

磁光调制和法拉第旋转测量

刘 公 强

(上海交通大学应用物理系)

刘 湘 林

(中国科学院上海冶金研究所)

提 要

本文描述石榴石单晶薄膜磁光调制器的基本特性。文中论述了磁光调制倍频法测量法拉第旋转角 θ 的基本原理和方法, 讨论测试结果, 分析测量误差。指出其优点是用这种新方法测得的 θ 将不受光源幅度变化以及光路中其它元器件不稳定因素的影响, 测量精度达 $\pm 0.020^\circ$ 。

一束线偏振光通过具有磁矩的物质(以下简称为介质)后, 其偏振面相对于入射线偏振光发生了一定的旋转, 这个现象称为法拉第磁光效应, 法拉第旋转角 θ 为^[1]

$$\theta = (\pi z / \lambda) (n_- - n_+) = \theta_F z, \quad (1)$$

式中 λ 为真空中光波的波长, z 为光在介质中传播的距离, n_+ 、 n_- 分别为介质的右旋和左旋圆偏振光的折射率, θ_F 为光传播方向单位长度的旋转角, 称为法拉第旋光率或称比法拉第旋转。

关于法拉第旋转角测量已有一些报道^[2,3], 但在那些测量装置中, 由于激光源、光路中其它元器件的不稳定以及被测样品透射率的大小, 都对测量结果带来一定的误差。本文介绍的磁光调制倍频法测量法拉第旋转角 θ , 将避免这一致命的弱点, 从而提高了测量精度和重复性。

一、原理与方法

根据 Malus 定律, 通过起偏器, 经检偏器输出的光强为

$$I(\alpha) = I_0 \cos^2 \alpha, \quad (2)$$

式中 α 为起偏器和检偏器透光轴之间的夹角, I_0 为 $\alpha=0$ 时的输出光强。在两个偏振器之间插入一个由磁化线圈交变磁化了的磁光石榴石单晶或单晶薄膜样品, 构成一个磁光调制器, 如图 1 所示。设由交变电流产生的交变磁场 H 引起的交变法拉第旋转角为 θ' , 则如图 1 系统的输出光强变为

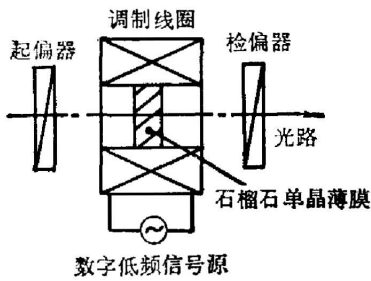


图 1 磁光调制器

Fig. 1 Magneto-optic modulator

$$\begin{aligned} I(\alpha + \theta') &= I_0 \cos^2(\alpha + \theta') \\ &= (I_0/2) [1 + \cos 2(\alpha + \theta')]. \end{aligned} \quad (3)$$

当用正弦波电流输入调制线圈, 则在垂直石榴石单晶薄膜平面的方向上产生一个正弦变化的交变磁场, 由此引起的交变法拉第旋转角 θ' 为

$$\theta' = \theta'_0 \sin \omega t, \quad (4)$$

式中 θ'_0 是交变法拉第旋转角 θ' 的幅度, 称为调制幅度。由上可知, 当 α 一定时, 输出光强 I 仅随 θ' 变化, 而 θ' 是受磁场 H 控制的, 因此 I 随 H 而变化, 这就是光强的磁光调制。显然, 由于交变磁场 H 引起的法拉第旋转使输出光强幅度变化(磁光调制幅度)为

$$I_0 \cos^2(\alpha - \theta'_0) - I_0 \cos^2(\alpha + \theta'_0) = I_0 \sin 2\alpha \sin 2\theta'_0. \quad (5)$$

由(3)、(5)两式可知:

(1) 当 θ'_0 为定值时, 磁光调制幅度随 α 而变化。 $\alpha = 45^\circ$ 时, 磁光调制幅度最大(如图 2(a) 所示)。此时由(3)式得

