

文章编号: 1005-5630(2015)04-0283-04

基于法拉第调制的线偏振光旋转角检测技术

刘 强¹, 张晓雨¹, 韩思淼², 黄 强², 曾宪金², 刘 超¹

(1. 东北石油大学 电子科学学院, 黑龙江 大庆 163318; 2. 哈尔滨工程大学 理学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 分析了基于法拉第调制的线偏振光旋转角检测技术的基本原理, 证明输出信号基频分量的振幅与偏振面旋转角 θ 成正比, 仿真发现基频分量远小于零频和二倍频分量, 需采用锁相放大技术进行基频信号提取。实验采用 ZF7 玻璃和 TG28 晶体作为旋光介质, 分别制作了标准旋转角产生装置和偏振面调制装置, 并结合锁相放大器搭建偏振光旋转角检测系统。实验结果证明, 当法拉第调制频率为 1.45 kHz、调制幅度为 0.035 rad 时, 该方法可以实现 6.3×10^{-8} rad 的微小偏转角检测。

关键词: 偏转角检测; 法拉第调制; 锁相放大器; TG28 晶体

中图分类号: TH 744 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1005-5630.2015.04.001

Measurement of linearly polarized light rotation based on Faraday modulation

LIU Qiang, ZHANG Xiaoyu, HAN Simiao, HUANG Qiang, ZENG Xianjin, LIU Chao

(1. College of Electronic Science, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China;

2. College of Science, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: The principle of linearly polarized light rotation based on Faraday modulation is analyzed. The results indicated that the output amplitude of fundamental frequency component is proportional to optical rotation θ . But the fundamental frequency component, which is less than zeroth-order and second-order frequency component, need be extracted by lock-in amplification technique. The ZF7 glass and TG28 crystal are used as the standard optical rotation and polarization modulation devices. The measurement system of linearly polarized light rotation is built by a lock-in amplifier. When the modulation frequency is 1.45 kHz and modulation magnitude is 0.035 rad, the experimental results show that the method can examine the angle of 6.3×10^{-8} rad.

Keywords: detection of polarized angle; Faraday modulation; lock-in amplifier; TG28 crystal

引 言

现代光学系统中, 经常将被测量信息转化为光的偏振态变化, 利用此方法可以研究介质的物理、化学性质。光的偏振面旋转角检测技术已经广泛应用于介质质量浓度测量^[1]、光纤电流互感器^[2]、原子磁力

收稿日期: 2014-11-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51474069); 东北石油大学青年科学基金资助项目(ky120227)

作者简介: 刘 强(1980—), 男, 副教授, 主要从事半导体激光器稳频、原子磁力仪方面的研究。E-mail: nepulq@126.com

通信作者: 刘 超(1978—), 男, 教授, 主要从事光学系统设计的研究。E-mail: msm-liu@126.com

仪^[3]、云相态识别^[4]、薄膜制备^[5]以及军事领域^[6]。

目前,常用的线偏振光旋转角检测方法主要包括分光束检测法和法拉第调制技术检测法,分光束检测法由于其光学系统简单,操作方便而被广泛采用,其测量灵敏度可以达到 10^{-6} rad^[7],但却远低于基于法拉第调制技术的旋转角检测方法的测角分辨率^[8]。在高灵敏度的原子磁力仪系统中,需将微弱的磁场信息转化为线偏振光偏振面旋转角度的变化,因此,测角灵敏度直接影响原子磁力仪的灵敏度,为此研究了基于锁相放大器的法拉第调制技术微小偏转角检测方法。

1 法拉第调制技术原理

法拉第调制技术的基本原理如图 1 所示,激光器输出的光经起偏器后变成线偏振光,假设经旋光介质后偏振面旋转 θ 角,偏振面的调制频率为 ω ,调制幅度为 φ_0 ,然后经过法拉第调制线圈,再经检偏器输出。

