

基于微米空心波导的单粒子高效探测

张鹏飞^{1,2*}, 李刚^{1,2}, 张天才^{1,2}

¹山西大学光电研究所量子光学与光量子器件国家重点实验室, 山西 太原 030006;

²山西大学极端光学省部共建协同创新中心, 山西 太原 030006

摘要 提出一种用于高效率收集单粒子荧光的锥形空心波导探针。在理论上采用数值模拟得到了锥形空心波导探针对单粒子荧光的收集效率。通过优化探针几何尺寸可得, 单粒子为径向偏振时探针对单粒子荧光的收集效率最高为25.3%, 普遍高于利用高数值孔径透镜的传统方法。综合发光粒子不同方向的偏振后可知, 探针的平均收集效率可达21.7%, 最优工作距离为0.75 μm。此外, 探针对单个粒子荧光的收集效率和工作距离对于粒子发射光的波长不敏感, 故此探针可以用于对具有不同波长的各类粒子和宽谱发光粒子的高效率探测。此探针直径为微米量级, 易于与其他微纳结构结合。此探针可用于单原子、单分子、量子点、金刚石色心等粒子的高效率探测, 并有望进一步用于化学、生物微小发光体等的探测。

关键词 量子光学; 单粒子探测; 空心波导; 光与原子相互作用

中图分类号 O431.2

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.0327002

High-Efficiency Detection of Single Emitter Based on Micro-Hollow Waveguides

Zhang Pengfei^{1,2*}, Li Gang^{1,2}, Zhang Tiancai^{1,2}

¹ State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China;

² Collaborative Innovation Center of Extreme Optics, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China

Abstract This paper proposes a scheme for high-efficiency collection of a single emitter using a tapered hollow waveguide probe. The collection efficiency of the single-emitter fluorescence by the tapered hollow waveguide probe is numerically simulated. When the single emitter is radially polarized and the probe is designed with the optimized geometrical dimensions, the maximum collection efficiency reaches 25.3%, which is generally higher than that of the traditional method using a lens with large numerical aperture. The average collection efficiency of the probe can reaches 21.7% for the single emitter with polarization in different directions, and the optimized working distance is 0.75 μm. Furthermore, the collection efficiency and working distance of the probe for the single-emitter fluorescence are not sensitive to the wavelength of the light emitted by the single emitter, so the probe can be used for high-efficiency detection of all kinds of particles with different wavelengths and luminous particles with very broad optical spectra. The probe has a micron-sized diameter and is easily combined with other micro/nano structures. Therefore, the probe can efficiently detect many types of emitters, such as a single atom, single molecule, quantum dots, diamond color center, and other particles. The probe is also expected to detect chemical and biological micro-luminescent bodies.

Key words quantum optics; single-emitter detection; hollow waveguides; atom-photon interaction

OCIS codes 270.5290; 230.7370; 220.4000

1 引言

单粒子操控在过去二十年间得到了巨大发展^[1-2], 目前已发展成为单光子源^[3-4]、非经典光

场^[5]、量子态相干操控^[6-7]、量子逻辑门^[8-9]、多原子及多粒子阵列^[10-11]等研究领域的重要基础和关键技术。单粒子操控在量子信息^[12]、量子模拟^[13]、量子计算^[14], 以及精密测量与传感^[15]等方面有着重要

收稿日期: 2019-09-17; 修回日期: 2019-10-10; 录用日期: 2019-10-21

基金项目: 国家自然科学基金(11974225, 11574187, 11634008, 11674203, 11974223)、山西省“1331工程”重点学科建设计划

