

文章编号: 1001-3806(2016)05-0682-05

PBF 在 1550nm 传输波段受径向压力的影响研究

张雪霞, 刘海霞*, 徐小斌, 高福宇

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

摘要: 为了研究光子带隙光纤在 1550nm 波长下受径向压力的影响, 采用有限元法做仿真计算进行了定量研究, 并通过搭建实验系统对比分析了实测与仿真计算结果的差异。结果表明, 限制损耗随径向压力变化的灵敏度为 $0.00067(\text{dB}/\text{km})/(\text{N}/\text{m})$, 归一化分界面场强 F 参量随径向压力的变化率为 $0.68 \times 10^{-6}/(\text{N}/\text{m})$, 折射率随径向压力的变化率为 $1.0 \times 10^{-8}/(\text{N}/\text{m})$ 。该研究为光子带隙光纤在光纤传感领域的应用提供了一种实验分析途径。

关键词: 光纤光学; 光子带隙光纤; 有限元法; 损耗; 压力

中图分类号: TN253 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2016.05.017

Effect of radial pressure on 1550nm transmission characteristics of photonic bandgap fibers

ZHANG Xuexia, LIU Haixia, XU Xiaobin, GAO Fuyu

(School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: In order to analyze the influence of radial pressure on the characteristics of a photonic bandgap fiber in 1550nm transmission band, both the limiting loss and refractive index of the photonic bandgap fiber caused by the radial pressure were calculated by using finite element method (FEM). In addition, the differences between simulation and measurement were also compared and analyzed through experiments. The results show that FEM sensitivity of limiting loss of photonic bandgap fibers varying with the change of radial pressure is $0.00067(\text{dB}/\text{km})/(\text{N}/\text{m})$, the change rate of the F parameter with the change of radial pressure is $0.68 \times 10^{-6}/(\text{N}/\text{m})$, and the change rate of the refractive index with the change of radial pressure is $1.0 \times 10^{-8}/(\text{N}/\text{m})$. The study about transmission characteristics of photonic bandgap fibers under radial pressure will support an experiment foundation for fiber optical sense in long wavelength band applications.

Key words: fiber optics; photonic bandgap fiber; finite element method; loss; pressure

引言

光子带隙光纤 (photonic bandgap fiber, PBF) 是一种新型的微结构光纤^[1], 其周期性排列的包层空气孔能够产生光子带隙, 从而阻碍特定频率的光在其中传播。纤芯作为周期性结构中的一个缺陷, 会将该频率的光波限制在其中传输^[2], 这一特殊的机理可使光在空气中传输。PBF 具有弯曲敏感度低、非线性度低、磁敏感度低和温度敏感度低等特点^[3], 因此被认为是未来光纤通信和光纤传感领域的首选。但是 PBF 内部为空气孔结构, 受到应力作用时容易产生变形, 引起 PBF 光波传输特性发生变化^[4]。目前国内外许多学者

对 PBF 受到压力作用时其传输光谱的变化进行了研究, 例如 PBF 在受到压力作用时, 其某些频率段的损耗与压力成正比, 且具有较高的灵敏度, 在 633nm 波段其灵敏度为 $2.18 \times 10^{-8} \text{dB}/\text{Pa}$ ^[5], PBF 两个方向的偏振光随着压力的增大偏振方向的角度会发生扭转。以其中一束偏振光波为例, 其扭转的角度随压力变化的灵敏度为 $50^\circ/\text{MPa}$ ^[6]。上述研究主要是针对 PBF 在短波长传输波段的影响进行分析。近年来, 随着 PBF 在陀螺、惯性导航系统、特殊传感等长波长传输波段领域的应用趋向^[7], 其受到压力作用时的传输特性问题也亟待解决。作者结合仿真计算和实验验证, 分析了径向压力对 PBF 在 1550nm 波段的损耗和折射率的影响, 为 PBF 在长波长传输波段的应用奠定基础。

1 仿真计算

选用七单元芯空芯光子带隙光纤, 以 HC-1550-02 型光纤建立仿真模型, 采用 COMSOL 有限元软件对

基金项目: 北京市自然科学基金资助项目(7152089)

