

doi:10.3788/gzxb20184702.0206001

面向实用化的片上光阱传感单元

葛晓佳¹, 沈瑜², 苏鹤鸣¹, 佘玄¹, 胡慧珠¹

(1 浙江大学 光电科学与工程学院 现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027)

(2 浙江科技学院 理学院, 杭州 310023)

摘 要:提出并实现了一种片式光阱传感单元.利用基片上的 V 型槽保证双光纤光阱的对准,利用压电元件振动使微球与基片脱离,实现了空气环境中对 10 μm 微球的捕获,捕获后的微球位置稳定性达到 0.12 μm .在此基础上,设计制作了可预置少量微球的封闭微型腔,实现了光阱传感结构的微型化和集成化,解决了光阱中单微球的高效可重复起振难题,为实现实用化的光阱传感器奠定了基础.

关键词:光纤光阱;悬浮微球;封闭微型腔;静态稳定性;重复起振

中图分类号:O439

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)02-0206001-7

Practical Sensing Chip Based on Optical Trap

GE Xiao-jia¹, SHEN Yu², SU He-ming¹, SHE Xuan¹, HU Hui-zhu¹

(1 State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, College of Optical Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

(2 School of Science, Zhejiang University of Science & Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract: A chip of fiber optical trap was investigated, using the V-grooved SiO_2 platform to align the fibers and the piezoelectric components to break the constraints between particles and the substrate. After successfully trapping the particle with 10 μm diameter in the air, the axial fluctuation of the particle reaches to the submicron scale (0.12 μm). Furthermore, combined with the micromachining technology, this paper realizes a sealed micro-cavity to contain few particles that not merely achieves integration into lab-on-a-chip environments but also implements the reproducible launching of a single particle, promoting the application for engineering of optical trap sensing technique.

Key words: Fiber optical trap; Levitating particle; Sealed micro-cavity; Static stability test; Reproducible launching

OCIS Codes: 020.7010; 060.2310; 120.4640; 130.3120

0 引言

光阱作为一种重要的研究工具,提供了方便、无接触式的操控和测量技术,被广泛运用于物理、生物、化学等科学研究领域^[1].光阱不仅能悬浮微球,还能控制其移动,有些光阱系统甚至可以同时控制多个微球,并且能与强大的分析技术相集成,是精密测量领域的研究热点.当前传统的基于自由空间中单光束梯度力的商业型光阱通常使用体积较大的光学系统,相比之下,光纤光阱更容易集成于小尺寸的基片上,其简单、高效、低成本和实用化的特点更贴近实际应用的需求.1970年,Ashkin^[2]最早提出利用高数值孔径的物镜聚焦激光束形成光阱,实现对微球的捕获.20年后,A. Constable^[3]等首次提出双光纤光阱,使用毛细管来支撑和固定两根相对的光纤的位置,以保证其对准,形成稳定的捕获区.此后,很多研究学者探索了各种不同的光纤光阱结构,如使用具有特殊结构的光纤^[4-6],使用光纤阵列^[7],结合特殊的光学元件^[8],使用非高斯光束^[9-10]等.

基金项目:国家自然科学基金(Nos.11304282,10947104),中央高校基本科研业务费专项资金(No.2016XZZX004-01)资助

第一作者:葛晓佳(1993-),女,硕士研究生,主要研究方向为光镊技术及其在光学传感方面的应用.Email:gexiaojia@zju.edu.cn

导师(通讯作者):胡慧珠(1979-),男,教授,博士,主要研究方向为光学惯性导航及精密测量.Email:huhuihu2000@zju.edu.cn

收稿日期:2017-09-26;录用日期:2017-11-14

<http://www.photon.ac.cn>

光纤光阱也同样应用于很多领域,如与微流控技术相结合,在聚二甲基硅氧烷(Polydimethylsiloxane, PDMS)集成芯片上安装垂直于微流通道的双光纤^[11];光学捕获和操控微小的玻璃棒^[12];利用单个细胞测量喇曼光谱^[13];操控固体和液体气溶胶^[14]等.此外,双光纤光阱同时存在多个不同位置的稳定捕获点^[15],这为其应用带来巨大的潜能.

