

文章编号: 0253-2239(2010)08-2432-05

带隙型光子晶体光纤微观弯曲传输损耗特性分析

郭夏锐^{1,2} 杨德兴^{2*}

(¹ 中国空间技术研究院北京空间机电研究所, 北京 100190; ² 西北工业大学理学院, 陕西 西安 710072)

摘要 空芯光子晶体光纤由于独特的结构, 具有不同于传统光纤在弯曲状态下的光传输特性。对空芯带隙型光子晶体光纤的微观弯曲损耗特性进行研究, 利用改进型微弯器使光纤获得不同外力和弯曲条件下的响应, 测量其传输谱。实验上分析了波长、压力、微弯振幅和微弯周期等因素对于光纤传输损耗的影响, 利用模式理论分析给出了微弯损耗产生的原因。结果表明, 带隙型光子晶体光纤的抗微弯能力强, 由于表面模式的存在, 在 1520~1620 nm 波段内光纤微弯损耗随波长的增加而增大。带隙型光子晶体光纤的弯曲损耗随微弯振幅增大而增大, 并且在一定范围内损耗随微弯空间周期的增加而增大, 但当微弯周期超过一定的临界值时其损耗随之减小; 微弯状态下光纤的表面模式、包层模式与损耗密切相关。

关键词 光纤光学; 光子晶体光纤; 弯曲损耗; 光子带隙; 表面模式

中图分类号 TN25 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103008.2432

Experimental Investigation on Microbending Loss Properties in Air-Guiding Photonic Bandgap Fiber

Guo Xiarui^{1,2} Yang Dexing²

(¹ Beijing Institute of Space Mechanics and Electricity, China Academy of Space Technology, Beijing 100190, China)
(² School of Science, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710072, China)

Abstract Air-guiding photonic bandgap fibers are developed into application in various areas. Microbending loss properties of fiber play an important role in practical application including optical communications and optical fiber sensors. Microbending losses in air-guiding photonic bandgap (PBG) fiber are investigated experimentally. Transmission spectra of PBG fiber subjected to microbending under different pressure and conditions are measured. Various factors which affect the microbending loss, including wavelength, pressure, bending period, and diameter, are analyzed. An analysis of the losses associated with surface modes and mode coupling is presented. The results show that, as the existing of surface modes, spectral losses of PBG fiber increase with the wavelength in the band of 1520~1620 nm. Moreover, within the critical period, transmission loss increases with the microbending period. Additionally, as the diameter of the microbending increases, the fiber is found to be more sensitive to the bending loss.

Key words fiber optics; photonic crystal fiber; microbending loss; photonic bandgap; surface mode

1 引 言

光子晶体光纤(PCF)因导光机理的不同分为两类:纤芯为实心的折射率引导型光子晶体光纤与纤芯为空气孔的光子带隙型光子晶体光纤(PBG-

PCF)^[1~3]。PBG-PCF 的主要特点在于,光纤包层所具有的光子禁带效应能将光束限制在空气孔的纤芯中传播。这种与传统光纤完全不同的导光机制,打破了石英芯光纤的限制,并且以其结构设计的可

收稿日期: 2009-09-23; 收到修改稿日期: 2009-11-07

基金项目: 航空科学基金(20080753005)资助课题。

作者简介: 郭夏锐(1983—),男,硕士,主要从事光电子技术及应用等方面的研究。

E-mail: xiarui.guo@hotmail.com

* 通信联系人。E-mail: dxyang@nwpu.edu.cn

控性、易耦合性和低色散等特点在光通信、光纤传感和检测等领域得到广泛关注并迅速发展,其研究已经逐步从理论分析走向实验阶段^[4~7]。

微观弯曲是指光纤产生了形变半径小于 2 mm 的弯曲,从而导致光纤对称的几何结构和纤芯与包层的相对折射率发生了改变,影响到光纤模场的横向分布,导致光能泄漏至包层引起模式间耦合传输损耗。作为光纤基本特性之一,无论是在光通信还是传感领域,对微弯损耗的研究都是极为重要的^[8~10]。2004 年 Hansen 等^[11]首次对 PBG-PCF 的宏观弯曲损耗进行了测量,2005 年 Olszewski 等^[12]从理论上分析了 PCF 弯曲损耗中的振荡效应。2007 年郭夏锐等^[13]对两种光子晶体光纤的宏观弯曲临界半径等问题进行了实验研究。2008 年 Skorobogatiy 等^[14]对 PBG-PCF 弯曲损耗的模式间耦合问题进行了分析。但带隙型光子晶体光纤由于其结构的复杂性和多样化,相关微弯损耗的实验研究鲜见报道。本文通过对带隙型光子晶体光纤进行微观弯曲实验,研究利用改进型微弯器获得在不同

