

文章编号: 1001-3806(2012)01-0005-03

一种测量液体旋光特性的共光路外差干涉技术

娄本浊

(陕西理工学院 物理系 汉中 723003)

摘要: 为了提高旋光特性检测的灵敏度,设计搭建了一套基于塞曼效应的共光路外差干涉仪应用于旋光液体的旋光特性检测。采用塞曼效应激光器作为光源能发出两束正交线偏光,简化了实验装置的复杂性;且在系统中利用平衡检测与差动放大器,可降低激光器本身与外部环境所造成的大部分噪声,从而提高检测灵敏度。结果表明,对(0~50) mg/dL的低浓度葡萄糖水溶液的旋光特性测量,其检测灵敏度可达 2.3×10^{-5} (°)。这种结构简单的干涉仪可应用于固态、液体或气态旋光物质的旋光特性分析中。

关键词: 激光技术; 外差干涉技术; 旋光特性; 塞曼效应; 共光路; 差动放大器

中图分类号: O436.3 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1001-3806.2012.01.002

A common-path heterodyne interferometer technique for measurement of optical activity of liquid

LOU Ben-zhuo

(Department of Physics, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723003, China)

Abstract: In order to improve the detection sensitivity of optical activity, based on Zeeman effect, a common-path heterodyne interferometer was developed to measure the optical activity of liquid. In this heterodyne interferometer, a pair of correlated orthogonal linear polarized beam is emitted from a Zeeman He-Ne laser, which reduces the complexity of the optical system greatly. A balanced detector and a differential amplifier are integrated into this interferometer so as to reduce the excess noise induced by laser intensity fluctuation and external environments significantly. Thus, a shot-noise-limited detection of this interferometer can be achieved. The optical activity of glucose solution with concentration of (0~50) mg/dL was measured with this common-path heterodyne interferometer and the detection sensitivity was up to 2.3×10^{-5} degree. This simple heterodyne interferometer can be applied in the optical activity analysis of solid-state, liquid-state or gas-liquid material.

Key words: laser technique; heterodyne interferometer; optical activity; Zeeman effect; common-path; differential amplifier

引言

化合物的物化性质是由其结构所决定的,旋光性是其中一个非常重要的物理特性^[1]。分子的旋光性最早由19世纪的PASTEUR发现,它对药理学与代谢途径有非常重要的影响。葡萄糖与氨基酸是人体最重要的两种营养成分,葡萄糖与氨基酸浓度的检测以及未知分子的定性检测都很重要,因此,旋光特性检测成为分析生物体构成成分的一项重要指标^[2]。许多液

体溶液都具有旋光性质:由于液体本身并无对称轴存在,致使光沿任意方向入射时在溶液中每单位光程的旋转角都相等,也就是说旋光性是物质溶解后的单独分子的属性表现,对入射光产生左旋或右旋的倾向。目前发现的大部分新的复杂分子一般都具有旋光性,可通过测量其旋光性进而了解分子结构^[3]。物质的旋光特性是指具有改变原入射线偏光偏振方向的性质,一般最直接的方法就是测量因偏振方向改变而造成的原偏振方向上的振幅强度变化,但这些方法只适用于检测无吸收性的透明旋光物质^[4]。一般的旋光物质都具有吸收特性,可利用光电调变装置结合相位灵敏式检测技术完成对这类旋光物质的旋光度测量,但是某些光电调变装置本身存在双折射效应,大大降低测量精确度^[5]。另外,近似外差干涉的信号处理结合极化调变装置也可实现对旋光溶液的检测,但这种方法比较适合高浓度旋光溶液的测量,而光散射效应

基金项目:陕西省自然科学基金基础研究计划基金资助项目(2010JM5011);陕西省教育厅专项科研计划资助项目(11JK0553)

作者简介:娄本浊(1982-),男,硕士,讲师,主要从事光电检测技术开发与应用的研究。

E-mail: lunwen_8686@163.com

收稿日期:2011-06-27;收到修改稿日期:2011-07-04

却对测量结果有严重的影响^[6]。MITSUI 与 BARRON 等人^[7-8]提出延迟式光学外差干涉技术,利用低同调性光源来减少溶液中的散射效应,但因环境温度改变的影响需加上反馈系统来稳定输出光源,致使对散射性旋光物质的探测灵敏度只在 10^{-5} 数量级上。COTE 等人^[9]在 2004 年提出了一种平衡电路光度法,检测了浓度为 180mg/dL 的血糖,这已经达到了生理溶液的要求。为了克服以上所提及限制,进一步拓展干涉技术在旋光物质中检测^[10-11]的应用范围,作者利用塞曼效应设计了一种共光路光学外差干涉系统,并用其对低浓度葡萄糖溶液的旋光特性进行了测量,以期简化实验系统复杂性、降低实验条件、提高检测灵敏度,更好地应用于临床非侵入性血糖检测中。

