

基于弹光调制的高灵敏旋光测量

李克武 王志斌 陈友华 杨常青 张瑞

High sensitive measurement of optical rotation based on photo-elastic modulation

Li Ke-Wu Wang Zhi-Bin Chen You-Hua Yang Chang-Qing Zhang Rui

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 184206 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.184206

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.184206>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I18>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

负折射平板透镜景深特性仿真分析

[Simulation analysis of the depth of field characteristic of negative refraction flat lens](#)

物理学报.2014, 63(13): 134202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.134202>

光波导微环谐振器用于二进制格式变换研究

[Study of data format transform with optical waveguide resonators](#)

物理学报.2013, 62(19): 194201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.194201>

微生物远红外波段复折射率测定及模型构建

[Determination and model construction of microbes' complex refractive index in far infrared band](#)

物理学报.2013, 62(9): 094218 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.094218>

光束运动特性对焦斑束匀滑效果的影响

[Influence of beam moving characteristics on smoothing effect of focal spot](#)

物理学报.2012, 61(21): 214202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.214202>

圆锥边界附近激光空泡溃灭行为的研究

[Investigation of the collapse of laser-induced bubble near a cone boundary](#)

物理学报.2012, 61(17): 174210 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.174210>

基于弹光调制的高灵敏旋光测量*

李克武¹⁾²⁾³⁾ 王志斌¹⁾³⁾† 陈友华¹⁾²⁾³⁾ 杨常青¹⁾ 张瑞¹⁾³⁾

1)(中北大学电子测试技术重点实验室, 太原 030051)

2)(山西省光电信息与仪器工程技术研究中心, 太原 030051)

3)(中北大学信息与通信工程学院, 太原 030051)

(2015年4月15日收到; 2015年4月30日收到修改稿)

为了实现连续稳定、高速、高精度和高灵敏度的光学旋光测量, 考虑到弹光调制技术具有高的调制频率、调制纯度、调制精度和良好的调制稳定度等应用优势, 设计了一种基于弹光调制的旋光测量新方案. 检测激光经起偏器、测量样品、弹光调制器和检偏器到探测器的光路设计, 使得测量系统选用较少的光学器件, 最大化地降低了光学器件可能引入的测量误差; 起偏器和检偏器偏振轴相对于弹光调制器快轴方向分别取 0° 和 45° 的光学安排, 并选择弹光调制的二倍频信号作为研究对象, 有效避免了弹光调制器剩余双折射对旋光样品测量的影响, 提高了旋光测量精确度; 将探测器输出调制信号的直流和交流分开输出, 并将交流信号进行前置放大处理, 然后再锁相输出, 进一步提高了测量灵敏度. 设计了将激光调制为圆偏光, 然后精确调节起偏器来替代样品的旋光测量验证试验, 确定了系统旋光测量的比例系数, 并且获得旋光测量灵敏度为 3.15×10^{-7} rad, 测量精度优于0.3%. 所以, 本方案实现了较高灵敏度旋光测量, 有望应用于高灵敏旋光测量领域, 并且本方案的实验可为高灵敏旋光测量系统的定标提供参考.

关键词: 光学旋光, 弹光调制, 高灵敏度

PACS: 42.30.Lr, 42.87.-d

DOI: 10.7498/aps.64.184206

1 引言

光通过某些介质时偏振方向发生改变的现象称为光学旋光现象. 如 α -石英、蔗糖溶液、施加磁场的旋光玻璃等所产生的旋光现象都是我们熟知的^[1]. 近年来, 旋光现象及其应用得到广泛研究, 光学旋光的高精度和高灵敏度测量对旋光色散、旋光吸收、旋光二项色性和磁致旋光等方面的研究起到关键作用^[2-4], 特别是基于原子自旋效应研制的新一代磁场和惯性测量装置问世以来, 对被操控量子产生的旋光测量的精度和灵敏度提出了更高的要求^[5,6].