2005年,Jensen-McMullin^[16]等提出了四光纤的光阱结构,装置中的其中两根单模光纤共线对准,间距130~170 μm ,用来捕获微球,另一根单模光纤用于照明,第四根多模光纤用来进行光学探测,该装置实现了在液体环境下对微球的捕获、动作控制、位置传感、荧光探测等,是多功能集成捕获平台的重要里程碑.近年来,光纤光阱已经展现出了巨大的潜力,利用被光阱悬浮的微球,可以实现力、加速度等信号的传感^[17-19],目前相关的研究已经实现了高达 10^8 的机械品质因数^[20],甚至超过了最先进的纳米机械设备^[21].浙江大学已经实现了液浮式光阱加速度传感器^[22],并利用残余重力法^[23]进行光阱刚度的标定等.但是上述研究中均使用大量微球进行捕获,实验过程中需要反复补充,这在工程应用中显然是无法适用的.光阱传感单元的集成化和单微球的高效可重复捕获(reproducible launching)是实现一个实用化光阱传感器的关键问题^[19].本文就这一问题,提出并实现了一种新型的光阱传感单元,在空气环境下实现了基于双光纤光阱结构的片式传感单元.基片上的V型槽保证双光纤光阱的对准,压电元件振动使微球挣脱与基片之间的范德瓦尔斯力脱离基片,进入双光纤光阱的捕获区域,利用光阱力将其捕获并且稳定悬浮,通过静态稳定性测试得到捕获后的微球位置稳定性达0.12 μm .此装置真正实现了空气光阱传感单元的片上集成.在此基础上与微加工技术结合,制作出容纳少量微球(小于5个)的封闭微型腔,将微球束缚在限定的区域内,实现了对单个微球的重复起振,克服了在实验中反复补充大量微球的问题,封装后可重复使用,提高了片式传感单元的工程适用性,并且利用封闭腔可以减小外界空气扰动对微球的影响,这对于需要高精度测量的领域具有重要的应用价值.本文提出的片式光阱传感单元的设计方法,可以直接应用于基于光阱的真空高精度力学测量^[24]、室温下的量子光学^[25-26]、涨落定理的检验^[27],以及光学反馈和腔冷却^[28-29]等研究中.

1 光力传感测量原理

传统的空间光阱使用单激光束聚焦来捕获束腰附近的微球,而在双光纤光阱中,两根光纤相距一段距离并且同轴对准,两束相向传播的激光束从两根光纤中发出用以捕获微球.光阱力源于激光束和样品的动量交换,激光束通过样品时,通过光与样品的相互作用,导致样品受到力的约束.这个力可以分解成两种:散射力 F_s ,它使样品获得与激光传播方向相同的动量;梯度力 F_g ,它源于光场梯度的存在,使样品沿着光强最大的地方移动^[30],如式(1)、(2)所示.

$$F_s = \frac{n_1 P}{c} \left\{ 1 + R \cos 2\theta - \frac{T^2 [\cos(2\theta - 2\gamma) + R \cos 2\theta]}{1 + R^2 + 2R \cos 2\gamma} \right\} \quad (1)$$

$$F_g = \frac{n_1 P}{c} \left\{ R \sin 2\theta - \frac{T^2 [\sin(2\theta - 2\gamma) + R \sin 2\theta]}{1 + R^2 + 2R \cos 2\gamma} \right\} \quad (2)$$

式中 P 为入射光功率, $n_1 P/c$ 为介质中每秒的入射光动量, θ 和 γ 分别为入射角和折射角, R 和 T 分别是介质表面的菲涅尔反射和折射系数.

由两束对射激光产生的散射力相互抵消,梯度力与微球重力相平衡,此时微球被稳定捕获,通过改变两边的光功率可以改变微球的位置.如图1(a)所示,对于双光纤构成的光阱而言,当两束激光光功率 $P_1 = P_2$ 时,微球位于中点位置.改变功率大小,使 $P_1 < P_2$,则微球受到右侧光束的光阱力增大,粒子向左偏移(图1(b)),反之亦然(图1(c)).

