

光捕获和光操控研究进展

李宝军 辛洪宝 张 堉 雷宏香

(中山大学光电材料与技术国家重点实验室, 广东 广州 510275)

摘要 光捕获和光操控是一种通过光镊、倏逝波、光泳或光热等对微纳尺度颗粒、生物大分子和细胞等微小物体进行非接触、无损伤捕获和操控的方法和技术。详细归纳和总结了国际上在光捕获和光操控方面的研究进展和最新动态,分析了其今后的研究发展方向。

关键词 光捕获;光操控;光镊;光泳;倏逝波

中图分类号 O439 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0900126

Progress of Optical Trapping and Manipulation

Li Baojun Xin Hongbao Zhang Yao Lei Hongxiang

(State Key Laboratory of Optoelectronic Materials and Technologies, Sun Yat-sen University, Guangzhou, Guangdong 510275, China)

Abstract Optical trapping and manipulation provides a precise, non-contact, and noninvasive method for manipulation of micro/nanoscale objects. This technique is realized mainly by optical tweezers, evanescent waves, photophoresis or photothermal effect, etc. A review on the progress of optical trapping and manipulation is presented, and the trend of the research is analyzed.

Key words optical trapping; optical manipulation; optical tweezers; photophoresis; evanescent wave

OCIS codes 350.4855; 350.5340; 310.6628

1 引 言

光能够影响物体的运动,这是在经典电动力学中就被证明了的事实。光与物质相互作用的研究在最近 40 多年取得了令人瞩目的成就,其中一个非常重要的成果是利用光来改变微小物体的运动状态,也就是光捕获和光操控。这些微小物体小至原子、纳米微粒,大至生物大分子和细胞甚至细菌等生物个体。由于光捕获和光操控具有精度高、非接触和无损伤等特点,使其在生物、物理、化学和医学等领域得到了广泛的应用。

自 1970 年 Ashkin^[1]首次使用激光束对微米量级的颗粒进行操控后,光捕获和光操控技术得到了迅速的发展。光力从飞牛(10^{-15} N)到皮牛(10^{-12} N)的大小变化和其从几十纳米到几百微米的作用范围使得光操控能够方便地应用到微观系统

上,并在自然科学和工程技术的很多领域成为了一种非常重要的工具^[2~4]。光捕获和光操控最开始是通过激光光镊来实现的。后来人们发现,介质界面的倏逝波也能够对物体进行捕获和操控。最近的一些研究还表明,利用光泳和光热效应也能够实现大量微颗粒或生物体的捕获和操控。鉴于目前国际上在光捕获和光操控上的多种实现方法,本文就其各自的特性、应用范围以及最新进展进行详细的归纳总结。

2 基于光镊的捕获和操控

Ashkin 率先使用波长为 514.5 nm 的连续激光对直径为 2.68 μm 的微球进行了操控^[1],实验证实,单束激光被透镜聚焦后可以将颗粒加速,而将相同的两束激光同时通过透镜聚焦后相向传播,可以

收稿日期: 2011-07-07; **收到修改稿日期**: 2011-08-01

基金项目: 国家自然科学基金(61007038, 10974261)和国家杰出青年科学基金(60625404)资助课题。

作者简介: 李宝军(1964—),男,长江学者特聘教授,主要从事光电子器件及集成、纳米光子学及技术、能源光子学及应用等方面的研究。E-mail: stslbj@mail.sysu.edu.cn

将颗粒稳定捕获。Ashkin 认为,颗粒在光束附近时,会受到光对它产生的力的作用,这个力的一个分量是指向光强的方向,被称为梯度力;而另一个分量是沿着光传播的方向,称为散射力。因此,适当改变光束的聚焦情况,使这两个力的大小发生改变,就可以实现对颗粒的加速、捕获和分离等。后来,Ashkin 及其合作者使用这种方法对单个介质颗粒^[5]、原子^[6]、病毒和细菌^[7~9]等进行了捕获和操控。他们将这种使用高数值孔径物镜对激光进行聚焦后捕获物体的方法叫做“光镊”,其原理如图 1 所示^[3]。

Ashkin 及其合作者在光镊上的开创性工作为

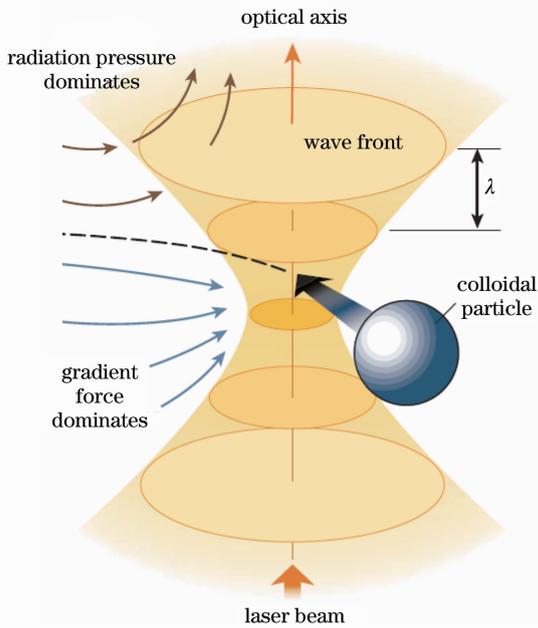


图 1 光镊原理示意图。聚焦光束在焦点处产生一个大的光梯度力,能够将颗粒捕获到焦点处

Fig.1 Schematic of optical tweezers. Particle is trapped by the strong optical gradient force toward the focus of the laser beam

光捕获和操控技术的发展起到了里程碑的作用。他们还将这种基于光镊的捕获和操控应用到不同种类的微小物体上^[10],包括原子、分子、亚微米颗粒、宏观颗粒,甚至活体细胞和组织等。光镊对这些物体进行操控时,不会造成明显的物理损伤^[2,11]。光镊的这种无损伤、非接触性操控的性质使其在生物大分子的研究上具有重要的价值。人们已能够利用光镊对生物大分子进行操控,并且能够利用这种操控研究分子之间的作用,例如 DNA 的自我复制和转录等^[12]。由于大小不同或折射率不同的颗粒受到的光梯度力大小不同,光镊捕获这些颗粒的能力也就不同,因而,光镊还可以对不同特性的颗粒进行分类^[13~16],排列成特定结构和形状^[17,18]。此外,在光镊系统中将光学涡流光束进行耦合,还可以实现对微颗粒的旋转操控^[19]。

