

文章编号: 0258-7025(2008)10-1505-05

利用具有自旋角动量的光束实现微粒的旋转

高秋娟 朱艳英 史锦珊 李亚林 王明利 魏 勇

(燕山大学物理系, 河北 秦皇岛 066004)

摘要 从理论上分析了偏振光束与双折射晶体粒子的相互作用过程,讨论了由于光束自旋角动量向晶体粒子的传递所导致的光致旋转效应的原理,通过 MATLAB 仿真分析,研究了粒子的旋转频率随激光功率的变化关系,得出粒子转动频率与激光功率成正比。利用光镊装置,采用波长为 632.8 nm 的 He-Ne 激光器,在不同的激光功率下实现对不同半径双折射粒子的旋转,测量了光致旋转的转动频率,最高转速可达 5 r/s,并得出了不同粒子的旋转频率随激光功率的变化关系,实验结果和理论分析基本一致。分析了产生误差的原因,其中载波片底面的摩擦影响最大。

关键词 物理光学;光致旋转;双折射;偏振光;自旋角动量

中图分类号 TN 249;O 436.3 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL20083510.1505

Rotation of Particles by Using the Beam with Spin Angular Momentum

Gao Qiujuan Zhu Yanying Shi Jinshan Li Yalin Wang Mingli Wei Yong

(Physics Department, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China)

Abstract The principle of optical rotation due to the transfer of spin angular momentum from light to particles was discussed by analyzing the interaction between the beam of light and birefringent crystal particles. Through MATLAB simulation, the dependence of the rotation frequency of the trapped particle on the laser power was analyzed, it was obtained that the rotation frequency was proportional to the laser power. The birefringent different particles were rotated by the optical tweezers, the wavelength of He-Ne laser was 632.8 nm, at the same time the rotation frequency was measured, and the maximum speed could reach 5 r/s. The dependence of the rotation frequency of the trapped particle on the laser-power was experimentally studied for several birefringent particles with different sizes in the optical tweezers. When experimental results were compared with theoretical results, experimental results and theoretical analysis were agreeing very well, and the reasons for the error were analyzed, which the bottom friction affected the most.

Key words physical optics; optical rotation; birefringence; polarized light; spin angular momentum

1 引 言

光具有产生辐射压力的线性动量,在一定条件下,光还携带有角动量,包括自旋角动量和轨道角动量。1936年,R. A. Beth 利用实验让一束圆偏振光通过细丝悬挂的半波片,首次利用光束中光子的角动量实现了物体的旋转^[1]。自此人们一直在不停地探索着实现光致旋转的方法。光致旋转可实现对微粒的角向操纵,这是在光镊对微粒的三维操纵基础

上又增加了一维角向的操纵。Friesse^[2]利用光镊研究偏振光的角动量特性,方便地再现了 Beth 实验,同时实现悬浮微粒的连续旋转。祝安定等^[3]采用一种新型的丙烯酸酯紫外光固化树脂,采用双光子聚合加工出直径 6 μm 的万字形微转子,微转子的旋转为实现微机械电动机提供了一种有效手段。

目前,实现光致旋转的方式^[4]有:旋转光斑法、携带自旋或轨道角动量的光束与微粒相互作用时的

收稿日期:2007-10-30;收到修改稿日期:2008-02-03

基金项目:国家自然科学基金(50375138,50575193)资助项目。

作者简介:高秋娟(1982—),女,河北人,硕士研究生,主要从事光电检测和激光精密测试方面的研究。

E-mail: qiujuan59@163.com

导师简介:朱艳英(1961—),女,辽宁人,硕士生导师,目前主要从事光电检测与激光精密测试方面的研究。

E-mail: yywlxzyy@163.com

角动量传递法、光场散射力推动类风车微粒旋转法等。其中,利用偏振光与双折射微粒的相互作用实现的光致旋转,可以获得很高的转速,并且产生旋转的方式也较方便,具有良好的应用前景,但是一直没有人对光致旋转做仿真分析和实验相结合的研究。本文在理论上分析了偏振光与双折射微粒相互作用时的自旋角动量传递特性,并从理论和实验两方面得出了双折射粒子旋转频率和激光功率的关系曲线。

