

文章编号: 0258-7025(2009)03-0663-05

# 光子晶体光纤包层中气孔和掺杂介质柱尺寸对光纤带隙特性的影响

侯金钗 李曙光 刘司英 甄海龙

(燕山大学理学院亚稳材料制备技术与科学国家重点实验室, 河北 秦皇岛 066004)

**摘要** 采用平面波展开法(PWM)研究了基于三角晶格、复合蜂窝晶格和改进的复合蜂窝晶格光子晶体光纤(PCF)的包层中不同层气孔和掺杂介质柱尺寸对光纤带隙的影响。结果表明,在第  $m$  层( $m = 1, 2, 3$ ) 空气孔直径改变同样大小的情况下,随着  $m$  的增大,第  $m$  层空气孔尺寸的变化对带隙的影响越来越小;通过改进光纤结构中介质柱的排列,或掺杂折射率比较大的介质,可以有效地调节或增宽光子带隙(PBG),具有改进的复合蜂窝晶格结构的光子晶体光纤可实现更宽的带隙分布。

**关键词** 光纤光学; 光子晶体光纤; 改进的复合蜂窝晶格; 光子带隙; 平面波展开法

中图分类号 O437 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093603.0663

## Influence of the Air-Hole Size and Doped Dielectric Cylinders Size in Cladding on Photonic Crystal Fiber

Hou Jinchai Li Shuguang Liu Siying Zhen Hailong

(Key Laboratory of Metastable Materials Science and Technology, College of Science, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China)

**Abstract** The influence of the air hole size of different rings and the doped dielectric cylinders size in the cladding on the band gap is investigated by plane-wave expansion method(PWM), for photonic crystal fibers(PCF) based on the triangular periodic structure, the composite honeycomb structure and the improved composite honeycomb structure. It is demonstrated that photonic crystal fiber band gap is most sensitive to the air hole size variation in the first two rings. When the change of the air hole size in the  $m$ -th ring is constant, the effect of the air hole size changing on the band gap decreases with the increasing of  $m$ . Through improving the arrangement of these dielectric cylinders in structure or doping the high refractive-index medium, the band gap can be regulated or made wider effectively. Compared with other two structures, photonic crystal fiber with improved composite honeycomb structure can achieve a wider band gap.

**Key words** fiber optics; photonic crystal fibers; improved composite honeycomb structure; photonic band gap; plane wave expansion method

## 1 引言

光子晶体光纤(PCF)的概念最早由 Russell 等<sup>[1]</sup>于 1992 年提出。由于它具有传统光纤无法比拟的奇异特性,引起了国内外广泛的关注和研

究<sup>[2~12]</sup>。光子带隙(PBG)是 PCF 的一个重要特征,PCF 的绝对带隙越大,其性能就越稳定,应用价值越高<sup>[7]</sup>。所以探索具有适当带宽光子带隙的光子晶体光纤结构是一个有意义的研究课题。

收稿日期: 2008-10-10; 收到修改稿日期: 2008-11-10

基金项目: 国家自然科学基金(10874145)和燕山大学博士基金(B153)资助课题。

作者简介: 侯金钗(1984—),女,硕士研究生,主要从事光子晶体光纤及其带隙特性等方面的研究。

E-mail: mimicat9014@yahoo.com.cn

导师简介: 李曙光(1968—),男,教授,主要从事光子晶体光纤及其应用技术等方面的研究。

E-mail: shuguangli@ysu.edu.cn

1998年 Russell 的研究小组研制出的第一根光子带隙光纤是基于蜂窝晶格的<sup>[8]</sup>。在这种光纤中,蜂窝状包层结构产生光子禁带效应,将波长处于PBG中的光限制在空气纤芯区域传播,能够提供比较宽的光子带隙并且具有灵活的设计参数,这在光纤制造领域具有非常重要的意义<sup>[9~11]</sup>。本文针对三角晶格、复合蜂窝晶格和改进的复合蜂窝晶格三种结构的光子晶体光纤,对包层中不同层气孔尺寸及掺杂对光纤带隙的影响进行了研究,主要就改进的复合蜂窝晶格的光子晶体光纤的带隙特性进行了讨论。