当微球位于中点位置时(图1(a)),若外界有加速度,微球将产生位移,假设位移量为 x ,线性系数

(光阱刚度)为 k ,微球的质量为 m ,由于光阱力在一定范围内是线性的,系统加速度可以表示为

$$a = kx/m \quad (3)$$

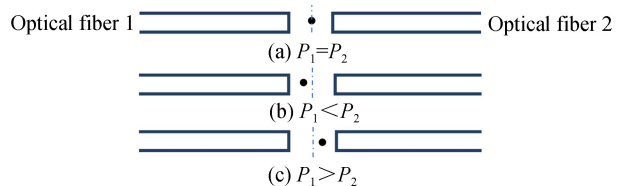


图1 光功率与微粒位移关系示意图(虚线表示中点位置)
Fig.1 Schematic diagram of the relationship between optical power and the displacement of particle(the dotted line representing the midpoint)

微粒的位移与光阱线性范围内的线性系数 k 成反比,这就是说,同一个加速度下,光阱线性系数越小,微粒位移越大,测量的灵敏度越高.若改变两光束的输出功率 P_1 、 P_2 ,使微粒沿着光轴向偏离方向的反方向移动,直至恢复到原平衡位置.此时出射的两束光存在功率差 $\Delta P = P_1 - P_2$,由式(1),(2)可知,光阱力 F 和功率 P 之间是正比关系,根据 ΔP 同样也可以获取力、加速度等信息.

2 开放式片式光阱传感单元

片式光阱传感单元的主体是边长为 2 cm 的正方形二氧化硅玻璃基片,图 2(a)为其三维结构示意图,基片的厚度为 1 mm,上表面有两条呈十字交叉状的 V 型槽,其截面是边长约为 205 μm 的等边三角形,用来实现光纤的高精度对准和固定.利用带成像系统的光纤耦合台将直径 125 μm 的单模光纤平行放入 V 型槽内,图 2(b)为放大的基片实物图,光纤的径向对准偏差小于 2 μm .

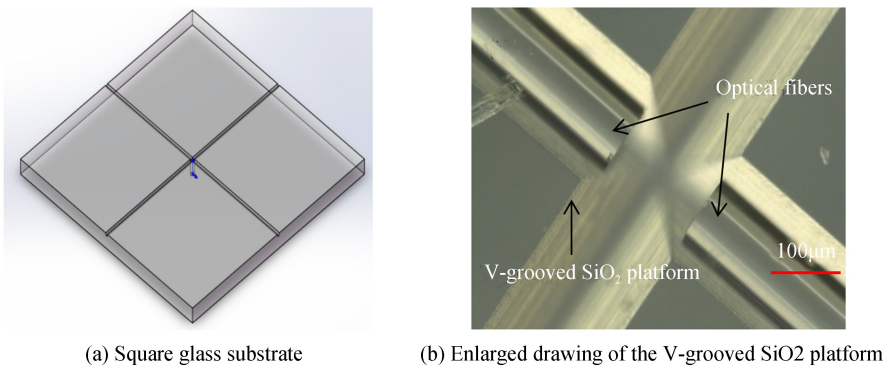


图 2 片式光阱传感单元结构图

Fig.2 Structure drawing of a chip of fiber optical trap

在本实验中,两根光纤的一端放置于基片的 V 型槽中,另一端连接到激光光源(波长 980 nm),将微球(硼硅酸盐材质,直径 10 μm ,折射率 1.56)置于基片中央,利用紫外胶将基片固定于压电元件的上表面,利用驱动电源驱动压电元件振动(40 kHz),使微球脱离基片抛入空中,微球经过光阱区域时被捕获并稳定悬浮.图 3 为微球在空气中被捕获的成像图.为了提高捕获效率,将光功率调至最大(约 330 mW),待微球被捕获后,依次减小两侧的光功率,可以得到微球逃逸时的光功率^[31].由于每次被捕获微球的个体差异性、外界环境等因素,实验测得的逃逸光功率波动范围较大,在 180~270 mW 之间.另外光纤对准的径向偏移和角度偏移,也会影响微球逃逸光功率.若能有效控制上述因素的影响,依次减小两束激光的光功率,得到准确的微球逃逸光功率,即可以参考此光功率值,在实验中减小捕获光功率,以减小光阱刚度来提高传感单元的测量灵敏度.