2 光致旋转的理论研究

光束携带的角动量有两种形式:自旋角动量,和光束的偏振状态有关;轨道角动量,和光束的空间结构有关^[5]。其中一个或两个可以为零,两个角动量在粒子上的机械作用是一样的,其中任何一个都可以被用来使粒子旋转。但是在实际应用中有一个重要的不同就是自旋角动量可以用光学方法稳定地测到,因为它只和光的偏振性有关,而轨道角动量在理论上可以被测到,在实际中被证明是有可能,但是很困难^[6]。因此重点介绍自旋角动量引起的光致旋转。

2.1 光束自旋角动量引起的光致旋转

光作用于双折射微粒时,偏振态会发生改变,光束中光子本身所携带的自旋角动量发生改变,根据角动量守恒定律,双折射微粒将从光束获得相应的角动量并产生围绕自身光轴的旋转。

一个沿 z 轴传播的激光光束可以写成

$$\mathbf{E} = (E_x \hat{x} + E_y \hat{y}) \exp(ikz - i\omega t), \quad (1)$$

式中 E_x 和 E_y 为复振幅, ω 表示入射光的圆频率, k 为角波数, t 为入射光传播时间。考虑一个双折射材料的薄片,光轴位于 $x-y$ 平面,与 x 轴的夹角为 θ ,上下两个面在 z 轴的位置为 z_0 和 $z_0 + d$,则入射光^[7]表示为

$$\mathbf{E} = [(E_x \cos \theta + E_y \sin \theta) \hat{i} + (-E_x \sin \theta + E_y \cos \theta) \hat{j}] \exp(ikz_0 - i\omega t), \quad (2)$$

式中 \hat{i} 和 \hat{j} 为平行和垂直光轴的单位矢量。在通过厚度为 d , 折射率为 n 的方解石薄片后,相位会发生一个 $\Delta\varphi = kdn$ 的改变,如果电场方向垂直光轴方向,该电场方向在双折射晶体中的折射率为 n_o ; 如果电场方向平行光轴方向,该电场方向在双折射晶体中的折射率为 n_e ^[8]。则出射场为

$$\mathbf{E} = [(E_x \cos \theta + E_y \sin \theta) \exp(ikdn_e) \hat{i} + (-E_x \sin \theta + E_y \cos \theta) \exp(ikdn_o) \hat{j}] \times \exp(ikz_0 - i\omega t), \quad (3)$$

由此,运用 T. A. Nieminen 等^[9]的求解方法,得出方解石薄片单位面积上获得的自旋角动量为

$$\tau = \frac{c \epsilon_0}{2\omega} \{i(E_x E_y^* - E_x^* E_y)(1 - \cos \Delta) + \sin \Delta [(E_x E_x^* - E_y^* E_y) \sin 2\theta - (E_x E_y^* + E_x^* E_y) \cos 2\theta]\}, \quad (4)$$

式中 $\Delta = kd(n_o - n_e)$ 为微粒厚度。如果入射光是线偏振光($E_y = 0$),则力矩为

$$\tau = \frac{c \epsilon_0}{2\omega} \sin \Delta |E_x|^2 \sin 2\theta, \quad (5)$$

扭力矩 τ 正比于 $\sin 2\theta$, 当线偏振光的偏振方向与光轴的夹角 $\theta = 0$ 时,微粒处于平衡位置。所以当双折射微粒处于线偏振光的光镊光场时,总会旋转到这个特定的位置,然后保持平衡^[2]。

如果入射光是圆偏振光($E_y = \pm iE_x$),则力矩为

$$\tau = \frac{c \epsilon_0}{\omega} |E_x|^2 (1 - \cos \Delta) = \pm \frac{P_{\text{eff}}}{\omega} (1 - \cos \Delta), \quad (6)$$

式中正负分别表示左旋与右旋圆偏振光, P_{eff} 为与晶体粒子相互作用的有效激光功率,此时的力矩与材料光轴的取向无关,扭力矩恒定,悬浮微粒将以恒定角速度旋转。当微粒厚度满足 $\Delta = (2m + 1)\pi$ 时(即粒子薄片相当于一个半波片),粒子获得最大的转动力矩,且左旋与右旋圆偏振光会分别导致微粒的顺时针或逆时针旋转。

在粘性流体中转动着的粒子还受到流体的阻力力矩,该力矩与粒子的转动角速度 Ω 成比例,设比例系数为 D ,则粒子旋转时受到的总转动力矩为

$$\tau = I\Omega = \frac{P_{\text{eff}}}{\omega} (1 - \cos \Delta) - D\Omega, \quad (7)$$

