

激光整形器件在光镊中的应用及进展

郭志和, 刘泽田, 陈启敏, 黄豪杰, 任洪亮

华侨大学信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021

摘要 光镊是一门利用光的动量与物质相互作用产生光势阱效应以实现粒子捕获的重要技术, 该技术被广泛应用于纳米或微米级微粒的捕获及操控领域。当今技术和需求的发展对光镊系统的光束变换提出了更高的要求, 因此需要对捕获光源的光束进行整形, 获得光镊所需的光场分布。以激光光束整形的器件为主线, 分别介绍在光镊系统中使用棱镜、衍射光学元件、液晶空间光调制器、数字微镜器件、光纤等光学元件进行捕获光源光束整形的情况。列出了这些器件组成的典型整形光路, 以及近年来这些器件在光束整形方面的研究进展。同时还介绍了在捕获光源的整形设计中, 上述方法的各自特点及相应的捕获能力。

关键词 激光光学; 光镊; 衍射光学元件; 空间光调制器; 数字微镜器件; 光纤

中图分类号 TN249 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.090004

Application and Progress of Laser Shaping Devices in Optical Tweezers

Guo Zhihe, Liu Zetian, Chen Qimin, Huang Haojie, Ren Hongliang

College of Information Science & Engineering, Huaqiao University, Xiamen, Fujian 361021, China

Abstract Optical tweezer is an important technique that utilizes the interaction between momentum of light and matter to produce light potentials and then realize particle trapping. Optical tweezer is widely used in the field of nano- or micron-scale particle capture and manipulation. The development of today's technology and demands puts forward higher requirements for beam transformation of optical tweezers. Therefore, it is necessary to shape the light beam to obtain the required light field distribution of the optical tweezers. We follow laser beam shaping devices, and the applications of prism, diffractive optical elements, spatial light modulators, digital micro-mirror devices, optical fibers and other optical components in the optical tweezer system are introduced. Typical shaping optical paths of these devices are listed, and recent advances in beam shaping of these devices are presented. Characteristics of the methods mentioned above and their corresponding capture abilities in the shaping design of the capture light source are introduced as well.

Key words laser optics; optical tweezers; diffractive optical elements; spatial light modulators; digital micro-mirror devices; fiber

OCIS codes 140.3300; 350.4855; 230.6120

1 引言

光镊是一种利用光物理性质实现光捕获的工具。1986年前后, 美国科学家 Ashkin A 等^[1-2]在美国电话电报公司(AT&T)贝尔实验室发现单束激光高度聚焦后能够捕获较大的粒子, 继而发明了光镊。光镊与原子力显微镜(AFM)、扫描探针显微镜(SPM)相比, 最突出的特点是可实现远距离非接触式捕获和无损伤操纵, 因而在生命科学、物理、化学、微纳制造、微流体等诸多领域有着重要的应用价值^[3]。光镊光源是由激光

收稿日期: 2017-03-28; **收到修改稿日期:** 2017-04-28

基金项目: 福建省高校青年自然科学基金重点项目(JZ160408)、福建省光电技术与器件重点实验室开放课题、国家级大学生创新创业训练计划项目(201610385027)

作者简介: 郭志和(1993—), 男, 硕士研究生, 主要从事光与生物、光电子方面的研究。E-mail: mozhiyan@qq.com

导师简介: 任洪亮(1980—), 男, 博士, 副教授, 主要从事光镊建设和应用、光电检测和应用等方面的研究。

E-mail: renhongliang@hqu.edu.cn(通信联系人)

器、光学耦合器和聚焦镜等组成,光源需是高梯度的光场,并且对光源的模式、波长、功率和工作方式都有很高的要求^[4]。

通常激光器输出光的光场分布并不适合光镊系统,因此需要对输出的激光进行准直和整形。常用的激光光束整形方法可以按照所使用的器件进行分类,如:非球面透镜、数字微镜器件(DMD)、反射式透镜、双折射透镜组、衍射光学元件(DOE)、空间光调制器(SLM)、光纤、长焦深元件等^[5-7]。本文对上述部分方法进行具体介绍,并给出相应的典型光路,分析各种方法的优缺点和适用领域。

2 棱 镜

棱镜可将半导体激光器输出的椭圆光束整形为圆光束^[8],也可以将光束整形为无衍射光束^[9],其中贝塞尔光束是最典型无衍射光束。

Ashkin A 等^[10]使用图 1 所示的装置观察到大肠杆菌在光镊中的运动。图 1 中,BS 为分束器,BF 为红外阻塞滤波器,VC 为摄像机,SL 为盖子,E 为目镜,F 为充液中空光纤,I 为照明器,L 为透镜,WI OBJ 为水浸物镜,CL 为聚焦透镜,其整形光路较为简单。这种通过高数值孔径的显微镜聚焦形成的高斯型光束光镊由于显微物镜的工作距离和高斯光束发散特性的限制,导致光镊在纵向的操控距离通常不会超过 $100\ \mu\text{m}$ ^[4]。而利用角锥棱镜产生贝塞尔光束型光镊则拥有更长的工作距离。

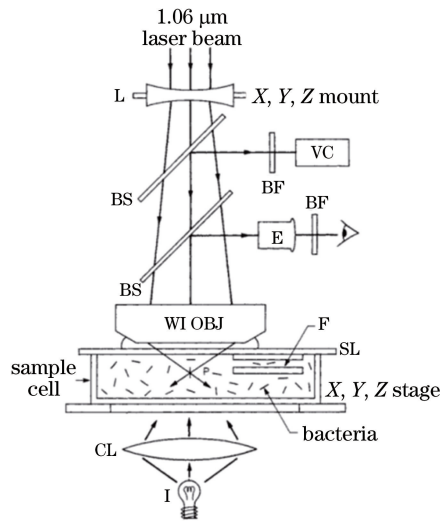


图 1 光学显微镜组成的光镊

Fig. 1 Schematic of optical tweezers consisting of optical microscope

1987 年 Durnin J E^[11]率先发现无衍射光束,其特点是在自由空间传输时,与传播方向垂直的平面上光场分布是相同的,无衍射光束与高斯型光束相比,具有更长的工作距离、更大的视场和更低的球差,并且不会发生衍射扩展。

利用贝塞尔光束的无衍射特性,2001 年圣安德鲁斯大学的 Arlt J 等^[12]利用角锥棱镜产生的贝塞尔光束作为光镊光源,实现对微粒长达 $1\ \text{mm}$ 的轴向输运和同时对多个粒子的轴向捕获。其装置包括电荷耦合器件(CCD)摄像机和磁带录像机(VCR),如图 2 所示,左上角插图显示的是沿光传播方向的贝塞尔光束横截面及其强度分布。