* E-mail: zhangpengfei@sxu.edu.cn

的应用。单粒子系统主要包括单个中性原子^[16]、单离子^[17]、单分子^[18]、单量子点^[19]和单金刚石色心^[20]等物理系统。

单粒子探测需要通过收集单粒子辐射的光子来完成,而高的收集效率是实现各项研究目的的重要保证。单粒子荧光的收集效率会直接影响单光子源纯度、量子态操控保真度、原子阵列寻址准确度等。因此,高效率探测单粒子发出的光子成为一个重要的研究课题。传统的单粒子探测方法是利用大数值孔径的透镜组^[16,21-22]或非球面镜^[23]收集单粒子发出的光子。但是,此方法存在两个缺点:1)单粒子荧光的收集效率低,通常小于1%,若要进一步提高收集效率就需要减小工作距离;2)大数值孔径的透镜的工作距离太小,致使透镜必须近距离靠近粒子,而透镜组或非球面镜的体积又比较大(通常在毫米量级),这会直接影响到对单粒子的操控。另外,为了提高对单粒子荧光的收集效率,可以利用高精细度光学微腔来提高光场与单粒子的相互作用^[24-26]。此类方法可使单粒子荧光的收集效率接近100%。然而,高精细度光学微腔的结构复杂,集成难度大,同时需要反馈控制腔长,技术要求高。另外,高精细度光学微腔为自由空间输出,在收集过程中也存在损耗,不利于对粒子的高效率探测。

不论是大数值孔径的透镜还是高精细度光学微腔,收集效率的提高都是通过增强光学器件的光场模式的强度来实现的。而具有微纳结构的光波导对在其中传输的光场具有强烈的束缚作用,因此可以用于实现对单粒子的高效率探测。2005年,Le Kien等^[27]曾预言:使用直径小于光波长的锥形微纳光纤可以高效地收集纳米光纤表面原子的自发辐射荧光,收集效率大于20%。2012年,Yalla等^[28-29]将单个量子点放置在锥形微纳光纤表面,验证了Le Kien等^[27]的预言。锥形微纳光纤通常是通过对普通光纤进行熔融后拉伸获得的,所以将锥形微纳光纤与普通光纤相连,粒子的收集会更方便。然而,锥形微纳光纤的直径对其收集效率有显著影响,只有在锥形微纳光纤直径为某一特定值时收集效率才能达到最大^[27]。锥形微纳光纤的直径通常小于光波长,加工控制和直径测量均存在难度^[30]。另外,在锥形微纳光纤上加工微纳结构形成光学谐振腔可以进一步提高对单粒子荧光的收集效率,腔精细度为30时收集效率可提高到90%以上^[31]。但是在锥形微纳光纤上加工微纳结构需要用到飞秒激光、离子束刻蚀等微纳加工技术,过程复杂,加工难度

大^[32-33]。

综合以上大数值孔径透镜、锥形微纳光纤的优点,2014年,Kato等^[34]在实验上将锥形微纳光纤截断,利用二氧化碳激光对其进行加热,使其端面变成半球形,这样就可以有效收集单粒子荧光。锥形微纳光纤的半球形端面可看作是一个大数值孔径的透镜,其收集的荧光直接耦合进入光纤并被探测器探测。但是端面为半球形的锥形微纳光纤的直径在微米量级,半球形端面的加工精度要求高,成品率低。2010年,Fu等^[35]在实验上制作了直径在微米量级的锥形空心波导,此锥形空心波导可以将光聚焦,聚焦后的光斑尺寸为亚波长量级。锥形空心波导结构可以产生微小尺度的偶极力阱,用于俘获单个粒子^[36]。因为微米量级的锥形空心波导对光场的强聚焦使光场强度得到了有效提高,所以当发光粒子与此类强的模场耦合时,粒子发出的光会高效率地耦合进入空心波导。因此,尺寸在微米量级的空心波导可以高效率地收集单粒子荧光,从而实现对单粒子的灵敏探测。

本文提出一种用于单粒子高效率探测的锥形空心波导探针。根据理论数值模拟结果可知,该锥形空心波导探针对单粒子荧光的收集效率可达25%以上。此锥形毛细管端面为平面,由普通光纤切割工具即可完成,加工难度低。此探针直径为微米量级,易于与其他微纳结构结合。

