

文章编号: 0258-7025(2005)03-0315-04

# 光阱中的 $\text{CaCO}_3$ 晶体微粒的光致旋转

孙玉芬, 李银妹\*, 楼立人

(中国科学技术大学物理系, 安徽 合肥 230026)

**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, 并在纳米光镊装置上利用线偏振 He-Ne 激光器 (633 nm, 10 mW) 形成了光镊光阱, 利用  $1/4$  波片来改变光镊光束的偏振状态, 在不同的椭圆偏振状态下实现了直径约为几微米的  $\text{CaCO}_3$  晶体微粒的捕获和光致转动。同时利用 CCD 相机和四像限探测器 (QD) 测量了粒子光致旋转的转动频率, 研究了粒子的旋转频率随激光功率的变化关系。结合实验结果从理论上详细讨论了粒子自身的性质, 如厚度、半径和晶体粒子的光轴取向等因素对粒子光致旋转转动速度与激光功率关系的影响。

**关键词** 激光光学; 光致旋转; 光镊; 自旋角动量; 偏振光; 双折射

中图分类号 Q 631 文献标识码 A

## Optical Rotation of Crystal $\text{CaCO}_3$ Micro-Particle in Optical Tweezers

SUN Yu-fen, LI Yin-mei, LOU Li-ren

(Physics Department, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China)

**Abstract** In the paper 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, and then an optical tweezers was formed on nanometer optical tweezers system with a linearly polarized light beam (He-Ne laser 633 nm, 10 mW). A quarter wavelength plate was used to change the polarization of light. The calcite particles (about several  $\mu\text{m}$  in diameters) were then trapped by the optical tweezers under different polarization of light. At the same time optical rotation of the particles was realized. The rotation frequency was measured by CCD camera and quadrant photodiode detector (QD). The dependence of the rotation frequency of the trapped particle on the laser-power was analyzed and experimentally studied for several calcite crystallites with different sizes in the optical tweezers. The effects of several particle parameters such as thickness, radius, and orientation of its optic axis etc. were also discussed.

**Key words** laser optics; optical rotation; optical tweezers; spin angular momentum; polarized light; birefringence

## 1 引言

从 20 世纪 30 年代人们就开始探索实现光致旋转的方法。光镊<sup>[1,2]</sup> 出现后, 利用光镊来研究光致旋转得到了人们的关注。光致旋转可实现对微粒的角向操作, 这是在光镊对微粒的三维操作基础上又增加了一维角向的操作, 对微操作的应用具有重要意义。利用光镊研究光致旋转的优点在于光镊对粒子的无机械接触的捕获和悬浮的功能, 避免了粒子

与样品池底面或其他粒子的接触, 从而避免了它们引起的阻力和干扰。另外, 光镊对粒子的操纵作用, 也为光致旋转的应用带来新的可能。光镊中微粒的光致旋转不但是—种有效的微型马达, 而且可以把旋转着的粒子操作到另外一个粒子附近带动这个粒子转动<sup>[3]</sup>, 从而为微型马达的传动研究和实际应用提供了手段。目前实现光致旋转的方法很多, 但是其实质主要都是利用粒子的双折射特性、吸收特性

收稿日期: 2003-10-22; 收到修改稿日期: 2004-04-06

基金项目: 国家自然科学基金(10072062)和中国科学院知识创新工程(KJ CX1)资助项目。

作者简介: 孙玉芬(1978—), 女, 安徽亳州人, 中国科学技术大学物理系硕士研究生, 主要从事光镊中光致旋转的研究。

\* 通信联系人。E-mail: liyinmei@ustc.edu.cn

和粒子的特殊几何形状,来获得激光光束的自旋角动量、轨道角动量和线性动量等<sup>[3~7]</sup>。

本文结合光镊技术从实验上对双折射  $\text{CaCO}_3$  晶体微粒在偏振激光自旋角动量的作用下的转动进行了研究,并详细讨论了激光功率的大小、双折射粒子的几何性质以及其光轴取向等因素对粒子的旋转速度与激光功率之间关系的影响。