## 2 光子带隙的计算方法

目前计算光子带隙的理论方法主要有平面波展开法<sup>[12]</sup>(PWM)、有限元方法、有限差分方法<sup>[13]</sup>、传输矩阵法等。其中,平面波展开法提出最早应用最普遍,具有可以分辨简并模、运算速度比较快和计算

精确的优点,本文即选用平面波法。它是从麦克斯韦方程出发,将周期性介电常数在倒格矢空间做傅里叶展开,这样光子晶体的能带问题就简化为代数本征值方程求解。但是这种方法有缺陷,不能获得描述衰减模式的特征值,不能应用于有损介质的研究。

## 3 三种光纤带隙的分析比较

在通过堆积法拉制光纤的过程中,如果使用圆形毛细管制备蜂窝结构 PCF 预制棒,就会出现间隙孔。间隙孔的存在能够增加蜂窝晶格光子晶体光纤的带隙数目与宽度,有利于实现宽带隙的传输,可以通过设计其本身所构成的蜂窝晶格的参数,进一步来调节复合蜂窝晶格光子晶体光纤的带隙结构<sup>[9]</sup>。改进的复合蜂窝状光子晶体光纤就是以此结构为基础设计的,如图 1 所示。

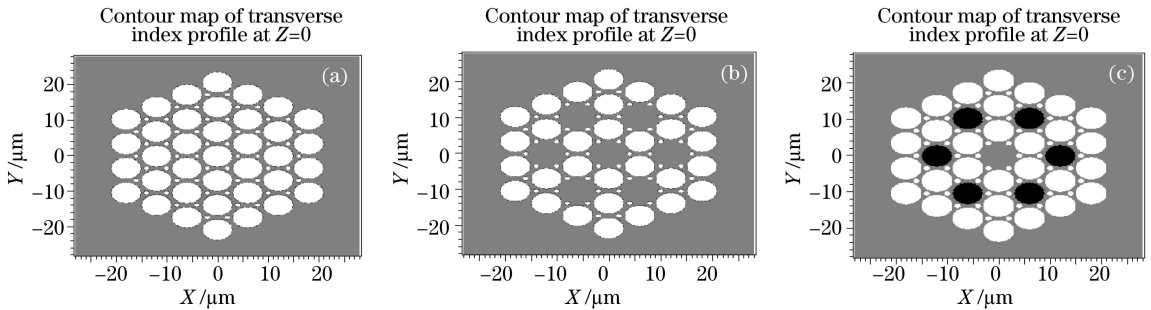


图 1 光子晶体光纤折射率场分布图。基于三角晶格(a), 复合蜂窝晶格(b)和改进的复合蜂窝晶格(c)的光子晶体光纤

Fig. 1 Refractive index fields of photonic bandgap fibers. Photonic crystal fiber based on the triangular periodic structure (a), composite honeycomb structure (b) and improved composite honeycomb structure (c)

由影响光纤带隙变化的因素可以知道,保持光纤包层空气孔的间距不变,仅改变空气孔的尺寸就可以调节光纤带隙。而本文所研究的光纤包层中不同层空气孔的大小单独变化时对光纤带隙的影响程度,这有助于设计和优化具有适当带宽的光子晶体光纤,还可以解释光纤实验研究中的误差问题<sup>[14]</sup>。

### 3.1 基于三角晶格的光纤带隙

首先分析某一包层空气孔尺寸单独变化对三角晶格光纤的带隙影响。图 1(a)中灰色区域是背景介质,小圆孔为间隙孔,大圆孔为空气孔,其中距离纤芯最近的大气孔为第一层空气孔,以此类推。 $\Lambda$ 为空气孔间距, $w$ 为不变化包层空气孔直径, $w_i$ 为单独发生变化的某一包层空气孔直径。例如  $w_1$  表示第一层空气孔的直径, $w_2$  表示第二层空气孔的直径,以此类推。所选光纤参数: $\Lambda = 7.0 \mu\text{m}$ ,  $w = 5.8 \mu\text{m}$ ,取石英折射率为 1.45。数值研究中仅改变