然而,基于高功率激光器和透镜系统的常规光镊系统体积较庞大、样品移动自由度小、且工作距离短,使其不容易用于操控位于狭窄位置(如深孔中或毛细血管中)的微粒,也不易同时使用多个光镊进行操纵。为了克服这些不足,人们进行了大量的工作,其中一种新型的方法是利用光纤端面出射的激光束来实现对颗粒的捕获和操控,即“光纤光镊”。这种方法以其结构简单、操控灵活等优点而备受重视。光纤光镊的工作原理是:光在光纤中传播时,会在出射端面附近产生一个较强的光强梯度,对周围的物体产生一个梯度力,因而可以用来对物体进行捕获和操控^[20,21]。而通过改善光纤端面结构(如具有抛物线形状或透镜形状的锥形光纤等)来改变出射光的聚焦性质,光纤径向的捕获力和稳定性可以得到进一步提高。例如,将波长为 980 nm 的近红外光通入锥形光纤后,利用光纤尖端部位的光梯度力可以对酵母菌细胞进行捕获^[20],如图 2 所示。

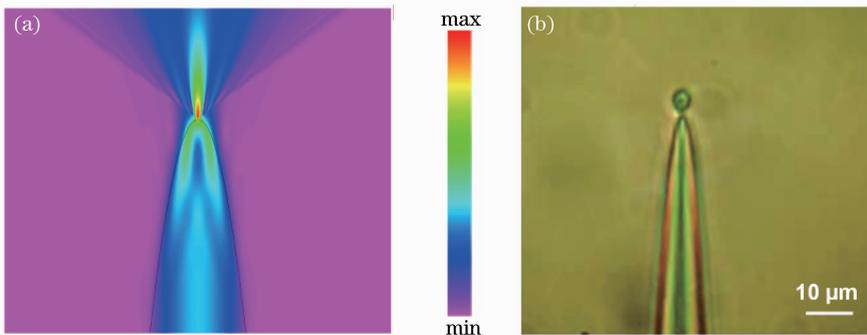


图 2 光纤光镊原理和捕获效果。(a)光场分布图;(b)光纤光镊通入波长为 980 nm 的近红外光后,对酵母菌细胞进行捕获

Fig.2 Tapered fiber-based optical tweezers. (a) Distribution of optical fields at the tip of a fiber taper; (b) trapping of a yeast cell by injecting a 980-nm-wavelength laser into the fiber

传统光镊和光纤光镊为微米尺寸的物体捕获和精确定位提供了极为重要的技术保障。但是这些基于光镊的捕获和操控对捕获物体的体积存在一个衍射限制,对于体积很小(纳米级)的物体,很难高效的捕获和操控;此外,对于纳米颗粒,布朗运动很明显,光镊产生的梯度力很难与布朗运动抗衡,因而对于纳米级的颗粒捕获和操控,需要在传统光镊的基础上进行相关改进。一个有效的方法就是通过金属表

面产生的等离激元,对近场光进行放大,来增强光镊的梯度力,从而对纳米颗粒进行有效的捕获和操控^[18]。另外一个有效的方法是使用谐振器来对光场进行局部增强,例如 Mandal 等^[22]使用一个孔型的一维光子晶体谐振器对光场产生的近场放大作用,能够对直径为 42 和 62 nm 的介质颗粒进行捕获和操控,如图 3 所示。这种方法对颗粒产生的捕获能力比传统光镊的捕获能力提高了几个数量级。

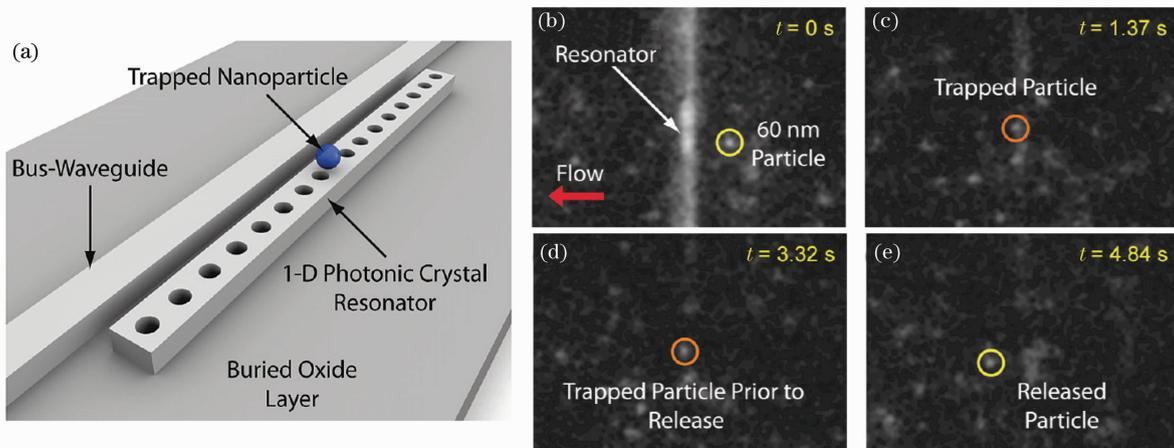


图 3 光子晶体谐振器捕获纳米颗粒。(a) 一维光子晶体谐振器结构图;(b)~(e)谐振器捕获和释放随着微流运动的直径为 60 nm 的聚苯乙烯颗粒

Fig. 3 Optical trapping of nanoparticle with a photonic crystal resonator. (a) Schematic of a one-dimensional photonic crystal resonator; (b)~(e) trapping and release of polystyrene particle of diameter 60 nm by the photonic crystal resonator

3 基于倏逝波的捕获和操控

光镊能够以极高的精确度实现对颗粒的非接触操控,但是基于光镊的捕获和操控也存在一些应用方面的不足。由于光镊需要用一个高数值孔径的透镜来对光束进行聚焦,这使得光梯度力的作用区域比较有限,当光传播到较远的地方时,光力迅速减弱,将不能对颗粒起作用。而利用介质界面处倏逝波则能够克服这一不足。倏逝波本身就呈现较强的梯度,因此倏逝波也能够对颗粒产生力的作用。使用倏逝波对颗粒进行操控最开始是由 Kawata 等^[23]提出的,他们使用在棱镜表面存在的激光倏逝波,使得颗粒能够在倏逝波的作用下沿着光传播的方向运动。自使用倏逝波实现对颗粒进行操控后,一些基于平面波导^[24~27]的器件也被用来对颗粒进行捕获和操控。颗粒能够被倏逝波产生的梯度力捕获到波导表面,进一步被作用在其上的散射力推动并沿着波导表面传输。利用这种方法可以对介质颗粒^[24]、生物细胞^[26]和金属颗粒^[27]等进行捕获和操控。