早期用消光法来检测旋光介质产生的旋光角度, 该方法虽然操作简单、成本低, 但其测量灵敏度较低, 并且每次测量需旋转检偏器, 精度无法保证,

也无法实现实时高速的旋光测量. 因此, 研究者们相继提出了声光调制、电光调制、Faraday磁光调制和弹光调制等光学偏振态调制的检测方法^[7], 将光学调制器件引入检测光路, 通过分析调制信号的主要倍频成分幅值的变化来获得光学旋光参量. 鉴于弹光调制器(photo-elastic modulator, PEM)具有宽的光谱窗口、大的通光面积、大的视场角、较好的抗震性能、高的调制频率、高的调制纯度、高的调制精度和较好的调制稳定度^[8], 弹光调制技术在微小旋光和微小光程差测量领域得到了很好的应用.

从20世纪70年代开始, Kemp^[9], Mollenauer等^[10]就致力于弹光调制技术的研制和改进, 并将弹光调制技术引入旋光二项色性的测量研究; 1975年, Modine和Major^[11]首次运用弹光调制器来测量光学旋光; 1998年, Wang^[12]研制了基于弹光调制的旋光测量装置, 实现了灵敏度为 0.001° (约

* 国家国际科技合作专项项目(批准号: 2013DFR1015, 2012DFA10680)和国家自然科学基金(批准号: 61127015)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: wangzhibin@nuc.edu.cn

1.74×10^{-5} rad) 的光学旋光测量; 2010 年, 普林斯顿大学设计研制了基于原子自旋效应的磁场/惯性测量装置, 首次实现了灵敏度为 $0.16 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的磁场高灵敏测量, 该测量装置的核心是基于弹光测量被操控原子自旋效应产生的旋光来实现的^[13]. 显然, 高速、稳定、连续和更高灵敏度的旋光测量是迫切需求的. 因此, 本文从用弹光调制器测量光学旋光的原理出发, 设计了检测激光、起偏器、测量样品、弹光调制器、检偏器到探测器的测量系统, 尽可能地减少系统中不必要的光学器件来降低光学器件引入的测量误差; 通过调配系统中的各光学器

件, 并选择弹光调制的二倍频作为研究对象, 有效避免了弹光调制器剩余双折射对样品旋光测量的影响, 提高了旋光测量精确度.

2 旋光测量原理

本文设计的光学旋光测量系统如图 1 所示. 检测激光经扩束准直后入射, 依次通过起偏器、被测旋光样品、PEM 和检偏器, 最后汇聚到探测器. 起偏器和检偏器的偏振轴方向相对于 PEM 的快轴方向分别取 0° 和 45° .

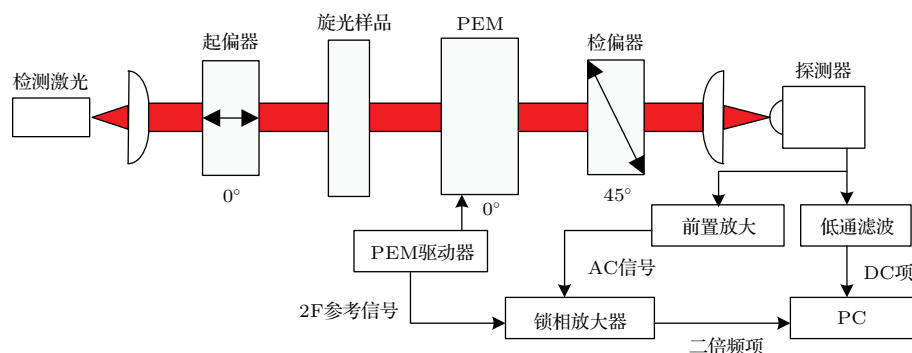


图 1 旋光测量系统示意图

Fig. 1. Scheme of optical rotation measurement system.