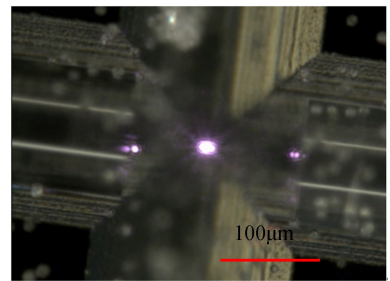


图 3 空气中捕获微球

Fig.3 Drawing of the optical trapped particle in air

3 封闭微型腔结构设计与制作

如图 3 所示,微球置于基片中央时,由于没有空间限制,微球随着压电元件的振动,洒落于基片的任意位置,不仅污染光纤及 V 型槽,而且降低了微球被捕获的效率,同时难以实现对同一微球的重复捕获,是研制实用的光阱传感器的关键问题^[19].为解决这一问题,设计制作了封闭微型腔,用于放置少量微球,并且将其束缚在限定的区域内,封装后可重复使用,大大提高了其实用性,推进了光阱传感技术在工程技术领域的发展.

3.1 结构设计方案

将一小段方形毛细管(外边长 300 μm ,内边长 50 μm ,熔融二氧化硅材质),放在两根对准的光纤中间,少量微球封装进入毛细管后,毛细管开口处分别由光纤端面密封,此时毛细管内壁与光纤端面就构成了储存微球的封闭空间,如图 4.利用压电元件起振装置,使光阱传感单元封闭腔内的微球脱离内壁,进入双光纤光阱中被捕获,随后进行传感测量;当传感单元不工作时,微球则存储在封闭腔内,以备下次起支捕获使用.

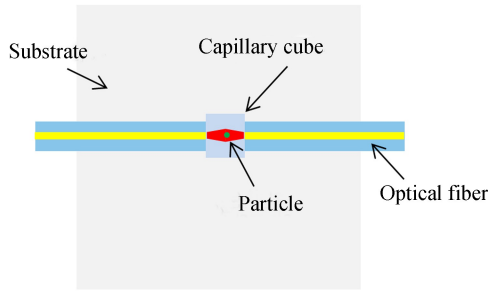


图 4 封闭微型腔结构示意图

Fig.4 Structure diagram of the sealed micro-cavity

3.2 封闭微型腔光阱传感单元制作

将方形毛细管放置于 $20\text{ mm} \times 20\text{ mm} \times 0.31\text{ mm}$ 的正方形石英玻璃片中央,利用紫外固化胶将其固定,用机械切割获得长 20 mm ,高 $310\text{ }\mu\text{m}$,宽 $200\text{ }\mu\text{m}$ 的操作棒,上面附着 $200\text{ }\mu\text{m}$ 长的方形毛细管通腔(简称通腔),如图 5,如此便可通过控制操作棒,方便地操控通腔。

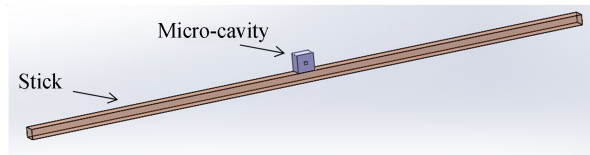


图 5 微型通腔三维结构示意图

Fig.5 3D structure diagram of the micro-cavity

在原有的十字交叉状的 V 型槽基片上重新加工一个矩形通槽,用于放置上述得到的通腔结构.为了让通腔的中心与光纤的纤芯对准,按实际几何关系得到矩形通槽的槽深为

$$d = l + \frac{b}{2} + \left(\frac{\sqrt{3}}{2}x - 2r\right) \quad (4)$$

式中 d 为矩形通槽的深度, l 为操作棒的高度 ($310\text{ }\mu\text{m}$), b 为毛细管的外边长 ($300\text{ }\mu\text{m}$), x 为十字 V 形槽的边长 ($205\text{ }\mu\text{m}$), $2r$ 为单模光纤裸纤直径 ($125\text{ }\mu\text{m}$), $\frac{\sqrt{3}}{2}x - 2r$ 为光纤纤芯到基片上表面的距离。

以上步骤都完成后,进行微球的放置、光纤与通腔的对准与安装.利用拉锥毛细管探针,其中一端是直径均匀变化的玻璃尖端,尖端最小直径可达几微米,直径小于 $50\text{ }\mu\text{m}$ 的长度可达 $2\text{ }000\text{ }\mu\text{m}$,如图 6.用探针尖端蘸取少量微球,然后将微球转移至通腔内.实验中一般可以控制的微球装载数量在 $1 \sim 5$ 个.将光纤安装在 V 型槽内,通过控制操作棒,将通腔置于矩形通槽与 V 型槽的交叉点处,图 7(a)为安

