

使用锥形光纤对纳米颗粒进行振荡式光捕获*

刘清源

(中山大学物理科学与工程技术学院, 广东 广州 510275)

摘要: 提出了利用锥形光纤对纳米颗粒进行振荡捕获的光操控方法。通过火焰加热技术将单模光纤拉制成尖端直径为 $1\ \mu\text{m}$ 的锥形光纤, 并且通入功率为 $30\ \text{mW}$, 波长为 $808\ \text{nm}$ 的输入激光, 溶液中的直径为 $800\ \text{nm}$ 的二氧化硅纳米颗粒受到沿锥形光纤方向的光学梯度力而被捕获, 在锥形光纤末端焦点附近产生周期振荡现象。颗粒的振荡周期约为 $0.8\ \text{s}$, 振荡中心距离锥形光纤尖端约为 $4.4\ \mu\text{m}$, 颗粒振荡振幅约为 $1.45\ \mu\text{m}$ 。该方法有望对微纳颗粒及生物细胞进行振荡式的动态研究。

关键词: 光捕获; 锥形光纤; 纳米颗粒; 振荡操控

中图分类号: TN814 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579(2015)06-0077-06

Optical Oscillating Trapping of Nanoparticles Using a Tapered Optical Fiber

LIU Qingyuan

(School of Physics and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: This work provides an optical manipulation method for oscillating trapping of a single nanoparticle with a tapered optical fiber. The tapered optical fiber was drawn by a flame heating technique using a single-mode optical fiber with the diameter of the tapered end being $1\ \mu\text{m}$. With a laser beam at a wavelength of $808\ \text{nm}$ and an optical power of $30\ \text{mW}$ launched into the tapered fiber, a single SiO_2 nanoparticle with a diameter of $800\ \text{nm}$ is trapped by the optical gradient force along the tapered fiber direction. The trapping is a periodic oscillated near the focus point of the tapered fiber tip. The period of particle oscillation is about $0.8\ \text{s}$, and the distance of the oscillation center is about $4.4\ \mu\text{m}$ to tapered fiber tip, while the particle oscillation amplitude is about $1.45\ \mu\text{m}$. The method may provide an opportunity for the oscillating dynamic study of micro/nano particles and biological cells.

Key words: optical trapping; tapered optical fiber; nanoparticles; oscillating manipulation

光捕获和光操控, 即利用光来改变微小物体的运动状态的技术, 是光学当前热门的新兴技术之一, 能够操作从纳米级到微米级尺度的物体或者颗粒, 并对其进行引导, 捕获和分类^[1-6]。光学操控精度高、目标性强, 同时具有非接触式、无损伤性和维持样品生物环境等优点, 能够操控的微纳颗粒包括原子、纳米微粒^[7-13], 生物大分子如 DNA, 细胞, 细菌等^[14-18], 在生物、物理、化学和医学等领域发挥了非常重要的作用。

最早发现的光捕获方法是 1970 年 Ashkin^[1] 通过光镊操控对微粒进行加速和光势阱捕捉。光镊操控通过使用高数值孔径物镜对高功率激光进行聚焦的方法, 产生单位面积光场强度极大的高斯光束, 其照射于微粒上时, 微粒受到光对它产生的指向光强的方向的光梯度力和沿着光传播的方向的光散射力的共同作用^[19], 从而对微粒进行捕获。通过调节光束的聚焦情况, 改变光梯度力和光散射力的作用范围和大小, 就可以对微粒进行加速和光势阱捕

* 收稿日期: 2015-03-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11274395, 61205165)