波长、压力、弯曲半径和微弯周期等条件下 PBG-PCF 的传输谱,并分析这些因素对光纤传输损耗的影响。

2 实验装置

实验装置如图 1 所示,将 EXFO FLS-2300B ASE 宽带光源输出的波长范围为 1520~1620 nm 的光波耦合至带隙型光子晶体光纤,光纤经过改进型微弯器加压调制后接入精度为 0.015 nm 的 Ando AQ6317C 光谱分析仪进行测量分析。改进型微弯器^[11]结构如图 2 所示,它由直径相同的玻璃棒周期性排列于两块相同的钢板组成。与传统微弯器相比改进型微弯器采用圆柱状的玻璃棒代替机械棱角,降低了机械损伤对光纤的影响,玻璃棒的周期性排列使得光纤沿传播方向产生类正弦周期性弯曲。通过改变玻璃棒的直径和排列间隔,能够测量得到施加不同外力条件下 PBG-PCF 的传输光谱强度。

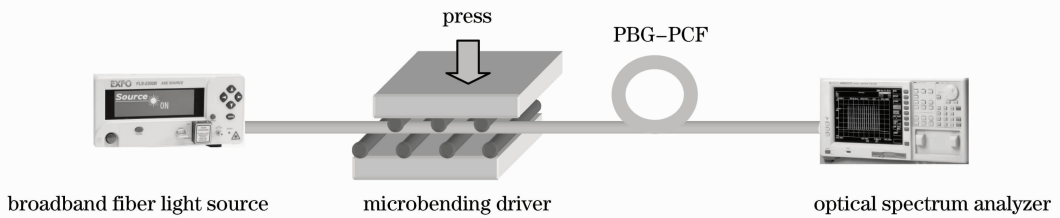


图 1 测量光纤微弯损耗的实验装置

Fig. 1 Experimental setup for measuring microbending losses

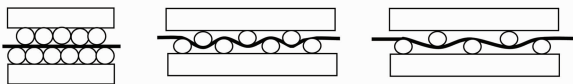


图 2 不同周期改进型微弯器结构示意图

Fig. 2 Schematic of microbending driver with different periods

实验采用 Blaze Photonics 公司生产的 HC-1550-02 型带隙光子晶体光纤,由数字显微镜观察到的横截面结构如图 3 所示。其中光纤空气孔包层直径为 $70\ \mu\text{m}$,它由孔间距 $\Lambda=3.8\ \mu\text{m}$ 的空气孔按三角结构周期排列形成二维光子晶体结构。纤芯是在周期结构中抽掉 7 根空心硅管形成的空气孔,其直径 $d=10.9\ \mu\text{m}$,光纤的空气填充率达到 90% 以上。由于宽带光源输出的 1520~1620 nm 范围的光波处于光子带隙中,因此光波被约束在中心缺陷空气孔(即纤芯)中传输。在无弯曲时的测量表明该种光纤在中心波长 1550 nm 处的传输损耗为 0.1 dB/m。

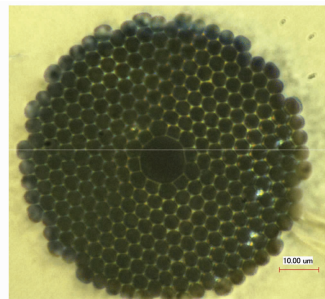


图 3 HC-1550-02 光子晶体光纤横截面结构

Fig. 3 Cross-section image of PBG-PCF used for experiments

3 实验结果与分析

3.1 弯曲损耗与波长的关系

首先测量了带隙型光子晶体光纤在一定弯曲曲率和周期下加载不同外力时的传输谱。取直径为 $795\ \mu\text{m}$ 的玻璃棒按其直径的 2 倍周期排列,形成的