作者简介: 张雪霞(1988-), 女, 硕士研究生, 现主要从事空芯光子带隙光纤应力特性的研究。

* 通讯联系人。E-mail: LiuHX08@buaa.edu.cn

收稿日期: 2015-08-17; 收到修改稿日期: 2015-10-17

PBF 的光传输特性进行模拟仿真^[8]。仿真计算过程中,建立的 PBF 的截面几何模型如图 1 所示。为了更精确地模拟实际光纤中的光传输,几何模型完全覆盖光纤的主要结构特征,具体尺寸如表 1 所示。其中各材料参量如表 2 所示。

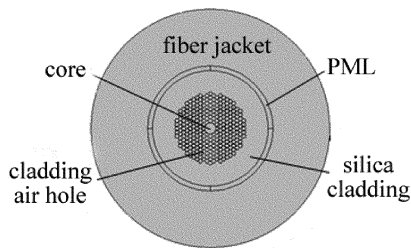


Fig. 1 Simulation structure of photonic bandgap fiber

Table 1 Geometric parameter table of photonic bandgap fiber

structure parameters	fiber diameter $D/\mu\text{m}$	cladding diameter/ μm	cladding hole pitch/ μm	hole diameter/ μm
numerical value	248	130	3.88	3.788

Table 2 Material parameter table of photonic bandgap fiber

name	Young's modulus/GPa	Poisson's ratio	density/ $(\text{g} \cdot \text{m}^{-2})$	refractive index
fiber jacket	0.5	0.37	1091	—
PML (silica)	72.45	0.17	2203	1.444
cladding (silica)	72.45	0.17	2203	1.444
air	—	—	—	1

由于光波主要存在于光纤纤芯和包层空气孔中,在仿真模拟时只将电磁场求解域添加在纤芯和包层

中。光纤属于开放的波导,其模式场分布于无限大空间中,但受计算容量和实际情况的限制,数值计算只能在有限的区域中进行,所以常采用一定的边界条件来模拟截断的无限空间^[9]。本文中选用完美匹配层(perfectly matched layer, PML)这一边界条件,完美匹配层的基本思想是在截断的边界处设置与相邻介质波阻抗完全匹配的介质层,使得入射波无反射地进入完美匹配层并被完全吸收,从而可以计算 PBF 的限制损耗^[10-11]。

PBF 受到 30N/m 径向压力时的仿真变形如图 2a 所示,变形比例为 1500:1。图 2b 为 PBF 在 30N/m 径向压力作用下的基模解。由图可知,当径向压力垂直作用在 PBF 上时,PBF 微结构会产生变形,其基模解也会随之发生变化。由于在实验测量过程中,所加径向压力为 0N/m ~ 10N/m 时,PBF 输出功率没有变化,因此从 10N/m 以上施加径向压力值。为了与实验测量结果进行对比,仿真中施加径向压力值范围为 10N/m ~ 30N/m。

1.1 仿真径向压力对 PBF 损耗的影响

PBF 的损耗主要分为两种:一种是限制损耗,一种为散射损耗。其中限制损耗约占 PBF 总损耗的 1%^[12],与实际损耗相比较小,所以散射损耗为 PBF 的主要损耗。散射损耗目前无法具体计算,只能通过归一化分界面场强 F 参量进行表征,文中利用 F 参量来说明散射损耗随径向压力的变化趋势。

计算径向压力对 PBF 限制损耗的影响时,随着压力的改变,PBF 的结构及其截面面积均会发生改变,从而导致传播常数 β 的变化。利用传播常数的虚部可求得 PBF 的限制损耗 l_c ,具体表示为:

$$l_c = -\frac{20\pi}{\ln 10} 10^6 \text{Im}\beta \text{ (dB/m)} \quad (1)$$

式中, β 为模式传播常数。

在 PBF 中,散射损耗占总损耗的 90% 以上^[12],由于数学计算方法的局限,目前没有办法计算 PBF 的散射损耗数值,只能通过计算 PBF 中归一化分界面场强 F 参量随径向压力的变化关系分析径向压力对 PBF 散射损耗的影响。 F 参量的表达式如下式所示:

$$F = \left(\frac{\epsilon_0}{\mu_0} \right)^{1/2} \frac{\oint_m dS |E|^2}{\left| \int_{A_c} dS (\mathbf{E} \times \mathbf{H}) \cdot \hat{\mathbf{z}} \right|} \quad (2)$$

