

光子晶体光纤布拉格光栅谐振特性的研究

黄从利 黄勇林

(南京邮电大学光电工程学院, 江苏 南京 210046)

摘要 利用模式理论和传输矩阵法,对基于包层空气孔排布为正八边形对称结构的光子晶体光纤光栅(PCFG)的模式截止特性以及谐振特性进行了研究,得出了此种光子晶体光纤光栅的模式截止条件和可传导的模式,并利用得到的模式截止条件,提出利用相位匹配条件设计相应的光纤光栅周期来得到满足需要的谐振波长,同时给出了谐振峰的反射谱图。研究表明,通过合理选择此种光子晶体光纤光栅的结构参数,可以实现需要的单模传输以及定制波长处的主谐振峰的谐振。所研究的基于包层空气孔排布为正八边形对称结构的掺杂光子晶体光纤光栅有望更好地应用于光子晶体光纤光栅传感领域。

关键词 光纤光学;光子晶体光纤光栅;模式截止;谐振波长;反射谱

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.040601

Research on Resonance Properties of Photonic Crystal Fiber Bragg Grating

Huang Congli Huang Yonglin

(College of Optoelectronic Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu 210046, China)

Abstract The modal cut-off properties and resonant properties of Ge-doped photonic crystal fiber Bragg grating (PCFBG) with regular octagonal cladding air holes are investigated by using the mode coupling theory and the transmission matrix method, and the modal cut-off condition and the mode of transmission are given. To meet the need of the resonant wavelength, a method is designed by changing the period of the grating based on the phase matching conditions. The reflection spectrum of the grating simulation result is obtained. It is found that with properly chosen structural parameters, needed single-mode transmission and resonance with tailored main resonant peak can be realized using the PCFBG. This kind of PCFBG can thus be better applied to fiber sensing areas.

Key words fiber optics; photonic crystal fiber grating; mode cut-off; resonant wavelength; reflection spectrum

OCIS codes 060.4005; 060.3735

1 引言

自光子晶体光纤(PCF)问世以来,由于其独特的光学性质而备受关注,人们一直尝试在光子晶体光纤中写入光纤光栅,从而制作出光子晶体光纤光栅(PCFG)。

与普通光纤光栅相比,PCFG具有设计自由度大、无截止单模和灵活的色散等独特的性质^[1],在光纤通信、光纤传感和光信息处理等领域具有广阔的应用价值。目前,人们对PCFG的研究都局限于在柚子型^[2]、六边形空气孔排布^[3]等光子晶体光纤中写入光栅,而对于八边形空气孔排布的光子晶体光纤则更加侧重研究双折射、色散特性^[4,5]。本文在包层空气孔排布为正八边形对称结构的光子晶体光纤中写入光栅,利用模式理论和传输矩阵法对基于包层空气孔为正八边形对称结构的光子晶体光纤及光栅的结构进行分析和计算,使用Matlab等工具进行仿真,得出PCFG的截止特性和谐振特性以及谱图。

收稿日期: 2011-12-05; **收到修改稿日期**: 2011-12-21; **网络出版日期**: 2012-02-23

基金项目: 南京邮电大学引进人才项目(NY207140)资助课题。

作者简介: 黄从利(1986—),女,硕士研究生,主要从事光纤通信与光波技术等方面的研究。E-mail: mmhcl2006@126.com

导师简介: 黄勇林(1964—),男,博士,教授,主要从事光纤通信与光波技术等方面的研究。E-mail: huangyl@njupt.edu.cn

2 理论基础

2.1 模式理论

对全内反射型光子晶体光纤,纤芯折射率高于包层折射率,类似于传统的阶跃型光纤波导,故光子晶体光纤的归一化频率 ν 可以定义为^[6]

$$\nu_{\text{PCF}} = (2\pi\Lambda/\lambda)(n_{\text{co}}^2 - n_{\text{cl}}^2)^{1/2}, \quad (1)$$

式中 λ 为自由空间波长; n_{co} 和 n_{cl} 分别为基模和包层结构中的第一本征模式的有效折射率; Λ 为光子晶体光纤的空气孔间距。

高阶模的截止条件可以表示为 $\nu_{\text{PCF}} = \pi$, 即单模的模式条件表示为^[7]

$$\nu_{\text{PCF}} < \pi. \quad (2)$$

PCFG 激励谐振模式需要满足三个条件:1) 相位匹配条件;2) 光栅区的电场交叠;3) 要激发相应的响应模式,即满足 $\nu_{\text{PCF}} > \pi$ 的条件。

光子晶体光纤布拉格光栅(PCFBG)中基模的谐振波长由布拉格条件决定^[8]

$$\lambda_{\text{B}} = 2n_{\text{co}}\Lambda_{\text{FBG}}, \Lambda_{\text{FBG}} = \lambda_{\text{B}}/(2n_{\text{co}}). \quad (3)$$

