

空芯光子带隙光纤散射损耗特性及结构优化研究

宋镜明 孙康* 徐小斌

北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100191

摘要 针对空芯光子带隙光纤内部结构提出了一种准确的建模方法,使用全矢量有限元法研究了纤芯结构变化对光纤散射损耗的影响,对不同纤芯壁厚度以及不同纤芯半径的空芯光子带隙光纤进行了仿真计算,并以归一化分界面场强表征散射损耗的大小。计算结果表明,纤芯壁相对厚度 $T_c \approx 4$ 时,散射损耗可以得到较大的降低,同时散射损耗也会随着纤芯半径的增大而减小。通过对纤芯结构进行优化,理论上在1.5~1.56 μm 波段范围内散射损耗可比现有光纤减小50%。

关键词 光纤光学;空芯光子带隙光纤;有限元法;散射损耗;归一化分界面场强;结构设计

中图分类号 TN253

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.1105003

Scattering Loss Analysis and Structure Optimization of Hollow-Core Photonic Bandgap Fibers

Song Jingming Sun Kang Xu Xiaobin

School of Instrumentation Science and Opto-Electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China

Abstract An accurate modeling method for the internal structure of hollow-core photonic bandgap fiber is proposed, and the effect of core structure on scattering loss is studied by full-vector finite element method. The fibers with different core walls thicknesses and different core radii are simulated, and the normalized interface field intensity is used to characterize the scattering loss. Calculation results show that scattering loss can be largely reduced with the relative core wall thickness $T_c \approx 4$. Furthermore, scattering loss decreases with the increase of core radius. With optimized core structure design, the scattering loss can be further reduced down to 50% of the present level in theory within the wavelength range from 1.5 μm to 1.56 μm .

Key words fiber optics; hollow-core photonic bandgap fiber; finite element method; scattering loss; normalized interface field intensity; structure design

OCIS codes 060.5295; 060.2310; 060.2400; 060.2280

1 引言

自1999年空芯光子带隙光纤(HC-PBF)出现以来^[1],这一新型光纤以其独特的光学特性受到了越来越多的关注^[2-4]。不同于传统光纤的全内反射导光方式,空芯光子带隙光纤利用光子带隙原理实现光的传输^[5],其特殊的导光机理可使光在低折射率的空气中传播,此外,空芯光子带隙光纤通常采用无掺杂的二氧化硅材料制作。因此,空芯光子带隙光纤与传统全内反射光纤相比具有非线性度低、磁敏感度低、温度稳定性好、辐射敏感度低以及理论上的低损耗等特点^[3],从而在光纤陀螺应用中具有潜在的优势。目前,国内外已有空芯光子带隙光纤在光纤陀螺中应用方面的研究^[6-10]。尽管空芯光子带隙光纤存在诸多优点,但目前这一光纤仍具有较大的损耗。对于NKT公司的HC-1550-02型光纤来说,在1550 nm处损耗实测为25 dB/km,远大于普通光纤约0.15 dB/km的损耗。较大的损耗会给光纤陀螺带来信噪比(SNR)降低、精度降低等问题,严重制

收稿日期: 2015-06-04; 收到修改稿日期: 2015-07-01

基金项目: 国家自然科学基金(61205077)

作者简介: 宋镜明(1974—),男,博士,讲师,主要从事光纤传感方面的研究。Email: saskm@163.com

*通信联系人。E-mail: sunk4195@live.com

约空芯光子带隙光纤在光纤陀螺中的应用。

空芯光子带隙光纤的损耗主要有两种,分别是限制损耗^[11]以及散射损耗^[12]。对于目前的空芯光子带隙光纤来说,限制损耗通常低于0.1 dB/km^[13],与实际约25 dB/km的损耗相比低3个数量级,所以散射损耗是目前光纤具有较大损耗的主要原因^[14]。空芯光子带隙光纤的散射损耗主要是光在空气-玻璃分界面上由于表面粗糙发生散射而产生的损耗,受限于工艺,表面粗糙无法消除,因此散射损耗也无法消除^[12,15-16]。降低散射损耗的方法主要有两种,一种是改进工艺,减小分界面粗糙度^[12];另一种是改变纤芯结构减小分界面光强^[13,17-18]。对工艺和材料来说,改进难度很大,因此减小散射损耗的方法主要是对纤芯结构进行改变。目前对于空芯光子带隙光纤损耗的研究并没有考虑具体应用需求,本文针对光纤陀螺应用设计空芯光子带隙光纤,使其在相对较窄的带宽范围内实现低损耗。

