

光阱中光致旋转测量液体温度的研究

魏 强, 秦水介

(贵州大学 贵州省光电子技术及应用重点实验室, 贵州 贵阳 550025)

摘 要:根据偏振光束与双折射性晶体粒子的相互作用原理,对双折射性晶体粒子在激光光阱中的转动频率与粒子所在液体的粘滞系数的关系进行了研究,并利用 MATLAB 数值仿真对其进行了分析。分析结果显示了液体的粘滞系数影响粒子的转动频率,而液体的粘滞系数与液体的温度相关,这样可以通过观测粒子的转动频率的变化得到液体的温度改变,实现对液体温度实时监测。

关键词:光镊;温度;粘滞系数;光致旋转

中图分类号:TN249 **文献标识码:**A

Study on measuring the liquid temperature by testing the optically driven rotation in optical tweezers

WEI Qiang, QIN Shui-jie

(Laboratory for Photoelectric Technology and Application, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: Based on the theory of interaction between polarized light beam and birefringence crystal particles, relationship of the rotation frequency with the liquid viscosity coefficient was studied in the optical tweezers, simulations with Matlab were also made. It came to the conclusion that the rotation frequency of particles is affected by the liquid viscosity coefficient. The liquid viscosity depends on the temperature of liquid. So the change of the temperature can be obtained by observing the rotation frequency for the real-time temperature measurement.

Key words: optical tweezers; temperature; viscosity coefficient; optically driven rotation

1 引 言

液体温度是反映液体自身性质的一个重要物理量,温度的测定在很多科学领域有着重要意义。随着科技的进步,人们越来越关注微小领域的研究,液体微小区域的温度测量受到重视。目前,测定方法有拉曼光谱法和热色液晶法等。粒子在液体中的运动会受到液体阻碍,与液体的粘滞系数有一定的关系;液体的粘滞系数与温度的变化也有一定的关系。我们可以通过液体中粒子的运动来研究液体温度的变化。

光镊技术由 Ashkin^[1]于1986年发明后,它捕获和操控微小粒子的功能使它成为深入研究微观领域的特有手段。澳大利亚 Queensland 大学的 Friese^[2]等人在光镊中利用圆偏光作用碳酸钙微粒,实现了

碳酸钙微粒的光致旋转。在光镊中通过对粒子光致旋转的研究可以得到相应液体微区域的粘滞系数,再来研究液体温度。利用光镊实现光致旋转是在对微粒的三维操作的基础上又增加了一维角向操作,对微操作的应用和微观研究具有更重要的意义。本文主要通过对粒子在光镊中的光致旋转的研究,得出粒子转动频率与液体微区域的粘滞系数和温度关系。通过 MATLAB 数值模拟了粒子转动频率与液体粘滞系数和温度的关系并做了讨论。

基金项目:国家自然科学基金(No. 50375031);2006年度教育部博士点基金项目(No. 20060657002)资助。

作者简介:魏 强(1989-),男,主要从事激光微加工的研究。
E-mail: luckboy_214@126.com

收稿日期:2010-01-04

2 理论基础

当一束偏振光与具有双折射性的微粒相互作用时,其偏振状态会发生改变,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而产生围绕自身光轴的旋转。当偏振光透过晶体后相位会发生一定的改变,其光场也会发生相应的改变。根据 T. A. Niemine^[3] 等的方法,我们可以得到作用在晶体上的扭转力矩^[4]:

$$\tau = \frac{c\varepsilon_0}{2\omega} \{ i (E_x E_y - E_x E_y) (1 - \cos\Delta) + \sin\Delta [(E_x E_x - E_y E_y) \sin 2\phi - (E_x E_y + E_x E_y) \cos 2\phi] \} \quad (1)$$

其中, c 和 ε_0 分别为真空中的光速和介电常数; ω 为光频率; ϕ 为入射偏振光的快轴与晶体光轴的夹角; $\Delta = kd(n_0 - n_e)$ 为相位差。

当入射光为圆偏振光: $E_x = \pm iE_y$, 粒子获得的扭转力矩为:

$$\tau = \frac{P_{\text{eff}}}{\omega} (1 - \cos\Delta) \quad (2)$$

其中, P_{eff} 为有效激光功率。

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 。其中对于圆盘状粒子的系数 $D = 32\eta r^3/3$, 其中 r 为粒子半径, η 为液体粘滞系数。当粒子恒定运动时,激光产生的转动力矩和阻力力矩平衡:

$$\frac{P_{\text{eff}}}{\omega} (1 - \cos\Delta) - D\Omega = 0 \quad (3)$$

其中,第一项为激光产生的转动力矩;第二项为阻力力矩。

最后得出粒子转动频率与液体粘滞系数的关系为:

$$n = \frac{\Omega}{2\pi} = \frac{P_{\text{eff}}(1 - \cos\Delta)}{2\pi\omega D} \quad (4)$$

3 数值仿真与分析

3.1 粒子转动频率与液体粘滞系数的关系

选用激光器的有效频率为 10 mW; 激光波长为 623.8 nm, $\omega = 2\pi \frac{c}{\lambda}$; 选用粒子的半径选为 2 μm , 相位差为 $\Delta = (2m + 1)\pi/2$ 。转动频率与液体粘滞系数的关系: $n = 0.0063 \frac{1}{\eta}$, 从图 1 中可以得出转动频率与粘滞系数的关系, 可以利用 CCD 相机图像采集系统和四象限探测器 (QD) 测量系统测量粒子的转动频率, 由已知粒子的转动频率可以得出此时液体