由于倏逝波存在于器件表面,要实现对小尺寸颗粒的捕获与操控,也将面临着克服颗粒布朗运动的难题。由于金属与介质接触的表面能够产生表面

等离激元波,使倏逝波得到增强,从而得到更大的光力,因而使用金属波导能够有效地操控颗粒^[28]。此外,环形波导能够起到一个谐振的作用,使得颗粒能够更好地限制在环上,并以较高的速度沿环形波导运动^[29]。除了加强表面光场来更加有效地操控颗粒外,限制倏逝场的作用范围也是一种有效的方法。例如, Yang 等^[30]通过一个宽度为 100 nm 的硅基狭缝波导[图 4(a)],有效限制倏逝场的作用范围,使狭缝中间形成了很强的倏逝场。将波长为 1.55 μm 的红外激光导入狭缝波导后,直径为 75 nm 的聚苯乙烯纳米颗粒随着水流运动到狭缝附近时能够被狭缝捕获进而沿狭缝传输[图 4(b)]。激光关掉后,颗粒将被释放并随流体一起运动[图 4(c), (d)]。进一步的研究表明,这种狭缝波导还能够成功地捕获 DNA。

与制作在衬底上的平面波导类似,亚波长尺寸的光纤表面也存在较强的倏逝波,且亚波长光纤制作更加方便,移动也更加灵活。因而可以用亚波长光纤来对颗粒进行捕获和传输^[31]。光滑的亚波长尺寸光纤可以将颗粒沿着光纤传输,如果在光纤上制作一个缺陷,则传输的颗粒将聚集在缺陷上^[32],如图 5 所示。例如,在一根直径为 720 nm 的纳米光

纤上引入一个凸起的缺陷,由于缺陷对光的散射,使得缺陷处颗粒受到的梯度力比在光滑的表面所受的力更强,而散射力更弱,因此沿着纳米光纤传输的颗粒遇到缺陷后将被缺陷捕获住,进而聚集在缺陷处;

通过关闭光源,捕获的颗粒能够在预设的时刻释放在设置好的地方,如图 6 所示。利用这一方法能够实现对纳米颗粒的定向传输和可控释放^[32]。

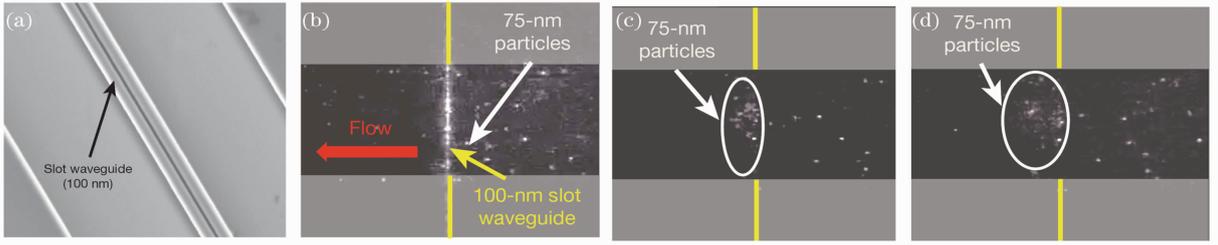


图 4 使用亚波长狭缝波导对颗粒进行操控。(a)宽度为 100 nm 的狭缝波导的扫描电镜图像; (b)激光打开,颗粒被捕获;(c)激光关闭,捕获的颗粒被释放;(d)释放的颗粒被流体带走

Fig. 4 Optical manipulation of nanoparticles with a sub-wavelength slot waveguide. (a) SEM image of a 100-nm slot waveguide; (b) laser switched on, particles trapped; (c) laser switched off, the trapped particles released; (d) released particles swept off by the fluid flow

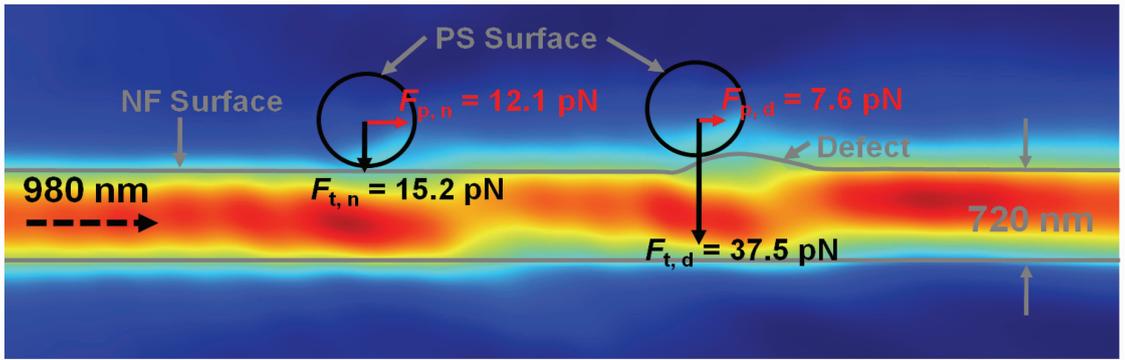


图 5 带有缺陷的纳米光纤(NF)对聚苯乙烯颗粒(PS)的捕获和传输模拟图

Fig. 5 Simulations for trapping and delivery of PS nanoparticles with a defect NF

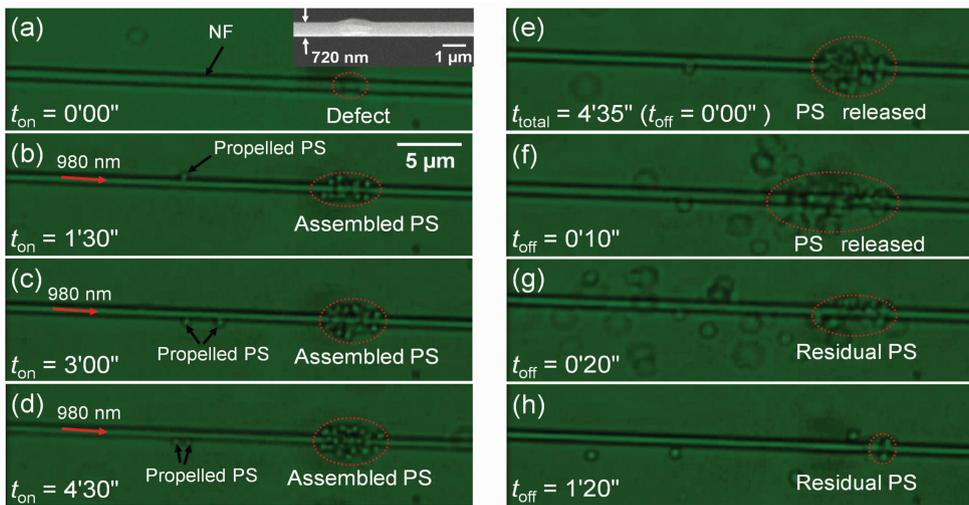


图 6 使用带有缺陷的纳米光纤对聚苯乙烯纳米颗粒进行定向传输和可控释放^[32]。(a)~(d)往 NF 中通入功率为 39 mW 的 980 nm 波长的近红外光,直径为 713 nm 的 PS 沿着光纤定向运输到缺陷处并聚集;(e)~(h) 光源关闭,聚集的颗粒被释放

