

文章编号: 1005-5630(2015)06-0475-04

## 基于锁相技术和磁光调制的旋光角度检测

曹江辉, 贾宏志, 曹君杰, 尤 贝, 王 辽

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

**摘要:** 根据法拉第磁光效应和锁相基本原理, 研究了经磁光调制后的偏振光通过旋光物质后的偏转情况, 分析了透射光信号中的与调制频率相同的基频信号和二倍于调制频率的倍频信号。通过对基频幅值和倍频幅值进行比较, 提出了一种测量旋光角度的计算方法, 根据旋光角和磁偏角两者之间的关系, 提出了一种用标准石英管来标定法拉第磁光效应中磁偏角大小的方法, 并对其进行了实验研究, 证明了这种测量方法的可行性。

**关键词:** 锁相放大器; 磁光调制; 旋光角; 磁偏角

**中图分类号:** TH 741 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1005-5630.2015.06.002

### Optical rotation angle detection based on the lock-in amplifier and magneto-optical modulation

CAO Jianghui, JIA Hongzhi, CAO Junjie, YOU Bei, WANG Liao

(School of Optical-Electrical and Computer Engineering,

University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** According to Faraday effect and lock-in amplification principle, the magneto-optical modulation of polarized light through an optical material occurs after deflection. The output light contains a fundamental signal and a frequency-doubled signal whose frequencies are equal and doubled to modulation frequency respectively. Based on the analyses of amplitudes of fundamental and frequency-doubled signals, we put forward an algorithm for measuring the rotation angle. According to the relation between optical rotation angle and magnetic declination, we put forward a method to calibrate the magnetic declination in the Faraday magneto-optic effect. The feasibility of such measurement approach has been verified by our experiments.

**Keywords:** lock-in amplifier; magneto-optic modulation; optical rotation angle; magnetic declination

## 引 言

旋光现象最早是由科学家 Arago 发现的, 随后 Biot 发现石英能使偏振光的偏振面发生旋转, 其偏转的角度为旋光角<sup>[1]</sup>。旋光测量技术已广泛应用于溶液浓度分析、物质成分分析、纯度分析、分子结构分析等<sup>[2]</sup>。Lin 等利用锁相放大技术测量了小角度时的旋光角<sup>[3]</sup>; Wu 等同样用锁相技术测量了血糖的浓度,

收稿日期: 2015-04-01

作者简介: 曹江辉(1989—), 男, 硕士研究生, 主要从事微弱信号处理方面的研究。E-mail: caojianguichina@163.com

通信作者: 贾宏志(1968—), 男, 教授, 主要从事光纤光栅、光电检测技术方面的研究。E-mail: hzjia@usst.edu.cn

大大减小了实验中环境的影响<sup>[4]</sup>；Côté 等用平衡检测的方法测量了溶液的浓度<sup>[5]</sup>，但是他们都有同样的不足之处——光路结构复杂。随着锁相技术的发展，越来越多的微弱信号可以运用此项技术得到解决，因此，锁相技术成为检测微弱信号的重要手段<sup>[6]</sup>。本文根据法拉第磁光效应，用法拉第线圈对偏振光进行调制<sup>[7]</sup>，省去了复杂的光学结构，减小了其带来的系统误差，提高了系统的紧凑性。

### 1 测量原理

测量系统由光路部分和光电转换部分组成：光路部分主要包括半导体激光器、起偏器、法拉第调制器、待测溶液、检偏器；光电转换部分包括光电二极管和前置放大电路。其光路装置如图 1 所示。

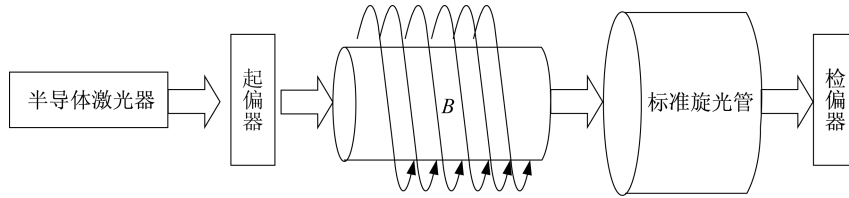


图 1 测量系统的光路装置

Fig. 1 The measurement system of optical devices

由马吕斯(Malus)定律可知：当两偏振器件的透光轴平行时，透过检偏器的光强  $I_0$  最大，当两个偏振器件的透光轴处于正交位置时，如果是理想的偏振器件，则透过检偏器的光强为零，此时检偏器处于消光位置。当起偏器的透光轴与检偏器的透光轴偏离正交位置为  $\theta$  时，透过检偏器的光强  $I$  可表示为

