

一种基于结构性改变的光子晶体光纤光栅理论研究

齐跃峰^{1,2} 毕卫红^{1,2}

(¹燕山大学信息科学与工程学院, 河北 秦皇岛 066004
²河北省特种光纤与光纤传感重点实验室, 河北 秦皇岛 066004)

摘要 对一种新型基于结构性改变的光子晶体光纤光栅原理进行了研究。采用多极法分析了结构性改变对折射率的影响,得到有效折射率与包层气孔塌缩之间的关系,建立了结构性改变光子晶体光纤光栅模型。利用耦合模理论对所成光栅性能进行了分析,重点研究了包层空气孔层数、空气孔占空比、气孔塌缩程度对光栅谐振波长、带宽的影响。研究表明,光子晶体光纤包层空气孔周期性塌缩可以形成光栅;空气孔塌缩程度和塌缩包络对有效折射率的大小和分布都有影响;空气孔层数增加,光栅谐振波长出现蓝移,带宽变宽,谐振强度减弱;相同光纤结构下,空气孔塌缩程度增加,光栅谐振波长出现红移,谐振带宽变窄。

关键词 光纤光学;光子晶体光纤;光纤光栅;结构性改变;有效折射率

中图分类号 TN253 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201131.0106003

Theroretical Study on a Kind of Photonic Crystal Fiber Grating Based on Structural Change

Qi Yuefeng^{1,2} Bi Weihong^{1,2}

(¹Institutue of Information Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China)
(²Hebei Key Laboratory of Especial Optcal Fiber and Fiber Sensor, Qinhuangdao, Hebei 066004, China)

Abstract A kind of novel photonic crystal fiber grating based on structural change is researched. The influence of refractive index brought by structural change is studied by using multipole method. The relation between effective refractive index and collapsed cladding pillars is gotten. The model of structural changed photonic crystal fiber grating is built. Furthermore, the influence of cladding layers of pillars and the degree of collapsed pillars are discussed. It is shown that periodic collapsed pillars can form grating, and that not only the extent of collapsed pillars, but also the collapse envelope has influence on the magnitude and distribution of effective refractive index. As the layers of pillars increase, the resonant wavelength shows blue shift, the grating has wider bandwidth and weaker resonance intensity. Under the same fiber structure, resonant wavelength shows red shift and grating has narrower bandwidth with increasing the extent of collapsed pillars.

Key words fiber optics; photonic crystal fiber; fiber grating; structural chenge; effective refractive index

OCIS codes 060.2310; 060.2340; 050.2770

1 引 言

光纤光栅(FG)作为一种重要的无源器件,在光纤通信、光纤传感等领域获得了广泛的应用^[1~4]。目前常用的光纤光栅制作工艺大多采用紫外曝光法,利用相位模板在光敏光纤或经过载氢处理的普通单模光纤中写入,其优点是技术成熟,简单易行。

但是其缺点是光栅性能随时间退化,长期稳定性难以保证,例如利用低温高压载氢技术写入的光栅在室温下 2 个星期其光致折射率下降 11%^[5];另外一个问题就是光栅的热稳定性,在高温环境下,光栅会消退,甚至被完全擦除,例如锗/硼双掺杂光纤光栅在 400 °C 下 2~3 h 就会被完全擦除^[6]。这些缺点

收稿日期: 2010-05-05; 收到修改稿日期: 2010-06-18

基金项目: 国家 973 计划(2010CB327801)、国家自然科学基金(60850001)和河北省自然科学基金(F2010001286)资助课题。

作者简介: 齐跃峰(1972—),男,博士,副教授,主要从事光纤通信方面的研究。E-mail: yfqi@ysu.edu.cn

大大限制了光纤光栅在一些领域的应用。

光子晶体光纤(PCF)的出现为解决这一问题提供了一个新的思路,本文在总结传统光纤光栅优缺点以及前人研究成果的基础上,研究了一种基于结构改变的新型光纤光栅—光子晶体光纤光栅(PCFG)。这种光栅无需纤芯掺杂或载氢处理,而是通过改变 PCF 本身结构来形成光栅,因而从根本上克服了常规光纤光栅热稳定性和长期稳定性难以保证的问题,在桥梁、大坝等大结构建筑长期健康监测等领域具有很大的潜在应用价值^[7,8]。