## 2 理论分析

当一束激光通过双折射物质时,一般情况下其偏振状态会发生改变。为了方便讨论,下面具体分析一个圆盘状的  $\text{CaCO}_3$  晶体,假定它的柱面沿  $z$  方向,光轴平行于端面( $x$ - $y$  平面)并与  $x$  轴的夹角为  $\theta$ ,晶体的主折射率分别为  $n_e, n_o$ 。设晶体的前端面  $z = 0$ ,后端面  $z = d$ , $d$  为粒子厚度。一束沿  $z$  轴方向传播的单色激光光场  $E$  可以用两个相互垂直的电矢量表示

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

其中  $E_x, E_y$  为与光束相位有关的复振幅, $k$  为波矢, $\omega$  为光的频率。设  $\hat{i}$  为晶体光轴方向上的矢量元, $\hat{j}$  为  $x$ - $y$  平面内垂直于  $\hat{i}$  的方向上的矢量元,则平行于  $x$  轴和  $y$  轴的矢量元可以表示为  $\hat{x} = \hat{i} \cos\theta - \hat{j} \sin\theta, \hat{y} = \hat{i} \sin\theta + \hat{j} \cos\theta$ ,代入(1)式可以得到入射到晶体前端面( $z = 0$ )上的光场为

$$E = \exp(-i\omega t) \cdot [i(E_x \cos\theta + E_y \sin\theta) + j(-E_x \sin\theta + E_y \cos\theta)], \quad (2)$$

透过晶体以后,在后端面( $z = d$ )上的光场变成

$$E = [i(E_x \cos\theta + E_y \sin\theta) \exp(ikdn_e) + j(-E_x \sin\theta + E_y \cos\theta) \exp(ikdn_o)] \cdot \exp(-i\omega t), \quad (3)$$

由此,T. A. Nieminen 等<sup>[8]</sup>在忽略吸收和反射的条件下,得到了光束作用在  $\text{CaCO}_3$  晶片上的扭转力矩  $\tau$

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

式中  $c$  和  $\epsilon_0$  分别为真空中的光速和介电常数。当入射光是线偏振光( $E_y = 0$  或者  $E_x = 0$ )时,(4)式可以简写为

$$\tau = \left| \frac{c \epsilon_0}{2\omega} \sin kd(n_o - n_e) E_0^* E_0 \sin 2\theta \right|,$$

其中  $E_0$  为线偏振光的复振幅。这个力矩可以使晶体

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<sup>[9]</sup>。

当  $E_x = -iE_y$  时,入射光为左旋圆偏振光,(4)式可以改写为

$$\tau = (c \epsilon_0 / 2\omega) E_0^* E_0 [1 - \cos kd(n_o - n_e)] = (P_{\text{eff}} / \omega) [1 - \cos kd(n_o - n_e)], \quad (5)$$

其中  $P_{\text{eff}}$  为与晶体粒子相互作用的有效激光功率。 $\tau$  的值与  $\theta$  无关。这个力矩将使粒子产生连续恒定的转动。而且当粒子厚度使得  $o$  光和  $e$  光的相位差  $kd(n_o - n_e) = (2m+1)\pi$  时(即粒子薄片相当于一个半波片),粒子可以获得最大的转动力矩。

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  $\Omega$  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

$$\tau = I\Omega = \frac{P_{\text{eff}}}{\omega} [1 - \cos kd(n_o - n_e)] - D\Omega, \quad (6)$$

上式第一项是激光产生的转动力矩;第二项是粒子在粘性液体中转动时受到的阻力力矩,对于圆盘状粒子  $D = 32\eta r^3/3$ , $r$  为粒子的半径, $\eta$  为水的粘滞系数。对于相同半径的圆球形粒子<sup>[10]</sup>  $D = 8\pi\eta r^3$ 。当粒子转速恒定时( $\Omega = 0$ ),对于所讨论的圆盘状粒子,由(6)式可得

$$\Omega = P_{\text{eff}} [1 - \cos kd(n_o - n_e)] / D\omega = 3P_{\text{eff}} [1 - \cos kd(n_o - n_e)] / 32\omega\eta r^3, \quad (7)$$