1 基本原理

激光在外加磁场作用下会因塞曼效应而造成原子光谱的分离,进而形成两束正交的线偏振光,则这两束线偏光可用 p 光与 s 光来描述,如图 1a 所示,其电场可表示为:

$$\begin{cases} E_p = A_p \cos(\omega_p t + \varphi_p) \\ E_s = A_s \cos(\omega_s t + \varphi_s) \end{cases} \quad (1)$$

式中 E_p 和 E_s 分别为 p 光与 s 光的电场, A_p 和 A_s 分别为 p 光与 s 光的振幅, ω_p 和 ω_s 分别为 p 光与 s 光的频率, φ_p 和 φ_s 分别为 p 光与 s 光的初相位。若 p 光与 s 光所处的几何坐标分别为 x 轴和 y 轴,则它们经过旋光性溶液时由于旋光作用而同时偏转一定角度 θ ,如图 1b 所示。

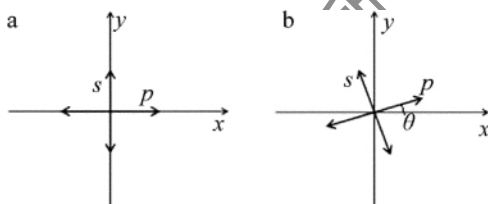


Fig. 1 Deflection of p and s polarized beam before and after passing through the solution
a—before b—after

偏转后 p 光与 s 光在 x 轴上的分量相交产生干涉信号,其电场分量可表示为:

$$\begin{cases} E_{p_x} = A_p \cos(\omega_p t + \varphi_p) \cos\theta \\ E_{s_x} = A_s \cos(\omega_s t + \varphi_s) \sin\theta \end{cases} \quad (2)$$

式中 E_{p_x} 和 E_{s_x} 分别为 p 光与 s 光在 x 轴上的电场分量, θ 为偏转角度。则在 x 轴上所获得的光强度 I_x 可表示为:

$$I_x = [A_p \cos(\omega_p t + \varphi_p) \cos\theta + A_s \cos(\omega_s t + \varphi_s) \sin\theta]^2 \approx A_p^2 \cos^2\theta + A_s^2 \sin^2\theta + 2A_p A_s \sin 2\theta \cos(\Delta\omega t + \Delta\varphi) \quad (3)$$

式中 $\Delta\omega = \omega_p - \omega_s$, $\Delta\varphi = \varphi_p - \varphi_s$ 。同理可得 p 光与

光在 y 轴上的电场分量为:

$$\begin{cases} E_{p_y} = A_p \cos(\omega_p t + \varphi_p) \sin\theta \\ E_{s_y} = A_s \cos(\omega_s t + \varphi_s) \cos\theta \end{cases} \quad (4)$$

同样可得在 y 轴获取的干涉光强度 I_y 为:

$$I_y = [A_p \cos(\omega_p t + \varphi_p) \sin\theta - A_s \cos(\omega_s t + \varphi_s) \cos\theta]^2 \approx A_p^2 \sin^2\theta + A_s^2 \cos^2\theta - 2A_p A_s \sin 2\theta \cos(\Delta\omega t + \Delta\varphi) \quad (5)$$

若利用差动放大器来处理在 x 轴上获取的光信号 I_x 与在 y 轴获取得光信号 I_y ,则在差动放大器中进行相减运算后可得:

$$\Delta I = I_x - I_y = 2A_p A_s \sin(2\theta) \cos(\Delta\omega t + \Delta\varphi) \quad (6)$$