某一层气孔的直径,来考察其对光子带隙的影响。

由图 2 看出, $w_3$  的变化几乎不影响光子晶体光纤的带隙。取  $w = 5.8 \mu\text{m}$ ,开始时光纤带隙几乎不受  $w_1$  的影响,这是由于此时  $w_1$  较小,带隙更容易受大尺寸包层的影响。而当  $w_1$  取  $3.5 \sim 6.1 \mu\text{m}$  之间的值时, $w_1$  对光纤带隙的变化影响较小。在  $w_1 = 6.1 \mu\text{m}$  之后,光纤带隙个数随  $w_1$  增大而增多,宽度变宽且向高频方向移动。 $w_2$  对光纤带隙的影响相对于  $w_1$  来说比较滞后,且较为平坦。当  $w_2 = 4.0 \mu\text{m}$  时,光纤带隙才开始增大,其增长速度也相对较小。

### 3.2 复合蜂窝晶格的光纤带隙

复合蜂窝晶格的光子晶体光纤结构如图 1(b)所示,栗岩锋等<sup>[11]</sup>针对这种结构研究了间隙孔对光纤带隙特性的影响。其包层出现的实心介质柱形成了蜂窝结构, $w_2$  为第二层的空气孔直径,其他参数与图 1(a)所选参数相同。

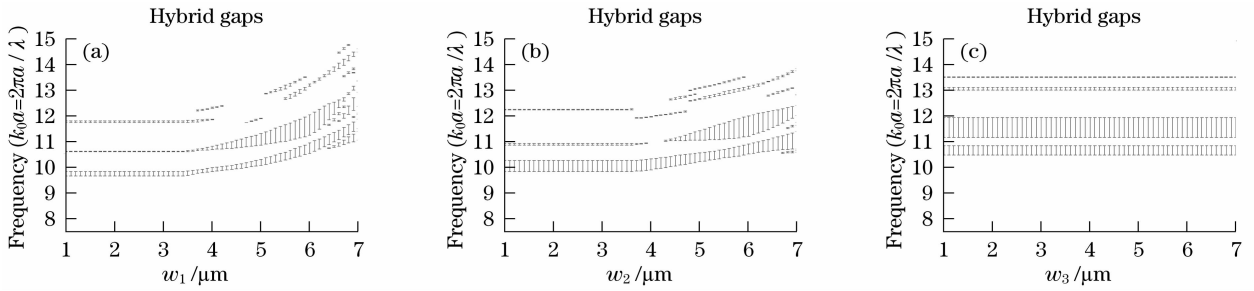


图2 基于三角晶格的光子晶体光纤随包层尺寸变化的带隙图。光纤带隙随第一层(a), 第二层(b)和第三层(c)空气孔直径变化关系图

Fig. 2 Photonic bandgap in the triangular PCF changes with the size of the rings of the first rings (a), the second rings (b) and the third rings (c)

从图3中不难看出,  $w_2$  与  $w_3$  的变化对复合蜂窝晶格的光子晶体光纤的带隙的影响几乎为零。取  $w = 5.8 \mu\text{m}$ , 而第一层空气孔直径  $w_1$  在  $3.5 \sim 6.5 \mu\text{m}$  之间变化时, 光纤带隙变化随第一层空气孔

直径的变化较小。而在  $w_1 = 6.5 \mu\text{m}$  之后, 光纤带隙个数随  $w_1$  增大而增多, 宽度增大且向高频方向移动。在此种光纤的基础上做了一些改进。

