

文章编号: 0258-7025(2009)03-0699-06

光子晶体光纤长周期光栅的特性

陈卫国 娄淑琴 王立文 李宏雷 郭铁英 简水生

(北京交通大学光波技术研究所 全光网络与现代通信网教育部重点实验室, 北京 100044)

摘要 将修正的矢量等效折射率模型和耦合模理论相结合, 系统地研究了光子晶体光纤长周期光栅(PCFLPG)的特性。验证了光子晶体光纤长周期光栅的双谐振峰特性; 定量地研究了光子晶体光纤结构参数如空气孔间距、相对孔径比和光栅参数如光栅周期、光栅长度、折射率调制深度和光栅啁啾量对光栅谐振峰强度和谐振波长的影响。研究结果为光子晶体光纤长周期光栅在光纤通信、光纤传感等方面的应用提供了理论依据。

关键词 光纤光学; 光纤光栅; 光子晶体光纤长周期光栅; 修正的矢量等效折射率模型; 耦合模理论

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092903.0699

Properties of Long Period Gratings in Photonic Crystal Fibers

Chen Weiguo Lou Shuqin Wang Liwen Li Honglei

Guo Tiewing Jian Shuisheng

*Key Laboratory of All Optical Network & Advanced Telecommunication Network of
Education Ministry of China, Beijing Jiaotong University, Institute of Lightwave Technology,
Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China*

Abstract The properties of long period gratings in photonic crystal fibers (PCFLPG) are systematically analyzed by the improved full-vector effective index model and the coupled mode theory. Dual-resonance peak occurs in PCFLPG. The dependence of the coupling strength and the resonance wavelength on the hole pitch, the hole-to-pitch ratio, the grating period, the length of grating, the refractive index modulation depth and the chirp coefficient is studied. The results provide the theoretical basis for the applications of PCFLPG in the optical fiber communication, the optical fiber sensing and so on.

Key words fiber optics; fiber grating; long-period gratings in photonic crystal fibers; improved full-vector effective index model; coupled mode theory

1 引言

长周期光纤光栅具有插入损耗低、制作简单、背向反射小等优点, 可以用来制作滤波器、耦合器、光开关及传感器等器件, 在光纤通信、光纤传感等领域具有广泛的应用^[1,2]。光子晶体光纤(PCF)又称微结构光纤。自 1996 年英国 Bath 大学的 J. C. Knight 等^[3]首次研制后, 由于具有众多新奇的特性如无尽单模特性、高非线性、大模场面积、色散灵活、

高双折射等^[4]而成为光纤研究领域的研究热点。光子晶体光纤和光纤光栅的有效结合促进了新型光纤光栅器件的发展。B. J. Eggleton 等^[5]利用紫外曝光法在光敏光子晶体光纤上成功地写制光栅。随后相继报道了利用电弧放电^[6]、CO₂ 激光加热^[7]、压力^[8]和声波诱导^[9]等方法写制光子晶体光纤光栅的实验研究工作。

本文将利用修正的矢量等效折射率模型和耦合模理论系统地研究了光子晶体光纤长周期光栅

收稿日期: 2008-10-14; 收到修改稿日期: 2008-12-18

基金项目: 国家自然科学基金(60777033)和教育部重大项目(308002)资助项目。

作者简介: 陈卫国(1983—), 男, 博士研究生, 主要从事光子晶体光纤及光纤通信方面的研究。

E-mail: 07111012@bjtu.edu.cn

导师简介: 简水生(1929—), 男, 中国科学院院士, 博士生导师, 主要从事光纤通信及光纤器件方面的研究。

E-mail: ssjian@bjtu.edu.cn

(PCFLPG)的透射谱特性,着重分析 PCF 结构参数以及光栅参数对透射谱的影响。为设计满足不同应用要求的长周期光纤光栅器件提供了理论依据。

2 理论模型

2.1 耦合模理论

在长周期光栅中,纤芯折射率的周期性变化引起纤芯导模和包层模的相互耦合形成谐振峰。模式耦合强弱由耦合系数来表征,耦合系数由横向和纵向耦合系数组成。在弱导近似下通常只需考虑横向耦合系数的影响。在圆柱坐标系下横向耦合系数可表示为^[10,11]

$$K'_{ij} = \frac{\omega}{4} \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{\infty} r dr \Delta\epsilon(r, z) E_i(r, \phi) E_j^*(r, \phi), \quad (1)$$

