

鸟喙形环形芯光纤光镊粒子捕获受力分析

申泽, 成煜, 邓洪昌, 苑立波*

桂林电子科技大学电子工程与自动化学院光子学研究中心, 广西 桂林 541004

摘要 设计了一种具有鸟喙形的环形芯光纤光镊结构,并通过理论仿真进行研究。应用有限元法仿真光镊的光场强度分布,并对比了不同弯曲条件下光镊的光场图,结果表明,弯曲结构显著增强了光纤侧边的倏逝场强度。采用麦克斯韦应力张量法计算光镊对粒子的捕获力,并对比锥形光纤,分析鸟喙形光纤光镊的弯曲半径与捕获力的关系,以及粒子半径与捕获力的关系。结果证实鸟喙形环形芯光纤光镊不仅可以在尖端捕获粒子,还可以在侧边捕获、运输粒子。所提出的新型光纤光镊可应用于细胞生物学辅助研究领域。

关键词 几何光学; 光镊; 有限元法; 倏逝场; 麦克斯韦应力张量法

中图分类号 Q631

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1808001

Analysis of Trapping Force of Beak-Shaped Optical Tweezers with Annular Core Fibers for Particles

Shen Ze, Cheng Yu, Deng Hongchang, Yuan Libo*

Photonics Research Center, School of Electronic Engineering and Automation, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China

Abstract In this paper, a beak-shaped optical tweezer with annular core fibers is designed and studied by theoretical simulation. The finite element method is used to simulate the optical field intensity distribution of the optical tweezers, and the optical field images of the optical tweezers under different bending conditions are compared. The results show that bending deformation increases the light intensity of the side evanescent field. The Maxwell stress tensor method is used to analyze and calculate the trapping force of the optical tweezers for particles. The new tweezers are compared with the conical optical fibers to analyze the relationship between the bending radius and the trapping force, as well as between the particle radius and the trapping force. The results show that the designed optical tweezers can not only capture particles at the tip but also capture and transport particles at the side. The new optical tweezers can be applied to auxiliary research on cell biology.

Key words geometric optics; optical tweezers; finite element method; evanescent wave; Maxwell stress tensor method

OCIS codes 350.4855; 170.4520; 080.1753

1 引言

Ashkin 等^[1-4]在光镊领域的开创性研究获得了 2018 年诺贝尔物理学奖。大量科研人员沿着 Ashkin 开创的工作继续前进,并从研究空间光镊^[5]

扩展到光纤光镊^[6-7],从单纯的细胞捕获^[8]到细胞分选^[9-10]、受力研究或细胞拉曼光谱研究^[11-12]等,极大促进了人类知识库的丰富。

经过几十年的发展,光镊主要分为两种类型:空间光镊^[13]和光纤光镊。传统的空间光镊需要大量

收稿日期: 2021-03-09; 修回日期: 2021-03-31; 录用日期: 2021-04-16

基金项目: 国家重点研发项目(2019YFB2203901)、国家自然科学基金面上项目(61975038, 61675052)、广西研究生教育创新计划资助项目(YCSW2019146)

通信作者: *lbyuan@vip.sina.com

光学器件,在实验平台搭建过程中需要严格地调整光路,不仅仪器昂贵、系统复杂、体积庞大,而且输出激光的传播路径十分单一,缺乏灵活性。相比于空间光镊,光纤光镊的实验设备简单、操作平台搭建难度小,而且激光可以随着光纤的移动随意改变光路。正是因为光纤光镊具有很多得天独厚的特点,近年来大量研究人员进行了非常多有意义的研究。研究人员使用不同种类的光纤经过各种光纤端的特殊加工处理,制备出各式各样的光纤光镊探针^[14-16],可以实现更多复杂而实用的操作,例如,集成细胞捕获、探测、弹射功能的光纤“枪”^[17],多方向调整细胞姿态的“光纤微光手”^[18]等。

