

文章编号: 0258-7025(2005)05-0663-05

傅里叶磁光谱仪中的起偏器和检偏器的自动定位及误差分析

刘质斌, 丁剑平*, 籍建亭, 张 荣, 都有为

(南京大学物理系, 江苏 南京 210093)

摘要 在傅里叶变换型磁光谱仪中,起偏器和检偏器的初始方位通常需要在测量前预先定位。提出了一种不需要专门对起偏器和检偏器定位即可完成磁光谱的测量计算的新方法,该方法可以计算出起偏器和检偏器的初始角度值,从而进行自动校准。推导了检偏器旋转角度偏差导致磁光偏转角测量误差的理论公式,并进行了数值分析,给出了测量误差与旋转步数的关系,数值结果表明检偏器角度偏差引起的误差与步数的平方根成反比关系。还给出了一个钴膜样品的磁光克尔角随外加磁场变化的实测曲线。

关键词 测量; 磁学性质; 磁光效应; 傅里叶变换; 误差分析

中图分类号 O436.3 **文献标识码** A

Auto-Alignment of Polarizer and Analyzer and Error Analysis in Fourier Magneto-Optic Spectrometry

LIU Zhi-bin, DING Jian-ping, JI Jian-ting, ZHANG Rong, Du You-wei

(Department of Physics, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210093, China)

Abstract In conventional Fourier-type magneto-optic spectrometer, the starting azimuth angle of polarizer and analyzer should be determined and aligned before the measurements. A novel method for the auto-alignment of polarizer and analyzer is proposed. The magneto-optical rotation angle can be measured and calculated without knowing the starting positions of polarizer and analyzer. The starting positions of polarizer and analyzer are computed during the measurement and can be automatically aligned. A formula of magneto-optical rotation angle error resulting from the positioning deviation of analyzer is derived, which gives a inverse proportional relation between measuring error and the square root of step number of rotating analyzer through a revolution. Numerical simulation is presented to demonstrate the theoretical analysis. As an example, the magneto-optical Kerr angle of Co films as a function of strength of magnetic field is given.

Key words measurement; magnetic property; magneto-optical effect; Fourier transform; error analysis

1 引 言

一束线偏振光入射到处于磁场内的介质中,其反射光或透射光的偏振面可能发生偏转并成为椭圆偏振光,从而产生磁光克尔效应或法拉第效应。从经典电磁理论可知,磁光克尔效应源自两个垂直线偏振分量的反射系数不同,而法拉第效应是由右旋和左旋圆偏转分量透射系数的差异引起的,都与材料的复介电函数张量有关。通过测量旋转角和椭圆偏

率可以计算介电函数张量,不仅可以了解磁光效应的物理机制,而且有助于新型磁光材料的发现和开发应用^[1~4]。

测量磁光谱已有多种方法^[5~11],其中利用检偏器旋转的傅里叶变换光度型磁光测量原理更便于自动测量。在傅里叶变换型磁光测量系统中,旋转检偏器测出相应的光强值,经过傅里叶变换,可以计算待测的磁光参量。但是,通常测量前要求起偏器和

收稿日期: 2004-05-09; 收到修改稿日期: 2004-09-17

基金项目: 国家自然科学基金(60290080)资助项目。

作者简介: 刘质斌(1977—),女,河南信阳人,南京大学物理系光学专业硕士研究生,主要从事磁光学方面的研究。

* 通信联系人。E-mail: jpding@nju.edu.cn

检偏器的初始方位能够预先定位在某个方向上。本文提出了一种新方法,可以在测量中对起偏器和检偏器自动定位和校准,因此起偏器和检偏器的初始方位可以是任意角度,从而为测量带来很大方便。