2 空心波导探针模型及数值模拟结果

用于单粒子高效率探测的锥形空心波导探针结构示意图如图1所示。锥形空心波导探针可由普通毛细管通过熔融拉伸技术^[27]制作而成。毛细管的材质为二氧化硅,其折射率为1.45,直径为125 μm,拉伸后的探针的直径由粗变细,形成锥状,最细处直径可达到微米量级。探针尖端部分为直径不再变化的圆管,其横截面为圆环形平面,其内部和外部为真空,折射率为1。单个偶极发光粒子(single emitter)被放置在探针尖端出口处。单个粒子发出的光子被耦合进入探针,并由锥形空心波导传输进入探测系统。利用时域有限差分方法(FDTD)模拟获得锥形空心波导探针的工作距离及其对单粒子荧光的收集效率。当激光由此锥形空心波导引并由探针尖端输出时,在探针的圆柱对称轴上(图1中为x轴)可以产生微小尺度的偶极力阱(用于俘获单个粒子)^[32],所以本文只考虑处于探针的圆柱对称轴上的单粒子荧光的收集效率。这样的探针可以同时完成对单个粒子的俘获和探测。

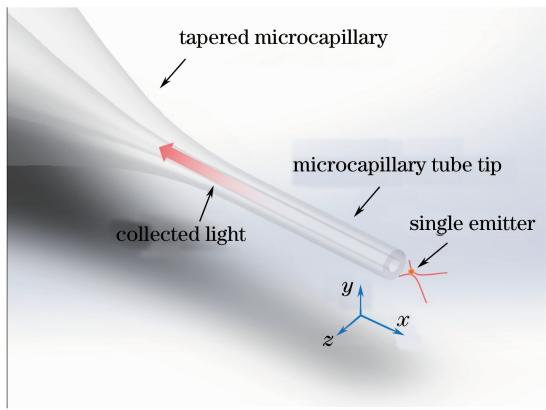


图 1 高效率探测单个粒子的锥形空心波导探针结构示意图

Fig. 1 Schematic of tapered hollow waveguide probe for detecting photons from single emitter efficiently

位于探针的旋转对称轴上的单个发光粒子相对于探针存在两个独立的偏振, 单个粒子偏振如图 2 中插图所示, 分别为沿着探针轴向和径向的偏振(axial polarization and radial polarization)。图 2 所示为两种不同偏振情况下探针对单粒子荧光的收集效率随单个粒子位置变化的曲线。因为空心波导在探针轴向上产生了微小尺度的偶极力阱, 且获得最优阱深的探针的内外直径比值为 3:8^[36], 这样的探针有望同时实现对单个粒子的俘获和探测, 所以本文也选取了相同的内外直径比例参数对收集效率进行模拟。探针外直径为 3.0 μm, 内直径为 1.125 μm。此探针主要针对后续实验中的铯原子荧光进行探测, 因此选取了对应于铯原子 D2 线的 852 nm 为单个发光粒子的波长。图中点线和实线分别为单个粒子轴向偏振和径向偏振时收集效率的情况。 $x=0 \mu\text{m}$ 为探针端面所在位置。由图 2 可知: 当单个粒子位于距离探针端面 0.55 μm 和 0.85 μm 时处, 探针对单粒子荧光的收集效率分别达到 16.1% (轴向偏振) 和 25.3% (径向偏振); 当原子逐渐远离探针时 ($x \gg 0 \mu\text{m}$), 收集效率逐渐降低为 0; 当将单个粒子置于探针内部时 ($x < 0 \mu\text{m}$), 收集效率降低并且出现振荡, 主要原因是单个粒子在空心波导内部发光并由内壁反射, 形成了干涉现象。在实际的实验过程中, 单个发光粒子, 例如偶极阱俘获的单个原子, 其发射光子的偏振在 x 、 y 、 z 轴三个方向的分量是随机的。所以, 在综合发光粒子沿 x 、 y 、 z 轴三个方向的收集效率后, 单个粒子发光耦合进入探针的平均效率随单个粒子在 x 轴位置变化的曲线可由图 2 中的虚线表示。由图 2 可以看出, 发光粒子最大收集效率的平均值为 21.7%, 探针的最优工作距离为 0.75 μm。