实验中光频率  $\omega$  和水的粘滞系数  $\eta$  都是一定的。可见对于同一个粒子, $\Omega$  与激光功率成线性关系,其斜率为

$$(3/32\omega\eta) \cdot [1 - \cos kd(n_o - n_e)] / r^3, \quad (8)$$

从(8)式可以看出斜率受粒子的厚度、粒子半径以及光轴的取向等因素的影响。

上面的结论是在光场为平行光的情形下得出的。当光场为会聚光场时,这些因素对微粒旋转运动的影响仍然有效,可以用来定性分析在实验中所观察到的实验现象。

## 3 实验装置和样品

该研究是在纳米光镊系统<sup>[11]</sup>上进行的,实验装置如图 1 所示。光镊光源采用 He-Ne 激光器(Coherent, USA),输出激光功率 10 mW,波长 633 nm,线偏振比例约 500:1。 $f_1, f_2$  组成准直扩束望远镜,把激光扩束,然后由双色镜 BS 反射进入油浸物镜(100 $\times$ , N. A = 1.35, OLYMPUS, JAPAN),

并由它强会聚后形成光镊。Nf(neutral filter)是中性衰减片组,用来改变激光的功率。光路中的 1/4 波片用来调节激光束的偏振状态。设它的光轴方向与线偏振光的偏振方向平行时的位置为该波片的旋转零点。另外,装置中包括两路独立的测量系统用以实现 CaCO<sub>3</sub> 晶体微粒旋转的探测,一路为 CCD 相机(CoolsnapCF mono camera, USA)图像采集系统,它能够连续直观地显示粒子的转动过程,但是 CCD 的时间分辨率较差,不能够满足粒子转速较快时的精度要求,用另一路四像限探测器(QD)测量系统补偿这个缺点。四像限探测器的探测靶面分为四个像限,其输出信号是这四个靶面上的信号进行一定运算的结果<sup>[12]</sup>。当不规则的粒子转动时,其后向散射光的光强分布也以同样的周期随之转动,因此,置于该粒子像平面处的四像限探测器靶面输出的信号带有粒子旋转运动的信息,把四像限探测器输出的信号进行傅里叶变换,即可得到粒子的旋转频率。

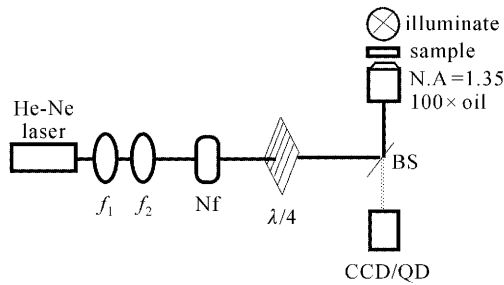


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Experimental setup for optical trapping and rotation of birefringent micro-object

样品采用纯 CaCO<sub>3</sub> 粉末,经过研磨并分离出大小合适的微粒(直径几微米到十几微米),然后将其悬浮于蒸馏水中。再将样品悬浮液置于内孔直径为 6 mm,高度为 1 mm 的硅胶垫圈中,上下表面用盖玻片密封制成实验用的样品池。

### 4 光致旋转实验研究

首先将 1/4 波片置于旋转零点,利用光镊稳定捕获一个悬浮于水中的 CaCO<sub>3</sub> 晶体微粒,可以看到此时粒子没有转动。旋转 1/4 波片,使光束由线偏振状态转变为椭圆偏振状态,可以看到被捕获的 CaCO<sub>3</sub> 微粒开始旋转起来。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<sup>[12]</sup>。