2002 年 Garceschavez V 等^[13]利用贝塞尔光束自修复性质所发明的光镊可在两个样品池中同时捕获微粒,如图 3 所示,两个样品池相距 $3\ \text{mm}$ 。这种光镊阵列可以对处于不同环境中的细胞进行同步观察研究。该技术在片上实验室和微机械结构等研究领域也具有重要意义。

2016 年 Ayala Y A 等^[14]将高斯光束依次分别通过 4 个不同相对数值孔径的透镜聚焦形成光镊,以及将零阶贝塞尔光束通过相对数值孔径为 0.40 的透镜聚焦形成的光镊,最后分析这些光镊沿着横向和轴向方向的光场和捕获力。实验结果表明:由贝塞尔光束聚焦形成的光阱在三维空间中操纵单个玻璃珠具有高度优越性。与高斯光镊相比,由贝塞尔光束聚焦形成的光阱具有无衍射光束所具有的优点。实验使用的装置如

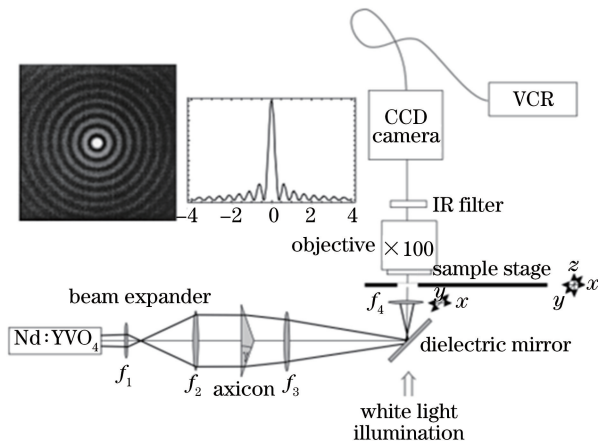


图 2 贝塞尔光镊的实验装置

Fig. 2 Experimental device of Bessel optical tweezers

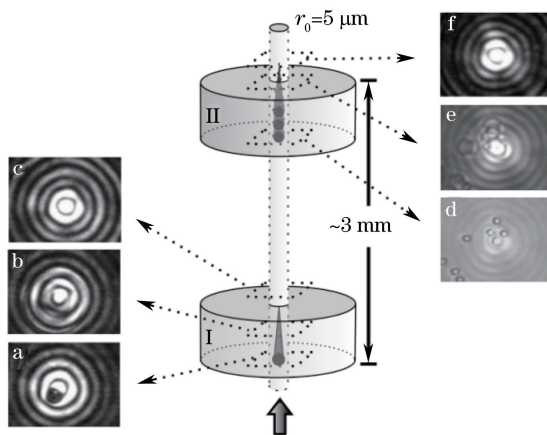


图 3 贝塞尔光镊多平面同时捕获多个粒子

Fig. 3 Bessel optical tweezers capture multiple particles simultaneously in multiple planes

图 4 所示,其中 PBS 为偏振光束分光器, O_1 、 O_2 为显微镜物镜,DM 为分色镜, T_1 、 T_2 、 T_3 为望远镜,NA 为数值孔径,A 为锥棱镜, M_1 、 M_2 为反射镜, B_1 光形成贝塞尔光束, B_2 光形成高斯光束。

如图 5 所示,以粘附到样品池底部的相同非捕获球(白色箭头)作为参考,(a)列中显示出了被捕获球体

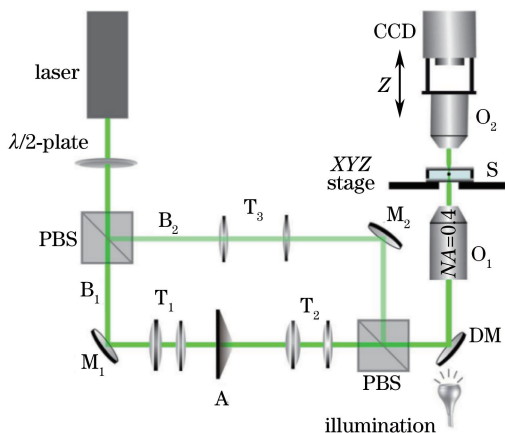


图 4 贝塞尔与高斯光束的光镊实验装置

Fig. 4 Experimental devices for optical tweezers of Bessel beam and Gaussian beam

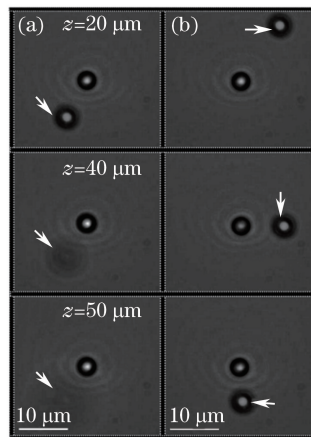


图 5 聚焦贝塞尔光阱捕获的玻璃球

Fig. 5 A glass ball captured by a FBT

的轴向控制,在(b)列中显示出聚焦贝塞尔光阱(FBT)的横向控制。

类似图 1 所示的标准光镊装置简单,性能良好,仍然是用于操纵单个颗粒的重要工具。例如 2014 年张聿全等^[15]就利用类似的光镊装置检测卵巢癌 SKOV₃ 细胞凋亡情况。图 2 当中,由于贝塞尔光束的自修复性在传播过程中不会发生发散,这种光镊甚至可以不需要显微物镜。在阵列光镊中,棱镜透镜法是最简单和运算速度最快的方法^[4]。相比之前的光镊光路,近年来的光路结构相对复杂,功能也会相对多样。依靠棱镜来光束整形的这类光镊由于光路搭建好后,棱镜位置必须固定,这对于被捕获的微粒需要移动的情况会造成不便。贝塞尔光镊可用于研究胶体和生物物质的制备或组合。目前有科研人员在研究不同条件下聚焦贝塞尔光阱的俘获能力以及捕获其他不同种类粒子的效果^[14]。

3 衍射光学元件

早期的光镊是单微粒操控,在技术的发展和需求导向下出现多微粒操控的光镊。全息光镊在众多多光阱光镊方案中脱颖而出。全息光镊是光镊技术与全息技术的结合,是具有特定光场分布的光镊^[16]。