上述光学系统运用 Stokes 参量和穆勒矩阵分析较为方便. 设通过起偏器后的入射光 Stokes 参量为

$$S_{\text{in}} = I_0 \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T, \quad (1)$$

其中, I_0 为检测激光通过起偏器后的总强度. 旋光样品、PEM 和检偏器的穆勒矩阵^[14,15]分别表示为

$$M_\theta = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2\theta & -\sin 2\theta & 0 \\ 0 & \sin 2\theta & \cos 2\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$M_{\text{PEM}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos \delta & \sin \delta \\ 0 & 0 & -\sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$M_A = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

(2) 式中, 通常规定样品旋光方向为左旋时, θ 取正值, 反之取负值; (3) 式中, $\delta = \delta_0 \sin \omega t$, δ_0 为 PEM 的调制幅值, ω 为 PEM 的调制圆频率. 特别值得指出的是, PEM 正常工作时, 通光晶体由于支撑固定或加工过程造成的应力不均匀分布不可避免地引入了剩余双折射, 据文献^[16]报道, 剩余双折射导致的光程差一般不超过 1 nm (约 $9.93 \times 10^{-3} \text{ rad}$ 在 632.8 nm), 但对于高精度的旋光测量来说, 剩余双折射可能带来的测量误差是不可忽略的. 将 PEM 剩余双折射的穆勒矩阵^[17]表述为

$$M_\beta = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos^2 2\alpha + \sin^2 2\alpha \cdot \cos \beta & \cos 2\alpha \cdot \sin 2\alpha \cdot (1 - \cos \beta) & -\sin 2\alpha \cdot \sin \beta \\ 0 & \cos 2\alpha \cdot \sin 2\alpha \cdot (1 - \cos \beta) & \sin^2 2\alpha + \cos^2 2\alpha \cdot \cos \beta & \cos 2\alpha \cdot \sin \beta \\ 0 & \sin 2\alpha \cdot \sin \beta & -\cos 2\alpha \cdot \sin \beta & \cos \beta \end{bmatrix}, \quad (5)$$

其中, α 为 PEM 剩余双折射快轴与 PEM 快轴的夹角, β 为剩余双折射幅值, 通常通光面上不同位置的 α 和 β 是不确定的.

暂时忽略检测激光通过系统时的光损失, 则经检偏器出射光 Stokes 参量为

$$S_{\text{out}} = M_A M_\beta M_{\text{PEM}} M_\theta S_{\text{in}}. \quad (6)$$

将上述几式代入 (6) 式, 求解得到探测器探测的光信号为

$$I = \frac{I_0}{2} \left[1 - \cos 2\theta \cdot \frac{\sin 2\alpha}{2} \cdot (\cos \beta - 1) + \sin(2\theta) \cdot (\cos \beta \cdot \cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha) \cdot \cos \delta - \sin(2\theta) \cdot \sin \beta \cdot \cos \alpha \cdot \sin \delta \right]. \quad (7)$$

通常, 对于需高精度测量的旋光样品来说 $\sin 2\theta \cong 2\theta$, 并且对于 PEM 剩余双折射有 $\cos \beta \cong 1$ 和 $\sin \beta \cong \beta$. 将 (7) 式中的 $\cos \delta = \cos(\delta_0 \sin \omega t)$ 和 $\sin \delta = \sin(\delta_0 \sin \omega t)$ 利用第一类贝塞尔级数展开, 可以得到

$$I = \frac{I_0}{2} \left[1 + 2\theta \cdot \left(J_0(\delta_0) + \sum_{2k} 2J_{2k}(\delta_0) \cdot \cos(2k\omega t) \right) - 2\theta \cdot \beta \cdot \cos \alpha \cdot \sum_{2k-1} 2J_{2k-1}(\delta_0) \cdot \sin((2k-1)\omega t) \right], \quad (8)$$

