

电弧法刻写长周期光子晶体光纤光栅的研究

黄图斌 施解龙 浦珺慧 陈园园

(上海大学理学院物理系, 上海 200444)

摘要 通过电弧放电在光子晶体光纤(PCF)中产生空气孔塌缩来刻入长周期光栅(LPG)。在此基础上进一步分析其周期长度、周期个数、环境折射率和温度对该光栅传输特性的影响。研究表明,该方法制备的光栅的传输特性随周期长度和周期个数有规律地变化,并测得其环境折射率灵敏度系数和温度灵敏度系数分别为 420 nm/RIU (RIU 表示折射率单位)和 7.86 pm/°C。由此可见,这种光栅具有对环境折射率的变化敏感而对温度的变化较不敏感的特性,因而在减少交叉敏感的光纤传感器件方面有广泛的应用前景。

关键词 光纤光学;光子晶体光纤;长周期光栅;电弧法

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0605002

Long Period Gratings Fabrication by Arc Discharge in Photonic Crystal Fibers

Huang Tubin Shi Jielong Pu Junhui Chen Yuanyuan

(Department of Physics, College of Science, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract The method of fabricating structural long period grating (LPG) in a photonic crystal fiber (PCF) with periodically collapsed holes along the length of the fiber by use of arc discharge is proposed. The influence of the fiber structural parameters, involving the grating period, the number of periods, the refractive index and temperature, on transmission characteristics is further studied. The research results indicate that the transmission characteristics of the manufactured LPG can be tuned by the grating period and the number of periods regularly. The refractive sensitivity and the temperature sensitivity are 420 nm/RIU (RIU is refractive index unit) and 7.86 pm/°C, respectively, which is found to be highly sensitive to refractive index while weakly sensitive to temperature. These unique properties can bring many potential applications in the field of optical fiber sensor with largely reduced cross-sensitivity.

Key words fiber optics; photonics crystal fiber; long period grating; arc discharge

OCIS codes 050.2770; 060.2310; 060.5295

1 引言

光子晶体光纤(PCF)^[1]是由单一材料二氧化硅组成,通常含有不同排列形式的气孔,这些气孔的尺寸与光波波长大致在同一量级且贯穿器件的整个长度。对该种光纤而言,光波可以被限制在光纤芯区传播。在 PCF 上刻写长周期光子晶体光纤光栅(LP-PCFG)具有设计灵活性高,对压力、温度,环境折射率等参数敏感的特点,可以应用于高速率、多参数、分布式传感技术^[2-3]。因此近年来 LP-PCFG 的

制备工艺及其应用已成为研究的热点。制作结构型 LP-PCFG 的主要方法有:使用 CO₂ 激光器的热冲击效应使光纤包层中的空气孔出现周期性坍塌^[4-7]、填充空气孔^[8]、红外飞秒激光写入技术等^[9-11]。激光器在 PCF 上刻写长周期光栅(LPG)会破坏光纤横截面上的几何结构对称性,如红外飞秒激光刻写技术需要在 PCF 一侧制作微孔^[12-13],这将导致非对称模场调制,进而引起偏振相关损耗;其他一些方法也存在或设计不灵活、或成本过高、或

收稿日期: 2014-01-06; **收到修改稿日期**: 2014-03-02

基金项目: 上海市重点学科建设项目资助(S30105)

作者简介: 黄图斌(1986—),男,硕士研究生,主要从事光纤光栅及光子晶体光纤等方面的研究。

E-mail: huangtubin@shu.edu.cn

导师简介: 施解龙(1960—),男,博士,副教授,主要从事光纤光栅、光通信器件等方面的研究。

E-mail: sjlong@staff.shu.edu.cn(通信联系人)

系统复杂等缺点。

近年来,电弧成栅法因制备工艺简单、成本较低的特点而备受关注^[14]。本文利用电弧在 PCF 上刻写结构型 LPG。该方法是通过使 PCF 的一系列纵向气孔环形塌缩,以实现 PCF 几何结构的周期性调制。这种方式保证了 LP-PCFG 的横截面具有对称的几何结构。研究表明,该 LP-PCFG 的环境折射率敏感系数可达到 420 nm/RIU(RIU 为折射率单位),可以广泛应用于环境折射率传感领域,同时其温度敏感系数只有 7.86 pm/°C,可以有效降低温度引起的交叉敏感问题^[15]。

2 实验原理与过程

2.1 实验原理

利用局域模耦合理论分析了 LP-PCFG^[16-17]的电磁场传输过程。该理论可以应用于模拟具有较大非均匀性的波导模的性质。在此理论的基础上,光纤中的电场和磁场可以表示为纤芯模和包层模的叠加。当光传输到塌缩区域时,纤芯模被部分耦合到独立的包层模中。在只考虑纤芯基模和包层模耦合

