

doi:10.3788/gzxb20154408.0806004

# 光子晶体光纤长周期光栅栅区塌陷程度的理论研究

段睿智,赵春柳,周雨萌,龚华平

(中国计量学院 光学与电子科技学院,杭州 310018)

**摘要:**采用局域耦合模理论对一种光子晶体光纤长周期光栅的耦合机理和特性进行了研究.建立了栅区模型,用局域耦合模理论和传统的耦合模理论模拟出  $LP_{01}$  和  $LP_{02}$ 、 $LP_{01}$  和  $LP_{11}$  耦合的透射谱,并进行比较.从理论上分析局域耦合模理论对光子晶体光纤长周期光栅的适用性,研究了栅格个数、栅格周期和光栅栅区对透射谱的影响.模拟结果表明:随着栅格周期的增大,谐振波长向短波方向移动;随着栅格个数的增加,透射峰深度增加;随着栅区塌陷深度的增加,谐振波长向长波方向移动.

**关键词:**局域耦合模理论;光子晶体光纤;长周期光栅;耦合模理论;有效折射率;塌陷程度

中图分类号:TN253

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2015)08-0806004-5

## Theoretical Study of Depths of Cladding Collapse of PCF-LPGs

DUAN Rui-zhi, ZHAO Chun-liu, ZHOU Yu-meng, GONG Hua-ping

(China Jiliang University, College of Optical and Electronic Technology, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** A kind of Photonic Crystal Fiber based Long Period Grating (PCF-LPG) was analyzed on basis of the local coupled-mode theory. Transmission spectrum of the coupling between  $LP_{01}$  and  $LP_{02}$ ,  $LP_{01}$  and  $LP_{11}$ , was numerically modeled after building the collapse model. Compared with transmission spectrum calculated with the coupled mode theory, the local coupled-mode theory was found in a good agreement to analyze the strong PCF-LPGs. The changes of resonant wavelength were discussed in different grating periods, number of periods and the depths of cladding collapse. The results indicate that, with the increase of grating period, the resonance wavelength shifts to shorter wavelength; with the increase of number of periods, the resonance depth increases; with the increase of depths of cladding, the resonance wavelength shifts to longer wavelength.

**Key words:** Local coupled-mode theory; Photonic crystal fiber; Long period grating; Coupled mode theory; Ineffective refractive index; Depths of cladding collapse

**OCIS Codes:** 060.2270; 060.2310; 060.2400; 050.2770; 050.5298

## 0 引言

光子晶体光纤与传统光纤相比,具有无截止单模传输、色散色度灵活、大模场面积、高双折射效应、良好的非线性等优良特性,在光纤激光器、非线性光学、光纤传感、光与气体等领域有重要应用<sup>[1-3]</sup>.在光子晶体光纤上引入周期型的折射率调制,使其具有光栅的特性,形成光子晶体光纤长周期光栅,并逐渐开发出许多新型的光纤光栅器件<sup>[4-5]</sup>.

光子晶体光纤长周期光栅可为不同结构光子晶体

光纤的特殊性提供理论依据.耦合模理论是长周期光纤光栅理论分析的有效工具,已经形成了一套比较完善的理论体系.传统的耦合模理论体系<sup>[13-14]</sup>中的一些假设是在折射率调制是微扰的情况下才成立的.目前,许多光子晶体光纤长周期光栅用  $CO_2$  激光器制备而成,由于内部有大量的通气孔,使得制成的光栅折射率调制比较强,用传统耦合模理论计算量大且精度较低.如果模场的扰动相对于波长是缓慢变化的,则该模场在局域内是麦克斯方程解的确切近似,这些模近似为局域模,就可以用局域耦合模理论<sup>[6-7]</sup>来分析这种强折

**基金项目:**国家自然科学基金(No. 61108058)、国家重点基础研究发展计划(No. 2010CB327804)子课题、浙江省钱江人才计划 D 类项目(No. QJD0902005)

**第一作者:**段睿智(1991-),男,硕士研究生,主要研究方向为光纤传感. Email: 360802574@qq.com

**导师(通讯作者):**赵春柳(1958-),女,教授,博士后,主要研究方向为光纤传感领域. Email: clzhao@cjlu.edu.cn

**收稿日期:**2014-12-10; **录用日期:**2015-05-30

<http://www.photon.ac.cn>

射率调制但缓变的长周期光纤光栅了. 本文用局域耦合模理论对光子晶体长周期光栅进行理论上研究, 着重分析光子晶体光纤长周期光栅的结构参数对其透射谱的影响.

