

磁旋光增强效应与旋光增强器特性分析*

梁忠诚† 赵 瑞 包 刚

(南京邮电大学光电工程学院, 南京 210003)

(2008 年 8 月 26 日收到, 2008 年 12 月 1 日收到修改稿)

根据法拉第磁光效应的非互易性, 分析了旋光反射腔的光强输出特性, 表明这种反射腔具有旋光增强效应. 在此基础上提出了用于检测微小旋转角的旋光增强法, 并对旋光增强器的特性进行了理论分析和仿真计算. 给出了测量灵敏度随器件反射率、样品吸收因素及一次旋光角变化的关系, 讨论了角度测量工作点、测量范围以及相对灵敏度理论极限问题. 旋光增强器有望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: 法拉第磁光效应, 磁旋光增强, 微小旋光角检测, 微流控系统

PACC: 4285F, 7280E

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. 微流控系统的检测样品量微小, 光程严重受限, 为了测量微小旋光角可以采用偏振调制的方法^[3], 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, 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, 表明反射腔输出光强会随着反射率的加大而增强. 根据这一现象提出了旋光增强法用于微小旋光角的检测, 并对旋光增强器的特性进行了理论分析和仿真计算. 旋光增强器件具有光程短、灵敏度高的优点, 可望应用于微流控系统的旋光检测并有助于实现磁旋光仪器的小型化.

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 Verdet 常数. 这就是著名的法拉第磁光效应. 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, 即通常所谓的法拉第磁光效应的非互易性^[4]. 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 , 样品厚度为 d , 吸收系数为 β , 光束一次通过样品的旋转角为 θ , 则通过检偏镜的光强由 Malus 定律确定,

$$\begin{aligned} I &= I_0 e^{-\beta d} \sin^2 \theta \\ &= I_0 \lambda \sin^2 \theta, \end{aligned} \quad (1)$$

式中 $\lambda = e^{-\beta d}$. 若这时旋转检偏镜处于消光位置, 则检偏镜的相对旋转角度与样品旋光角度相同. 这种根据 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

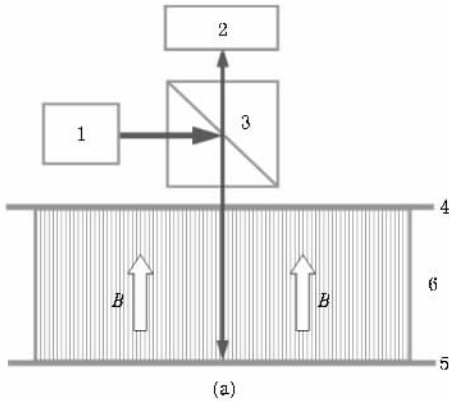
$$\begin{aligned} S_0(\theta, \lambda) &= \frac{1}{I_0} \frac{\partial I}{\partial \theta} \\ &= \lambda \sin 2\theta. \end{aligned} \quad (2)$$

在通过样品的光程一定的情况下, 可以根据磁光效

* 国家自然科学基金(批准号: 60878037)和南京邮电大学攀登计划(批准号: NY206076, NY207030)资助的课题.

† E-mail: zcliang@njupt.edu.cn

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旋转角的测量灵敏度.该装置主要包括非相干光源、光电探测器、偏振分束棱镜、部分反射镜、全反射镜以及处于均匀磁场中的磁光介质.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.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,但为清晰起见,图中画成倾斜入射.设部分反射镜的振幅反射率为 r ,振幅透射率分别为 t 和 t' ,全反射镜的振幅反射率为 1,光束通过厚度为 d 、吸收系数为 β 的样品的一次旋转角为 θ .