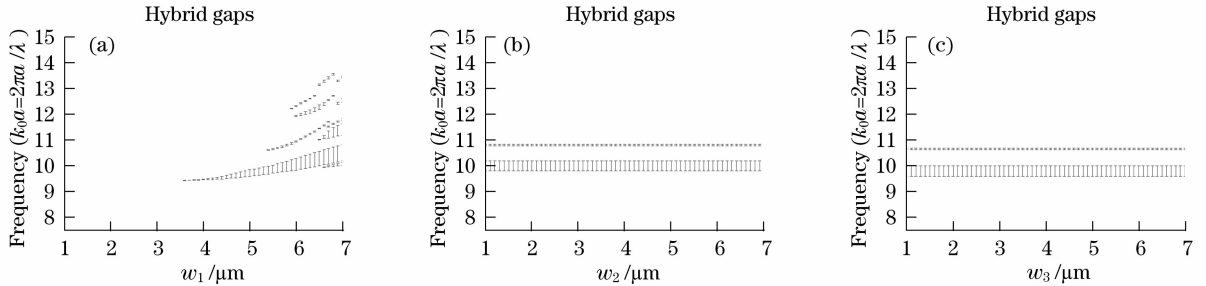


图3 复合蜂窝结构的光子晶体光纤随包层尺寸变化带隙图。光纤带隙随第一层(a), 第二层(b)和第三层(c)空气直径变化关系图

Fig. 3 Photonic band gap in the composite honeycomb PCF changes with the size of the rings of the first rings (a), the second rings (b) and the third rings (c)

### 3.3 改进的复合蜂窝晶格的光纤带隙

所提出的改进的复合蜂窝结构, 即在包层中掺杂高折射率介质, 自身构成蜂窝结构, 如图1(c)所示。图中黑色大圆为掺杂介质柱, 距离纤芯最近的大气孔为第一层空气孔, 以此类推。即  $w_1, w_2, w_3$  分别为第一、二、三层的空气孔直径,  $w_2 d$  为第二层掺杂介质柱直径。文中掺杂介质柱折射率为2, 其他参数与图1(a)相同。

分析图4可知, 第二层与第三层空气孔直径的变化几乎不影响改进的复合蜂窝状的光子晶体光纤的带隙。当  $w_2$  与  $w_3$  取  $5.8 \mu\text{m}$ , 而第一层空气孔直径在  $1 \sim 4.0 \mu\text{m}$  之间变化时,  $w_1$  对光纤带隙影响很小, 此时光纤带隙受掺杂介质柱的调制。在  $4.0 \mu\text{m}$  之后, 光纤带隙随  $w_1$  增大而变宽且向高频方向移动。当第一层、第三层空气孔直径取  $5.8 \mu\text{m}$ , 而  $w_2 d$  在  $1 \sim 3.8 \mu\text{m}$  之间变化时, 光纤带隙不变。光纤带隙从  $w_2 d = 4.3 \mu\text{m}$  开始明显地增多, 宽度也大

幅度变宽, 且向低频方向移动。因此, 在制备光子晶体光纤时可以通过增大掺杂介质柱直径达到增大带隙的效果, 同时也有助于在低频段实现光子带隙导光。

比较图2, 图3与图4可以看出, 这三种光纤带隙随第一层空气孔直径的变化趋势是相同的, 这是因为某一层空气孔变大则意味着波导色散作用的增强, 因而光纤带隙向短波长方向移动, 反之则向长波长方向移动<sup>[15]</sup>。还可以看出, 在每层空气孔直径改变同样大小的情况下, 第一层空气孔的参数对带隙的影响最大, 随着到纤芯距离的增大, 某层空气孔直径大小的变化对带隙的影响越来越小。这与 G. Renversez 等<sup>[16]</sup>的研究结果相符合。由此可见, 在设计光纤参数时, 除了改变空气孔间距, 还可以通过单独调节第一、二层空气孔直径的大小来实现对光子晶体光纤带隙的调节。

图4中改进的复合蜂窝晶格光子晶体光纤的带

隙明显比图 3 中的光纤带隙宽得多,带隙条数也增加了。另外,图 4 中的光纤带隙受第二层掺杂介质柱直径大小变化的影响比较大,这与它自身所构成的蜂窝结构有关。第二层掺杂介质柱自身形成的蜂

窝结构具有增宽和调节带隙的作用。通过改进光纤结构中中介质柱的排列,掺杂折射率比较大的介质,有效地增宽了光纤带隙,因此这种优化的光纤结构可实现更宽的带隙分布,这对光纤的应用很重要。