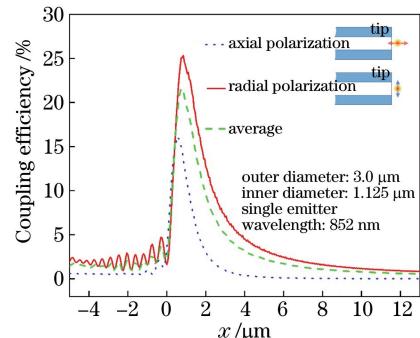


图 2 单个粒子为轴向(点线)和径向(实线)偏振时, 探针对单粒子荧光的收集效率随单个粒子在轴向不同位置变化的曲线

Fig. 2 Collection efficiency of probe for single-emitter fluorescence as a function of position of single emitter in axial direction, when single emitter is axially (dotted line) and radially (solid line) polarized

单个粒子发出的光子耦合进入探针的效率与空心波导探针的尺寸有着直接的关系, 因此本文进一步研究了收集效率和工作距离与探针几何参数的关系, 从而优化探针参数并获得更高的收集效率。空心波导探针的几何参数包括内直径、外直径。仍然保持内外直径的比例为 3:8, 改变探针的外直径, 外直径的变化范围为 1.0~5.0 μm, 根据固定比例可知内直径变化范围为 0.375~1.875 μm。单个粒子发光波长为 852 nm, 模拟结果如图 3(a)所示。图中实心圆点表示单个粒子偏振为径向偏振时探针对单粒子荧光的收集效率, 实心方点表示轴向偏振时的收集效率, 实心三角点表示平均收集效率。由图 3(a)可知: 当探针内外直径比例不变时, 探针对单粒子荧光的收集效率随着探针外直径的增大而先增大再减小; 在探针外直径为 3.0 μm 时, 探针对径向偏振单粒子荧光的收集效率达到最大, 为 25.3%。由于在 x 、 y 、 z 三个方向的收集效率中径向偏振起主导作用, 因此平均收集效率也在外直径为 3.0 μm 时达到最大, 为 21.7%。另外, 由图 3(a)可知, 探针的工作距离随着外直径的增大而单调增大, 图中空心圆点表示单个粒子偏振为径向偏振时探针的工作距离, 空心方点表示轴向偏振时的工作距离, 空心三角点表示 x 、 y 、 z 三个方向偏振的平均情况。在获得最大收集效率时(外直径为 3.0 μm), 探针的工作距离为 0.85 μm(径向偏振)和 0.75 μm(平均偏振)。通过上述探针外直径的优化过程可知, 在外直径为 3.0 μm 时可获得最大的收集效率。接下来, 保持探针外直径为 3.0 μm 不变, 通过调整探针内直径的尺寸来获得收集效率和工

作距离,相应的结果如图 3(b)所示。由图 3(b)可知:当探针外直径不变时,收集效率随着内直径的减小而单调增大,探针的工作距离随内直径的减小而减小;当内直径为 $0.4\text{ }\mu\text{m}$ 时,径向偏振收集效率可达到 37.5%,但是其工作距离减小至 $0.4\text{ }\mu\text{m}$ 。工作距离太