式中 E_i 和 E_j 分别为第 i 阶与第 j 阶模的电场分布, $\Delta\epsilon(r, z) = 2\epsilon_0 n_1 \delta n$, ϵ_0 为真空中的介电常数, δn 是光栅折射率调制深度, n_1 是纤芯折射率。通常 δn 在光栅横向是均匀的,对式(1)进行分解计算可得到

$$K'_{ij} = \sigma_{ij}(z) + 2k_{ij}(z) \cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda_g} z\right), \quad (2)$$

式中 Λ_g 为光栅周期, σ_{ij} 和 k_{ij} 分别是直流和交叉耦合系数,可表示为

$$\sigma_{ij}(z) = \frac{2\pi n_1 \delta n}{\lambda \sqrt{n_i n_j}} \cdot \frac{\int_0^{2\pi} d\phi \int_0^r r E_i E_j dr}{\left(\int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{\infty} r |E_i|^2 dr \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{\infty} r |E_j|^2 dr \right)^{1/2}}, \quad (3)$$

$$k_{ij} = \sigma_{ij}/2, \quad (4)$$

其中, n_i 和 n_j 分别为第 i 阶与第 j 阶模的模式有效折射率。

长周期光纤光栅模式间的失谐量 δ 和直流自耦合系数 $\hat{\sigma}$ 分别定义为

$$\delta = \pi(n_{co} - n_{cl,i})(1/\lambda - 1/\lambda_d), \quad (5)$$

$$\hat{\sigma} = \delta + \frac{\sigma_{11} + \sigma_{22}}{2}, \quad (6)$$

式中, n_{co} 和 $n_{cl,i}$ 分别为纤芯导模和第 i 阶包层模的有效折射率, σ_{11} 和 σ_{22} 分别为纤芯导模和基包层模的直流耦合系数,可以通过公式(3)计算; λ_d 为设计波长,即光栅折射率调制深度无限小时的谐振波长(初始谐振波长),定义为

$$\lambda_d = (n_{co} - n_{cl,i})\Lambda_g. \quad (7)$$

考虑导模和包层模的直流耦合系数可以得到长

周期光栅的谐振波长

$$\lambda_{res} = \lambda_d / [1 - (\sigma_{11} - \sigma_{22})\Lambda_g / 2\pi]. \quad (8)$$

2.2 修正等效折射率法

三角格子光子晶体光纤是在石英基底材料中周期性排列空气孔,在光纤的中心缺失一个空气孔构成纤芯,其结构特征可用孔间距 Λ ,空气孔直径 d 和相对孔径比 f ($f = d/\Lambda$) 等结构参数来表征。光子晶体光纤的包层等效折射率通常用基空间填充模的有效折射率表示。标量等效折射率方法^[12]在分析光子晶体光纤特性等方面具有简单快速的优点,但在大空气孔填充率情况下由于不满足弱导近似条件,会出现较大误差。矢量等效折射率方法^[13]具有简捷的特点,在大空气孔填充率时也能适用,并且准确性较好。另外通过适当修正其等效纤芯半径和适当选取孔径取值能得到与有限元法相比拟的精度,因此采用修正的矢量等效折射率模型和耦合模理论可以有效分析光子晶体光纤长周期光栅的相关特性^[14]。

3 数值分析

本文主要分析光栅参数(光栅周期 Λ_g , 折射率调制深度 δn , 光栅长度 L 和啁啾量 chirp)和 PCF 结构参数对全内反射型光子晶体光纤长周期光栅透射谱的影响,并和普通光纤(掺锗摩尔分数为 4.1%, 纤芯半径 2.65 μm , 包层半径 62.5 μm)长周期光栅(SMFLPG)的特性进行对比。

