

文章编号: 0253-2239(2009)08-2221-04

磁致旋光增强效应与微量样品旋光检测方法

梁忠诚 赵 瑞

(南京邮电大学光电工程学院微流控光学技术研究中心, 江苏 南京 210003)

摘要 微流控光学检测系统的微型化和集成化是微流控技术的发展趋势, 微量液体物质的旋光检测也是微流控光学技术的重要研究课题之一。分析了内含磁致旋光介质的旋光反射腔的偏光特性, 理论预言这种旋光反射腔具有旋光增强效应, 在此基础上提出了微量样品的旋光增强检测方法和器件设计原理。研究表明, 该方法可以在小光程限制条件下显著提高磁旋光介质的检测灵敏度。在不考虑样品吸收的情况下, 旋光增强法与普通消光法的检测灵敏度之比的极限约为 78.5。该方法可以应用于微流控系统的旋光检测以及实现磁旋光仪器的小型化和微型化。

关键词 微流控光学技术; 法拉第旋光效应; 磁旋光增强; 微小旋光角检测

中图分类号 O436.4 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20092908.2221

Effect of Magneto-Optic Rotation Enhancement and the Polarimetric Detection of the Small Rotation Angles

Liang Zhongcheng Zhao Rui

(College of Optoelectronic Engineering, Center of Optofluidic Technology, Nanjing University of Posts & Telecommunications, Nanjing, Jiangsu 210003, China)

Abstract One of the developing trend of microfluidic technology is the integration and miniaturization of the optical detection system. In the meantime, the polarimetric detection of microfluidic system is also one of the important research topics. In this work, the polarized characteristics of polarimetric reflection cavity embedded with Faraday magneto-optic medium is analyzed in detail. It is predicted that such a rotatory reflection cavity has the effect of magneto-optic rotation enhancement. Base on this phenomenon, the method for the angle detection of small amount sample and the theory for the feature analysis of Faraday rotation devices are proposed. The results show that the method can significantly improve the detection sensitivity of magneto-optic rotation media under conditions where the optical path is seriously restricted. The theoretical limitation of the relative sensitivity with polarimetric detection is 78.5. The method can be applied to the magneto-optical rotation detection of microfluidic system and miniaturize the magneto-optic polarimetric instruments.

Key words optofluidic technology; Faraday effect; magneto-optical rotation enhancement; detection of small rotation angle

1 引 言

微流控光学检测系统的微型化和集成化是微流控技术的发展趋势^[1], 微量流体物质的光学检测也是微流控光学技术的重要研究课题之一^[2]。对于含有顺磁和抗磁物质的流体介质, 可以通过法拉第磁致旋光效应来测量其包含物的浓度^[3]。微流控系统的问题是样品量微小, 光程严重受限, 为了测量微小

旋光角可以采用调制的方法^[4~8], 但这会增加测量装置的复杂程度。另外, 一般的法拉第旋光检测可以采用增加光程的办法提高灵敏度^[9], 但是这样却不利于仪器的小型化。

本文根据法拉第磁光效应的非互易性, 研究了包含磁光介质的旋光反射腔的光输出特性, 预言了反射腔输出光强随反射率加大而增强的现象。根据这一

收稿日期: 2008-10-13; 收到修改稿日期: 2008-11-04

基金项目: 国家自然科学基金(60878037)和南京邮电大学攀登计划(206076, 207030)资助课题。

作者简介: 梁忠诚(1958—), 男, 博士, 教授, 主要从事光电子信息、信息存储和微流控光学技术等方面的研究。

E-mail: zliang@njupt.edu.cn

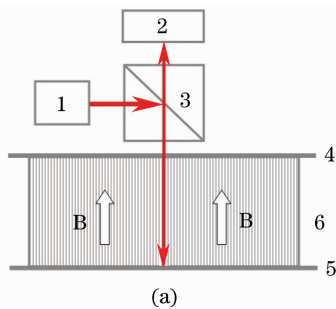
现象,提出了磁旋光角测量新方法和反射腔优化设计思路。基于旋光反射腔的旋光增强器件具有光程短、灵敏度高的优点,可望应用于微流控光学检测并有助于实现糖浓度检测及血糖检测仪器的小型化^[10-12]。

2 磁旋光增强效应

当一束平面偏振光穿过磁光介质时,如果在介质中沿光传播的方向加一磁场,则光通过介质后,偏振面会转过一角度 θ , 且 θ 与光在介质中通过的距离 L 及介质中的磁感应强度 B 成正比, 即 $\theta = V_d BL$ 。式中 V_d 是表征物质磁光特性的费尔德 (Verdet) 常数。法拉第效应的重要特性之一就是对于给定的物质, 光矢量的旋转方向由磁场的方向决定, 而与光的传播方向无关, 即通常所说的法拉第磁光效应的非互易性^[13], 它是不可逆的光学过程。当光束经样品介质往返一周后, 旋光角将倍增, 这是磁致旋光与自然旋光现象的重要区别。