2 原 理

2.1 磁光谱的傅里叶变换测量

磁光测量系统如图 1 所示,光束经过各主要元件的顺序依次为:光源→单色仪→起偏器→样品→检偏器→探测器。高压球形氙灯经过单色仪产生单色光照射到磁场中的样品上,起偏器和检偏器安装在中空的步进旋转电机上,通过测量检偏器旋转一周时的光强度分布信号来获得磁光偏转角和椭圆偏率^[11]。图示的反射工作方式用于测量克尔效应,该测量系统也可工作在透射方式下用来测量法拉第效应。

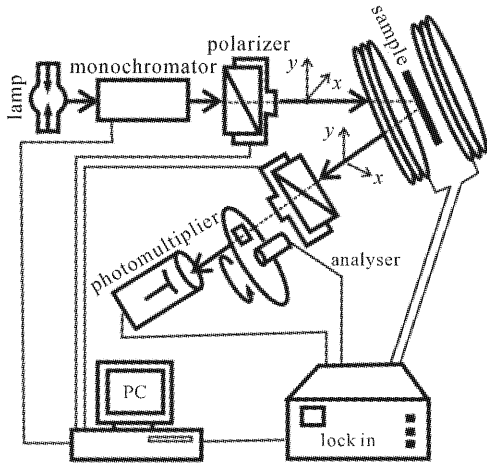


图 1 磁光效应测量系统

Fig. 1 Experimental setup configuration for measuring magneto-optical effect

为简便起见,只以克尔效应测量为例进行讨论,但原理和结论同样适用于法拉第效应的测量。

在图 1 中,如果起偏器产生的沿 x 轴方向振动的线偏振光近似垂直入射到磁场中样品的表面,反射光将成为椭圆偏振光。因受到磁光效应的影响,其椭圆长轴相对于原偏振方向可能旋转一个角度 θ ,该磁光偏转角可以通过旋转检偏器检测出来。从检偏器输出的光强可以表示为

$$I = I_0 + I_1 \cos 2A + I_2 \sin 2A, \quad (1)$$

式中 A 为检偏器方位角, I_0, I_1, I_2 三个傅里叶系数都与反射光的偏振态有关,包含了样品的信息。

如果检偏器等间隔地步进旋转一周,步数为 N ,则(1)式中的傅里叶系数 I_0, I_1 和 I_2 可通过傅里叶变换求得

$$\begin{aligned} I_0 &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_i, \\ I_1 &= \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N I_i \cos 2A_i, \\ I_2 &= \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N I_i \sin 2A_i, \end{aligned} \quad (2)$$

对于磁光偏转角可由傅里叶系数通过下式计算得到

$$\theta = \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{I_2}{I_1} \right), \quad (3)$$

因此测出光强 $I(A_i)$ 即可测定磁光偏转角,但是,上述数学推导成立的前提条件是检偏器的初始角定位在 x 轴方向上。由于克尔角较小,因此检偏器的定位精度要求较高。对于自动测量系统而言,如果每次测量前都要进行人工定位,费时费力,显然是不方便的。

2.2 起偏器和检偏器的自动定位和校准

Kawabata^[12]曾提出一种对傅里叶变换型椭圆偏振仪中的检偏器进行角度校准的方案。本文针对磁光偏转谱的测量,推导出一般的公式,可以在起偏器和检偏器的初始位置未知的情况下,完成磁光谱的自动测量,并且可算出其初始方位,并对其方位进行自动校准。

设起偏器的起偏轴与 x 轴的夹角为 P_0 ,产生的人射线偏振光可分解为 y 方向的振动 \tilde{r}_y 与 x 方向的振动 \tilde{r}_x ,两个分振动在样品上的复反射系数之比 ρ 可表示为

$$\rho = \frac{\tilde{r}_y}{\tilde{r}_x} = \left| \frac{\tilde{r}_y}{\tilde{r}_x} \right| \exp(i\Delta) = \rho_0 \exp(i\Delta), \quad (4)$$