## 1 局域耦合模理论

根据局域耦合模理论<sup>[6-8]</sup>, 在求解光子晶体长周期光纤光栅局域模式场时, 可以将一段非均匀的有限长光纤光栅的栅区等分成  $N$  段, 并近似为一个一个的圆柱段. 在每一个圆柱段内, 折射率变化很缓慢, 可以近似相同. 但随着的改变, 每段圆柱段的折射率是渐变的, 同时意味着从一段到下一段传播常数的变化很小, 所以可以把相位和近似为积分  $\int_0^z \beta_j(z) dz$ . 有任意扰动波导的场可精确地表示成局域模式场和辐射场的叠加, 并且只要折射率的变化缓慢, 在传播过程中各个模式的功率是基本上不变的. 这样, 受到调制的光纤中横向电场、磁场可以分别表示为

$$\begin{cases} E_t(x, y, z) = \sum_j E_{t,j}(x, y, z) = \\ \sum_j \{b_j(z) + b_{-j}(z)\} \hat{e}_{t,j}(x, y, z) \\ H_t(x, y, z) = \sum_j H_{t,j}(x, y, z) = \\ \sum_j \{b_j(z) + b_{-j}(z)\} \hat{h}_{t,j}(x, y, z) \end{cases} \quad (1)$$

公式中  $t$  表示横向分量,  $\hat{h}$  表示正交归一性.  $b_j(z)$  同时包含局域模的振幅和相位信息, 负号表示反向传播模式, 可以表示为

$$b_j(z) = a_j(z) \exp\left\{i \int_0^z \beta_j(z) dz\right\} \quad (2)$$

$\hat{e}_{t,j}$  和  $\hat{h}_{t,j}$  分别表示归一化横向电场、磁场分布. 由于光栅的存在, 光纤中不同部分的电介质扰动引起折射率发生调制, 各个模式之间不再相互正交, 不同模式间的能量相互传输, 发生能量交换, 产生模式耦合现象. 根据局域模式的正交归一性可以得到其耦合方程为

$$\begin{cases} \frac{db_j}{dz} - i\beta_j(z)b_j = \sum_k \{C_{jk}(z)b_k + C_{j-k}b_{-k}\} \\ \frac{db_{-j}}{dz} + i\beta_j(z)b_{-j} = -\sum_k \{C_{jk}(z)b_k + C_{-j-k}b_{-k}\} \end{cases} \quad (3)$$

式中  $C_{jk}$  表示耦合系数, 定义为

$$C_{jk} = \frac{1}{4} \int_{A_{\infty}} \{h_{t,j} \times (\partial e_{t,k} / \partial z) - e_{t,j} \times (\partial h_{t,k} / \partial z)\} \cdot z dA (j \neq k) \quad (4)$$

局域耦合模方程展现出一个这样的物理现象: 当光在一扰动光纤中传播时, 纤芯模的部分能量泄露到高阶模、包层模(包括前向和后向)还有辐射模. 局域耦合系数的大小取决于原始模场改变的快慢. 对于长周期光纤光栅, 只需考虑其基模耦合到同向传输的一阶

低奇次包层模当中, 这样, 由方程(1)、(2)可化简耦合模方程, 得到

$$\begin{cases} \frac{da_{co}}{dz} = C(z) \cdot a_{cl} \exp\left\{i \int_0^z [\beta_{cl}(z) - \beta_{co}(z)] dz\right\} \\ \frac{da_{cl}}{dz} = -C(z) \cdot a_{co} \exp\left\{i \int_0^z [\beta_{co}(z) - \beta_{cl}(z)] dz\right\} \end{cases} \quad (5)$$

