

光子晶体光纤布拉格光栅慢光的研究

宋民青^{1,2}, 侯尚林¹, 张保侠¹, 黎锁平¹, 刘廷君¹

(1. 兰州理工大学 理学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 青海大学 物理教研室, 青海 西宁 810016)

摘要: 采用改进的全矢量有效折射率法和耦合模理论, 研究了光子晶体光纤布拉格光栅长度、占空比、光栅周期与慢光的变化规律。结果表明当光栅长度和光栅周期不变时, 随着包层空气孔占空比的增大, 光栅的慢光峰值波长出现蓝移, 且时延量逐渐减小; 1.06 cm 长的光子晶体光纤布拉格光栅可以产生约 52 ps 的线性时延; 光栅长度越大, 慢光时延量越大; 优化结构参数, 在光子晶体光纤布拉格光栅的时延谱的侧瓣附近会产生最大群速度为 $c/371$ 的慢光峰。

关键词: 光子晶体光纤; 布拉格光栅; 有效折射率法; 耦合模理论; 慢光

中图分类号: TN252 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)06-1547-06

Investigation on slow light of photonic crystal fiber Bragg gratings

Song Mingqing^{1,2}, Hou Shanglin¹, Zhang Baoxia¹, Li Suoping¹, Liu Yanjun¹

(1. School of Science, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

2. Physics Department, Qinghai University, Xi'ning 810016, China)

Abstract: The influence of grating length, air filling factor and grating period of photonic crystal fiber Bragg grating (PCFBG) on slow light was investigated by improved full vector Effective Index Method (IEIM) and the Coupled-mode theory. The results indicate that the slow light peak wavelength of PCFBG shows a blue shift as the filling factor increases, and the slow light of PCFBG decreases gradually while keeping the grating length and grating period as constants; 1.06 centimeter-long PCFBG can produce linear delay of about 52 ps; slow light of PCFBG increases with the grating length increase; the maximum group velocity of $c/371$ exists in the vicinity of the side-lobes under optimizing the structure parameters.

Key words: photonic crystal fiber; fiber Bragg grating; effective index method; coupled-mode theory; slow light

收稿日期: 2012-10-05; 修订日期: 2012-11-07

基金项目: 国家自然科学基金(61167005); 甘肃省自然科学基金(1112RJZA018)

作者简介: 宋民青(1970-), 男, 硕士生, 主要从事光纤慢光方面的研究。Email: qhusmq@yahoo.com.cn

导师简介: 侯尚林(1970-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为新型光纤与光传感、光子晶体光纤技术和光纤光栅技术方面的研究。
Email: houshanglin@gmail.com

0 引言

光子晶体光纤(Photonic Crystal Fiber, PCF)是一种在纤芯周围沿轴向周期性排列微孔结构的新型光纤^[1]。由于 PCF 可通过改变其横截面的几何特征来获得一系列“奇异”的光学特性,如:无穷单模传输^[2],高非线性^[3],大模场面积^[4]等。因此,PCF 可用来制作优异的传输介质以及功能新奇的光子器件,并迅速成为光电子领域的研究热点。

近年来,在光学领域有关慢光或快光的相关现象引起了学者们的极大兴趣^[5],对色散介质中传播的光脉冲群速度的调控也成为可能。光脉冲的群速度与光的真空速度 c 有很大的不同:群速度可以远小于 c ,称为“慢光”^[6];也可以大于 c 或成为负值,称为“快光”^[7],当群速度为负时,脉冲包络在色散材料中向后传输,因此也称为“后向光”^[8]。

光纤光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)是通过一定的方法在光纤纤芯形成永久性折射率周期性变化的一种新型的光无源器件^[9],具有体积小、插入损耗低、抗干扰能力强等优点。近年来报道了光纤光栅的慢光的研究,如 Joe T. Mok 等人^[10]对于均匀 FBG 的能带光孤子进行研究,在 1550 nm 附近得到群速度为 $c/3.3$ 的慢光。Kai Qian 等人^[11]实验证明了利用掺 Er/Yb 的 FBG 来实现光时延的调谐,通过改变 980 nm 的泵浦,实验得到了 0.9 ns 的时延。