作者简介: 刘清源(1990年生), 男; 研究方向: 微纳光学操控技术; E-mail: lqytimer@qq.com

获^[2-3]。由于传统光镊系统复杂,操作不便,为克服以上不足,人们提出了锥形光纤操控技术。将单模光纤通过火焰加热技术控制,得到一个尖锐的锥形光纤。锥形光纤的出射端面为尖锐的抛物线形状,故其能够将高能量的激光束聚集到锥形光纤焦点附近。在光纤内通入能量密度大的激光束,输入激光光强集中于锥形光纤的焦点,从而对焦点附近的微粒产生一个较强的梯度力,实现对颗粒的捕获和操控^[7-8,14]。这种光操控方法易于调节操作,现象明显,容易观测,捕捉速度快,效率高^[20]。然而传统的光操控技术捕获颗粒时限于固定位置,颗粒遭到捕捉后其动能消失,在对颗粒的动态反应过程或者生物细胞、细菌等进行能量研究时,较难实现捕获后的进一步反应,难以观测颗粒之间的相互作用。鉴于目前在光捕获和光操控上的多种实现方法均基于固定位置的捕获,本文提出了一种新的捕获和操控方法,即利用锥形光纤对纳米颗粒进行振荡操控。而利用锥形光纤对纳米颗粒进行振荡操控,通过使用光锥头的聚光原理,利用光锥头的尖锐性将高能量的激光束聚集到一起^[21],在距离锥形光纤尖端有一定距离的前方进行聚焦而产生光势阱。在液体中自由运动的颗粒当运动到势阱周围时,由于受到光梯度力的影响,从而在势阱内部发生周期性的往复运动。这种方法可以快速有效捕捉颗粒,且捕获后颗粒可以在势阱中往复运动,有利于对需要与外界环境充分接触来保证生理活性的生物细胞、细菌等的动态研究^[22-23]。利用该技术可以为光学显微操作提供一种新的途径。

1 实验装置与理论分析

针对单一纳米颗粒使用锥形光纤光操控的方法可以描述如下。图 1 (a) 展示了如何对二氧化硅纳米颗粒进行稳定捕获的实验装置图。连接于电脑上的电荷耦合装置 (CCD) 显微镜,可以用来监测和实时捕捉图像。锥形光纤放置于载玻片上,尖端放入溶解有二氧化硅纳米颗粒的液滴。二氧化硅纳米颗粒液滴是通过将二氧化硅纳米颗粒溶解在去离子水中形成的。将锥形光纤的尖端部分放置于颗粒溶液中,光纤的另一端连接在波长为 808 nm 的激光器上。往光纤中通入激光后,随机游动中的二氧化硅纳米颗粒受到沿锥形光纤方向的光学梯度力而被捕获。这个装置的架设方法在于通过将锥形光锥的一端利用可调节支架固定,在进行测量时,可以方便的调节光纤的位置和与颗粒的相对间距。通过调节可调节支架的位置,就可以改变锥形光纤的

平面位置,高度等参数,从而对锥形光纤的参数和性质进行更好的测量。同时,在光学显微镜调整放大倍数时,这样的结构能够更好地减少视野范围变化对于实验观察的影响。光锥通过可调节支架调节至光锥尖端与纳米颗粒附近,且在显微镜视角内位于水平方向上。采用这样的支架结构,方便对支架以及固定在支架上的光纤进行调节,从而更好地方便接下来对纳米颗粒的操控与捕捉。

图 1 (b) 显示了使用锥形光纤对颗粒进行振荡式捕获的原理图。溶有二氧化硅纳米颗粒的液滴由滴定管滴在载玻片上一个锥形光纤放置处。捕获激光 (波长为 808 nm) 通入锥形光纤之中。光在 808 nm 的近红外波段被二氧化硅纳米颗粒弱吸收。由于输入的激光在光纤末端距离末端一定距离的地方得到聚焦,故当颗粒位于焦点附近时,颗粒将受到光学梯度力的作用^[19]。对于沿着光纤轴线垂直的方向,颗粒受到指向光纤轴线的光梯度力的作用,从而可以捕获在光纤中心轴线上。而对于沿着光纤中心轴线的方向,颗粒同时受到光梯度力和光散射力的作用。但是在焦点附近,光梯度力大于散射力,从而颗粒可以被捕获到焦点处。由于焦点距离光纤末端有一定的距离,所以当颗粒在焦点处时,原有的动能使得它能够继续运动,当离开焦点时,颗粒又被指向焦点的梯度力拉回来,从而速度减小,到达一定位置后返回运动到焦点处,继续向前运动,同样再次受到指向焦点的光梯度力的作用,速度较小到一定距离再次被拉回到焦点处,从而颗粒可以在焦点处进行振荡式运动,从而实现了颗粒的振荡式捕获。