2 理论基础

利用结构性改变的方法在 PCF 中制作光栅是由新加坡南洋理工大学的 Yinian Zhu 等^[9]在 2003 年提出,在无掺杂全内反射型 PCF 上,利用 CO₂ 激光器作为热光源,使 PCF 的包层空气孔按设定间距塌缩,塌缩的空气孔会改变光纤的有效折射率,类似于紫外曝光法在光纤中引入折射率微扰,从而形成光栅。

对于这种基于结构性改变的成栅工艺,以往的文献中仅仅给出了它的原理性描述,未能给出明确的数学分析^[10]。本文利用多极法结合耦合模理论,从空气孔塌缩对光纤有效折射率的影响入手,建立了结构性改变的 PCFG 模型,对其进行了详细的数学分析,并对所成光栅性能进行了仿真,验证了这种成栅工艺的可行性。

2.1 光子晶体光纤

PCF 通常又称为微结构光纤(MF),或多孔光纤(HF)^[11]。PCF 是由单一介质(纯石英或聚合物)和空气进行周期(或无序)排列而成,在中心形成缺陷(空芯或实芯),如图 1 所示。根据传导机制的不同可以将 PCF 分为全内反射型 PCF 和带隙型 PCF,分别如图 1(a)和(b)所示。PCF 包层空气孔的大小、排列的方式、空气孔间距以及纤芯的形成方式直接决定其传输性能^[12]。

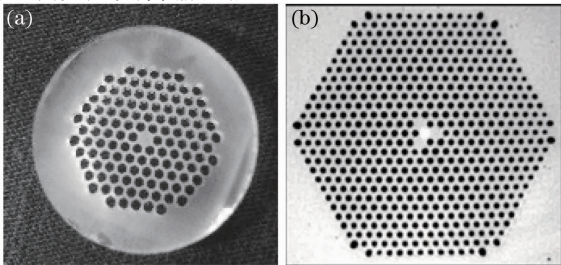


图 1 光子晶体光纤。(a)全内反射型,(b)光子带隙型
Fig. 1 Photonic crystal fibers. (a) total internal reflection, (b) photonic bandgap

2.2 结构性改变对有效折射率影响

多极法理论由 Rayleigh 在 1892 年提出,T. P. White 等^[13~15]将其引入到 PCF 色散及损耗特性的计算。利用多极法,研究了空气孔塌缩对有效折射率的影响^[16]。计算中设定塌缩程度从包络边沿开始到塌缩最低点处包层空气孔半径从 1.9 ~ 0.2 μm 连续变化,空气孔半径越小,代表塌缩程度越大。采用分段线性化方法,对不同位置处有效折射率分别进行计算。计算结果表明:随着空气孔塌缩程度的增加,有效折射率增加;有效折射率的改变除了与塌缩程度有关外,其分布规律还与塌缩包络函数有关。正弦与方波包络下塌缩程度与有效折射率关系部分数据如表 1 所示。正弦与方波包络下有效折射率与塌缩程度关系曲线如图 2 所示。

表 1 不同包络下塌缩程度与有效折射率数据

Table 1 Data of effective refractive index under different collapse envelopes and degrees

Collapse degree / μm	Effective refractive index (sine envelope)	Effective refractive index (rectangle envelope)
0.20	1.4434506627	1.4439658528
0.30	1.4431440870	1.4437514908
0.40	1.4427904560	1.4436847138
.....
1.60	1.4282071151	1.4282071151
1.70	1.4283687591	1.4283687591
1.80	1.4276466353	1.4276466353