(7) 式第一项为激光产生的转动力矩;第二项为粒子在粘性液体中转动时受到的阻力力矩,对于所讨论的圆盘状粒子^[10], $D = 32\eta r^3/3$, r 为粒子的半径, η 为液体的粘滞系数。阻力力矩最终将与束缚光产生的转动力矩平衡,从而粒子将具有恒定的旋转频率,当粒子转速恒定时(合力矩 $\tau = 0$),由(7)式可得

$$\Omega = P_{\text{eff}} (1 - \cos \Delta) / D\omega = \frac{3P_{\text{eff}} (1 - \cos \Delta)}{32\omega\eta r^3}, \quad (8)$$

实验中光频率 ω 和水的粘滞系数 η 都是一定的。

2.2 自旋角动量引起的光扭矩的仿真分析

(8) 式中 $0 \leq 1 - \cos \Delta \leq 2$, 当粒子厚度不满足旋转条件,即 $\Delta = kd(n_o - n_e) = 2\pi$ 时,粒子不会旋转;当 $\Delta = \pi$ 时,粒子受到的力矩最大。取一般情况,设 $\Delta = (2m + 1)\pi/2$, 则 $1 - \cos \Delta = 1$, 而 $\omega = 2\pi c/\lambda$,

波长 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$, 室温 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 查表得粘滞系数 $\eta = 0.894 \times 10^{-3} \text{ N}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 转动频率 $\nu = \Omega/2\pi$, 将 Δ, ω, η 代入(8)式得 $\nu = 0.55 \times 10^{-14} P_{\text{eff}}/r^3$, 由此可知, 对于不同的半径和功率, 则粒子的转动频率 n 不同。图 1(a) 为 CaCO_3 粒子转动频率和激光功率关系曲线图, 选取一组容易得到且实验中可以实现旋转的粒子, 其半径分别为 $4.0 \text{ } \mu\text{m}, 5.0 \text{ } \mu\text{m}, 3.0 \text{ } \mu\text{m}, 2.5 \text{ } \mu\text{m}$ 。

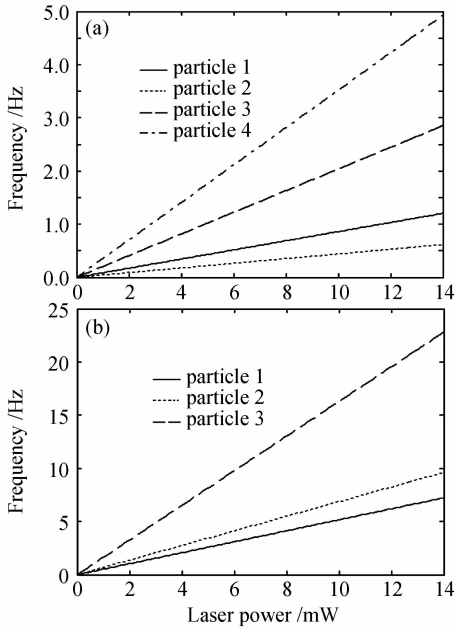


图 1 4 个 CaCO_3 粒子(a)和 3 个 SiO_2 粒子(b)转动频率与激光功率的关系

Fig.1 Relationship between the rotation frequency and the laser power of four different shape CaCO_3 particles (a) and three different shape SiO_2 particles (b)

图 1(b) 为 SiO_2 粒子转动频率和激光功率关系曲线图, 取粒子半径分别为 $2.2 \text{ } \mu\text{m}, 2.0 \text{ } \mu\text{m}, 1.5 \text{ } \mu\text{m}$ 。由图可以看出转动频率和激光功率成线性关系, 与粒子半径的三次方成反比, 半径对转动频率影响很大。在同样的激光功率下, 半径小的粒子旋转频率大于半径大的粒子旋转频率, 而对于同一个粒子, 功率越大旋转频率也越大。在实际应用中, 要考虑需要的粒子半径大小和旋转频率来选择合适的激光功率。

