

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201706041



# 光学衬底上微光纤的传输损耗

梁定鑫<sup>1,2</sup>, 戴昊<sup>3</sup>, 杨宇航<sup>1,2</sup>, 张奚宁<sup>1,2</sup>, 蒲继雄<sup>1,2</sup>

1. 华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021;
2. 华侨大学 福建省光传输与变换重点实验室, 福建 厦门 361021;
3. 厦门大学 海洋与地球学院海洋观测技术研发中心, 福建 厦门 366005

**摘要:** 选择不同的光学衬底,采用纳米光纤锥直接耦合的方法,测量微光纤传输损耗与光学衬底之间的关系,分析损耗机制,探索降低损耗的有效方法.结果表明:放置于  $MgF_2$  及  $CaF_2$  光学衬底上的微光纤传输损耗明显高于悬置于空气中的损耗值;衬底的折射率越接近光纤的折射率,置于其上的微光纤传输损耗越大;在同一种光学衬底上,微光纤直径越大,其传输损耗越小;光学衬底的存在,使微光纤中光场能量中心向衬底方向偏移,增加了传输损耗;采用将微光纤部分悬空的方法可有效降低传输损耗.

**关键词:** 微纳光纤; 纳米光纤锥; 光学衬底; 传输损耗

中图分类号: TN 253 文献标志码: A 文章编号: 1000-5013(2019)01-0101-05

## Propagation Loss of Microfibers on Optical Substrates

LIANG Dingxin<sup>1,2</sup>, DAI Hao<sup>3</sup>, YANG Yuhang<sup>1,2</sup>,  
ZHANG Xining<sup>1,2</sup>, PU Jixiong<sup>1,2</sup>

1. College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;
2. Fujian Key Laboratory of Light Propagation and Transformation, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;
3. Center for Ocean Observation Technologies, Xiamen University, Xiamen 366005, China)

**Abstract:** By depositing on different substrates, the relationship between the propagation loss of microfiber and the substrate is measured through direct coupling of microfiber and tapered nanofiber. The loss mechanics is analyzed and the effective methods to reduce the propagation loss is also proposed. It demonstrates that the losses of microfiber deposited on the  $MgF_2$  and  $CaF_2$  substrates are much higher than the one of the air-suspended microfiber. When the optical index of the substrate closes to the microfiber index, the propagation loss of the microfiber deposited on the substrate increases. On the same substrate, the propagation loss decreases with the increase of the microfiber diameter. The existence of the substrate drags the center of the optical energy field to the substrate and leads to higher loss. By suspending a part of the microfiber in air, the propagation loss can be effectively reduced.

**Keywords:** micro/nano fiber; nanofiber taper; optical substrates; propagation loss

微纳光纤因其质量小、对光场具有强约束力、在光纤表面具有强倏逝场等特点,在光学传感、光通信、光动力学、微纳光子器件等诸多领域有着广泛的应用前景<sup>[1-2]</sup>.由于微纳光纤易制备、结构简单、便于与标准光纤集成,因而,可利用微纳光纤制作各种尺寸小、集成度高的功能化光波导器件.对基于微纳光

收稿日期: 2017-06-14

通信作者: 张奚宁(1982-),女,讲师,博士,主要从事微纳光子学、微纳光纤及金属微纳结构中表面等离子激元的研究.  
E-mail: zhangxining1014@163.com.

基金项目: 国家青年科学基金资助项目(61505056); 华侨大学高层次人才科研启动项目(12BS220)