最常见的光纤光镊就是锥形光纤光镊^[19-21]和微纳光纤光镊^[22-23]。通过机械研磨、熔融拉锥、化学腐蚀等方法可以将光纤端制备成锥形光纤或者制备成微纳光纤。锥形结构可以将原本发散的激光汇聚在光纤尖端,形成梯度光场。这个梯度光场可以对粒子实现三维捕获。研究人员通过设计不同的锥形来改进制备工艺,目的是增强出射光场的梯度,从而获得更大的捕获力。如果将光纤制备成微纳光纤,由于微纳光纤的直径在几百纳米到几微米之间^[24],纤芯已经失去了对激光的束缚能力,部分光场在包层和外界环境的交界处产生倏逝场。倏逝场对粒子具有二维捕获能力,可以将粒子捕获到光纤表面,并沿着光束传播方向移动粒子,实现对粒子的定向运输等操作。

本文从理论方面提出一种鸟喙形环形芯光纤光镊,发现锥形环形芯光纤光镊经过弯曲形变,不仅可以显著增强锥形侧面的倏逝场,提供较大的侧向捕获力,还可以继承锥形光纤光镊和微纳光纤光镊的特性功能。并且,这种技术对设备要求低,制造成本也低,因此非常具有研究价值。

2 基本原理

2.1 鸟喙形环形芯光镊模型

设计出一种鸟喙形环形芯光纤光镊模型,形状如同一个经过一定弯曲形变的锥形,如图 1 所示。用类抛物线函数描述锥形光纤光镊的尖端轮廓,仿真光纤长度 $x_{\text{length}} = 35 \mu\text{m}$,其线性函数为

$$x = f(y) = 35 - \left(\frac{35}{10^{2.2}} \cdot y \right)^{2.2}. \quad (1)$$

在图 1 中,锥形光纤的纤芯已省略。初始光镊尖端半径为 $7 \mu\text{m}$,即 $x = 0$ 时, $y = \pm 7 \mu\text{m}$ 。直线 $y = 0$ 表示类抛物线函数的中心线。

鸟喙形光纤尖端的弯曲中心线是圆心坐标 $(x, y) = (0, -r)$ 、弯曲半径为 r 的圆弧,如图 1 所示。锥形随着中心线弯曲成圆弧而形变成鸟喙形。因此在计算模型的任意一点 x_0 处,直光纤探针半径与环形芯鸟喙光纤光镊的半径相同,即 $\Delta y_{\text{straight}} = \Delta y_{\text{bend}}$,由此可得出鸟喙形光纤光镊轮廓的线性函数:

$$y = f(x, r) = \sqrt{r^2 - x^2} - r + \left[\frac{(x_{\text{length}} - x)r^{2.2}}{x_{\text{length}}} \right]^{\frac{1}{2.2}}. \quad (2)$$

当 $r = \infty$ 时,鸟喙形光纤光镊成为锥形光镊。在光纤形变过程中,纤芯随着光纤发生仿射变形。在 $x = 0$ 处,纤芯直径为 $0.58 \mu\text{m}$,纤芯中心到 x 轴的距离为 $4.96 \mu\text{m}$ 。

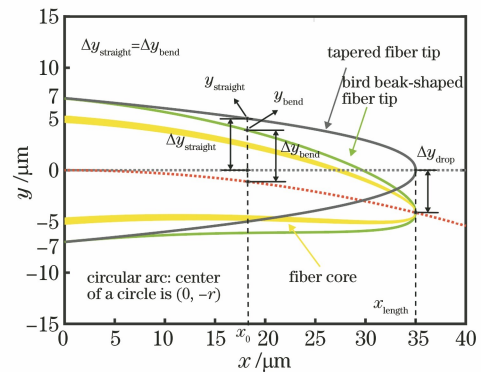


图 1 锥形和鸟喙形环形芯光纤尖端计算模型

Fig. 1 The computational model of the tapered and bird beak-shaped annular core fiber tip

2.2 捕获力计算

捕获力可以被分解为梯度力和散射力。其中,强度剧烈变化的光场可以产生将粒子“拉”向光强最大位置的梯度力,沿光束传播方向可以产生“推”开粒子的散射力。激光经过光纤尖端的锥形结构形成聚焦光场,也就是三维梯度光场,可以在横向和纵向的一定范围内将粒子捕获到光纤前端。根据光场焦点的位置,粒子被捕获到光纤前端或者距离光纤前端一定距离,但无论如何都是强汇聚的光束对透明介质产生的作用力。倏逝场对粒子捕获的特性与聚焦光场不同。倏逝场在光纤包层与环境的交界处,光场沿横向剧烈衰减形成梯度光场,从而对粒子产生梯度力;在纵向沿交界处传播,对粒子形成散射力。