锥形光纤是由单模光纤通过火焰加热技术控制而成。通过用钳子将标准石英光纤的外皮和保护层破去,将光纤端平行拉直,放置于支架之上,通向光输入口处的一端固定于支架上,另一端用镊子夹住。固定完成后利用酒精灯的火焰尖端对将光纤前段的裸光纤部分进行灼烧,待裸光纤被灼烧至软化之后,利用镊子迅速对光锥尖端进行控制。最初的拉制速度大约为 0.3 mm/s,在这个速度下,光纤直径在大约 2 mm 的长度范围内从约 125 μm 减少到约 10 μm 的。此后突然提高拉制速度至 3 mm/s,在 1 s 之内,通过镊子极快速的移动,对熔融态的光纤施加一个较大的拉力,从而将其拉断,得到一个尖锐的锥形角形状的,能起到很好聚光作用的光锥头。

锥形光纤的固定和操纵使用精密微调支架 (Kohzu Precision 公司生产,50 nm 的分辨率) 完

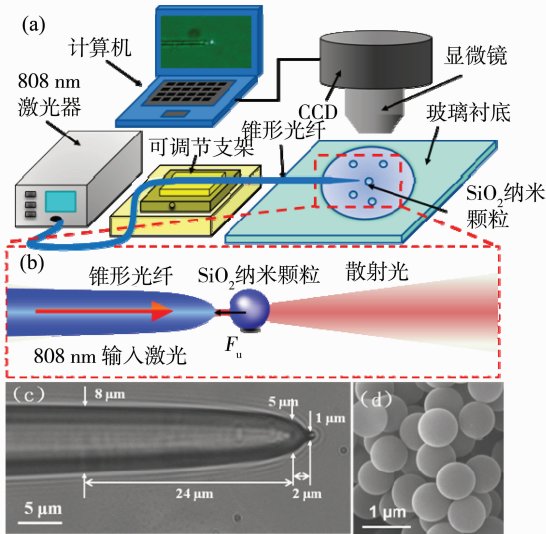


图 1 (a) 实验装置示意图；(b) 锥形光纤操控颗粒原理图；(c) 锥形光纤的光学显微照片；(d) 二氧化硅纳米颗粒的扫描电子显微镜 (SEM) 照片
 Fig. 1 (a) Scheme of the experimental setup; (b) Schematic of manipulating using the tapered fiber; (c) Optical microscope image of the tapered fiber; (d) Scanning electron microscope (SEM) image of SiO₂ nanoparticles

成。理想的锥形光纤的尖端直径在几微米数量级。与普通的光纤末端相比，由于锥形纤维的锥尖直径突然减少，故其尖端的直径要小得多。因此其能够对光进行聚焦，使得光纤尖端释放的光能量和光力最大化。因此该光锥仅需要 30 mW 输入光功率即可以实现捕获。采用以上方法拉制的锥形光纤如图 1 (c) 所示，光纤的直径一开始缓慢的减小，然后突然用力拉制，使得直径迅速变小以至形成尖端。由锥形光纤的光学照片 (图 1 (c)) 可见，锥形光纤的直径在长度为 24 μm 范围内从 8 μm 减少到 5 μm，然后在 2 μm 长度之内迅速从 5 μm 降低至 1 μm。

选用平均直径约 800 nm 的二氧化硅纳米颗粒作为操控对象。二氧化硅纳米颗粒如图 1 (d) 所示，为均匀的纳米颗粒，宏观上外观为白色粉末状固体。将微量二氧化硅纳米颗粒溶于去离子水中，并通过超声波振荡器使其形成均匀澄清的溶液。

