

空芯光子带隙光纤的损耗特性

王 鑫, 娄淑琴, 邢 震

(北京交通大学 电子信息工程学院, 北京 100044)

摘要: 降低光纤损耗是当前空芯光子带隙光纤的研究重点。以 19 芯空芯光子带隙光纤为例, 采用有限元方法, 从光纤结构设计角度出发, 系统地研究了光纤结构参数与光纤损耗之间的关联性。研究表明, 增大包层空气孔层数、包层空气孔占空比以及包层空气孔的倒圆角直径可以有效降低光纤的限制损耗(降低到 10^{-4} dB/km 以下); 而表面散射损耗的大小取决于芯模和表面模之间的耦合, 纤芯壁厚增加以及纤芯扩张系数增大都会导致芯模与表面模的耦合增强, 增大光纤表面散射损耗, 并且由于表面模的出现也会导致光纤的传输带宽变窄。受光纤结构的限制, 19 芯空芯光子带隙光纤的光纤损耗难以降到 1 dB/km 以下, 进一步降低光纤损耗, 只能通过去掉更多的空气孔, 形成更大的空芯结构。研究结果为优化空芯光子带隙光纤结构、降低损耗提供了理论依据和指导。

关键词: 光子带隙光纤; 空芯; 损耗

中图分类号: TN253 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.S218001

Loss characteristic of hollow core photonic bandgap fiber

Wang Xin, Lou Shuqin, Xing Zhen

(School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: As the focus of current research on hollow core photonic bandgap fiber, reducing fiber loss is of great importance. In the view of fiber design, taking the 19 cell hollow core photonic bandgap fiber for example, the relationship between structure parameters and loss characteristic was investigated using the finite element method. Simulation results indicate that the confinement loss can be effectively reduced by adjusting the cladding parameters. With the increase of the layer of air holes, the air filling fraction and the fillet diameter at the corners, the confinement loss can be reduced below 10^{-4} dB/km. While the surface scattering loss, which depends on the coupling between the core mode and the surface mode, increases with the thickness of the core wall as well as the core expansion factor. In addition, the appearance of surface mode also leads to a sacrifice of transmission bandwidth. Limited by the fiber structure, the transmission loss of 19 cell hollow core photonic bandgap fiber is difficult to be reduced to less than 1 dB/km. Further reducing fiber loss can only be achieved by removing more air holes to form

收稿日期: 2019-04-10; 修订日期: 2019-05-20

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(2016RC037)

作者简介: 王鑫(1989-), 女, 讲师, 博士, 主要从事微结构光纤及器件方面的研究。Email: xin.wang@bjtu.edu.cn

通讯作者: 娄淑琴(1965-), 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事特种光纤及器件、光纤传感器、光纤激光器等方面的研究。

Email: shqlou@bjtu.edu.cn

a larger hollow core structure. The research achievement provides theoretical basis for the realization of low loss hollow core photonic bandgap fibers.

Key words: photonic bandgap fiber; hollow core; loss

0 引言

空芯光纤打破了材料吸收对光纤损耗的限制,凭借低损耗传输以及低非线性特性、高效耦合特性、传输窗口可控等优良特性成为了近年来特种光纤领域的研究热点^[1-2]。空芯光子带隙光纤(Hollow Core Photonic Bandgap Fiber, HC-PBGF)以光子带隙机理导光^[3],自问世以来,就吸引了国内外研究者的广泛关注^[4]。

1999年,Bath大学成功研制出了第一根HC-PBGF^[5],为了保证严格的周期性包层结构,制作过程中采用了较小的空气填充率,光纤损耗很高(100 dB/m),并不符合研究者们希望通过HC-PBGF获得超低损耗的初衷。2003年,康宁公司通过将包层空气孔填充率提升到90%,从而将HC-PBGF的光纤损耗有效地降到了13 dB/km^[6],但该损耗值仍然远远高于人们的预期。由于光纤损耗是阻碍HC-PBGF应用发展的最大障碍,因此,近年来关于HC-PBGF的研究主要围绕在降低光纤损耗上。通过不断优化结构,提升制备工艺水平,截至目前,HC-PBGF的损耗已经降到了1 dB/km的量级^[1]。但理论上,HC-PBGF的最低损耗应低于传统的单模光纤(0.15 dB/km),因此,HC-PBGF的损耗还有很大的下降空间。