如果假定  $\Lambda$  为长周期光纤光栅的周期, 那么  $C(z)$ ,  $\beta_{co}(z)$  和  $\beta_{cl}(z)$  都是关于  $z$  的周期函数. 那么可以把  $C(z)$  进行傅里叶展开为

$$C(z) = \sum_{N=0}^{\infty} f_N \exp\left(i \frac{2N\pi}{\Lambda} z\right) \quad (6)$$

$f_N$  表示傅里叶展开后第  $N$  次谐波系数. 与传统耦合模理论一样, 当相位匹配条件满足  $\Delta\varphi = \int_0^z [\beta_{cl}(z) - \beta_{co}(z) + \frac{2N\pi}{\Lambda}] \cdot dz = 0$  时, 才会发生谐振耦合. 那么其谐振波长可以表示为

$$N\lambda_{res} = \int_{z_0}^{z_0+\Lambda} [n_{eff,co}(z) - n_{eff,cl}(z)] \cdot dz \quad (7)$$

## 2 模型建立与仿真

本文所用的光子晶体光纤为长飞 28, 建立的光纤光栅栅区结构模型如图 1, 空气孔之间的间距为  $3.06 \mu\text{m}$ , 空气孔的直径为  $5.60 \mu\text{m}$ , 光栅周期是  $420 \mu\text{m}$ , 栅格个数为 30 个, 所用光纤基底折射率 1.4457, 并假设其不随着栅区塌陷深度改变(这种改变足够小可以忽略). 我们在进行模拟仿真的时候, 把每个栅区的部分都理想认为是轴对称, 并把其分为相互对称的 5 个部分,  $L_{AB} = 28 \mu\text{m}$ ,  $L_{BC} = 7 \mu\text{m}$ . 从图中 5 个横截面可以看出包层空气孔在栅区不同的位置有着不同的塌陷, 这种模型的构建与用  $\text{CO}_2$  激光器刻写出来的光子晶体光纤长周期光栅的横截面相吻合.

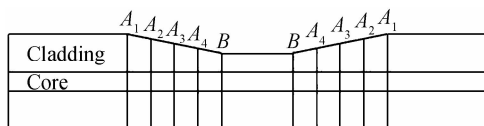


图 1 光纤光栅栅区模型示意图

Fig. 1 The collapse model of PCF-LPGs

本文用 COMSOL Multiphysic 软件作为有限元法的分析工具, 数值模拟出光纤在各个截面  $\text{LP}_{01}$ 、 $\text{LP}_{02}$  以及  $\text{LP}_{11}$  的有效折射率和模场分布<sup>[9-10]</sup>.  $\text{LP}_{01}$  在栅区各个截面有效折射率保持不变(1.4403), 所以图 2 只给出包层模有效折射率变化. 可以看出随着栅区深度的改变,  $\text{LP}_{02}$  和  $\text{LP}_{11}$  在各截面有效折射率也跟着改变, 都在栅区最深处最小, 并且  $\text{LP}_{02}$  有效折射率变化幅度比  $\text{LP}_{11}$  小. 图 3 是在入射波长为  $1550 \text{ nm}$  的传输光在栅区不同位置的  $\text{LP}_{02}$  和  $\text{LP}_{11}$  模场分布: (a)、(b) 分别表示在  $A_1$  截面  $\text{LP}_{02}$  和  $\text{LP}_{11}$  沿  $y$  轴方向模场分布情况; (c)、(d) 分别表示在  $B$  截面  $\text{LP}_{02}$  和  $\text{LP}_{11}$  沿  $y$  轴方向模场分

布情况.从图3可发现,随着栅区深度的变化,LP<sub>01</sub>模场分布变化很小,LP<sub>02</sub>和LP<sub>11</sub>的模场分布变化较大.这是因为包层中多层空气孔,将基模中的能量牢牢束缚在中间,但包层空气孔结构的改变会影响包层模的有效折射率和模场分布.