而包层模的谐振波长由包层响应的相位匹配条件决定:

$$\lambda_{\text{FBG},i} = (n_{\text{co}} + n_{\text{clad},i})\Lambda_{\text{FBG}}, \Lambda_{\text{FBG}} = \lambda_{\text{FBG},i}/(n_{\text{co}} + n_{\text{clad},i}), \quad (4)$$

式中 Λ_{FBG} 为 PCFBG 的周期, $n_{\text{clad},i}$ 为相对于基模反向传播的第 i 阶包层模式的有效折射率。

2.2 传输矩阵法

分析 PCFG 的光谱特性通常采用传输矩阵法。该方法将非均匀的光栅分成一系列小的均匀周期的光纤光栅,先计算出每一小段均匀周期光纤光栅的传输矩阵,然后利用矩阵相乘运算求出整个光栅区域的光谱特性。

设长度为 L 的光纤光栅被分成 N 个小的均匀周期光栅,正反向传输的光经过 N 个小光栅后模场振幅分别表示为 A_N 和 B_N , 则有

$$\begin{pmatrix} A_N \\ B_N \end{pmatrix} = F_N \cdot F_{N-1} \cdots F_j \cdots F_1 \begin{pmatrix} A_0 \\ B_0 \end{pmatrix} = F \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (5)$$

式中 F_j 为第 j 段的传输矩阵,可表示为

$$F_j = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma_{\text{B}}\Delta z) - i \frac{\zeta}{\gamma_{\text{B}}} \sinh(\gamma_{\text{B}}\Delta z) & -i \frac{\kappa}{\gamma_{\text{B}}} \sinh(\gamma_{\text{B}}\Delta z) \\ i \frac{\kappa}{\gamma_{\text{B}}} \sinh(\gamma_{\text{B}}\Delta z) & \cosh(\gamma_{\text{B}}\Delta z) + i \frac{\zeta}{\gamma_{\text{B}}} \sinh(\gamma_{\text{B}}\Delta z) \end{bmatrix},$$

κ, ζ 分别为第 j 段“均匀”光栅的交流耦合系数和直流自耦合系数的本地值, $\gamma_{\text{B}} = \sqrt{\kappa^2 - \zeta^2}$ 。则光栅的反射系数为

$$\rho = A_N/B_N. \quad (6)$$

在上述理论模型的基础上,利用仿真软件就可以模拟出包层空气孔排布为正八边形对称结构的 PCFG 的截止条件,结合布拉格相位匹配条件确定谐振波长以及布拉格光栅的反射谱图。

3 数值结果

计算中考虑的光纤是具有八边形空气孔排布的锗掺杂光子晶体光纤,其截面如图 1 所示,其中 d 为空气孔直径,孔间距 $\Lambda = 2.3 \mu\text{m}$ 。硅的折射率为 1.4466,光纤的锗掺杂光敏芯径 $d_{\text{core}} = 0.46 \mu\text{m}$,纤芯折射率 $n_{\text{core}} = 1.4476$ 。

图 2 是不同占空比 d/Λ 的情况下,由(1)式计算得到的归一化频率 ν_{PCF} 与归一化间距 Λ/λ 的关系。图中虚线 $\nu_{\text{PCF}} = \pi$ 表示单模界限。从图 2 可以看出八边形空气孔排布的锗掺杂光子晶体光纤的模式截止条件是 $d/\Lambda = 0.4$ 。八边形空气孔排布的锗掺杂光子晶体光纤的归一化间距 Λ/λ 在 0.505 附近,占空比 $d/\Lambda < 0.4$ 的时候全波段(800~2000 nm)截止,可以保持无限单模传输。所以当占空比 $d/\Lambda = 0.3$ 时, $\nu_{\text{PCF}} < \pi$ 始终成立,即在此条件下 PCFBG 只支持基模。而当波长在 800~1300 nm 的范围内时,占空比 d/Λ 在 0.5~0.7 之间的都不截止,当占空比 $d/\Lambda = 0.6$ 时,在波长 800~1900 nm 范围都不截止,可实现多模的传输。

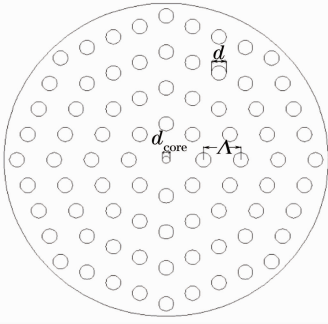


图1 八边形空气孔排布的锗掺杂光子晶体光纤截面图
Fig.1 Transverse section of Ge-doped photonic crystal fiber with regular octagonal cladding air holes