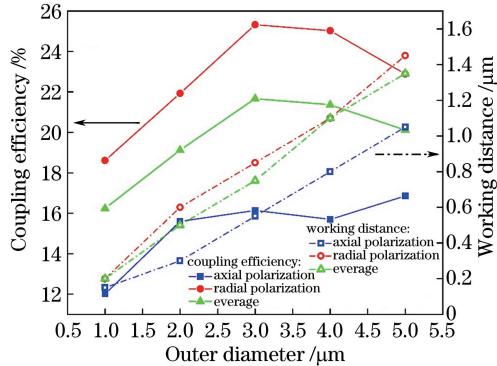


图 3 收集效率和工作距离与探针几何尺寸的关系。(a)探针内外直径的比例为 3:8 时,

收集效率和工作距离与探针外直径的关系;(b)探针外直径为 $3.0\text{ }\mu\text{m}$ 时,收集效率和工作距离与探针内直径的关系

Fig. 3 Collection efficiency and working distance as functions of geometrical dimension of probe. (a) Collection efficiency and working distance as functions of outer diameter when ratio of inner diameter to outer diameter of probe is 3:8;
(b) collection efficiency and working distance as functions of inner diameter when outer diameter is $3.0\text{ }\mu\text{m}$

图 2 和图 3 中显示的主要实验室用到的铯原子的探测结果,其发光波长为 852 nm 。为了研究和扩展此探针对不同发光波长的粒子探测的能力,研究了此探针对不同波长的单粒子荧光的收集效率和工作距离,具体结果如图 4 所示。图中空心三角点表示平均收集效率,而空心方点表示工作距离。探针内外直径的比例为 3:8,探针外直径为 $3.0\text{ }\mu\text{m}$;发光粒子的波长选取 $650, 750, 852, 950, 1064\text{ nm}$ 。由图 4 可知,探针对不同波长单粒子荧光的收集效率受波长的影响很小,各波长收集效率的平均值为 $(23.1 \pm 1)\%$,而最大收集效率为 24.2%,对应波长 852 nm ,最小收集效率为 21.9%,对应波长

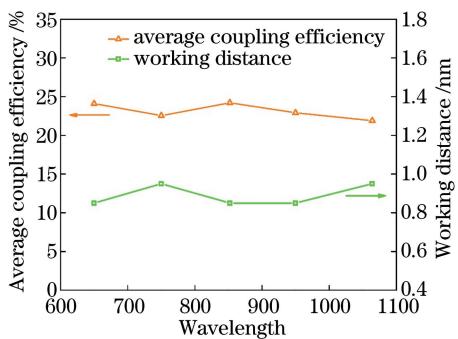
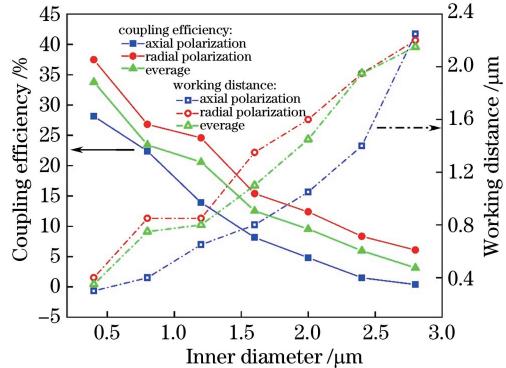


图 4 探针对不同波长的单个发光粒子的平均收集效率和工作距离

Fig. 4 Average collection efficiency and working distance of probe as functions of single emitter's wavelength

小使得待测粒子极易受到探针表面静电力和范德瓦耳斯力的影响,并且对探针的空间控制精度提出了更高的要求。因此在具体实验操作过程中,可以根据待测粒子性质、控制精度的具体实验条件选择合适内直径的探针,以获得尽可能高的收集效率。



1064 nm 。与此同时,工作距离随波长的变化也很小。工作距离最大为 $0.95\text{ }\mu\text{m}$ (对应波长 750 nm 和 1064 nm),工作距离最小为 $0.85\text{ }\mu\text{m}$ (对应波长 $650, 852, 950\text{ nm}$)。最大和最小工作距离相差只有 100 nm 。由此可见,此探针用于不同发光波长粒子的探测时,均可以得到较高的收集效率。而且,工作距离随波长变化很小,所以此探针可以应用于具有大范围发光光谱的粒子的探测,如常温下的量子点、金刚石色心等。