本文利用全矢量有限元法,在空芯光子带隙光纤理想结构的基础上,分析了纤芯壁厚度以及纤芯半径对散射损耗的影响,并给出了具体的变化关系。以计算结果为依据,针对光纤陀螺应用优化了纤芯壁以及纤芯半径的结构,同时与现有光纤仿真结果进行对比预计了这一结构的散射损耗特性。分析结果可为空芯光子带隙光纤的生产提供一定的依据。

2 基本理论及仿真模型

散射损耗是由空气-玻璃分界面上的表面粗糙引起的光散射造成的。在光纤拉制过程中,熔融玻璃表面存在热激发表面毛细波(SCWs),随着光纤的冷却,这些表面毛细波也会固定在玻璃表面,从而造成固有的表面粗糙^[14]。在光纤纤芯传输的光入射到粗糙表面会发生散射,引起光纤的散射损耗。对空芯光子带隙光纤来说,散射损耗无法具体计算,只能通过其他参量来间接表示^[12]。由于散射损耗的大小与空气-玻璃分界面上的模场强度有关,因此通常使用分界面上的归一化场强 F 来表征散射损耗的大小^[12,14,18-19]:

$$F = \left(\frac{\epsilon_0}{\mu_0} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{\oint_{\text{hole perimeter}} ds |\mathbf{E}|^2}{\iint_{\text{cross-section}} dS (\mathbf{E} \times \mathbf{H}) \cdot \mathbf{z}}, \quad (1)$$

式中 \mathbf{E} 和 \mathbf{H} 分别是传输模式的电场和磁场强度, \mathbf{z} 是沿光纤轴向的单位矢量。研究表明,归一化场强 F 与散射损耗成正比^[12-13,19], F 越大表明散射损耗就越大。本文通过计算 F 的大小来表示光纤的散射损耗特性。

本文选用7单元芯(7 cell core)空芯光子带隙光纤,以HC-1550-02型光纤为基础建立光纤模型。对空芯光子带隙光纤来说,其光子带隙主要取决于包层光子晶体结构,纤芯壁厚度以及纤芯半径的变化对带隙影响较小。因此为了不改变光纤的带隙,在HC-1550-02型光纤的基础上,保持其包层结构参数不变,对纤芯壁厚度以及纤芯半径进行优化分析,以降低光纤的损耗。研究选用光纤的电子显微镜(SEM)图像如图1所示,依据电镜图像建立了图2所示的理想光纤模型,其各结构参数见表1,其中 d 为包层空气孔直径、 Λ 是包层空气孔间距、 d_c 为六边形空气孔圆角直径、 R_c 为纤芯半径、 r_c 为纤芯圆角、 d_p 为五边形空气孔圆角直径、 t_p 为最内层五边形空气孔对应纤芯壁厚、 t_h 为最内层六边形空气孔对应纤芯壁厚。模型中忽略了实际光纤中存在的不规则空气孔变形。