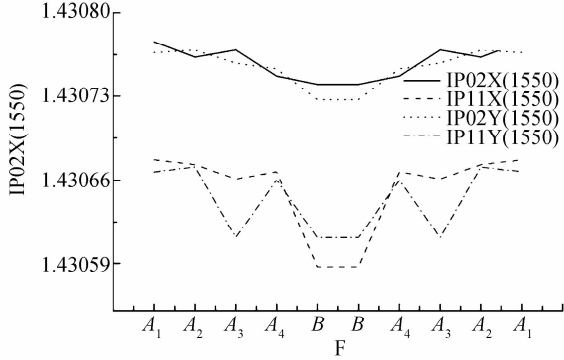


图2 栅区有效折射率变化情况

Fig. 2 The effective refractive index in collapse model

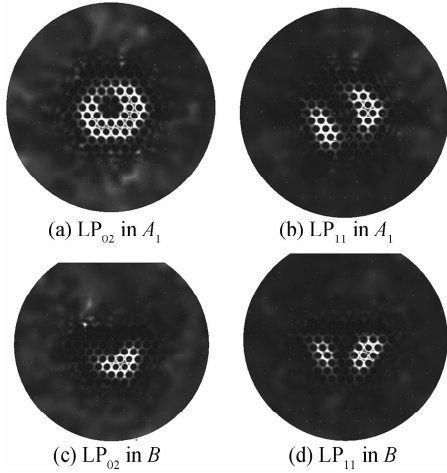
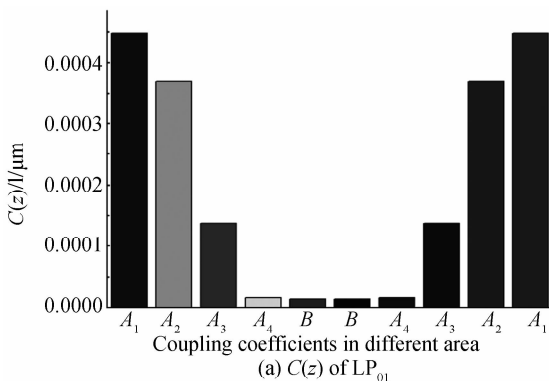


图3 LP<sub>02</sub>和LP<sub>11</sub>模场示意图

Fig. 3 The LP<sub>02</sub> and LP<sub>11</sub> cladding mode

将所求的各个模式的电磁场值带入式(4),得到基膜和两个包层模之间的耦合系数,其耦合系数在栅区各区域如图4,(a)和(b)分别表示LP<sub>01</sub>和LP<sub>02</sub>耦合系数以及LP<sub>01</sub>和LP<sub>11</sub>耦合系数在栅区的变化情况.由式(4)可以知道有效折射率跟光纤横截面模场随着z方向的改变速率有关,所以栅区各部分的耦合系数大小不一样.