3 结论

本文提出了一种用于单个粒子高效率探测的锥形空心波导探针,在理论上模拟了此锥形空心波导探针对单个粒子发出的光子的收集效率和工作距离。通过改变探针的几何尺寸来优化该收集效率。当探针外直径为 $3.0\text{ }\mu\text{m}$ 、内直径为 $1.125\text{ }\mu\text{m}$ 时(内直径与外直径的比值为 3:8),探针对波长为 852 nm 的径向偏振的单粒子荧光的收集效率达到 25.3%,而综合各种偏振情况,其平均收集效率可达 21.7%。当固定探针外直径时,收集效率随着内直径的减小而增大,工作距离减小。发光粒子的波长对探针的收集效率没有影响,所以此探针对于不同波长的单粒子和宽谱发光粒子均可以实现高效率的荧光收集。综上所述,此探针可以用于各种粒子的高效探测,在化学、生物等领域具有广阔的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Haroche S. Nobel lecture: controlling photons in a box and exploring the quantum to classical boundary [J]. *Reviews of Modern Physics*, 2013, 85 (3): 1083-1102.
- [2] Wineland D J. Nobel lecture: superposition, entanglement, and raising Schrödinger's cat [J]. *Reviews of Modern Physics*, 2013, 85 (3): 1103-1114.
- [3] Lounis B, Orrit M. Single-photon sources [J]. *Reports on Progress in Physics*, 2005, 68(5): 1129-1179.
- [4] Kuhn A, Hennrich M, Rempe G. Deterministic single-photon source for distributed quantum networking[J]. *Physical Review Letters*, 2002, 89 (6): 067901.
- [5] Deléglise S, Dotzenko I, Sayrin C, et al. Reconstruction of non-classical cavity field states with snapshots of their decoherence [J]. *Nature*, 2008, 455(7212): 510-514.
- [6] Darquié B, Jones M P A, Dingjan J, et al. Controlled single-photon emission from a single trapped two-level atom[J]. *Science*, 2005, 309(5733): 454-456.
- [7] Wang Z H, Tian Y L, Yang C, et al. Experimental test of Bohr's complementarity principle with single neutral atoms[J]. *Physical Review A*, 2016, 94(6): 062124.
- [8] Schmidt-Kaler F, Häffner H, Riebe M, et al. Realization of the Cirac-Zoller controlled-NOT quantum gate[J]. *Nature*, 2003, 422(6930): 408-411.
- [9] Isenhower L, Urban E, Zhang X L, et al. Demonstration of a neutral atom controlled-NOT quantum gate [J]. *Physical Review Letters*, 2010, 104(1): 010503.
- [10] Barredo D, de Léséleuc S, Lienhard V, et al. An atom-by-atom assembler of defect-free arbitrary two-dimensional atomic arrays [J]. *Science*, 2016, 354 (6315): 1021-1023.
- [11] Endres M, Bernien H, Keesling A, et al. Atom-by-atom assembly of defect-free one-dimensional cold atom arrays [J]. *Science*, 2016, 354(6315): 1024-1027.
- [12] Barnett S. Quantum information [M]. New York: Oxford University Press, 2009: 141-163.
- [13] Georgescu I M, Ashhab S, Nori F. Quantum simulation[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2014, 86 (1): 153-185.
- [14] Nielsen M A, Chuang I L. Quantum computation and quantum information [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000: 171-215.
- [15] Baumgart I, Cai J M, Retzker A, et al. Ultrasensitive magnetometer using a single atom[J]. *Physical Review Letters*, 2016, 116(24): 240801.
- [16] Schlosser N, Reymond G, Protsenko I, et al. Sub-Poissonian loading of single atoms in a microscopic dipole trap [J]. *Nature*, 2001, 411 (6841): 1024-1027.
- [17] Keller M, Lange B, Hayasaka K, et al. A calcium ion in a cavity as a controlled single-photon source [J]. *New Journal of Physics*, 2004, 6(1): 95.
- [18] Lounis B, Moerner W E. Single photons on demand from a single molecule at room temperature [J]. *Nature*, 2000, 407(6803): 491-493.
- [19] Santori C, Pelton M, Solomon G, et al. Triggered single photons from a quantum dot [J]. *Physical Review Letters*, 2001, 86(8): 1502-1505.
- [20] Kurtsiefer C, Mayer S, Zarda P, et al. Stable solid-state source of single photons[J]. *Physical Review Letters*, 2000, 85(2): 290-293.
- [21] Guo Y Q, Li G, Zhang Y F, et al. Efficient fluorescence detection of a single neutral atom with low background in a microscopic optical dipole trap [J]. *Science China Physics, Mechanics and Astronomy*, 2012, 55(9): 1523-1528.
- [22] Wang J L, Li G, Tian Y L, et al. Measurement and 3D reconstruction of the micro-scale optical dipole trap for single atom manipulation [J]. *Journal of Quantum Optics*, 2015, 21(1): 74-80.
王建龙, 李刚, 田亚莉, 等. 用于单原子操控的微尺度蓝移阱的三维构建与测量 [J]. 量子光学学报, 2015, 21(1): 74-80.
- [23] Tey M K, Chen Z L, Aljunid S A, et al. Strong interaction between light and a single trapped atom without the need for a cavity [J]. *Nature Physics*, 2008, 4(12): 924-927.
- [24] Zhang P F, Zhang Y C, Li G, et al. Sensitive detection of individual neutral atoms in a strong coupling cavity QED system [J]. *Chinese Physics Letters*, 2011, 28(4): 044203.
- [25] Zhang P F, Guo Y Q, Li Z H, et al. Elimination of the degenerate trajectory of a single atom strongly coupled to a tilted TEM₁₀ cavity mode[J]. *Physical Review A*, 2011, 83(3): 031804.
- [26] Du J, Li W, Wen R, et al. Precision measurement of single atoms strongly coupled to the higher-order transverse modes of a high-finesse optical cavity[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 103(8): 083117.
- [27] Le Kien F, Dutta Gupta S, Balykin V I, et al. Spontaneous emission of a cesium atom near a nanofiber: efficient coupling of light to guided modes

