

文章编号: 1001-3806(2015)02-0194-04

光驱动马达技术中晶体转子厚度的优化分析

魏勇^{1,2}, 朱艳英², 肖长江^{1,2}

(1. 燕山大学 里仁学院, 秦皇岛 066004; 2. 燕山大学 理学院, 秦皇岛 066004)

摘要: 为了提高碳酸钙晶体转子的转动频率, 采用了激光微束驱动单轴双折射晶体使其产生旋转的方法, 并改进了光致旋转的实验系统。对给定实验参量下的碳酸钙晶体转子的转动频率与其厚度和激光有效功率的变化关系进行了理论分析, 通过实验测得了不同厚度碳酸钙晶体转子的转动频率值, 并对影响转子转动频率的主要因素进行了详细讨论。结果表明, 碳酸钙晶体转子的转动频率与其厚度呈现余弦变化关系, 当入射有效激光功率为 10mW 时, 测得其最大转动频率值为 8.9Hz, 实验结果与理论模拟基本吻合。该结论为微观范围内生物活细胞的颗粒分类、微纳机械转子的性能研究等提供了技术保障。

关键词: 物理光学; 光致旋转; 自旋角动量; 转动频率

中图分类号: TN249; O436.3

文献标志码: A

doi: 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2015.02.010

Optimal analysis of thickness of crystal particles based on optical drive motor

WEI Yong^{1,2}, ZHU Yanying², XIAO Changjiang^{1,2}

(1. College of Liren, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China; 2. College of Science, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: In order to improve the rotational frequency of a CaCO₃ crystal rotor, based on optical rotation caused by the transfer of spin angular momentum from the laser beam to birefringence crystal particles, an experimental system of optical tweezers was designed and further improved with the circular polarized light beam. The relation between the rotation frequency of a calcium carbonate rotor and the thickness was simulated under different laser power. The rotation frequency of the calcium carbonate rotor with different thickness was measured in the experiment. The primary affecting factors of rotation frequency, such as thickness, radius, and orientation of the optic axis were analyzed. The results show that experimental curve of rotation frequency and thickness is periodic cosine function meanwhile the rotation frequency of the crystal rotor is proportional to the effective power. The maximum frequency of the crystal rotor can reach 8.9Hz in the experiment when effective power is 10mW, which is consistent with the theoretical simulation result. The conclusion supply the theoretical basis and technological guarantee for the classification of living biological cells, the study on properties of micro-mechanical rotor in the microscopic fields.

Key words: physical optics; optical rotation; spin angular momentum; rotation frequency

引言

微纳型机器人的开发设计和实际应用一直是人们所关注的焦点, 尤其是随着研究工作的深入, 发现其主要问题在于如何制造出适用的微米数量级元

件来驱动机器人进行工作。目前一般采用的是微机电系统 (micro-eletromechanical system, MEMS)。微型机电系统把智能航空学、微观材料学、电子通信技术等多种学科结合在一起, 研制出了大量的集成器件来满足光通信、生命科学、医疗等方面的需求^[1-2]。MEMS 的核心部件是动力源的提供和输出部分, 研究发现, 可以基于光致旋转技术的实验系统, 将激光束通过光路入射到双折射晶体转子上, 其角动量传递给晶体转子后可以转动, 然后把一个设计好的风车状或者不规则齿轮状的马达转子放在晶体转子附近, 由晶体转子提供的驱动力从而带动马达转子一起转动^[3]。早在 1998 年, FRIESE 等人^[4]就观察到

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50875232); 秦皇岛市科学技术研究与发展计划资助项目 (201101A071; 201101A072)

作者简介: 魏勇 (1982-), 男, 博士, 讲师, 主要从事光微操纵技术和激光精密测试技术方面的研究。

E-mail: weiyongwei@163.com

收稿日期: 2014-05-27; 收到修改稿日期: 2014-06-13

激光与双折射晶体转子作用会导致其角动量发生转移,并通过实验进一步实现了晶体转子的光致旋转过程。SKRYABINA 等人利用光致旋转技术研究了光驱动微纳米型非线性齿轮和磁性微粒之间的刚度等领域^[5]。另外,光致旋转技术在生物学、临床医学等方面也有比较广阔的应用前景^[6]。作者所在课题组利用光镊实验装置实现了单轴双折射晶体转子的转动过程,对不同半径下双折射晶体转子的转动频率进行了多次测量^[7-10]。但是目前尚少有对晶体转子厚度影响其转动频率的情况进行的分析。