取占空比 d/Λ 分别为 0.30 和 0.60, 计算八边形空气孔排布的锗掺杂光子晶体光纤中可传播的模式, 结果如图 3 和图 4 所示。

在研究 PCFG 反射谱时, 设光栅的折射率调制深度 $\Delta n = 10^{-4}$, 写制的光栅长度为 10 mm。为了得到主谐振峰在 1550 nm 波长处的反射谱, 根据(3), (4)式表示的布拉格相位匹配条件, 得出谐振周期随谐振波长变化的关系, 如图 5 和图 6 所示。

图 5 和图 6 分别为 $d/\Lambda = 0.30$ 和 $d/\Lambda = 0.60$ 时谐振周期随谐振波长的变化关系。由图可知, 确定光栅反射谱的主谐振峰在 1550 nm 处就可得出相应的光栅周期, 即可以通过设计不同的光栅周期, 使模式在指定波长处谐振, 得到想要波长处的反射谱。

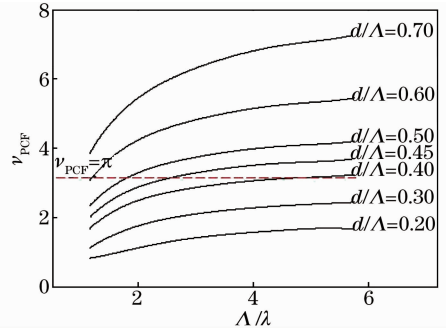


图2 归一化频率随归一化间距的变化图($d/\Lambda = 0.20 \sim 0.70$)
Fig.2 Normalized frequency ν_{PCF} as a function of normalized pitch Λ/λ ($d/\Lambda = 0.20 \sim 0.70$)

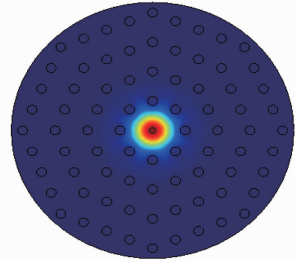


图3 $d/\Lambda = 0.30$ 时八边形空气孔排布的锗掺杂 PCF 中可传播的模式模场图

Fig.3 Mode that can be transmitted in the Ge-doped PCF with regular octagonal cladding air holes for $d/\Lambda = 0.30$

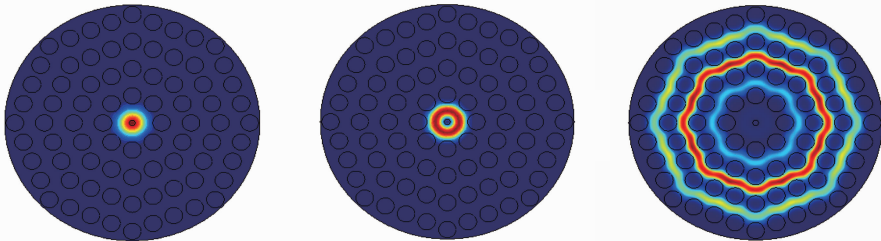


图4 $d/\Lambda = 0.60$ 时八边形空气孔排布的锗掺杂 PCF 中可传播的模式模场图

Fig.4 Modes that can be transmitted in the Ge-doped PCF with regular octagonal cladding air holes for $d/\Lambda = 0.60$

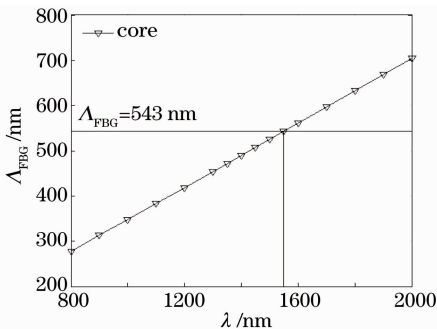


图5 占空比为 0.30 时基模谐振周期随谐振波长的变化关系

Fig.5 Resonant period of the fundamental mode as a function of resonant wavelength when $d/\Lambda = 0.30$

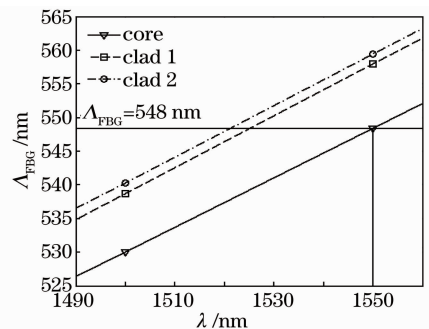


图6 占空比为 0.60 时基模和包层模谐振周期随谐振波长的变化关系

Fig.6 Resonant periods of the fundamental and cladding modes as functions of resonant wavelength when $d/\Lambda = 0.60$

利用传输矩阵法结合图 5 和图 6 确定的光栅周期 $\Lambda_{0.30} = 543 \text{ nm}$ 和 $\Lambda_{0.60} = 548 \text{ nm}$, 得出占空比为 0.30 和 0.60 的 PCFBG 的反射谱如图 7 和图 8 所示。