Fig. 6 Targeted delivery and controllable release of PS nanoparticles with a defect NF. (a)~(d) A 980 nm wavelength laser (39 mW) injected into the NF, PS particles (713 nm diameter) are delivered along the NF and accumulated at the defect; (e)~(h) laser switched off, the accumulated PS released

4 基于光泳和光热的捕获和操控

基于光镊和倏逝波的捕获和操控都是利用光的辐射压力对颗粒产生的光力(梯度力和散射力)来实现的。但由于光力的大小一般只有几个飞牛到皮牛,而作用范围只有几微米^[10],因而很难在较大范围内对大量的物体进行捕获和操控。颗粒在光照下,除了受到光的梯度力和散射力而运动外,还会因颗粒对光的吸收而产生定向运动,这种作用称为“光泳”。光泳现象的产生源于受光束照射的微小物体表面热分布的不均匀^[33,34]。当物体的向光面能量

分布更为集中时[如图 7(a)所示],与向光面接触的液体温度也更高,水分子撞击物体的频率高于物体背光面的撞击频率,从而引起物体由液体的高温部分(接近光源)向低温部分(远离光源)的方向运动,即正向光泳;反之,若物体的背光面能量分布更为集中[如图 7(b)所示],则物体会发生逆向光泳运动。研究表明,光泳力的大小比普通光力的大小大几个数量级^[33],因而可以用来对大量颗粒进行大范围的操控。

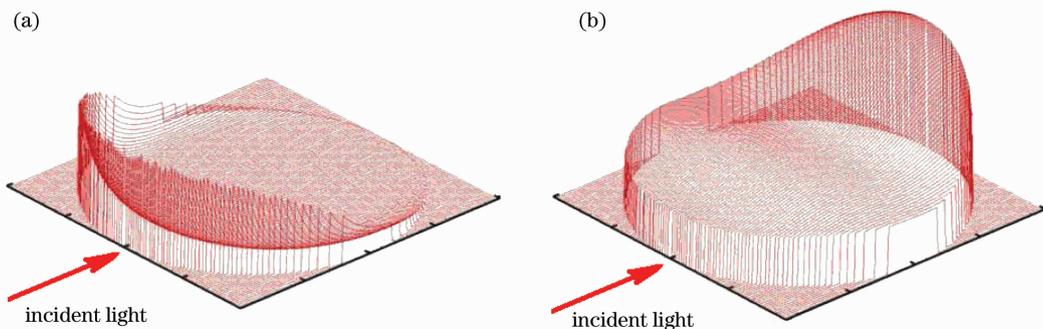


图 7 发生光泳现象时受光束照射的微小物体表面的热分布示意图。(a)正向光泳(向光面能量集中);
(b)逆向光泳(背光面能量集中)

Fig. 7 Thermal distribution at the surface of small object irradiated by an incident light when photophoresis phenomenon occurs. (a) Positive photophoresis (energy concentrated on the front surface); (b) negative photophoresis (energy concentrated on the back surface)

液体中的颗粒发生正向光泳和逆向光泳运动的条件是不同的。一般来说,当颗粒的材料对入射光波长的吸收较强(折射率虚部大于 0.05)时,入射光的能量大部分在向光面被颗粒吸收转化为热能,而透过颗粒的光波能量会明显减弱,形成正向光泳;当颗粒的材料对入射光波长的吸收很弱(折射率虚部小于 0.001,几乎透明),颗粒可被看作是一个微小的透镜,将入射光的能量汇聚到颗粒的背光面,形成逆向光泳。颗粒的光泳方向与颗粒表面能量分布有关,而能量分布则由入射光波长、折射率以及颗粒大小等决定。例如,在波长为 $1.55 \mu\text{m}$ 的光照射下,不同直径 SiO_2 颗粒表面光场分布情况可以用三维时域有限差分(FDTD)方法进行模拟,如图 8 所示^[35]。从该图可看出,当波长为 $1.55 \mu\text{m}$ 的光从 SiO_2 颗粒左侧入射时,随着颗粒直径 D_p 从 500 nm [图 8(a)]向 $8 \mu\text{m}$ [图 8(f)]增大,颗粒右侧(背光面)的电场振幅强度也不断增加,背光面能量分布更加集中,从而导致逆向光泳力越来越大。进一步的分析表明,尺寸较大、折射率较高的颗粒能够获得更大的光泳力。

在逆向光泳原理基础上,借助于不同结构微/纳米光纤表面的倏逝波场及泄漏光场,可以实现对液体中大量微颗粒的光捕获和光操控。例如,利用亚波长光纤(SDF)表面的倏逝波场及泄漏光场可以实现对大量介质颗粒和细菌的捕获和操控。如图 9 所示^[35],当波长为 $1.55 \mu\text{m}$ 、功率为 200 mW 的红外光通过直径为 910 nm 的亚波长光纤时,会形成一个“线状光源”,借助于其表面的倏逝波场及辐射范围较广的泄露光场,悬浮在水中的、对 $1.55 \mu\text{m}$ 光具有低吸收率的 SiO_2 颗粒(直径 $3.14 \mu\text{m}$)将受到逆向光泳力的作用而朝着此“光源”运动,从而实现对大量 SiO_2 颗粒的捕获[图 9(a)~(c)]。当关闭激光器后, SiO_2 颗粒停止泳动,被捕获的颗粒开始通过布朗运动逐步扩散至悬浮状态[图 9(d)]。使用这种方法还可以对大肠杆菌、血细胞等生物样品进行类似的捕获。这种方法具有结构简单、捕获范围广泛、捕获数量大和无损伤等优点,可用于疾病的药物靶向治疗、病毒或恶性细胞的有效清除和医用水的净化等领域。