在光敏光子晶体光纤上写入光纤光栅具有更大的设计自由度、更宽的波长调谐范围、及低阶的包层模对外界的折射率、温度的不敏感,可进行多参量、多功能感测等特点^[12]。这些优良特性使得光子晶体光纤光栅在光通信、光传感及光信息处理等领域都有很大的潜在应用价值^[13-14]。但是目前对于基于光子晶体光纤光栅慢光的研究仍比较少^[15]。光子晶体光纤布拉格光栅(PCFBG)慢光技术可在再生器、激光雷达系统、干涉技术、光学缓冲器、光开关等方面有潜在的应用^[16-17]。

文中采用改进的全矢量有效折射率法和耦合模理论,研究了光子晶体光纤布拉格光栅结构参数与慢光时延特性的变化规律,优化 PCFBG 的结构参数,设计出了比现有报道群速度还要低的慢光 PCFBG。这些结论对于设计基于 PCFBG 的新型光电

子器件具有重要意义。

1 理论基础

1.1 改进的全矢量有效折射率法

利用改进的有效折射率法分析光子晶体光纤的过程如图 1、2 所示。图 1 的左图是全反射型光子晶体光纤的纵截面图,空气孔间距为 Λ ,空气孔直径为 d 。为了简化计算,将微结构光纤包层中规则分布的六角单元包等效为与其面积相等的圆形单元包,如图 1 右图所示。设六边形的单元包有一个外部环形边界,半径取 $r_e = \Lambda \sqrt{\frac{\sqrt{3}}{2\pi}}$,空气孔半径 $r_a = d/2$,空气孔中的折射率为 n_a ,空气孔外包层的石英硅折射率为 n_{si} 。根据电磁场理论,可得出单元包的特征方程为^[18]:

$$\left(\frac{P_1'(U_c)}{U_c P_1(U_c)} + \frac{I_1'(W_c)}{W_c I_1(W_c)} \right) \left(\frac{n_{si}^2 P_1'(U_c)}{U_c P_1(U_c)} + \frac{n_a^2 I_1'(W_c)}{W_c I_1(W_c)} \right) = \rho^2 \left(\frac{1}{U_c^2} + \frac{1}{W_c^2} \right) \left(\frac{\beta}{k} \right)^2 \quad (1)$$

式中: $P_1'(U_c) = J_1'(U_c) Y_1 \left(\frac{U_c}{r_a} r_e \right) - Y_1'(U_c) J_1 \left(\frac{U_c}{r_a} r_e \right)$ 通过上方程,设 $l=1$,可以解得 EH11 包层基模的最大传输常数 β_{FSM} ,于是基空间填充模(FSFM)的有效折射率(即包层有效折射率)可以通过 $n_{FSFM} = \beta_{FSM}/k$ 得出。

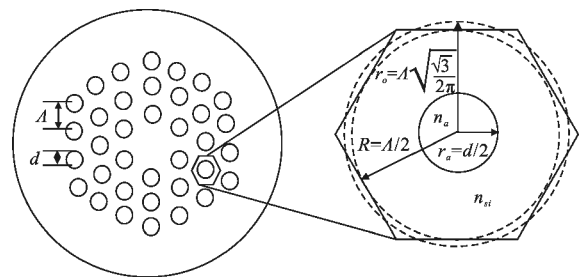


图 1 采用有效折射率法分析 PCF 的示意图

Fig.1 Diagram of PCF analyzed by EIM

根据有效折射率法的基本思想,可以将光子晶体光纤等效为标准的阶跃光纤来处理,光纤包层的有效折射率由最大基空间填充模(FSFM)的有效折射率近似代替。具体结构如图 2 所示。图中的 n_{si} 为纤芯折射率, n_{FSFM} 为包层有效折射率。