捕获力与光的波长、粒子属性、粒子尺寸、所处环境等因素密切相关。经过了几十年的发展,已经形成了较为成熟的计算模型。本研究使用有限元分析法(FEM),通过解麦克斯韦方程对矢量光场的分

布和变化进行精确描述,基于电磁散射过程分析粒子和光场的相互作用,再通过麦克斯韦应力张量法计算粒子受力情况。

电磁场作用到体积为 V 的粒子的总力为^[25]

$$\mathbf{F} = \oint_S \mathbf{T} \cdot \mathbf{n} dS = \oint_S \langle T_{ij} \rangle n_j dS, \quad (3)$$

对粒子闭合曲面 S 进行积分, \mathbf{n} 是闭合曲面 S 的单位外法向量,作用在体积为 V 的细胞上的力可以看作是粒子的表面 S 上的张力, \mathbf{T} 为作用在单位面积上的张力张量。作用在面元上的力为 $d\mathbf{F} = \mathbf{T}dS$ 。

对于时谐场,电磁场应力张量的时间平均值可用场的复振幅表示

$$\langle T_{ij} \rangle = \frac{1}{2} \text{Re} \left[\epsilon_0 \epsilon_1 E_i E_j^* + \mu_0 \mu_1 H_i H_j^* - \frac{1}{2} \delta_{ij} (\epsilon_0 \epsilon_1 E^2 + \mu_0 \mu_1 H^2) \right], \quad (4)$$

式中: ϵ_0 为介质的介电常数; ϵ_1 为真空介电常数; μ_0 为真空磁感应系数; μ_1 为介质的磁感应系数。

定义 F_n 表示合力 \mathbf{F} 沿光纤表面法线方向的分

量; F_t 表示合力 \mathbf{F} 沿光纤表面切线方向的分量。

3 分析与讨论

根据计算模型,使用有限元法计算不同弯曲半径下的鸟喙形光纤尖端的光场分布,由于计算机配置所限,使用二维模型近似方法。其中仿真区域为 $52 \mu\text{m} \times 40 \mu\text{m}$ 的矩形区域,使用 2 倍波长厚度的完美匹配层。模型使用自由三角形网格,其最大单元的边长为波长的 1/5。光束在光纤中的传播方向是从左往右。光源波长为 980 nm,功率为 1 W;背景、包层、纤芯、粒子折射率分别为 1.33、1.45、1.46、1.40。当弯曲半径 r 在 $100 \sim 200 \mu\text{m}$ 的范围内变化时, Δy_{drop} 的变化最大(图 1),所以,本课题组重点在这个范围内进行研究。不同弯曲半径下光场强度分布的仿真结果如图 2 所示。当 $r = \infty$ 时,鸟喙形等同于锥形。从图 2(a)~(c)与图 2(d)的光场对比可以清楚地看到:通过弯曲形变,光纤不仅顶端有聚焦光场,而且侧边的倏逝场显著增强。