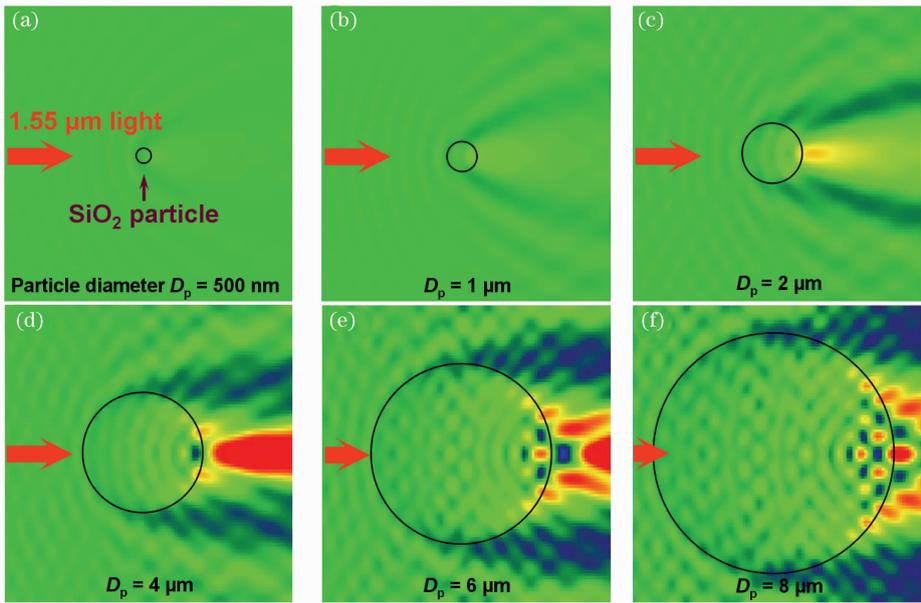


图 8 三维 FDTD 方法模拟的亚波长光纤周围不同直径 SiO₂ 颗粒表面电场振幅分布情况。直径(a) 500 nm; (b) 1 μm; (c) 2 μm; (d) 4 μm; (e) 6 μm; (f) 8 μm

Fig. 8 3D-FDTD simulated electric field amplitude distributions at the surfaces of the SiO₂ particles with diameters of (a) 500 nm; (b) 1 μm; (c) 2 μm; (d) 4 μm; (e) 6 μm; (f) 8 μm

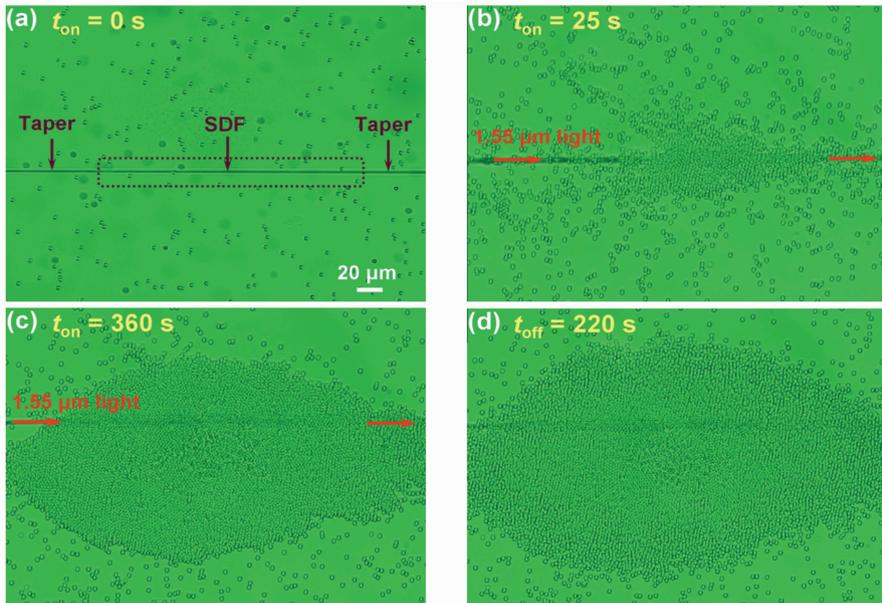


图 9 光学显微镜下拍摄的亚波长光纤对 SiO₂ 颗粒群体的光泳力捕获和扩散图。(a)未通光的情况;(b)通光时间为 $t_{on}=25$ s 的情况;(c) $t_{on}=360$ s;(d)关闭激光后 $t_{off}=220$ s 时被捕获颗粒的分散悬浮状态

Fig. 9 Optical microscope images of SiO₂ particles assembled and diffused by the subwavelength diameter fiber. (a) Without light; (b) with light for $t_{on}=25$ s; (c) $t_{on}=360$ s; (d) suspension of diffused particles after light switched off for $t_{off}=220$ s

在完成捕获后,还可以通过平行移动亚波长光纤实现对捕获颗粒的迁移。图 10 是在输入光功率为 100 mW 时,利用直径 1.3 μm 的亚波长光纤对已捕获的 SiO₂ 颗粒(直径 2.08 μm)群体进行迁移的情况^[35]。当迁移时间经过 119 s 时,大约 85% 的 SiO₂ 颗粒迁移到了新的位置(距离原始位置约

20 μm)。除了在悬浮液中实现对大量微颗粒群体的捕获与迁移外,利用亚波长光纤还可以在毛细管、微流通道等狭小密闭空间内的光泳捕获和操控。例如,将亚波长光纤置于玻璃毛细管内,当通光波长为 1.55 μm,通光功率约 200 mW 时,同样可以将悬浮液中的 SiO₂ 颗粒(直径 3.14 μm)进行捕获