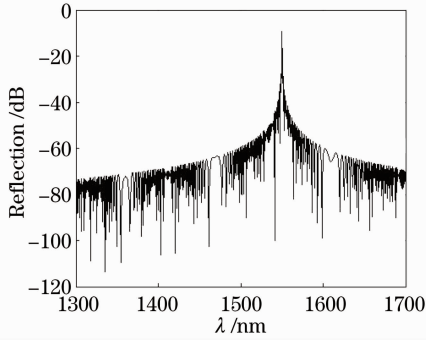


图 7 占空比为 0.30 对 PCFBG 的反射谱

Fig. 7 Reflection spectrum of PCFBG when $d/\Lambda=0.30$

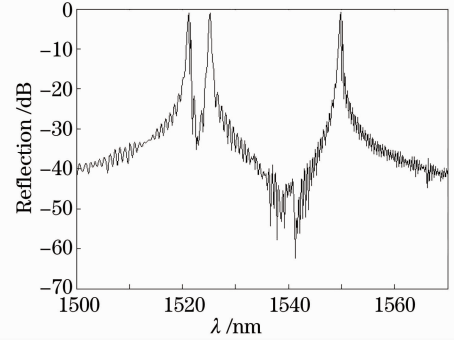


图 8 占空比为 0.60 对 PCFBG 的反射谱

Fig. 8 Reflection spectrum of PCFBG when $d/\Lambda=0.60$

图 7 中反射光谱只有一个反射峰,这是因为此时光子晶体光纤只支持单模传输,反射峰是正反向传输的基模耦合的结果。而图 8 中有三个反射峰,这是由于此时光子晶体光纤支持多模传输的缘故。从反射峰可以看出,包层模与基模相耦合产生的谐振峰强度可与正反向传输的基模耦合的谐振峰强度相比拟。值得注意的是,反射谱的主谐振峰正好与图 5、图 6 所选择的谐振波长相吻合。因此,可以利用相位匹配条件设计相应的光栅周期得到想要的谐振波长处的主谐振峰。

4 结 论

对基于包层空气孔为正八边形对称结构的光子晶体光纤写入的布拉格光栅的模式截止条件和谐振特性进行了研究,给出了模式截止条件、所选择的谐振波长以及反射谱。由仿真结果可以看出,占空比和归一化间距是决定八边形空气孔排布的 PCFBG ν_{PCF} 值的两个因素。八边形空气孔排布的掺掺杂 PCFBG 的单模-多模边界条件为 $d/\Lambda = 0.40$ 。利用相位匹配条件设计不同的光栅周期,可使谐振模式在需要的波长处谐振,实现谐振波长的灵活选择。

参 考 文 献

- Zhang Meiyan, Li Shuguang, Yao Yanyan *et al.*. Influence of micro-structured core on characteristics of photonic crystal fibers[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, **59**(5): 3278~3285
张美艳, 李曙光, 姚艳艳 等. 微结构纤芯对光子晶体光纤基本特性的影响[J]. *物理学报*, 2010, **59**(5): 3278~3285
- Zhang Chunshu, Kai Guiyun, Wang Zhi *et al.*. Temperature and strain sensing property of grapefruit microstructure fiber Bragg grating[J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, **54**(6): 2759~2763
张春书, 开桂云, 王 志 等. 柚子型微结构光纤 Bragg 光栅温度和应变传感特性研究[J]. *物理学报*, 2005, **54**(6): 2759~2763
- 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
- Yang Qianqian, Hou Lantian. Octagonal photonic crystal fiber of birefringence[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(12): 8345~8351
杨倩倩, 侯蓝田. 八边形结构的双折射光子晶体光纤[J]. *物理学报*, 2009, **58**(12): 8345~8351
- Hou Yu, Zhou Guiyao, Hou Lantian *et al.*. Analysis of dispersion properties of octagonal structural photonic crystal fiber with double cladding[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(4): 1068~1072
侯 宇, 周桂耀, 侯蓝田 等. 八边形双包层光子晶体光栅色散特性分析[J]. *中国激光*, 2010, **37**(4): 1068~1072
- Turan Erdogan. Fiber grating spectra[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1277~1294
- N. A. Mortensen, J. R. Folkenberg, M. D. Nielsen *et al.*. Modal cutoff and the V parameter in photonic crystal fibers [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(20): 1879~1881
- Liu Rui, Qu Ronghui, Cai Haiwen *et al.*. Analysis of the transmission spectral characteristics of fiber Bragg grating in photonic crystal fibers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(7): 1007~1012
刘 锐, 瞿荣辉, 蔡海文 等. 光子晶体光纤布拉格光栅传输谱特性的分析[J]. *光学学报*, 2006, **26**(7): 1007~1012