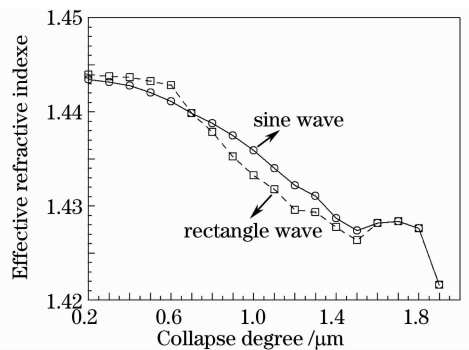


图 2 有效折射率与塌缩程度关系曲线

Fig. 2 Variation of effective refractive index with collapse degree

利用表 1 数据可求出包层凹陷部分有效折射率沿轴向(z 方向)分布规律。选择具有代表性的正弦包络下有效折射率数据进行 5 阶拟合,得到有效折射率在塌缩部分沿轴向的分布关系式:

$$f(z) = \sum_{k=0}^5 a_k \exp(kz), \quad -\frac{\omega}{2} \ll z \ll \frac{\omega}{2}, \quad (1)$$

式中 ω 为塌缩宽度, a_k 为展开式系数,由矩阵 A 决定:

$$\mathbf{A} = [1.138 \times 10^7, -5.581 \times 10^7, \\ 1.636 \times 10^8, -3.187 \times 10^8, \\ 4.331 \times 10^8, -4.189 \times 10^8]. \quad (2)$$

2.3 理论分析

热激条件下,精确控制热激周期、热激功率和热激时间,PCF包层空气孔会按照设定的间距和深度塌缩变形,塌缩后光纤纵向形变如图3所示。

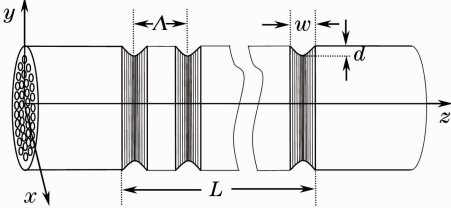


图3 塌缩后 PCF
Fig.3 Collapsed PCF

图3中 Δ 为塌缩周期,也即光栅周期; w 为塌缩宽度,取决于热激光斑尺寸(使用激光器热激时); d 为塌缩深度,取决于热激功率和热激时间。采用正弦包络时光纤中的折射率分布模型如图4所示,假设光纤中折射率在径向为均匀分布。

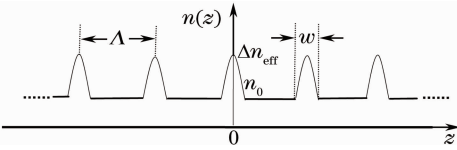


图4 PCFG 折射率分布模型

Fig.4 Distribution model of effective refractive index in PCFG

图4中, n_0 为光纤中未塌缩部分的有效折射率, Δn_{eff} 为塌缩部分的有效折射率最大值,即折射率调制幅度。 $n(z)$ 可表示为

$$n(z) = \begin{cases} n_0 + f(z), & k\Delta - w/2 \leq z \leq k\Delta + w/2 \\ n_0, & k\Delta - w/2 > z, z > k\Delta + w/2 \end{cases}, \quad (3)$$

式中 k 为整数。将(1)式代入(3)式,并进行傅里叶级

数展开,取前5阶得

$$n(z) = n_0 + \sum_{k=0}^5 b_k \cos\left(k \frac{2\pi}{\Delta} z\right), \quad (4)$$

式中 b_k 为傅里叶级数展开系数,由矩阵 \mathbf{B} 决定:

$$\mathbf{B} = [1.435, -0.008822, \\ -0.0002008, -0.1478305, \\ -0.0001246, -0.0004898]. \quad (5)$$

根据耦合模理论,第 q 阶包层谐振模与纤芯模之间的耦合系数 C_q 为^[17]

$$C_q = \zeta_q(z) + 2k_q(z) \sum_{k=0}^5 c_k \cos\left(k \frac{2\pi}{\Delta} z\right), \quad (6)$$