并通过移动亚波长光纤实现迁移,如图 11 所示^[35]。可见使用这种亚波长光纤对物体产生的逆向光泳力

可以方便地对介质颗粒和生物样品的大量捕获和移除。

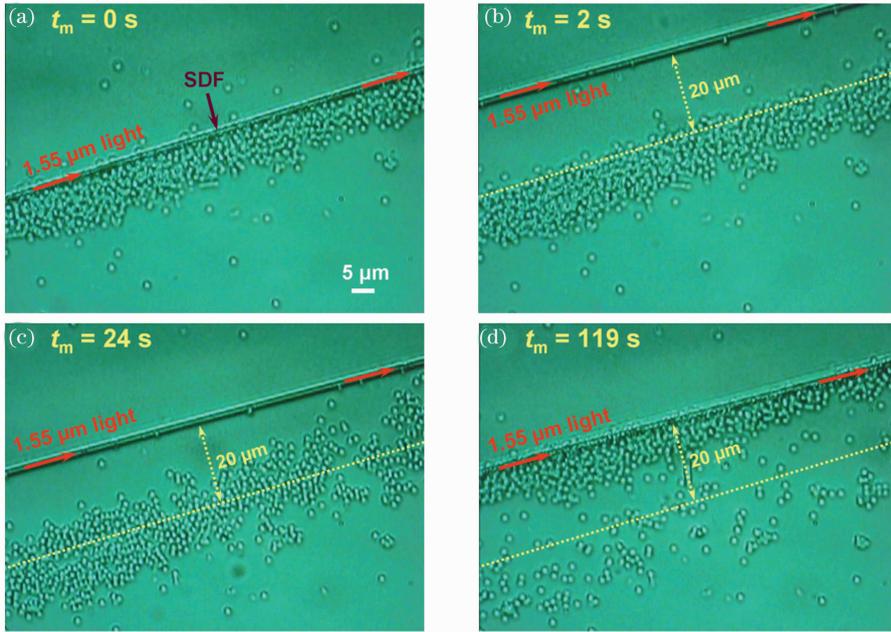


图 10 光学显微镜拍摄的亚波长光纤对 SiO₂ 颗粒的光泳力迁移过程。(a) 迁移前的情况($t_m=0$); (b) 将亚波长光纤平行移动到了距离初始位置为 20 μm 处时,迁移了 $t_m=2$ s 的情况; (c) $t_m=24$ s 时的迁移情况; (d) $t_m=119$ s 时的迁移情况
Fig. 10 Optical microscope images for migration of assembled SiO₂ particles by the subwavelength diameter fiber. (a) Before migration ($t_m=0$); (b) migration for $t_m=2$ s after moving the subwavelength diameter fiber to a new location of 20 μm away from its original location; (c) migration for $t_m=24$ s; (d) migration for $t_m=119$ s

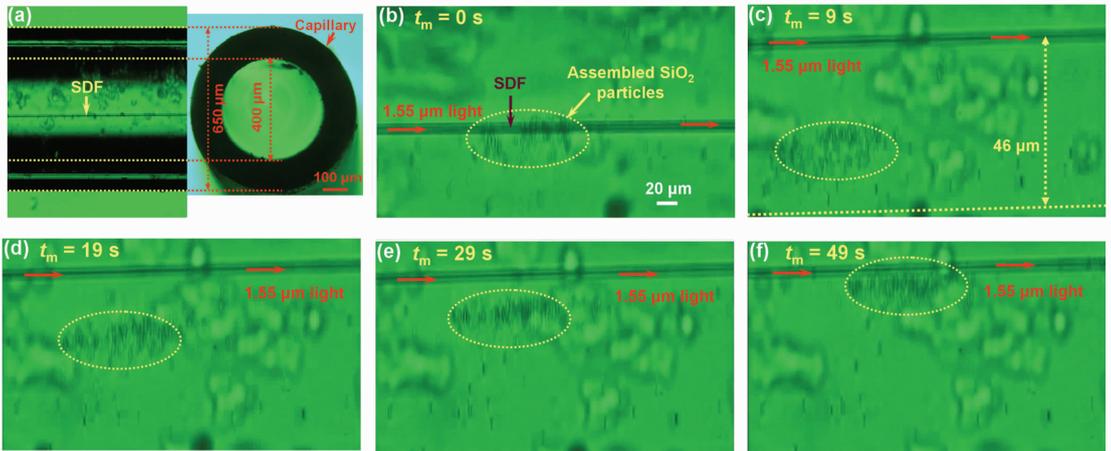


图 11 SiO₂ 颗粒在毛细管内的捕获和迁移。(a) 置于玻璃毛细管内的亚波长光纤和毛细管横截面的显微镜照片; (b) 迁移前的情况($t_m=0$); (c) 迁移了 $t_m=9$ s 的情况; (d) $t_m=19$ s; (e) $t_m=29$ s; (f) $t_m=49$ s 时有 90% 以上的颗粒迁移到了亚波长光纤的新位置周围

Fig. 11 Trapping and migration of SiO₂ particles in a capillary. (a) Microscopic image of a 1.3-μm-diameter fiber placed in the capillary; (b) before migration ($t_m=0$); (c) migration for $t_m=9$ s; (d) $t_m=19$ s; (e) $t_m=29$ s; (f) $t_m=49$ s, over 90% particles migrated to the new location

光泳的产生源于颗粒表面能量分布的不均匀,这是一种依靠局部环境的温度梯度产生的运动。当颗粒所处的液体环境存在整体的温度梯度时,也能够导致颗粒沿着温度梯度的方向(一般是从高温区

域到低温区域)运动^[36]。液体环境的温度梯度对物体的操控方法已被广泛应用到颗粒以及生物分子的捕获、迁移上^[37,38]。而通过液体对光的吸收(光热效应)可以引起液体环境的整体温度梯度,因此利用

光热效应也成为捕获和操控微小物体的方法之一。例如,将直径为 $6\ \mu\text{m}$ 的光纤制成一个光纤环,将波长为 $1.55\ \mu\text{m}$ 、功率为 $97\ \text{mW}$ 的近红外光通入光纤环后,利用近红外光在水中的光热效应可以实现对 SiO_2 颗粒的大量捕获和移除^[39]。当 $1.55\ \mu\text{m}$ 波长的光在光纤环中传播时,由于光纤环的弯曲,光从表面散射和泄漏到水中,如图 12 的模拟结果所示^[39]。进而作用在悬浮的 SiO_2 颗粒(直径为 $2.08\ \mu\text{m}$)上产生逆向光泳力,使受到光照的颗粒朝环运动;而在靠

近环的区域,由于水对 $1.55\ \mu\text{m}$ 波长的光有较大的吸收,使得水的温度升高,从而在光纤周围产生一个温度梯度。由于作用在颗粒上的温度梯度力与逆向光泳力的方向相反,颗粒的运动速度渐渐减小;环中央区域由于距离光纤稍远、光场较弱,从而形成一个温度低谷,而颗粒最终被捕获在环中央并且在此聚集。利用光纤环捕获 SiO_2 颗粒的过程^[39] 如图 13(a)~(d)所示。也可以通过移动光纤环将捕获到的颗粒移除,如图 13(e),(f)所示。图 13(e)表示将光纤环