其中, k 为正整数, J_0 为 0 阶贝塞尔级数, J_{2k-1} 为 $2k-1$ 阶贝塞尔级数, J_{2k} 为 $2k$ 阶贝塞尔级数. 据 (8) 式, 旋光角出现在交流调制信号中, 为了调制解调出测量的旋光角, 我们将 PEM 调制幅值设置为 2.405 rad 使得 $J_0 = 0$, 并把探测器输出信号的直流项和交流项分别提取出来. 探测器输出的电信号经低通滤波器输出得到直流项

$$V_{\text{DC}} = K_1 \frac{I_0}{2}, \quad (9)$$

K_1 是与探测器相关的光电转换系数. 对于交流信号, 我们主要选择与 PEM 双折射无关的二倍频信号作为研究对象. 为了进一步提高灵敏度, 我们先将交流信号进行放大, 然后再运用锁相放大技术将二倍频信号项提取出

$$V_{2f} = 2\theta \cdot 2J_2(\delta_0 = 2.405) \cdot K_2 \cdot K_1 \frac{I_0}{2}, \quad (10)$$

K_2 是由前置放大和锁相增益决定的系数. 据 (10) 式可知, 二倍频项与旋光角成正比, 结合直流项 (9) 式, 所以旋光角

$$\theta = \frac{1}{4K_2 \cdot J_2(\delta_0 = 2.405)} \cdot \frac{V_{2f}}{V_{\text{DC}}}. \quad (11)$$

可以看出, 该检测方法不仅有效避免了 PEM 剩余双折射对光学旋光的测量的影响, 同时还消除了检测激光强度波动对检测造成的影响.

3 实验与结果

按图 1 搭建了实验装置, 检测激光选用 632.8 nm 的 He-Ne 激光; 检偏器和起偏器为 Thorlabs 公司生产的格兰泰勒偏振器, 消光比优于 100000 : 1; PEM 是我们自行研制的单个压电石英驱动的长棒状 PEM, 通光晶体为熔融石英, 谐振频率为 49.86 kHz. 探测器选用较为灵敏的硅基雪崩光电探测器, 并设计制作了输出电路和前置放大电路; 锁相放大器选用的是斯坦福研制的 SR830. 直流项信号和锁相放大器输出的二倍频项均由 NI 采集卡输入计算机, 经计算机数据处理输出旋光测量结果.

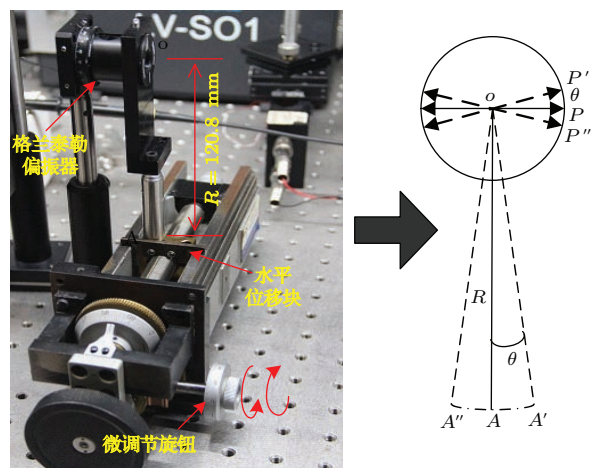


图 2 起偏器微调节系统

Fig. 2. Micro regulation system of polarizer

为了验证该方案的可行性并得出检测灵敏度, 我们精心设计了实验. 首先将扩束准直的激光通过偏振轴方向与快轴方向成 45° 的偏振片和 $\lambda/4$ 波片调节为圆偏振光再入射到测量系统的起偏器. 设计了如图 2 所示的起偏器微调节系统, 装有格兰泰勒偏振器的旋转架通过连杆连接到精密机械微调装置的水平位移块, 偏振器中心 O 到连接端点 A 的距离 $R = 120.8$ mm. 调节精密机械微调装置的微调旋钮, 水平位移块沿水平方向运动, 并推动连杆 A 端使偏振器绕其中心 O 旋转. 其中, 微调旋钮能够调节水平位移块水平位移的分度值为 $0.1 \mu\text{m}$, 调节微调旋钮旋转一周, 水平位移块移动 $10 \mu\text{m}$. 因此, 当 A 端的位移 $S_{AA'}$ 不是很大时, 偏振器的旋转角 θ