3.1 光栅参数的影响

图 1 给出了光子晶体光纤长周期光栅和普通光纤长周期光栅的设计波长和谐振波长与光栅周期的关系。对比图 1 中光子晶体光纤长周期光栅和普通光纤长周期光栅的数值结果,可以看出与普通光纤长周期光栅不同,光子晶体光纤长周期光栅存在双谐振峰,在短波长区域随着光栅周期的增加,谐振波长(λ_{resL})减小,设计波长(λ_{dL})大于谐振波长。原因是由于光子晶体光纤色散特性即纤芯导模和包层模的有效折射率差随波长的变化趋势与普通光纤不同造成的;在长波长区域,变化规律与普通光纤光栅是一致的。

折射率调制深度的大小也能影响模式间的耦合从而改变光栅的透射谱特性,如图 2 所示。对于光子晶体光纤长周期光栅,当折射率调制深度较小时双谐振峰逐渐靠近并会合,当折射率调制深度减小到一定值时,双谐振峰将合并成一较宽谱峰。这一特性可应用在设计宽带光纤滤波器;随着折射率调制深度的增加,左侧谐振波长 λ_{resL} 减小,右侧谐振波

长 λ_{resR} 增加, 耦合强度均增大。折射率调制深度增加到一定程度时, 耦合强度达到饱和。由于左侧短波长处模式有效折射率较大, 所以在相同折射率调制深度的情况下左侧谐振峰耦合强度大, 如

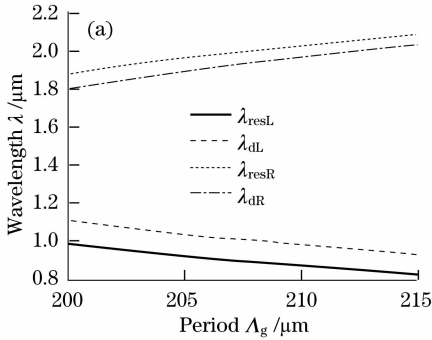


图 2(a); 对于普通长周期光栅, 随着折射率调制深度的增加谐振波长增大, 耦合强度增大以至达到饱和。

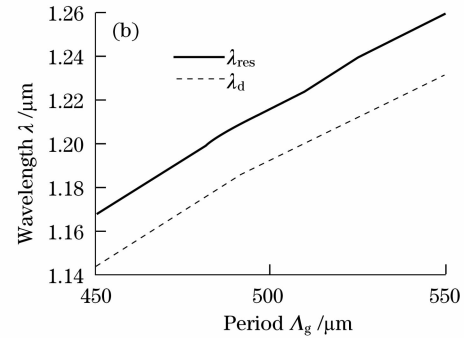


图 1 PCFLPG 和 SMFLPG 的设计波长和谐振波长与光栅周期的关系。(a) PCFLPG: $\Lambda=3 \mu\text{m}$, $f=0.4$, $\delta n=3 \times 10^{-4}$, $L=0.1 \text{ m}$; (b) SMFLPG: $\delta n=2 \times 10^{-4}$, $L=0.1 \text{ m}$

Fig. 1 Design wavelength and resonance wavelength versus the grating period for PCFLPG with $\Lambda=3 \mu\text{m}$, $f=0.4$, $\delta n=3 \times 10^{-4}$, $L=0.1 \text{ m}$ (a) and for SMFLPG with $\delta n=2 \times 10^{-4}$, $L=0.1 \text{ m}$ (b)