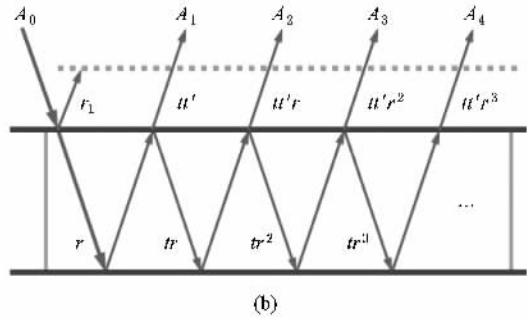


图 1 (a)旋光增强器结构示意图 1 代表非相干光源 2 代表光电探测器 3 代表偏振分束棱镜 4 代表部分反射镜 5 代表全反射镜 6 代表处于磁场中的磁光介质 (b)旋光增强器出射光分析示意图

如图 1(b)所示, A_0 是进入反射腔前的光束振幅,其偏振面垂直于纸面, 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,可以从旋光增强器输出,出射光束的振幅为

$$A_1 = A_0 t t' \lambda^2 \sin 2\theta. \quad (3)$$

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

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

相应的出射光强为

$$\begin{aligned} I_n &= A_n^2 \\ &= A_0^2 (t t')^2 r^{2(n-1)} \lambda^{4n} \sin^2 2n\theta \\ &= I_0 (1 - R)^2 R^{(n-1)} \lambda^{4n} \sin^2 2n\theta, \end{aligned} \quad (5)$$

式中 $R = r^2$ 是部分反射镜的光强反射率(简称为增强器的反射率),并利用了斯托克斯关系 $t t' + r^2 = 1$.

采用普通光源照明时,旋光增强器的出射光强 I 是 I_n 的非相干叠加,即

$$\begin{aligned} I(R, \theta, \lambda) &= \sum_{n=1}^{\infty} I_n \\ &= I_0 (1 - R)^2 \sum_{n=1}^{\infty} R^{n-1} \lambda^{4n} \sin^2 2n\theta. \end{aligned} \quad (6)$$

图 2 是根据(6)式计算得到 $\lambda = 1.0$ 时相对光强 I/I_0 随反射率 R 和一次旋转角 θ 变化的曲面图.

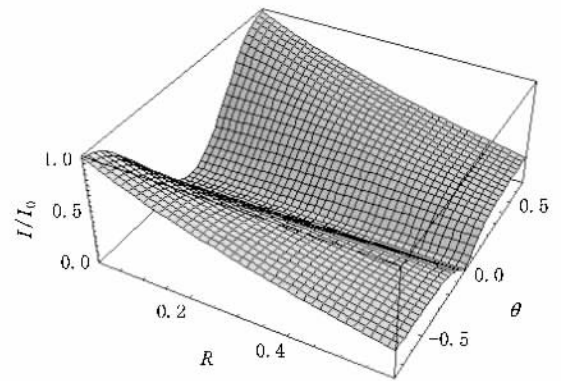


图 2 相对光强 I/I_0 随反射率 R 和一次旋转角 θ 变化的关系曲面图 $\lambda = 1.0$

图 3 给出了反射率 $R = 0, 0.2, 0.4, 0.6$ 和 0.8 , $\lambda = 1.0$ 时相对光强随一次旋转角 θ 变化的仿真曲线,同时给出了消光法输出的相对光强曲线 I_0 作为对比.由图 3 可见在一次旋转角较小的范围内,输出光强随反射率 R 的加大而增强,且均大于消光法的输出光强,这种现象称为磁旋光增强效应.

如果给定第 N 束与第 $N + 1$ 束出射光强的相对误差 δ_n 以及弧度值与正弦值的相对误差 δ_θ ,那么在

$$(I_N - I_{N+1})/I_N < \delta_n,$$

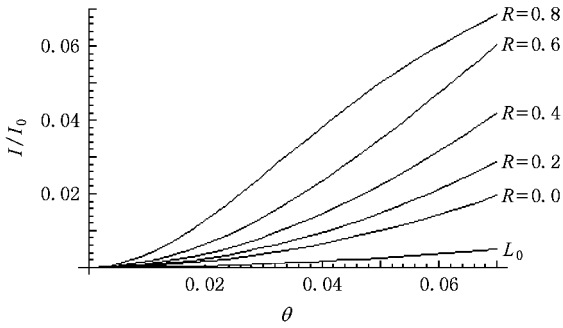


图3 旋光增强器输出光强 I/I_0 随一次旋转角 θ 变化的关系曲线 $\lambda = 1.0$

$$(2N\theta - \sin 2N\theta)(2N\theta) < \delta_\theta \quad (7a)$$

限制下所确定的小角度近似条件为

$$N < \left(\sqrt{\frac{1 - \delta_\theta}{R\lambda^4}} - 1 \right)^{-1}, \quad \theta^2 < \frac{3\delta_\theta}{2N^2}. \quad (7b)$$