式中, ϵ_0 和 μ_0 分别为介质的介电张量和磁导率张量, \mathbf{E} 和 \mathbf{H} 分别是传输模式的电场和磁场强度,是沿光纤轴向上的单位矢量, S 是光程, A_c 是截面面积, m 是边界线积分。

当 PBF 受到压力作用时,其内部微结构会产生变

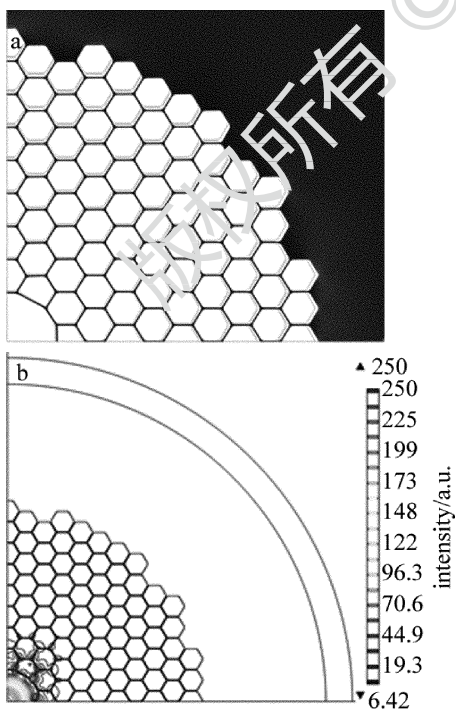


Fig. 2 Internal strain diagram and base model solution of PBF

a—internal strain diagram of photonic bandgap optical fiber core b—base model solution of photonic bandgap fiber

形,因此其传播常数和模场分布会随着其结构的变化而发生改变。令所加径向压力范围为 10N/m~30N/m,记录 PBF 在不同压力下的传播常数的变化和模场分布的改变,并由(1)式和(2)式计算得出其限制损耗和 F 参量随径向压力的变化关系,如图 3 所示。

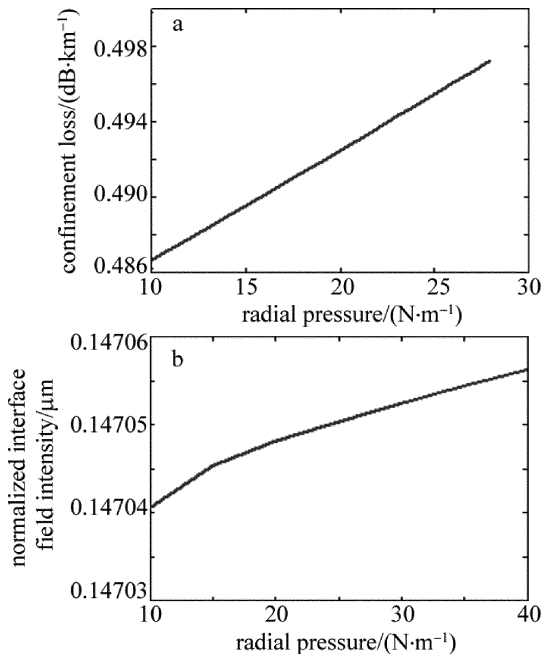


Fig. 3 Influence of radial pressure on PBF loss

a—influence of radial pressure on PBF loss b—influence of radial pressure on F parameter

由图可知,在所加径向压力范围内,PBF 的限制损耗随径向压力的增大而线性增加,其变化灵敏度为 $0.00067 \text{ (dB/km)}/(\text{N/m})$; F 参量随径向压力的增大而逐渐增大,变化率为 $0.68 \times 10^{-6} / (\text{N/m})$ 。