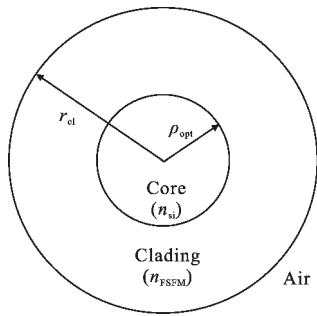


图 2 PCF 阶跃光纤近似的示意图

Fig.2 Conventional step-index fiber model used for PCF

在光子晶体光纤中等效纤芯半径是一个随着光子晶体光纤结构变化的量。在文中,采用有效纤芯半径为空气孔占空比 d/Λ 的函数^[19],如下:

$$\frac{\rho_{opt}}{\Lambda} = c_1 / \left\{ 1 + \exp \left[\left(\frac{d}{\Lambda} - c_3 \right) / c_2 \right] \right\} \quad (2)$$

式中: c_1 、 c_2 和 c_3 分别为 0.686 064, 0.265 366 和 1.291 08。

根据电磁场理论,利用轴向场分量和切向场分量的关系以及电磁场的边界条件,可得到如下的特征方程^[18]:

$$F \left[\frac{n_{si}^2}{n_{FSFM}^2} \frac{J_m'(U)}{U J_m(U)} + \frac{K_m'(W)}{W K_m(W)} \right] = m^2 Q \left(\frac{n_{si}^2}{n_{FSFM}^2 U^2} + \frac{1}{W^2} \right) \quad (3)$$

式中: J_m 、 K_m 分别是 m 阶第一类贝塞尔函数和 m 阶第二类修正贝塞尔函数,参数 F 和 Q 分别定义如下:

$$F = \frac{J_m'(U)}{U J_m(U)} + \frac{K_m'(W)}{W J_m(W)} \quad Q = \frac{1}{U^2} + \frac{1}{W^2}$$

通过求解特征方程(3),可求得 PCF 纤芯基模的传输常数 β ,则纤芯基模有效折射率为 $n_{eff} = \beta/k$ 。

1.2 光纤布拉格光栅慢光

简单起见,设光纤布拉格光栅纤芯折射率沿 Z 轴向的分布为

$$n(z) = n_0 + \overline{\delta n}_{eff} \left[1 + v \cos \left(\frac{2\pi}{\Lambda} z \right) \right] \quad (4)$$

式中: n_0 为光纤的纤芯折射率; $\overline{\delta n}_{eff}$ 为“dc”折射率变化; v 为折射率条纹可见度; Λ 为光栅周期。

对于等效后均匀光纤布拉格光栅,求解耦合模方程,在光纤光栅波导边界条件下,可得到均匀光纤布拉格光栅的反射系数^[9]:

$$\rho = \frac{-\kappa \sinh \left(\sqrt{\kappa^2 - \hat{\sigma}^2} L \right)}{\hat{\sigma} \sinh \left(\sqrt{\kappa^2 - \hat{\sigma}^2} L \right) + i \sqrt{\kappa^2 - \hat{\sigma}^2} \cosh \left(\sqrt{\kappa^2 - \hat{\sigma}^2} L \right)} \quad (5)$$

式中: $\hat{\sigma} = \delta + \sigma$, $\kappa = \pi \cdot v \cdot \overline{\delta n}_{eff} / \lambda$, L 为光栅长度,及失谐量 δ 和直流耦合系数 σ 分别定义为:

$$\delta = \beta - \frac{\pi}{\Lambda_{FBG}} \quad (6)$$

$$\sigma = 2\pi \overline{\delta n}_{eff} / \lambda \quad (7)$$

由反射系数可得出光纤布拉格光栅的时延量为:

$$\tau = \frac{d\theta}{d\omega} = - \frac{\lambda^2}{2\pi c} \frac{d\theta}{d\lambda} \quad (8)$$

式中: θ 为反射系数的相位角 $\text{phase}(\rho)$ 。则传输脉冲的群折射率 n_g 可以定义如下^[20]:

$$n_g = \frac{c}{L} \cdot \frac{d\theta}{d\omega} = \frac{c}{L} \cdot \tau \quad (9)$$