的情况下,可以表示为

$$\begin{cases} \frac{db_{co}}{dz} - i\beta_{co}(z)b_{co} = C(z) \cdot b_{cl} \\ \frac{db_{cl}}{dz} - i\beta_{cl}(z)b_{cl} = C(z) \cdot b_{co} \end{cases}, \quad (1)$$

式中 b 为磁场或是电场模式, β 为传播常数。下标 co 和 cl 分别代表基模和包层模。 $C(z)$ 表示纤芯和包层局域模耦合效率的耦合系数,其可表示为

$$C(z) = \sum_N f_N \exp\left(i \frac{2\pi N}{\Lambda} z\right), \quad (2)$$

式中 Λ 为周期长度, N 为光栅阶数, f_N 为展开后各次谐波系数。

根据(2)式可以得到相位匹配条件为

$$N\lambda_{res} = \int_{z_0}^{z_0+\Lambda} [n_{co}(z, \lambda_{res}) - n_{cl}(z, \lambda_{res})] \cdot dz \approx (n_{co} - n_{cl})\Lambda, \quad (3)$$

式中 λ_{res} 为谐振波长, n_{co} 和 n_{cl} 分别为非微扰 PCF 的纤芯和包层模的有效折射率。

2.2 实验装置

图1给出电弧加工系统的装置示意图,该系统

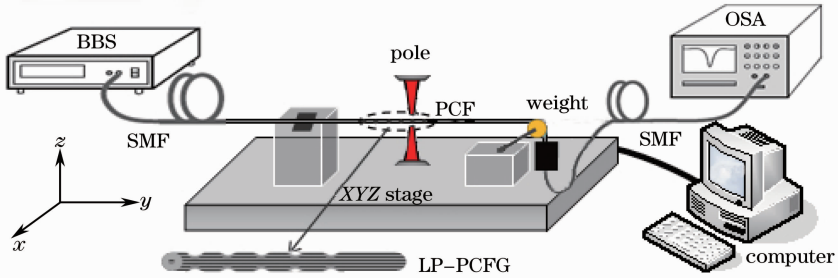


图1 LP-PCFG 加工系统

Fig. 1 LP-PCFG fabrication system

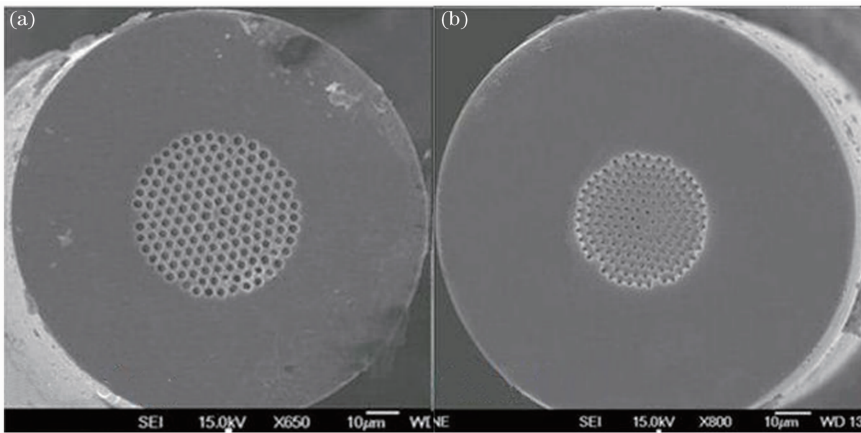


图2 (a)刻写前光子晶体光纤光栅的横截面; (b)刻写后光子晶体光纤光栅塌缩区域的横截面

Fig. 2 (a) Image of the PCF cross section before arc discharge; (b) image of the PCF cross section with annular collapse after arc discharge

主要由宽带光源(BBS)、古河 S177 光纤熔接机、光谱仪和精密数控平台组成。实验中采用的 PCF 的纤芯半径为 $3.11 \mu\text{m}$, 气孔直径为 $3.33 \mu\text{m}$, 空气孔间距为 $5.45 \mu\text{m}$ 。图 2(a) 为该 PCF 的剖面图。将 PCF 两端以低损耗的熔接方式熔接到两段普通单模光纤(SMF)上^[18-19], 在熔接过程中产生的熔接损耗为 -0.25 dB 。这两段单模光纤分别连接到宽带光源和 Agilent 86140B 光谱仪(OSA)。光谱仪的系统参数: 分辨带宽(RBW)、视频带宽(VBW)、灵敏度(sens)、扫描时间(ST)、是否打开平均测量(Avg)等设置见图 3 和图 4。并将 PCF 固定在移动步长为 40 nm , 重复率为 300 nm 的精密数控平台上, 其中一端悬挂重物以提供恒定的拉力。