这时输出光强公式(6)可以近似表示为

$$I(R, \lambda, \theta) = 4I_0(1 - R)^2 \left(\sum_{n=1}^N n^2 R^{n-1} \lambda^{4n} \right) \theta^2 = I_0 K(R, \lambda) \theta^2, \quad (8)$$

式中

$$K(R, \lambda) = 4(1 - R)^2 \sum_{n=1}^N n^2 R^{n-1} \lambda^{4n}. \quad (9)$$

这表明在小角度近似条件下,输出光强与一次旋转角的二次方成正比.这一结论可以从图3得到验证.

3. 旋光增强器的特性

磁旋光增强现象可以应用于磁光介质样品的参数测量.若对特定旋光增强器的一次旋光角和输出光电流(或电压)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.由于磁旋光增强器结构相对简单,也易于实现检测仪器的集成化和小型化.

3.1. 角度测量灵敏度

旋光增强法的角度测量灵敏度定义为

$$S(R, \lambda, \theta) = \frac{1}{I_0} \frac{\partial K(R, \lambda, \theta)}{\partial \theta} = 2(1 - R)^2 \sum_{n=1}^N n R^{n-1} \lambda^{4n} \sin 4n\theta \quad (10)$$

由(8)式可以得到小角度近似条件下测量灵敏度的表达式

$$\tilde{S}(R, \lambda, \theta) = 2K(R, \lambda) \theta. \quad (11)$$

图4是 $\lambda = 0.98$ 时 $|S|$ 在 (R, θ) 参数空间中的形貌,图中 $\theta = 0$ 处是 $S = 0$ 的谷线.从谷线出发,沿着 R 值不变的方向增加 θ ,在 θ_m 前灵敏度单调增加至峰值 S_m ,然后下降.随着 R 的增加,谷线两侧的坡度变陡($\partial S / \partial \theta$ 增大),但峰与谷线之间的距离变近(θ_m 减小),且峰的高度单调下降(S_m 减小);当 R 接近 1 时,峰消失($S_m = 0$).

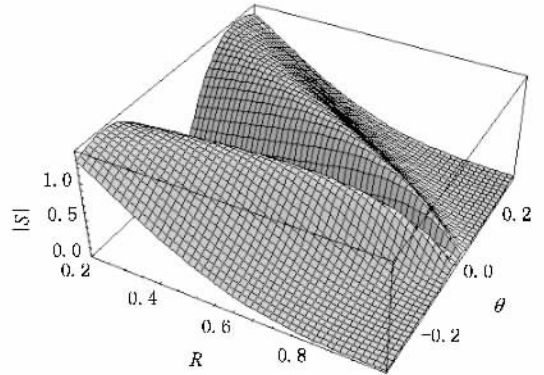


图4 测角灵敏度绝对值 $|S|$ 在 (R, θ) 参数空间中的形貌 $\lambda = 0.98$

3.2. 角度工作点和测量范围

图4中峰与谷线之间的距离 θ_m 是影响旋光角度测量的关键因素之一.为了获得较高的测量灵敏度,应将旋光增强器的初始状态选择在 θ_m 点附近.因此,旋光角度的量程也大致被限制在 $0 < \theta < 2\theta_m$ 的范围之内.

角度工作点 θ_m 可以通过测角灵敏度的极大值条件确定,即

$$\left. \frac{\partial S(\theta)}{\partial \theta} \right|_{\theta_m} = 2(1 - R)^2 \sum_{n=1}^{\infty} n^2 R^{n-1} \lambda^{4n} \cos(4n\theta_m) = 0, \quad (12)$$

在小角度近似条件下(12)式可表示为

$$2(1 - R)^2 \sum_{n=1}^N \left[n^2 R^{n-1} \lambda^{4n} \left(1 - \frac{1}{2}(4n\theta_m)^2 \right) \right] = 0. \quad (13)$$

由此得到角度工作点 θ_m 与 R 和 λ 的近似关系

$$\theta_m^2(R, \lambda) = \frac{\sum_{n=1}^N n^2 R^{n-1} \lambda^{4n}}{8 \sum_{n=1}^N n^4 R^{n-1} \lambda^{4n}}. \quad (14)$$

图 5 给出了 θ_m 随 R 和 λ 变化的关系曲面. 由图 5 可见, 角度工作点 θ_m 是随着 R 和 λ 的增大而单调下降的. 当已知 R 和 λ 时, 由图 5 可以直接确定角度工作点和角度测量范围.