式中: c 为真空中光速; $\theta(\omega)$ 为反射系数的相位角; τ 为时延量。可以得出在 PCFBG 中群速度与时延的关系为:

$$v_g = \frac{L}{\tau} \quad (10)$$

可以看出,只有当时延量 τ 大到满足 $v_g \ll c$ 的条件时,才会产生慢光现象。光子晶体光纤布拉格光栅慢光效应产生的主要原因是在共振波长边缘,群折射率对频率的变化很大^[21],会导致群速度变小。

2 数值计算与结果讨论

2.1 光子晶体光纤布拉格光栅慢光时延

设光栅的折射率条纹可见度 $v=1$, 直流折射率变化 $\overline{\delta n}_{eff}=0.0001$ 。图 3 给出了当光栅周期 $\Lambda=0.53 \mu\text{m}$, 光栅长度为 $L=1.06 \text{ cm}$, 占空比 $f=0.2$ 时的慢光时延

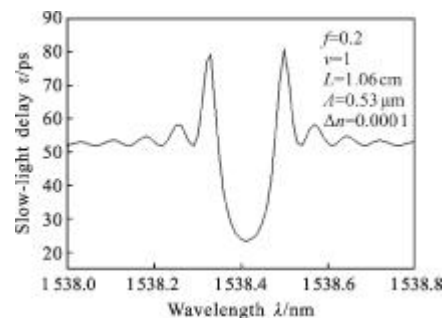


图 3 光子晶体光纤布拉格光栅慢光时延谱

Fig.3 Slow-light delay spectra of PCFBG

谱。可见均匀光子晶体光纤布拉格光栅的慢光时延在反射带宽内以中心波长对称,在中心区随波长的改变变化很小,在带的边缘有较大震荡。这是由于光纤布拉格光栅的两端折射率突变引起的 Fabry-Perot 结构效应^[22]所致,这些旁瓣分散了光能量,不利于光的传输。

2.2 占空比对慢光时延的影响

如图 4 所示,当 $f=0.3$ 时 PCFBG 的谐振波长相对于 $f=0.25$ 、 $f=0.2$ 时的谐振波长处于短波长区,即:随着光子晶体包层空气孔占空比 f 的增大,布拉格光栅的谐振波长产生蓝移。这是因为空气孔占空比 f 越大,说明包层中的空气孔越大,包层的等效折射率 $n_{\text{clad},i}^{\text{eff}}$ 越小,由谐振波长 $\lambda_{\text{clad},i} = (n_{\text{clad},i}^{\text{eff}} + n_{\text{co}}^{\text{eff}}) \cdot \Lambda_{\text{FBG}}$ 可以看出布拉格光栅的谐振波长越来越小^[20-21],向短波长方向移动,即慢光峰值波长产生蓝移,与理论完全相符。图 5 更加直观的说明了布拉格谐振波长 λ_B 随着空气孔占空比 f 的变化呈现出递减的趋势。通过对 PCFBG 包层空气孔占空比 f 的调整,易于实现光子晶体光纤布拉格光栅的谐振波长调谐。

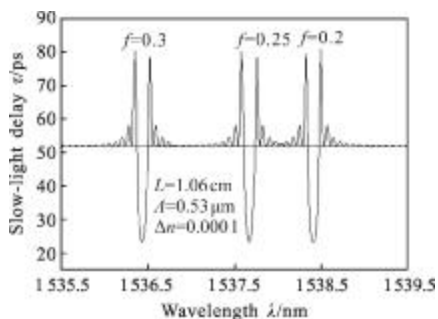


图 4 空气孔占空比对时延谱的影响

Fig.4 Influence of air filling factor versus slow-light delay spectra

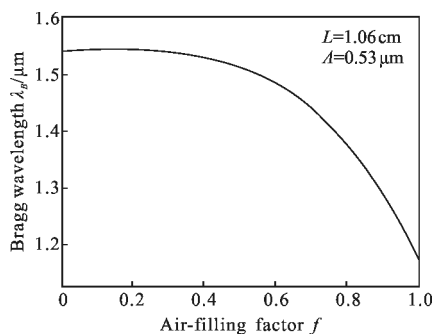


图 5 布拉格波长随空气孔占空比的变化关系

Fig.5 Relation of Bragg wavelength versus air filling factor

图 6 为当光栅长度 $L=1.06 \text{ cm}$, 光栅周期为 $\Lambda=0.53 \mu\text{m}$ 时,慢光时延量随空气孔占空比 f 的变化图。可见随着占空比 f 的增大,慢光时延量呈现出递减的趋势。