纤的光波导器件而言,光的传输损耗是器件的重要参数之一. Tong 等<sup>[3]</sup>采用两步拉伸法制备的微纳光纤,其悬置于空气中的传输损耗可低于  $0.1 \text{ dB} \cdot \text{mm}^{-1}$ ,是工作于可见和近红外波段的良好光学波导. Leon-Saval 等<sup>[4]</sup>研究出  $1550 \text{ nm}$  的光在微纳光纤的损耗为  $0.001 \text{ dB} \cdot \text{mm}^{-1}$ . 侯建平等<sup>[5]</sup>提出采用反射剪断法测量微纳光纤传输损耗的方法. 郝建莘等<sup>[6]</sup>采用剪断法与后向散射法相结合,对由氢氧焰加热法拉制的微纳光纤在气溶胶及水中的传输损耗进行实验测量,发现光纤直径越大,损耗越低. Brambilla<sup>[7]</sup>总结了不同制备方法得到的微纳光纤传输损耗,发现虽然采用不同的制备技术,但微纳光纤的传输损耗存在随着直径的增加而减小的趋势. 上述研究关注的是对称环境,即悬置于空气或水中时,微纳光纤的传输损耗,而在光波导器件的集成过程中,为增加器件的机械稳定性,微纳光纤往往需固定在光学衬底上. Kou 等<sup>[8]</sup>采用模拟计算的方法,理论上证明了光学衬底对拉锥微光纤的出射光透射率具有显著影响,增加了微光纤的传输损耗. 然而,光学衬底对微光纤传输损耗影响的相关工作尚未见报道. 本文采用纳米光纤锥直接耦合的方法,通过测量输出端光强变化,对置于光学衬底上的微光纤传输损耗进行实验测量,并对不同光学衬底对损耗的影响及相同衬底上不同直径的微光纤传输损耗进行系统分析.

## 1 理论依据和方法

### 1.1 传输损耗的理论公式

微光纤中,光的传输长度  $L_0$  可通过测量光纤输出光强进行估算,输出光强符合指数衰减<sup>[9]</sup>,即

$$I(x) = I_0 \times e^{-x/L_0}, \quad (1)$$

式(1)中: $I_0$  为初始光强; $x$  为微光纤与纳米光纤锥耦合点与微光纤输出端之间的距离,记为传输距离.

微光纤的传输损耗  $\alpha$  与传输长度  $L_0$  成反比,两者满足如下关系式<sup>[9]</sup>,即

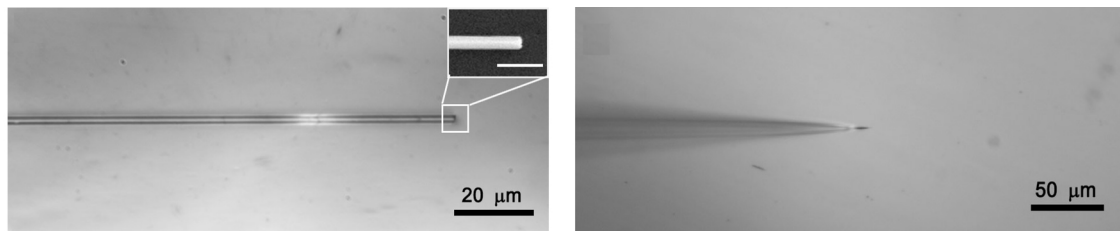
$$\alpha = \frac{-10 \times \log(1/e)}{L_0} \approx \frac{4.343}{L_0}. \quad (2)$$

通过测量微光纤在不同传输距离  $x$  激发下的输出光强,可以推算出传输长度  $L_0$  及传输损耗  $\alpha$ .

### 1.2 传输损耗实验

利用纳米光纤锥与微光纤直接耦合的方法,将外部光源导入微光纤,记录不同耦合位置下,微光纤输出端的光强变化,推算微光纤中光束的传输长度及传输损耗.

微光纤及耦合用纳米光纤锥采用酒精灯火焰拉锥法,从标准通信用单模光纤(SMF28, Corning)中制备得到,其典型形貌如图1所示. 图1(a)中:局域放大区为微光纤输出端的 SEM 照片,标尺为  $5 \mu\text{m}$ . 由图1(a)可知:微光纤表面质量好,直径  $D=1.5 \mu\text{m}$ ,长度为毫米量级,通过微光纤与衬底之间的范德瓦尔斯力,固定在表面洁净的光学衬底上,且微光纤输出端口较为平整. 图1(b)为纳米光纤锥的形貌图,其锥尖直径可达数纳米,入射光( $650 \text{ nm}$ )从另一端的标准单模光纤端输入<sup>[10]</sup>.



(a) 典型的微光纤光学明场照片

(b) 典型的耦合用纳米光纤锥的光学明场照片

图1 微光纤及纳米光纤锥的典型形貌图

Fig. 1 Typical optical images of microfiber and nanofiber taper

传输损耗测量系统的结构示意图,如图2所示. 固定在三维微调架上的纳米光纤锥,与放置于光学衬底上的微光纤进行倏逝波耦合. 通过三维微调架,可精确调节微光纤与纳米光纤锥的耦合角度,并可在保持耦合系数不变的情况下,使纳米光纤锥沿微光纤的轴向移动(图2中箭头方向),改变传输距离<sup>[11]</sup>. 通过光学显微镜(i80, Nikon)及其连接的单色 CCD(Neo sCOMS, Andor),记录不同传输距离微光纤输出端的暗场光强信息.