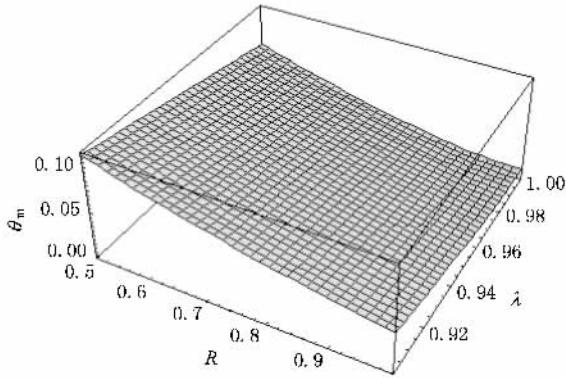


图 5 初始工作点 θ_m 与 R 和 λ 之间的关系

3.3. 相对灵敏度

作为对比, 定义增强法和消光法两种灵敏度之比为相对灵敏度, 即

$$S'(R, \lambda, \theta) = \frac{S(R, \lambda, \theta)}{S_0(\lambda, \theta)} = \mathcal{A}(1 - R)^2 \sum_{n=1}^{\infty} nR^{n-1} \lambda^{4n-1} \left(\frac{\sin 4n\theta}{\sin 2\theta} \right). \quad (15)$$

图 6 给出了 $\lambda = 0.98$ 和 $\lambda = 0.96$ 时 $|\theta| < \pi/10$ 弧度范围内旋光增强器的相对灵敏度 S' 随反射率 R 和一次旋转角 θ 变化的关系曲面. 由图 6 可见, 旋光增强法的相对灵敏度是随着 θ 的减小而增大, 在 $\theta \rightarrow 0$ 时 S' 趋于极大值.

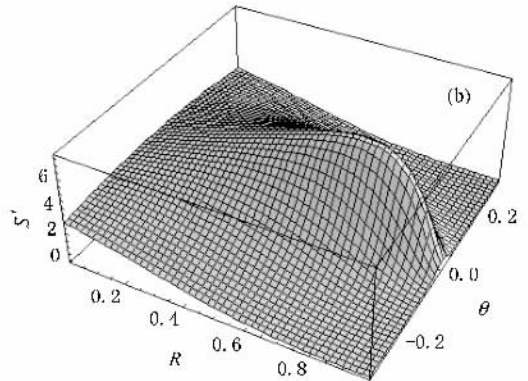
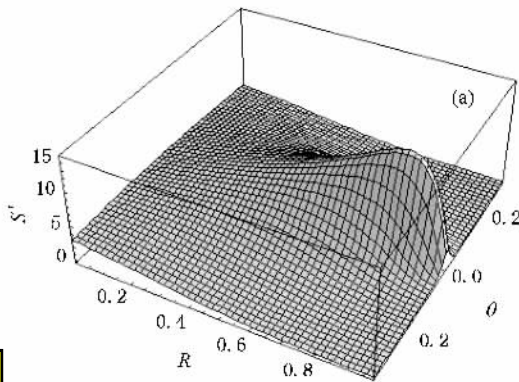


图 6 相对灵敏度随反射率和一次旋转角变化的情况 (a) $\lambda = 0.98$ (b) $\lambda = 0.96$

小角度近似条件下相对灵敏度可以表示为

$$\begin{aligned} \tilde{S}'(R, \lambda) &= \mathcal{A}(1 - R)^2 \sum_{n=1}^{\infty} n^2 R^{n-1} \lambda^{4n-1} \\ &= \frac{1}{\lambda} K(R, \lambda). \end{aligned} \quad (16)$$

图 7 是根据(16)式绘制的小角度条件下相对灵敏度随反射率和吸收系数变化的情况. 计算表明, 当 $\lambda = 1, R_c = 0.9351$ 时, 相对灵敏度达到理论极限值 $S'_c = \tilde{S}'(R_c, 1) = 78.49$.