微弯器长度为 12.65 cm, 微弯振幅为 795 μm , 微弯周期为 1590 μm 。图 4 所示为不同压力作用下, 受压光纤在近红外 1520~1620 nm 范围内的传输功率谱, 可以看出在外力作用下输出光强被减弱。进一步研究其弯曲损耗随波长的关系, 将测量得到的功率曲线利用损耗公式 $I_L = 10\lg(P/P_0)$ 进行处理。

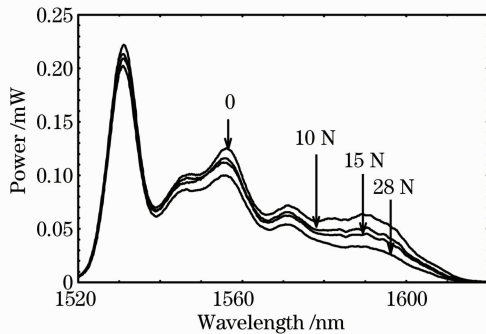


图 4 不同压力下的传输谱

Fig. 4 Transmission spectra under different pressures

图 5 为在上述微弯器条件下外力 $F = 28 \text{ N}$ 时的损耗曲线, 从图中可以明显看出, 长波区对微弯损耗的响应较短波区强烈。这是由于带隙效应将光波限制在 PBG-PCF 的空气孔缺陷中, 利用等效折射率模型分析, 所有光波传输模式的有效折射率均位于空气折射率线和带隙上边缘之间, 即满足 $n_{\text{eff}} = n_{\text{air}} \cos \theta_z < 1$, θ_z 是波矢量与光纤轴线的夹角。PBG-PCF 中传输的主要模式包括纤芯模式和表面模式, 前者的大部分能量存在于空气孔内; 而表面模式的大部分能量分布于纤芯空气孔与周期性包层交界处的石英介质区附近, 是影响 PBG-PCF 传输损耗的重要因素^[15,16]。随着波长的增大, 表面模式的有效折射率迅速减小, 而在空气孔缺陷内传输的纤芯模式的有效折射率变化较小。在实验中, 两种不同模式光波的有效折射差值随波长的增加而增大, 其相

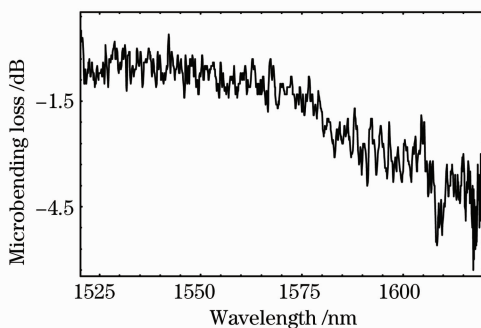


图 5 微弯损耗随波长变化的关系

Fig. 5 Relation between microbending loss and wavelength

互间的耦合也随之增大。因此, PBG-PCF 的弯曲损耗随波长的增加而增加。

同时, 在实验中也测量了普通单模光纤 SMF-28 在各种不同条件的传输损耗。对比了 PBG-PCF 与普通单模光纤在相同微弯条件下的弯曲损耗。如图 6 所示, 为两种光纤在微弯周期为 3180 μm 加载 15 N 时的对比损耗曲线, 可以看出 SMF 的损耗明显较大。大量实验结果表明, 在相同条件下, 该结构 PBG-PCF 对微弯损耗不明显, 具有良好的抗微弯能力。

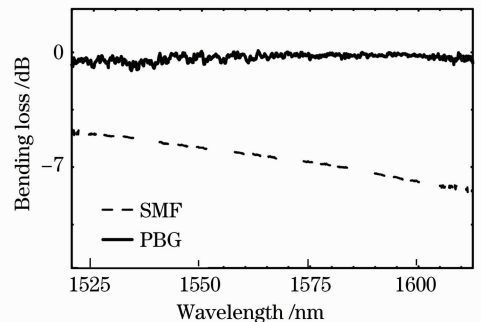


图 6 带隙型光子晶体光纤与标准单模光纤弯曲损耗的对比

Fig. 6 Bending losses contrast between the PBG-PCF and single mode fiber

3.2 微弯振幅和周期对弯曲损耗的影响

保持微弯曲率半径和外力不变的情况下改变玻璃棒的间隔, 从而实现光纤微弯周期的改变。如图 7 所示, 分别为 PBG-PCF 在微弯周期分别为 795, 1590 和 3180 μm 时外力 $F = 28 \text{ N}$ 时的微弯损耗谱。从图中可以看出当微弯棒紧密排列与排列周期 3 倍于微弯棒直径时, 光纤的传输损耗均较小; 但当微弯棒排列周期为微弯振幅的 2 倍时, 弯曲损耗明显增大, 特别是在长波一侧。实验结果表明, PBG-PCF 与传统光纤类似, 微弯存在临界周期, 其弯曲损耗不随弯曲周期成单调关系。这种弯曲损耗