降低HC-PBGFs的光纤损耗需要从损耗来源入手。不同于传统光纤,HC-PBGF的损耗主要来源于限制损耗和表面散射损耗。限制损耗取决于光纤结构对纤芯模式的束缚作用,通过合理的结构设计可以将其降低到 10^{-4} dB/km以下,而表面散射损耗是目前限制HC-PBGF损耗降低的瓶颈,在HC-PBGF的光纤损耗中占有较大比重。表面散射损耗,一方面来源于光纤的结构设计。由于纤芯尺寸和纤芯壁厚等因素使得纤芯周围石英壁表面易于出现表面模,芯模与表面模的之间的能量耦合会引起大的表面散射损耗;另一方面来源于光纤的制作工艺。在制作过程中由于热力学原因引入的石英壁的表面粗糙、纵向的不均匀性等,使得分布在石英壁和空气交

界面表面的能量发生散射,从而产生散射损耗,只能通过改进制作工艺来尽量减小表面粗糙所造成的损耗。由此可见,要想突破HC-PBGF的损耗瓶颈,需要从优化结构设计和改进制作工艺两方面入手,而改进HC-PBGF的制作工艺还有很长的路要走。

文中从损耗来源入手,以19芯PBGF为例,采用有限元方法分析了光纤结构参数对限制损耗和表面散射损耗的影响,探究光纤结构参数与光纤损耗之间的关联性,为进一步降低HC-PBGF的光纤损耗提供了理论指导。

1 HC-PBGF的损耗来源

光纤损耗来源于光纤对能量的吸收、辐射和散射。对于HC-PBGF来说,光纤中的能量主要集中在空芯中传输,而非在介质材料中传输,因此,材料的吸收损耗可以忽略。辐射损耗可以通过光纤结构对纤芯能量的限制能力来表示,即光纤的限制损耗,可以表示为^[7-8]:

$$CL = -\frac{20}{\ln 10} \text{Im}(\beta) = \frac{20}{\ln 10} k_0 \text{Im}(n_{\text{eff}}) \quad (1)$$

式中: k_0 为真空中的波数; n_{eff} 为光纤对应模式的有效折射率。

在HC-PBGF中,散射损耗可以分为瑞利散射损耗和表面散射损耗。由于HC-PBGF传输过程中,分布在介质中的能量非常少,相比传统光纤,瑞利散射的影响可以大大降低。但是,光纤纤芯与包层的交界面上存在石英层,这些交界面的表面粗糙度以及其在传输方向上的纵向不均匀性使得分布在石英壁表面的能量发生散射,由此引起的表面散射损耗成为HC-PBGF传输过程中不可忽略的损耗因素,这也是目前限制其损耗进一步降低的关键因素。HC-PBGF的表面散射损耗可以用归一化的表面电场强度来衡量:

$$\alpha_{\text{sc}} (\text{dB/km}) = \eta \times F (\mu\text{m}^{-1}) \quad (2)$$

式中: η 为修正因子,在1550 nm处的经验值为300; F 为归一化的表面电场强度,可以表示为^[9]:

$$F = \left(\frac{\epsilon_0}{\mu_0} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{\oint_{\text{holes perimeter}} |E|^2 dl}{\iint_{\text{cross section}} E \times H^* dS} \quad (3)$$

式中： ϵ_0 和 μ_0 分别为真空中的介电常数和磁导率； E 和 H 分别为交界面处的电场强度和磁场强度。

2 结构参数对光纤损耗的影响

2.1 HC-PBGF 的结构参数

根据形成空芯的空气孔个数的多少,HC-PBGF 可以分为 3 芯、7 芯、19 芯、37 芯等。图 1 所示为 19 芯 HC-PBGF 的结构图。在理论仿真中,为了更接近实际,通常采用具有倒圆角的六边形来表示 HC-PBGF 的空气孔结构。图 1 中 D_c 、 D_1 、 D_2 分别为纤芯、最内圈空气孔内侧和包层空气孔的倒圆角直径, Λ 和 D 分别为孔间距和包层空气孔直径, R_c 为圆心到右侧第一个空气孔内壁的距离, t 为纤芯壁厚。文中采用有限元方法,结合完美匹配层边界条件,分析结构参数对光纤损耗的影响。结构参数设置为: $\Lambda=5 \mu\text{m}$, $D/\Lambda=0.98$, $D_c/D=0.7$, $D_1/D=0.4$, $D_2/D=0.6$, $t=T(\Lambda-D)$, $T=0.5$,包层空气孔层数 $N=6$,石英折射率 $n=1.444$ 。