全息光镊最初是通过微加工的衍射光学元件实现。衍射光学元件是一种由计算机产生的全息元件,可用于调制通过它的光的相位或幅度来产生预期的近场或远场图案。

1998 年芝加哥大学 Dufresne E R 等^[17]报道了使用衍射光学元件将单个激光束分成任意图案的多个光束,再通过强会聚透镜聚焦后形成光阱的方法,光路如图 6 所示,图中 PC 为个人电脑。当时这种光镊阵列及其衍生物已经应用于生物系统、复杂流体以及介观材料的研究当中。

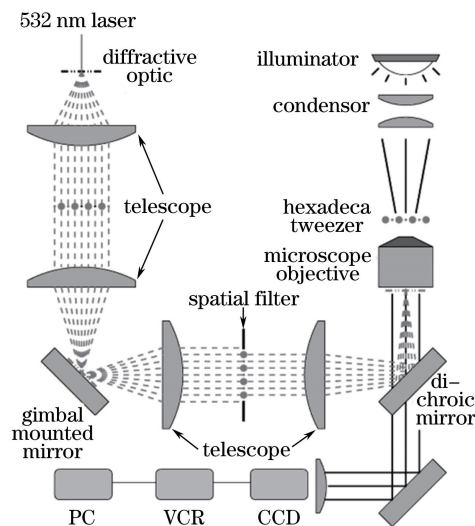


图 6 实际的衍射光镊阵列示意图

Fig. 6 Schematic diagram of a practical diffractively generated optical tweezer array

2015 年中国科学院 Zhang Z 等^[18]提出一种新的 3D 聚焦成形技术。该技术使用部分相干圆偏振涡旋光束和二元衍射光学元件,运用矢量衍射理论研究部分相干圆偏振涡旋光束通过高数值孔径的透镜和二元衍射光学元件聚焦产生的 5 个同心区域的性质。结果发现聚焦性质在很大程度上取决于拓扑电荷、光束宽度、入射光束的相干长度以及二元衍射光学元件的参数。通过选择一些合适的相关参数,可获得几个有用的光束模式,如光链、光针、光暗通道、平顶场和 3D 光学笼等。

2015 年俄罗斯 Skidanov R 等^[19]设计并制作了一个径向对称的二元衍射光学元件,并用该元件产生瓶状光强分布。在图 7 中,高强度的区域为较亮的斑点,低强度的区域为苍白的斑点。形成的局域空心光束再配合其他部分的器件可形成完整的光镊系统,如图 8 所示。图 8 中, M_1 、 M_2 、 M_3 为偏转镜,L 为固体激光器, L_1 、 L_2 、 L_3 为显微镜头,V 为一个微粒。这种瓶状光束移动微粒的距离比高斯光束的瑞利范围长得多,二元衍射光学元件适合应用于 3D 激光捕获微粒领域。

2015 年郑晓等^[20]基于德拜矢量理论,研究了贝塞尔-高斯径向偏振光束经过衍射光学元件和高数值孔径透镜组成的光学系统后,再经介质分界面的强聚焦特性。郑晓等^[20]详细讨论了由介质分界面形成的聚焦

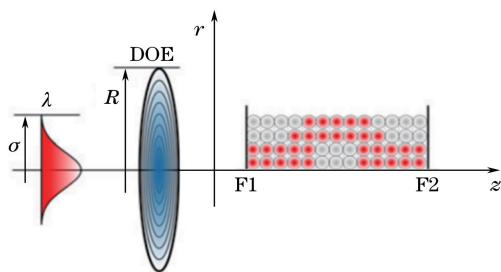


图7 产生“光阱”的光学方案

Fig. 7 An optical scheme of generating an "optical trap"

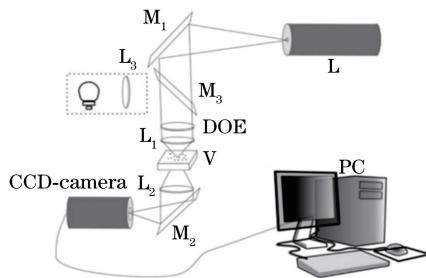


图8 使用衍射光学元件的光镊系统

Fig. 8 Optical tweezers system using DOE

场相对于无介质面发生的变化、入射光束的拦截比、数值孔径和聚焦场介质的折射率对光束强聚焦特性的影响,发现通过改变衍射光学元件内外环的相位差和介质分界面的位置能实现聚焦光链的周期性移动。当光束的拦截比增大到一个值后,原来形成的聚焦光链会转变成暗通道结构,暗通道的长度会随着介质折射率的增大而增大,这个特性对于矢量光束在粒子微操纵领域的应用有非常重要的意义。

衍射光学元件可以形成具有高光效和强衍射图案的柔性光束,因而受到广泛关注。使用衍射光学元件的光镊可产生多种有用的光束模式,如使用单光束产生多光阱实现多微粒捕获。但由于制造工艺限制,衍射光学元件的单位尺寸大、衍射角受限,因此由衍射光学元件产生的衍射图案分辨率有限^[21]。通常衍射光学元件的几何形状在制造后就是固定的,如果要改变衍射光学元件的结构,就需要新的模具、时间和成本来重新制造。2016年 Schauer S等^[22]利用形状记忆聚合物制造出主动可调式的衍射光学元件以克服这一缺点,未来该技术可以应用到光镊系统当中。

4 SLM

目前全息光镊以使用 SLM 的方案居多。SLM 是一种能对光波的空间分布进行调制的器件,SLM 的实时可重构特征使得其可以在没有机械移动光学部件的情况下进行光学操控。根据 SLM 工作原理的不同,可分为液晶 SLM(LCSLM)、磁光 SLM、声光 SLM 和多量子阱 SLM 以及 DMD 等^[4]。根据 SLM 调制方式的不同,可将其分为振幅型、混合型和纯相位型 SLM。振幅型 SLM 每个像素的透射率可以受控地变化,实现对入射光场振幅分布的调制,通常作为强度调制器件使用。而混合型 SLM 虽然可以同时改变光场的振幅和相位,但两者不能同时变化,所以应用范围较为有限。纯相位型 SLM 则可在不影响原先光强分布的情况下,独立改变复振幅场的相位分布,对光能量的损耗小^[3]。

4.1 LCSLM

科研人员为了避免由于改变操作目的或机械操作而引起的光学部件的重新排列,1999年, Hayasaki Y等^[23]提出将 SLM 引入光镊系统,如图 9 所示,他们的光镊系统是基于电寻址 LCSLM(EA-LCSLM)。该系统能够捕获并操纵聚苯乙烯小球,且第一次证明了非机械光学操作微粒的可行性。