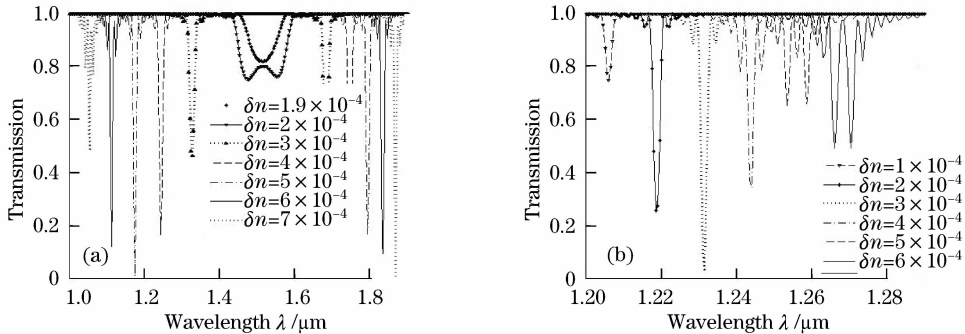


图 2 不同折射率调制深度时的光栅透射谱。(a) PCFLPG: $\Lambda=3.2 \mu\text{m}$, $f=0.4$, $\Lambda_g=200 \mu\text{m}$, $L=0.1 \text{ m}$; (b) SMFLPG: $\Lambda_g=500 \mu\text{m}$, $L=0.1 \text{ m}$

Fig. 2 Transmission spectra of the different refractive index modulation depth for PCFLPG with $\Lambda=3.2 \mu\text{m}$, $f=0.4$, $\Lambda_g=200 \mu\text{m}$, $L=0.1 \text{ m}$ (a) and for SMFLPG with $\Lambda_g=500 \mu\text{m}$, $L=0.1 \text{ m}$ (b)

由于光栅长度直接影响光栅的耦合强度, 随着光栅长度的增加, 模式之间的耦合将增强从而使透射谱下陷变深, 而带宽变窄。图 3 给出了光栅长度的变化对两种光栅透射谱的影响。

另外长周期光纤光栅啁啾量对光栅透射谱带宽和耦合强度也有较大的影响, 为考虑其对高阶模的影响, 这里计算了四个包层模, 光栅啁啾量对传输谱的影响如图 4 所示。由图 4 可知, 随着光栅啁啾量的增加, 两者透射谱深度变浅, 带宽增加且损耗峰会出现交叠。对于光子晶体光纤长周期光栅, 谱变浅时中间两个谐振峰逐渐交叠会合。

3.2 PCF 结构参数的影响

由于 PCF 包层有效折射率及色散特性主要取决于相对孔径比、孔间距, 因此光子晶体光纤结构参数的变化对于光纤中各个模式的等效折射率和模场分布都会产生影响, 从而影响长周期光栅透射谱。首先分析不同光子晶体光纤结构参数时设计波长和周期的关系, 如图 5 所示。由图可知, 随着 Λ 的增大曲线凹陷部分逐渐向长波长移动并展宽, 即对于较大尺寸 Λ 的长周期光栅, 右侧谐振波长会变得更大。随着 f 的增大, 获得同样谐振波长所需光栅周期减小, 曲线凹陷逐渐向长波长移动并展宽, 曲线变得陡峭, 周期的微扰会引起设计波长的巨大波动, 且对于较小的 f 更容易出现双谐振峰。

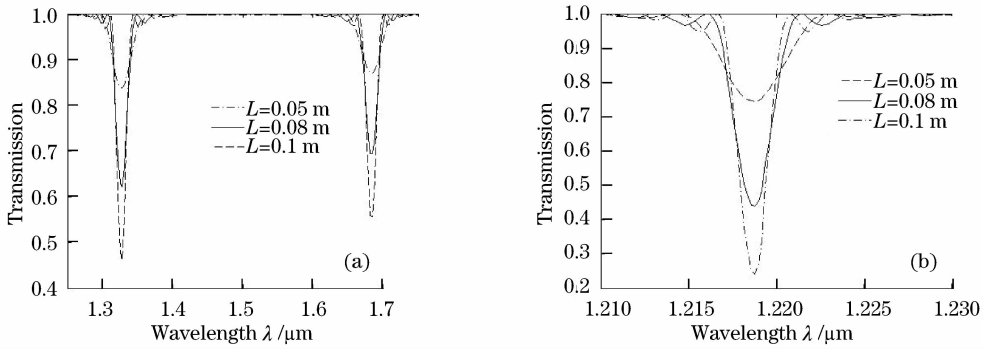


图3 不同光栅长度时的光栅透射谱。(a) PCFLPG: $\Lambda=3.2 \mu\text{m}$, $f=0.4$, $\Lambda_g=200 \mu\text{m}$, $\delta n=3 \times 10^{-4}$; (b) SMFLPG: $\Lambda_g=500 \mu\text{m}$, $\delta n=2 \times 10^{-4}$