式中 ρ 的模可表示为 $\rho = \tan \varphi$, φ 和 Δ 分别为反射的椭圆偏振光的椭圆偏角和相位角,这样,在(1)式中的三个系数就有了具体含义

$$\begin{cases} I_0 = \eta (\cos^2 P_0 + \rho_0^2 \sin^2 P_0), \\ I_1 = \eta (\cos^2 P_0 - \rho_0^2 \sin^2 P_0), \\ I_2 = \eta \rho_0 \sin 2P_0 \cos \Delta, \end{cases} \quad (5)$$

其中 η 是与入射光强有关的常数。

当检偏器不从 x 轴而是以一个初始方位角 A_0 开始步进旋转时,检偏器后的光强与步进角的关系 $I(A_i)$ 经过推导可重新表示为

$$\begin{aligned} I_a(A_i) &= I_{0a} + I_{1a} \cos 2A_i + I_{2a} \sin 2A_i, \\ &(i = 1, 2, \dots, N) \end{aligned} \quad (6)$$

其中

$$\begin{aligned} I_{0a} &= \eta(\cos^2 P_0 + \rho_0^2 \sin^2 P_0) = I_0, \\ I_{1a} &= \eta[(\cos^2 P_0 - \rho_0^2 \sin^2 P_0) \cos 2A_0 + \rho_0 \sin 2P_0 \cos \Delta \sin 2A_0], \\ I_{2a} &= \eta[-(\cos^2 P_0 - \rho_0^2 \sin^2 P_0) \sin 2A_0 + \rho_0 \sin 2P_0 \cos \Delta \cos 2A_0], \end{aligned} \quad (7)$$

使起偏器旋转 90° , 即 $P_0 \rightarrow P_0 + \pi/2$, 检偏器后的光强与步进角的关系 $I(A_i)$ 成为

$$I_b(A_i) = I_{0b} + I_{1b} \cos 2A_i + I_{2b} \sin 2A_i, \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (8)$$

其中系数从(7)式换成

$$\begin{aligned} I_{0b} &= \eta(c \sin^2 P_0 + \rho_0^2 \cos^2 P_0) = I_0, \\ I_{1b} &= \eta[(\sin^2 P_0 - \rho_0^2 \cos^2 P_0) \cos 2A_0 - \rho_0 \sin 2P_0 \cos \Delta \sin 2A_0], \\ I_{2b} &= \eta[-(\sin^2 P_0 - \rho_0^2 \cos^2 P_0) \sin 2A_0 - \rho_0 \sin 2P_0 \cos \Delta \cos 2A_0], \end{aligned} \quad (9)$$

(6)式和(8)式中的系数可由测得的光强经过(2)式计算获得, 为了进一步确定 P_0 和 A_0 的值, 令

$$\begin{cases} L_1 = I_{1a} \sin 2A_0 + I_{2a} \cos 2A_0, \\ L_2 = I_{1b} \sin 2A_0 + I_{2b} \cos 2A_0, \end{cases} \quad (10)$$

和

$$\begin{cases} J_1 = I_{1a} \cos 2A_0 - I_{2a} \sin 2A_0, \\ J_2 = I_{1b} \cos 2A_0 - I_{2b} \sin 2A_0, \end{cases} \quad (11)$$

联立(7)式, (9)式, (10)式和(11)式, 推导可得

$$A_0 = \frac{1}{2} \arctan\left(-\frac{I_{2a} + I_{2b}}{I_{1a} + I_{1b}}\right), \quad (12)$$

$$P_0 = \arctan \sqrt{\frac{J_2 + I_{0b}}{J_1 + I_{0a}}}, \quad (13)$$

$$\rho_0 = \sqrt{\frac{I_{0a} + I_{0b} - J_1 - J_2}{I_{0a} + I_{0b} + J_1 + J_2}}, \quad (14)$$

$$\cos \Delta = \frac{L_1}{\sqrt{I_{0a}^2 - J_1^2}} = -\frac{L_2}{\sqrt{I_{0b}^2 - J_2^2}}, \quad (15)$$