2 实验结果

为了能够以高效率对纳米颗粒进行捕捉，输出功率为 30 mW 的波长 808 nm 的激光到光纤之中，通过光纤传入锥形光纤尖端。在锥形光纤尖端周

围，滴有均匀的溶解了平均直径为 800 nm 的二氧化硅微粒溶液。激光从锥形光纤的尖端输出，并在溶液之中形成一个较强的光场分布。由于锥形光纤尖端的聚焦效应，光锥尖端附近会聚了高密度高能量光束。在该激光束的作用下，随机悬浮在锥形光纤尖端附近的纳米颗粒受到光学梯度力的影响，纳米颗粒将朝着光强度较高的位置移动，最终被捕获到焦点处。由于颗粒在焦点处尚且保有一部分动能，故其可以继续运动，直到移动一定距离，在指向焦点的光梯度力作用下耗尽动能后，停止在锥形光纤尖端一定距离处。此后受到光梯度力影响，开始折返回到焦点，并保有远离锥形光纤尖端方向的动能。由于光梯度力指向焦点方向，纳米颗粒在一定距离的减速后停止，此后加速回到焦点。结果，纳米颗粒会并且在光梯度力的作用下，在焦点附近摆动。综上所述，溶液中的颗粒在通入激光束的影响下产生了周期性的振荡运动 (图 2)。通过以上原理，我们实现了利用锥形光纤对于平均直径为 800 nm 的二氧化硅微粒的振荡操控。

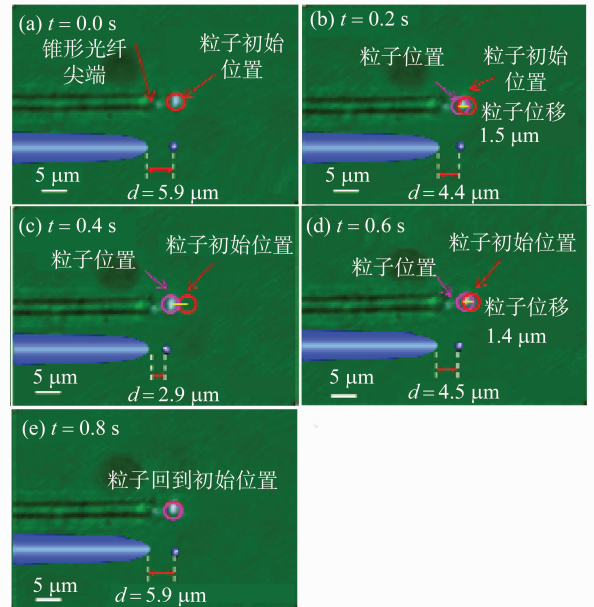


图 2 二氧化硅纳米颗粒的振荡操控光学显微照片
 红色圆圈表明颗粒在 $t = 0.0$ s 时的初始位置；
 粉色圆圈表明颗粒在捕获过程中的位置。
 插图表明颗粒捕获情况的示意图

Fig. 2 Optical microscope image of oscillating manipulation of SiO₂ nanoparticle

The red circle indicates the initial location of the particle at $t = 0.0$ s, while the pink circle indicates the location of the particle in the trapping process.