- [J]. Physical Review A, 2005, 72(3): 032509.
- [28] Yalla R, Le Kien F, Morinaga M, et al. Efficient channeling of fluorescence photons from single quantum dots into guided modes of optical nanofiber [J]. Physical Review Letters, 2012, 109 (6): 063602.
- [29] Wang L Z, Li L J, Tong L M. Optical microfibers and their applications in mode-locked fiber lasers [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(1): 0126011.
王利镇, 李林军, 童利民. 微纳光纤及其锁模激光应用 [J]. 光学学报, 2019, 39(1): 0126011.
- [30] Zhang P F, Cheng F, Wang X, et al. Nondestructive measurement of nanofiber diameters using microfiber tip [J]. Optics Express, 2018, 26 (24): 31500-31509.
- [31] Le Kien F, Hakuta K. Cavity-enhanced channeling of emission from an atom into a nanofiber [J]. Physical Review A, 2009, 80(5): 053826.
- [32] Nayak K P, Zhang P F, Hakuta K. Optical nanofiber-based photonic crystal cavity [J]. Optics Letters, 2014, 39(2): 232-235.
- [33] Qiao L L, Chu W, Wang Z, et al. Three-dimensional microfabrication by shaped femtosecond laser pulses [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(1): 0126012.
乔玲玲, 储蔚, 王哲, 等. 基于整形飞秒激光脉冲的三维微纳制备 [J]. 光学学报, 2019, 39 (1): 0126012.
- [34] Kato S, Chonan S, Aoki T. High-numerical-aperture microlensed tip on an air-clad optical fiber [J]. Optics Letters, 2014, 39(4): 773-776.
- [35] Fu J, Dong H T, Fang W. Subwavelength focusing of light by a tapered microtube [J]. Applied Physics Letters, 2010, 97(4): 041114.
- [36] Zhang P F, Li G, Zhang T C. Subwavelength optical dipole trap for neutral atoms using a microcapillary tube tip [J]. Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics, 2017, 50(4): 045005.