这样, 就得到了一组实验测量和角度校准的计算公式(12)~(15)式, 在实际测量过程中, 起偏器和检偏器的起始位置(分别用 P_0 和 A_0 表示)通常是未知的, 通过(12)式和(13)式可以确定这两个初始方位, 并且在同一次测量中利用(14)式和(15)式可计算出反射光的偏振状态。在实验中, 测量过程可通过计算机编程控制系统自动完成, 同时也可对起偏器和检偏器进行自动定位和校准。因此需要注意的是, 因为 $\tan(2A_0 + \pi) = \tan 2A_0$, (12)式的反正切得到 A_0 的主值有 $\pi/2$ 的模糊性, 但在实际测量中, 总可以事先确定检偏器的大致方位, 使得 A_0 的值小于 $\pi/2$, 因此在实际测量中不会带来问题, 对 P_0 有类似的结论。

如果磁光测量系统换成透射式, 本征基矢量可能从线基矢量(即两个垂直振动分量)变成圆基矢量(即左旋圆振动分量和右旋圆振动分量), 例如法拉第效应, 但经过相似的理论推导可以证明(12)~(15)式和结论同样成立。

2.3 检偏器步进精度的误差分析

在检偏器步进旋转时存在偏差的情形下, 即 $A'_i = A_i + \alpha_i$ 时(其中 α_i 表示步进旋转电机在目标角度 A_i 处的定位偏差), 从检偏器出射的光强可表示为

$$\begin{aligned} I'(A_i) &= I_0 + I_1 \cos(2A_i + 2\alpha_i) + \\ &I_2 \sin(2A_i + 2\alpha_i) = \\ &I_0 + k_A \cos(2A_i + 2\alpha_i + 2\theta), \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} I'(A_i) &= I_0 + k_A (\cos 2A_i \cos 2\alpha_i \cos 2\theta - \\ &\sin 2A_i \sin 2\alpha_i \cos 2\theta - \\ &\sin 2A_i \cos 2\alpha_i \sin 2\theta - \\ &\cos 2A_i \sin 2\alpha_i \sin 2\theta), \end{aligned} \quad (17)$$

其中 $k_A = \sqrt{I_1^2 + I_2^2}$, θ 为无定位偏差时的磁光偏转角, 由(3)式表示。考虑到步进旋转电机的定位误差通常是一个小量, 可以取一级近似, 则 $\sin \alpha_i \sim \alpha_i$ 和 $\cos \alpha_i \sim 1$, (17)式可以改写成

$$I'(A_i) = I_0 + I'_1 \cos 2A_i + I'_2 \sin 2A_i, \quad (18)$$

其中

$$\begin{cases} I'_1 = k_A (\cos 2\theta - 2\alpha_i \sin 2\theta), \\ I'_2 = -k_A (2\alpha_i \cos 2\theta + \sin 2\theta), \end{cases} \quad (19)$$

磁光偏转角的实际测量值是由(18)式和傅里叶关系计算得到的, 即

$$\begin{cases} I'_1 = \frac{2}{N} \sum I'(A_i) \cos 2A_i, \\ I'_2 = \frac{2}{N} \sum I'(A_i) \sin 2A_i, \\ \tan 2\theta' = I'_2 / I'_1, \end{cases} \quad (20)$$

因此由检偏器定位偏差所导致的磁光偏转角的测量误差为

$$\begin{aligned} \Delta\theta &= \frac{1}{2} (2\theta' - 2\theta) = \\ &\frac{1}{2} [\arctan(I'_2 / I'_1) - \arctan(\tan 2\theta)] = \\ &\frac{1}{2} \arctan\left(\frac{I'_2 - I'_1 \tan 2\theta}{I'_2 \tan 2\theta + I'_1}\right), \end{aligned} \quad (21)$$