1.2 仿真径向压力对 PBF 折射率的影响

由全矢量有限元法求解麦克斯韦方程可得 PBF 的传播常数,利用传播常数的实部可获得其模式折射率,表达式为^[13]:

$$n_{\text{eff}} = \frac{\text{Re}\beta}{k_0} \quad (3)$$

式中, k_0 为真空中的波数。通过计算不同径向压力作用下 PBF 传播常数的变化值,即可得到其折射率的相

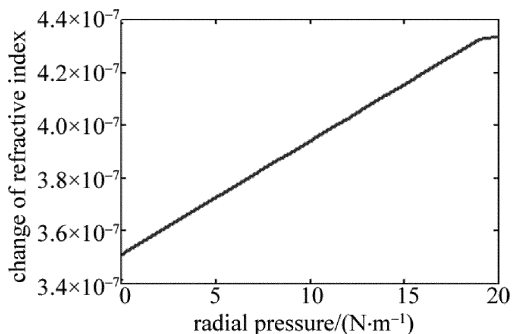


Fig. 4 Relationship between refractive index and radial pressure

对变化量,如图 4 所示。从图中曲线可知,折射率变化随径向压力的增大呈线性增长趋势,其变化率为 $(1.0 \times 10^{-8}) / (\text{N/m})$ 。

2 实验测试

为了验证仿真结果,本文中设计实验测试了在不同的径向压力下 HC-1550-02 型光子带隙光纤的损耗和折射率的变化。测试时选取 10m PBF 和单模光纤 (single mode fiber, SMF) 样本,在室温环境下分别多次测量不同径向压力下输出功率和其折射率的变化量。

实验测量时,将光纤盘绕在大理石台上,在光纤上压一个光滑的刚性平板,在刚性平板上加重物以产生径向压力,记录不同的压力作用下 PBF 的损耗和折射率的变化值,实验测量结束后又重新测量了 PBF 的传输功率,以检验 PBF 的结构是否被破坏。

2.1 实测径向压力对 PBF 损耗的影响

实验中采用中心波长为 1550nm 的激光光源,经过 PBF 光纤接入光功率计,对 PBF 光纤施加径向压力。测量不同径向压力下的输出光功率,以计算光纤损耗的变化量,从而明确径向压力对损耗的影响,测试原理如图 5 所示。



Fig. 5 Test principle diagram of loss with the change of radial pressure

设输入光功率为 P_{in} ,输出光功率为 P_{out} ,光纤长度为 L ,根据损耗 α 的计算公式^[14]:

$$\alpha = \frac{10}{L} \lg\left(\frac{P_{\text{in}}}{P_{\text{out}}}\right) \text{ (dB/m)} \quad (4)$$

当输出光功率分别为 P_1, P_2 时,损耗变化量为:

$$\Delta\alpha = \alpha_2 - \alpha_1 = \frac{10}{L} \lg\left(\frac{P_2}{P_1}\right) \quad (5)$$

根据上式计算压力引起的损耗的变化量,实验结果如图 6 所示。

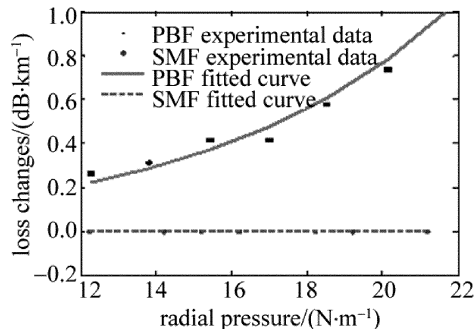


Fig. 6 Influence of stress on the changes of loss

由图可见 PBF 损耗随径向压力呈指数变化,拟合公式为:

$$l = 0.03247 \exp(0.158M) \quad (6)$$

式中, l 是 PBF 的传输损耗, M 是径向压力大小。实验测试得到径向压力引起的损耗约为 $0.06 \text{ (dB/km)/(N/m)}$, 其拟合方差为 0.9815 。仿真计算径向压力引起的损耗为 $0.00067 \text{ (dB/km)/(N/m)}$, 这是由于仿真结果只提取了 PBF 的限制损耗随径向压力的变化关系, 而限制损耗仅占光纤总损耗的 1%。仿真计算得到的 F 参量随径向压力大小的变化率约为 $0.68 \times 10^{-6}/(\text{N/m})$, 与实验测试所得 PBF 总损耗的变化率 $0.56 \times 10^{-5}/(\text{N/m})$ 相比, 由于仿真建模时 PBF 形状规则, 实际使用的光纤在拉制过程中内部结构会发生变形, 因此实验结果与仿真结果会有一定差异, 但其变化趋势是一致的。在同样实验条件下, 将被测光纤改为普通光纤, 实验结果表明, 在一定压力范围内, 径向压力对普通光纤的损耗没有影响。

