

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
(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。研究了粒子的旋转频率随激光功率的变化关系, 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:双折射; 光致旋转; 自旋角动量; 偏振光

中图分类号:TN249

文献标识码:A

Rotation of Particles by Using the Beam with Spin Angular Momentum

GAO Qiu-juan, ZHU Yan-ying, SHI Jin-shan, LI Ya-lin
(Physics Department, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, 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. The dependence of the rotation frequency of the trapped particle on the laser power was analyzed. The effects of several particle parameters such as thickness, radius, and orientation of its optic axis etc. were also discussed.

Key words: birefringence; optical rotation; spin angular momentum; polarized light

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^[1]在实验上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。自此以来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。

Friese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, 这为制造微机械马达提供了新的手段。目前, 实现光致旋转的方式^[2]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。本文首先在理论上分析了偏振光与双折射微粒相互作用时的角动量传递特性, 并给出了双折射粒子旋转频率和激光功率的关系曲线。

2 理论基础

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。

基金项目:国家自然科学基金(No. 50375138); 国家自然科学基金(No. 50575193)资助项目。

作者简介:高秋娟(1982-), 女, 硕士生, 主要研究方向为光电检测和激光精密测试。E-mail: qiujuan59@163.com

收稿日期:2007-10-10

一个沿 z 轴传播的激光光束可以写成:

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

其中, E_x 和 E_y 为复振幅; ω 表示入射光的圆频率; k 为波矢。设 $E_y = E_x e^{i\varphi}$, 在一般情况下, 光束为椭圆偏振光。我们知道, 一个椭圆偏振光可以写成左旋圆偏振光和右旋圆偏振光的线性叠加, 所以, 椭圆偏振光有如下分解:

$$E = (E_L \hat{e}_L + E_R \hat{e}_R) \exp(ikz - i\omega t) \quad (2)$$

在自由空间中, 式(2)所代表的光场的光强可以写成:

$$I = \frac{c\epsilon_0 E_L^* E_L}{2} + \frac{c\epsilon_0 E_R^* E_R}{2} = I_L + I_R \quad (3)$$

式中, c, ϵ_0 分别为真空的光速和介电常数。对于一个单轴的双折射晶体(如方解石), 如果电场方向垂直光轴方向, 电场感受到的折射率为 n_0 ; 如果电场方向平行光轴方向, 电场感受到的折射率为 n_e 。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 $z_0 + d$, 则入射光表示成:

$$E = [(E_x \cos\theta + E_y \sin\theta) \hat{i} + (-E_x \sin\theta + E_y \cos\theta) \hat{j}] \exp(ikz_0 - i\omega t) \quad (4)$$

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, 则出射场为:

$$E = [(E_x \cos\theta + E_y \sin\theta) \exp(ikdn_e) \hat{i} + (-E_x \sin\theta + E_y \cos\theta) \exp(ikdn_0) \hat{j}] \exp(ikz_0 - i\omega t) \quad (5)$$

由此, 运用 T. A. Nieminen 等^[3] 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是:

$$\tau = (\sigma_{\text{zin}} - \sigma_{\text{zout}}) \frac{I}{\omega} = \frac{c\epsilon_0}{2\omega} \{ i(E_x E_y^* - E_x^* E_y)(1 - \cos\Delta) + \sin\Delta [(E_x E_x^* - E_y^* E_y) \sin 2\theta - (E_x E_y^* + E_x^* E_y) \cos 2\theta] \} \quad (6)$$

其中, $\Delta = kd(n_0 - n_e)$ 。如果入射光是线偏振光($E_y = 0$), 则力矩为:

$$\tau = \frac{c\epsilon_0}{2\omega} \sin\Delta |E_x|^2 \sin 2\theta \quad (7)$$

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^[4]。

如果入射光是左旋圆偏振光($E_y = iE_x$), 则力矩为:

$$\tau = \frac{c\epsilon_0}{\omega} |E_x|^2 (1 - \cos\Delta) = \frac{p_{\text{eff}}}{\omega} (1 - \cos\Delta) \quad (8)$$

如果入射光是右旋的圆偏振光($E_y = -iE_x$), 则力矩为:

$$\tau = -\frac{c\epsilon_0}{\omega} |E_x|^2 (1 - \cos\Delta) = -\frac{p_{\text{eff}}}{\omega} (1 - \cos\Delta) \quad (9)$$

其中, 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。

在黏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:

$$\tau = I\Omega = \frac{p_{\text{eff}}}{\omega} (1 - \cos\Delta) - D\Omega \quad (10)$$

式(10)中, 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, 对于所讨论的圆盘状粒子^[5], $D = 32\eta r^3/3$, r 为粒子的半径, η 为水的黏滞系数。阻力力矩最终将和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 $\tau = 0$), 由式(10)可得:

$$\Omega = p_{\text{eff}} (1 - \cos\Delta) / D\omega = 3p_{\text{eff}} (1 - \cos\Delta) / 32\omega\eta r^3 \quad (11)$$