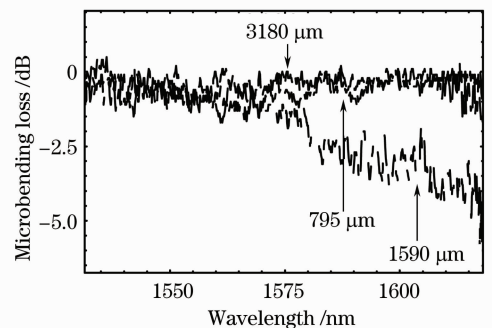


图 7 不同微弯周期的微弯损耗谱

Fig. 7 Microbending loss spectra for different microbending periods

的振荡效应^[12]是由于在光子带隙的上下边界处分别存在着有效折射率大于和小于基模的两种包层模式。带隙效应将光波限制在空气孔缺陷中传输,随着弯曲周期的减小,能量分布在弯曲外侧的包层模式有效折射率增大,能量分布在弯曲内侧的包层模式有效折射率减小^[16,17]。微弯过程是不同的包层模式共同作用与基模发生耦合的过程。当在临界周期之内时,随微弯周期的增大基模与包层模之间的耦合加剧,并在一定的临界周期时使弯曲损耗达到最大;而当微弯超过该极值点后,损耗随之减小。

为了研究微弯振幅对带隙型光子晶体光纤弯曲损耗的影响,采用直径为 930 μm 玻璃棒制作微弯器,其排列周期为直径的 2 倍,进行微弯实验。如图 8 所示为施加外力 $F=28\text{ N}$ 时,微弯振幅分别为 795 μm 和 930 μm 的损耗谱。与 PBG-PCF 宏观弯曲^[13]不同,微观弯曲并非弯曲半径越小损耗越大,而是当微弯棒直径增大时光纤的弯曲损耗增大。这是由于微弯直径均在光纤临界半径以内,当弯曲段长度一定时,随着微弯棒直径的增大,光纤弯曲部分近正弦曲线的振幅增大,加深了弯曲凸起或凹陷幅度,从而增大了光纤的弯曲损耗。

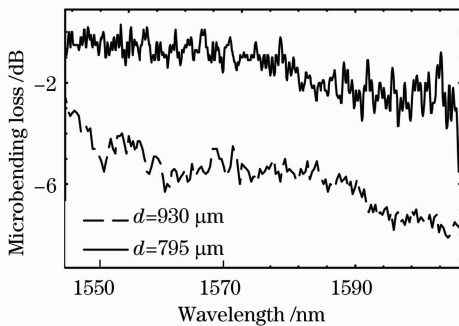


图 8 不同微弯振幅的微弯损耗谱

Fig.8 Microbending loss spectra for different microbending diameters

4 结 论

利用改进型微弯器在不同外力情况下对带隙型光子晶体光纤的微弯损耗特性进行研究,分析了波长、压力、微弯振幅和微弯周期等因素对于光纤光波传输的影响,讨论了微弯损耗产生的原因。实验结果表明,PBG-PCF 的抗微弯能力强,在实验波段内光纤对短波长光波的束缚能力更强,而对长波区的光波束缚相对较弱。从微弯结构上分析,PBG-PCF 与普通单模光纤类似,其微弯存在一临界周期,当光纤在临界周期之内时,其弯曲损耗随周期的增加而

增大。并且光纤的弯曲半径在其弯曲临界半径之内时,其弯曲损耗随微弯振幅的增加而增加。微弯使得光纤的带隙结构发生改变,各模式间的耦合和模式泄漏与微弯损耗有着密切的联系。