2.2 验证径向压力对 PBF 折射率的影响

测量径向压力对 PBF 折射率影响的实验原理如图 7 所示^[15]。实验中采用中心波长为 1550nm 的激光光源, 依据马赫-曾德尔干涉原理测试径向压力对折射率的影响。光电探测器将两路光干涉后光强变化转换为电压值, 经数字示波器检测输出电压, 根据电压峰值的改变(见图 8)得到光程差变化量, 最后得出径向压力对 PBF 折射率的影响。同样作为对比, 对传统单模光纤进行了测试。

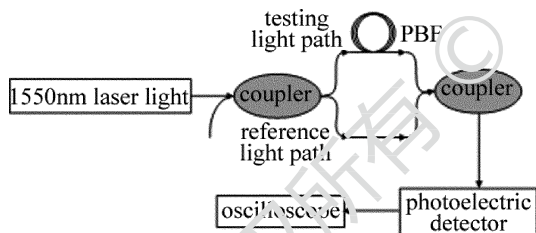


Fig. 7 Principle diagram of refractive index with the change of pressure

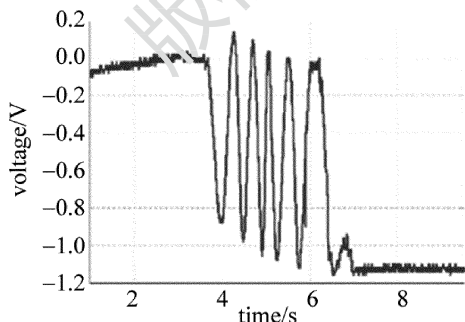


Fig. 8 Test pattern of oscilloscope

由图 7 可知, 激光光源输出的干涉光经过耦合器分为两路, 其中参考光路的光程不变, 测试光路中, 径向压力垂直作用于 PBF, 引起 PBF 的折射率改变, 使其光程发生变化, 两路光又经过耦合器合并为一路光输入光电探测器。设示波器检测的峰值的周期数为

N , 则其折射率变化量 Δn 与其光程变化量 ΔS 的表达式为:

$$\Delta n = \frac{N \times \lambda}{L} = \frac{\Delta S}{L} \quad (7)$$

式中, L 为实验光纤的长度, λ 为干涉光的中心波长, ΔS 为测试光路的光程变化量。

根据实验测试数据计算得到图 9, 由于实验无法准确得到光程变化量, 因此在数据读取中会有小于 λ 的误差。

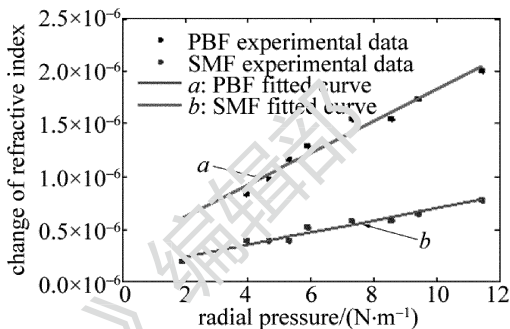


Fig. 9 Influence of stress on the change of refractive index

图 9 中, 曲线 a 为 PBF 测试数据的拟合结果, 其折射率随径向压力大小线性变化, 变化率为 $(0.14898 \times 10^{-6})/(\text{N/m})$, 曲线拟合方差为 0.9686 。曲线 b 为传统单模光纤的数据拟合结果, 其折射率随径向压力变化仍然为线性, 变化率为 $0.060949 \times 10^{-6}/(\text{N/m})$ 。结果表明, PBF 的灵敏度是普通光纤的 2.44 倍, 可见 PBF 的折射率较传统光纤对压力更加敏感。