3 光致旋转的实验研究

根据实验室所建的光镊实验平台绘制基本光路原理图如图 2 所示, 其工作原理是将待处理样品置于载物台上, 通过显微物镜成像于 CCD 光敏面, 其

图像再经过图像采集卡输入计算机, 操作者可通过显示器对样品进行观察, 调节物镜高度与照明光源使成像清楚。激光光束经聚焦光学系统进入显微镜, 调节聚焦光学系统使激光光束准确聚焦于样品, 且通过调节聚焦光学系统可控制激光束聚焦光斑的大小。过程可在显示器上直接观察。控制二维精密载物台的移动旋钮, 使激光准确作用于样品位置。由电动快门控制曝光时间, 也可由软件设定图像采集时间范围, 将样品的变化动态过程(AVI 格式视频文件)存入硬盘。

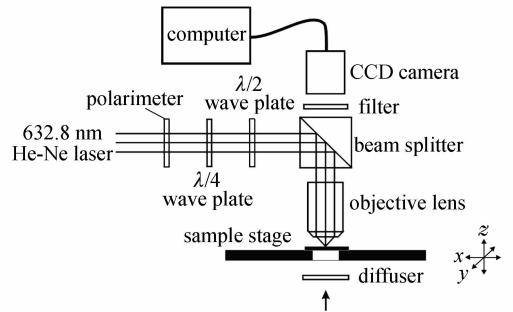


图 2 光镊实验光路原理图

Fig.2 Principle sketch of the optical tweezers experimental setup

为了确定线偏振光的偏振方向, 在光路中加入起偏器, 转动它的偏振方向, 当功率最大时, 即为 He-Ne 激光器线偏振光的偏振方向。在光路中加入 $1/4$ 波片, 将其置于旋转零点(即 $1/4$ 波片的光轴与线偏振光偏振方向重合), 利用光镊稳定捕获一个悬浮于水中的 CaCO_3 晶体微粒(选择不规则形状的粒子, 特别是带有一个明显凸出的, 以此来确定粒子转动角度和方向), 可以看到粒子有转动, 但当粒子转动到一个方位时即停止, 当把光镊移开粒子位置又捕获住粒子, 它都转动到同样的方位。在光镊通道中放置 $1/2$ 波片, 使 $1/2$ 波片旋转 15° , 此时被捕捉的方解石粒子也同方向旋转了 30° , 当 $1/2$ 波片旋转 45° 时, 粒子也同方向旋转了 90° , 如图 3 所示。

当 $1/2$ 波片旋转 α 角时, 通过 $1/2$ 波片后光的偏振方向同方向旋转 2α 角, 粒子为了保持平衡, 所以也同方向旋转 2α 角。实验现象和理论公式(5)一致。力矩可以使晶体粒子转动, 直到晶体的光轴与 x 轴的夹角 $\theta = 0$ 或者 $\pi/2$, 所以线偏振光对双折射粒子有定向的作用。

撤去 $1/2$ 波片, 旋转 $1/4$ 波片, 使光束由线偏振光状态变为椭圆偏振光, 被捕获的 CaCO_3 微粒开始旋转起来。图 4 给出了实验中的一个 CaCO_3 粒子在激光光阱中转动一周的图像, 粒子逆时针方向旋

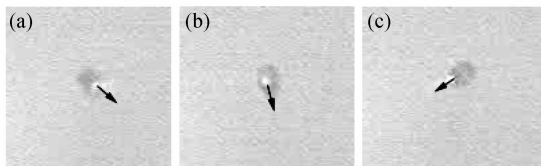


图3 由线性角动量引起的微粒旋转。(a) 初始位置;(b) 1/2 波片旋转 15° , 粒子旋转 30° ;(c) 1/2 波片旋转 45° , 粒子旋转 90°

Fig.3 Rotation of particles with the result of linear momentum. (a) original position; (b) 1/2 wave plate rotating 15° , 30° rotation particles; (c) 1/2 wave plate rotating 45° , 90° rotation particles