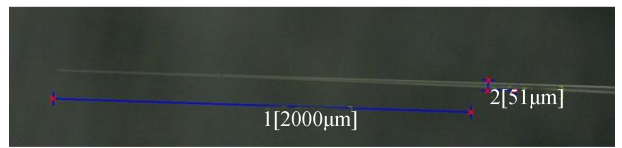
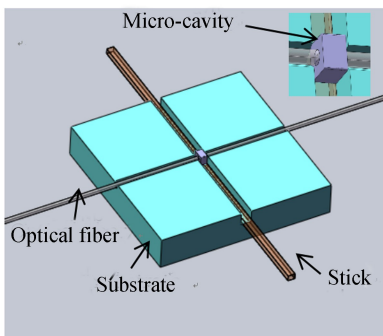
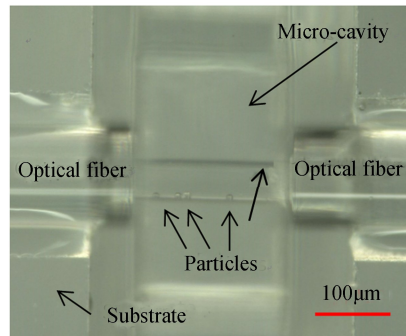


图 6 拉锥毛细管探针

Fig.6 Capillary probe



(a) 3D structure drawing



(b) Enlarged drawing of the sealed micro-cavity

图 7 封闭微型腔光阱传感单元结构

Fig.7 Structure drawing of a chip of fiber optical trap with sealed micro-cavity

装完成后的结构示意图,右上角为中央的局部放大示意图.图 7(b)为基片中央的放大实物图,中间的通腔中装载了 5 个微球.通过改变压电元件驱动电源的输出功率,改变施加于基片上的振动,实现对其中单独一个微球的重复起振.

4 结果与分析

由于存在光源自身波动、微粒布朗运动等因素的影响,即使在光轴方向没有任何加速度输入,被捕获的微球也会在其被捕获位置附近进行小范围的运动.微球的这种波动会影响到后期测量的精度,所以需要成片式光阱传感单元中微球被稳定捕获时的微小波动量进行测量,即静态稳定性测试.

如图 8 所示,利用自行搭建的实验平台进行静态稳定性测试.捕获光由激光器的尾纤输出,接入光隔离器中,再接入光分束器的 99%端,两根 100%端分别与片式光阱传感单元的两根光纤熔接,而 1%端接入光功率计中,用于监测耦合对向光纤输出激光的光功率波动情况.探测系统用来获取微球位置波动信息,实验中利用对显微镜图像进行离线处理实现.

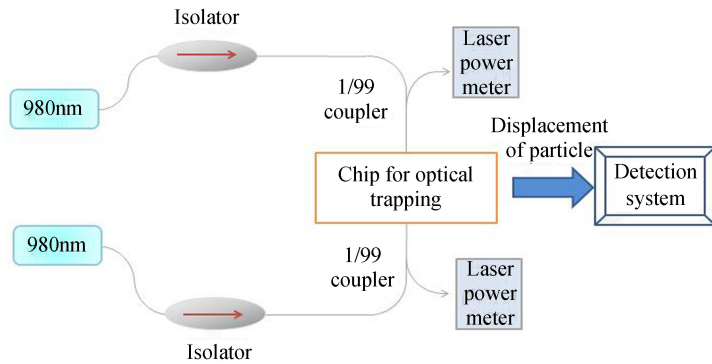


图 8 静态稳定性测试实验平台系统图

Fig.8 Schematic diagram of experiment stage for static stability test

微球位置的静态稳定性测试方法主要原理是利用图像的自相关算法得到粒子的位置波动信息^[32].其算法思路为:选取捕获视频的第一帧图像作为标准图像,在标准图像上选出微球完整图像的最小区域作为参考;与各帧图像作自相关运算,得到相关矩阵;求解相关矩阵的重心位置,即该帧图像中微球相对于标准图像帧的像素位移;利用显微镜自带的校准标尺作为像素与长度的单位转换基准,得到微球位置的实际变动量.用上述方法,处理激光输出光功率为 300 mW、光纤间距为 167 μm 时的微球稳定捕获的视频,得到被捕获微球在光轴方向上的位置波动曲线(如图 9),其位置波动标准差(STD 值)为 0.12 μm .根据上述实验条件,计算出光阱刚度设计值为 4.06×10^{-6} N/m,取最小检测位移量为 0.12 μm ,得到加速度分辨率为 37.10 mg,当光阱线性度为 5%时测量量程为 $-9.28 \text{ g} \sim +9.89 \text{ g}$.