式中 $\zeta_q(z)$ 为自耦合系数, $k_q(z)$ 为互耦合系数,分别由下式决定^[17]:

$$\begin{cases} \zeta_q(z) = \frac{\Delta n_{\text{eff}} \omega}{2} \iint_{\Omega} e_q(x, y) \cdot e_{\text{core}}(x, y) dx dy \\ k_q(z) = \frac{s}{2} \zeta_q(z) \end{cases}, \quad (7)$$

式中 $e_q(x, y)$ 为第 q 阶谐振模的电场分布, $e_{\text{core}}(x, y)$ 为纤芯模电场分布, Ω 为光纤光栅区域, s 为光栅条纹可见度,取常数0.6。将(6)、(7)式代入耦合模方程,求解方程即可得到光栅的归一化振幅和反射率^[17]。

3 数值仿真与结果讨论

3.1 结构性改变 PCFG 传输谱特性

利用分析方法,对一种具有七层三角形空气孔排布的全内反射型 PCF 进行了仿真。光纤结构参数如下:其中空气孔直径 $h = 1.84 \mu\text{m}$,空气孔间距 $p = 4.8 \mu\text{m}$,光纤外径 $D = 125 \mu\text{m}$,光栅长度 $L = 20 \text{ mm}$,光纤芯径 $d_0 = 2p - h = 7.76 \mu\text{m}$,光纤材料为 SiO_2 ,折射率 $n_{\text{SiO}_2} = 1.4466$,光栅周期为 $\Delta = 4.35 \mu\text{m}$ 。外径塌缩最大深度 $m = 5 \mu\text{m}$,不同位置包层空气孔塌缩程度不同,由外至内塌缩深度在 $0.2 \sim 1.1 \mu\text{m}$ 之间。根据以上参数所成 PCFG 结构模型及传输谱仿真结果分别如图5(a)和(b)所示。

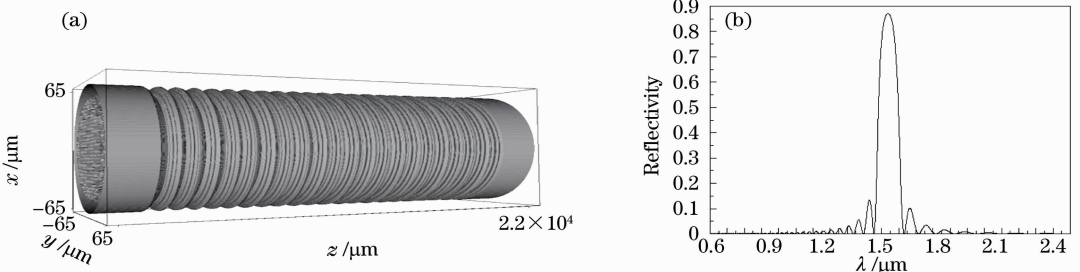


图5 PCFG 结构模型及传输谱。(a)纵向结构,(b)传输谱

Fig.5 Configuration and transmission spectrum of PCFG. (a) longitudinal configuration, (b) transmission spectrum

由图 5 可以看出,通过周期性结构改变后的 PCF 出现了很好的光栅效应,其谐振波长 $\lambda_g = 1.55 \mu\text{m}$,谐振带宽约为 100 nm,谐振峰强度约为 0.86。

3.2 空气孔层数对光栅性能的影响

PCF 结构尤其是包层空气孔层数对 PCFG 性能有显著影响。表 2 是 PCFG 谐振波长、带宽和反射峰强度随包层空气孔层数变化数据,图 6 为谐振波长、谐振带宽与空气孔层数变化曲线。由表 2 和图 6 可以看出,随着包层空气孔层数增加,谐振波长向短波长方向移动,带宽明显变宽,反射峰强度增加。

表 2 空气孔层数与谐振波长、带宽和反射峰强度数据

Table 2 Data of resonance wavelength, bandwidth, reflection-peak intensity and air-hole layer number