Insets show the schematics of the particle during the trapping process

由于激光通入锥形光纤的时间可以由手动操控,因此我们可以对纳米颗粒的运动进行讨论如下。如图 2 所示,通入激光后,纳米颗粒被锥形光纤捕获。取颗粒位于远光锥点附近时为计时起始点观测,初始时刻颗粒位于远光锥点,在指向锥形光纤焦点的光梯度力的作用下向锥形光纤方向加速运动(图 2 (a)); 0.2 s 之后,颗粒运动到焦点处,其运动速度被加速到最大值,在光梯度力和散射力作用下达到受力平衡状态,由于颗粒仍有运动速度,依靠惯性继续向锥形光纤方向减速运动(图 2 (b)); 0.4 s,颗粒到达近光锥点,速度降为 0,受到指向锥形光纤焦点的光梯度力的作用加速远离锥形光纤(图 2 (c)); 0.6 s,颗粒返回到焦点处,运动速度被加速到极大值,由于光梯度力和散射力相互抵消,再次达到受力平衡状态,同样在这个位置由于颗粒仍有速度,它将进一步运动,随惯性继续减速远离光锥(图 2 (d)); 0.8 s,颗粒重新回到远光锥点,颗粒运动速度降为零。由于光梯度力的作用向焦点方向做加速运动,从而开始下一个运动周期(图 2 (e))。在整个运动周期之中,颗粒运动的位置均位于锥形光纤焦点附近,且颗粒在焦点附近的运动呈周期性现象。通过以上实验结果可知,我们实现了利用周期振荡的方式对纳米颗粒的捕捉,并且测得其周期性振荡现象的规律。

通过对颗粒在焦点附近做周期性的振荡运动情况进行长时间的观察和记录,其与锥形光纤尖端距离随颗粒受操控时间变化的函数关系如图 3 所示。由图中可以得出,在整个颗粒受操控的运动周期之中,颗粒运动的位置均位于距离光锥尖端约 $4.4 \mu\text{m}$ 的平衡点附近,且颗粒在平衡点附近的运动呈周期性现象。由观测数据可以得出,在颗粒位于锥形光纤尖端附近时,颗粒的振荡周期约为 0.8 s,振荡中心距离锥形光纤尖端约为 $4.4 \mu\text{m}$,颗粒振荡振幅约为 $1.45 \mu\text{m}$ 。采用简谐振子模型对这一振荡捕获的过程进行比较分析,从中可以得出结论如下:输入激光在锥形光纤末端一定距离的地方得到聚焦,并且在焦点附近形成较强的光学梯度力。由于光梯度力的作用,颗粒与锥形光纤尖端距离约 $4.4 \mu\text{m}$ 周围产生了一个势阱,颗粒被捕获后,在势阱内部产生周期振荡现象。

3 分析与讨论

为对以上结论进行验证,我们采用有限元法(使用 COMSOL Multiphysics 4.3 模拟软件)对锥形光纤尖端附近的光场强度,在颗粒位于锥形光纤焦

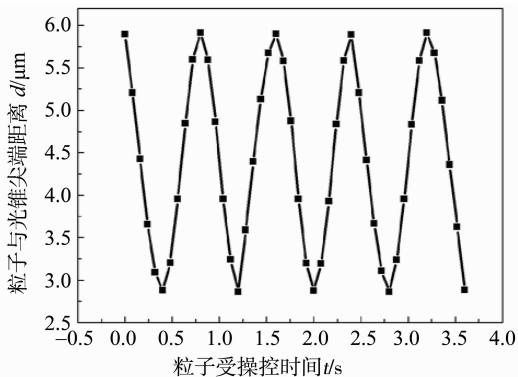


图 3 颗粒与锥形光纤尖端距离随颗粒受操控时间变化的函数关系图

Fig. 3 Distance between the particle and the tapered fiber end as a function of particle manipulating time

点处的情况下进行模拟。模拟的光场强度分布结果如图 4 (a) 所示。沿着光纤中心轴线 ($Y = 0 \mu\text{m}$) 的光场分布如图 4 (b) 所示。由图 4 (a) 和 4 (b) 可以看出,出射光场在距离光纤末端为 $4.1 \mu\text{m}$ 的地方达到最大值,也就是在这个位置得到聚焦。图 4 (c) 给出了在焦点处 ($X = 4.1 \mu\text{m}$) 沿着 Y 方向的光场分布曲线。根据图 4 (c),锥形光纤焦平面上的光场强度集中于锥形光纤中轴线上。所以当颗粒在光纤末端附近运动时,在偏离光纤轴线的地方,由于受到沿着 Y 方向指向光纤轴线的力学梯度力的作用而被捕获到光纤轴线上。而颗粒在被捕获后,在光纤轴线方向,颗粒受到的光