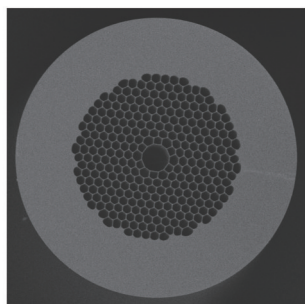


图1 空芯光子带隙光纤端面电镜扫描图像
Fig.1 SEM image of hollow-core photonic bandgap fiber

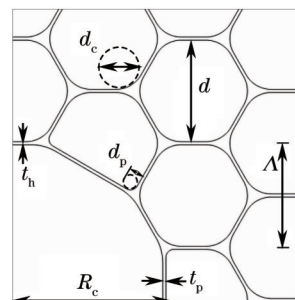


图2 空芯光子带隙光纤模型结构参数示意图
Fig.2 Sketch map of geometric parameters

表 1 空芯光子带隙光纤几何结构参数表

Table 1 Geometric parameters of hollow-core photonic bandgap fiber

Parameter	Λ	d	d_c	t_h	t_p	d_p	R_c
Value / μm	4	3.892	2.21	0.108	0.116	0.459	5.82

区别于以往的仿真模型,模型中纤芯壁由 t_p 、 t_h 两个参数定义。在空芯光子带隙光纤拉制过程中,部分环绕纤芯的空气孔被压缩为五边形,如图 3 所示,从而使六边形的两条边合并为五边形中的一边,导致五边形空气孔与纤芯相接的壁厚 t_p 增大。考虑到质量守恒,并且由于纤芯毛细管对纤芯壁厚度贡献一致, t_p 与 t_h 满足关系: $t_p = t_h \cdot (2\sqrt{3} + 3)/6$ 。

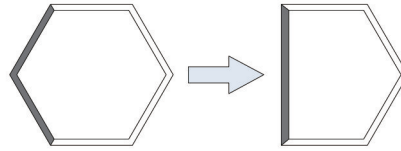


图 3 空气孔形变示意图

Fig.3 Sketch map of air core deformation

考虑到光纤拉制工艺,纤芯壁厚度变化量是一致的,因此在研究中定义相对纤芯壁厚度 T_c ,用这一参量的变化代指纤芯壁厚的变化:

$$T_c = \frac{t_h}{\Lambda - d}, \quad (2)$$

式中 $\Lambda - d$ 为包层空气孔的壁厚。 $T_c=1$ 时纤芯壁厚度与理想结构相同, T_c 越大表示纤芯壁越厚。

为了在 7 单元芯光纤的基础上改变纤芯半径,模型中通过对围绕纤芯的第 1 圈空气孔进行伸缩来控制纤芯半径的大小。定义第 1 圈空气孔伸缩量 e ,则对应纤芯半径的变化量为

$$\Delta R_c = \frac{(1 - e) \cdot d}{\sqrt{3}}, \quad (3)$$

式中 $e>1$ 表示第 1 圈空气孔伸长,即纤芯半径减小; $e<1$ 表示第 1 圈空气孔被压缩,同时纤芯半径增大。图 4 为伸缩量 e 分别为 0.7、1、1.3 下的光纤结构,可以看到光纤纤芯随 e 增大而减小。

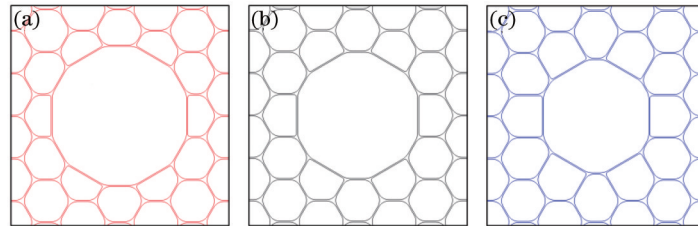


图 4 不同伸缩量 e 下光纤结构示意图。(a) $e=0.7$; (b) $e=1$; (c) $e=1.3$

Fig.4 Fiber structures with different expansion coefficients e . (a) $e=0.7$; (b) $e=1$; (c) $e=1.3$

3 仿真结果及分析

3.1 纤芯壁厚度对散射损耗特性的影响

针对光纤陀螺应用,需要光纤的工作波长位于 $1.53 \mu\text{m}$ 附近,带宽范围不大于 60 nm 。为了节约计算资源以及计算时间,只针对 $1.53 \mu\text{m}$ 附近 120 nm 的波长范围($1.47 \sim 1.59 \mu\text{m}$)进行计算。在纤芯半径未改变($e=1$)的情况下,分析了纤芯壁厚度对散射损耗特性的影响。计算时令相对纤芯壁厚度在较大的范围内变化($0.2 \leq T_c \leq 5$)。

图 5 为不同纤芯壁厚度下基模的归一化分界面场强 F 与波长的关系,图中每条水平线都对应不同的纤芯壁厚度,也就是表示不同的光纤结构。深色区域表示 F 较小,即光纤的散射损耗较小;浅色部分表明此处基模与表面模之间发生了交叉耦合,使 F 显著升高,从而增大了光纤的散射损耗。