置于  $\text{CaF}_2$  衬底上,不同传输距离的微光纤的传输损耗实验操作过程,如图3所示. 由图3(a)可测

得耦合点到微光纤输出端的传输距离  $x$ , 此时,  $x = 67 \mu\text{m}$ . 保持耦合条件不变<sup>[11]</sup>, 纳米光纤锥向左移动时, 微光纤的光学暗场照片, 如图 3(b)~(d) 所示. 由图 3(b) 可知: 当  $x = 67 \mu\text{m}$  时, 通入红光 (650 nm) 的纳米光纤锥在耦合点有明显的散射, 光沿微光纤传输时, 可清晰观察到微光纤表面的光散射, 散射点的形成主要是由于微光纤表面吸附了空气中的悬浮颗粒. 微光纤的散射光主要由两方面作用: 一是微光纤中的光在颗粒处的散射; 二是纳米光纤锥对悬浮颗粒的照射. 由图 3(c), (d) 可知: 微光纤表面散射光随距离的增加而逐渐减弱, 这主要是因为传输距离的增加, 散射点处光场能量逐渐减小; 同时, 纳米光纤锥的耦合点逐渐远离散射点, 无法近距离照射, 也使散射点光强逐渐减弱.

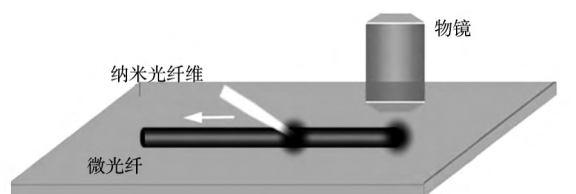
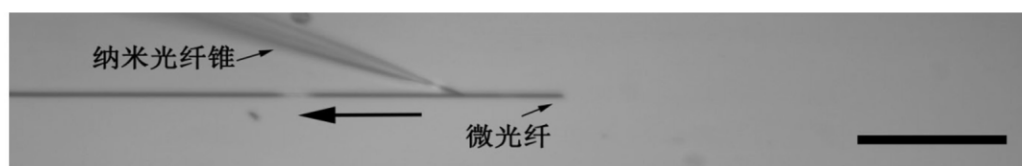
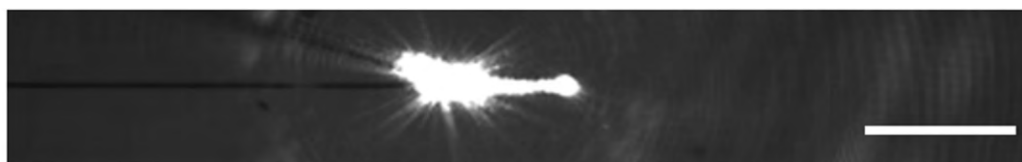


图 2 微光纤传输损耗测量系统的示意图  
Fig. 2 Sketch of propagation loss of microfiber in measure system

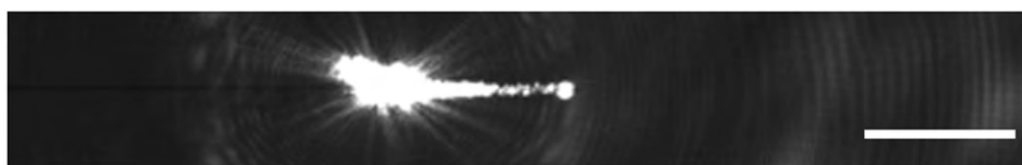
为得到微光纤输出光强随传输距离的变化关系, 根据图 3(b)~(d) 所示实验方法, 通过 CCD 相机记录不同传输距离下, 微光纤输出端的光学暗场照片, 如图 3(e)~(j) 所示. 计算图 3(e)~(j) 中各暗场照片的灰度值, 作为对应传输距离下微光纤的相对输出强度<sup>[9,11]</sup>. 对输出强度做最大值归一, 采用指数拟合的方法, 由式(1), (2) 得到红光在衬底上微光纤中的传输长度  $L_0$  和传输损耗  $\alpha$ .