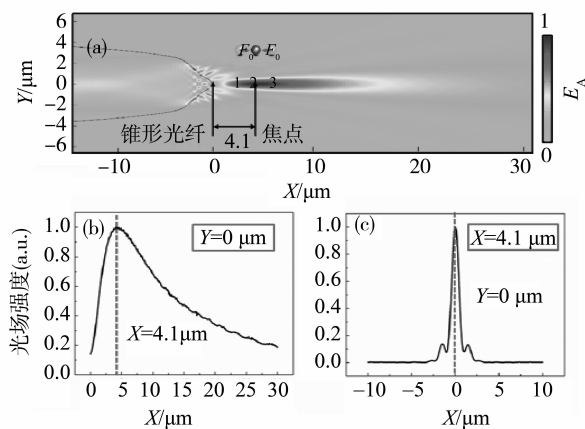


图 4 (a) 锥形光纤尖端输出的光场分布模拟图; (b) 归一化的锥形光纤尖端中轴线上的光场强度分布图; (c) 归一化的锥形光纤焦平面上的光场强度分布图

Fig. 4 (a) Simulated optical field distribution output from the tapered fiber; (b) Normalized optical field intensity distribution along the central axis of the tapered fiber; (c) Normalized optical field intensity distribution at focus plane of the tapered fiber

梯度力指向光场最大的地方，也就是焦点 $X = 4.1 \mu\text{m}$ 的地方。在焦点左侧，颗粒受到的力向右指向焦点（如图 4（a）中的颗粒 1），从而向右运动；然后运动到焦点处（如图 4（a）中的颗粒 2），颗粒由于原有的速度继续向右运动；在焦点右侧，颗粒受到的力向左指向焦点（如图 4（a）中的颗粒 3），先减速后停止最后返回向左运动。从而颗粒在围绕着焦点进行周期性的振荡运动。由以上模拟结果可以得出，锥形光纤尖端发射的激光射入溶液之中，在锥形光纤的焦点附近形成一个较强的光强分布，从而产生一个光梯度力作用在运动到光纤末端附近的颗粒上。颗粒在光梯度力的作用下，在焦点附近做简谐振荡运动，从而实现了锥形光纤对颗粒的振荡捕获。颗粒在锥形光纤的光场内振荡运动时，其振荡范围集中在焦点附近，振荡运动中心的靠近锥形光纤的焦点，振幅在锥形光纤的光势阱区内部。模拟得到的光场强度集中区域位于锥形光纤中轴线上距离焦点前后约 $2 \mu\text{m}$ 范围内，和实验中观测到的粒子振荡运动范围较为接近。综上所述，模拟结果证实了颗粒在锥形光纤尖端附近时，照射在颗粒上的激光在颗粒产生光梯度力作用，被锥形光纤捕获从而产生周期性的振荡运动。模拟结果与理论分析以及实验现象基本吻合，证明了上文给出的结论。

综合实验数据和理论模拟的结果并进行分析，通过颗粒的运动作为表征，测试了锥形光纤对颗粒的振荡捕获和操控。在实验装置安装完毕的基础上，锥形光纤尖端放入溶有二氧化硅纳米颗粒的液滴，输入激光通过锥形光纤聚焦，在焦点附近产生光学梯度力。受光学梯度力的影响，液滴内部可操控区间内的二氧化硅纳米颗粒可以被锥形光纤捕获，束缚在光力势阱之中，产生周期性的振荡运动。通过以上步骤完成了使用锥形光纤对单个纳米颗粒进行光学振荡捕获。采用此方法捕获的纳米颗粒保有一定强度的动能，相较传统的静止捕获方法更加容易与外界环境发生反应。由于纳米大小的颗粒的布朗运动现象相对于微米大小的颗粒更明显，因此，需要更高的激光输出功率来对更小的颗粒进行作用，从而施加更大的光作用力来抵消布朗运动的影响。