一般 $A_p = A_s = A_0$ 且偏转角度 θ 很小,故上式可改写为:

$$\Delta I = 4A_0 \theta \cos(\Delta\omega t + \Delta\varphi) \quad (7)$$

由此可看出,利用差动放大器进行相减运算不仅可将两束光中所含共同噪声一起消除,也能使信号加倍。由(7)式可得旋光性溶液所造成偏转角度 θ 约为:

$$\theta \approx \frac{\Delta I}{4A^2} \quad (8)$$

2 实验系统

作者设计搭建的实验系统如图 2 所示。由于塞曼激光器能够输出两束正交线偏光,即 p 光和 s 光,选择塞曼效应 He-Ne 激光器作为光源,其波长为 632.8nm,输出功率为 1.0mW,两正交线偏光的差频约为 3.0MHz。在光源后面放置一个半波片,其作用是调整 p 光与 s 光的偏振方向分别平行于系统设置的 x 轴与 y 轴。经调整后的正交线偏光透过旋光溶液后照射到偏振光分束器 (polarizing beam splitter, PBS) 上,且放置时使其坐标轴平行于系统坐标轴。PBS 在系统中的作用是将透过样品产生偏转后的线偏光分别与 x 轴与 y 轴相平行而产生外差干涉信号,这两个外差干涉信号大小相等且一正一负,所产生的外差干涉信号分别被置于 x 轴与 y 轴上的光电探测器接收,然后输入到差动放大器中作相减运算后,信号被放大了两倍。由于 p 光与 s 光在进入 PBS 前所经光学路径相同,故只要将两检测器的距离放置于距离 PBS 相等的位置时,即可消除共光路径上的环境噪声。最后利用数字电压

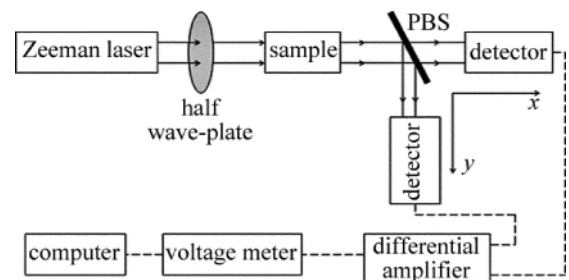


Fig. 2 Structure sketch of a common-path heterodyne interferometer

表获取差动放大器的输出信号并由电脑记录结果。

3 结果与讨论

为了验证作者所提实验方法与系统在旋光溶液的旋光特性检测上的有效性,在此利用上述理论与实验系统在室温下测量了 10 种不同浓度的葡萄糖水溶液的旋光度,并且探讨了实验灵敏度。被测溶液的浓度分别为 5mg/dL, 10mg/dL, 15mg/dL, 20mg/dL, 25mg/dL, 30mg/dL, 35mg/dL, 40mg/dL, 45mg/dL, 50mg/dL, 且其 pH 值均等于 7; 实验结果如图 3 所示。

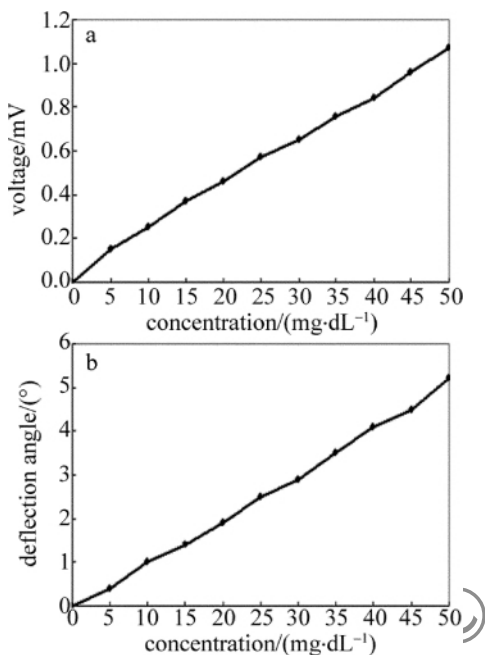


Fig. 3 Measurement results of optical activity of glucose solution with different concentrations
a—direct result of glucose solution, b—relation between deflection angle and concentration

对于低浓度的旋光溶液而言,由于其旋光性很小,故由(7)式可得:

$$\frac{\partial(\Delta I)}{\Delta I} = \frac{\partial\theta}{\theta} \quad (9)$$