将(18),(19)和(20)式代入(21)式,经数学推导可得

$$\Delta\theta = \frac{1}{2} \left[\frac{\sum 2\alpha_i + \beta \sin 4\theta - \gamma \cos 4\theta}{N - \beta \cos 4\theta - \gamma \sin 4\theta} \right], \quad (22)$$

式中 $\beta = \sum 2\alpha_i \sin 4A_i$, $\gamma = \sum 2\alpha_i \cos 4A_i$ 。(22) 式表明测量误差与检偏器旋转一周设定的步进步数 N , 步进定位偏差以及待测的磁光偏转角有关, 并且是 θ 的四倍频周期函数。从下节的数值分析可知, 只要选用合适的步数 N , 由步进定位偏差导致的磁光偏转角误差可以控制在要求的范围内。

3 数值分析与实验结果

为了对误差进行数值分析, 用正态分布随机模型描述检偏器的定位随机偏差, 取其均值为零, 均方差为 σ_A 。假定磁光偏转角为 $\theta = 40'$, 对(22) 式进行数值模拟计算, 得到偏转角误差与步数的关系。图 2 给出了在不同定位均方差情形下, $\Delta\theta$ 与 $1/\sqrt{N}$ 的关系曲线。

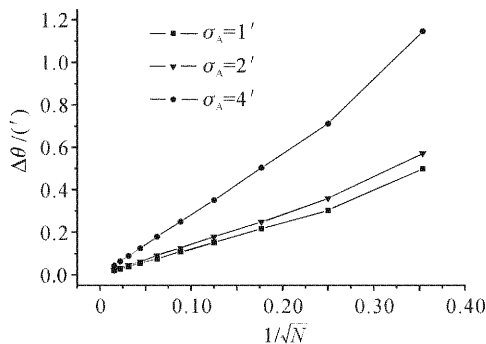


图 2 磁光偏转角测量误差与测量步数的关系

Fig. 2 Plot of relation between error of magneto-optical angle and number of rotation steps

从曲线图可清楚地发现 $\Delta\theta \propto 1/\sqrt{N}$, 即随着步数的增加, 误差减小, 但是测量时间也要相应增加。该结果对实际测量过程中步数 N 的选取有指导意义, 通常要考虑测量时间和精度的折中, 在实验中合理地选择适当的测量步数。

在自行建立的磁光测量系统中, 步进旋转电机采用卓立汉光公司的 RSA100 中空步进马达, 其标称的步进精度为 0.00125° , 可以认为其步进偏差小于 $1'$ 。在这个条件下误差在 100 步时, 小于 $0.1'$, 基本满足磁光偏转角的测量精度要求。因此在实际测量时, 检偏器旋转步数选为 100 即可。应该指出, 对误差分析只考虑了步进电机的定位精度, 实际误差来源还有光源功率的涨落、光电倍增管的暗电流以

及所有信号放大器的非线性响应等^[13]。

作为磁光效应测量的一个演示实验, 图 3 给出的是在载波片上真空溅射 100 nm 厚度 Co 的膜的磁光克尔偏转角与磁场强度的关系, 测量的波长为 550 nm, 检偏器旋转一周取为 100 步。

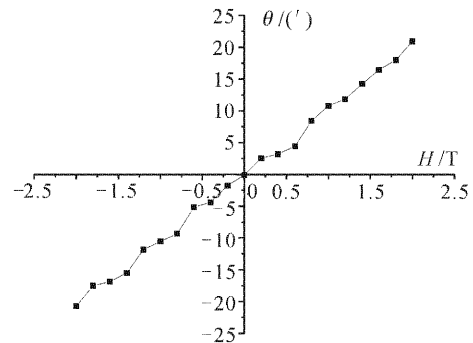


图 3 Co 膜的磁光克尔角与外磁场的关系

Fig. 3 Magneto-optical Kerr angle versus strength of magnetic field

经过多次实验测量发现, 该实验系统对磁光克尔偏转角测量的误差在正负 $1'$ 左右。通过分析还发现, 该实验误差的主要来源是由于电网电压的波动导致所用的氙灯光源功率的涨落。如果配置精密交流稳压电源, 减少测量时间(对于本实验系统即减少测量步数, 但可能增加由步进电机偏差引起的误差), 可以降低光源功率不稳定导致的误差。