随着纤芯壁厚度的变化,归一化分界面场强会随之发生改变。由图 5 可知,纤芯壁相对厚度主要存在 3 个取值区域使 F 较低,分别位于 $T_c \approx 0.5$ 、 $T_c \approx 2.6$ 和 $T_c \approx 4.4$ 附近。当相对纤芯壁厚度 $T_c \approx 0.5$ 时,归一化分界面场强 F 较小,并且在较宽的波段范围内基模与表面模没有发生交叉耦合现象。当纤芯壁较厚时($T_c \approx 4.4$),引

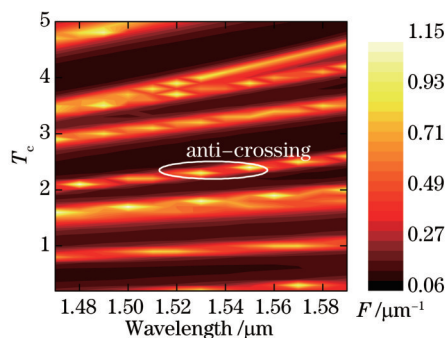


图5 F 系数与波长以及纤芯壁厚度的关系

Fig.5 Relationship between F factor, wavelength and normalized core wall thickness

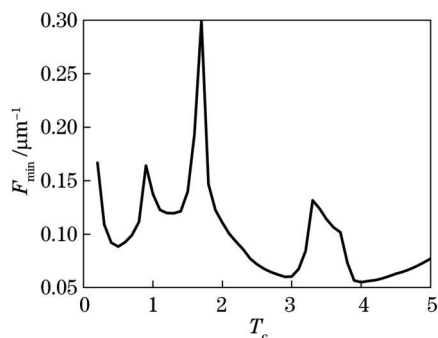


图6 F_{\min} 与相对纤芯壁厚度的关系

Fig.6 Relationship between F_{\min} and normalized core wall thickness T_c

入了较多的表面模,但这一结构同样能够降低分界面场强,进而降低散射损耗。对于不同的纤芯壁厚度 T_c ,可以得到计算波长范围内的最小分界面场强 F_{\min} ,如图6所示。可见与薄纤芯壁结构相比,较厚的纤芯壁能够实现更低的分界面场强,这一结果与文献[17]中所述一致。

图7为 $T_c=0.5、2.6、4.4$ 时归一化分界面场强与波长的关系。当 $T_c=0.5$ 时, F 最小约为 $0.088 \mu\text{m}^{-1}$; 而当 $T_c=4.4$ 时, F 最小为 $0.06 \mu\text{m}^{-1}$, 约为 $T_c=0.5$ 时的 68%。此外当 $T_c=0.5$ 时, 在约 110 nm 的波段范围内 F 均小于 $0.1 \mu\text{m}^{-1}$, 因此设置 $F < 0.1 \mu\text{m}^{-1}$ 为阈值条件计算不同纤芯壁厚度下的工作带宽(以 $1.53 \mu\text{m}$ 为中心波长), 如图8所示。可见 $T_c \approx 0.5、2.6、4.4$ 这3个区域都存在较大的工作带宽, 并且当 $T_c \approx 0.5$ 时工作带宽最大, $T_c \approx 4.4$ 时工作带宽最小。结果说明增大纤芯壁厚度可以实现更低的归一化分界面场强, 但同时提供的工作带宽较小。

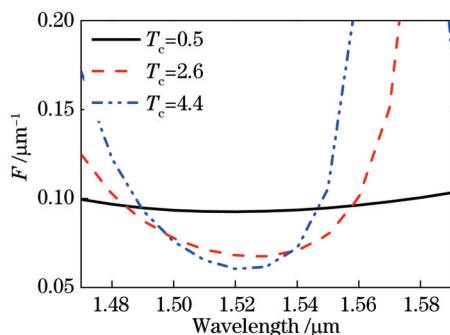


图7 不同纤芯壁厚度下 F 系数与波长的关系曲线

Fig.7 Relationship between F factor and wavelength under different core walls thicknesses