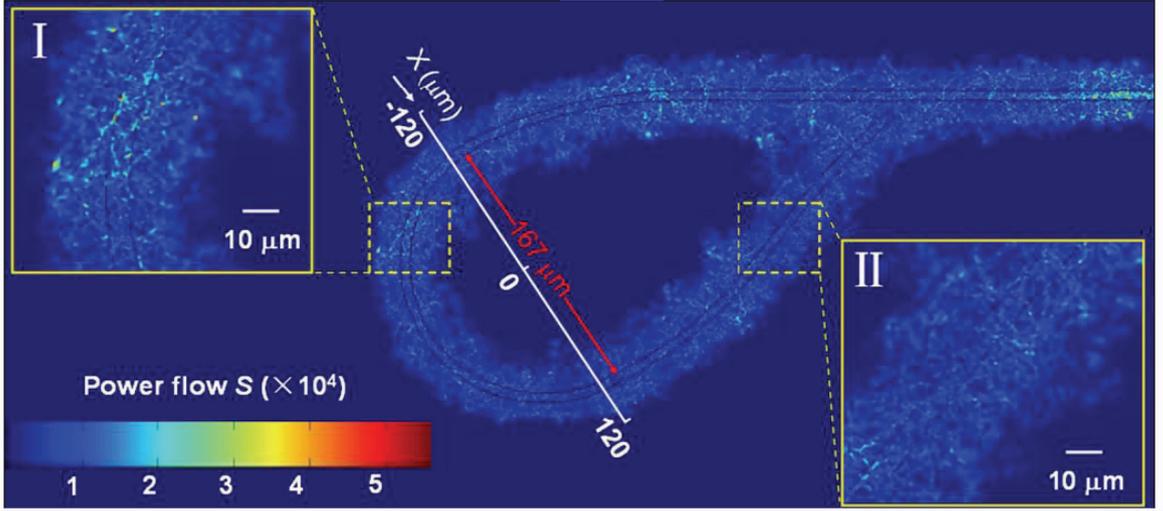


图 12 $1.55\ \mu\text{m}$ 波长的光在光纤环中传播时的光场分布模拟结果。插图 I 和 II 分别表示光纤环左侧和右侧的光场分布
Fig. 12 Simulation results of optical field distribution ($1.55\ \mu\text{m}$ in wavelength) around the fiber ring. Insets I and II show the optical field distributions on the left and right boundaries, respectively

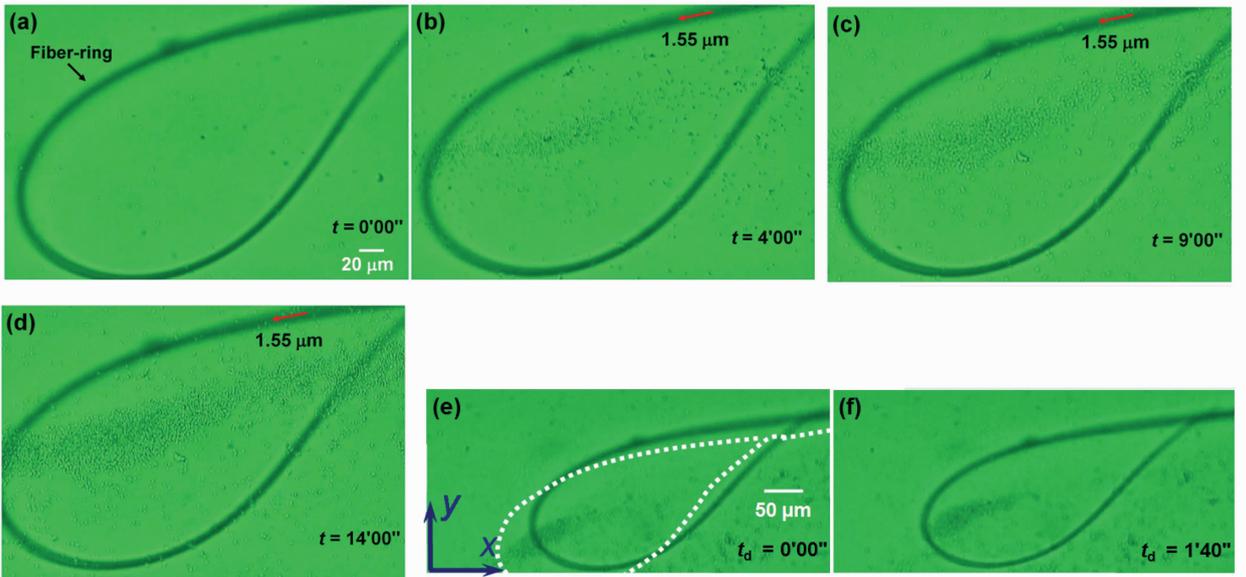


图 13 使用光纤环对颗粒进行大量捕获和移除。(a)~(d)颗粒的大范围捕获和收集过程;
(e),(f)通过移动光纤环对收集到的颗粒进行移除

Fig. 13 Optical microscopic images for trapping and removal of the particles in big quantity by fiber ring. (a)~(d) Trapping and collection process of particles in large range; (e), (f) removing the collected particles by moving fiber ring

从最初的位置(白色虚线表示)沿 x 和 y 方向分别移动 50 和 40 μm ,再经过 100 s 后,原先被捕获的颗粒也移动到了新的位置[图 13(f)].这一方法是通过逆向光泳和光热效应二者的共同作用来对颗粒进行大范围的收集和移除的。此外,当低吸光率、不同材料或不同大小的颗粒同时悬浮于水中时,尺寸较大或折射率较高的颗粒将获得更大的光泳速度^[34,35],因而利用光泳还可以将不同种类的颗粒进行分离。可见,使用逆向光泳或者光热效应可以方便地实现对微小物体(包括介质颗粒和生物样品等)的大量捕获、移除以及分离等操作。

5 结 论

对近年来国际上在光捕获和光操控方面取得的一些重要研究成果进行了总结。可以看出,虽然光镊、倏逝波、光泳和光热对物质进行操控的原理有所区别,作用范围和效果也有所差异,但这些方法都为物质的非接触性操控提供了无损害的途径。目前,光捕获和光操控的研究及应用已从颗粒、细胞的个体研究逐渐深化到生物分子的研究,而具有大范围捕获作用的光泳捕获和操控将在生物医学、环境卫生、微纳结构组装等领域发挥重要的作用。可以预见,光捕获和光操控将在交叉学科研究中起到越来越大的作用,也将成为交叉学科的一个前沿研究热点。