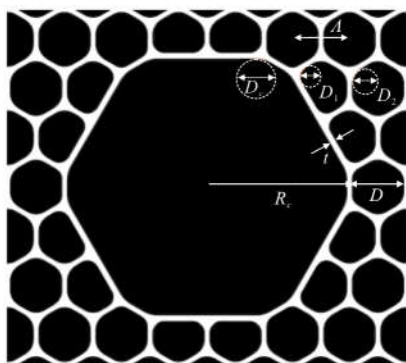


图 1 19 芯 HC-PBGF 的结构示意图

Fig.1 Cross section of a 19 cell HC-PBGF

2.2 包层结构参数对光纤损耗的影响

2.2.1 包层空气孔层数对损耗的影响

图 2 给出了当包层空气孔层数 N 分别为 5、6、7 时,光纤损耗随归一化波长的变化。由图可知,包层空气孔层数的增加可以有效地降低光纤的限制损耗,但对光纤的表面散射损耗并没有明显的影响。在

实际制作中,HC-PBGF 的包层空气孔层数通常选取为 6 层,既能获得足够低的限制损耗,又能避免多层空气孔造成的制作工艺复杂。

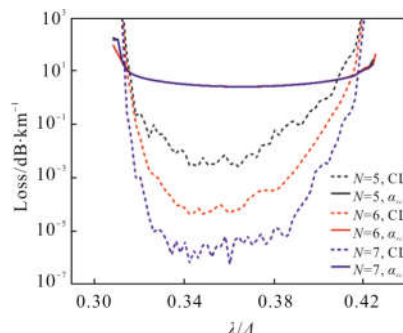


图 2 包层空气孔层数对光纤损耗的影响

Fig.2 Layer of air holes as a function of fiber loss

2.2.2 包层空气孔占空比对光纤损耗的影响

由图 3 可知,包层空气孔占空比越大,光纤的损耗越低。当空气孔占空比 D/Λ 从 0.92 增加到 0.98 时,光纤的限制损耗下降了 7 个数量级,而光纤的表面散射损耗仅从 6.5 dB/km 下降到 3 dB/km,空气孔占空比增加对降低限制损耗的作用远远大于对表面散射损耗的影响。此外,HC-PBGF 的传输带宽也随着空气孔占空比的增大而增大,传输带宽的中心波长也随之向短波长移动,由此可知,空气孔占空比越

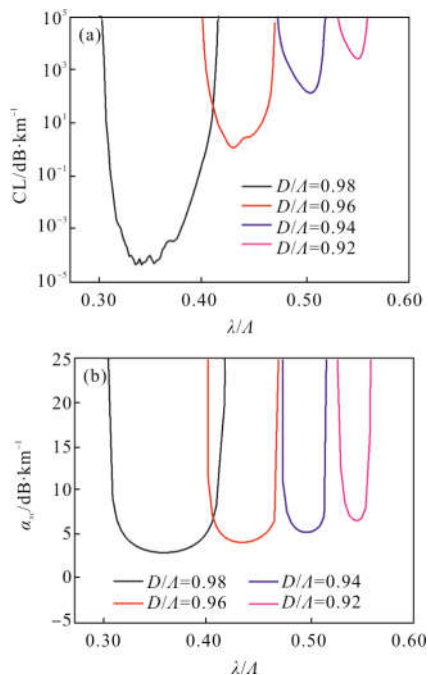


图 3 空气孔占空比对限制损耗(a)和表面散射损耗(b)的影响

Fig.3 Confinement loss(a) and surface scattering loss(b) as a function of air filling fraction