Layers	Resonance wavelength / μm	Bandwidth / nm	Intensity
1	1.5512	0.8	0.6032
2	1.5511	1.6	0.6878
3	1.5510	3.2	0.7962
4	1.5506	8.0	0.8543
5	1.5499	20.6	0.9054
6	1.5479	61.8	0.9437
7	1.5472	134.4	0.9828

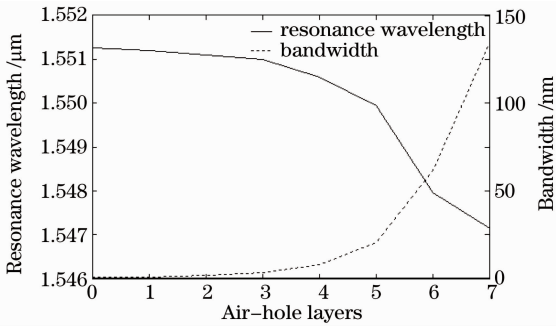


图 6 空气孔层数与谐振波长和带宽变化关系

Fig. 6 Curves of resonance wavelength and bandwidth varying with air-hole layers

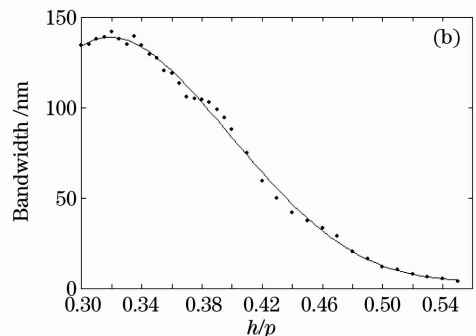
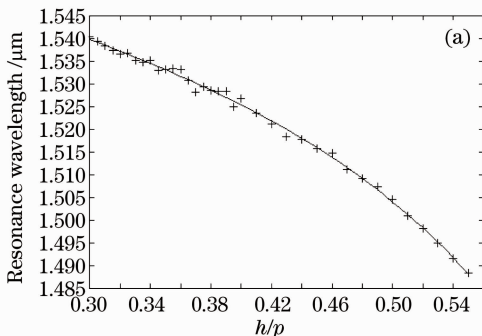


图 8 (a)谐振波长随 h/p 变化的拟合曲线,(b)带宽随 h/p 变化的拟合曲线

Fig. 8 (a) Curve of resonance wavelength varying with h/p , (b) curve of bandwidth varying with h/p

3.3 空气孔塌缩层数对折射率的影响

除了包层中空气孔排布及层数外,空气孔塌缩层数对有效折射率也有明显影响。仿真时设定包层空气孔塌缩层数逐渐增加,并且每一层塌缩程度由轻到重划分为 2 个等级。图 7 是当外 2 层(第 6、7 层)和外 4 层(第 4、5、6、7 层)空气孔塌缩时 PCFG 有效折射率随波长变化情况。从图中可以看出,随着波长增大,有效折射率呈下降趋势;空气孔塌缩层数越多,塌缩程度越严重,包层有效折射率就越大。

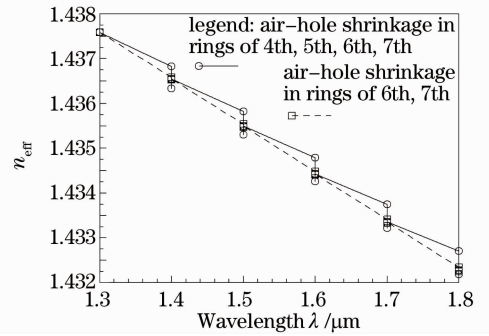


图 7 外 2 层和外 4 层空气孔塌缩时有效折射率与波长关系

Fig. 7 n_{eff} versus λ with the shrunken air-hole in the rings of 6th, 7th and rings of 4th, 5th, 6th and 7th