为了提高全息光镊的光能利用率与光学捕获效率,2002年 Curtis J E等^[24]首次将盖师贝格-萨克斯通(GS)算法引入到光镊领域。经过多次优化与改进,现在 GS 算法是计算光阱阵列相位全息图的最常用算法。Curtis J E 等搭建的全息光镊使用反射式 SLM 将来自激光器的光束重新整形为指定的光束图案,其基本结构和原理如图 10 所示。

2003年 Hossack W J等^[25]提出了基于铁电液晶微显示器的高速全息光镊,而在此之前几乎所有的动态全息光镊是基于向列型 LCSLM。然而,这些器件的重新配置速度受到向列液晶相对慢的切换时间(几十毫秒)的严格限制。基于铁电材料的 SLM 则显示出非常快速($<100 \mu\text{s}$)的开关时间。

2016年 Porfirev A P等^[26]使用 SLM 研究动态光学操控光吸收微粒的可能性,证明了产生光阱的显微物镜或其他光学元件的数值孔径和焦距决定了捕获区域的尺寸。在使用多个光阱的情况下,粒子能被动地从一个光阱中转移到另一个中。他们也实现了对非球面光吸收的微粒体(例如空气传播的气溶胶)的多重操控,该方法可用于分析这些颗粒的行为,这对于监测空气污染、人类健康和全球气候变化非常有用。最近也

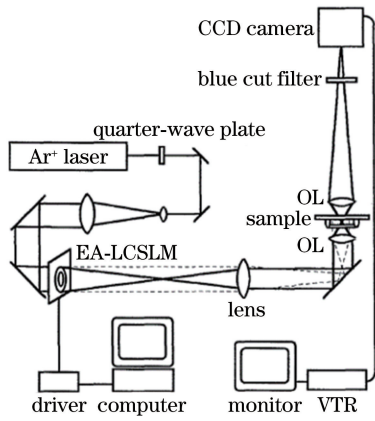


图 9 使用 EA-LCSLM 的光镊系统

Fig. 9 Optical tweezers system using EA-LCSLM

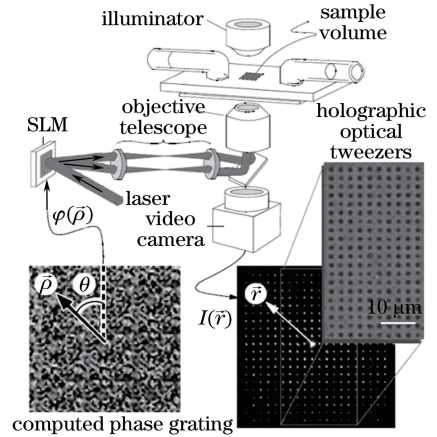


图 10 反射式 LCSLM 的动态全息光镊

Fig. 10 Dynamic holographic optical tweezers using a reflective LCSLM

有利用 LCSLM 调制输入光形成全息光镊,实现实时动态传输单个原子的效果^[27]。

除此也可使用 LCSLM 实现衍射光学元件对微粒的多次光学捕获效果^[28-29]。SLM 上加载的计算全息图能调制光场,实时动态改变和控制光镊。还可以与计算机视觉技术相结合,创建全自动化的光镊系统。故利用 SLM 的光镊被称为新一代的光镊。目前 SLM 价格持续下降,因而越来越容易被科研工作者接受。但是 SLM 存在光损伤的可能,这限制了入射光的最大功率^[30]。SLM 光镊主要应用在多元微粒相互作用力测量、微粒分离等领域。

4.2 DMD

DMD 是德州仪器(TI)数字投影技术(DLP)的核心器件。DMD 最早由固态物理学家、德州仪器荣誉博士 Morris J E^[31]于 1987 年发明的。DMD 是一种基于半导体的快速反射数字光开关阵列器件,使用二进制脉宽调制技术精确控制光源。它可以与图像处理、存储器、光源和光学器件组合以形成能够投影大尺寸、明亮、无缝、高对比度的彩色图像的 DLP 系统,如图 11 所示。

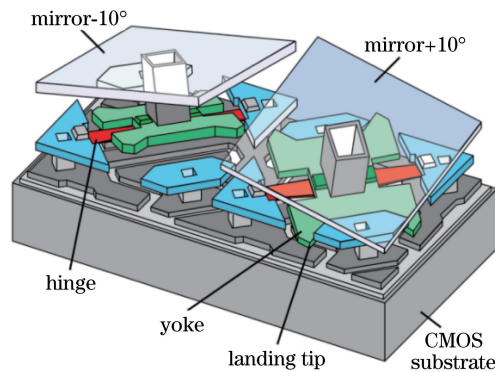


图 11 两个 DMD 像素(反射镜被表示为透明的)

Fig. 11 Two DMD pixels (mirrors are shown as transparent)

DMD 通过互补金属氧化物半导体(CMOS)存储器上的类 CMOS 工艺单片制造。每个光开关上有一面 $16 \mu\text{m}$ 正方形铝镜,其根据下面的存储器单元的状态在两个方向上反射光。通过由反射镜和下面的存储单元之间产生的电压差产生的静电吸引来实现反射镜的旋转。在存储器单元处于开(1)状态时,反射镜旋转到 $+10^\circ$ 。当存储单元处于关闭(0)状态时,镜子旋转到 -10° 。

DMD 利用数字电压信号控制微镜片执行机械运动来实现光束整形^[3]。2006 年 Jiang Y Q 等^[32]演示了用 DMD 构建的多光镊系统,展示 DMD 在氩氦激光器、紫外激光器和红外激光器激光下的空间光调制能力,并且研究了用红外激光器激光捕获聚苯乙烯小球的情况。装置如图 12 所示,图 12 中 D_1 、 D_2 、 D_3 、 D_4 为分色