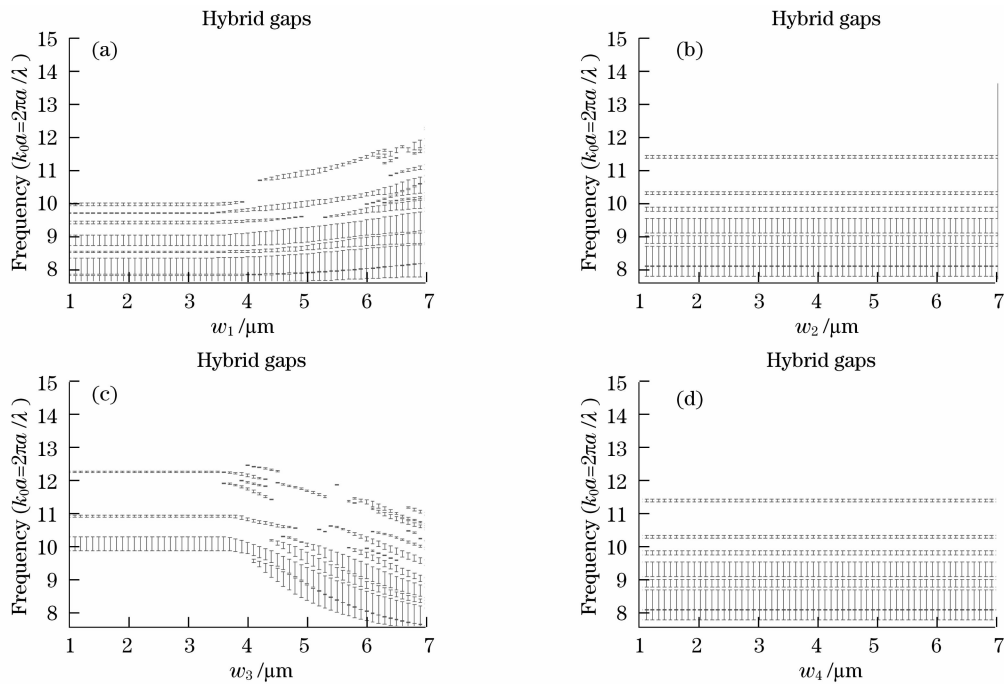


图 4 改进的复合蜂窝状的光子晶体光纤随包层和尺寸变化带隙图。光纤带隙随第一层空气孔(a),第二层空气孔(b),第二层掺杂介质柱(c),第三层空气孔(d)直径变化关系图  
g. 4 Photonic bandgap in the improved composite honeycomb PCF changes with the size of the rings of the first rings (a), the second rings (b), the doped dielectric cylinders size of the second rings (c) and the air hole size of the third rings (d)

## 4 结 论

蜂窝状光子晶体光纤的优点是结构的高度可调性,通过调节 PCF 的结构参数,可有效地调节光纤的带隙特性。从 Maxwell 方程出发,采用平面波法,针对三角晶格、复合蜂窝晶格和改进的复合蜂窝晶格三种结构的光子晶体光纤,对包层中不同层气孔尺寸及掺杂对光纤带隙的影响进行了数值模拟和分析。结果表明,在设计光纤参数时,可以调节第一层或第二层的孔结构来获得更适合的带隙位置和带隙宽度。本文的结论对带隙型光子晶体光纤的设计和制备具有一定的指导意义。