4 结 论

本文使用锥形光纤对单个纳米颗粒进行光学振荡捕获。我们分析了颗粒的捕获原理，并测试了一

个特定的二氧化硅纳米颗粒的振荡运动过程。通过分析实验数据并且与模拟结果进行对比，我们发现该颗粒的运动规律符合简谐振动现象，其运动表现为周期性振荡。这一结果为锥形光纤对颗粒进行振荡捕获的原理提供了解释，并且对于以后进一步探究锥形光纤的光捕获现象，以及采用该方法对微纳颗粒进行捕获和操控都有很大的帮助。利用该技术有利于对微纳颗粒及生物细胞进行振荡式的动态研究。

参考文献：

- [1] ASHKIN A. Acceleration and trapping of particles by radiation pressure [J]. *Physical Review Letters*, 1970, 24:156 - 159.
- [2] GRIER D G, A revolution in optical manipulation [J]. *Nature*, 2003, 424:810 - 816.
- [3] NEUMAN K C, BLOCK S M. Optical trapping [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2004, 75: 2787 - 2809.
- [4] CHIOU P Y, OHTA A T, WU M C. Massively parallel manipulation of single cells and microparticles using optical images [J]. *Nature*, 2005, 436: 370 - 372.
- [5] DHOLAKIA K, REECE P. Optical micromanipulation takes hold [J]. *Nanotoday*, 2006, 1:18 - 27.
- [6] GRIGORENKO A N, ROBERTS N, DICKINSON M, et al. Nanometric optical tweezers based on nanostructured substrates [J]. *Nature Photonics*, 2008, 2:365 - 370.
- [7] LIU Z H, GUO C K, YANG J, et al. Tapered fiber optical tweezers for microscopic particle trapping: fabrication and application [J]. *Optics Express*, 2006, 14:12510 - 12516.
- [8] LIBERALE C, MINZIONI P, BRAGHERI F, et al. Miniaturized all-fibre probe for three-dimensional optical trapping and manipulation [J]. *Nature Photonics* 2007, 1:723 - 727.
- [9] JUAN M L, RIGHINI M, QUIDANT R. Plasmon nano-optical tweezers [J]. *Nature Photonics*, 2011, 5:349 - 356.
- [10] PANG Y, GORDON R. Optical trapping of 12 nm dielectric spheres using double-nanoholes in a gold film [J]. *Nano Letters*, 2011, 11:3763 - 3767.
- [11] CHEN C, JUAN M L, LI Y, et al. Enhanced optical trapping and arrangement of nano-objects in a plasmonic nanocavity [J]. *Nano Letters*, 2012, 12:125 - 132.
- [12] DESCHARMES N, DHARANIPATHY P, DIAO Z, et al. Observation of backaction and self-induced trapping in a planar hollow photonic crystal cavity [J]. *Physical Review Letters*, 2013, 110:123601.