镜,UV 为紫外线,M 为反射镜。结果如图 13 所示,可见该装置可以容易地捕获和操作 10 个以上的微粒。这表明用 DMD 建立全息光镊是可行的。

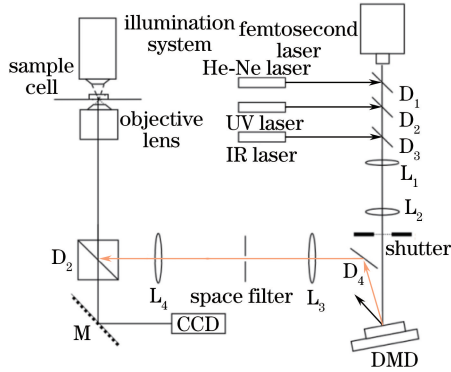


图 12 实验设置示意图

Fig. 12 Schematic diagram of the experimental setup

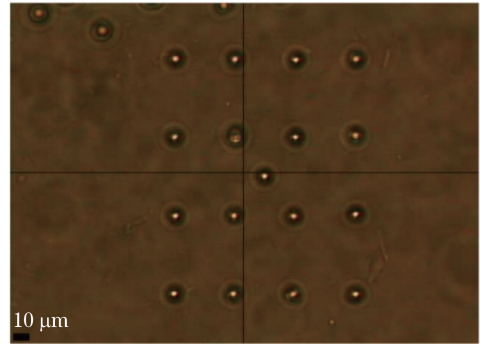


图 13 红外激光和 DMD 捕获聚苯乙烯珠
Fig. 13 Polystyrene beads trapped by infrared laser and DMD

2014 年 Ding X Y 等^[33]用 DMD 将高斯激光束整形为超高斯光束。DMD 加载的图案由计算机程序生成,633 nm 氦氖激光经扩束、准直后被 DMD 调制,受调制的激光经过聚焦透镜 L_3 和针孔滤波器由 CCD 测量、记录,实验装置如图 14 所示。

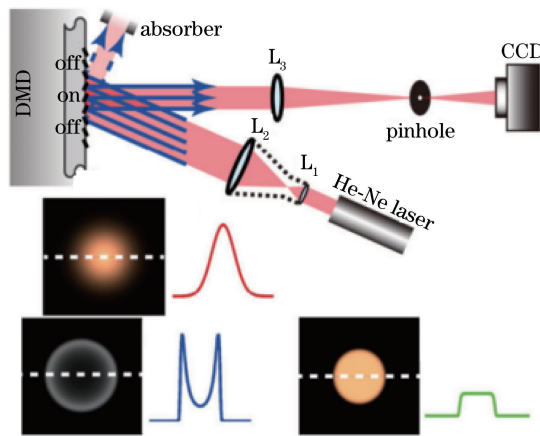


图 14 实验装置示意图

Fig. 14 Schematic diagram of the experimental setup

目前已经有科研人员使用特制的 DMD 对贝塞尔-高斯光束进行整形,获得用于光镊系统的胶囊状光束,这类光束可使得光镊系统对吸收性颗粒、气溶胶或单个原子的显微操控能力加强^[34]。最近也有利用高数值孔径的透镜和 DMD 构成直接成像的光镊系统,并将其应用于捕获玻色-爱因斯坦凝结物^[35]。尽管 DMD 被归类为 SLM 已经很长时间,但是其能量损失大,以往很少用于全息光镊。DMD 与 LC-SLM 相比具有响应快、分辨率高、对不同波长一致且器件的损伤阈值高等优点^[3,32-33,36]。近几年 DMD 的应用领域得到较大的扩展,所以研究其在全息光镊中的应用是非常必要的。

由衍射光学元件、SLM 和 DMD 这类元件产生的全息光镊是目前的发展趋势。目前所采用的 SLM 的衍射效率低,影响全息光镊捕获效率。输入的激光功率一定,如果全息光镊生成的光阱数量越多,则平均到每个光阱上的激光功率就会越低,光镊的捕捉能力势必随之下降。随着全息光镊技术的不断改善,它将在广泛用于分子生物学、纳米制造等交叉学科的研究领域。在全息光镊发明之前,光镊技术主要侧重在单粒子的基础研究方面,全息光镊在对多粒子操控方面的优势,为光镊技术走向实用化、规模工业生产打开了新局面^[16]。Grier D G^[37]预言,全息光镊将引发光学操纵的一场技术革命。

5 光 纤

传统的光镊系统加入了显微镜,这导致光镊系统设备体积较大、自由度低、成本较高,光镊灵活应用的角度受到限制。光纤具有轻便、价格低廉、灵活等特点,用光纤做成的光镊可避免光阱位置固定的限制,可以使光镊这一操控工具真正“活动”起来^[4]。

1993年 Constable A 等^[38]提出用光纤来对捕获光源进行光束整形。因为捕获光经过光纤可发生空间滤波,所以利用光纤进行光束整形时,对输入的激光光束没有很高的要求。如图 15 所示的情况,高斯光束耦合到平端头单模光纤,它的出射光可以用高斯光束来近似,其束腰位于光纤的端面上。

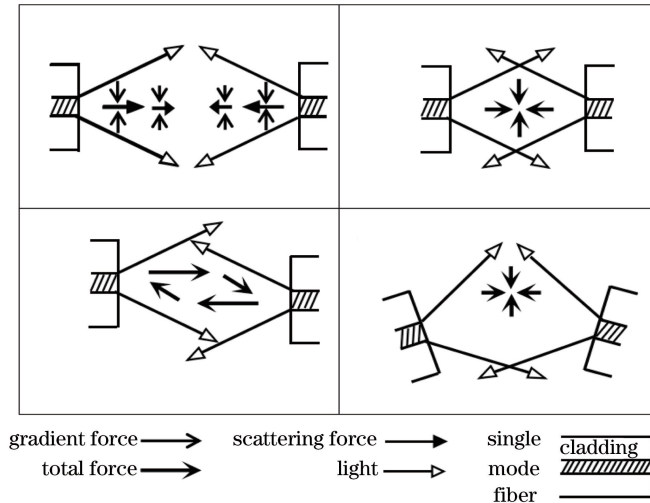


图 15 两个平端头光纤形成相对位置

Fig. 15 Two flat end fibers form relative position

利用光纤对光束整形的关键之一是光纤的尖端。除了可以通过研磨抛光和化学蚀刻方法加工制造光纤光镊的尖端,也可通过热熔拉伸的方法制造突变锥形光纤尖端^[39],通过离子束刻蚀高精度加工光纤尖端微透镜^[40]。为此,Taylor R 等^[41]使用了蚀刻方法,制成了一个金属化锥形的中空光纤尖端,实现在 3D 情形下捕获微粒。1995 年 Lyons E R 等^[42]使用两个尖端是锥形透镜的光纤形成光阱,在轴向上实现对微粒的捕获。对于特定的应用场合,可通过设计光纤前端的透镜曲率、发散角、光纤间隔和模场直径来优化经光纤形成的光阱的性能。

2002 年 Taguchi K 等^[43]用尖端抛光成锥形球面的光纤实现了单激光束的光学捕获。2004 年 Hu Z H 等^[44]将锥形球面单模透镜光纤探针以一定角度插入构建出光纤光镊系统,并使用了两种波长的光源。该系统比常规光镊更简单、更灵活,展现了单透镜光纤光镊系统在可见光和红外光中操纵生物颗粒、电介质颗粒的能力。系统如图 16 所示。