## 参 考 文 献

- J. C. Knight, T. A. Birks, R. F. Cregan *et al.*. Photonic crystals as optical fibers—physics and applications [J]. *Optical Materials*, 1999, **11**(223):143~151
- Zongfeng Ma, Chunxi Zhang, Pan Ou *et al.*. Application of fiber interferometer in coherent Doppler lidar [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(4):261~263
- Li Shuguang, Liu Xiaodong, Hou Lantian. Numerical simulation and analysis on photonic crystal fibers with closing to zero and flattened chromatic dispersion[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(6):713~717
- 李曙光,刘晓东,侯蓝田. 接近于零色散的色散平坦光子晶体光纤的数值模拟与分析 [J]. *中国激光*, 2004, **31**(6):713~717
- Tingting Sun, Guiyun Kai, Zhi Wang *et al.*. Enhanced nonlinearity in photonic crystal fiber by germanium doping in the core region [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(2):93~95
- N. A. Mortensen, M. D. Nielsen. Modeling of realistic cladding structures for air-core photonic bandgap fibers[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(4):349~351
- Li Shuguang, Xing Guanglong, Zhou Guiyao *et al.*. Numerical simulation of square-lattice photonic crystal fiber with high birefringence and low confinement loss [J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(1):238~243
- 李曙光,邢光龙,周桂耀等. 空气孔正方形排列的低损耗高双折射光子晶体光纤的数值模拟 [J]. *物理学报*, 2006, **55**(1):238~243
- J. Broeng, S. E. Barkou, A. Bjarklev *et al.*. Highly increased photonic band gaps in silica/air structures[J]. *Opt. Commun.*, 1998, **156**(4):240~244
- J. C. Knight, J. Broeng, T. A. Birks *et al.*. Photonic band gap guidance in optical fibers [J]. *Science*, 1998, **282**(5393):1476~1478
- M. Y. Chen, R. J. Yu. Analysis of photonic bandgaps in

- modified honeycomb structures [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(3):819~821
- 10 J. Lægsgaard, N. A. Mortensen, A. Bjarklev. Mode areas and field-energy distribution in honeycomb photonic bandgap fibers [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2003, **20**(10): 2037~2045
- 11 Y. Li, C. Wang, M. Hu *et al.*. Honeycomb photonic bandgap fibers with and without interstitial air holes [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(18):6856~6863
- 12 Shangping Guo, Sacharia Albin. Simple plane wave implementation for photonic crystal calculations [J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(2):167~175
- 13 T. Fujisawa, M. Koshiba. Finite element characterization of chromatic dispersion in nonlinear holey fibers [J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(13):1481~1489
- 14 W. H. Reeves, J. C. Knight, P. St. J. Russell *et al.*. Demonstration of ultra-flattened dispersion in photonic crystal fibers [J]. *Opt. Express*, 2002, **10**(14):609~613
- 15 Li Yanfeng. Theoretical analysis of dispersion properties of photonic crystal fibers [D]. Tianjin: Tianjin University, 2004  
栗岩峰. 光子晶体光纤色散特性的理论研究 [D]. 天津: 天津大学, 2004
- 16 G. Renversez, B. Kuhlmeier, R. McPhedran. Dispersion management with microstructured optical fibers: ultraflattened chromatic dispersion with low losses [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(12):989~991

## 《中国激光》“全固态激光技术”专题征稿启事

全固态激光技术是目前我国在国际上为数不多的从材料源头到激光系统集成拥有整体优势的高技术领域之一,随着全固态激光器件与材料研究的迅速发展,对激光先进制造技术、激光显示技术和激光医疗等领域的发展产生了巨大的推动作用,已取得大量研究成果。《中国激光》计划于2009年6月正刊上推出“全固态激光技术”专题栏目,现特向国内外广大读者以及作者征集“全固态激光技术”方面原创性的研究论文和综述,旨在集中反映该方面最新的研究成果及研究进展。

征稿范围包括:

- 激光二极管抽运固体激光器
- 光纤激光器
- 半导体激光器及相关技术
- 晶体材料及相关技术
- 光学薄膜技术
- 其他

截稿日期:2009年3月31日

投稿方式以及格式:通过网上投稿系统(<http://www.opticsjournal.net/zgjg.htm>)直接上传稿件(主题标明“全固态激光技术”投稿),也可直接将稿件电子版发至邮箱:zhgjg@mail.shcnc.ac.cn(主题标明“全固态激光技术”投稿),详情请参见中国光学期刊网:www.opticsjournal.net。本专题投稿文体不限,中英文皆可,其电子版请使用MS-word格式,有任何问题请发邮件至zhgjg@mail.shcnc.ac.cn询问。

《中国激光》编辑部