大,越有利于实现 HC-PBGF 的宽带低损耗传输。因此,在实际制作中,需要尽可能保证大的空气孔占空比,通常空气孔占空比应大于 0.96。

2.2.3 包层空气孔倒圆角直径对光纤损耗的影响

图 4 为不同空气孔倒圆角直径对应的光纤结构示意图,图 5 为包层空气孔倒圆角直径与包层空气孔直径比值 D_2/D 取值分别为 0.2、0.4、0.6 和 0.8 时,对应的光纤限制损耗和表面散射损耗。结合图 4 中不同倒圆角直径对应的光纤结构可知,倒圆角直径越大,包层空气孔越接近于圆形,光纤的损耗越小,传输带宽越宽。虽然空气孔倒圆角直径变化对光纤的表面散射损耗没有明显影响,但从图 5(b)中可以发现,当 D_2/D 取值为 0.2、0.4 和 0.8 时,在传输带宽内,都存在表面散射损耗的明显增大点。该点损耗

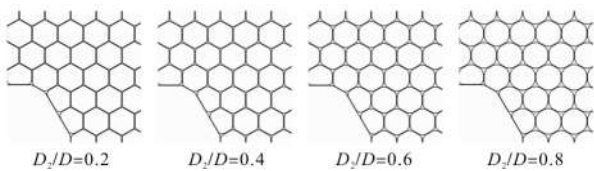


图 4 不同空气孔倒圆角直径对应的空芯光子带隙光纤结构示意图

Fig.4 Cross sections of HC-PBGFs with different fillet diameters

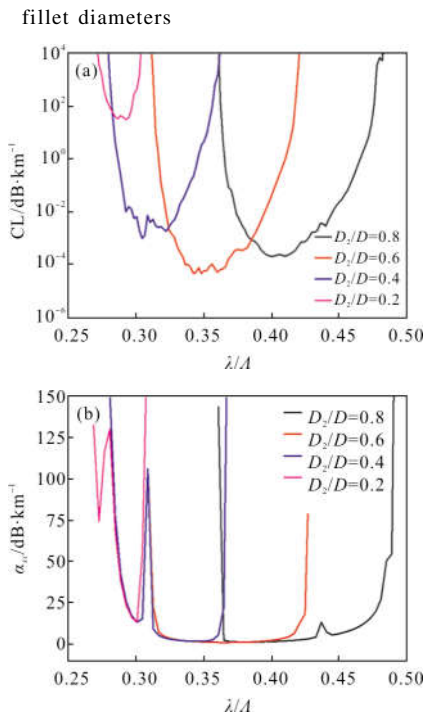


图 5 不同空气孔倒圆角直径对应的光纤限制损耗(a)和表面散射损耗(b)

Fig.5 Confinement loss(a) and surface scattering loss(b) with different fillet diameters

的增大是由于芯模和包层模的耦合。因此在实际制作中,应尽量控制包层的充气气压,使得 D_2/D 的取值在 0.6 附近,避免包层空气孔过度膨胀,产生类六边形的形变。

2.3 纤芯结构参数对损耗的影响

2.3.1 纤芯壁厚对损耗的影响

纤芯壁厚 t 定义为与空气孔间距和空气孔直径有关的函数,表示为 $t=T(\Lambda-D)$,图 6 给出了当 T 值为 0.5,1 和 1.5 时对应的限制损耗与表面散射损耗。由图 6 可知,随 T 值增大,纤芯壁厚增加,光纤的限制损耗也有所增加,更重要的是,光纤的传输带宽变窄。由图 6(b)中表面散射损耗的变化曲线(实线)可知,在波长 1540~2120 nm 的范围内,当 $T=0.5$ 时,光纤存在一个带宽为 580 nm 的低损耗传输窗口,当 $T=1$ 时,整个波长范围被划分为带宽 240、340 nm 的两个低损耗传输窗口,当 $T=1.5$ 时,整个波长范围被

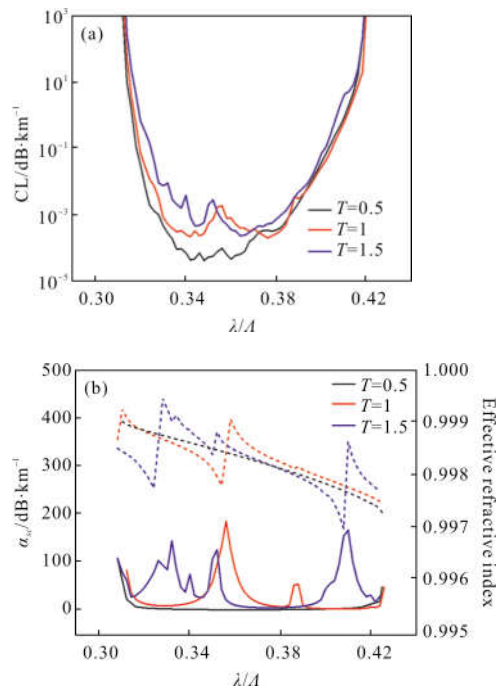


图 6 不同 T 值对应的光纤限制损耗(a)和表面散射损耗(b)