因此,在利用光纤作为传输介质或制作光纤器件时,若需要对其进行复杂密集布线,就可以利用对弯曲不敏感的带隙型光子晶体光纤代替普通光纤,这样可以降低弯曲所引起的损耗,提高弯曲状态下的传光效率。若要利用 PBG-PCF 制作外力传感器件,可改变其微弯结构的周期和振幅,并选择合适波长,达到增敏的效果。

参 考 文 献

- 1 T. A. Birks, J. C. Knight, P. St. J. Russel *et al.*. Endlessly single-mode photonic crystal fiber[J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(13): 961~963
- 2 J. C. Knight, T. A. Birks, P. St. J. Russell *et al.*. All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding [J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(19): 1547~1549
- 3 J. C. Knight. Photonic crystal fibres [J]. *Nature*, 2003, **424**(6950): 847~851
- 4 R. F. Cregan, B. J. Mangan, J. C. Knight *et al.*. Single-mode photonic bandgap guidance of light in air [J]. *Science*, 1999, **285**(5433): 1537~1539
- 5 S. Kazunori, K. Hirokazu, K. Satoki *et al.*. Optical properties of a low-loss polarization-maintaining photonic crystal fiber [J]. *Opt. Express*, 2001, **9**(13): 676~680
- 6 Guo Tiejing, Lou Shuqin, Li Honglei *et al.*. Low loss arc fusion splice of photonic crystal fibers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(2): 511~516
郭铁英, 娄淑琴, 李宏雷等. 光子晶体光纤的低损耗电弧熔接方案 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(2): 511~516
- 7 Cheng Tonglei, Li Shuguang, Zhou Guiyao *et al.*. Relation between power fraction in the core of hollow-core photonic crystal fibers and their bandgap property fiber [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(2): 249~254
程同蕾, 李曙光, 周桂耀等. 空芯光子晶体光纤纤芯中的功率分数及其带隙特性 [J]. *中国激光*, 2007, **34**(2): 249~254
- 8 Liu Renqiang, Liu Pinkuang, Fu Zhuang *et al.*. Operation principle of a bend enhanced curvature optical fiber sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(5): 807~812
刘仁强, 刘品宽, 付庄等. 弯曲增敏型光纤曲率传感器机理的研究 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(5): 807~812
- 9 M. D. Nielsen, N. A. Mortensen, M. Albertsen *et al.*. Predicting macrobending loss for large-mode area photonic crystal fibers [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(8): 1775~1779
- 10 J. C. Baggett, T. M. Monro, K. Furusawa *et al.*. Understanding bending losses in holey optical fibers [J]. *Opt. Commun.*, 2003, **227**(4-6): 317~335
- 11 T. P. Hansen, J. Broeng, C. Jakobsen *et al.*. Air-guiding photonic bandgap fibers: spectral properties, macrobending loss, and practical handling [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2004, **22**(1): 11~15
- 12 J. Olszewski, M. Szpulak, W Urbanczyk *et al.*. Effect of coupling between fundamental and cladding modes on bending losses in photonic crystal fiber [J]. *Opt. Express*, 2005, **16**(13): 6015~6022
- 13 Guo Xiarui, Yang Dexing, Zhao Jianlin *et al.*. Experimental investigation on the bending loss properties of photonic crystal

- fibers[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(10): 1817~1820
- 郭夏锐, 杨德兴, 赵建林 等. 光子晶体光纤弯曲损耗特性研究 [J]. *光子学报*, 2007, **36**(10): 1817~1820
- 14 M. Skorobogatiy, K. Saitoh, M. Koshiba. Full-vectorial coupled mode theory for the evaluation of macro-bending loss in multimode fibers. application to the hollow-core photonic bandgap fibers[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(19): 14945~14953
- 15 K. Saitoh, N. Mortensen, M. Koshiba. Air-core photonic band-gap fibers; the impact of surface modes[J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(3): 394~400
- 16 Cui Li, Zhao Jianlin, Zhang Xiaojuan *et al.*. Analysis of bending loss oscillations in photonic crystal fibers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(6): 1172~1177
- 崔 莉, 赵建林, 张晓娟 等. 光子晶体光纤的弯曲损耗振荡特性分析[J]. *光学学报*, 2008, **28**(6): 1172~1177
- 17 J. West, C. Smith, N. Borrelli. Surface modes in air-core photonic band-gap fibers [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(8): 1485~1496