(a) C(z) of LP<sub>01</sub>

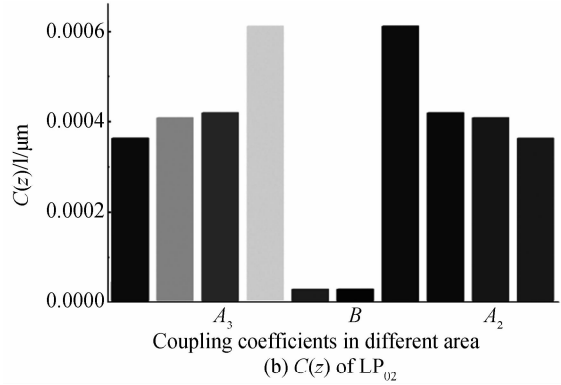


图4 栅区不同区域的耦合系数

Fig. 4 Coupling coefficients in different area

根据求得的耦合系数可以得到该光子晶体光纤长周期光栅的透射谱,所得仿真结果如图5实线所示:LP<sub>01</sub>和LP<sub>02</sub>耦合所得谐振峰在1568nm处,谐振深度为11.52dB;LP<sub>01</sub>和LP<sub>11</sub>耦合所得的谐振峰在1482.1nm处,谐振深度为1.03dB.图5虚线表示的是用传统耦合模理论模拟的结果,LP<sub>01</sub>和LP<sub>02</sub>耦合所得谐振峰在1566.6nm处,谐振深度为7.24dB;LP<sub>01</sub>和LP<sub>11</sub>耦合所得的谐振峰在1479.8nm处,谐振深度为2.06dB.相比两种方法,所求的谐振波长相差不大,但谐振深度有着明显的差异.传统耦合模理论和局域耦合模理论最大的不同在于,传统耦合模理论认为沿着光纤模式耦合是连续发生的,所以耦合系数沿着整根光纤被认为是一个常数;而局域耦合模理论认为模式耦合只发生在扰动区域(即光栅栅区部分),耦合系数表征着光纤模式能量交换的快慢程度,局域耦合模理论把栅区分为多个部分,每个部分耦合系数都不同,近似为一连续函数,相当于把栅区微分,更接近CO<sub>2</sub>激光器制作的光子晶体光纤长周期光栅的真实值.

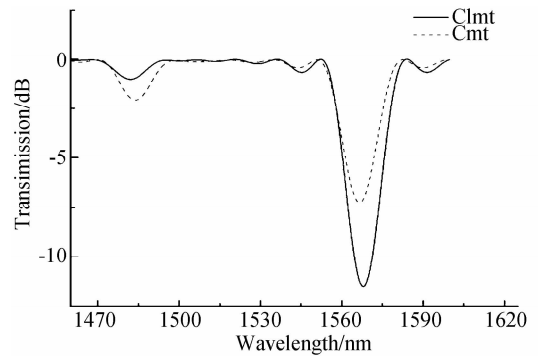


图5 光子晶体光纤长周期光栅透射谱

Fig. 5 Transmission spectrum of PCF-LPGs

### 3 光栅结构参数对谐振波长的影响

用局域耦合模理论研究不同的栅格个数、栅格周期和栅区坍塌深度对透射谱的影响<sup>[11-12]</sup>.

#### 3.1 栅格周期对透射谱的影响

根据相位匹配条件,谐振波长跟光栅周期有很直

观的联系<sup>[13-15]</sup>. 图 6(a) 是栅格周期在 410  $\mu\text{m}$  到 440  $\mu\text{m}$  透射谱的变化情况, 可以明显地观察到, 随着栅格周期的增大, 谐振波长向短波方向移动, 并且谐振深度随之增大. 将不同周期下的透射谱的谐振波长和共振深度绘制关系曲线图, 如图 6(b), 发现在相同栅格个数、不同栅格周期的情况下, 同一模式与基模形成的谐振峰的谐振波长和共振深度成一定的线性关系.

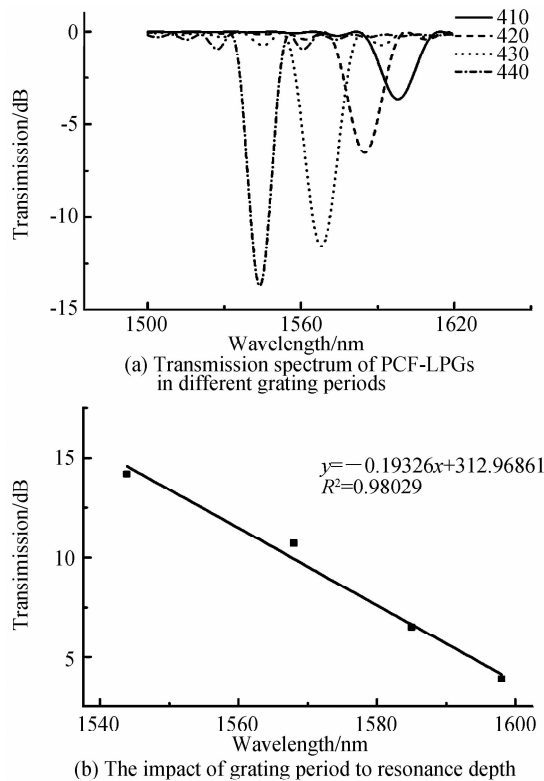


图 6 栅格周期对透射谱的影响

Fig. 6 The impact of grating period to transmission spectrum

### 3.2 栅格个数对透射谱的影响

从理论上来看, 栅格个数只加强模式之间的耦合强度, 对谐振波长没有影响. 图 7 是不同栅格个数 10-25 下的透射谱的模拟结果, 说明光子晶体光纤长周期光栅也遵循这种规律.