也有通过多种光纤复合组成新型的光纤光镊,如 2012 年 Kim J 等^[45]研究由单模光纤(SMF)、中空光纤(HOF)、无芯二氧化硅纤维(CSF)和聚合物透镜组成的单股复合光纤,激光通过该单股复合光纤时会进行傅里叶变换,理论和实验上都成功实现生成类贝塞尔光束,如图 17 所示。图 18 显示的是为在培养溶液中沿着光束的轴向方向成功地俘获多个电介质颗粒和活 Jurkat 细胞的情况。

2016 年 Zhang Y 等^[46]提出并演示一种基于椭圆形纤芯的新型单一光镊,可以对捕获的酵母细胞进行精确旋转和控制。项目研究当中采用研磨和抛光的方法来使光纤生成 34° 的楔形尖端,以获得足够大的光梯度力。尖端的示意图和图像如图 19 所示。

光纤光镊对光镊系统小型化、探头式模块集成化非常有利,而且光纤光镊可以直接深入样品室,可以在浑浊的介质中捕获微粒^[4]。光纤光镊的潜在应用之一是可以与正常生物微操作系统的微型注射器一起使用,以实现无接触和非破坏性的操作和注射。光纤光镊还可以应用于细胞之间的相互作用和通信、细颗粒的特性研究及微组装,以及生物学、物理学、化学和微机械学领域的研究^[44]。光纤光镊适用于对微粒的捕获、悬浮和旋转等场合,可满足多种微操控的研究需求。相比标准光镊,光纤光镊更利于推广和工程实际应用。

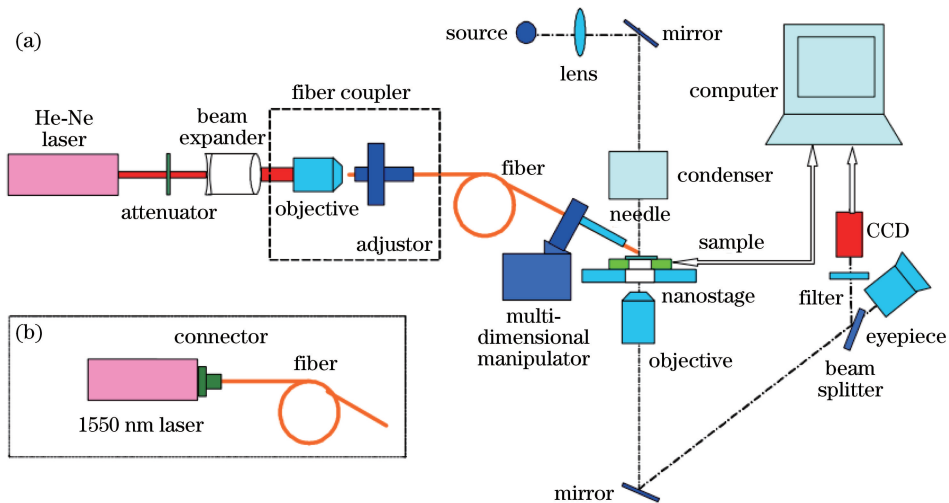


图 16 实验装置^[44]。(a)采用 He-Ne 激光器;(b)采用 1550 nm 激光

Fig. 16 Experimental setup^[44]. (a) He-Ne laser is used; (b) 1550 nm laser is used

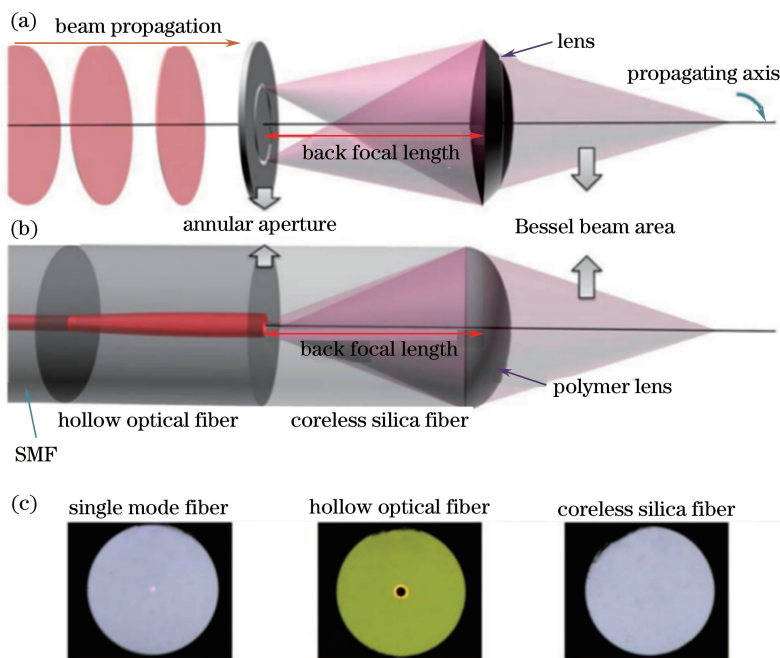


图 17 (a)大体积光学解决方案的示意图^[8];(b)提出光纤用于生成类贝塞尔光束的解决方案;(c)实验中使用的光纤的横截面

Fig. 17 Schematic diagram of (a) bulk-optic solution^[8]; (b) proposed fiber-optics solution for Bessel-like beam generation; (c) cross sections of the optical fibers used in the experiments

传统的光镊通常是通过用物镜紧密聚焦激光束产生的,但是与传统光镊的庞大结构和昂贵的成本相比,光纤光镊为微型集成化光镊提供了更灵活的解决方案^[46]。使用光纤来整形捕获光源不需要高倍物镜。光纤有较长的操作尺度,其检测信号可以通过光纤回传到显示设备。光纤光镊系统简单便宜,可以自由移动被捕获的微粒,捕获的微粒可随着光纤尖端旋转而旋转。光源也可以通过光纤连接器改变。但是光纤整形带来的缺点也非常明显,如在光纤制备工艺上有更高的要求且可重复性差,在应用中由于纤芯柔软易变形,操控过程会受到液体表面张力的影响。