粒子所在微区的粘滞系数。由此可以得出同种液体不同温度下的液体粘滞系数以及相同温度下不同液体的粘滞系数的差别。

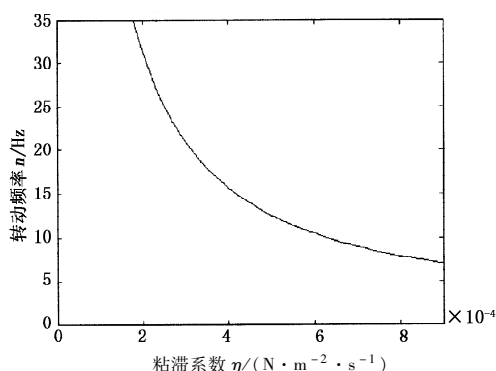


图 1 转动频率与液体粘滞系数的关系

Fig. 1 the relationship of rotation frequency of particle and the liquid viscosity coefficient

3.2 液体粘滞系数与温度的关系

已知对于任意液相的体系,其动力粘滞系数随温度变化的规律是随着温度 T 的上升呈指数衰减的,可表示为^[5-6]:

$$\eta = \eta_0 e^{\frac{\Delta W}{KT}} \quad (5)$$

其中, η_0 和 ΔW 对于某一液体为特定常数; K 为波尔兹曼常数。通过计算可得出 $\eta_0 = 0.2445 \times 10^{-6}$, $\Delta W = 0.3355 \times 10^{-19}$ 。

图 2 显示液体的粘滞系数随温度的变化关系。粘滞系数随温度上升而衰减。温度与粘滞系数一一对应。由温度可以确定对应的液体粘滞系数。

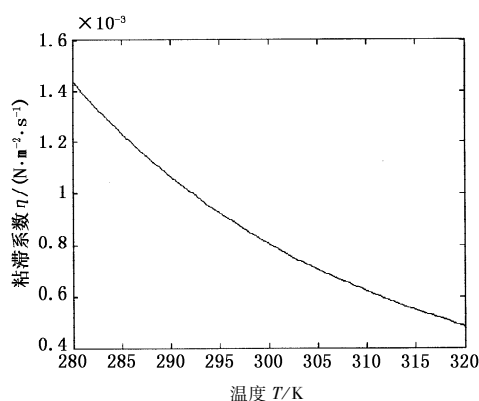


图 2 粘滞系数与温度的关系

Fig. 2 the relationship of the viscosity coefficient and temperature

3.3 粒子转动频率与温度的关系

通过粒子的转动频率与粘滞系数的关系,可以得到转动频率与温度的关系:

$$n = 0.0063 \frac{1}{\eta_0 e^{\frac{\Delta W}{KT}}} \quad (6)$$

图 3 显示粒子的转动频率与液体温度的变化关

系。粒子的转动频率随着温度的增加呈指数增加。由测得粒子的转动频率的变化可以得到此时液体对应温度的改变。

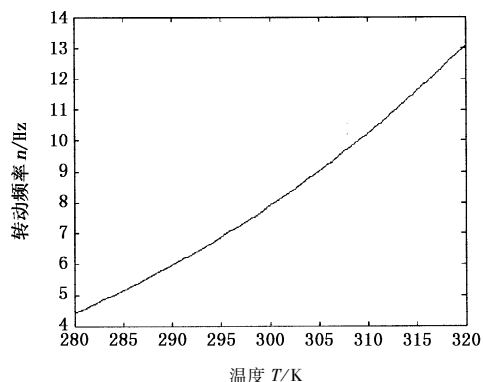


图3 转动频率与温度的关系

Fig. 3 the relationship of rotation frequency of particle and the temperature

4 结论

通过光镊操作旋转微小粒子,研究粒子所在区域的液体粘滞系数。在光镊中,粒子受到激光转动力矩的作用转动,同时受到所在液体的粘滞阻力作用,即一个阻力力矩。当阻力力矩与激光转动力矩平衡时,粒子稳定的旋转。由粒子的转动频率,可以得到液体的阻力力矩,从而获得液体在该区域的粘

滞系数。由于实验条件和粒子的形状等因素,得出的液体粘滞系数的精度受到限制。获取液体微小区域的粘滞系数,对一些生物学的研究有一点意义,例如血液和细胞外液的粘滞系数一定程度上反映生物的生理状态。

参考文献:

- [1] A Ashkin, J M Dziedzic, J E Bjorkholm, et al. Observation of a single beam gradient force optical trap for dielectric particles[J]. Opt. Lett., 1986, 11(5): 288 - 290.
- [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: 348 - 350.
- [3] T A Nieminen, N R Heckenberg, H Rubinsztein-Dunlop. Optical measurement of microscopic torques[J]. J. Mod. Opt., 2001, 48: 405 - 413.
- [4] 孙玉芬, 李银妹, 楼立人. 光阱中的 CaCO_3 晶体微粒的光致旋转[J]. 中国激光, 2005, 32(3): 315 - 318.
- [5] 张文静, 李银妹, 楼立人, 等. 应用光镊技术测量液相微区温度[J]. 中国激光, 2006, 5(5): 663 - 666.
- [6] 李椿, 章立源, 钱尚武, 等. 热学[M]. 北京: 人民教育出版社, 178, 313.