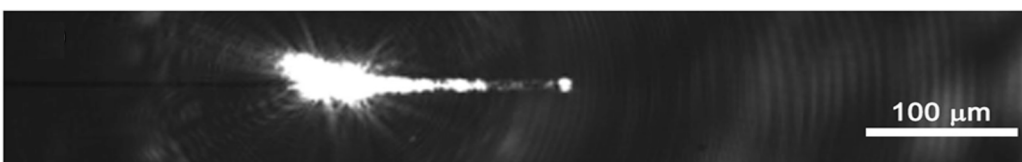
(a) 光学明场照片 (未通光)



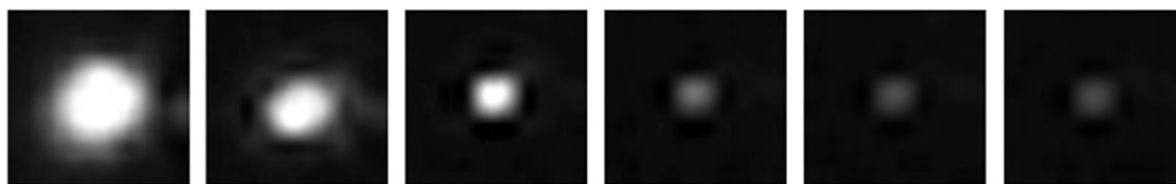
(b) 光学暗场照片 ( $x = 67 \mu\text{m}$ )



(c) 光学暗场照片 ( $x = 111 \mu\text{m}$ )



(d) 光学暗场照片 ( $x = 145 \mu\text{m}$ )



(e)  $x = 50 \mu\text{m}$  (f)  $x = 70 \mu\text{m}$  (g)  $x = 87 \mu\text{m}$  (h)  $x = 130 \mu\text{m}$  (i)  $x = 162 \mu\text{m}$  (j)  $x = 193 \mu\text{m}$

图 3 微光纤传输损耗的光学实验测量

Fig. 3 Optical experimental measurement of propagation loss in microfiber

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 光学衬底对微光纤传输损耗的影响

为了对比衬底对微光纤传输损耗的影响,将微光纤( $D=1.5\ \mu\text{m}$ )的两端放置于  $\text{MgF}_2$  衬底上,中间悬空,得到置于空气中的微光纤.位于衬底上的微光纤长度约为  $20\ \mu\text{m}$ ,空气中的长度约为  $300\ \mu\text{m}$ .纳米光纤锥与置于空气、 $\text{MgF}_2$  及  $\text{CaF}_2$  衬底上的同一根微光纤耦合,记录3种情况下微光纤输出端的光强变化,按节1.2所述方法分别计算其相对输出强度.

不同光学衬底上,同一微光纤的归一化传输损耗曲线,如图4所示.图4中: $x$ 为传输距离; $I$ 为光强度.由图4可知:无论有无衬底,微光纤中的相对光强均随传输距离的增加而减小;空气中,微光纤输出的相对光强衰减幅度最小; $\text{MgF}_2$ 衬底上微光纤的损耗明显低于  $\text{CaF}_2$ ,且两者的衰减幅度较为接近.

对上述相对输出强度曲线进行指数拟合,得到空气、 $\text{MgF}_2$  及  $\text{CaF}_2$  衬底上微光纤的传输长度分别为  $1\ 125.43, 66.84, 40.05\ \mu\text{m}$ .根据式(2)可得到空气、 $\text{MgF}_2$  及  $\text{CaF}_2$  衬底上微光纤的传输损耗分别为  $0.003\ 8, 0.065\ 0, 0.108\ 0\ \text{dB} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ ,即  $\alpha(\text{CaF}_2) > \alpha(\text{MgF}_2) > \alpha(\text{空气})$ .