3.4 空气孔占空比 h/p 对光栅性能的影响

空气孔占空比 h/p 对光栅性能也有明显影响,图 8 为 h/p 与谐振波长 λ_g 和带宽 $\Delta\lambda$ 关系曲线。从图中可以看出,空气孔占空比 h/p 从 0.3 到 0.55 的变化过程中,谐振波长和带宽都呈现下降趋势,原因是在 h/p 增加的过程中,包层有效折射率下降,根据 PCFG 包层模谐振条件^[18], $\lambda_{\text{clad}, i} = (n_{\text{clad}, i} + n_{\text{core}})\Delta$, 谐振波长向短波方向漂移。带宽变窄是因为在仿真中设定的纤芯直径与空气孔间距之间的函数关系是 $d_0 = 2p - h$,如果 h 不变, h/p 增加意味着 p 减小,即芯径 d_0 变小;如果 p 不变,当 h/p 增加意味 h 增大,

仍然得出芯径 d_0 变小的结论,即芯径减小,基模与高阶包层模的耦合区域减小,满足相位匹配条件的模式减少,因而带宽变窄。从图中还可以观察到当 $h/p=0.32$ 时,带宽达到最大值,约为 140nm。

3.5 空气孔塌缩程度对光栅性能的影响

相同光纤结构下,空气孔塌缩程度对 PCFG 性能影响关系如图 9 所示。

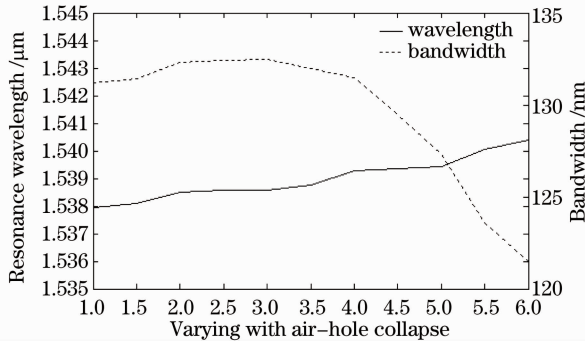


图 9 气孔塌缩程度与谐振波长和带宽之间的关系
Fig. 9 Curves of resonance wavelength, bandwidth varying with air-hole collapse

计算时设定包层空气孔塌缩层数逐渐增加,并且每一层塌缩程度由轻到重划分为 2 个等级。计算发现,随着空气孔塌缩程度的增加,包层有效折射率变大,谐振波长向长波长方向移动,带宽变窄。由图 9 还可以看出,在每一层的塌缩中,谐振波长基本不受影响,这是因为仿真时设定的空气孔直径较小,所以在塌缩层数相同而塌缩程度不同时有效折射率改变不大,如果空气孔直径较大,那么谐振波长变化将会比较显著。

4 结 论

研究了一种基于结构性改变的新型光纤光栅—PCFG,理论分析了此种光纤光栅的成栅原理,并对所成光栅性能与光纤结构、成栅工艺之间的关系进行了探讨。研究表明,利用激光器或电弧等热源使 PCF 包层空气孔按一定要求塌缩可以形成光栅,改变空气孔的塌缩周期、占空比和塌缩程度等参数可以改变所成光栅的谐振波长、谐振带宽等特性。此种光纤光栅工艺无需纤芯掺杂或光纤载氢,具有工艺简单,周期灵活可调的优点,如结合光纤拉丝过程可实现光纤光栅的快速大批量生产;而且从根本上克服了传统光纤光栅热稳定性和长期稳定性不佳的缺点,在传感领域,尤其是高温或需要长期工作的环境下具有较大的潜在应用价值。