为了便于实验观察,首先把 1/4 波片固定在粒

子的旋转速度最快的位置,再利用衰减片 Nf,改变入射激光功率,通过 CCD 和四像限探测器同时观察并探测粒子的动态过程以及粒子的旋转速度,由此得出一个粒子在相同偏振状态下的转速与激光功率的关系。

图 2 给出了实验中的一个 CaCO<sub>3</sub> 粒子在激光光阱中转动一周的图像,其微粒直径约 3 μm。图 3 (A)是四个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,但是对不同的粒子,得到的直线的斜率都不相同。图 3(B)是对应的 CaCO<sub>3</sub> 晶体在 CCD 上的图像。实验结果与式(7),(8)完全一致。

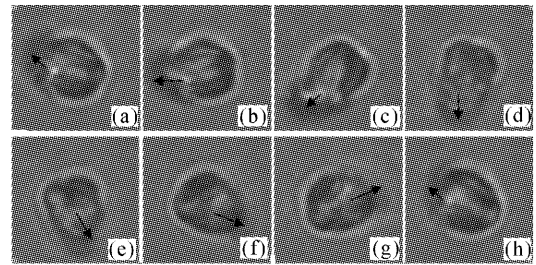


图 2 CaCO<sub>3</sub> 晶体微粒的光致旋转

Fig. 2 Rotation of calcite crystal with the diameter about 3 μm

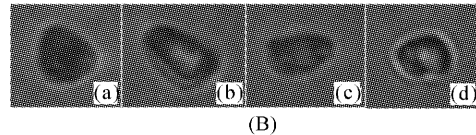
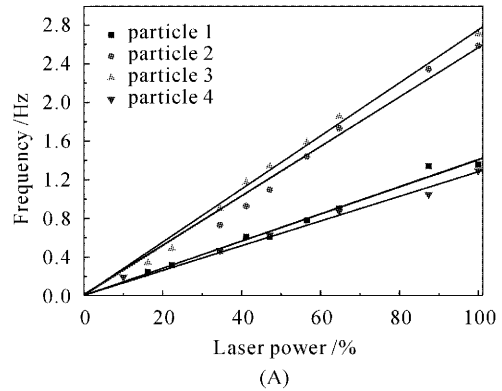


图 3 四个不同形状的 CaCO<sub>3</sub> 粒子在不同激光功率下的旋转

(A) 四个粒子的转动频率与激光功率的关系;  
(B) 对应的 CaCO<sub>3</sub> 晶体粒子在 CCD 上的图像

Fig. 3 Dependence of the rotation frequency of the trapped particle on the laser-power for four different shape particles (A), (B) is their images

## 5 讨 论

粒子转动速度与激光功率成线性关系,但是对于不同粒子其斜率不同。根据(8)式讨论几个影响斜率的主要因素。

### 5.1 粒子厚度的影响

当  $1/4$  波片位置固定时,入射到粒子的激光的偏振状态相同,但是如果粒子在光束传播方向上的厚度  $d$  不同,透过粒子的激光的偏振状态就不相同,由光束传递给粒子的自旋角动量就不相等,(8)式分子的取值范围为  $0 \leq (1 - \cos kd(n_o - n_e)) \leq 2$ ,当  $d(n_o - n_e) = \lambda$  时,光束施加在  $\text{CaCO}_3$  粒子上的转动力矩为 0,粒子不会转动;当  $d(n_o - n_e) = \lambda/2$  时,直线的斜率最大。

### 5.2 $e$ 光的折射率的影响

在理论分析中,只考虑了晶体光轴在  $x-y$  平面内的情形,而在实验中用的  $\text{CaCO}_3$  粒子的光轴不一定恰好在  $x-y$  平面内,这样  $e$  光的折射率将依赖于晶体光轴的取向。假设粒子的形状不变,激光束还是垂直于粒子表面入射到粒子上,只是晶体粒子的光轴与粒子的表面不再平行,而是有一个夹角  $\varphi$ ,此时  $e$  光的折射率  $n(\varphi)$  是  $\varphi$  的函数<sup>[13]</sup>

$$n(\varphi) = [(\cos^2 \varphi/n_o^2) + (\sin^2 \varphi/n_e^2)]^{-2} = n_e \cdot (n_o / \sqrt{n_e^2 \cos^2 \varphi + n_o^2 \sin^2 \varphi}), \quad (9)$$