满足

$$\theta = \frac{S_{AA'}}{R}. \quad (12)$$

首先将起偏器粗略地调节到 0° , 调节微调旋钮, 观察NI采集到的二倍频项值, 直至输出接近于0; 然后, 每过约3.5 min顺时针调节微调旋钮10格, 水平位移块移动 $1\text{ }\mu\text{m}$, 并使起偏器顺时针旋转, NI采集卡采集到的直流项和二倍频项数据如图3所示.

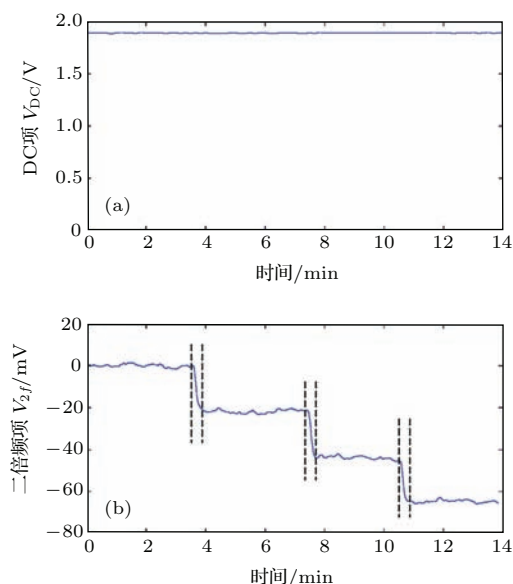


图3 (a) 直流项; (b) 二倍频项

Fig. 3. (a) DC term; (b) second harmonic term.

据图3, 直流项平均值为 $V_{DC} = 1.89\text{ V}$; 从图3(b)可以看出偏振器初始时已调节到非常接近于零位置, 二倍频项锁相输出数据有波动, 且调节过程有延迟. 除去延迟的影响, 将图3(b)数据整理列入表1中.

表1 二倍频项数据

Table 1. Data of second harmonic term.

水平位移块 位移/ μm	二倍频项 平均值 V_{2f}/mV	标准偏差 $\sigma_{V_{2f}}/\text{mV}$
0	-0.07	0.72
1	-22.02	0.82
2	-43.88	0.82
3	-65.85	0.68

将表1中水平位移块移动和二倍频项平均值经最小二乘拟合, 可得水平位移块每移动 $1\text{ }\mu\text{m}$, 二倍频项变化值的平均值为 21.93 mV ; 水平位移

块位移为 $2\text{ }\mu\text{m}$ 时, 偏差最大为 0.07 mV , 对应相对误差为 0.3% . 结合(12)式可知, 水平位移块每移动 $1\text{ }\mu\text{m}$, 偏振器旋转 $8.28 \times 10^{-6}\text{ rad}$, 若将(11)式简化为

$$\theta = K \frac{V_{2f}}{V_{DC}}. \quad (13)$$

因此, 将水平位移块每移动 $1\text{ }\mu\text{m}$, 将二倍频项变化值和直流项的值代入(13)式, 求解得本系统的比例系数 $K = 7.14 \times 10^{-4}\text{ rad}$.

实际上, 0.3% 的相对误差表明了该方案的测量精度, 而二倍频项值的最大标准偏差则代表了该方案的灵敏度. 最大标准偏差对应的旋光角

$$\Delta\theta = K \frac{\max(\sigma_{V_{2f}})}{V_{DC}}. \quad (14)$$

所以, $\Delta\theta = 7.14 \times 10^{-4} \times 0.82 \times 10^{-3} / 1.89 = 3.10 \times 10^{-7}\text{ rad}$ 为该系统能够测量的最小旋光角.

