

磁光材料磁圆二向色性的测量

刘公强 龚挺童 亮
(上海交通大学应用物理系)

提 要

采用磁光旋转测量装置与1/4波片组合而成的实验装置测量了(BiTm)₃(FeGa)₅O₁₂单晶薄膜样品的磁圆二向色性(椭圆率 $\tanh \theta''$), 以及 θ'' 与磁场强度 H 、样品厚度 $2h$ 的关系。测量密度达 0.01° 。实验证明了磁光旋转的虚部 θ'' 与实部 θ' 一样, 是与磁化强度 M 相联系的, 且随样品厚度线性增加。

一、实验原理

一束线偏振光入射到被磁化的磁光介质(以下简称为介质)中, 其电场强度矢量 \mathbf{E} 可表示成

$$\mathbf{E} = (\mathbf{E}_0/2) \{ \exp[-i(\omega t + \theta_1)] + \exp[i(\omega t + \theta_2)] \}, \quad (1)$$

式中 θ_1, θ_2 分别为右旋和左旋圆偏振光旋转的角度(θ_1, θ_2 符号相反), $(\theta_1 + \theta_2)/2$ 为线偏振光通过介质时产生的磁光旋转。若介质存在吸收, 则 $\theta_1 = \theta'_1 + i\theta''_1, \theta_2 = \theta'_2 + i\theta''_2$, (1)式变为

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_r \exp[-i(\omega t + \theta'_1)] + \mathbf{E}_i \exp[i(\omega t + \theta'_2)], \quad (2)$$

式中 $\mathbf{E}_r = (\mathbf{E}_0/2)e^{\theta''_1}$, $\mathbf{E}_i = (\mathbf{E}_0/2)e^{\theta''_2}$ 。出射后的光强为

$$I = \mathbf{E} \mathbf{E}^* = E_r^2 + E_i^2 + 2E_r E_i \cos 2(\omega t + \theta'), \quad (3)$$

式中 $\theta' = (\theta'_1 + \theta'_2)/2$ 为磁光旋转的实部。(3)式表明电矢量 \mathbf{E} 随 t 而变, 其轨迹为一椭圆, 如图1所示。当 $t = (\theta'/\omega)$ 时*, 由(3)式可知 $E_{\max} = E_r + E_i$, 表示椭圆的长轴。说明当开始时 $t=0$, \mathbf{E} 在入射线偏振光 \mathbf{E}_0 方向(Y 向)上, 经 $t = -\theta/\omega$ 后, \mathbf{E} 转到椭圆长轴方向(Y' 向)上, 转过的角度刚好等于磁光旋转的实部 θ' 。换句话说, 介质存在光吸收和磁圆二向色性情况下, 磁光旋转的实部 θ' 是出射的椭圆偏振光长轴方向与入射线偏振光电矢量 \mathbf{E}_0 方向之间的夹角。当

$$t = -(\theta'/\omega) \pm (\pi/2)$$

时, $E_{\min} = |E_r - E_i|$, 表示椭圆的短轴。

椭圆短轴与长轴之比定义为椭圆率, 其值为

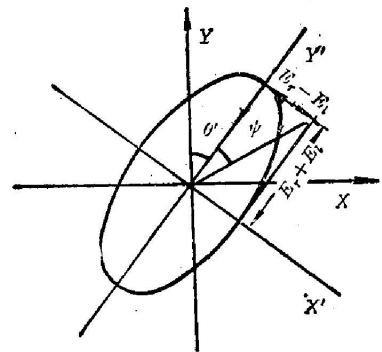


图1 椭圆偏振光示意图
Fig. 1 Schematic diagram of elliptically polarized light

收稿日期: 1984年9月18日; 收到修改稿日期: 1985年1月31日

* 若 θ' 为正值, 则 $t < 0$, 此时可理解为时间超前。

$$\tan \psi = \frac{E_r - E_l}{E_r + E_l} = \frac{e^{\theta_1} - e^{-\theta_2}}{e^{\theta_1} + e^{-\theta_2}} = \tanh \theta'', \quad (4)$$

式中 $\theta'' = (\theta_1' + \theta_2'')/2$ 。当磁圆二向色性较小时, $\psi \cong \theta''^*$ 。由此可见, 只要实验上测得椭圆偏振光的 ψ 角, 即可确定磁光旋转的虚部 θ'' 。

磁圆二向色性的大小与介质的成分、结构、制备工艺、磁特性和其它磁光特性有关, 所以, 精确测定 θ'' 对于研究磁光介质某些物理特性和深入探讨法拉第磁光效应的机制起着重要作用。

二、实验方法

介质磁圆二向色性(椭圆率)的测量装置如图 2 所示。它由磁光(法拉第)旋转测量装置和测角仪 A 同轴旋转的 1/4 波片组合而成, 测量的基本方法是磁光调制倍频法^[1]。