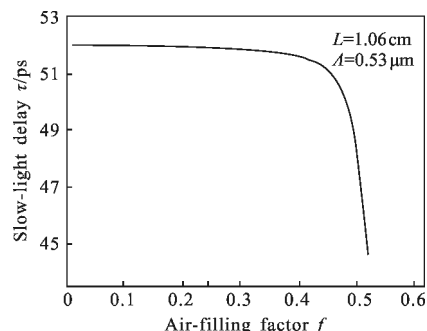


图 6 时延随空气孔占空比变化关系曲线

Fig.6 Relation of slow-light delay versus air filling factor

2.3 光栅周期对慢光时延的影响

图 7 为保持光栅长度不变 $L=1.06 \text{ cm}$ 时,光栅周期分别为 $\Lambda=0.2 \mu\text{m}$ 、 $\Lambda=0.4 \mu\text{m}$ 、 $\Lambda=0.8 \mu\text{m}$ 时的时延谱的比较图。由图 7 中的小图可以看出三条曲线基本重合,这是因为光栅周期的变化对时延量的影响很小,差别仅为 fs 量级。将小图中总体曲线部分放大可以看出三条曲线的微小差别,可见当光栅长度保持不变时,随着光栅周期的增大,PCFBG 的时延量会略微的增大,但并不明显。

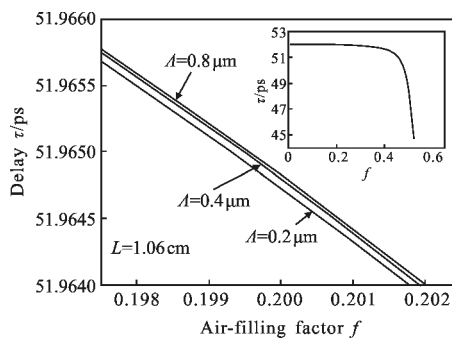


图 7 光栅周期不同时,时延随空气孔占空比的变化关系

Fig.7 Delay as function of air filling factor with different grating periods

2.4 光栅长度对慢光时延的影响

当光栅周期 $\Lambda=0.53 \mu\text{m}$, 光栅长度分别为 $L_0=1.06 \text{ cm}$ 、 $1.1L_0$ 、 $1.2L_0$, 空气孔占空比 $f=0.2$ 时,计算出的时延谱比较图如图 8 所示。说明时延量会随着光栅长度的增大而成正比增大,且谱宽变窄。这是因为对

于不满足谐振条件的波长将会不受阻碍的传输出去,光栅长度的增加必然会增加光在纤芯中的传输距离,需要的时间延迟就会越长;而对于满足同一谐振条件的波长(空气孔占空比控制了谐振波长),将会被立即反射回来,所需时延最短,且相互差别很小。

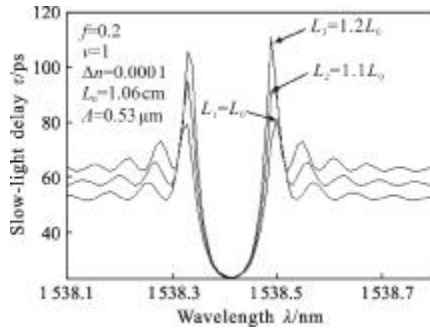


图 8 光子晶体光纤布拉格光栅慢光时延谱
Fig.8 Slow-light delay spectra of PCFBG

2.5 优化后的时延的传输谱

通过以上分析,发现当其他结构参数不变(光栅周期 $\Lambda=0.53 \mu\text{m}$,空气孔占空比 $f=0.2$),同时增大光栅长度 L 和折射率调制 $\Delta n=\overline{\delta n}_{\text{eff}} \cdot v$ 时,光纤布拉格光栅的慢光时延会显著增大,且在 PCFBG 的慢光时延谱对称边带处产生了最大慢光峰^[22]。如图 9 所示,