由毕奥定律可知,旋光性溶液浓度变化 ΔC 与偏转角度 θ 呈正比关系:

$$\theta = [\alpha]_{T, pH}^{\lambda} \cdot l \cdot \Delta C \quad (10)$$

式中 α 为比旋光度, l 为光在溶液中的光路径长度。结合(9)式和(10)式可得:

$$\frac{\partial\theta}{l} = \frac{\partial(\Delta I)}{\Delta I} [\alpha]_{T, pH}^{\lambda} \cdot \Delta C \quad (11)$$

式中, $[\alpha]_{T, pH}^{\lambda} = [\alpha]_{25^{\circ}C, pH=7}^{632.8} = 45.5$ 。由图 3a 所示结果可知 $\partial(\Delta I) / \Delta I = 1/10$, 其中 $\partial(\Delta I)$ 为图 3a 中 0 ~ 50mg/dL 之间每段测量值的均方根,而在实验中所用样品池尺寸为 1cm × 1cm,且比旋光度为 45.5,所以有:

$$\partial\theta = l \Delta C [\alpha]_{T, pH}^{\lambda} \frac{\partial(\Delta I)}{\Delta I} = 0.01 \times 5 \times 10^{-4} \times 45.5 \times \frac{1}{10} \approx 2.3 \times 10^{-5} (^{\circ}) \quad (12)$$

故在实验中偏转角 θ 的测量灵敏度约为 $2.3 \times 10^{-5} (^{\circ})$ 。

由图 3b 可以看出,基于塞曼效应激光器的外差干涉仪所测得的结果表明,葡萄糖水溶液的浓度变化与毕奥定律基本符合,也就是说当光源波长 λ 、旋光溶液的 pH 值、温度 T 等条件固定时,由旋光特性所造成的偏转角与葡萄糖溶液的浓度成正比。在本实验中,光学系统强度稳定性对共光路平衡检测技术影响较大,故利用 PBS 分出两束振幅相同的光源,因这两束光的来源相同,所以夹杂的扰动情形也就几乎相同,此时利用差动放大器将两束光信号进行相减运算,这样所得光信号就可大幅消除系统中的噪声,同时也增加信号强度。对于低浓度葡萄糖水溶液而言,其旋光特性非常微弱,很容易被噪声掩盖而无法对低浓度旋光溶液进行检测;而利用上述共光路平衡检测技术能大幅度消除噪声,因此,能够提高测量灵敏度而对低浓度旋光溶液进行有效测量。

4 结论

在作者所提出的干涉系统中,塞曼效应激光器所产生的极化光子对具有共光路特性,能够简化整个实验系统的复杂性,而且利用平衡检测方式与差动放大器,能够有效地消除激光本身扰动与外部环境干扰,从而大幅降低系统的噪声,提高整个实验的灵敏度。通过对低浓度葡萄糖水溶液的旋光特性实验测量表明,该系统能准确测量旋光液体形成的微小偏转角,且其检测灵敏度可达 $2.3 \times 10^{-5} (^{\circ})$ 。这种简单的光学干涉仪可广泛应用于固态、液态或气态旋光物质的旋光特性分析中。如果将该干涉仪与法布里-珀罗腔相结合,可使线偏光在法布里-珀罗腔来回穿过旋光样品,进而通过增大旋光度偏转来提高检测灵敏度,所以在以后的研究中,可尝试加入法布里-珀罗腔来构造更高灵敏度的干涉仪用于旋光特性检测中。

参 考 文 献

[1] LI D T, LIU Y H. Study on the distinguished methods the optically active compounds[J]. Theory and Practice of Contemporary Education, 2011, 3(3): 50-51 (in Chinese).
 [2] LIU Z Q. Measuring specific rotation and concentration of the sucrose solution with light intensity equipment[J]. College Physics, 2010, 29(2): 37-42 (in Chinese).
 [3] HUANG S J. Measure to revolve angular at solution of the sugar[J]. Metrology & Measurement Technique, 2009, 36(4): 88-89 (in Chinese).