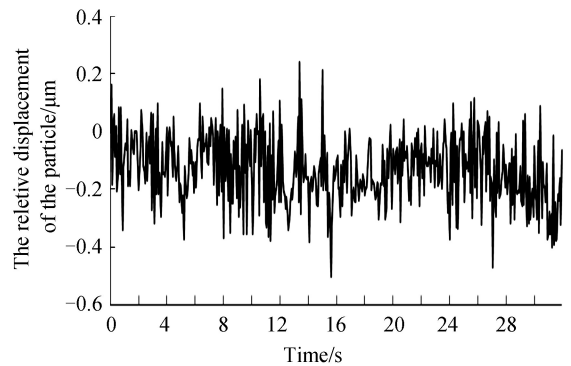


图 9 微球的位置波动曲线

Fig.9 The displacement fluctuation of particle

封闭微型腔结构限制了微球的上抛与下落的空间,提高了微粒起支的可控性,但另一方面,目前的封闭微型腔结构使得微球起振后没有足够的空间和时间减速,从而增大了捕获所需的光阱刚度.本课题组在 330 mW 的光功率下进行了多次微球起振实验,均未实现捕获.未进行更高光功率的捕获实验,因为与单纯通过提高光功率以实现微球可控捕获的途径相比,更好的途径是进一步优化封闭微型腔结构.

5 结论

本文实现了空气光阱传感单元的微型化和集成化,并且设计制作了可预置少量微球的封闭型光阱传感用微型腔,解决了光阱中单微球的高效可重复起振难题,为实现实用化的光阱传感器奠定了基础,对光阱加