参 考 文 献

- 1 A. Ashkin. Acceleration and trapping of particles by radiation pressure [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1970, **24**(4): 156~159
- 2 A. Ashkin. History of optical trapping and manipulation of small-neutral particle, atoms, and molecules [J]. *IEEE J. Sel. Topics Quant. Electron.*, 2000, **6**(6): 841~856
- 3 D. G. Grier. A revolution in optical manipulation [J]. *Nature*, 2003, **424**(6950): 810~816
- 4 K. Dholakia, P. Reece. Optical micromanipulation takes hold [J]. *Nanotoday*, 2006, **1**(1): 18~27
- 5 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
- 6 S. Chu, J. E. Bjorkholm, A. Ashkin *et al.*. Experimental observation of optically trapped atoms [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1986, **57**(3): 314~318
- 7 A. Ashkin, J. M. Dziedzic. Optical trapping and manipulation of viruses and bacteria [J]. *Science*, 1987, **235**(4795): 1517~1520
- 8 A. Ashkin, J. M. Dziedzic, T. Yamane. Optical trapping and manipulation of single cells using infrared laser beams [J]. *Nature*, 1987, **330**(6150): 769~771
- 9 A. Ashkin, J. M. Dziedzic. Internal cell manipulation using infrared laser traps [J]. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 1989, **86**(20): 7914~7918
- 10 A. Ashkin. Forces of a single-beam gradient laser trap on a dielectric sphere in the ray optics regime [J]. *Biophys. J.*, 1992, **61**(2): 569~582
- 11 A. Ashkin. Optical trapping and manipulation of neutral particles using lasers [J]. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 1997, **94**(10): 4853~4860
- 12 M. D. Wang, H. Yin, R. Landick *et al.*. Stretching DNA with optical tweezers [J]. *Biophys. J.*, 1997, **72**(3): 1335~1346
- 13 R. W. Applegate, J. Squier, T. Vestad *et al.*. Optical trapping, manipulation, and sorting of cells and colloids in microfluidic systems with diode laser bars [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(19): 4390~4398
- 14 C. Xie, D. Chen, Y. Li. Raman sorting and identification of single living micro-organisms with optical tweezers [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(14): 1800~1802
- 15 R. W. Applegate, J. Squier, T. Vestad *et al.*. Microfluidic sorting system based on optical waveguide integration and diode laser bar trapping [J]. *Lab. Chip*, 2006, **6**(3): 422~426
- 16 Y. Y. Sun, X. C. Yuan, L. S. Ong *et al.*. Large-scale optical traps on a chip for optical sorting [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **90**(3): 031107
- 17 M. J. Guffey, N. F. Scherer. All-optical patterning of Au nanoparticles on surfaces using optical traps [J]. *Nano Lett.*, 2010, **10**(11): 4302~4308
- 18 A. N. Grigorenko, N. W. Roberts, M. R. Dickinson *et al.*. Nanometric optical tweezers based on nanostructured substrates [J]. *Nature Photonics*, 2008, **2**(6): 365~370
- 19 S. H. Tao, X. C. Yuan, J. Lin *et al.*. Fractional optical vortex beam induced rotation of particles [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(20): 7726~7731
- 20 Z. Liu, C. Guo, J. Yang *et al.*. Tapered fiber optical tweezers for microscopic particle trapping: fabrication and application [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(25): 12510~12516
- 21 Z. H. Hu, J. Wang, J. W. Liang. Manipulation and arrangement of biological and dielectric particles by a lensed fiber probe [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(17): 4123~4128
- 22 S. Mandal, X. Serey, D. Erickson. Nanomanipulation using silicon photonic crystal resonators [J]. *Nano Lett.*, 2010, **10**(1): 99~104
- 23 S. Kawata, T. Sugiura. Movement of micrometer-sized particles in the evanescent field of a laser beam [J]. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(11): 772~774
- 24 B. S. Schmidt, A. H. J. Yang, D. Erickson *et al.*. Optofluidic trapping and transport on solid core waveguides within a microfluidic device [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(22): 14322~14334
- 25 A. H. J. Yang, D. Erickson. Stability analysis of optofluidic transport on solid-core waveguiding structures [J]. *Nanotechnology*, 2008, **19**(4): 045704
- 26 S. Gaugiran, S. Getin, J. M. Fedeli *et al.*. Optical manipulation of microparticles and cells on silicon nitride waveguides [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(18): 6956~6963
- 27 S. Gaugiran, S. Getin, J. M. Fedeli *et al.*. Polarization and particle size dependence of radiative forces on small metallic particles in evanescent optical fields. Evidences for either repulsive or attractive gradient forces [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(13): 8146~8156
- 28 K. Wang, E. Schonbrun, K. B. Crozier. Propulsion of gold nanoparticles with surface plasmon polaritons: evidence of enhanced optical force from near-field coupling between gold particle and gold film [J]. *Nano Lett.*, 2009, **9**(7): 2623~2629
- 29 S. Y. Lin, E. Schonbrun, K. Crozier. Optical manipulation with planar silicon microring resonators [J]. *Nano Lett.*, 2010, **10**(7): 2408~2411
- 30 A. H. J. Yang, S. D. Moore, B. S. Schmidt *et al.*. Optical manipulation of nanoparticles and biomolecules in sub-wavelength slot waveguides [J]. *Nature*, 2009, **457**(7225): 71~75
- 31 G. Brambilla, G. S. Murugan, J. S. Wilkinson *et al.*. Optical

- manipulation of microspheres along a subwavelength optical wire [J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(20): 3041~3043
- 32 H. B. Xin, B. J. Li. Targeted delivery and controllable release of nanoparticles using a defect-decorated optical nanofiber [J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(14): 13285~13290
- 33 A. S. Desyatnikov, V. G. Shvedov, A. V. Rode *et al.*. Photophoretic manipulation of absorbing aerosol particles with vortex beams: theory versus experiment [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(10): 8201~8211
- 34 C. Y. Soong, W. K. Li, C. H. Liu *et al.*. Theoretical analysis for photophoresis of a microscale hydrophobic particle in liquids [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(3): 2168~2182
- 35 H. X. Lei, Y. Zhang, X. M. Li *et al.*. Photophoretic assembly and migration of dielectric particles and *Escherichia coli* in liquids using a subwavelength diameter optical fiber [J]. *Lab. Chip*, 2011, **11**(13): 2241~2246
- 36 S. Duhr, D. Braun. Why molecules move along a temperature gradient [J]. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 2006, **103**(52): 19678~19682
- 37 M. Ichikawa, H. Ichikawa, K. Yoshikawa *et al.*. Extension of a DNA molecule by local heating with a laser [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2007, **99**(14): 148104
- 38 P. Baaske, C. J. Wienken, P. Reineck *et al.*. Optical thermophoresis for quantifying the buffer dependence of aptamer binding [J]. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2010, **49**(12): 2238~2241
- 39 H. B. Xin, H. X. Lei, Y. Zhang *et al.*. Photothermal trapping of dielectric particles by optical fiber-ring [J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(3): 2711~2719