Fig. 3 Transmission spectra of the different grating length for PCFLPG with $\Lambda=3.2 \mu\text{m}$, $f=0.4$, $\Lambda_g=200 \mu\text{m}$, $\delta n=3 \times 10^{-4}$ (a) and for SMFLPG with $\Lambda_g=500 \mu\text{m}$, $\delta n=2 \times 10^{-4}$ (b)

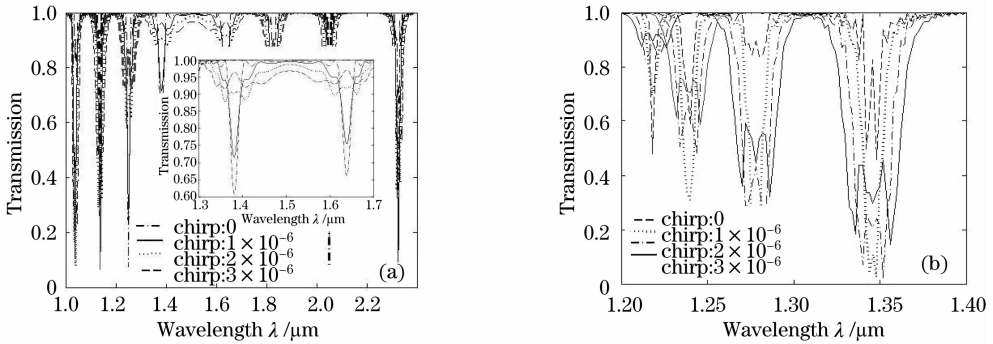


图4 不同光栅啁啾量时的光栅透射谱。(a) PCFLPG: $\Lambda=3.2 \mu\text{m}$, $f=0.4$, $\Lambda_g=200 \mu\text{m}$, $\delta n=3 \times 10^{-4}$, $L=0.1 \text{ m}$, 插图为中间两个谐振峰的局部放大图; (b) SMFLPG: $\Lambda_g=500 \mu\text{m}$, $\delta n=2 \times 10^{-4}$, $L=0.1 \text{ m}$

Fig. 4 Transmission spectra of the different chirp coefficient for PCFLPG with $\Lambda=3.2 \mu\text{m}$, $f=0.4$, $\Lambda_g=200 \mu\text{m}$, $L=0.1 \text{ m}$, $\delta n=3 \times 10^{-4}$, with the insert graph enlarged of the two middle resonant peaks (a) and for SMFLPG with $\Lambda_g=500 \mu\text{m}$, $\delta n=2 \times 10^{-4}$, $L=0.1 \text{ m}$ (b)

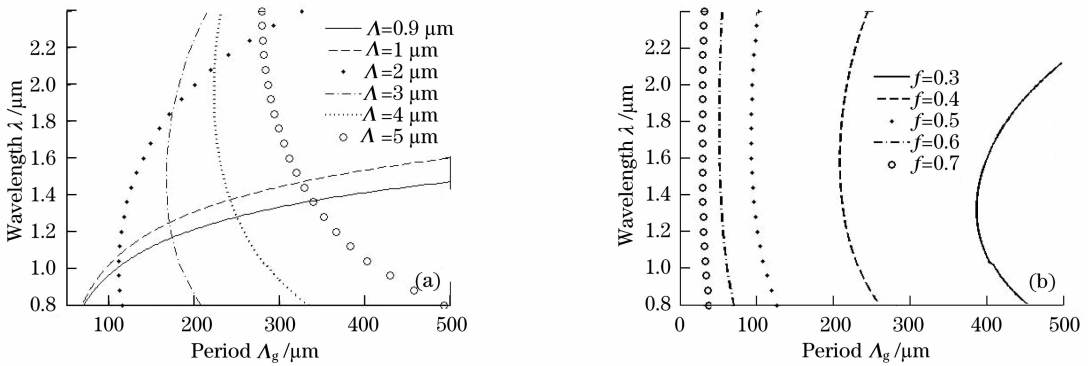


图5 不同光纤结构参数时设计波长和周期的关系。(a) 相对孔径比 $f=0.4$; (b) 孔间距 $\Lambda=3.2 \mu\text{m}$

Fig. 5 Design wavelength versus the grating period of different structure parameters with the hole-to-pitch ratio $f=0.4$ (a) and with the pitch $\Lambda=3.2 \mu\text{m}$ (b)