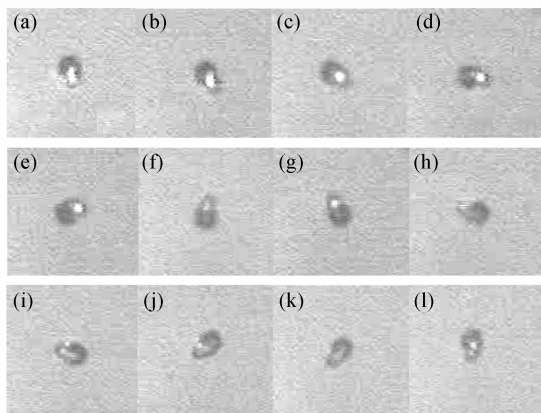


图4 CaCO_3 晶体微粒的光致旋转

Fig.4 Rotation of calcite crystals with the diameter about $4 \mu\text{m}$

转,其微粒直径约为 $4 \mu\text{m}$ 。1/4 波片的光轴与入射线偏振光的偏振方向之间的夹角不同时,粒子的转动速度也不相等^[11]。当 1/4 波片的光轴与入射线偏振光的偏振方向之间的夹角为 45° 时,线偏振光变为圆偏振光,通过波片的光功率恒定,粒子的转动速度也最大。

图 5(a)为四个 CaCO_3 粒子的转动频率与激光功率的关系曲线。图中直线是对各个粒子的数据点进行拟合的结果。可以看出每个粒子的转速总是与激光功率成正比的,对于不同的粒子,得到的直线的斜率都不相同。图 5(b)为对应的 CaCO_3 晶体粒子在 CCD 上的图像。粒子的图像和标尺相比较,标尺每一格为 $10 \mu\text{m}$,得出四个粒子的尺寸分别为 $4 \mu\text{m}$, $5 \mu\text{m}$, $3 \mu\text{m}$, $2.5 \mu\text{m}$ 。图 6(a)为三个 SiO_2 粒子的转动频率和激光功率的关系曲线,粒子转速与激光功率成正比。图 6(b)为对应的 SiO_2 晶体粒子在 CCD 上的图像。粒子的图像和标尺相比较,标尺每一格为 $10 \mu\text{m}$,得出三个粒子的尺寸分别为 $2.2 \mu\text{m}$, $2.0 \mu\text{m}$, $1.5 \mu\text{m}$,实验结果与理论相一致。

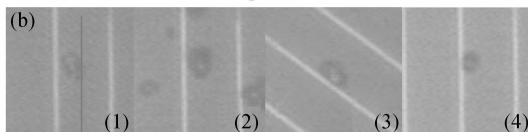
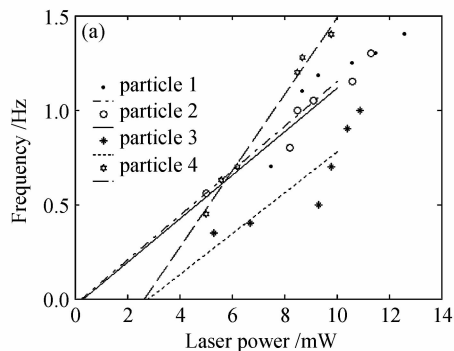


图5 四个不同形状的 CaCO_3 粒子在不同激光功率下的旋转。(a) 四个粒子的转动频率与激光功率的关系;(b) 对应的 CaCO_3 晶体粒子在 CCD 上的图像

Fig.5 (a) Dependence of the rotation frequency of the trapped particle on the laser power for four different shape CaCO_3 particles and (b) their images

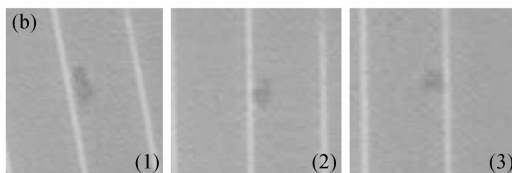
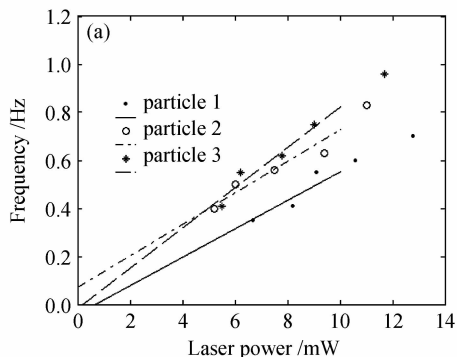


图6 三个不同形状的 SiO_2 粒子在不同激光功率下的旋转。(a) 三个粒子的转动频率与激光功率的关系;(b) 对应的 SiO_2 晶体粒子在 CCD 上的图像

Fig.6 (a) Dependence of the rotation frequency of the trapped particle on the laser power for three different shape SiO_2 particles, and (b) their images