$$I = I_0 \sin^2 \theta \tag{1}$$

偏振光经过法拉第线圈进行磁光调制，通过旋光度为  $\varphi$  的待测溶液后， $\theta$  为

$$\theta = \varphi + VBL \tag{2}$$

式中： $V$  为磁光介质的费尔德常数； $B$  为光传播方向上的磁场强度； $L$  为光程。当给法拉第线圈一个频率为  $\omega$  的交变电压时，其产生的磁场为  $B = B_0 \sin(\omega t)$ ，则由磁场产生的磁偏角  $\phi = VB_0 L$ ，由以上可知

$$\theta = \varphi + \phi \sin(\omega t) \tag{3}$$

将式(3)代入式(1)得

$$I = I_0 \sin^2[\varphi + \phi \sin(\omega t)] \tag{4}$$

通过三角函数关系式，式(4)可写为

$$I = I_0 \frac{1 - \cos[2\varphi + 2\phi \sin(\omega t)]}{2} = \frac{I_0}{2} \{1 - \cos(2\varphi) \cos[2\phi \sin(\omega t)] + \sin(2\varphi) \sin[2\phi \sin(\omega t)]\} \tag{5}$$

又根据近似公式可将式(5)近似为

$$I \approx \frac{I_0}{2} \left\{ 1 - \cos(2\varphi) \left[ 1 - \frac{(2\phi \sin(\omega t))^2}{2} \right] + \sin 2\varphi \sin[2\phi \sin(\omega t)] \right\} = \frac{I_0}{2} \{1 - \cos(2\varphi) + \phi^2 \cos(2\varphi) + 2\phi \sin(2\varphi) \sin(\omega t) - \phi^2 \cos(2\varphi) \cos(2\omega t)\} \tag{6}$$

由式(6)可知，从检偏器出射的光强信号中包含了一个与调制频率相等的基频信号和一个二倍于调制频率的倍频信号。

以上原理分析可得：通过检偏器后的光信号，在经过光电转换电路后变成一个电压输出信号。在同样的实验条件下，调制后的光信号经光电转换、隔离、放大后，得到的电压信号可表示为

$$u = ku_0 \{1 - \cos(2\varphi) + \phi^2 \cos(2\varphi) + 2\phi \sin(2\varphi) \sin(\omega t) - \phi^2 \cos(2\varphi) \cos(2\omega t)\} \tag{7}$$

式中： $k$  为信号的放大倍数； $u_0 = \eta I_0$ ，其中  $\eta$  是光电转化放大倍率， $I_0$  是起偏镜的出射光强； $u$  亦为锁相放大器的待测信号输入。

锁相放大器(基频)的参考输入为

$$u_{r1} = U_1 \sin(\omega t) \tag{8}$$

式中: $U_1$  为基频参考信号的幅值。锁相放大器(倍频)的参考输入为

$$u_{r2} = U_2 \cos(2\omega t) \quad (9)$$

式中: $U_2$  为倍频参考信号的幅值。根据锁相放大器的原理,参考信号为基频时的输出电压  $u_p$  为

$$\begin{aligned} u_p = u \times u_{r1} = ku_o \{ & 1 - \cos(2\varphi) + \phi^2 \cos(2\varphi) + 2\phi \sin(2\varphi) \sin(\omega t) - \\ & \phi^2 \cos(2\varphi) \cos(2\omega t) \} \times U_1 \sin(\omega t) = ku_o \{ \sin(\omega t) - \cos(2\varphi) \sin(\omega t) + \\ & \frac{3}{2} \phi^2 \cos(2\varphi) \sin(\omega t) + \phi \sin(2\varphi) - \phi \sin(2\varphi) \cos(2\omega t) - \frac{1}{2} \phi^2 \cos(2\varphi) \sin(3\omega t) \} \end{aligned} \quad (10)$$

经过 LPF 窄带化作用,锁相放大器(基频)的输出为

$$X_1 = ku_o U_1 \phi \sin(2\varphi) \quad (11)$$

同理,锁相放大器(倍频)的输出为

$$X_2 = -\frac{1}{2} ku_o U_2 \phi^2 \cos(2\varphi) \quad (12)$$

将锁相放大器的两个输出值相比可得

$$\tan(2\varphi) = -\frac{X_1 U_2 \phi}{2 X_2 U_1} \quad (13)$$

则旋光度为

$$\varphi = \frac{\arctan\left(-\frac{X_1 U_2 \phi}{2 X_2 U_1}\right)}{2} \quad (14)$$