置于两种光学衬底上的微光纤传输损耗均明显高于空气中微光纤的损耗值.这是因为微光纤放置于光学衬底上,其两侧分别为空气和衬底,而衬底的折射率与微光纤较为接近,折射率差较小,使微光纤的倏逝场中心向衬底一侧偏移,光场能量向衬底内泄露,传输损耗明显增加<sup>[12]</sup>.此外,空气中微光纤传输损耗为  $0.003\ 8\ \text{dB} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ ,明显高于郝建萃等<sup>[6]</sup>用氢氧焰制备微光纤的研究结果.这是由于在测量时,采用  $\text{MgF}_2$  衬底支持微光纤的输出端,使微光纤部分悬空,输出端的光学衬底增加了微光纤的传输损耗;同时,虽同为火焰加热法制备微纳光纤,但酒精灯火焰的稳定程度低于氢氧焰,故研究中的微光纤表面粗糙程度较大,增加了微光纤的表面散射,引起较大的散射损耗<sup>[13-15]</sup>.

两种光学衬底上,同一微光纤的传输损耗也存在较大差异,即  $\alpha(\text{CaF}_2) > \alpha(\text{MgF}_2)$ ,这是衬底折射率不同导致的.当波长为  $650\ \text{nm}$  时, $\text{MgF}_2$  和  $\text{CaF}_2$  的折射率分别为  $1.377, 1.433$ .考虑到拉锥后的光纤芯层与包层折射率差异不大,以往的研究中多用  $\text{SiO}_2$  折射率代替微光纤折射率进行分析<sup>[16]</sup>,因此,文中微光纤的折射率约为  $1.456$ <sup>[17]</sup>.可见,当微光纤与光学衬底的折射率越接近时,光场在微光纤内的约束能力越差,传输损耗越高.因此,衬底的折射率越接近  $\text{SiO}_2$  光纤的折射率,微光纤的传输损耗越大.

### 2.2 不同直径对微光纤传输损耗的影响

在同一块  $\text{MgF}_2$  衬底上,分别放置直径为  $1.0, 1.5, 3.2\ \mu\text{m}$  的微光纤,先后与同一根纳米光纤锥耦合,测量其输出端的相对光强.得到微光纤直径与输出端相对光强之间的关系,如图5所示.由图5可知:三者光强衰减幅度较为接近.

通过指数拟合,得到直径为  $1.0, 1.5, 3.2\ \mu\text{m}$  微光纤的传输长度分别为  $53.5, 66.8, 89.5\ \mu\text{m}$ .根据式(2)计算,直径  $1.0, 1.5, 3.2\ \mu\text{m}$  的微光纤对应的传输损耗分别为  $0.090, 0.065, 0.049\ \text{dB} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ .由此可知,直径越大的微光纤,在  $\text{MgF}_2$  衬底上的传输损耗越小.这是因为直径越大,微光纤外的倏逝波分量越少,光在微光纤中传输时因衬底影响而导致的损耗越少.因而,在器件容许的情况下,适当增加微光纤的直径,可以减小其传输损耗.

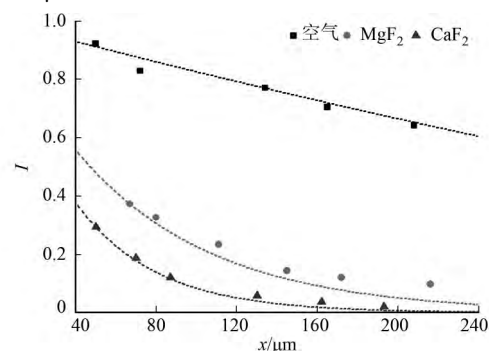


图4 光学衬底与微光纤传输损耗的关系曲线  
Fig. 4 Relationship curves of propagation losses of microfibers and substrates

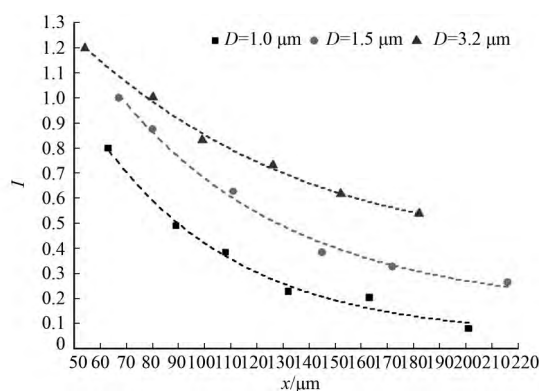


图5 不同直径微光纤的传输损耗曲线  
Fig. 5 Propagation loss curves of microfibers with different diameters