为增大微米型马达转子的转动速度,首先需要考虑如何提高晶体转子的转动频率,通过实验发现,晶体转子的厚度是影响其转动频率的主要因素之一。本文中详细分析了提供驱动力的碳酸钙晶体转子的厚度因素对其转动频率产生的影响,通过实验测量了不同厚度碳酸钙晶体转子的转动频率,得出在一定实验条件下其转动频率的最优值。模拟分析和实验结果基本符合,该结论对微型机电制造系统中转子厚度的选取有一定的实际意义。

1 光致旋转理论基础

1.1 理论推导

按照直线方向(z 轴)传播的激光光束 \mathbf{E} 可分解为:

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

式中, E_x 和 E_y 为入射光的复振幅, ω 表示入射光的圆频率, $k = 2\pi/\lambda$ 为波数, λ 为波长, $x-y$ 表示与传播方向垂直的两电矢量所在平面,并且双折射晶体的光轴处于此平面。

对于单轴的双折射晶体薄片(如碳酸钙晶体转子),其厚度为 d , n_o 和 n_e 分别为 o 光和 e 光的折射率。可知晶体转子所受到的转动力矩的大小为^[7]:

$$\begin{aligned} \tau = & \frac{c\varepsilon_0}{2\omega} \{ i(E_x E_y^* - E_x^* E_y)(1 - \cos\Delta) + \\ & \sin\Delta [(E_x E_x^* - E_y^* E_y) \sin 2\theta - \\ & (E_x E_y^* + E_x^* E_y) \cos 2\theta] \} \quad (2) \end{aligned}$$

式中, c 为光速, ε_0 表示介电常数, $\Delta = kd(n_o - n_e)$, θ 是 x 轴与晶体光轴之间的夹角。单轴双折射晶体转子受到溶液的阻力力矩与其转动角速度 Ω 成正比关系,调节入射光为圆偏振光时,则转子旋转时所受到的力矩大小^[11]为:

$$\tau = P_{\text{eff}}(1 - \cos\Delta)/\omega - D\Omega \quad (3)$$

式中,对于圆形的薄片转子满足^[12]比例系数 $D =$

$32\eta^3/3$, η 是溶液的粘滞系数, r 为转子的半径, P_{eff} 表示与晶体转子相互作用的有效激光功率。随着晶体转子在溶液中转动角速度的增大,其转动力矩和所受到的溶液阻力力矩平衡(合力矩 $\tau = 0$),从而使晶体转子的转动频率 f 处于稳定状态,可得:

$$f = \frac{\Omega}{2\pi} = \frac{3P_{\text{eff}}(1 - \cos\Delta)}{64\pi\omega\eta r^3} \quad (4)$$

1.2 数值仿真分析

选取入射光为波长 650nm, 光强范围在 0mW ~ 100mW 的可见光, 室温度保持在 16℃, 通过光致旋转效应可精确测得所配置溶液的粘滞系数为 $\eta = 1.18 \times 10^{-3} \text{ N}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。对于碳酸钙晶体折射率为 $n_e = 1.6557$, $n_o = 1.4852$ 。测得有效激光功率 $P_{\text{eff}} = 10\text{mW}$, 并取其半径 $r = 2\mu\text{m}$, 然后利用 MATLAB 软件进行仿真模拟。图 1 和图 2 分别为碳酸钙晶体转子的转动频率与其厚度和有效激光功率的关系曲线。

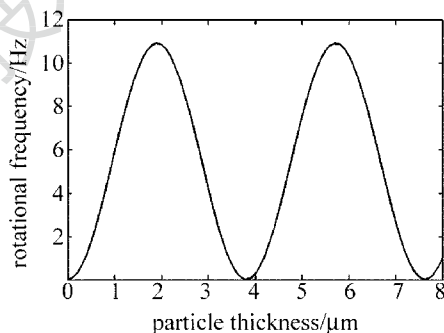


Fig. 1 Relationship between rotational frequency of CaCO_3 particle and thickness

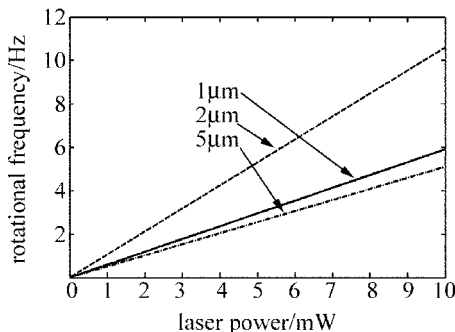


Fig. 2 Relationship between rotational frequency of CaCO_3 particle and the laser power

从图 1 可以看出,碳酸钙晶体转子的厚度与其转动频率呈余弦变化关系。当晶体转子的厚度为 $d = 1.9\mu\text{m}$ 时,或满足条件 $d = 1.9 \times (2n + 1)$ (其中 $n = 0, 1, 2 \dots$) 时,其转动频率可以获得最大值 11.9Hz;而厚度满足 $d = 1.9 \times (2n)$ 时,会发现晶体转子的转动频率 f 始终是 0。从图 2 中可知,若碳酸