目前,光纤光镊的研究工作较多集中在对光纤尖端的设计^[47-49]和使用多根光纤集成一束以实现多光阱效果^[50-51]的设计上。

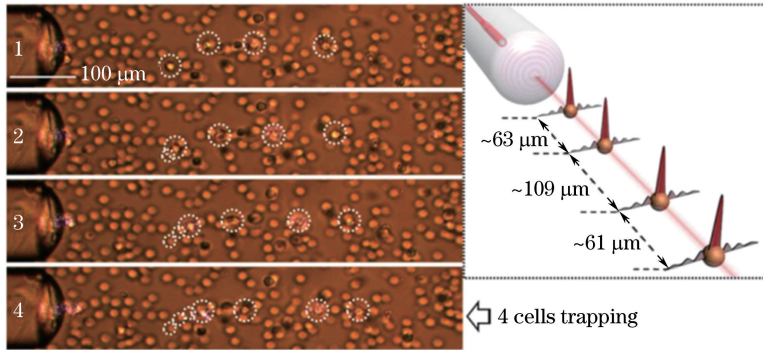


图 18 在培养溶液中捕获 4 个活的 Jurkat 细胞

Fig. 18 Trapping of four living Jurkat cells in culture solution

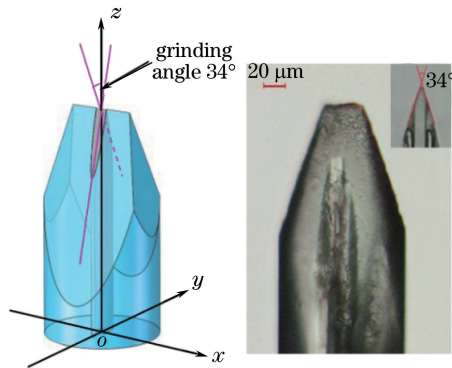


图 19 椭圆形纤芯尖端示意图

Fig. 19 Schematic of the wedged tip of the elliptical fiber core

6 结束语

光镊的激光光束整形的方法并不是只需要一种器件就可实现,仍需和其他光学器件配合使用才能构成完整的光镊系统。早期方法使用的是单一的透镜进行激光光束整形,随着科技的进步,更多技术应用到光镊系统光束整形中,从而使得光镊系统的光束整形技术越来越成熟。用棱镜对捕获光源进行整形的方式较为简单,功能相对单一。用衍射光学元件可以产生高光效和强衍射图案的光束,因而受到广泛的关注。单根光纤光镊系统的光路相对简单,但是无法产生多个光阱,因此产生了多光纤光镊系统。由于 SLM 和 DMD 使用起来方便、高效,并可产生多个光阱,故得到广泛的应用,而过高的价格是制约它们市场推广的重要因素。但是,SLM 以其优越的性能,可实时产生适合光镊系统需要的光束,如拉盖尔-高斯光束、艾里光束等。使用 SLM 的光镊系统更有发展潜力,该类系统在目前光镊系统研究发展中非常重要。

参 考 文 献

- [1] Ashkin A, Dziedzic J M. Optical trapping and manipulation of viruses and bacteria[J]. Science, 1987, 235(4795): 1517-1520.
- [2] 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.
- [3] Li Jing, Zhu Chunli, Wu Xiaoping. Holographic optical tweezers[M]. Beijing: Science Press, 2015: 3-106.
李 静, 朱春丽, 伍小平. 全息光镊[M]. 北京: 科学出版社, 2015: 3-106.
- [4] Li Yinmei, Yao Kun. Optical tweezers technology[M]. Beijing: Science Press, 2015: 36-143.
李银妹, 姚 焜. 光镊技术[M]. 北京: 科学出版社, 2015: 36-143.
- [5] Meng Xiangxiang, Liu Weiqi, Liu Hua, *et al.* A reflective optical system for converting elliptical Gaussian laser beam to flat-top beam[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2013, 34(7): 940-947.

- 孟祥翔, 刘伟奇, 柳 华, 等. 反射式椭圆高斯光束平顶整形系统[J]. 发光学报, 2013, 34(7): 940-947.
- [6] Peng Yameng, Su Yuping. Design of freeform surface lens for shaping divergent laser beam[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(5): 0522003.
彭亚蒙, 苏宙平. 用于发散激光光束整形的自由曲面透镜设计[J]. 光学学报, 2016, 36(5): 0522003.
- [7] Wu Yuli. Research on far field beam shaping method based on Fourier transform[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2016.
武钰丽. 基于正反傅里叶变换的远场光束整形方法研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2016.
- [8] Donato M G, Vasi S, Sayed R, *et al.* Optical trapping of nanotubes with cylindrical vector beams[J]. Optics Letters, 2012, 37(16): 3381-3383.
- [9] Dholakia K, Reece P J. Optical micromanipulation takes hold[J]. Nano Today, 2006, 1(1): 18-27.
- [10] Ashkin A, Dziedzic J M, Yamane T, *et al.* Optical trapping and manipulation of single cells using infrared laser beams [J]. Nature, 1987, 330(6150): 769-771.
- [11] Durnin J E. Exact solutions for nondiffracting beams. I. The scalar theory [J]. Journal of the Optical Society of America A, 1987, 4(4): 651-654.
- [12] Arlt J, Garces-Chavez V, Sibbett W, *et al.* Optical micromanipulation using a Bessel light beam [J]. Optics Communications, 2001, 197(4-6): 239-245.
- [13] Garceschavez V, Mcgloin D, Melville H, *et al.* Simultaneous micromanipulation in multiple planes using a self-reconstructing light beam[J]. Nature, 2002, 419(6903): 145-147.
- [14] Ayala Y A, Arzola A V, Volkesepulveda K, *et al.* Comparative study of optical levitation traps: focused Bessel beam versus Gaussian beams[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2016, 33(6): 1060-1067.
- [15] Zhang Yuquan, Wu Xiaojing, Wang Yijia, *et al.* Monitoring SKOV₃ cell apoptosis based on dynamic laser tweezers[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41 (11): 1104001.
张聿全, 吴晓静, 王弋嘉, 等. 基于动态光镊技术的卵巢癌 SKOV₃ 细胞凋亡检测 [J]. 中国激光, 2014, 41(11): 1104001.
- [16] Ren Yuxuan, Zhou Jinhua, Wu Jianguang, *et al.* Holographic tweezers—the most vigorous member in optical Tweezers’ family[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2008, 45 (11): 35-41.
任煜轩, 周金华, 吴建光, 等. 全息光镊—光镊家族中极具活力的成员 [J]. 激光与光电子学进展, 2008, 45(11): 35-41.
- [17] Dufresne E R, Grier D G. Optical tweezer arrays and optical substrates created with diffractive optics[J]. Review of Scientific Instruments, 1998, 69(5): 1974-1977.
- [18] Zhang Z, Fan H, Xu H F, *et al.* Three-dimensional focus shaping of partially coherent circularly polarized vortex beams using a binary optic[J]. Journal of Optics, 2015, 17(6): 065611.
- [19] Skidanov R, Kachalov D, Khonina S, *et al.* Three-dimensional laser trapping on the base of binary radial diffractive optical element[J]. Journal of Modern Optics, 2015, 62(14): 1-4.
- [20] Zhao Xiao, Yang Yanfang, He Ying, *et al.* Tight focusing of double-ring-shaped Bessel-Gaussian radially polarized beam through a dielectric interface[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(4): 0426001.
郑 晓, 杨艳芳, 何 英, 等. 双环贝塞尔-高斯径向偏振光束经介质分界面的强聚焦 [J]. 光学学报, 2016, 36(4): 0426001.
- [21] Qu W, Gu H, Tan A Q, *et al.* Design of refractive/diffractive hybrid optical elements for beam shaping with large diffraction pattern[J]. Chinese Optics Letters, 2016, 14(3): 031404-031407.
- [22] Schauer S, Meier T, Reinhard M, *et al.* Tunablediffractive optical elements based on shape-memory polymers fabricated via hot embossing[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2016, 8(14): 9423-9430.
- [23] Hayasaki Y, Itoh M, Yatagai T, *et al.* Nonmechanical optical manipulation of microparticle using spatial light modulator[J]. Optical Review, 1999, 6(1): 24-27.
- [24] Curtis J E, Koss B, Grier D G, *et al.* Dynamic holographic optical tweezers[J]. Optics Communications, 2002, 207 (1): 169-175.
- [25] Hossack W J, Theofanidou E, Crain J, *et al.* High-speed holographic optical tweezers using a ferroelectric liquid crystal microdisplay[J]. Optics Express, 2003, 11(17): 2053-2059.
- [26] Porfirev A P, Skidanov R V. Dynamic photophoresis-based optical trapping using a spatial light modulator[C]. SPIE, 2016, 9884: 98843E.