4 讨 论

通过验证试验不仅证明了本方案的可行性, 而且还确定了本系统测量旋光角的比例系数和灵敏度. 因此, 本方案的验证实验能够为高灵敏测旋光系统提供定标参考.

在已报道的其他一些用PEM测旋光的系统中, 有的在测量光路中装配 $\lambda/4$ 波片, 虽然将含有旋光测量的交流信号调节到PEM谐振的奇数倍频上, 能够将锁相降低到一倍频项, 但是 $\lambda/4$ 波片总是存在 $\lambda/300$ — $\lambda/500$ 的延迟量误差, 并且在光学器件调配中也会引入波片快轴的误差, 这些误差都会对旋光测量带来不必要的误差, 所以在超高灵敏度的旋光测量系统中应尽量简化并优选光学器件. 本系统实现的光学旋光测量精度为 0.3% , 事实上该系统的测量误差主要来源于微调装置的机械调节误差和偏振器偏振方向与PEM快轴方向的偏差. 对于无需机械调节的旋光样品, 进一步匹配偏振器方向和PEM快轴方向, 有望进一步提高本方案的旋光测量精度.

此外, 系统的长期稳定性通常决定着系统的测量精度、灵敏度和应用场合. 而本系统的长期稳定性主要受到核心调制器件PEM的制约, 所以稳定PEM驱动电压, 对PEM的温度控制和尽量减小环境噪声等措施有望能够维持系统的长时间稳定工作.

5 结 论

本文提出了一种基于PEM调制的超高灵敏旋光测量方法. 测量系统与已有系统相比采用较少的光学器件, 降低了光学器件可能引入的测量误差; 选择弹光调制的二倍频信号作为研究对象, 有效避免了PEM剩余双折射对样品旋光测量的影响, 提高了旋光测量精确度; 将探测器输出调制信号的直流和交流分开输出, 并将交流信号进行前置放大处理, 然后再锁相输出, 进一步提高了测量灵敏度. 旋光测量验证试验, 确定了本系统旋光测量的比列系数为 $K = 7.14 \times 10^{-4}$ rad, 并且获得旋光测量灵敏度为 $\Delta\theta = 3.10 \times 10^{-7}$ rad, 测量精度优于0.3%. 所以, 本方案实现了较高灵敏度旋光测量, 可为高灵敏旋光测量领域提供参考.

参考文献

- [1] Shi S X, Liu J F, Sun Y L 2013 *Electromagnetic Theory of Light* (Xi'an: Xi'an Electronic and Science University press) p69 (in Chinese) [石顺祥, 刘继芳, 孙艳玲 2013 光的电磁理论 (西安: 西安电子科技大学出版) 第69页]
- [2] Li C S 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 047801 (in Chinese) [李长胜 2015 物理学报 **64** 047801]
- [3] Zhang B, Pan X F, Tao W D 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 054214 (in Chinese) [张斌, 潘雪丰, 陶卫东 2011 物理学报 **60** 054214]
- [4] Zhao Y M, Wang P J, Fang Y, Wu G Z 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 240201 (in Chinese) [赵彦牧, 王培杰, 方炎, 吴国祯 2012 物理学报 **61** 240201]
- [5] Sheng D, Kabcenell A, Romalis M V 2014 *Phys. Rev. Lett.* **113** 163002
- [6] Fang J C, Qin J, Wan S A, Chen Y, Li R J 2013 *Appl. Phys. Lett.* **58** 1512
- [7] Zeng A J, Li F Y, Zhu L L, Huang H J 2011 *Appl. Opt.* **50** 4347
- [8] Wang Z B, Li K W, Zhang R, Wang L F, Wang G L 2015 *Opt. Precision Eng.* **23** 63
- [9] Kemp J C 1969 *J. Opt. Soc. Am.* **59** 950
- [10] Mollenauer L F, Downie D, Engstrom H, Grant W B 1969 *Appl. Opt.* **8** 661
- [11] Modine F A, Major R W 1975 *Appl. Opt.* **14** 761
- [12] Wang B L 1998 *Proc. SPIE* **3535** 294
- [13] Dang H B, Maloof A C, Romalis M V 2010 *Appl. Phys. Lett.* **97** 151110
- [14] Lu Y X, Lü B D 1989 *Matrix Optics* (Dalian: Dalian University of Technology Press) pp356–357 (in Chinese) [卢亚雄, 吕百达 1989 矩阵光学 (大连: 大连理工大学出版社) 第356—357页]
- [15] Wang B L, Theodore C O 1999 *Rev. Sci. Instrum.* **70** 3847
- [16] Wang B L, Emily Hinds, Erica Krivoy 2009 *Proc. SPIE* **7461** 746110
- [17] Liao Y B 2003 *Polarization Optics* (Beijing: Science Press) p246 (in Chinese) [廖延彪 2003 偏振光学 (北京: 科学出版社) 第246页]