钙转子的厚度保持恒定,当入射的有效激光功率增大时,则其转动频率 f 也会随之提高。但是对于厚度不同的碳酸钙晶体转子,模拟得出的直线斜率是有差别的。通过上面的分析可以得出,晶体转子的厚度和有效激光功率对其转动频率的影响较大,只有选择合适厚度的晶体转子才能达到理想的实验结果,这为下一步的实验中各仪器参量和晶体转子尺寸的选择提供了重要的理论依据。

2 光致旋转实验研究

2.1 实验装置及操作过程

实验系统是由波长 650nm、功率可调的半导体激光器是光学匹配元件、奥林巴斯显微物镜、CCD 相机、3 维精密载物台以及 LED 照明光源等组成的光学微操控系统。实验装置如图 3 所示。样品采用定制的各种厚度的碳酸钙转子,将各种厚度的转子悬浮于蒸馏水中制成样品。

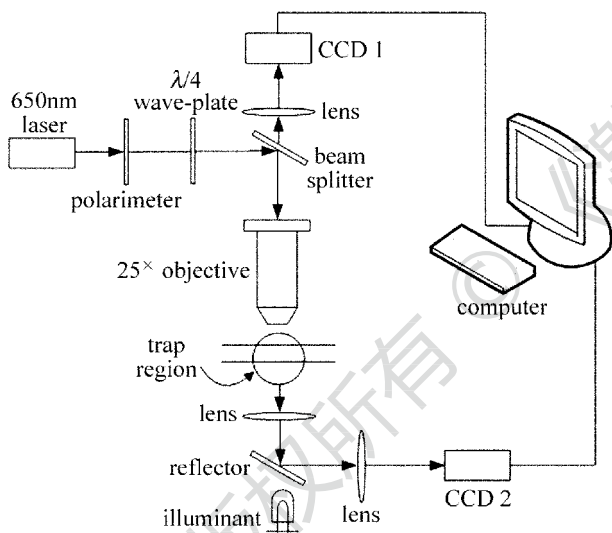


Fig. 3 Experimental setup for optical rotation of birefringent micro-object

光致旋转的操作过程如下:功率可调的激光器发出的激光束,由起偏器获得具有线偏振的光束,经 $\lambda/4$ 波片后改变其偏振的特性,调节波片的光轴与入射光偏振方向成 $\pi/4$ 角成为圆偏振光,经奥林巴斯显微物镜后聚焦形成光学势阱^[9]。照明光通过聚光镜照明样品池,在样品池中选择合适的形状、半径、厚度等条件合适的晶体转子进行捕捉直到所捕获转子的旋转状态合适为止。样品转子被操控后开始旋转的图像由 CCD 相机采集,将所得视频信息进行图片化处理,转化为每秒钟截取合适帧数的图片,接下来对图中晶体转子的旋转信息进行分析,进而可以得

到样品的转动频率。

2.2 实验结果与分析

图 4 所示为厚度为 $2\mu\text{m}$ 的碳酸钙晶体转子的转动过程。实验中观察,碳酸钙晶体转子在圆偏振光的作用下可以产生连续恒定的转动,对于半径相同的晶体转子其转动频率是不一定相同的,分析这应该与转子厚度有关,并且可以通过测量找出转动频率最大的转子。同时也会发现,无论怎么调节入射的有效激光功率,有一些转子始终是静止不动的。调节入射激光的有效功率,通过 CCD 观察并探测晶体转子的转动频率,测得当入射的有效激光功率提高时,晶体转子的转动频率会随之增大。



Fig. 4 Optical rotation of birefringence crystal CaCO_3

2.3 实验数据分析及讨论

调节入射光的有效功率保持为 10mW,测量了 13 组不同厚度下碳酸钙晶体转子转动频率值,对实验数据进行了处理并且绘制了关系曲线。图 5 和图 6 中分别表示碳酸钙晶体转子的转动频率与其厚度

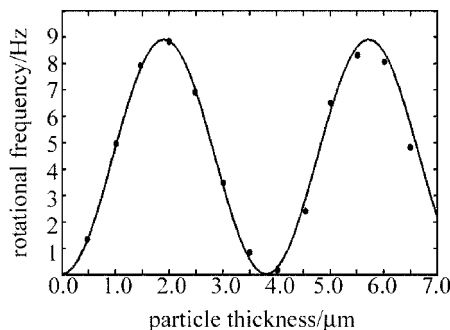


Fig. 5 Experimental curve between rotational frequency of CaCO_3 particle and thickness