2.3 实验过程

将古河 S177 光纤熔接机放电强度参数项设置为 200, 放电时间参数项设置为 400。令熔接机放电, 放电产生的电弧将造成 PCF 内温度升高, 进而导致空气孔塌缩^[20], 如图 2(b) 所示。通过利用精密数控平台将该 PCF 沿其纵向移动固定间距。重复以上步骤后将产生一系列具有几何形状相同且间距相等的塌缩, 从而在 PCF 中制作出长周期光栅。

3 实验结果与分析

如图 3 所示, 光栅周期长度为 $420 \mu\text{m}$, 周期个数为 20 的 LP-PCFG 在 1519 nm 处有一个幅值约为 -20 dB 的谐振峰, 相应的光栅长度只有 8.65 mm 。这种 PCF 光栅的周期性结构是由于电弧造成 PCF 空气孔的周期性环形塌缩形成的, 因而该方法制备的光栅是一种横截面几何结构对称的长周期光栅。图 3 的插图(a) 是利用红外摄像机拍摄该 LP-PCFG 输出的近场图片, 与插图(b) 所示的 LP_{11} 模场分布相吻合, 由此可知该 LP-PCFG 的谐振损耗主要来源于基模与 LP_{11} 模的耦合。

3.1 周期个数对谐振峰的影响

如图 3 所示, 透射谱的谐振峰的幅值随着光栅周期数量的增加而变大。产生该现象的原因是周期数的增加增强了基模和包层模之间的耦合, 从而导致了其透射率降低。实验结果显示该谐振峰的短波侧有谐振损耗峰, 这是由于基模中耦合了高阶包层模造成的^[21]。

3.2 周期长度对谐振峰的影响

实验过程中制作了一系列不同周期长度的光栅。图 4 给出了周期数为 20, 周期长度不同的 LP-PCFG 的透射谱。由图 4 可以看出随着 LP-PCFG

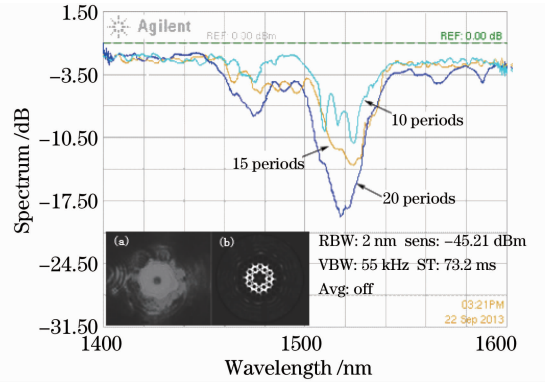


图 3 LP-PCFG 的周期个数对周期为 $420 \mu\text{m}$ 光栅透射谱谐振衰减峰的影响

Fig. 3 Influences of the number of periods on resonance peak of the LP-PCFG with $420 \mu\text{m}$ grating period

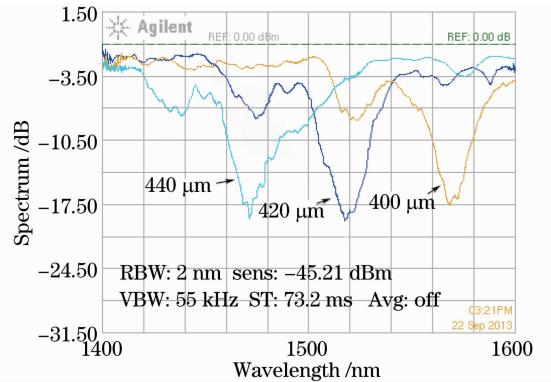


图 4 周期长度对周期个数为 20 的光栅透射谱谐振衰减峰的影响

Fig. 4 Influences of the length of period on resonance peak of the LP-PCFG with 20 periods

的周期长度增大谐振波长会向短波方向移动。而对于谐振波长的变化可以利用(3)式的相位匹配条件来解释。由于 PCF 各模式的有效折射率是随波长 λ 变化的, 因此(3)式是关于 λ 的方程, 该方程的解即是谐振波长 λ_{res} 。(3)式右边的积分项周期长度 Δ 的改变将导致 λ_{res} 的值出现变化, 即表现为谐振波长向短波方向移动。