High sensitive measurement of optical rotation based on photo-elastic modulation*

Li Ke-Wu¹⁾²⁾³⁾ Wang Zhi-Bin¹⁾³⁾† Chen You-Hua¹⁾²⁾³⁾
Yang Chang-Qing¹⁾ Zhang Rui¹⁾³⁾

1) (Key Laboratory of Electronic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China)

2) (Engineering and Technology Research Center of Shanxi Provincial for Optical-Electric Information and Instrument, Taiyuan 030051, China)

3) (School of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

(Received 15 April 2015; revised manuscript received 30 April 2015)

Abstract

In order to realize the continuous and stable, high speed, high precise and high sensitive measurement of optical rotation, and considering the application advantages of photo-elastic polarization modulation technology with high modulation frequency, high modulation purity, high modulation accuracy and good modulation stability, a new scheme about the measurement of optical rotation based on photo-elastic modulation is presented. Probe laser orderly passes through a polarizer, the rotation sample to be measured, a photo-elastic modulator, and a analyzer, and finally reaches the detector, this system uses less optical devices than any others previously reported, so it considerably reduces the measurement error that may be introduced by the optical devices. In the detecting of light path, the polarization axes of the polarizer and analyzer are respectively adjusted with respect to the photo-elastic modulator's fast axis directions 0° and 45° , the optical arrangements make the rotation angle to be measured appear in the alternating current signal, and the photo-elastic modulator's residual birefringence only appears in the odd harmonics. Consequently, the second harmonic signal of photo-elastic modulation is selected as the object to study, which effectively avoids the influence of residual birefringence of the photo-elastic modulator on optical rotation measurement, and efficiently improves the accuracy of optical rotation measurement. What is more, the detector output signal is separated into two parts, the direct current and alternating current signal. The alternating current signal is amplified, then outputs by a lock-in amplifier, which enhances the measurement sensitivity further. A ingenious verification test experiment is done, firstly, the probe laser is modulated into circularly polarized light, and then precisely rotates the polarizer to replace the optical rotation sample. The results show that the new scheme is feasible, this experiment gives the proportion coefficient of the measurement system, the sensitivity of optical rotation measurement increasing up to 3.15×10^{-7} rad, and the measurement precision exceeding 0.3%. Therefore, in this scheme achieved is a high sensitive and precise measurement of optical rotation, and it is expected to be applied to the high sensitive and precise rotation measurement. The verification test experiment designed by us can also provide a outstanding calibration reference for high sensitive rotation measurement system.

Keywords: optical rotation, photo-elastic modulation, high sensitivity

PACS: 42.30.Lr, 42.87.-d

DOI: 10.7498/aps.64.184206

* Project supported by the International Science and Technology Cooperation Special, China (Grant Nos. 2013DFR1015, 2012DFA10680), and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61127015).

† Corresponding author. E-mail: wangzhibin@nuc.edu.cn