### 3 结束语

研究光学衬底对微光纤传输损耗的影响,发现由于环境与微光纤的折射率差减小,光学衬底上微光纤的传输损耗明显增加;衬底的折射率越接近微光纤的折射率,置于其上的微光纤传输损耗越大;通过将微光纤部分悬空的方法,可明显减小微光纤的传输损耗。此外,在同一种光学衬底上,微光纤直径越大,其传输损耗越小。对光学衬底上微光纤传输损耗变化规律的探讨,有利于集成光子器件的设计与结构优化。

#### 参考文献:

- [1] TONG Limin,ZI Fei,GUO Xin,*et al.* Optical microfibers and nanofibers: A tutorial[J]. *Optics Commun*,2012,285(23):4641-4647. DOI:10.1016/j.optcom.2012.07.068.
- [2] 伍晓芹,王依霏,童利民.微纳光纤及其应用[J].*物理*,2015,44(6):356-365. DOI:10.7693/wl20150602.
- [3] TONG Limin,GATTASS R,ASHCOM J,*et al.* Subwavelength-diameter silica wires for low-loss optical wave guiding[J]. *Nature*,2003,426(6968):816-819. DOI:10.1038/nature02193.
- [4] LEON-SAVAL S,BIRKS T,WADSWORTH W,*et al.* Supercontinuum generation in submicron fibre waveguide[J]. *Opt Express*,2004,12(13):2864-2869. DOI:10.1364/OPEX.12.002864.
- [5] 侯建平,盖双龙,李鹏,等.一种微纳光纤损耗测试方法的实验研究[J].*半导体光电*,2010,31(5):747-750.
- [6] 郝建苹,侯建平,赵晨阳,等.微纳光纤传输损耗测试及实验优化[J].*半导体光电*,2012,33(1):62-69.
- [7] BRAMBILLA G. Optical fibre nanowires and microwires: A review[J]. *J Opt*,2010,12(4):043001(1-19). DOI:10.1088/2040-8978/12/4/043001.
- [8] KOU Xufeng,VIENNE G,WANG Guanghui. Modeling light propagation through taper-microfiber structures integrated on substrates[J]. *Chin Opt Lett*,2010,8(6):560-563. DOI:10.3788/COL20100806.0560.
- [9] PYAYT A,WILEY B,XIA Y,*et al.* Integration of photonic and silver nanowire plasmonic waveguides[J]. *Nat Nano*,2008,3(11):660-665. DOI:10.1038/nnano.2008.281.
- [10] GUO Xin,QIU Min,BAO Jiming,*et al.* Direct coupling of plasmonic and photonic nanowires for hybrid nanophotonic components and circuits[J]. *Nano Letters*,2009,9(12):4515-4519. DOI:10.1021/nl902860d.
- [11] MA Yaoguang,LI Xiyuan,YU Huakang,*et al.* Direct measurement of propagation losses in silver nanowires[J]. *Opt Lett*,2010,35(8):1160-1162. DOI:10.1364/OL.35.001160.
- [12] CHEN Yuan,MA Zhe,YANG Qing,*et al.* Compact optical short-pass filters based on microfibers[J]. *Opt Lett* 2008,33(21):2565-2567. DOI:10.1364/OL.33.002565.
- [13] KOVALENKO A,KURASHOV V,KISIL A. Radiation losses in optical nanofibers with random rough surface[J]. *Opt Express*,2008,16(8):5797-5806. DOI:10.1364/OE.16.005797.
- [14] ZHAI Gaoye,TONG Limin. Roughness-induced radiation losses in optical micro or nanofibers[J]. *Opt Express*,2007,15(21):13805-13816. DOI:10.1364/OE.15.013805.
- [15] BARMBILLA G,XU Fei,HORAK P,*et al.* Optical fiber nanowires and microwires: Fabrication and applications[J]. *Advances in Optics and Photonics*,2009,1(1):107-161. DOI:10.1364/aop.1.000107.
- [16] TONG Limin,LOU Jingyi,MAZUR E. Single-mode guiding properties of subwavelength-diameter silica and silicon wire waveguides[J]. *Opt Express*,2004,12(6):1025-1035. DOI:10.1364/OPEX.12.001025.
- [17] PALIK E D. Handbook of optical constants of solids[M]. New York:Academic Press,1998.

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:吴逢铁)