$$I(45^\circ + \theta') = (I_0/2)(1 - \sin 2\theta'), \quad (6)$$

I 随 θ' 作正弦变化。

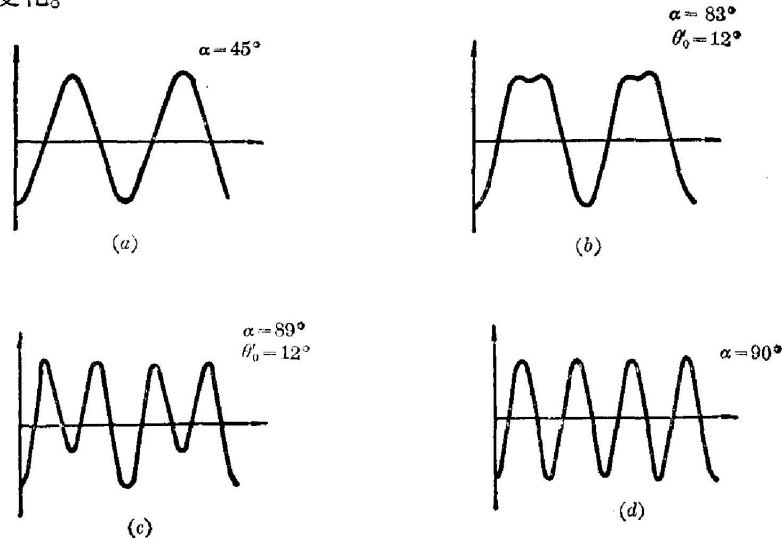


图 2 波形的变化

Fig. 2 Change of wave form

(2) 当 $\alpha = 45^\circ$ 时, $\theta'_0 = 45^\circ$ 磁光调制幅度最大。由(6)式可以看出, 当 $\theta'_0 > 45^\circ$ 时, 调制波形将产生畸变(如图 2(b)、2(c) 所示)。

(3) 当 $\alpha \neq 45^\circ$ 时, I 不仅与 θ' 有关, 而且与 α 的变化也有关, 因此调制波形及其幅度将随起偏器和检偏器相对位置 α 值而变化, $\theta'_0 < 45^\circ$ 也会引起调制波形的畸变。

当 $\alpha = 90^\circ$, 即两偏振器处于正交位置时, 输出光强为

$$I(90^\circ + \theta') = I_0 \cos^2(90^\circ + \theta') = (I_0/2)(1 - \cos 2\theta'). \quad (7)$$

此时, I 是 θ' 的偶函数, 输出光强仅与 θ' 的大小有关, 即与交变磁场 H 的大小有关, 与磁场的方向无关。显然, 此时输出调制信号的频率是输入调制信号频率的一倍(如图 2(d) 所示)。由此可见, 当我们用图 3 所示的测量装置检测倍频信号时, 即可确定两偏振器处于正交(“消光”)位置。

当 $\alpha = 0^\circ$ 时, 输出光强为

$$I(\theta') = I_0 \cos^2 \theta' = (I_0/2)(1 + \cos 2\theta'), \quad (8)$$

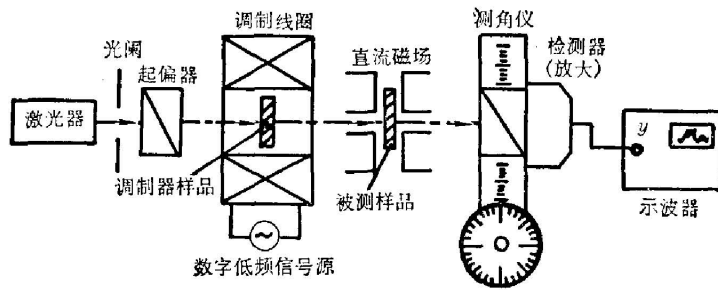


图 3 测量装置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of measurement installation

输出光强 I 的变化情况与 $\alpha=90^\circ$ 时相类似。从(7)、(8)两式可以看出,在 $\alpha=0^\circ$ 、 90° 情况下,磁光调制(倍频信号)幅度随 θ'_0 的增大而增大,而 $\theta'_0=90^\circ$ 时,其幅度最大。

法拉第旋转测量装置如图 3 所示。由激光器出射的激光通过起偏器后成为线偏振光,经磁光调制器调制后进入被测样品,出射后偏振面旋转了 θ 角。被调制和旋转后的线偏振光入射到检测器,转换成交变的光电流,经放大器放大后输入示波器的 y 轴,在示波荧光屏上就显示出被调制的信号。

旋转测角仪,检偏器就与之同轴旋转,当 $\alpha+\theta=90^\circ$ (“消光”位置)时,示波器上再次出现倍频信号。根据被测样品放入前后两次出现倍频信号时的测角仪位置,即可确定被测样品的法拉第旋转角 θ 。这个测量方法我们称之为磁光调制倍频法。

二、实验结果和讨论

1. 磁光调制

将图 3 测量装置中的被测样品取下,即可用作磁光调制器特性的测量。

磁光调制器所用样品为 $[111]\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ 衬底上液相外延的 $(\text{BiPrGdYb})_3(\text{FeAl})_5\text{O}_{12}$ 单晶薄膜^[4],厚度视光源波长等具体情况而定,我们选用的薄膜厚度为 $20\mu\text{m}$ 。调制频率可在 $0\sim 200\text{kHz}$ 范围内任意选择,但需注意随着频率的增加,由于 M 相对于 H 的滞后效应和磁化线圈的阻抗变化,使 θ' 逐步降低,调制幅度相应下降。波长在 $0.55\sim 6\mu\text{m}$ 范围内的光源均可使用,但需配备相应的检测器。

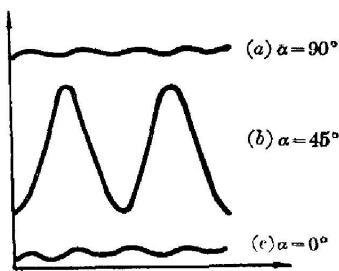


图 4 波形随 α 的变化
Fig. 4 Change of wave form with α

在输入光强及调制磁场幅度不变的情况下,改变 α ,由示波器显示的输出调制波形变化如下:

- (1) $\alpha=45^\circ$ 时,磁光调制幅度最大,如图 4(b) 所示。
- (2) $\alpha\rightarrow 0^\circ$ 或 90° 时,磁光调制幅度逐渐减小,波形变化如图 2 所示。

(3) $\alpha=0^\circ$ 或 90° 时,磁光调制幅度最小,调制频率为输入调制频率的倍频,如图 4(a)、(b) 所示。

由上可见,实验和理论取得了很好的一致。

2. 法拉第旋转测量

将被测样品装入如图 3 所示装置的直流磁场中。被测样品是 $[111]\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{13}$ 衬底上液相外延的 $(\text{BiTm})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$ 单晶薄膜^[5], 厚度为 $4.37\ \mu\text{m}$, 光源是波长为 $6328\ \text{\AA}$ 的 He-Ne 激光。

用磁光调制倍频法测得的 $\theta_F \sim H$ 曲线如图 5 所示 ($\theta_F = \theta/2h$, 其中 h 为单面膜厚度)。在 $H < 82\ \text{Oe}$ 时, 这种磁光石榴石单晶薄膜的 $\theta_F \sim H$ 基本上成线性关系。当 $H > 82\ \text{Oe}$ 时, θ_F 趋近于饱和值, 这与该材料的磁化强度 M 趋近于饱和值 M_s 有关。

用磁光调制倍频法测量法拉第旋转有如下两个特点:

(1) 磁光调制的测量灵敏度高, 调制深度可用磁场灵活控制。磁光调制器结构简单, 操作方便, 与电光调制器等相比, 所需的驱动功率小。

(2) 激光源的不稳定, 调制磁场的变化, 以及光路中其它元器件的不稳定, 主要影响调制信号的幅度变化, 不会影响调制信号的频率。即使磁光调制频率有些变化, 或者光路中有影响调制频率的因素存在, 由于采用观察或测量倍频信号的方法, 都不会影响法拉第旋转角 θ 的测量结果。

产生误差的主要因素:

- (1) 由于测角仪精度限制而引入的读数误差, 其值为 0.005° ;
- (2) 示波器观察倍频信号的方法, 因目视的判别而引入误差。

为了减少上述两个因素引入的误差, 将直流磁场反向后重测一次, 法拉第旋转角取直流磁场正向和反向时测得的测角仪读数的平均值。经多次测量证明, 本装置的测量精度为 0.020° 。

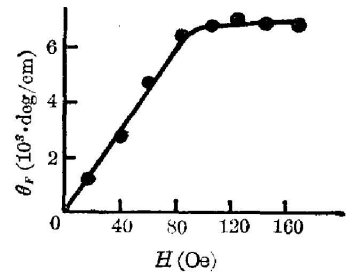


图 5 $\theta_F \sim H$ 曲线
Fig. 5 Specific Faraday rotation θ_F vs applied field H

三、结 论

(1) 掺 Bi 稀土石榴石单晶薄膜磁光调制器结构简单, 驱动功率低, 调制深度随交变磁场连续可调, 调制频率范围较宽, 这是一种有较大应用前景的新型调制器。

(2) $\alpha = 45^\circ$ 、 $\theta'_0 = 45^\circ$ 时, 磁光调制器的磁光调制幅度最大; $\alpha = 0^\circ$ 和 90° 时, 磁光调制幅度最小, 此时输出调制信号频率为输入调制信号的倍频。

(3) 用磁光调制倍频法测量磁光材料的法拉第旋转角 θ , 不受激光源幅度变化、被测样品透射率大小等因素的影响, 用读数精度为 $\pm 0.005^\circ$ 的测角仪测量时, 其精度可达 $\pm 0.020^\circ$, 对于 $\theta \geq 2^\circ$ 的样品, 所得数据的误差 $\leq 1\%$ 。

参 考 文 献

- [1] J. F. Dillon Jr.; *Magnetic Properties of Materials*, (J. Smit, McGraw-Hill, 1971), 152.
- [2] 阿部正纪; *应用物理*, 1981, **50**, No. 7 (Jul), 729.
- [3] H. Hayms, E. Feldtkeller; *Rev. Scient. Instrum.*, 1973, **44**, No. 6 (Jun), 742.
- [4] 刘湘林, 王洪祥; *中国激光*, 1983, **10**, No. 10 (Oct), 723.

[5] 刘湘林等;《应用科学学报》,1984 (待发表)。

Magneto-optic modulation and measurement of Faraday rotation

LIU GONGQIANG

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

LIU XIANGLIN

(Shanghai Institute of Metallurgy, Academia Sinica)

(Received 5 December 1983; revised 7 February 1984)

Abstract

Main properties of magneto-optic modulators with single crystal films of garnets, the basic principle and the experimental installation of the measurement of Faraday rotation angle θ by means of the frequency doubling method of magneto-optic modulation are described. The means and merits of the measurement are presented, the results measured are discussed, and the measuring error is analysed. The Faraday rotation angle θ measured with the new means is not effected by the light intensity change of a laser source and unstable factors of other devices in a optical circuit, so that the measuring precision is $\pm 0.020^\circ$.