3.3 传感特性

LP-PCFG 传输特性对外界环境很敏感, 即其谐振峰的位置和幅值受外界环境影响较大, 其中环境折射率和温度是影响长周期光纤光栅传输特性的重要因素。在 LP-PCFG 折射率敏感度测试中, 将 LP-PCFG 放入折射率不同(折射率范围在 $1.3 \sim 1.4$)、温度为 $30 \text{ }^\circ\text{C}$ 的蔗糖溶液中测试其透射谱。图 5 是 LP-PCFG 透射谱谐振波长随环境折射率变化的关系图。实验结果表明随着环境折射率的提升, LP-PCFG 的谐振波长沿着长波方向移动, 灵敏度系数

为 420 nm/RIU。LP-PCFG 的环境折射率敏感系数较大,因而在环境折射率传感领域有着潜在的应用价值。

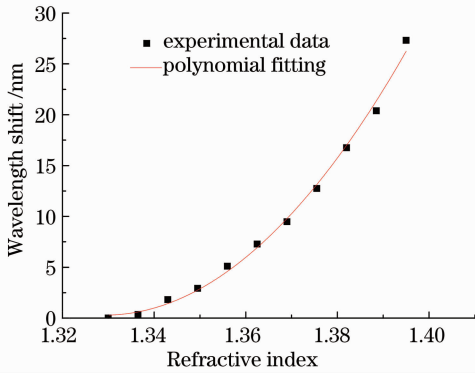


图 5 环境折射率对 LP-PCFG 透射谱谐振衰减峰的影响
Fig. 5 Influence of circumstance refractive index on LP-PCFG transmission spectrum resonance peak

LP-PCFG 的温度传感特性测试实验在恒温箱中进行,通过调节恒温箱的温度,测量了该光栅在不同温度下的谐振峰,结果如图 6 所示。根据图 6 可以看出随着温度升高,透射谱的谐振峰向长波方向移动,响应曲线呈线性,响应系数为 7.86 pm/°C。这种 LP-PCFG 的温度灵敏度较低,只有普通单模光纤光栅的 $1/4^{[22]}$,因而该特性可有效降低传感器的交叉敏感。

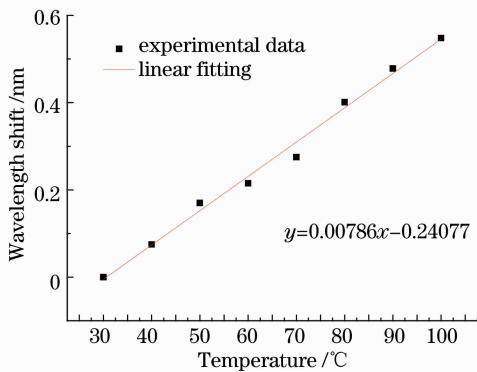


图 6 环境温度对 LP-PCFG 透射谱谐振衰减峰的影响
Fig. 6 Influence of circumstance temperature on LP-PCFG transmission spectrum resonance peak

4 结 论

通过电弧放电的方法制备了 LP-PCFG,分析了其周期个数、周期长度、环境折射率和温度对传输特性的影响。实验结果表明,该 LP-PCFG 的谐振峰的幅值随周期个数增加而增加,谐振峰的位置随周期长度的增加而向短波方向移动。该 LP-PCFG 具