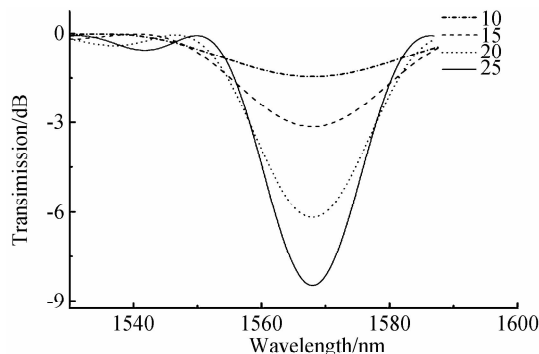


图 7 不同栅格个数下的透射谱

Fig. 7 Transmission spectrum of PCF-LPGs in different number of periods

### 3.3 光栅栅区塌陷程度对透射谱的影响

在用  $\text{CO}_2$  激光器刻制光纤光栅的时候, 曝光强度的调节决定着栅区的塌陷深度. 从理论上来看, 栅区塌陷地越深, 表征着介质扰动引起的光纤模式间的耦合越强烈, 也就是耦合系数越大, 耦合系数越大, 使得谐振深度越深<sup>[5]</sup>. 图 8(a) 是栅区塌陷深度从 3.8  $\mu\text{m}$  到 5.6  $\mu\text{m}$  光栅透射谱, 很好地反映了这一结论. 图 8(b) 是谐振波长与塌陷深度关系图, 有良好的线性关系. 图 8(c) 是谐振深度和塌陷深度的关系图. 这些关系可以从理论上指导光子晶体光纤长周期光栅的制作, 可以通过调节曝光强度得到想要的谐振波长或谐振深度的光栅.

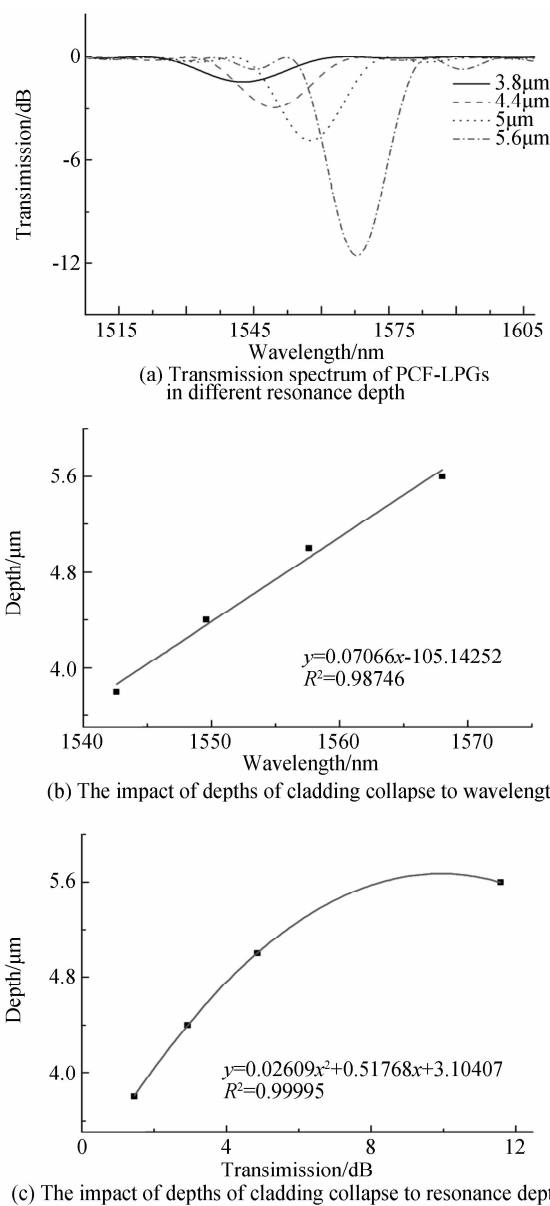


图 8 谐振深度对透射谱的影响

Fig. 8 The impact of depths of cladding collapse to transmission spectrum

## 4 结论

研究了光子晶体光纤长周期光栅的耦合机理,用局域耦合模理论建立了强折射率调制的折射率引导型光子晶体光纤长周期光栅的模型,证明了传统耦合模理论对这种强折射率调制光纤光栅分析的限制性,并对不同栅格个数、不同栅格周期、不同栅区深度的情况下研究了其传输特性,并分析了产生这一系列变化的原因,为其今后光子晶体光纤长周期光栅的发展、制造和使用提供了理论依据。