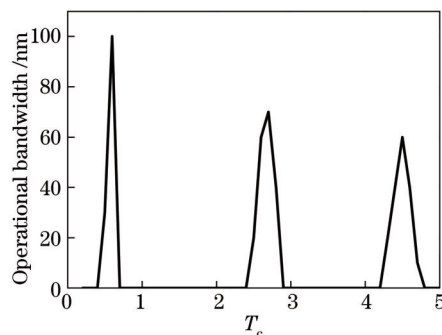


图8 纤芯壁厚度与工作带宽的关系曲线

Fig.8 Relationship between operational bandwidth and core wall thickness

3.2 纤芯半径对散射损耗特性的影响

保持其他各结构参数不变,在纤芯壁厚度为 4.4 的基础上,分析了纤芯半径对归一化分界面场强的影响。计算时通过改变第 1 圈空气孔的伸缩量 e 来改变纤芯半径的大小。不同伸缩量下 F_{\min} 的变化如图 9 所

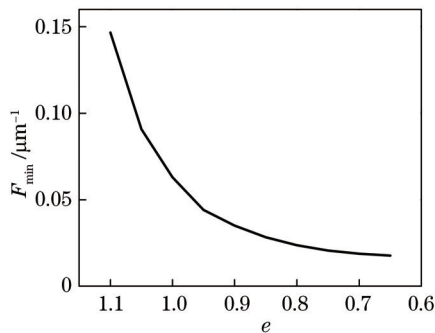


图9 F_{\min} 与伸缩量 e 的关系

Fig.9 Relationship between F_{\min} and expansion coefficient E

示,结果表明 F_{\min} 会随着伸缩量的减小(纤芯半径的增大)而减小。图中 $e=1$ 对应初始纤芯半径,当 e 增大到 1.1,即纤芯半径减小 $0.225 \mu\text{m}$ 时, F_{\min} 与初始结构相比增大了约 2.5 倍,而当 e 减小至 0.7(纤芯半径增大至 $6.495 \mu\text{m}$)时, F_{\min} 减小至初始结构的 30%。此外,当 e 小于 0.7 时, F_{\min} 的变化趋于平稳,此时纤芯直径的进一步增大对 F_{\min} 的影响逐渐减弱。上述结果说明纤芯半径的改变会对光纤分界面场强产生较大的影响,并且当纤芯半径增大到一定程度之后,对分界面场强的影响逐渐减弱。

3.3 纤芯结构优化设计

上述分析表明,纤芯壁厚度以及纤芯半径显著地影响着光纤的分界面场强,从而影响着散射损耗。为了降低散射损耗,需选择合适的纤芯壁厚度以及纤芯半径。依据分析结果,令第 1 圈伸缩量 $e=0.7$ 以确定纤芯半径,此时纤芯半径 $R_c=6.495 \mu\text{m}$ 。由于存在多个纤芯壁厚度范围使 F 较低,因此在确定纤芯半径的基础上,进一步计算了纤芯壁厚度对归一化分界面场强的影响,以确定合适的纤芯壁厚度。计算结果如图 10 所示。

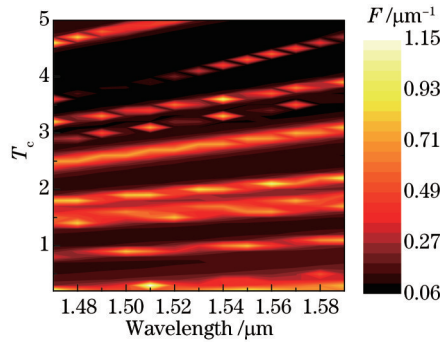


图 10 F 系数与波长以及纤芯壁厚度的关系

Fig.10 Relationship between F factor, wavelength and normalized core wall thickness

与纤芯半径未增大时相似,在 $T_c \approx 0.6$ 、 $T_c \approx 2.3$ 以及 $T_c \approx 4.5$ 附近存在归一化分界面场强较小的区域。将不同纤芯壁厚度 T_c 下 F_{\min} 的变化关系表示在图 11 中。与纤芯半径未发生变化($e=1$)时相比,在纤芯壁较薄时 ($T_c \approx 0.5$),分界面场强没有发生明显变化;当纤芯壁较厚时 ($T_c > 4$),分界面场强极大地降低,可减小至之前的 30% 以下。为了降低光纤损耗,纤芯壁厚取值应位于 $T_c \approx 4$ 附近。