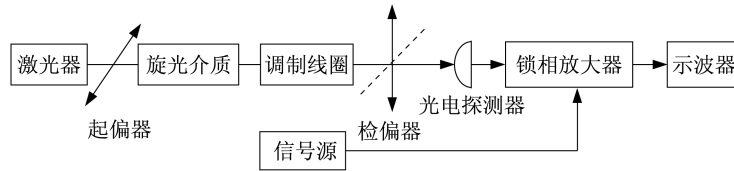


图 1 法拉第调制技术原理图

Fig. 1 The schematic diagram of faraday modulation technique

起偏器和检偏器的偏振方向垂直,根据马吕斯定律,经检偏器输出的光强为

$$I = I_0 \sin^2[\varphi_0 \sin(\omega t) + \theta] \approx I_0 [\varphi_0^2 \frac{1 - \cos(2\omega t)}{2} + 2\varphi_0 \theta \sin(\omega t) + \theta^2] \quad (1)$$

式中 I_0 为从起偏器输出的光强。由式(1)可知,基频分量的振幅与偏振面旋转角 θ 成正比,为进一步分析输出信号特征,采用 MATLAB 对公式(1)进行傅里叶变换,设法拉第调制频率 ω 为 5 kHz,调制幅度 φ_0 为 0.087 rad,旋转角 θ 为 10^{-7} rad,仿真结果如图 2(a)所示,频谱中仅包含零频分量和二倍频分量,未发现基频分量,将基频分量放大 10 000 倍后重新作傅里叶变换,才出现基频分量,如图 2(b)所示。可见基频分量远小于零频和二倍频信号,通常采用锁相放大技术提取基频分量。锁相放大器相当于一个相敏检波器,通过在参考端输入与待测信号同频的信号,检测出与参考信号同频同相的信号和噪声,经过低通滤波器后,可以提取出噪声中的微弱信号。锁相放大器的输出信号正比于基频分量振幅

$$I_\omega \approx 2I_0 \varphi_0 \theta \quad (2)$$

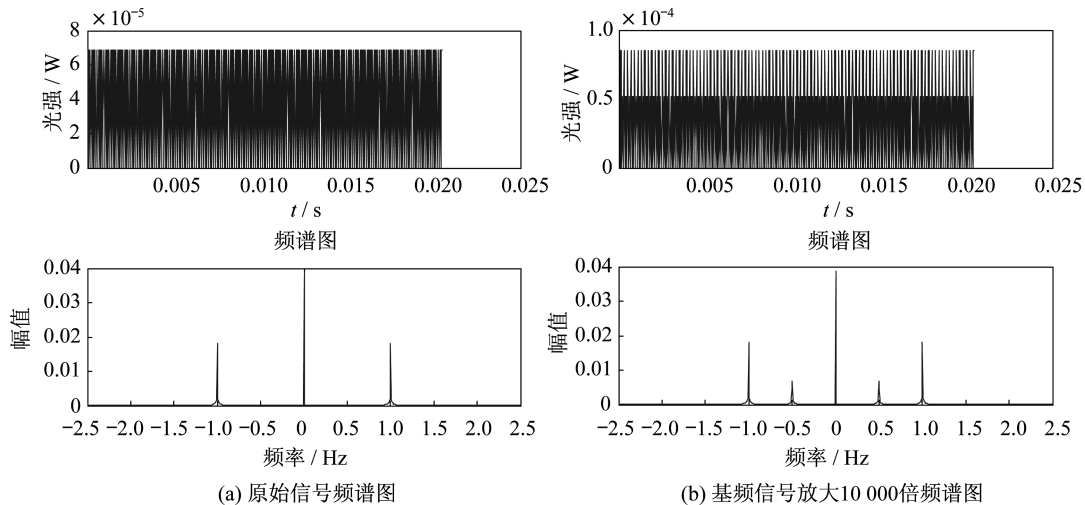


图 2 原始信号频谱图

Fig. 2 The spectra of the original signal

这种锁相放大测量技术的优点是可以在高噪声背景下将对应频率信号检出、放大,可以有效地提高系统测量精度和抗干扰能力。若输入光功率 $I_0=0.1\text{ mW}$,法拉第调制器旋转角调制幅度 $\varphi_0=0.087\text{ rad}$,光电探测器可以响应 1 pW 的光功率,不考虑噪声的影响,理论上可测量的旋光角 $\theta=5.8\times 10^{-8}\text{ rad}$ 。