4 误差分析

要对光功率和转动频率的关系曲线进行精确的绘画,实验环境、实验仪器、参数的选择及光路调节等方面都会带来不同程度的影响。误差的主要来源

包括:1) 功率测量的误差,如功率计放的位置的差别会导致测量值的不同;2) 由于外界环境的影响而产生的误差,如样品池内温度变化造成的误差、外界振动引起的误差,尤其是载波片底面的摩擦影响最大;3) 数据处理引起的误差,如采集的数据点个数有限而引起的误差;4) 参数的选择,如实验中粒子一般都为不规则形状,而半径 r 的选择引起的误差。

5 结 论

从光作用的原理出发,给出了利用光束的自旋角动量使粒子旋转的理论推导,并根据理论推导公式,从理论仿真和实验两方面对不同的双折射粒子进行了研究,并将结果与理论相比较。在相同的功率下,实验频率要低于理论频率,这是由不同因素引起的。所得的结果对于光致旋转的实际应用中粒子大小的选择和旋转速度的控制,以及光驱动电动机的实现有一定的参考作用。

纳米机器人的研究引起人们的普遍关注,而光致旋转有望可以用来驱动纳米机器人的微小齿轮和电动机。光致旋转的方法也许还可以用来研究旋转电动机蛋白、流体的微观性质、细胞膜剪切力等。随着科技的发展,以及工艺加工技术和计算机技术的发展,光致旋转将逐步展现其应用前景。

参 考 文 献

- 1 Gao Mingwei, Gao Chunqing, He Xiaoyan *et al.*. Rotation of particles by using the beam with orbital angular momentum [J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, **53**(2):413~417
高明伟,高春清,何晓燕 等. 利用具有轨道角动量的光束实现

- 微粒的旋转[J]. *物理学报*, 2004, **53**(2):413~417
- 2 M. E. J. Friese, T. A. Nieminen, N. R. Heckenberg *et al.*. Optical alignment and spinning of laser-trapped microscopic particles [J]. *Nature*, 1998, **394**(6691):348~350
- 3 Zhu Anding, Liu Yuxiang, Guo Rui *et al.*. Micro-rotor fabricated and rotated by laser [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, **33**(1):10~13
祝安定,刘宇翔,郭 瑞 等. 一种微型转子的激光加工和光致旋转[J]. *光电工程*, 2006, **33**(1):10~13
- 4 Sun Yufen, Li Yinmei, Lou Liren. Photo-induced rotation of particles in laser trapping [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2003, **40**(10):23~28
孙玉芬,李银妹,楼立人. 激光光阱中微粒的光致旋转[J]. *激光与光电子学进展*, 2003, **40**(10):23~28
- 5 Lei Ming, Yao Baoli. Experimental and theoretical studies of optically driven rotation of calcium carbonate particles [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(5):816~819
雷 铭,姚保利. 碳酸钙微粒光致旋转的实验和理论研究[J]. *光子学报*, 2007, **36**(5):816~819
- 6 Timo A. Nieminen, Simon Parkin, R. Norman *et al.*. Optical torque and symmetry [C]. *SPIE*, 2004, **5514**:254~263
- 7 D. N. Moothoo, J. Arlt, R. S. Conroy *et al.*. Beth's experiment using optical tweezers [J]. *Am. J. Phys.*, 2001, **69**(3):271~276
- 8 Zhao Kaihua, Zhong Xihua. Optics (2) [M]. Beijing: Beijing University Press, 1998. 185~186
赵凯华,钟锡华. *光学(下)*[M]. 北京:北京大学出版社, 1998. 185~186
- 9 T. A. Nieminen, H. Rubinsztein-Dunlop, N. R. Heckenberg. Calculation and optical measurement of laser trapping forces on non-spherical particles [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2001, **70**:627~637
- 10 Sun Yufen, Li Yinmei, Lou Liren. Optical rotation of crystal CaCO₃ micro-particle in optical tweezers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(3):315~318
孙玉芬,李银妹,楼立人. 光阱中的 CaCO₃ 晶体微粒的光致旋转[J]. *中国激光*, 2005, **32**(3):315~318
- 11 Wang Kangjun, Li Yinmei, Lou Liren *et al.*. Optical rotation of uniaxial crystal microparticle by polarized light [J]. *Applied Laser*, 2003, **23**(5):295~298
王康俊,李银妹,楼立人 等. 利用偏振光实现双折射微粒的光致旋转[J]. *应用激光*, 2003, **23**(5):295~298