根据计算结果,为使归一化分界面场强在 $1.53 \mu\text{m}$ 附近较小,选取纤芯壁相对厚度 $T_c=4.6$,此时 F 与波长的关系如图 12 所示。由图可见在 $1.53 \mu\text{m}$ 处 F 取值为 $0.022 \mu\text{m}^{-1}$,并且在 $1.53 \mu\text{m}$ 附近 60 nm 的波长范围内 ($1.5 \sim 1.56 \mu\text{m}$) F 小于 $0.04 \mu\text{m}^{-1}$ 。此外, F 在 $1.48 \mu\text{m}$ 以及 $1.58 \mu\text{m}$ 附近急剧升高,表明此处表面模与基模发生耦合,这一耦合位置位于所需的波段范围 ($1.53 \mu\text{m} \pm 0.3 \mu\text{m}$) 之外。通过对实际光纤建模仿真,同样可以得出 F 与波长的关系。可见通过优化纤芯结构, $1.53 \mu\text{m}$ 处的归一化分界面场强 F 可降至实际光纤的 $1/4$,并且在 $1.5 \sim 1.56 \mu\text{m}$ 波长范围内 F 取值小于实际光纤的 $1/2$ 以下。由于散射损耗与分界面场强成正比,因此这一结构相对于现有光纤可极大地降低散射损耗,从而降低光纤的传输损耗。

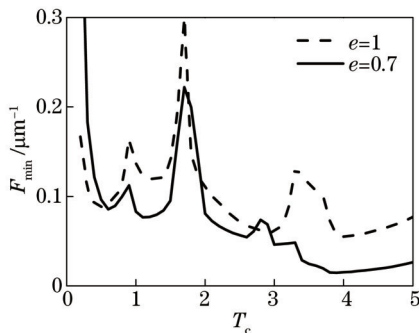


图 11 F_{\min} 与纤芯环厚度 T_c 的关系

Fig.11 Relationship between F_{\min} and normalized core wall thickness T_c .

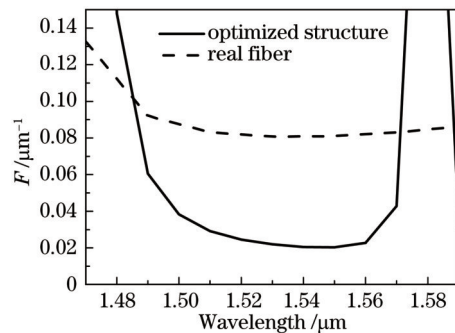


图 12 归一化分界面场强 F 与波长的关系 ($T_c=4.6$)

Fig.12 Relationship between F factor and wavelength ($T_c=4.6$)

4 结 论

应用全矢量有限元法对空芯光子带隙光纤的损耗特性进行了分析,在HC-1550-02型空芯光子带隙光纤的基础上分析了纤芯壁厚度以及纤芯半径对散射损耗的影响。结果表明,纤芯结构的改变会极大地影响分界面场强,从而影响光纤的散射损耗。当纤芯壁相对厚度 $T_c \approx 4$ 时,分界面场强有明显降低,同时纤芯半径的增加也会减小分界面场强,并且随着纤芯半径的增大对分界面场强的影响会逐渐减弱。通过对纤芯结构进行优化,令纤芯半径相对于理想结构增大 $0.675 \mu\text{m}$ 、纤芯壁相对厚度 $T_c=4.6$,理论上可在 $1.5\sim 1.56 \mu\text{m}$ 波长范围内将散射损耗降低至实际光纤的50%以下,从而可以极大地减小光纤陀螺所需波段内的损耗。

