период решетки;  $\varphi$  — угол фарадеевского вращения.

Дифракционная эффективность определяется шириной участка  $C$ , нагретого выше температуры Кюри, и углом фарадеевского вращения  $\varphi$ , который пропорционален намагниченности в переключенном участке. В свою очередь, намагниченность зависит от величины магнитных по-