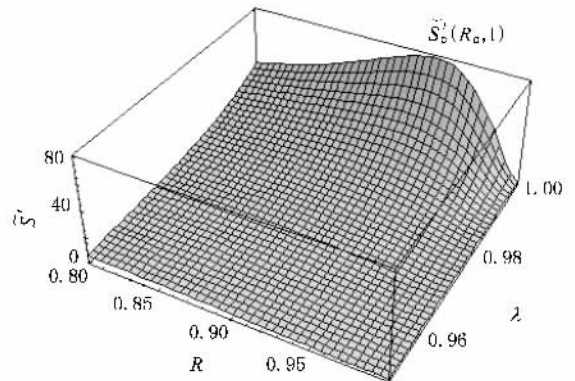


图 7 小角度条件下相对灵敏度随反射率和吸收因数变化的关系

4. 结 论

本文根据法拉第磁光效应的非互易性, 分析了旋光反射腔的光强输出特性, 表明这种旋光反射腔具有旋光增强效应. 在此基础上提出了用于检测微小旋转角的旋光增强法, 并对旋光增强器的特性进

行了理论分析和仿真计算. 给出了测角灵敏度、相对灵敏度随器件反射率、样品吸收因素及一次旋光角变化的关系, 并分析了角度测量工作点、测量范围以

及相对灵敏度理论极限问题. 研究表明, 在小角度近似条件下, 旋光增强器的输出光强与一次旋转角的平方成正比, 且随反射率的加大而增强, 此即旋光增强效应. 旋光增强器的初始工作点随着器件反射率的增大和样品吸收的减小而单调下降, 相对灵敏度则随着旋转角的减小而上升. 当样品无吸收和器件

反射率为 0.9351 时, 相对灵敏度达到理论极限值 78.49. 由于旋光增强器能在小光程限制条件下显著提高旋光角的检测灵敏度, 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, 有望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.

- [1] Psaltis D , Quake S , Yang C H 2006 *Nature* **442** 381
 [2] Liang Z C , Zhao R 2008 *Laser Optoelectron. Prog.* **45** 16 (in Chinese] 梁忠诚、赵 瑞 2008 激光与光电子学进展 **45** 16]
 [3] Fan S H , Xu L S , Liu L X 2007 *J. Huazhong Univ. Sci. Technol.* (Nat. Sci.) **35** 122 (in Chinese] 范淑华、徐丽珊、刘琳霞 2007

- 华中科技大学学报(自然科学版) **35** 122]
 [4] Zhao K H , Zhong X H 1984 *Optics (II)* (Beijing : Peking University Press) p224 (in Chinese] 赵凯华、钟锡华 1984 光学(下册)(北京:北京大学出版社)第 224 页]

Enhancement effect of magneto-optical rotation (MOR) and properties of MOR enhancement device^{*}

Liang Zhong-Cheng[†] Zhao Rui Bao Gang

(College of Optoelectronic Engineering , Nanjing University of Posts and Telecommunications , Nanjing 210003 , China)

(Received 26 August 2008 ; revised manuscript received 1 December 2008)

Abstract

Based on the nonreciprocal property of Faraday effect , we investigate the light output from optical reflection cavity filled with Faraday optical rotation medium. It is shown that such a reflection cavity has the enhancement effect of magneto-optical rotation (MOR). Base on this phenomenon , a detection method for small rotation angle is proposed , and the characteristics of MOR enhancement device is analyzed. The relations between the detection sensitivity and the factors of reflection , absorption and rotation angle are discussed analytically and simulated. The problems discussed include the angular working point , the measuring range , and the theoretical limitation of detection sensitivity. Under the condition of small angle approximation , the output intensity is proportional to the square of the rotation angle , and increases with the rise of device reflectivity. The angular working point and measuring range decrease monotonically with the increase of reflectivity and the drop of the absorption. The limiting value of relative sensitivity is 78.49. The results indicate that the MOR enhancement device can be applied to MOR detection of microfluidic system and miniaturization of MOR instruments.

Keywords : Faraday effect , magneto-optical rotation enhancement , detection of small rotation angle , microfluidic system

PACC : 4285F , 7280E

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation (Grant No. 60878037) and the Climbing Program of Nanjing University of Posts and Telecommunications , China (Grant Nos. NY206076 , NY207030).

[†] E-mail : zcliang@njupt.edu.cn