当探测光束通过一组正交放置的偏振镜时, 在偏振镜间放置待测旋光样品, 若通过起偏镜的光束光强为 I_0 , 样品的旋光角为 θ , 则通过检偏镜的光强由马吕斯定律确定

$$I = I_0 \sin^2 \theta, \quad (1)$$



若这时旋转检偏镜使处于消光位置, 则检偏镜的相对旋转角度与样品旋光角度相同。这种根据马吕斯 (Malus) 定律直接测定样品旋光角的方法称为消光法, 消光法的角度测量灵敏度为

$$S_0(\theta) = \frac{1}{I_0} \cdot \frac{\partial I}{\partial \theta} = \sin 2\theta, \quad (2)$$

在通过样品的光程一定的情况下, 可以根据磁光效应的非互易性, 采用图 1(a) 所示的旋光增强装置来提高对微小偏转角的测量灵敏度。该装置主要包括非相干光源 1、光电探测器 2、偏振分束棱镜 3、部分反射镜 4、全反射镜 5 以及处于均匀磁场中的磁光介质 6。两个平行反射镜和位于其间的磁光介质构成旋光反射腔, 偏振分束棱镜和旋光反射腔共同构成所谓旋光增强器, 偏振分束镜的分光面同时为旋光增强器的入射和出射面, 入射光和出射光的传播方向和振动面均相互垂直。

图 1(b) 给出旋光增强器出射光的分析示意图, 图中入射光和出射光方向均垂直于反射腔面, 为清晰起见, 图中画成倾斜入射。设部分反射镜的振幅反射率为 r , 透射率分别为 t 和 t' , 全反射镜的振幅反射率为 1, 光束通过样品的一次旋转角为 θ 。为简化起见, 本文不考虑介质的吸收影响。

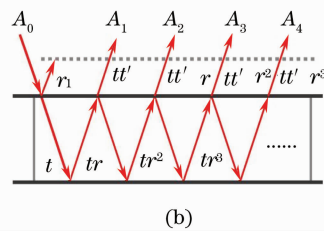


图 1 (a) 旋光增强器结构示意图; (b) 旋光增强器出射光分析示意图

Fig. 1 (a) Structure of magneto-optic rotation enhancement (MORE) device; (b) sketch map for analyzing the output light of MORE device

若 A_0 是进入反射腔前的光束振幅, 其偏振面垂直于纸面, 如图 1(b) 所示, A_0 首先经部分反射镜 4 反射, 反射光束振幅为 $A_0 r$, 振动面与 A_0 相同, 故没有输出分量。 A_0 经部分反射镜透过磁光介质后, 经全反射镜反射再次通过介质和部分反射镜, 光束偏振面旋转了 2θ , 这种 2 次通过磁光介质的光束具有平行于纸面的偏振分量, 可以从旋光增强腔的输出面出射, 出射光束的振幅为

$$A_1 = A_0 t' \sin(2\theta), \quad (3)$$

同理可知, $2n$ 次通过磁光介质的光束平行于纸面的偏振分量为

$$A_n = A_0 t' r^{n-1} \sin(2n\theta), \quad (4)$$

相应的出射光强为

$$I_n = A_n^2 = A_0^2 (t')^2 r^{2(n-1)} \sin^2(2n\theta) \\ = I_0 (1 - R)^2 R^{(n-1)} \sin^2(2n\theta), \quad (5)$$

式中 $R = r^2$ 是部分反射镜的光强反射率 (简称为反射腔的反射率), 并利用了斯托克斯关系 $t' + r^2 = 1$ 。旋光增强器输出面后的光强 I 是 I_n 的非相干叠加, 即

$$I(R, \theta) = \sum_{n=1}^{\infty} I_n = I_0 (1 - R)^2 \sum_{n=1}^{\infty} R^{(n-1)} \sin^2(2n\theta). \quad (6)$$

根据(6)式的计算,图 2 给出了 $R=0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ 时输出光强随一次旋转角 θ 变化的曲线,图 2 中同时给出消光法输出光强曲线 L_0 作为对比。由图 2 可见,在一次旋转角较小的范围内,输出光强随反射率 R 的增加而变大,且均大于消光法的输出光强,将这种现象称之为磁旋光增强效应。