### 参考文献

- [1] CHEN Wei-guo, LOU Shu-qin, WANG Li-wen, *et al.* Properties of long period gratings in photonic crystal fibers[J]. *Chinese Journal of Laser*, 2009, **36**(3): 699-704.  
陈卫国, 娄淑琴, 王立文, 等. 光子晶体光纤长周期光栅的特性[J]. *中国激光*, 2009, **36**(3): 699-704.
- [2] RAMASWAMI R. Optical fiber communication: from transmission to networking [J]. *Communications Magazine IEEE*, 2002, **40**(5): 138-147.
- [3] LUAN F, GEORGE A K, HEDLEY T D, *et al.* All-solid photonic bandgap fiber. [J]. *Optics Letters*, 2004, **29**(2): 2369-2371.
- [4] HE Z, ZHU Y, DU H. Long-period gratings inscribed in air- and water-filled photonic crystal fiber for refractometric sensing of aqueous solution [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, **92**(4): 044105.
- [5] XIAO L, DEMOKAN M S, JIN W, *et al.* Fusion splicing photonic crystal fibers and conventional single-mode fibers: microhole collapse effect [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2007, **25**(11): 3563-3574.
- [6] JIN L, JIN W, JU J, *et al.* Coupled local-mode theory for strongly modulated long period gratings [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, **28**(12): 1745-1751.
- [7] JIN L, JIN W, JU J, *et al.* Investigation of long-period grating resonances in hollow-core photonic bandgap fibers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2011, **29**(11): 1708-1714.
- [8] QI Yue-feng, ZHOU Li-ying, BI Wei-hong, *et al.* Research on transmission mechanism and characteristics of hollow-core photonic bandgap fiber gratings [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, **33**(10): 56-61.  
齐跃峰, 周丽英, 毕卫红, 等. 空芯光子带隙光纤成栅机理及特性研究[J]. *光学学报*, 2013, **33**(10): 56-61.
- [9] COELHO T V N, CARVALHO J P, PONTES M J, *et al.* A remote long-period grating sensor with electrical interrogation assisted by Raman amplification [J]. *Optics & Laser Technology*, 2013, **47**(4): 107-113.
- [10] JHA R, VILLATORO J, BADENES G, *et al.* Refractometry based on a photonic crystal fiber interferometer. [J]. *Optics Letters*, 2009, **34**(5): 912-915.
- [11] TURAN E. Fiber grating spectra[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1997, **15**(8): 1468-1488.
- [12] JHA R, VILLATORO J, BADENES G, *et al.* Refractometry based on a photonic crystal fiber interferometer [J]. *Optics Letters*, 2009, **34**(5): 617-619.
- [13] NI Y, ZHANG L, AN L, *et al.* Dual-core photonic crystal fiber for dispersion compensation[J]. *Photonics Technology Letters IEEE*, 2004, **16**(6): 1516-1518.
- [14] FENG De-quan, QIAO Xue-guang, WANG Hong-liang, *et al.* Experimental study of large range enhanced pressure sensitivity concerning fiber Bragg grating pressure sensor[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(7): 1273-1276.  
冯德全, 乔学光, 王宏亮, 等. 大范围光纤 Bragg 光栅压力传感器增敏实验研究[J]. *光子学报*, 2007, **36**(7): 1273-1276.
- [15] WEIBLEN R, DOCHERTY A, HU J, *et al.* Calculation of the expected bandwidth for a mid-infrared supercontinuum source based on As(2)S(3) chalcogenide photonic crystal fibers[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(25): 26666-26674.