速度计、光力传感器等光阱传感技术的发展有参考意义。

参考文献

- [1] LI Yin-mei, GONG Lei, LI Di, *et al.* Progress in optical tweezers technology[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, **42**(1): 0101001.
李银妹, 龚雷, 李迪, 等. 光镊技术的研究现状[J]. 中国激光, 2015, **42**(1): 0101001.
- [2] ASHKIN A. Acceleration and trapping of particles by radiation pressure[J]. *Physical Review Letters*, 1970, **24**(4): 156-159.
- [3] CONSTABLE A, KIM J, MERVIS J, *et al.* Demonstration of a fiber-optical light-force trap[J]. *Optics Letters*, 1993, **18**(21): 1867-1869.
- [4] LYONS E, SONEK G. Confinement and bistability in a tapered hemispherically lensed optical fiber trap[J]. *Applied Physics Letters*, 1995, **66**(13): 1584-1586.
- [5] WANG Lei. The capture character and vibration sensor character research of optical fiber tweezers[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2011.
王镭. 光纤光镊的捕获特性与振动传感特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2011
- [6] GHERARDI D, CARRUTHERS A, ČIŽMÁR T, *et al.* A dual beam photonic crystal fiber trap for microscopic particles [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, **93**(4): 041110.
- [7] TAM J, BIRAN I, WALT D. An imaging fiber-based optical tweezer array for microparticle array assembly[J]. *Applied Physics Letters*, 2004, **84**(21): 4289-4291.
- [8] ONO K, KANEDA S, SHIRAIISHI T, *et al.* Optofluidic tweezer on a chip[J]. *Biomicrofluidics*, 2010, **4**(4): 43012.
- [9] VOLPE G, SINGH G, PETROV D. Optical tweezers with cylindrical vector beams produced by optical fibers[C]. SPIE, 2004: 283-292.
- [10] METZGER N, WRIGHT E, SIBBETT W, *et al.* Visualization of optical binding of microparticles using a femtosecond fiber optical trap[J]. *Optics Express*, 2006, **14**(8): 3677-3687.
- [11] LINCOLN B, SCHINKINGER S, TRAVIS K, *et al.* Reconfigurable microfluidic integration of a dual-beam laser trap with biomedical applications[J]. *Biomedical Microdevices*, 2007, **9**(5): 703-710.
- [12] LIU Y, YU M. Optical manipulation and binding of microrods with multiple traps enabled in an inclined dual-fiber system[J]. *Biomicrofluidics*, 2010, **4**(4): 43010.
- [13] JESS P, GARCÉS-CHÁVEZ V, SMITH D, *et al.* Dual beam fibre trap for Raman microspectroscopy of single cells [J]. *Optics Express*, 2006, **14**(12): 5779-5791.
- [14] RUDD D, LOPEZ-MARISCAL C, SUMMERS M, *et al.* Fiber based optical trapping of aerosols[J]. *Optics Express*, 2008, **16**(19): 14550-14560.
- [15] CHEN J, HU H, SHEN Y. Multi-stability in dual-fiber optical trap[C]. SOPO, 2009: 1-4.
- [16] JENSEN-MCMULLIN C, LEE H, EDWARD R. Demonstration of trapping, motion control, sensing and fluorescence detection of polystyrene beads in a multi-fiber optical trap[J]. *Optics Express*, 2005, **13**(7): 2634-2642.
- [17] CHEN Hong-tao, LI Yin-mei, LOU Li-ren, *et al.* Detection of nanometer displacement in optical-tweezers and its related measuring errors[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2004, **31**(6): 729-734.
陈洪涛, 李银妹, 楼立人, 等. 光镊技术中的纳米位移探测及其测量误差讨论[J]. 中国激光, 2004, **31**(6): 729-734.
- [18] SHEN Yu, WANG Jian-zhong, LUO Jun-yan, *et al.* Theory and simulation of accelerometer based on laser trapping [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, **39**(3): 543-548.
沈瑜, 王建中, 骆钧炎, 等. 基于激光捕获的加速度测量原理及仿真[J]. 红外与激光工程, 2010, **39**(3): 543-548.
- [19] BARBOUR N. Inertial navigation sensors[R]. NATO RTO Lecture RTO-EN-SET-116. [S.l.]: Low-Cost Navigation Sensors and Integration Technology, 2010: 25-27.
- [20] GIESELER J, NOVOTNY L, QUIDANT R. Thermal nonlinearities in a nanomechanical oscillator [J]. *Nature Physics*, 2013, **9**(12): 806-810.
- [21] IMBODEN M, MOHANTY P. Dissipation in nanoelectromechanical systems[J]. *Physics Reports*, 2014, **534**(3): 89-146.
- [22] SU H, HU H, ZHANG L, *et al.* A chip of fiber optical trap[C]. SPIE, 2016, **10154**: 101540C.
- [23] LI Z, SHEN Y, HU H, *et al.* Simulation and measurement of stiffness for dual beam laser trap using residual gravity method[J]. *International Journal of Nanotechnology*, 2015, **12**(10-12): 849-859.
- [24] ARVANITAKI A, GERACI A. Detecting high-frequency gravitational waves with optically levitated sensors[J]. *Physical Review Letters*, 2013, **110**(7): 071105.
- [25] CHANG D, REGAL C, PAPP S, *et al.* Cavity opto-mechanics using an optically levitated nanosphere[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2010, **107**(3): 1005-1010.
- [26] ROMERO-ISART O, JUAN M, QUIDANT R, *et al.* Toward quantum superposition of living organisms[J]. *New Journal of Physics*, 2010, **12**: 033015.

- [27] GIESELER J, QUIDANT R, DELLAGO C, *et al.* Dynamic relaxation of a levitated nanoparticle from a non-equilibrium steady state[J]. *Nature Nanotechnology*, 2014, **9**(5): 358-364.
- [28] RANJIT G, ATHERTON D, STUTZ J, *et al.* Attonewton force detection using microspheres in a dual-beam optical trap in high vacuum[J]. *Physical Review A*, 2015, **91**(5).
- [29] LI T, KHEIFETS S, MEDELLIN D, *et al.* Measurement of the instantaneous velocity of a brownian particle[J]. *Science*, 2010, **328**(5986): 1673-1675.
- [30] ASHKINA. Forces of a single-beam gradient laser trap on a dielectric sphere in the ray optics regime[J]. *Biophysical Journal*, 1992, **61**(2):569-582.
- [31] LI W, HU H, SU H, *et al.* Dynamic analysis of trapping and escaping in dual beam optical trap[C]. SPIE, 2016, **10154**: 1015415.
- [32] 李银妹,姚焜. 光镊技术[M]. 北京: 科学出版社, 2016.