分析光纤结构参数对光子晶体光纤长周期光栅特性的影响,不同空气孔间距 Λ 的光栅透射谱和设计波长与周期的关系如图 6 所示。由图可知,随着 Λ 的增大,左侧谐振波长增加,右侧谐振波长减小,

与设计波长随 Λ 的变化规律一致,谐振峰对应的谐振波长域设计波长也满足图 1(a)的关系。另外,随着 Λ 的增加两侧谐振峰偏移增大,但是左侧谐振峰的间隔比右侧大。主要是由于导模与一阶包层模折

射率差偏移量的斜率与 Λ 是递增关系,且短波长处

的斜率大于长波长处的斜率等原因引起的。

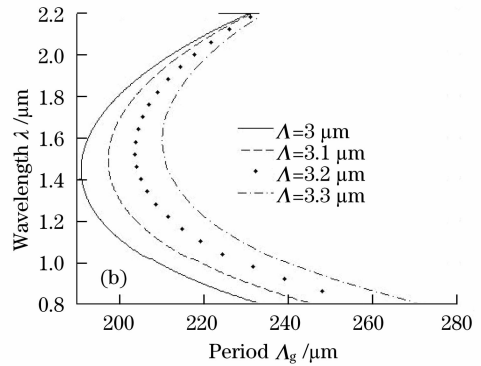
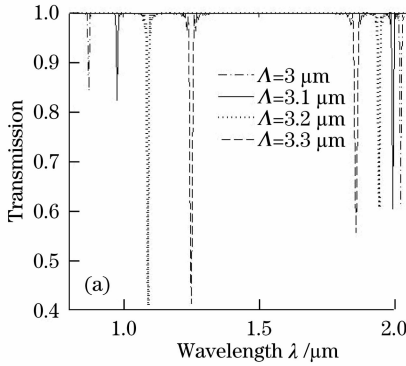


图 6 不同 Λ 时光栅透射谱(a)和设计波长与周期的关系(b)。光纤和光栅参数为

$$f=0.4, \Lambda_g=210 \mu\text{m}, \delta n=3 \times 10^{-4}, L=0.1 \text{ m}$$

Fig. 6 Transmission spectra (a) and the design wavelength versus the grating period (b) for different pitch with $f=0.4, \Lambda_g=210 \mu\text{m}, \delta n=3 \times 10^{-4}, L=0.1 \text{ m}$

图 7 表示不同 f 时的光子晶体光纤长周期光栅透射谱和设计波长与周期的关系。由图可知,在短波长区域随着 f 的增加谐振波长减小;在长波长区域随着 f 增加,谐振波长增大,与设计波长随 f 的变化

规律一致;由于导模和一阶包层模折射率差偏移量斜率的绝对值随 f 增大而减小,且长波长处斜率的绝对值大于短波长处的值,则随 f 增大两侧谐振峰间隔均减小,但右侧谐振峰间隔大于左侧,如图 7(a)。

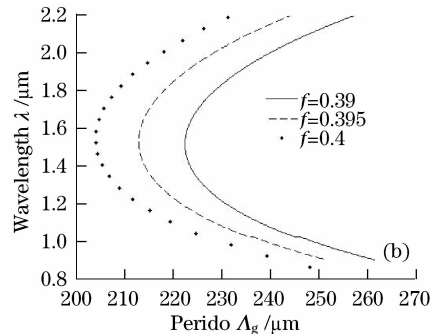
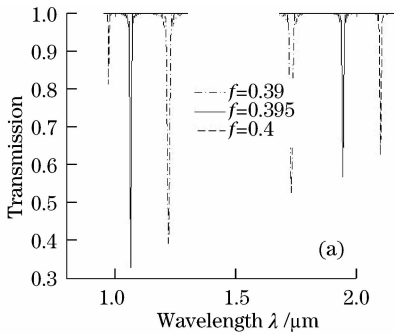