实验中光频率 ω 和水的黏滞系数 η 都是一定的。

3 自旋角动量引起的光扭矩的仿真分析

由公式(11), $\Omega = 3p_{\text{eff}} (1 - \cos\Delta) / 32\omega\eta r^3$, 式中 $0 \leq 1 - \cos\Delta \leq 2$, 当粒子厚度不满足旋转条件, 即 $\Delta = kd(n_0 - n_e) = 2\pi$ 时, 粒子不会旋转; 当 $\Delta = \pi$ 时, 粒子受到的力矩最大。我们取一般情况, 设 $\Delta = (2m+1)\pi/2$, 则 $1 - \cos\Delta = 1$, $\omega = 2\pi\nu = 2\pi \frac{c}{\lambda}$, 波长 $\lambda = 632.8\text{nm}$, 室温 25°C 时, 查表得黏滞系数 $\eta = 0.894 \times 10^{-3} \text{N} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 转动频率为:

$$n = \frac{\Omega}{2\pi} \quad (12)$$

将 Δ, ω, η 代入式(12)得 $n = 0.55 \times 10^{-14} \frac{P_{\text{eff}}}{r^3}$, 由此

式可知, 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, 取粒子半径分别为 $r_1 = 4.0\mu\text{m}$, $r_2 = 5.0\mu\text{m}$, $r_3 = 3.0\mu\text{m}$, $r_4 = 2.5\mu\text{m}$ 。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 $r_1 = 2.2\mu\text{m}$, $r_2 = 2.0\mu\text{m}$, $r_3 = 1.5\mu\text{m}$ 。由图可以看出转动频率和激光功率成线性关系, 而且半径对转动频率影响很大。

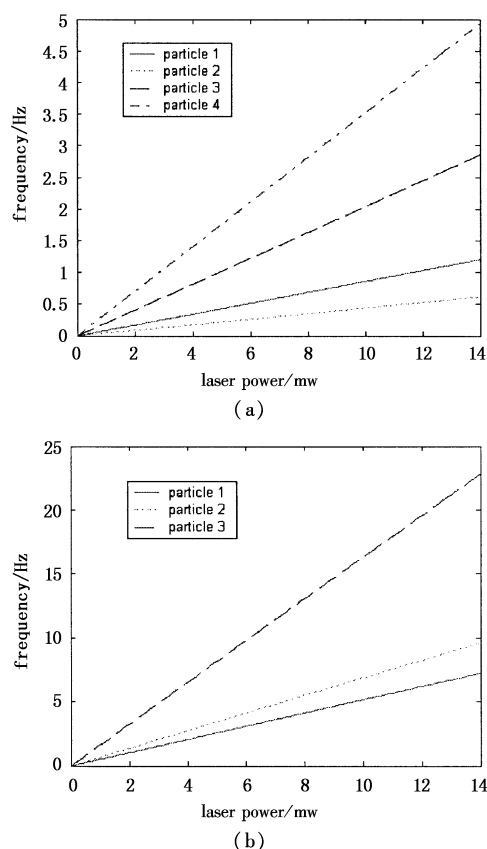


图1 (a)四个 CaCO₃ 粒子的转动频率与激光功率的关系
(b)三个 SiO₂ 粒子的转动频率与激光功率的关系
Fig. 1 (a) dependence of the rotation frequency of the four different shape CaCO₃ particles on the laser power
(b) is three different shape SiO₂ particles

4 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,并通过 Matlab 程序对给定参数条件下双折射微粒上的力矩进行了仿真。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,以及光驱动马达的实现有一定的参考作用。

参考文献:

- [1] Beth R A. Mechanical detection and measurement of the angular momentum of light [J]. Phys. Rev, 1936, 50: 115 - 125.
- [2] 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.
- [3] T A Nieminen, N R Heckenberg, H Rubinsztein-Dunlop. Optical measurement of microscopic torques [J]. J. Mod. Opt., 2001, 48: 405 - 413.
- [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: 348 - 350.
- [5] 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.

本 刊 声 明

《激光与红外》杂志为中国科技论文统计源期刊,中文核心期刊。目前本刊已入编中国科技核心期刊数据库、中文科技期刊数据库、万方数据—数字化期刊群、中国核心期刊(遴选)数据库、中国科技期刊精品数据库、中国学术期刊综合评价数据库(CAJCED)、中国期刊全文数据库(CJFD)、《中国物理文摘》、《中国物理学文献数据库》、台湾华艺等近10家国内知名期刊数据库以及美国CA等全文收录。作者著作权使用费与本刊稿酬一次性给付,不再另行发放。作者如不同意将文章入编,投稿时敬请说明。