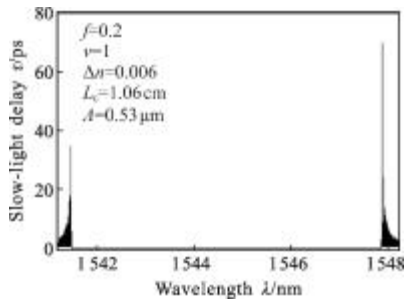


图 9 PCFBG 的慢光时延谱
Fig.9 Spectra of slow-light delay

设光栅长度 $L=10.6 \text{ cm}$,折射率条纹可见度 $v=1$,折射率调制 $\Delta n=0.006$ 时,做出 PCFBG 的慢光时延谱,看出 PCFBG 的慢光时延量相对于图 3($L=1.06 \text{ cm}$, $v=1$, $\overline{\delta n}_{\text{eff}}=0.0001$)明显增大,尤其在时延谱中心频率的对称边带产生了很大的震荡。为了清晰地找到最大慢光时延峰值,分别做出慢光时延谱的左边震荡部分和右边震荡部分,如图 10 所示。这里列出其中三个峰值,分别在 $\tau_1=34.46 \text{ ns}$, $\tau_2=69.69 \text{ ns}$, $\tau_3=53.34 \text{ ns}$ 处,代入公式(19),群速度分别为: $v_{g1}=c/97$, $v_{g2}=c/197$,

$v_{g3}=c/151$ 。得到了目前为止 PCFBG 中的最低群速度为 $c/197$ 的慢光,为制作基于 PCFBG 的慢光延迟器件提供理论依据。

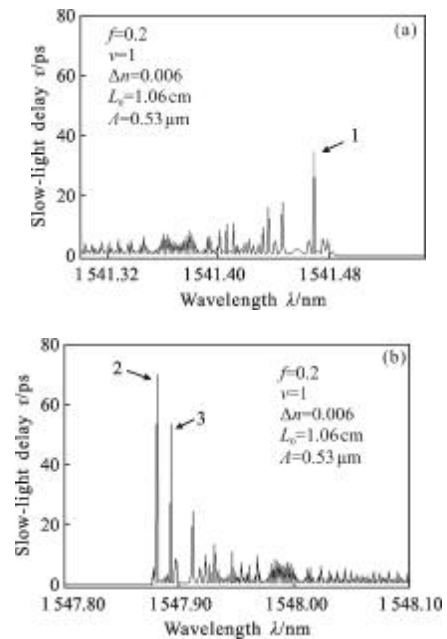


图 10 PCFBG 的慢光时延谱

Fig.10 Slow-light delay spectra of PCFBG

在实际允许的参数范围限制内,当继续增大光栅长度 L 和折射率调制 $\Delta n=\overline{\delta n}_{\text{eff}} \cdot v$ 时,将会产生更多更高的慢光峰。

3 结论

基于改进的全矢量有效折射率法和耦合模理论对 PCFBG 的慢光时延特性进行了研究。重点讨论了各个结构参数(光栅长度、光栅周期、包层中的空气孔占空比)对 PCFBG 慢光时延特性的影响;发现当同时增大光栅长度,折射率调制时,在 PCFBG 慢光时延谱的对称边带将会产生很大的慢光峰;优化参数后,设计出了最低群速度为 $c/371$ 的慢光 PCFBG。仿真结果与理论分析结合一致。以上结果对设计基于 PCFBG 的光通信器件及慢光延迟器件具有参考意义。且慢光 PCFBG 的相位敏感性将使其在光传感领域中的应用更加广泛。

参考文献:

- [1] Poli F, Cucinotta A, Selleri S. Photonic Crystal Fibers-

- Properties and Applications [M]. Dordrecht: Springer, 2007: 1-6.
- [2] Birks T A, Knight J C, Russell P St J. Endlessly single-mode photonic crystal fiber [J]. *Opt Lett*, 1997, 22 (13): 961-963.
- [3] Broderick N G R, Monro T M, Bennett P J, et al. Nonlinearity in holey optical fibers: measurement and future opportunities[J]. *Opt Lett*, 1999, 24(20): 1395-1397.
- [4] Knight J C, Birks T A, Gregan R F, et al. Large mode area photonic crystal fibre [J]. *Electronics Letters*, 1998, 34(13): 1347-1348.
- [5] Boyd Robert W, Gauthier Daniel J. Controlling the velocity of light pulses[J]. *Science*, 2009, 326: 1074-1077.
- [6] Hau L V, Harris S E, Dutton Z, et al. Light speed reduction to 17 metres per second in an ultracold atomic gas [J]. *Nature*, 1999, 397:594-598.
- [7] Stenner M D, Gauthier D J, Neifeld M A. The speed of information in a 'fast-light' optical medium [J]. *Nature*, 2003, 425: 695-698.
- [8] Gehring G M, Schweinsberg A, Barsi C, et al. Observation of backward pulse propagation through a medium with a negative group velocity[J]. *Science*, 2006, 312:895-897.
- [9] Turan Erdogan. Fiber grating spectra [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1997, 15(8): 1277-1294.
- [10] Mok Joe T, Martijn De Sterke C. Dispersionless slow light using gap solitons[J]. *Nature Physics*, 2006, 2: 775-780.
- [11] Kai Qian, Li Zhan, Honggen Li, et al. Tunable delay slow-light in an active fiber Bragg grating [J]. *Opt Exp*, 2009, 17(24): 22217-22222.
- [12] Eggleton B J, Westbrook P S, Windeler R S, et al. Grating resonances in air-silica microstructured optical fibers [J]. *Opt Lett*, 1999, 24(21): 1460-1462.
- [13] Hou Shanglin, Han Jiawei, Zhang Ruirui, et al. Study on sensing characteristics of tunable long-period gratings imprinted by mechanical pressure in photonic crystal fiber[J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2010, 1(21): 5-8. (in Chinese) 侯尚林, 韩佳巍, 张睿睿, 等. 基于可调谐长周期光子晶体光纤光栅压力传感的实验研究 [J]. *光电子·激光*, 2010, 1(21): 5-8.
- [14] Hou Shanglin, Ren Xiaomin, Zhang Xia, et al. Investigation on characteristics of fiber Bragg gratings formed in photonic crystal fibers[C]//SPIE, 2007, 6781: W7813-W7813.
- [15] Qi Yuefeng, Bi Weihong, Liu Yanyan, et al. Transmission spectra and delay characteristics of the photonic crystal fiber grating[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, 37(3): 105-109. (in Chinese) 齐跃峰, 毕卫红, 刘燕燕, 等. 光子晶体光纤光栅反射谱及时延研究[J]. *光电工程*, 2010, 37(3): 105-109.
- [16] Robert W. Boyd. Slow and fast light: fundamentals and applications [J]. *Journal of Modern Optics*, 2009, 56 (18): 1908-1915.
- [17] Khurgin Jacob B. Slow light in various media: a tutorial[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2010, 2:287-318.
- [18] Shanglin Hou, Xiaomin Ren, Xia Zhang, et al. Improved full-vector effective index method for analysis of fiber Bragg gratings formed in photonic crystal fibers [C]// International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology Proceedings, 2008, 2: 822-824.
- [19] Park Kwang N, Lee Kyung S. Improved effective-index method for analysis of photonic crystal fibers [J]. *Opt Lett*, 2005, 30(9): 958-960.
- [20] Turan Erdogan. Cladding-mode resonances in short-and long-period fiber grating filters[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1997, 14(8): 1760-1773.
- [21] He Wen, Matt Terrel, Shanhui Fan, et al. Sensing with slow light in fiber Bragg gratings [J]. *IEEE Sensor Journal*, 2012,12(1):156-163.
- [22] Joe Mok, Martijn de Sterke, Ian Littler, et al. Dispersionless and tunable slow light in Bragg gratings [J]. *Optics and Photonics News*, 2007, 18(12): 39-39.