- 29(4):587-591.
- [7] 孙永明,吴谨,刘劲,等. 基于 DWT 的高频系数压缩感知图像融合[J]. 红外技术,2014,36(9):714-718.
- [8] GAN L. Block Compressed Sensing of Natural Images [C] // Proceedings of the International Conference on Digital Signal Processing. Cardiff, UK, 2007: 403 - 406.
- [9] 赵慧民,蔡君,魏文国. 一种分块压缩感知变采样率的指纹图像水印算法[J]. 中山大学学报:自然科学版, 2014,53(5):14-19.
- [10] LUO X Y, ZHANG J, YANG J Y, et al. Image fusion in compressed sensing [C] // IEEE International Conference on Image Processing, 2009:2205-2208.
- [11] LUO X Y, ZHANG J, YANG J Y, et al. Classification-based image-fusion framework for compressive imaging [J]. Journal of Electronic Imaging, 2010, 19(3):1-14.
- [12] 刘哲,顾淑音,南炳炳,等. 一种基于块稀疏贝叶斯学习的压缩图像融合算法[J]. 光子学报,2013,42(11):1365-1369.
- [13] 杨森林,万国宾,高静怀. 基于分块压缩感知的遥感图像融合[J]. 计算机应用研究,2015,32(1):316-320.
- [14] MUN S, FOWLER J E. Block compressed sensing of image using directional transforms[C] // Proceedings of the International Conference on Image Processing. Cairo, Egypt, 2009:3021-3024.
- [15] 王宏,敬忠良,李建勋. 一种基于分块的多聚焦图像融合方法[J]. 上海交通大学学报, 2003,37(11):1743-1746.
- [16] GARG R, GUPTA P, KAUR H. Survey on multi-focus image fusion algorithms [C] // Proceedings of 2014 RA ECS UIET Panjab University Chandigarh, 06-08, March 2014:291-295.
- [17] 李树涛,王耀南,张昌凡. 基于视觉特性的多聚焦图像融合[J]. 电子学报,2001,29(12):1699-1701.
- [18] DO T T, GAN L, NGUYEN N H, et al. Fast and efficient compressive sensing using structurally random matrix [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2012,60(1):139-154.
- [19] LI H, MANJUNATH B, MITRA S. Multisensor Image fusion using the wavelet transform[J]. Graphical Models Image Processing, 1995,57(3):235-245.

(上接第 81 页)

- [13] BERTHELOT J, AĆIMOVIĆ S, JUAN M L, et al. Three-dimensional manipulation with scanning near-field optical nanotweezers [J]. Nature Nanotechnology, 2014, 9:295-299.
- [14] HU Z H, WANG J, LIANG J W. Manipulation and arrangement of biological and dielectric particles by a lensed fiber probe [J]. Optics Express, 2004, 12:4123-4128.
- [15] MARTINEZ I A, RAJ S, PETROV D. Colored noise in the fluctuations of an extended DNA molecule detected by optical trapping [J]. European Biophysics Journal With Biophysics Letters, 2012, 41:99-106.
- [16] WANG X L, XUE G, CHEN S, et al. Cell manipulation tool with combined microwell array and optical tweezers for cell isolation and deposition [J]. Journal of Micro-mechanics and Microengineering, 2013, 23:075006.
- [17] ZEHTABI-OSKUIE A, JIANG H, CYR B R, et al. Double nanohole optical trapping: dynamics and protein-antibody co-trapping [J]. Lab Chip, 2013,13:2563-2568.
- [18] WANG X, CHEN S, CHOW Y T, et al. A microengineered cell fusion approach with combined optical tweezers and microwell array technologies [J]. RSC Advances, 2013, 3:23589.
- [19] 周歧发,张进修,陈忠阳,等. 电场对 PbTiO₃ 超微粒子 0-3 型纳米复合材料性能的影响[J]. 中山大学学报:自然科学版,1997,36(2):54-57.
- [20] XIN H, XU R, LI B. Optical trapping, driving, and arrangement of particles using a tapered fibre probe [J]. Scientific Reports, 2012, 2: 818.
- [21] 傅思镜,刘叶新,童洲森. 单模光纤熔锥型 OADM 耦合率的计算[J]. 中山大学学报:自然科学版, 2001, 40(2):122-124.
- [22] STELLAMANN S, UPPALURI S, HOCHSTETTER A, et al. Optical trapping reveals propulsion forces, power generation and motility efficiency of the unicellular parasites Trypanosoma brucei brucei [J]. Scientific Reports, 2014, 4:6515.
- [23] LAKÄMPER S, LAMPRECHT A, SCHAAP I A, et al. Direct 2D measurement of time-averaged forces and pressure amplitudes in acoustophoretic devices using optical trapping [J]. Lab Chip, 2015, 15:290.