相应地(8)式中的  $n_o - n_e$  就变为  $n_o - n(\varphi)$ 。这将影响该粒子的转动速度与激光功率的关系。

另外,从(8)式可以看出粒子半径  $r$  对斜率的影响很大, $r$  不仅影响了粒子惯性的的大小,还影响着粒子转动时受到周围粘性流体的阻力的大小,这个阻力与粒子的形状有关,不具有旋转对称性的粒子转动时受到流体的阻力更大,这也是导致实验中不同粒子斜率不同的因素之一。

## 6 结 论

从理论上给出了具有旋转对称性的  $\text{CaCO}_3$  晶体粒子的旋转速度与激光功率的线性关系,讨论了影响其斜率的几个主要因素。并结合光镊技术从实验上对不同形状的粒子进行了研究,得到了相应的

结果。所得的初步结果,对于光致旋转的实际应用中,如何有效地控制粒子的转动速度有一定的参考作用。对复杂形状粒子的细致分析还有待进一步的研究。

### 参 考 文 献

- 1 Yin Lianghong, LI Yinmei, Lou Liren *et al.*. Experimental research of doughnut, a new kind of laser trap [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(3):211~215  
尹良红,李银妹,楼立人等. 空心新型光阱的实验研究[J]. *中国激光*, 2003, **30**(3):211~215
- 2 Li Yinmei, Lou Liren, Cao Chuanshun. The theoretical analysis and experimental simulation of astigmatic elliptic Gaussian beam [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(3):428~432  
李银妹,楼立人,操传顺. 像散椭圆高斯光束的理论分析与实验模拟[J]. *光学学报*, 1999, **19**(3):428~432
- 3 M. E. J. Friese, H. Rubinsztein-Dunlop, J. Gold *et al.*. Optically driven micromachine elements [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2001, **78**(4):547~549
- 4 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
- 5 H. He, M. E. J. Friese, N. R. Heckenberg *et al.*. Direct observation of transfer of angular momentum to absorptive particles from a laser beam with a phase singularity [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1995, **75**(5):826~829
- 6 Anna T. O'Neil, Miles J. Padgett. Axial and lateral trapping efficiency of Laguerre-Gaussian modes in inverted optical tweezers [J]. *Opt. Commun.*, 2001, **193**:45~50
- 7 P. Galajda, P. Ormos. Rotors produced and driven in laser tweezers with reversed direction of rotation [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **80**(24):4653~4655
- 8 T. A. Nieminen, N. R. Heckenberg, H. Rubinsztein-Dunlop. Optical measurement of microscopic torques [J]. *J. Mod. Opt.*, 2001, **48**:405~413
- 9 E. Higurashi, R. Sawada, T. Ito. Optically induced angular alignment of trapped birefringent micro-objects by linearly polarized light [J]. *Phys. Rev. E*, 1999, **59**(3):3676~3681
- 10 S. Juodkazis, S. Matsuo, N. Murazawa *et al.*. High-efficiency optical transfer of torque to a nematic liquid crystal droplet [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **82**(26):4657~4659
- 11 H. T. Chen, Y. M. Li, L. R. Lou *et al.*. High precision measurements in an optical tweezers for studying single biomolecule motion [C]. *SPIE*, 2002, **4536**:75~81
- 12 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
- 13 Zhao Kaihua, Zhong Xihua. *Optics (2)* [M]. Beijing: Beijing University Press, 1998. 172~177  
赵凯华,钟锡华. *光学(下)*[M]. 北京:北京大学出版社, 1998. 172~177