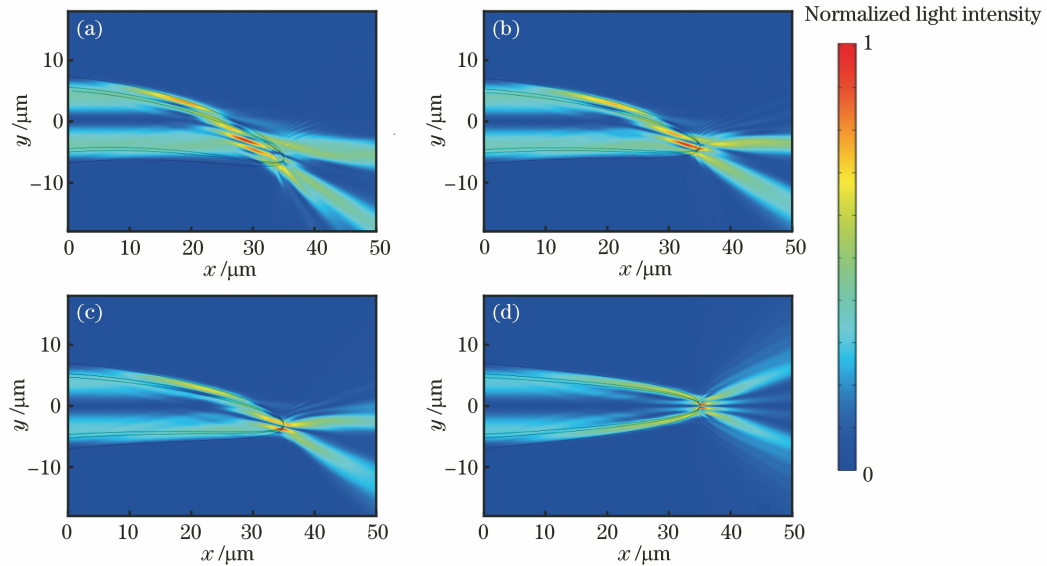


图 2 不同弯曲半径下的归一化光场强度分布。(a)弯曲半径为 $100 \mu\text{m}$; (b)弯曲半径为 $150 \mu\text{m}$; (c)弯曲半径为 $200 \mu\text{m}$; (d)弯曲半径为 ∞

Fig. 2 The normalized light intensity distribution under different bending radiuses. (a) The bending radius is $100 \mu\text{m}$; (b) the bending radius is $150 \mu\text{m}$; (c) the bending radius is $200 \mu\text{m}$; (d) the bending radius is ∞

为了定量研究增强后的倏逝场对鸟喙形光纤光镊粒子捕获的影响,计算了作用于直径为微米范围粒子的捕获力,结果如图 3 所示,选取 7 个离散的位置用于计算粒子捕获力(以 $r = 150 \mu\text{m}$ 的鸟喙形光纤为例):白色圆环表示被捕获粒子的外部轮廓,粒子折射率为 1.4、半径为 $2.5 \mu\text{m}$;黑点表示粒子与光纤的切点位置,相应标记为 $L_1 \sim L_7$ 。7 个切点的

横坐标位置分别为 $5 \mu\text{m}$ 、 $10 \mu\text{m}$ 、 $15 \mu\text{m}$ 、 $20 \mu\text{m}$ 、 $25 \mu\text{m}$ 、 $30 \mu\text{m}$ 和 $35 \mu\text{m}$ 。箭头表示每个粒子所受捕获力 \mathbf{F} 的单位矢量,捕获力的计算方法由(3)式和(4)式给出。为了更好地分析捕获力对粒子运动的影响,将 \mathbf{F} 分解为垂直于光纤表面的法向分量 F_n 和平行于光纤表面的切向分量 F_t 。当 F_n 的符号为正,表示粒子受到拉向光纤的“拉力”,反之表示受到

“推力”；当 F_t 的符号为正时，表示粒子受到朝着光束传播方向的“推力”。由于倏逝场沿光纤表面纵向传播，因此 F_t 的符号只能是正号。位置 L_7 表示粒子被稳定捕获的位置，此时粒子所受切向分量 F_t 为 0，法向分量 F_n 将粒子“吸”在光纤顶端。

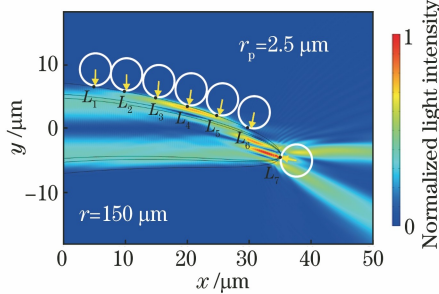


图 3 鸟喙形环形芯光纤尖端捕获粒子的计算模型

Fig. 3 The computational model for trapping particles on beak-shaped annular core fiber tip

当鸟喙形光纤的弯曲半径不同时，计算了捕获位置与捕获力的关系，并且与锥形光纤的结果进

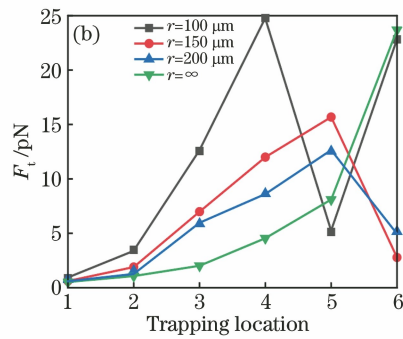
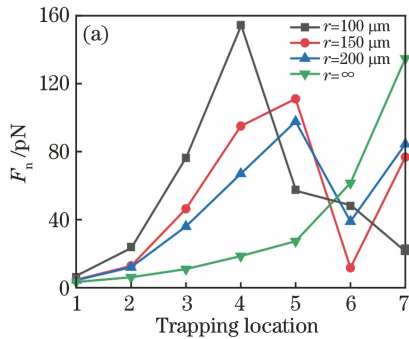