4 结 论

提出了检偏器和起偏器的同时自动定位与校准的原理, 实验表明, 该方法是可行的, 并且可方便用于磁光效应的自动测量过程。还提出了检偏器转角偏差的误差分析理论并给出数值模拟结果, 发现在适当的旋转步数下 (>100), 步进电机的转动随机偏差带来的磁光角误差可以降低到实验允许的范围。提出的误差分析方法同样可应用于检偏器旋转型偏振仪的测量过程。

参 考 文 献

- Liu Gongqiang, Le Zhiqiang, Shen Defang. Magneto-optics [M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 2001
刘公强, 乐志强, 沈德芳. 磁光学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2001
- M. Diwekar, V. Kamaev, J. Shi et al.. Optical and magneto-optical studies of two-dimensional metallodielectric photonic crystals on cobalt films[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **84**(16): 3112~3114
- Guo Jihua, Zhu Zhaoming, Deng Weimin. A novel magneto-optic

- modulator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(1): 110~113
郭继华, 朱兆明, 邓为民. 新型磁光调制器[J]. *光学学报*, 2000, **20**(1): 110~113
- 4 Wang Xianying, Zhang Yuepin, Ruan Hao *et al.*. Optimization of magneto-optical disk for blue-lasers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(9): 1090~1094
王现英, 张约品, 阮昊等. 蓝光磁光盘的优化设计与分析[J]. *光学学报*, 2003, **23**(9): 1090~1094
- 5 R. M. Esquerra, R. A. Goldbeck, D. B. Kim-Shapiro *et al.*. Fast time-resolved magnetic optical rotatory dispersion measurements. 1. Mueller analysis of optical and photoselection-induced artifacts[J]. *J. Phys. Chem. A*, 1998, **102**(45): 8740~8748
- 6 J. M. Florczak, E. D. Dahlberg. Detecting two magnetization components by the magneto-optical Kerr effect[J]. *J. Appl. Phys.*, 1990, **67**(12): 7520~7525
- 7 B. Kalska, J. J. Paggel, P. Fumagalli *et al.*. Magnetite particles studied by Mössbauer and magneto-optical Kerr effect [J]. *J. Appl. Phys.*, 2004, **95**(3): 1343~1350
- 8 H. T. Minden. Transverse Kerr magneto-optic measurements with a rotating analyzer ellipsometer[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1992, **63**(6): 3290~3292
- 9 M. Mansuripur, F. Zhou, J. K. Erwin. Measuring the wavelength dependence of magneto-optical Kerr (or Faraday) rotation and ellipticity: a technique[J]. *Appl. Opt.*, 1990, **29**(9): 1308~1312
- 10 Xiao-song Zhu, Hai-bing Zhao, Peng Zhou *et al.*. A method to measure the two-dimensional image of magneto-optical Kerr effect[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2003, **74**(11): 4718~4722
- 11 Qian Dongliang, Chen Liangyao, Zheng Weimin *et al.*. A method measure completely the magneto-optical Kerr and Faraday effects [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(4): 474~480
钱栋梁, 陈良尧, 郑卫民等. 一种完整测量磁光克尔效应和法拉第效应的方法[J]. *光学学报*, 1999, **19**(4): 474~480
- 12 S. Kawabata. Improved measurement method in rotating-analyzer ellipsometry[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1984, **1**(7): 706~710
- 13 L. Y. Chen, David W. Lynch. Scanning ellipsometer by rotating polarizer and analyzer[J]. *Appl. Opt.*, 1987, **26**(24): 5221~5228