图 7 不同 f 时(a)光栅透射谱(b)设计波长和周期的关系。光纤和光栅参数为

$$\Lambda=3.2 \mu\text{m}, \Lambda_g=220 \mu\text{m}, \delta n=3 \times 10^{-4}, L=0.1 \text{ m}$$

Fig. 7 Transmission spectra (a) and the design wavelength versus the grating period (b) for different hole-to-pitch ratio with $\Lambda=3.2 \mu\text{m}, \Lambda_g=220 \mu\text{m}, \delta n=3 \times 10^{-4}, L=0.1 \text{ m}$

4 结 论

利用修正的矢量等效折射率模型和耦合模理论系统地讨论了光子晶体光纤结构参数和光栅参数对光子晶体光纤长周期光栅传输特性的影响。与普通光纤相比,光子晶体光纤结构参量设置更为灵活,其长周期光纤光栅与普通光纤长周期光栅在传输特性上有明显差别。对于光子晶体光纤长周期光栅,通过适当选取结构参数,可在同一长周期光栅透射谱上获得双谐振峰,谐振峰的位置和强度受空气孔间距和相对孔径比的影响。通过优化相关参数,光子晶体光纤长周期光栅可以获得很多新奇的特性,为设计新型光纤器件提供了可能,能够广泛应用于光

纤通信和光纤传感等领域。

参 考 文 献

- 1 Wang Jiuling, Rao Yunjiang, Zhu Tao *et al.*. Refractive index characteristic for edge-written long-period fiber gratings induced by CO₂ laser pulses[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(10): 1730~1734
- 2 王久玲,饶云江,朱涛等. CO₂激光脉冲边缘写入的长周期光栅折射率特性研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(10): 1730~1734
- 3 Zhao Xiaoyun, Gu Zhengtian. Spectral characteristics of triple-clad cascaded long-period fiber gratings[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(10): 1532~1537
- 4 赵晓云,顾铮. 三包层级联长周期光栅的传输谱特性[J]. *中国激光*, 2008, **35**(10): 1532~1537
- 5 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

- 4 P. St. J. Russell. Photonic-crystal fibers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**(12): 4729~4749
- 5 B. J. Eggleton, P. S. Westbrook, R. S. Windeler *et al.*. Grating resonances in air-silica microstructured optical fibers [J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(21): 1460~1462
- 6 Georges Humbert, Abdelrafik Malki, Sébastien Février. Characterizations at high temperatures of long-period gratings written in germanium-free air-silica microstructure fiber [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(1): 38~40
- 7 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
- 8 Jong H. Lim, Kyung S. Lee, Jin C. Kim *et al.*. Tunable fiber gratings fabricated in photonic crystal fiber by use of mechanical pressure [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(4): 331~333
- 9 A. Diez, T. A. Birks, W. H. Reeves *et al.*. Excitation of cladding modes in photonic crystal fibers by flexural acoustic waves [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(20): 1499~1501
- 10 Turan Erdogan. Fiber grating spectra [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1277~1294
- 11 B. J. Eggleton, C. Kerbage, P. S. Westbrook *et al.*. Microstructured optical fiber devices [J]. *Opt. Express*, 2001, **9**(13): 698~713
- 12 Ren Guobin, Lou Shuqin, Wang Zhi *et al.*. Study on dispersion properties of photonic crystal fiber by equivalent-index model [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(3): 319~323
任国斌, 娄淑琴, 王智等. 等效折射率模型研究光子晶体光纤的色散特性 [J]. *光学学报*, 2004, **24**(3): 319~323
- 13 Zhao Xingtao, Hou Lantian, Liu Zhaolun *et al.*. Improved fully vectorial effective index method in photonic crystal fiber [J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(19): 4052~4056
- 14 Kwang N. Parka, Turan Erdogan Kyung S. Lee. Cladding mode coupling in long-period gratings formed in photonic crystal fibers [J]. *Opt. Commun.*, 2006, **266**: 541~545