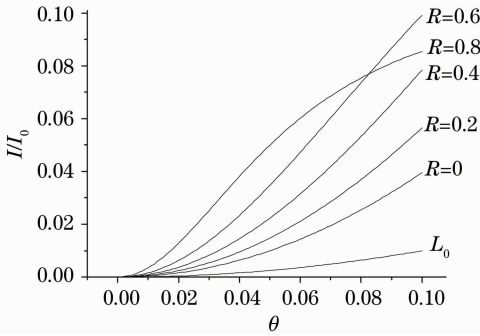


图 2 旋光增强器输出强 I/I_0 随一次旋转角 θ 的变化关系
Fig. 2 Variation of output intensity I/I_0 with rotation angle

3 旋光角检测特性

磁旋光增强现象可以应用于磁光介质样品的参数测量。若对特定旋光反射腔的一次旋光角和输出光电流关系进行标定以后,可以确定样品的一次旋转角,进而得到样品的 Verdet 常数。若样品为包含磁光介质的液体,则可以获得样品的浓度信息,并能实现对流动样品的实时、连续和自动监测。由于磁旋光增强器件结构相对简单,也易于实现检测仪器的集成化和小型化。

旋光增强法的角度测量灵敏度为

$$S(R, \theta) = \frac{1}{I_0} \cdot \frac{\partial I(R, \theta)}{\partial \theta} = (1 - R)^2 \sum_{n=1}^{\infty} 2nR^{(n-1)} \sin(4n\theta), \quad (7)$$

作为比较,定义增强法和消光法两种灵敏度的比值为相对灵敏度

$$s(R, \theta) = \frac{S(R, \theta)}{S_0(\theta)} = \frac{(1 - R)^2 \sum_{n=1}^{\infty} 2nR^{(n-1)} \sin(4n\theta)}{\sin 2\theta}. \quad (8)$$

图 3(a) 是 $|\theta| < 0.1$ 弧度范围内相对灵敏度曲面。图 3(b) 是 $\theta = 0.001, 0.01, 0.02, 0.04$ 和 0.1 平面与曲面的截线,曲线反映了相对灵敏度随反射率变化的情况。图 3(c) 则是 $R = 0, 0.6, 0.8$ 和 0.9 平面与曲面的截线,这些曲线反映出相对灵敏度随一次旋光角变化的情况。由图可见:相对灵敏度 s 在 $R > 0.5, |\theta| < 0.1$ 弧度范围内有明显的增加;在

$R = 0.935, |\theta| \rightarrow 0$ 时,相对灵敏度 s 趋于极限值 78.486;当 $R = 0$ 时, s 为常数 4;但在 R 和 $|\theta|$ 较大的区域, s 有可能小于 1。

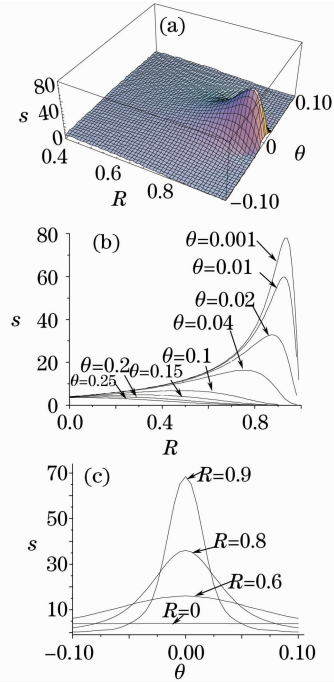


图 3 (a) 相对灵敏度曲面; (b) 相对灵敏度随反射率变化的情况; (c) 相对灵敏度随一次旋光角的变化关系
Fig. 3 (a) Curved surface of relative sensitivity; (b) variation of relative sensitivity with reflectivity; (c) variation of relative sensitivity with rotation angles

4 旋光反射腔设计

旋光增强器的相对灵敏度 s 随 R 和 θ 变化的关系比较复杂,从图 3(a), (b) 可见,一次旋光角不同时,最大灵敏度处对应的反射率也不同。制作旋光增强器需要依据旋光角的量程确定反射腔的反射率,旋光反射腔灵敏度优化设计的任务就是根据角

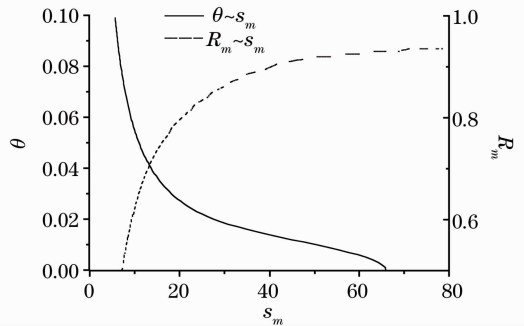


图 4 旋光角 θ 及最佳反射率 R_m 与最大灵敏度 s_m 的关系曲线

Fig. 4 Dependences of optimal reflectivity R_m and sensitivity s_m with rotation angles