2 旋光装置设计

为了测试这种测量方法的灵敏度,图1中的旋光介质采用放置在长直螺线管内的 ZF7 玻璃代替,首先对处于磁场中的 ZF7 玻璃产生的偏转角进行标定,实验测量了当激光器波长为 852.3 nm 时 ZF7 玻璃的维尔德常数 V 。测量方法:(1)在 ZF7 晶体前后分别加入格兰泰勒偏振棱镜,使其处于消光位置,出射的光强为零,然后在线圈中通入较大电流使线偏振光偏振面产生旋转,改变了输出光强;(2)通过旋转偏振棱镜的角度使输出光强归零,读取旋转角度值,重复测量可得到电流与旋转角 θ 关系曲线,如图3所示,线性拟合后得到曲线斜率为 $0.8(^{\circ})/\text{A}$,随后采用毫特计测量流过线圈电流和线圈中心磁场 B 的关系曲线如图4所示,斜率为 $14.1\text{ mT}/\text{A}$,由此可知 $\theta/B\approx 0.99\text{ rad}/\text{T}$,根据公式 $V=\theta/BL$,其中 $L=0.1\text{ m}$ 表示 ZF7 玻璃的长度,可知 ZF7 玻璃在波长为 852.3 nm 时的维尔德常数 $V\approx 9.9\text{ rad}/(\text{T}\cdot\text{m})$ 。

为产生微小旋转角,将 ZF7 晶体放入自制线圈匝数较少的长直螺线管中,采用精度为 0.1 nT 的磁通门磁强计测量中心磁场与线圈驱动电流的关系如图5所示,拟合斜率为 $2.23\text{ mT}/\text{mA}$,即 1 mA 的电流变化量将引起磁场变化 2.23 mT 。因此,根据 $\theta=VBL$ 可知,当 $\delta B=2.23\text{ mT}$ 时,偏振光旋转角 $\delta\theta\approx 2.2\times 10^{-6}\text{ rad}$ 。

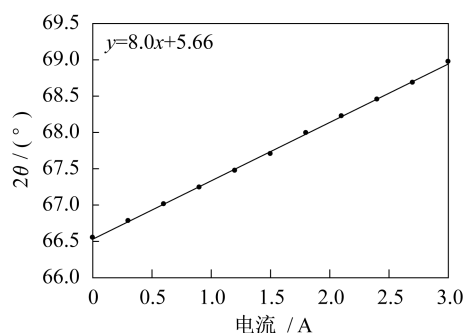


图3 线圈电流和偏转角关系

Fig.3 The relation between coils current and rotation angle

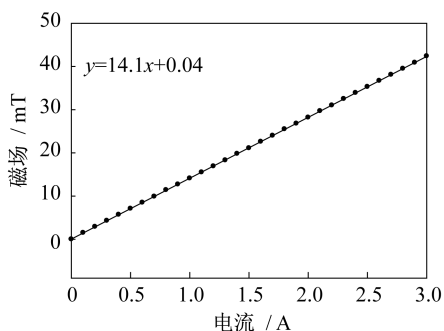


图4 线圈内磁场和电流关系

Fig.4 The relation between magnetic field and coils current

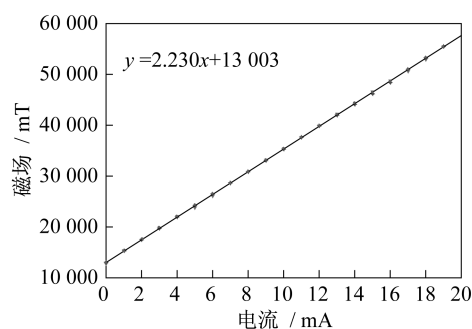


图5 自制线圈内磁场和电流关系

Fig5 The relation between magnetic field and coils current

3 实验测试

在图1所示的法拉第调制技术原理图中,需要对线偏振光的偏振面进行调制,设计偏振面调制幅度为 0.035 rad ,为了达到这一要求,需要采用高维尔德常数晶体和大匝数线圈。我们实际选用了长度为 12 cm 的 TG28 晶体,并采用 852.3 nm 激光器作为光源测量其维尔德常数,测量方法与前面测量 ZF7 玻璃维尔德常数类似,计算出其维尔德常数为 $53.5\text{ rad}/(\text{T}\cdot\text{m})$ 。线圈选用匝数为 5 000 匝,电感值为 581 mH ,电阻值为 $29.6\text{ }\Omega$ 的线圈。