3 结论

数值分析了初始脉冲、脉冲宽度、增益系数、增益色散等参量变化时对其自相似演化产生的影响。研究表明:对于不同初始脉宽的脉冲,只有满足一定关系时,才能在放大器中实现脉冲自相似的演化;初始脉冲形状不同时,最终都能演化形成抛物线型的自相似脉冲,但是演化的进程不同,高斯型输入脉冲能较快地向自相似抛物线脉冲演变;相同的总增益条件下,增益系数 g 较小时,可以允许脉冲在达到自相似演化后,继续传输较长的距离而不受非线性效应的影响,脉冲的演化结果最好,而大的 g 对产生高功率、宽频谱的自相似脉冲具有较大的优势;增益色散项 igT_2^2 可以对脉冲进行滤波整形,延长了从初始输入脉冲到形成渐近抛物型自相似脉冲的演化过程。自相似抛物脉冲很好地解决了在光纤中传输时脉冲能量受限的问题,研究结果对于设计自相似脉冲放大器具有一定的借鉴价值。

参考文献

- [1] ZHANG Q F, WU L M, LÜ H, *et al.* Influence of stimulated Raman scattering on parabolic pulse propagation in a dispersion decreasing fiber[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(10): 2543-2546(in Chinese).
- [2] HIROOKA T, NAKAZAWA M. Parabolic pulse generation by use of a dispersion-decreasing fiber with normal group-velocity dispersion [J]. *Optics Letters* 2004, 29(5): 498-500.
- [3] HARVEY J D, MÉCHIN D, IM S H. Generation of a 800fs pulse using a self-similar pulse compression technique [C] // Lasers and Electro-optics Society 2005, the 18th Annual Meeting of the IEEE. Sydney, Australia: Lasers and Electro-optics Society 2005: 69-370.
- [4] ZAOUTER Y, PAPADOPOULOS D N, HANNA M. Stretcher-free high energy nonlinear amplification of femtosecond pulses in rod-type fibers [J]. *Optics Letters* 2008, 33(2): 107-109.
- [5] XU Y F, ZHAN Y, ZHENG Y. Analysis of pulse amplification of yttrium-doped fiber amplifiers by means of finite elements [J]. *Laser Technology*, 2008, 32(2): 201-203(in Chinese).
- [6] LIMPERT J, SCHREIBER T, CLAUSNITZER T, *et al.* High-power femtosecond Yb-doped fiber amplifier [J]. *Optics Express*, 2002, 10(14): 628-638.
- [7] MALINOWSKI A, PIPER A, PRICE J H V, *et al.* Ultrashort pulse Yb³⁺ fiber-based laser and amplifier system producing >25W average power [J]. *Optics Letters*, 2004, 29(17): 2073-2075.
- [8] TANYA M M, ETER D M. Self-similar evolution of self-written waveguides [J]. *Optics Letters*, 1998, 23(4): 268-270.
- [9] AGRAWAL G P. *Nonlinear fiber optics* [M]. New York: Academic Press, 1995: 384.
- [10] JIE F, XU W Ch, LI Sh X, *et al.* Dependence constant coefficient of Ginzburg-Landau equation on the analytic of self-similar solution [J]. *Science in China*, 2007, 37(4): 427-433(in Chinese).
- [11] KRUGLOV V I, PEACOCK A C, HARVEY J D, *et al.* Self-similar propagation of parabolic pulses in normal-dispersion fiber amplifiers [J]. *Journal of the Optics Society of America* 2002, B19(3): 461-469.
- [4] YARIY A, LOTSPEICH J F. Coupled-mode analysis of light propagation in optical active crystals [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1982, 72(2): 273-277.
- [5] SILVER M P, BADOZ J, BRIAT B. Chiral reflection from a naturally optically active medium [J]. *Optics Letters*, 1992, 17(12): 886-888.
- [6] CHEUNG C K, NAIK P S, BELONG C D, *et al.* Performance of a slow positron beam using a hybrid lens design [J]. *Applied Surface Science*, 2006, 252(9): 3132-3137.
- [7] MITSUI T, SAKURAI K. Precise measurement of the refractive index and optirotatory power of a suspension by a delayed optical heterodyne technique [J]. *Applied Optics*, 1996, 35(13): 2253-2258.
- [8] BARRON L. *Molecular light scattering and optical activity* [M]. New York: Cambridge University Press, 2004: 386-388.
- [9] COTE D, VITAINI A. Balanced detection for low-noise precision polarimetric measurement of optically active [J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2004, 9(1): 213-220.
- [10] ZHAO P T, LI G H, PENG H D, *et al.* New design of optical activity measurement system [J]. *Laser Technology*, 2005, 29(5): 504-506(in Chinese).
- [11] FENG W W, SONG L K, CHEN L G. The study of the relation between circular polarized light's refractive rate and wavelength [J]. *Laser Technology*, 2004, 28(6): 639-644(in Chinese).

(上接第7页)