Fig.6 Confinement loss(a) and surface scattering loss(b) as a function of T

划分为四个传输窗口,每个传输窗口的带宽更窄。这是由于随着纤芯壁厚的增加,芯模与表面模之间的耦合加强,当芯模的能量向表面模耦合时,光场的分布就会扩散到芯壁和包层中,由于芯壁和包层的等效折射率大于 1,因此,在表面散射损耗急剧增大的

波长处,模式的有效折射率也会突然增大,如图 6(b)所示,有效折射率的变化曲线(虚线)侧面说明了光纤损耗及传输带宽的变化。为了保证 HC-PBGF 的有效带宽,考虑制作工艺的可行性, T 的最佳取值范围应该在 0.3~0.6 之间,目前在 HC-PBGF 的设计和制作中, T 的通常取值为 0.5。

2.3.2 纤芯尺寸对损耗的影响

在实际制作过程中,纤芯尺寸受充气气压的影响会产生形变。充气气压过大,纤芯会发生扩张,挤压最内圈空气孔,而气压过小,纤芯受最内圈空气孔的挤压会变小。HC-PBGF 的纤芯大小的变化可以通过定义纤芯扩张系数 E 来表示。假设包层结构参数不变,纤芯大小 R_c 与扩张系数 E 的关系可以表示为 $R_c=(1+E)(3A-D)/2$ 。如图 7 所示,当 $E>0$ 时代表纤芯发生扩张,最内圈空气孔受纤芯的挤压变小;当 $E<0$ 时代表纤芯受最内圈空气孔挤压而缩小,最内圈空气孔变大;当 $E=0$ 时,纤芯既没有扩张也没有压缩。

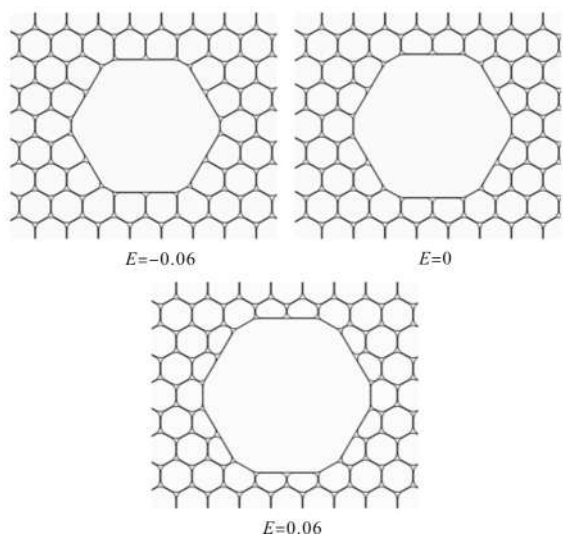


图 7 不同 E 值对应的空芯光子带隙光纤结构示意图

Fig.7 Cross sections of HC-PBGF with different value of E

图 8 给出了不同 E 值对应的光纤限制损耗(虚线)和表面散射损耗(实线)。当 E 值增大,光纤损耗增大,这是由于随着光纤纤芯变大,结构对能量的束缚作用减弱,不仅限制损耗增大,而且芯模与表面模更容易发生耦合,导致表面模更容易出现。当 $E=0.09$ 时,光纤的限制损耗和表面散射损耗都明显增加,结合图 9 中给出的基模模场分布,可以更直观地发现,在 1.6~2 μm 的波长范围内,纤芯壁周围出现

了明显的表面模,并且基模模场分布不是标准的圆形,而是发生了椭圆形的形变,使得基模与表面模更容易发生耦合。由此可知,实际制作中应严格控制纤芯的尺寸,避免充气过高使得扩张系数变大,引起高的光纤损耗。