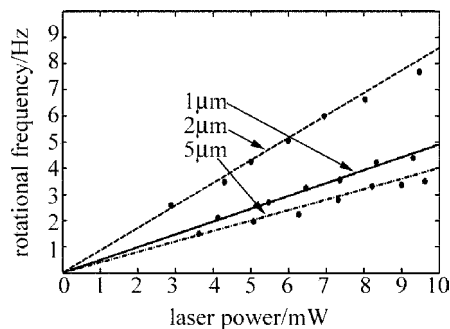


Fig. 6 Experimental curve between rotational frequency of CaCO_3 particle and laser power

和有效激光功率的关系,图中曲线是对各个晶体转子的数据点进行拟合后的图像。

通过比较实验曲线(见图5)和理论模拟(见图1),发现二者基本取得一致,但是当晶体转子厚度比较大时,其转动频率的理论值比实验值略大。从图中可知,碳酸钙晶体转子的最大转动频率为8.9Hz,略小于理论值的11.9Hz。通过分析可知,入射的激光束在进入碳酸钙晶体转子悬浊液界面后有一部分能量损失,实际作用到转子的有效激光功率比实验测定的要小。同时图6表明,碳酸钙晶体转子的转动频率与入射的有效激光功率成正比,测得实验数据与理论模拟数据之间也存在一个微小的波动。经分析认为这是由光束在晶体转子表面的反射以及吸收对其转动频率的影响。由于转子的形状并不是理想的圆盘形,因此,光压对转子的转动频率有一定贡献。在相同的激光有效功率下,当这一部分贡献与双折射造成的驱动方向一致时,表现为转动频率较理论值偏大;当这一部分贡献与双折射造成的驱动方向相反时,表现为转动频率偏小。

3 结论

从利用光束的自旋角动量使晶体转子产生转动的原理出发,对给定实验参量条件下的碳酸钙转子的转动频率与其厚度和激光有效功率的变化关系进行了仿真模拟和分析。结果表明,晶体转子的转动频率与其厚度呈现周期性曲线变化关系,并且转动频率与有效激光功率成正比关系。光致旋转技术为光驱动微机械马达实现的进一步深入研究奠定了基础理论;同时,也为微观范围内生物活细胞的颗粒分类、动态人类胚胎干细胞的微机械性能研究以及微纳机械动力学的设计^[13]等提供了技术支持。

参 考 文 献

[1] WANG S H. Current status and applications of MEMS sensors

[J]. *Micronanoelectronics Technology*, 2011, 48(8):516-522 (in Chinese).

[2] YAN X J, ZHANG K, WU X M, *et al.* Opportunities and challenges of MEMS technology in the environment of intelligent aero-engines[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2012, 27(6):1210-1216 (in Chinese).

[3] SOKOLOV A, APODACAC M M, GRZYBOWSKI A B, *et al.* Swimming bacteria power microscopic gears [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2010, 107(3):969-974.

[4] FRIESE M E, NIEMINEN T A, HECKENBERG N R, *et al.* Optical alignment and spinning of laser-trapped microscopic particles [J]. *Nature*, 1998, 394(5):348-350.

[5] SKRYABINA M N, LYUBINE V, KHOKHLOVA M D, *et al.* Probing of pair interaction of magnetic microparticles with optical tweezers[J]. *JETP Letters*, 2012, 95(11):560-564.

[6] LI L. Research of activity decay of red blood cells in static magnetic field with optical tweezers [J]. *Laser Technology*, 2013, 37(6):799-802 (in Chinese).

[7] GAO Q J, ZHU Y Y, SHI J S, *et al.* Rotation of Particles by using the beam with spin angular momentum [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, 35(10):1505-1510 (in Chinese).

[8] ZHANG J C, ZHU Y Y, DOU H X, *et al.* Analysis of radius effect on optical rotation of birefringent crystal particles [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(1):156-159 (in Chinese).

[9] ZHU Y Y, WEI Y, DOU H X, *et al.* Effect of ellipse degree of incidence light on rotational angular velocity of the crystal particle [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(12):3406-3409 (in Chinese).

[10] JIN L L, ZHU Y Y, WEI Y, *et al.* Generation of high-order Bessel-Gauss beams [J]. *Laser & Infrared*, 2012, 42(3):335-341 (in Chinese).

[11] NIEMINEN A T, HECKENBERG N R. Optical measurement of microscopic torque [J]. *Journal of Modern Optics*, 2001, 48(3):405-413.

[12] SUN Y F, LI Y M, LOU L R, *et al.* Optical rotation of crystal CaCO₃ micro-particle in optical tweezers [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2005, 32(3):315-318 (in Chinese).

[13] CAROLIN W, CARSTEN O, HERGEN B, *et al.* DNA condensation by tmhu studied by optical tweezers, AFM and molecular dynamics simulations[J]. *Journal of Biological Physics*, 2011, 37(1):117-131.