度量程确定一次旋光角 θ , 并找出最大灵敏度 s_m 处对应的最佳反射率 R_m 。

图 4 中实线和虚线分别是依据相对灵敏度表达式(8)得到的一次旋光角 θ 、最佳反射率 R_m 与最大灵敏度 s_m 之间的关系曲线。根据图 4 可以方便地确定旋光反射腔的参数。例如: 当一次旋光角为 0.032 rad 时, 由图 4 中的 $\theta \sim s_m$ 曲线找出最大灵敏度为 20.4, 然后由图中 $R_m \sim s_m$ 曲线找出对应的最佳反射率为 0.80。

5 结 论

根据法拉第磁光效应的非互易性, 分析了旋光反射腔的偏光特性, 给出了样品一次旋光角和反射腔反射率与输出光强、相对灵敏度之间的关系, 结果表明这种旋光反射腔具有旋光增强效应。在此基础上提出了微量样品的旋光增强检测方法和器件设计原理。研究结果表明: 旋光增强法可以在小光程限制条件下显著提高旋光角的检测灵敏度。在不考虑样品吸收的情况下, 旋光增强法与普通消光法检测灵敏度之比的理论极限为 78.486。该方法可以克服微量样品检测中光程较短的问题, 并易于实现对液体样品进行连续、实时和自动检测, 可以应用于微流控系统的旋光检测以及实现磁旋光仪器的小型化和微型化。

参 考 文 献

- 1 D. Psaltis, S. Quake, C. H. Yang. Developing optofluidic technology through the fusion of microfluidics and optics [J]. *Nature*, 2006, **442**: 381~386
- 2 Liang Zhongcheng, Zhao Rui. Optofluidics and its potential applications [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, **45**(6): 16~23
梁忠诚, 赵 瑞. 微流控光学及其应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2008, **45**(6): 16~23
- 3 Li Chengren, Lu Ling, Yao Yi *et al.*. Determine concentration of liquid faraday effect [J]. *J. Liaoning Normal University (Nature Science Edition)*, 1996, **19**(3): 259~262

- 李成仁, 吕 翎, 姚义等. 用法拉第效应测液体浓度 [J]. *辽宁师范大学学报*, 1996, **19**(3): 259~262
- 4 Y. H. Lu, M. H. Cho, J. B. Kim *et al.*. Magneto-optical enhancement through gyrotropic gratings [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(8): 5378~5384
- 5 Fan Shuhua, Xu Lishan, Liu Linxia. Measurement of linear polarization light rotation [J]. *J. Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition)*, 2007, **35**(2): 122~124
范淑华, 徐丽珊, 刘琳霞. 平面偏振光微小偏转角的精密测量 [J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2007, **35**(2): 122~124
- 6 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
- 7 Liu Gongqiang, Liu Xianglin. Magneto-optic modulation and measurement of faraday rotation [J]. *Acta Optica Sinica*, 1984, **4**(7): 588~591
刘公强, 刘湘林. 磁光调制和法拉第旋转测量 [J]. *光学学报*, 1984, **4**(7): 588~591
- 8 Chang Yue, Qian Xiaoling. A measurement technique of the tiny rotatory angle of polarization [J]. *Chinese J. Quant. Electron.*, 1999, **16**(4): 375~379
常 悦, 钱小陵. 光偏转的微小旋转角的测量技术 [J]. *量子电子学报*, 1999, **16**(4): 375~379
- 9 Qian Xiaoling, Chang Yue. The function of the magnetic-optic modulation in the very small rotatory angle of polarization [J]. *J. Capital Normal University*, 2001, **22**(1): 46~49
钱小陵, 常 悦. 磁光调制技术在光偏振微小旋转角精密测量中的应用 [J]. *首都师范大学学报*, 2001, **22**(1): 46~49
- 10 Zhang Bo. *Detection of Sugar Concentration Based on the Rotation Effect* [D]. Harbin: Heilongjiang university, 2007, 22~48
章 博. 基于旋光效应的糖浓度检测 [D]. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2007, 22~48
- 11 Wang Hong, Jiang Mingfeng, Cui Jianguo *et al.*. Microdegree polarimetry for glucose detection [J]. *Laser Journal*, 2006, **27**(1): 80~81
王 洪, 蒋明峰, 崔建国等. 基于光学旋光法的血糖浓度测量 [J]. *激光杂志*, 2006, **27**(1): 80~81
- 12 Chou Chien, Huang Yeuchuen, Feng Chingmei *et al.*. Amplitude sensitive optical heterodyne and phase lock-in technique on small optical rotation angle detection of chiral liquid [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1997, **36**: 356~359
- 13 Zhao Kaihua, Zhong Xihua. *Optics* [M]. Beijing: Peking University Press, 1984, 224~225
赵凯华, 钟锡华. *光学* [M]. 北京: 北京大学出版社, 1984, 224~225