图 4 当粒子半径 $r_p = 2.5 \mu\text{m}$ 时，捕获位置与捕获力的关系。(a) 捕获力的法向分量 F_n 与捕获位置的关系；(b) 捕获力的切向分量 F_t 与捕获位置的关系

Fig. 4 Trapping location changed with trapping force when bending radius of particle $r_p = 2.5 \mu\text{m}$. (a) Normal component of the trapping force F_n changed with trapping location; (b) the tangential component of the trapping force F_t changed with trapping location

通过观察图 3 所示的光场强度分布和图 4 所示的捕获力变化情况，可以得出结论：相比于锥形光纤光镊，鸟喙形光纤光镊由于弯曲作用，侧边倏逝场显著增强，并且捕获力随着弯曲半径的减小而增大。粒子在光纤侧边同时受到两个方向的捕获力：指向光纤的捕获力法向分量和推向光纤尖端的捕获力切向分量。

当光镊尖端的弯曲半径 $r = 150 \mu\text{m}$ 时，对比了不同粒子半径与捕获力的关系，如图 5 所示，粒子半径 r_p 分别为 $0.5 \mu\text{m}$ 、 $1.0 \mu\text{m}$ 、 $2.0 \mu\text{m}$ 、 $2.5 \mu\text{m}$ 和 $3.0 \mu\text{m}$ 。图 5(a) 中，横坐标 1~7 分别表示粒子位于 $L_1 \sim L_7$ 位置。粒子在位置 L_1 和 L_2 时，光纤弯

行对比。图 4(a) 中，横坐标 1~7 分别表示粒子位于 $L_1 \sim L_7$ 位置。位置 L_1 处光纤弯曲形变较小，倏逝场没有显著增强。当粒子位于位置 $L_2 \sim L_5$ 时，相比于锥形光纤，鸟喙形光纤的粒子捕获力明显增大；并且倏逝场的强度随着光纤弯曲半径的减小而增大， F_n 随倏逝场的增强而增大。但是，当弯曲半径 $r = 100 \mu\text{m}$ 且粒子位于位置 L_5 时，由于弯曲半径过小，光场在此之前经过全反射作用，因而形成光场“空白”， F_n 反而最小。当粒子位于位置 L_6 时，鸟喙形光纤在此处同样形成光场“空白”，此时 F_n 全部小于锥形光纤的相应力分量。当粒子位于位置 L_7 时，也就是光纤最前端的位置， F_n 随着弯曲半径的减小而减小。

图 4(b) 中，横坐标 1~6 分别表示粒子位于 $L_1 \sim L_6$ 位置，粒子在位置 $L_1 \sim L_5$ 时， F_t 随着弯曲半径的减小而增大，其中由于光场“空白”的原因，弯曲半径 $r = 100 \mu\text{m}$ 时 F_t 最小。在位置 L_6 ，锥形光纤的 F_t 最大。

曲形变较小，倏逝场没有明显增强，虽然在位置 L_2 的 F_n 有所增大，但是仍然很小，无法对粒子产生影响；随着捕获点向右移动，光纤的弯曲形变增大，相较于锥形光纤，鸟喙形光纤倏逝场有明显增强， F_n 也随之增大，在位置 L_5 时达到最大值；在位置 L_6 时，虽然弯曲形变剧烈，但是光场由于在此之前经过透射和折射作用，此时形成光场“空白”，光束对粒子的作用较小，使得 F_n 迅速减小；在位置 L_7 时，粒子位于光纤前端，光束被强聚焦后射出光纤，在前端具有三维捕获能力，在梯度力的作用下捕获粒子，此时捕获力较大。当 r_p 大于光源波长时， F_n 随半径的增大而减小；当 r_p 小于或近似于光源波长时， F_n 随