有较高的环境折射率敏感系数和较低的温度敏感系数,因而能够广泛应用于折射率传感领域且无需温度补偿。

参 考 文 献

- 1 J C Knight, T A Birks, P S Russell, *et al.*. All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding [J]. *Opt Lett*, 1996, 21(19): 1547–1549.
- 2 L Rindorf, J B Jensen, M Dufva, *et al.*. Photonic crystal fiber long-period gratings for biochemical sensing [J]. *Opt Express*, 2006, 14(18): 8224–8231.
- 3 Yu Chongxiu, Yuan Jinhui, Shen Xiangwei. Recent progress of study on photonic crystal fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(9): 0900139.
余重秀, 苑金辉, 申向伟. 光子晶体光纤的研究新进展 [J]. *光学学报*, 2011, 31(9): 0900139.
- 4 Y Zhu, P Shum, J H Chong, *et al.*. Deep-notch, ultracompact long-period grating in a large-mode-area photonic crystal fiber [J]. *Opt Lett*, 2003, 28(24): 2467–2469.
- 5 Wang Yiping. Review of long period fiber gratings written by CO₂ laser [J]. *J Appl Phys*, 2010, 108(8): 081101.
- 6 G Kakarantzas, T A Birks, P St J Russell. Structural long-period gratings in photonic crystal fibers [J]. *Opt Lett*, 2002, 27(12): 1013–1015.
- 7 Y P Wang, L M Xiao, D N Wang, *et al.*. Highly sensitive long-period fiber-grating strain sensor with low temperature sensitivity [J]. *Opt Lett*, 2006, 31(23): 3414–3416.
- 8 C Kerbage, B J Eggleton. Tunable microfluidic optical fiber gratings [J]. *Appl Phys Lett*, 2003, 82(9): 1338–1340.
- 9 T Allsop, K Kalli, K Zhou, *et al.*. Long period gratings written into a photonic crystal fibre by a femtosecond laser as directional bend sensors [J]. *Opt Commun*, 2008, 281(20): 5092–5096.
- 10 C J Hensley, D H Broaddus, C B Schaffer, *et al.*. Photonic band-gap fiber gas cell fabricated using femtosecond micromachining [J]. *Opt Express*, 2007, 15(11): 6690–6695.
- 11 A van Brakel, C Grivas, M N Petrovich, *et al.*. Micro-channels machined in microstructured by femtosecond laser [J]. *Opt Express*, 2007, 15(14): 8731–8736.
- 12 S Liu, L Jin, W Jin, *et al.*. Structural long period gratings made by drilling micro-holes in photonic crystal fibers with a femtosecond infrared laser [J]. *Opt Express*, 2010, 18(6): 5496–5503.
- 13 Li Dongjuan, Lin Ling, Lü Baida, *et al.*. Polarization-dependent optical guiding in low repetition frequency femtosecond laser photowritten type II fused silica waveguides [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(5): 0532001.
李冬娟, 林 灵, 吕百达, 等. 低重复频率飞秒激光在石英玻璃内写入的 II 类波导的偏振依赖导光性研究 [J]. *光学学报*, 2013, 33(5): 0532001.
- 14 Zhou Li, Liang Dakai, Zeng Jie, *et al.*. Mechanism and experimental research on performance degeneratio of fiber Bragg grating affected by temperature [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(4): 0405007.
周 丽, 梁大开, 曾 捷, 等. 温度影响光纤光栅传感器性能蜕化机理及实验研究 [J]. *中国激光*, 2012, 39(4): 0405007.
- 15 Liu Xuejing, Yang Yuanhong, Zhang Xiaozhe, *et al.*. Fabrication technology of phase shifted fiber Bragg grating with an arc discharge technique [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(5): 0505002.
刘学静, 杨远洪, 张晓哲, 等. 基于电弧放电的相移光纤布拉格光栅制作技术 [J]. *中国激光*, 2013, 40(5): 0505002.
- 16 Qingning Li. Coupled-local-mode theory and study of optical properties of a Gaussian fiber grating [J]. *J Opt Soc Am A*,

- 1999, 16(6): 1312—1325.
- 17 L Jin, W Jin, J Ju, *et al.*. Coupled local-mode theory for strongly modulated long period gratings [J]. *J Lightwave Technol*, 2010, 28(12): 1745—1751.
- 18 Yang Qing, Shi Jielong, Sun Weisheng, *et al.*. Low-loss splicing based on the technique of mode field matching by fusion taper rig [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(10): 1006001.
杨清, 施解龙, 孙伟胜, 等. 基于光纤拉锥模场匹配技术的光子晶体光纤低损耗熔接[J]. *光学学报*, 2012, 32(10): 1006001.
- 19 Zhang Yin, Chen Mingyang, Zhang Yongkang. Investigation of a novel large-mode-area photonic crystal fiber transmission system and its transmission characteristics[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(12): 1205001.
张银, 陈明阳, 张永康. 新型大模场光子晶体光纤传输系统及其传输特性分析[J]. *中国激光*, 2012, 39(12): 1205001.
- 20 Fu Guangwei, Bi Weihong, Jin Wa. Mechanics characteristic of air-hole in fusion splicing process for photonic crystal fiber[J]. *Chinese J Lasers*, 2009, 36(11): 2966—2971.
付广伟, 毕卫红, 金娃. 光子晶体光纤熔接过程中的空气孔力学特性[J]. *中国激光*, 2009, 36(11): 2966—2971.
- 21 Qi Yuefeng, Guo Wenguang, Bi Weihong. Research on transmission mechanism of the structurally changed long period photonic crystal fiber grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 32(12): 1205004.
齐跃峰, 郭文光, 毕卫红. 结构性改变长周期光子晶体光纤光栅成栅机理研究[J]. *光学学报*, 2011, 32(12): 1205004.
- 22 Y J Rao, Y P Wang, Z L Ran, *et al.*. Novel fiber-optic sensors based on long-period fiber gratings written by high-frequency CO₂ laser pulses [J]. *J Lightwave Technol*, 2003, 21(5): 1320—1327.

栏目编辑：王晓球