用已知标准石英管的值可以对磁偏角  $\phi$  进行标定,通过以上分析可知,求出基频幅值  $X_1$  和倍频幅值  $X_2$  就可以计算出旋光角的大小。

## 2 实验部分

### 2.1 磁偏角标定

若已知旋光角度,根据旋光角度的测量原理即可反过来计算出磁偏角的大小。实验采用波长为 650 nm 的半导体激光器,起偏器和检偏器均采用 Glan-Taylor 棱镜。给法拉第线圈加一个固定的调制频率和电压(90 Hz/220 V),用 4 支角度不同的标准旋光管对磁偏角进行标定,标准旋光管的值分别为  $16.813^\circ$ 、 $10.217^\circ$ 、 $5.165^\circ$  和  $20.085^\circ$ ,并分别编号 1、2、3、4。调节激光器光强大小使锁相放大器的灵敏度在合理的范围内。锁相放大器的设置分别为:时间常数 10~30 ms,信号输入为单端电压交流输入,通道一显示部分为振幅显示,通道二显示部分为相位显示,通过参考通道部分来调节参考信号的幅值,调节参考信号的相位使其与待测信号的相位差为 0。

对 4 支标准旋光管分别进行 10 次测量,得到多次测量结果,并做相关的误差处理<sup>[8]</sup>,根据数据处理结果,标定出磁偏角值为  $1.541^\circ$ ,绝对误差为  $\pm 0.004^\circ$ 。4 支标准旋光管标定出的磁偏角的数据如表 1 所示。

表 1 4 支不同标准旋光管标定的磁偏角

Tab. 1 Magnetic declination calibrated with four different standard optically active tubes

旋光管编号	10 次测量值平均值/ $^\circ$	标定值/ $^\circ$	绝对误差/ $^\circ$
1	1.538	1.541	-0.003
2	1.545		0.004
3	1.544		0.003
4	1.539		-0.002

## 2.2 旋光角的测量

由测量原理可知,只要知道锁相放大器提取出信号中的基频部分和倍频部分以及标定出的磁偏角的大小,根据式(14)即可得出旋光角度的大小。当磁偏角为  $1.541^\circ$  时,旋光物质由 3 支标准旋光管代替,其角度分别为  $17.445^\circ$ 、 $8.699^\circ$ 、 $4.577^\circ$ 。对 3 支旋光管分别测量 10 次,计算出其测量平均值和相对误差,结果如表 2 所示。

表 2 3 支不同标准旋光管测得的旋光角  
Tab. 2 Measurement value of three different standard optically-active tubes

旋光管编号	标准值/ $^\circ$	10 次测量平均值/ $^\circ$	相对误差/%
1	17.445	17.430	-0.086
2	8.699	8.720	0.241
3	4.577	4.620	0.939

## 3 结 论

本文详细介绍了基于锁相放大和磁光调制的旋光角测量方法,搭建了一套测量系统。首先对法拉第磁偏角进行了标定,实验结果显示,磁偏角的绝对误差为  $\pm 0.004^\circ$ ;然后又对旋光角进行了测量,旋光角的平均相对误差为 0.43%,证明了这种测量方法的可行性,同时又说明此方法可以同时用来测量磁偏角和旋光角。

### 参考文献:

- [1] 郁道银,谈恒英. 工程光学[M]. 2 版. 北京:机械工业出版社,2006.
- [2] FERRANTE DO AMARAL C E, WOLF B. Current development in non-invasive glucose monitoring[J]. Medical Engineering & Physics, 2008, 30(5): 541-549.
- [3] LIN J F, WU J S, HUANG C H, et al. An instrument for measuring low optical rotation angle[J]. Optik, 2011, 122(8): 733-738.
- [4] WU C M, TSAI Y C. Angular displacement-enhanced heterodyne polarimeter for the measurement of optically active media[J]. Sensors and Actuators B, 2006, 120(1): 324-328.
- [5] CÔTÉ D, VITKIN I A. Balanced detection for low-noise precision polarimetric measurements of optically active, multiply scattering tissue phantoms[J]. Journal of Biomedical Optics, 2004, 9(1): 213-220.
- [6] 高晋占. 微弱信号检测[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
- [7] 冯林,金涛,贾宏志,等. 新型旋光仪测量原理的研究[J]. 光学仪器, 2009, 31(2): 9-12.
- [8] 费业泰. 误差理论与数据处理[M]. 6 版. 北京:机械工业出版社,2010.

(编辑:刘铁英)