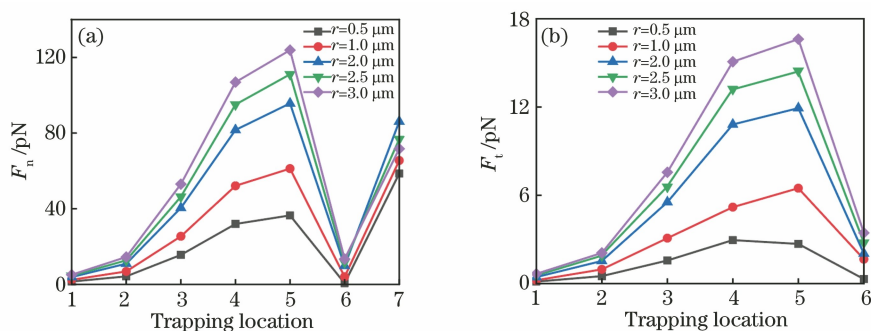


图 5 当鸟喙形环形芯光纤尖端弯曲半径 $r=150 \mu\text{m}$ 时,捕获位置与捕获力的关系。(a)捕获力的法向分量 F_n 与捕获位置的关系;(b)捕获力的切向分量 F_t 与捕获位置的关系

Fig. 5 Trapping location changed with trapping force of particles with different radiuses when bending radius of beak-shaped annular core fiber tip $r=150 \mu\text{m}$. (a) Normal component of the trapping force F_n changed with trapping location; (b) the tangential component of the trapping force F_t changed with trapping location

半径的增大而增大。图 5(b)中,横坐标 1~6 分别表示粒子位于 $L_1 \sim L_6$ 位置,粒子在位置 $L_1 \sim L_6$ 时, F_t 的变化规律与 F_n 相同。同样,由于粒子位于 L_7 时捕获力切向分量为零,因此不分析位置 L_7 时 F_t 的大小。

从以上分析中可以得出结论:当弯曲半径 $r=150 \mu\text{m}$ 时,粒子在位置 $L_1 \sim L_5$ 时捕获力逐渐增大,在位置 L_1 时最小,在位置 L_5 时最大,在位置 L_6 时捕获力迅速减小;捕获力的分量 F_n 和 F_t 随粒子半径的增大而增大;当粒子位于光镊尖端,即 L_7 位置时,粒子受到三维捕获力,被稳定捕获在光纤前端。

通过观察图 5 所示的捕获力变化,可以分析粒子的运动情况:粒子在 $x > 5 \mu\text{m}$ 的区域被捕获到光纤表面,它将沿着光纤表面朝着纵轴方向运动,到 L_6 位置附近被释放;当粒子在 L_7 附近时,会被“吸”到 L_7 ,并被捕获。

4 结 论

研究了鸟喙形环形芯光纤光镊的捕获力。通过有限元法仿真光场强度分布,对比不同弯曲半径的鸟喙形光纤光镊与锥形光纤光镊,结果表明,相较于传统锥形光纤光镊,鸟喙形光纤光镊侧边具有较强的倏逝场。利用麦克斯韦应力张量法对粒子进行积分计算,从而得到粒子捕获力。当改变粒子尺寸时,捕获力随半径的增大而增大。定性分析了粒子运动方式:鸟喙形光纤光镊不仅可以在顶端三维捕获粒子,还可以在侧边捕获粒子,具有定向运输粒子的能力。如果适当改变鸟喙形光纤尖端参数,如尖端长度、弯曲半径、类抛物线函数等,可将侧边运输功能

与顶端捕获功能结合使用。例如:将侧边粒子运输到顶端被捕获,从而扩大光镊捕获范围;侧边运输的粒子依靠在顶端细胞旁,实现粒子队列式捕获;侧边运输的力被顶端散射光场弹射开,实现粒子“光枪”功能等。这些功能有望实现对细胞的操控。

所提出的鸟喙形光纤光镊综合了粒子捕获、运输两种功能,为光纤光镊提供了一种新型结构,为细胞学研究提供能了一种功能更强大的工具。

参 考 文 献

- [1] Ashkin A. Acceleration and trapping of particles by radiation pressure [J]. *Physical Review Letters*, 1970, 24(4): 156-189.
- [2] Ashkin A, Dziedzic J M. Optical levitation by radiation pressure [J]. *Applied Physics Letters*, 1971, 19(8): 283-285.
- [3] Ashkin A, Dziedzic J M, Bjorkholm J E, et al. Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles[J]. *Optics Letters*, 1986, 11(5): 288-290.
- [4] Ashkin A. 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.
- [5] Grier D G. A revolution in optical manipulation [J]. *Nature*, 2003, 424(6950): 810-816.
- [6] Constable A, Kim J, Mervis J, et al. Demonstration of a fiber-optical light-force trap [J]. *Optics Letters*, 1993, 18(21): 1867-1869.
- [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(25): 12510-12516.
- [8] Liu Z L, Liu Y X, Tang Y, et al. Fabrication and application of a non-contact double-tapered optical