参 考 文 献

- 1 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.
- 2 Chai Lu, Hu Minglie, Fang Xiaohui, *et al.*. Advances in femtosecond laser technologies with photonic crystal fibers[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(1): 0101001.
柴路, 胡明列, 方晓惠, 等. 光子晶体光纤飞秒激光技术研究进展[J]. *中国激光*, 2013, 40(1): 0101001.
- 3 Huang Chongde, Chen Dijun, Cai Haiwen, *et al.*. Laser frequency stabilization technology based on hollow-core photonics crystal fiber gas cell[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(8): 0802006.
黄崇德, 陈迪俊, 蔡海文, 等. 空芯光子晶体光纤吸收池的激光稳频技术[J]. *中国激光*, 2014, 41(8): 0802006.
- 4 Wang Haibin, Liu Ye, Wang Jinzu, *et al.*. Preparation of all-fiber low-pressure CO₂ gas cell based on hollow-core photonic crystal fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(7): 0706007.
王海宾, 刘晔, 王进祖, 等. 光纤型空芯光子晶体光纤低压CO₂气体腔的制备[J]. *光学学报*, 2013, 33(7): 0706007.
- 5 Poletti F, Petrovich M N, Richardson D J. Hollow-core photonic bandgap fibers: Technology and applications[J]. *Nanophotonics*, 2013, 2(5-6): 315-340.
- 6 Kim H K, Digonnet M J F, Kino G S. Air-core photonic-bandgap fiber-optic gyroscope[J]. *J Lightwave Technol*, 2006, 24(8): 3169-3174.
- 7 Digonnet M, Blin S, Kim H K, *et al.*. Sensitivity and stability of an air-core fibre-optic gyroscope[J]. *Measurement Science & Technology*, 2007, 18(10): 3089-3097.
- 8 Blin S, Kim H K, Digonnet M J F, *et al.*. Reduced thermal sensitivity of a fiber-optic gyroscope using an air-core photonic-bandgap fiber[J]. *J Lightwave Technol*, 2007, 25(3): 861-865.
- 9 Lloyd S W, Dangui V, Digonnet M J, *et al.*. Measurement of reduced backscattering noise in laser-driven fiber optic gyroscopes[J]. *Opt Lett*, 2010, 35(2): 121-123.
- 10 Xu X, Zhang Z, Zhang Z, *et al.*. Investigation of residual core ellipticity induced nonreciprocity in air-core photonic bandgap fiber optical gyroscope[J]. *Opt Express*, 2014, 22(22): 27228.
- 11 Saitoh K, Koshiba M. Confinement losses in air-guiding photonic bandgap fibers[J]. *IEEE Photonic Technol Lett*, 2003, 15(2): 236-238.
- 12 Roberts P J, Couny F, Sabert H, *et al.*. Ultimate low loss of hollow-core photonic crystal fibres[J]. *Opt Express*, 2005, 13(1): 236-244.
- 13 West J, Smith C, Borrelli N, *et al.*. Surface modes in air-core photonic band-gap fibers[J]. *Opt Express*, 2004, 12(8): 1485-1496.
- 14 Fokoua E N, Poletti F, Richardson D J. Analysis of light scattering from surface roughness in hollow-core photonic bandgap fibers[J]. *Opt Express*, 2012, 20(19): 20980-20991.
- 15 Amezcua-Correa R, Broderick N G, Petrovich M N, *et al.*. Design of 7 and 19 cells core air-guiding photonic crystal fibers for low-loss, wide bandwidth and dispersion controlled operation[J]. *Opt Express*, 2007, 15(26): 17577-17586.
- 16 Amezcua Correa R, Broderick N N, Petrovich M N, *et al.*. Comparison of mode properties of 7 and 19 cells core hollow-core photonic crystal fibers[C]. *Optical Fiber Communication Conference, Optical Society of America*, 2007: OML5.
- 17 Amezcua Correa R, Broderick N G, Petrovich M N, *et al.*. Realistic designs of silica hollow-core photonic bandgap fibers free of surface modes[C]. *Optical Fiber Communication Conference, Optical Society of America*, 2006: OFC1.
- 18 Roberts P, Williams D, Mangan B, *et al.*. Realizing low loss air core photonic crystal fibers by exploiting an antiresonant core surround[J]. *Opt Express*, 2005, 13(20): 8277-8285.
- 19 Fokoua E N, Sandoghchi S R, Chen Y, *et al.*. Accurate loss and surface mode modeling in fabricated hollow-core photonic bandgap fibers[C]. *Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC) 2014, IEEE*, 2014: 1-3.

栏目编辑: 王晓琰