- [27] Kim H, Lee W, Lee H, *et al.* In situ single-atom array synthesis by dynamic holographic optical tweezers[J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 13317.
- [28] Cojoc D, Cabrini S, Ferrari E, *et al.* Multiple optical trapping by means of diffractive optical elements[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2004, 43(6): 294-295.
- [29] Cojoc D, Cabrini S, Ferrari E, *et al.* Dynamic multiple optical trapping by means of diffractive optical elements[J]. *Microelectronic Engineering*, 2004, 73(1): 927-932.
- [30] Morris J E. *Studies of novel beam shapes and applications to optical manipulation*[D]. St Andrews: University of St Andrews, 2010.
- [31] Hornbeck L J. *Digitallight processing for high-brightness high-resolution applications*[C]. SPIE, 1997, 3013(1): 27-40.
- [32] Jiang Y Q, Oh I, Matsumoto Y, *et al.* Spatial light modulating and multi-trapping with a DMD[J]. *Modern Physics Letters B*, 2011, 21(4): 175-181.
- [33] Ding X Y, Ren Y X, Lu R D, *et al.* Shaping super-Gaussian beam through digital micro-mirror device[J]. *Science China Physics Mechanics & Astronomy*, 2014, 58(3): 1-6.
- [34] Lei G, Liu W W, Zhao Q, *et al.* Controllable light capsules employing modified Bessel-Gauss beams[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 29001.
- [35] Gauthier G, Lenton I, Parry M K, *et al.* Direct imaging of a digital-micromirror device for configurable microscopic optical potentials[J]. *Optica*, 2016, 3(10): 1136-1143.
- [36] Stuart D, Barter O, Kuhn A. Fast algorithms for generating binary holograms[J]. arXiv, 2014, 1409. 1841.
- [37] Grier D G. A revolution in optical manipulation[J]. *Nature*, 2003, 424(6950): 810-816.
- [38] Constable A, Kim J, Mervis J, *et al.* Demonstration of a fiber-optical light-force trap[J]. *Optics Letters*, 1993, 18(21): 1867-1869.
- [39] 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.
- [40] Cabrini S, Liberale C, Cojoc D, *et al.* Axicon lens on optical fiber forming optical tweezers, made by focused ion beam milling[J]. *Microelectronic Engineering*, 2006, 83(4-9): 804-807.
- [41] Taylor R, Hnatovsky C. Particle trapping in 3-D using a single fiber probe with an annular light distribution[J]. *Optics Express*, 2003, 11(21): 2775-2782.
- [42] Lyons E R, Sonek G J. Confinement and bistability in a tapered hemispherically lensed optical fiber trap[J]. *Applied Physics Letters*, 1995, 66(13): 1584-1586.
- [43] Taguchi K, Ueno H, Hiramatsu T, *et al.* Optical trapping of dielectric particle and biological cell using optical fibre[J]. *Electronics Letters*, 2002, 33(5): 413-414.
- [44] Hu Z H, Wang J W, Liang J, *et al.* Manipulation and arrangement of biological and dielectric particles by a lensed fiber probe[J]. *Optics Express*, 2004, 12(17): 4123-4128.
- [45] Kim J, Jeong Y, Lee S, *et al.* Fourier optics along a hybrid optical fiber for Bessel-like beam generation and its applications in multiple-particle trapping[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(4): 623-625.
- [46] Zhang Y, Zhao L, Chen Y H, *et al.* Single optical tweezers based on elliptical core fiber[J]. *Optics Communications*, 2016, 365: 103-107.
- [47] Nylk J, Kristensen M V, Mazilu M, *et al.* Development of a graded index microlens based fiber optical trap and its characterization using principal component analysis[J]. *Biomedical Optics Express*, 2015, 6(4): 1512-1519.
- [48] Nikbakht H, Latifi H, Oraie M, *et al.* Fabrication of tapered tip fibers with controllable cone angle using dynamical etching[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(23): 4707-4711.
- [49] Ribeiro R S R, Soppera O, Guerreiro A, *et al.* Polymeric optical fiber tweezers as a tool for single cell micro-manipulation and sensing[C]. SPIE, 2015, 9604: 96342K.
- [50] Tam J M, Biran I, Walt D R, *et al.* An imaging fiber-based optical tweezer array for microparticle array assembly[J]. *Applied Physics Letters*, 2004, 84(21): 4289-4291.
- [51] Tam J M, Biran I, Walt D R, *et al.* Parallel microparticle manipulation using an imaging fiber-bundle-based optical tweezer array and a digital micromirror device[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 89(19): 194101.