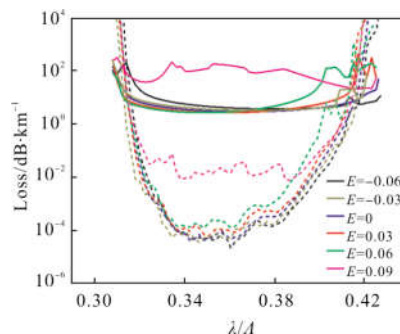


图 8 不同 E 值对应的光纤限制损耗和表面散射损耗

Fig.8 Confinement loss(a) and surface scattering loss(b) as a function of E

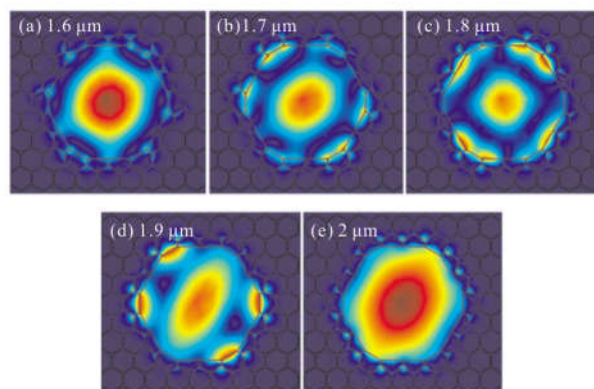


图 9 当 $E=0.09$ 时,光纤基模模场分布图

Fig.9 Mode field distribution of fundamental mode when $E=0.09$

3 结论

采用有限元方法系统分析了光纤结构参数对限制损耗和表面散射损耗的影响。理论分析结果表明,包层结构参数对光纤限制损耗以及传输带宽有着明显影响,通过增大包层空气孔层数、包层空气孔占比以及包层空气孔的倒圆角直径可以有效降低光纤的限制损耗同时增大光纤的低损耗传输带宽,而纤芯结构参数会直接影响芯模和表面模的耦合,从而对表面散射损耗有着明显影响。由于纤芯壁厚增加以及纤芯扩张系数增大都会导致芯模与表面模的耦合增强,增大光纤表面散射损耗,因此在实际制作

中,应采用较薄的纤芯壁厚同时避免纤芯扩张。但受光纤结构的限制,19 芯 HC-PBGF 的光纤损耗难以降到 1 dB/km 以下,要想进一步降低光纤损耗,只能通过去掉更多的空气孔,形成更大的空芯结构。上述研究结论同样适用于 7 芯和 37 芯 HC-PBGF 的基本结构。

参考文献:

- [1] Richardson D J, Wheeler N V, Chen Y, et al. Hollow core fibres and their applications [C]//Optical Fiber Communication Conference, 2017: Tu3H.1.
- [2] Yu Taoying, Liu Xuesong, Andrey D, et al. Femtosecond pulse compression using negative - curvature hollow-core fibers [J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(1): 75-87. (in Chinese)
- [3] Ding Wei, Wang Yingying, Gao Shoufei, et al. Theoretical and experimental investigation of light guidance in hollow-core anti-resonant fiber [J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67(12): 124201. (in Chinese)
- [4] Wang Xin, Lou Shuqin, Lian Zhenggang. Experimental research on the dispersion property of hollow core photonic bandgap fiber [J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(19): 194212. (in Chinese)
- [5] Cregan R F, Mangan B J, Knight J C, et al. Single-mode photonic band gap guidance of light in air [J]. *Science*, 1999, 285(5433): 1537-1539.
- [6] Smith C M, Venkataraman N, Gallagher M, et al. Low-loss hollow-core silica/air photonic bandgap fibre [J]. *Nature*, 2003, 424(6949): 657-659.
- [7] Bai Xiuli, Chen Heming, Zhang Lingfei. Circular photonic crystal fiber supporting orbital angular momentum modes transmission [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(2): 0222002. (in Chinese)
- [8] Yan Shibo, Lou Shuqin, Zhao Tongtong, et al. Polarization splitter based on metal-decorated microstructure fiber [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(5): 0522001. (in Chinese)
- [9] Fokoua E N, Poletti F, Richardson D J. Analysis of light scattering from surface roughness in hollow-core photonic bandgap fibers [J]. *Optics Express*, 2012, 20(19): 20980-20991.