若要产生 0.035 rad 的偏振面旋转角,需要在线圈中产生 6 mT 的磁场,经测量该磁场值下要求线圈驱动电流达到 400 mA 。由于线圈的阻抗 $Z=R+j\omega L$,在调制频率为 1 kHz 的情况下,驱动线圈的功率放大器电压需达到 232 V ,这样的功率放大器在电路上是很难实现的。为了克服此缺点,实际采用电容匹配

的方式驱动线圈,谐振频率为1.45 kHz。

实验测试了锁相放大器的输出电压与产生微小偏转角的线圈驱动电流的关系,如图6所示。为测量其灵敏度和稳定性,进行10次重复测量,我们发现每次测量的数据结果波动比较大,但是将10组数据分别进行线性拟合后,斜率变化较小,平均值为 -0.176 mV/mA 。可知微小偏转角产生装置每增加1 mA驱动电流,即线偏振光偏振面旋转 $2.2\times 10^{-6}\text{ rad}$,输出信号幅度减小176 mV,由于稳态下输出信号的噪声幅度约为5 mV,得到此时系统信噪比为35.2,因此系统可分辨 $6.3\times 10^{-8}\text{ rad}$ 的微小偏转角,说明法拉第调制技术具有极高的角测量灵敏度。

4 结 论

本文介绍了基于法拉第调制技术的线偏振光旋转角检测方法,从理论上证明了该方法的可行性。同时,设计制作了法拉第旋光装置和微小偏转角产生装置,测量了波长为852.3 nm时ZF7玻璃和TG28晶体的维尔德常数,并在此基础上采用锁相放大器进行测试,实验结果证明,当法拉第调制频率为1.45 kHz,调制幅度为0.035 rad,该方法可以实现 $6.3\times 10^{-8}\text{ rad}$ 的微小偏转角检测。

参 考 文 献:

- [1] 陈璐玲,杨晖,郑刚,等. 动态线偏振光散射纳米颗粒粒度测量法的研究与分析[J]. 光学仪器,2010,32(5):1-4.
- [2] 熊显明,方浚丞,王璐. 双光路全光纤电流互感器的研究[J]. 激光与红外,2013,43(5):536-539.
- [3] 刘强,卓艳男,黄强,等. 全光Cs原子磁力仪的温度特性研究[J]. 光学仪器,2014,36(2):152-155.
- [4] 程天海,陈良富,顾行法. 基于多角度偏振特性的云相态识别及验证[J]. 光学学报,2008,28(10):1849-1855.
- [5] 颜飞彪,潘雪丰,陶卫东,等. 手性E型胆甾相液晶薄膜的制备与偏振特性研究[J]. 光学仪器,2005,27(3):75-77.
- [6] 周木春,陈延如,赵琦,等. 激光制导中偏振态动态监测技术研究[J]. 仪器仪表学报,2005,26(8):87-89.
- [7] LIU Q,SUN Y D,HUANG Q,et al. Measurement of linearly polarized light rotation applied in atomic magnetometer[J]. Advanced Materials Research,2013,753-755:2149-2152.
- [8] 徐丽娜. 平面偏振光微小偏转角的精密测量[D]. 武汉:华中科技大学,2006.

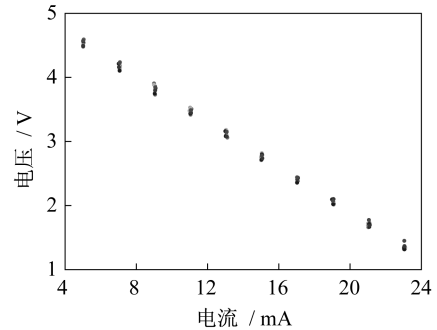


图6 锁相放大器电压值与线圈驱动电流关系
Fig.6 The relation between in the output of the lock-in amplifier and coils current

(编辑:张磊)