参 考 文 献

- Li Zhizhong, Yang Huayong, Cheng Yusheng *et al.*. Pressure sensing characteristics of panda fiber gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 157~162
李智忠, 杨华勇, 程玉胜等. 熊猫光纤光栅压力传感特性研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(1): 157~162
- 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
- Xiong Yanling, Zhao Hong, Zhang Jian *et al.*. Research on optical current transformer based on the fiber Bragg grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(4): 949~953
熊燕玲, 赵洪, 张剑等. 基于光纤光栅的光学电流互感器研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(4): 949~953
- Xu Lingling, Jin Long, Kai Guiyun *et al.*. Switchable dual-wavelength erbium-doped fiber laser with a tilted fiber Bragg grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(9): 1658~1662
徐玲玲, 金龙, 开桂云等. 利用倾斜光纤光栅的可开关双波长光纤激光器[J]. *光学学报*, 2007, **27**(9): 1658~1662
- Dong L., Liu W. F.. Thermal decay of fiber Bragg gratings of positive and negative index changes formed at 193 nm in a boron-codoped germanosilicate fiber[J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(31): 8222~8226
- Guan B. O., Tam H. Y., Tao X. M. *et al.*. Highly stable fiber Bragg gratings written in hydrogen-loaded fiber[J]. *Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(1): 1349~1351
- G. Genty, T. Ritari, H. Ludvigsen. Supercontinuum generation in large mode-area microstructured fibers[J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(21): 8625~8633
- Li Kuo, Zhou Zhenan, Liu Aichun *et al.*. High-sensitivity fiber Bragg grating temperature sensor at high temperature[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 249~251
李阔, 周振安, 刘爱春等. 一种高温下高灵敏光纤光栅温度传感器的制作方法[J]. *光学学报*, 2009, **29**(1): 249~251
- Zhou Yinian, Shum Ping, Chong Hin-Joo. Strong resonance and a highly compact long-period grating in a large-mode-area photonic crystal fiber[J]. *Opt. Express*, 2003, **16**(11): 1900~1905
- Zhou Zhihua, Wang Zhi, Xie Ping *et al.*. Long-period gratings inscribed in photonic crystal fibers[J]. *Laser & Optonics Progress*, 2005, **42**(8): 11~14
周志华, 王智, 谢平等. 基于光子晶体光纤的长周期光栅[J]. *激光与光电子学进展*, 2005, **42**(8): 11~14
- Wang Yiping, Hartmut Bartelt, Wolfgang Ecke *et al.*. Sensing properties of fiber Bragg gratings in small-core Ge-doped photonic crystal fibers[J]. *Opt. Commun.*, 2009, **282**(6): 1129~1134
- A. Cusano, A. Iadicicco, D. Paladino *et al.*. Micro-structured fiber Bragg gratings. Part II: Towards advanced photonic devices[J]. *Optical Fiber Technology*, 2007, **13**(4): 291~301
- T. P. White, B. T. Kuhlmeiy, R. C. McPhedran *et al.*. Multipole method for microstructured optical fibers. I. Formulation[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2002, **19**(10): 2322~2330
- B. T. Kuhlmeiy, T. P. White, G. Renversez *et al.*. Multipole method for microstructured optical fibers. II. Implementation and results[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2002, **19**(10): 2331~2340
- B. T. Kuhlmeiy. Theoretical and Numerical Investigation of the Physics of Microstructured Optical Fibres[D]. Australia: The University of Sydney, 2004. 41~49
- Qi Yuefeng, Bi Weihong, Liu Yanyan *et al.*. Research on transmission spectrum characteristics of the photonic crystal Bragg fiber grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(4): 1178~1183
齐跃峰, 毕卫红, 刘燕燕等. 光子晶体光纤布拉格光栅传输谱特性研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(4): 1178~1183

17 Li Chuan, Zhang Yimo, Zhao Yonggui *et al.*. Fiber Grating: Principles, Techniques, and Sensing Applications[M]. Beijing: Science Press, 2005. 85~88
李 川, 张以谟, 赵永贵 等. 光纤光栅: 原理、技术与传感应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2005. 85~88

18 Li Yan, Liu Jianguo, Kai Guiyun *et al.*. The modal cutoff

properties and exciting conditions of higher order resonant modes for Ge-doped photonic crystal fiber Bragg grating[J]. *Laser & Infrared*, 2007, **37**(2): 147~150
李 燕, 刘建国, 开桂云 等. 光子晶体光纤光栅模式截止与高阶模的谐振条件[J]. *激光与红外*, 2007, **37**(2): 147~150