3 结论

在结合仿真计算和实验测试的基础上, 分析了径向压力对 PBF 损耗和折射率的影响。仿真计算得到径向压力对 PBF 限制损耗的影响为 $0.00067 \text{ (dB/km)/(N/m)}$, 实验测试得其总损耗变化为 $0.06 \text{ (dB/km)/(N/m)}$, 与限制损耗仅占 PBF 损耗的 1% 结果一致。 F 参量随径向压力的变化率约为 $0.68 \times 10^{-6}/(\text{N/m})$, 实验测试 PBF 总损耗的变化率为 $0.56 \times 10^{-5}/(\text{N/m})$, 实验与仿真结果变化趋势一致。对于折射率来说, 仿真计算得到其随径向压力变化的灵敏度为 $0.01 \times 10^{-6}/(\text{N/m})$, 而实验测试得其灵敏度为 $0.14898 \times 10^{-6}/(\text{N/m})$, 这一较大的偏差可能是由于光纤在拉制过程中存在的内部结构不规则而造成的, 但实验与仿真的变化趋势一致。通过实验和仿真数据对比可知, PBF 对径向压力的灵敏度较高, 为 PBF 在 1550nm 波段在压力传感领域的应用提供了实验基础, 同时也为以 PBF 作为媒介的传感和通信领域提供了数据参考。

参 考 文 献

- [1] LIAO Y B. Fiber optics: principles and applications [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2010:28-45 (in Chinese).
- [2] JOANNOPOULOS J D, JOHNSON S G, WINN J N, *et al.* Photonic crystals: molding the flow of light[M]. Chicago, USA:Princeton University Press, 2011:79-88.
- [3] ZHANG H. Structure design and property research of hollow-core photonic bandgap fibers [D]. Beijing:Beijing University of Posts and Telecommunications, 2009:77-95 (in Chinese).
- [4] LIU Y Y, HOU L T, LI Q J, *et al.* Research on photonic bandgap-photonic crystal fibers [J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 27(2):1-5 (in Chinese).
- [5] SHI F F. Design and sensing characteristic on photonic crystal fibers [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013: 36-54 (in Chinese).
- [6] FOKOUA E N, RICHARDSON D J, POLETTI F. Impact of structural distortions on the performance of hollow-core photonic bandgap fibers[J]. Optics Express, 2014, 22(3): 2735-2744.
- [7] de OLIVEIRA R E P, de MATOS C J S. Response to pressure of a hollow core photonic crystal fiber for sensing applications[C]//Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC) 2009 SBMO/IEEE MTT-S International. New York, USA:IEEE, 2009: 299-302.
- [8] SONG D J, XIE K, XIAO J. Mode field and dispersion analysis of photonic crystal fiber based on finite element method [J]. Laser Technology, 2012, 36(1): 111-113 (in Chinese).
- [9] HE D D, LIU M, JIAN D, *et al.* Study on loss in hollow-core photonic bandgap fibers [J]. Laser Technology, 2013, 37(2): 243-246 (in Chinese).
- [10] van VICKLE P S. Photonic bandgap fibers for transverse strain sensing[M]. New York, USA:ProQuest, 2008:125-134.
- [11] de OLIVEIRA R E P, de MATOS C J S, HAYASHI J G, *et al.* Pressure sensing based on nonconventional air-guiding transmission windows in hollow-core photonic crystal fibers[J]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27(11): 1605-1609.
- [12] WEST J, SMITH C, BORRELLI N, *et al.* Surface modes in air-core photonic band-gap fibers[J]. Optics Express, 2004, 12(8): 1485-1496.
- [13] de OLIVEIRA R E P, de MATOS C J S, NUNES G E, *et al.* Visible transmission windows in infrared hollow-core photonic bandgap fiber: characterization and response to pressure[J]. Journal of the Optical Society of America, 2012, 129(5): 977-983.
- [14] KIM G, CHO T, HWANG K, *et al.* Strain and temperature sensitivities of an elliptical hollow-core photonic bandgap fiber based on Sagnac interferometer [J]. Optics Express, 2009, 17(4): 2481-2486.
- [15] PANG M. Response of photonic crystal fibres to pressure, axial strain and temperature [D]. HongKong: HongKong Polytechnic University, 2011: 38-65.