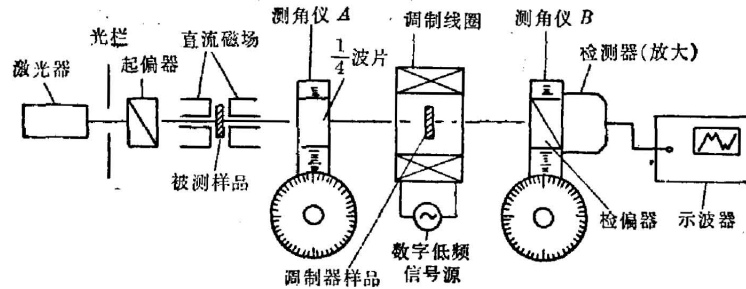


图 2 测量磁圆二向色性的实验装置

Fig. 2 Experimental arrangement used for measuring magnetic circular dichroism

测量方法和步骤如下:

(1) 按图 2 所示, 调好光路, 输入低频调制信号, 旋转测角仪 B 使检偏器与之同轴旋转至示波器上出现倍频信号时止。此时起偏器与检偏器透光轴之间夹角 $\alpha = 90^\circ$ (或 0°), 检偏器(测角仪 B)位置读数为 θ_1 。

(2) 将 1/4 波片置于被测样品和磁光调制器之间的光路中。旋转测角仪 A, 1/4 波片与之同轴旋转, 使示波器上再次出现倍频信号, 此时 1/4 波片的光轴与起偏器透光轴平行, 1/4 波片(测角仪 A)位置读数为 ψ_1 。

(3) 1/4 波片平移出光路, 在被测样品上施加直流磁场。旋转测角仪 B 至位置 θ_2 , 使示波器上第三次出现倍频信号。 $|\theta_2 - \theta_1|$ 即为被测样品的磁光旋转的实部 θ' 。

(4) 再将 1/4 波片平移置入被测样品和磁光调制器之间。旋转测角仪 A, 其方向与步骤(3)中测角仪 B 的旋转方向一致, 使 1/4 波片旋转至位置 ψ_2 , $|\psi_2 - \psi_1| = \theta'$ 。此时 1/4 波片光轴与从被测样品出射的椭圆偏振光的长轴重合, 从 1/4 波片出射的光变成线偏振光。

(5) 旋转测角仪 B 至位置 θ_3 , 使示波器上第四次出现倍频信号。此时检偏器的透光轴与从 1/4 波片出射的线偏振光偏振方向垂直(或平行), $\psi = |\theta_3 - \theta_2|$ 即为被测样品磁圆二向色性的椭圆角。

* 例如 $\theta'' = 5.730^\circ$ (0.1 rad) 时, $\tan \theta'' = 0.1003$, $\tanh \theta'' = 0.1000$, 两者仅差 3%。

(6) 重复上述步骤(3)~(5), 测出不同磁场强度 H 的 ψ 值, 由此得 ψ - H 曲线。

测量过程中需注意如下四点: (1) $\alpha=0^\circ$ 和 90° 时都会出现倍频信号, 测量过程中应注意只能选择一种倍频位置。 $\alpha=90^\circ$ 时输出光强的直流分量很小, 信噪比较 $\alpha=0^\circ$ 位置时高; (2) 当 $1/4$ 波片光轴与起偏器透光轴成 45° 角时, 入射线偏振光经 $1/4$ 波片出射后将变成圆偏振光, 在示波器上亦会出现倍频信号, 在测量过程中不能用这个倍频位置; (3) 每次测量时应严格退去电磁铁剩磁; (4) 采用有吸收和磁圆二向色性的磁光调制样品时, 入射线偏振光经磁光调制器后将变成摆动的椭圆偏振光, 从平均效果看, 与摆动的线偏振光是一样的, 不会影响测量结果。

三、结果和讨论

对液相外延生长在 $\langle 111 \rangle$ - $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ 衬底上的 $(\text{BiTm})_8(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$ * 单晶薄膜样品进行了如下两项测试工作: (1) ψ - H 关系; (2) 样品趋于磁饱和时, 不同样品厚度的 ψ 值。实验结果如图 3、图 4 所示, 激光工作波长 6328 \AA , 磁光调制频率 110 Hz 。

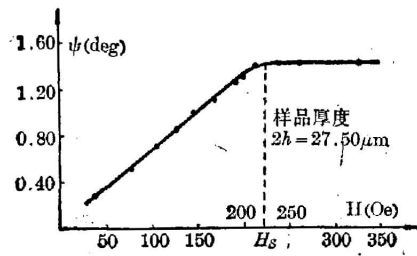


图 3 ψ - H 关系

Fig. 3 Magnetic circular dichroism ellipticity angle ψ vs. applied field H

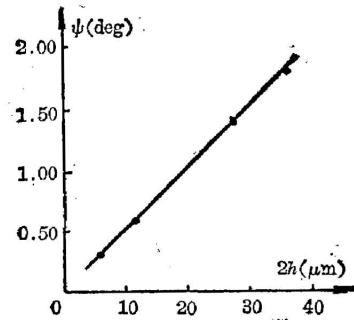


图 4 ψ - $2h$ 关系

Fig. 4 Magnetic circular dichroism ellipticity angle ψ vs. sample thickness $2h$

根据实验结果讨论如下:

(1) $\psi(\theta'')$ 随 H 变化规律与磁化强度 M 、磁光旋转的实部 θ' 随 H 的变化规律基本一致, 且 $H > H_s$ 后趋向饱和。这表明介质中磁光旋转的虚部 θ'' 和实部 θ' 一样, 本质上都是与 M 相联系, 而不是与 H 相联系的;

(2) $\theta''(\psi)$ 随样品厚度 $2h$ (h 为单面薄膜厚度) 线性增加, 这与实部 θ' 随 $2h$ 线性增加的规律一样。对于被测的四个 $(\text{BiTm})_8(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$ 单晶薄膜样品, 其单位厚度的椭圆率为 $0.051^\circ \pm 0.001^\circ / \mu\text{m}$ 。

磁圆二向色性(椭圆率)测量装置的实验误差可分为两部分, 第一部分是磁光旋转测量装置的测量误差, 详细分析可见文献 [1]。第二部分是 $1/4$ 波片引入的测量误差主要有两点: (1) $1/4$ 波片快、慢光轴的交角不严格为 90° , 设为 $90^\circ + \xi$ 。由于起偏器透光轴与 $1/4$ 波

* 上海冶金所二室磁光组提供。

片快轴或慢轴平行时示波器上都会有倍频信号出现, 根据测得的这两个倍频信号位置间的夹角证明, $\xi < 1^\circ$ 。由此得到的椭圆率 $\text{tg } \psi$ 与真值 $\text{tg } \psi'$ 的比值为 $\text{tg } \psi / \text{tg } \psi' \cong 1 - (\xi^2/2)^{[2]}$, 即 $0.9998 < (\text{tg } \psi / \text{tg } \psi') < 1$, 因此, 因 $1/4$ 波片快, 慢光轴间交角不严格为 90° 而引入的误差可以忽略不计。(2) 椭圆偏振光的长轴与 $1/4$ 波片不严格平行, 设交角为 ζ , 则 $(\text{tg } \psi / \text{tg } \psi') \cong 1 - (\zeta^2/2)$ 。通常 $\zeta < 0.5^\circ$, 故 $0.9999 < (\text{tg } \psi / \text{tg } \psi') < 1$ 。显然, 因 $\zeta \neq 0$ 引入的测量误差亦可忽略不计。

经多次测量表明, 用精度为 ± 0.005 的测角仪测量时, 磁圆二向色性(椭圆率)测量装置的测量误差为 0.01° 。

与有关椭圆率测量的文献比较, 本文所述的测量装置和测量方法有如下三个特点: (1) 文献[2]使用两个磁光调制器进行测量, 文献[2, 3]所用的测量方法是消光法。本文只需要一个磁光调制器, 采用磁光调制倍频法测量。用这种方法测量将不受激光幅度变化等因素的影响; (2) 文献[2]测量小的 θ' 、 θ'' 值时精确度较高, θ' 、 θ'' 增大, 精确度明显下降。本文所述的测量, 精确度随 θ' 、 θ'' 值变化较小, 因此, θ' 、 θ'' 增大, 相对误差有所下降; (3) 文献[1, 2]采用顺磁材料或 YIG 作磁光调制器的调制样品, 本文则用掺铋石榴石单晶薄膜样品, 比法拉第旋转 θ_F 较 YIG 大一个数量级左右。用这种薄膜材料做成的新型磁光调制器调制幅度较大, 这是提高磁圆二向色性测量的信噪比的关键因素之。在光波波长 $\lambda \leq 1 \mu\text{m}$ 情况下, 石榴石系列的材料吸收系数较大, 采用这种新型磁光调制器进行测量优越性较为突出。

参 考 文 献

- [1] 刘公强, 刘湘林; 《光学学报》, 1984, 4, No. 7 (Jul), 588.
 [2] S. J. Williamsom, J. M. Weingart; *J. O. S. A.*, 1964, 54, No. 3 (Mar), 337.
 [3] 阿部正纪; 《应用物理》, 1981, 50, No. 7 (Jul), 729.

Measurement of magnetic circular dichroism of magneto-optical materials

LIU GONGQIANG GONG TING AND TONG LIANG

(Department of Applied Physics, Shanghai Jiao-Tong University)

(Received 18 September 1984; revised 31 January 1985)

Abstract

An experimental set-up consisting of a measuring device of magneto-optic rotation and a quarter-wave plate is used to measure the magnetic circular dichroism (ellipticity $\tanh \theta''$) of $(\text{BiTm})_8(\text{FeGa})_8\text{O}_{12}$ single crystal films and the change of θ'' as a function of the magnetic field intensity H and sample thickness $2h$. The measuring accuracy is 0.01° . Experimental results have proved that the imaginary part of magneto-optic rotation is also related to the magnetization intensity M just as the real part, and that it changes linearly with the sample thickness.