- fiber tweezers [J]. *Optics Express*, 2017, 25(19): 22480-22489.
- [9] Zhang Y, Li B J. Particle sorting using a subwavelength optical fiber [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2013, 7(2): 289-296.
- [10] Zhang Y, Lei H X, Li B J. Refractive-index-based sorting of colloidal particles using a subwavelength optical fiber in a static fluid [J]. *Applied Physics Express*, 2013, 6(7): 072001.
- [11] Mahadevan-Jansen A, Mitchell M F, Ramanujam N, et al. Development of a fiber optic probe to measure NIR Raman spectra of cervical tissue *in vivo* [J]. *Photochemistry and Photobiology*, 1998, 68(3): 427-431.
- [12] Liang Y S, Yao B L, Lei M. Applications of holographic optical tweezers in biological research [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(2): 0207041.
梁言生, 姚保利, 雷铭. 全息光镊在生物学研究中的应用 [J]. *中国激光*, 2020, 47(2): 0207041.
- [13] Wei C Q, Chen X L, Xiao G Z, et al. Mechanical characteristics of four-beam optical trap on chip [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(13): 131401.
魏楚奇, 陈鑫麟, 肖光宗, 等. 片上四光束光阱的力学特性研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(13): 131401.
- [14] Li Y C, Xin H B, Liu X S, et al. Trapping and detection of nanoparticles and cells using a parallel photonic nanojet array [J]. *ACS Nano*, 2016, 10(6): 5800-5808.
- [15] Lou Y H, Wu D, Pang Y J. Optical trapping and manipulation using optical fibers [J]. *Advanced Fiber Materials*, 2019, 1(2): 83-100.
- [16] Zhao H Y, Gao S, Zhang X T, et al. A novel three-core fiber optic spanner [J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9634: 963457.
- [17] Deng H C, Zhang Y X, Yuan T, et al. Fiber-based optical gun for particle shooting [J]. *ACS Photonics*, 2017, 4(3): 642-648.
- [18] Zhang Y, Liu Z H, Yang J, et al. Four-core optical fiber micro-hand [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(10): 1487-1491.
- [19] Yuan L B. Specialty optical fibers for micro particle manipulation: optical tweezers, hands and gun [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2020, 18(2): 1-6.
苑立波. 纤端光操纵: 光镊·光手·光枪 [J]. *光学与光电技术*, 2020, 18(2): 1-6.
- [20] Liu X S, Li Y C, Xin H B, et al. Application of fiber tweezers in biosystems [J]. *Journal of Anqing Normal University (Natural Science Edition)*, 2019, 25(1): 4-9.
刘晓帅, 李宇超, 辛洪宝, 等. 光纤光镊在生物系统中的应用 [J]. *安庆师范大学学报(自然科学版)*, 2019, 25(1): 4-9.
- [21] Zhao X T, Zhao N, Shi Y, et al. Optical fiber tweezers: a versatile tool for optical trapping and manipulation [J]. *Micromachines*, 2020, 11(2): 114.
- [22] Brambilla G, Murugan G S, Wilkinson J S, et al. Optical manipulation of microspheres along a subwavelength optical wire [J]. *Optics Letters*, 2007, 32(20): 3041-3043.
- [23] Sheu F W, Wu H Y, Chen S H. Using a slightly tapered optical fiber to attract and transport microparticles [J]. *Optics Express*, 2010, 18(6): 5574-5579.
- [24] Tong L M. Micro-nano fiber and its application: research progress and future opportunities [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2020, 18(4): 12-17.
童利民. 微纳光纤及其应用: 研究进展及未来机遇 [J]. *光学与光电技术*, 2020, 18(4): 12-17.
- [25] Yang M J, Zhan W, Song W Z. Photothermal effect based single fiber trapping method and simulation analysis [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(8): 0806006.
杨敏君, 湛位, 宋五洲. 基于光热效应的单光纤捕获方法与仿真分析 [J]. *中国激光*, 2019, 46(8): 0806006.