·特约报告·

文章编号: 1001-5078(2006)增刊-0807-04

复合蜂巢晶格光子晶体光纤的带隙结构研究

栗岩锋,胡明列,柴 路,王清月
(天津大学精密仪器与光电子工程学院超快激光研究室,光电信息技术科学教育部重点实验室,天津 300072)

摘 要:提出了基于复合蜂巢晶格的光子晶体光纤。该光纤包层蜂巢结构每个单元内部包含有一层空气孔,它们形成另一个蜂巢结构。采用平面波展开法研究了这种复合结构的光子晶体光纤的带隙结构随内层蜂巢晶格参数的变化规律。研究发现,内层晶格位置存在一个临界值,在该值以下,光纤的带隙减小。同时得到了一些晶格参数使得次带隙得到抑制,而主带隙大小基本不变。

关键词:光电子学;光子晶体光纤:光子带隙光纤;光子带隙;平面波展开法
中图分类号: TN253 **文献标识码**: A

Bandgap Properties of Photonic Crystal Fibers Based on a Composite Honeycomb Lattice

LI Yan-feng, HU Ming-lie, CHAI Lu, WANG Qing-yue
(Ultrafast Laser Laboratory, College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China, Key Laboratory of Opto - electronics Information and Technical Science (Tianjin University) Ministry of Education, Tianjin 300072, China)

Abstract: A new type of photonic crystal fiber is proposed, which is composed of an internal honeycomb lattice of air holes within each unit cell of the original honeycomb lattice. The bandgaps of such fibers are investigated, and a critical value of the air hole position is found below which the gaps are reduced by the internal lattice. Some parameter ranges where the secondary gap can be suppressed while the primary gap is not identified.

Key words: optoelectronics; photonic crystal fiber; photonic bandgap fiber; photonic bandgap; plane wave expansion method

1 引 言

包层中周期排列有波长量级空气孔的光子晶体光纤(photonic crystal fiber, PCF),由于具有传统光纤所不具备的诸多特性,而在近几年成为光纤光学的研究热点之一[1-2]。光子晶体光纤传导光的机制可以分为两类:改进的全内反射和光子带隙效应。依靠全内反射实现光传输的光子晶体光纤,通常为

基金项目:国家自然科学基金(No. 60278003);国家重点基础研究发展计划(No. 2003CB314904);国家高技术研究发展计划(No. 2003AA311010)资助课题。

作者简介:栗岩锋(1977-),男,天津大学精密仪器与光电子工程学院博士后。主要从事超快激光及其在信息科学中的应用方面的研究。E-mail: yanfengli@tju.edu.cn

收稿日期: 2006-02-27;**修订日期**: 2006-03-02

© 1994-2006 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

实芯结构,因为具有宽带单模特性、灵活的色散和模式面积的调节特性等受到了广泛的研究。采用光子带隙效应[3]的光子晶体光纤又称为光子带隙光纤,通常以空气孔缺陷为纤芯,因而具有较低的非线性效应,可以实现高能量和长距离的脉冲传输[4]。

报道第一根光子带隙光纤是基于蜂巢晶格的[5],尽管目前应用较多的是三角晶格的光子带隙光纤,但蜂巢晶格的光子带隙光纤的研究仍然很多[6-9],因为此种光纤能够提供很宽的光子带隙而且具有灵活的设计参数。理论计算表明[10-11],在堆拉法拉制光子晶体光纤过程中出现的间隙孔,能够增大蜂巢晶格光子晶体光纤的带隙,而这些带隙孔本身构成一个蜂巢晶格,因而其参数可以进一步设计来调节这种复合蜂巢晶格光子晶体光纤(composite honeycomb photonic crystal fiber, CHPBF)的带隙结构。

本文采用平面波展开法研究了这种复合蜂巢晶格光子晶体光纤的带隙结构。研究发现,能够通过内层蜂巢晶格的位置、相对取向和大小等参数来调节光纤的带隙大小,且内层蜂巢晶格位置存在临界值,在此值以下,带隙减小。在一些晶格参数下,次带隙得到抑制,而主带隙大小基本不变。

2 计算模型

复合蜂巢晶格光子晶体光纤的横截面结构及特征参数如图 1所示。外部蜂巢晶格(图中的大圆表示)的两个相邻最近的空气孔的间距为 Λ,大小为 D,内层蜂巢晶格(图中的小圆表示)由空气孔的位置 R、相对于外部晶格的取向 θ和大小 D_{int}来表征。

计算光子晶体光纤带隙的有效方法之一是平面波展开法[12]。由麦克斯韦方程组可以得到磁场满足的主方程为:

$$\nabla \times \frac{1}{\varepsilon(\vec{r})} \nabla \times \vec{H}(\vec{r}) = \frac{\omega^2}{c^2} \vec{H}(\vec{r}) = k^2 \vec{H}(\vec{r}) \qquad (1)$$

其中,$\vec{r}$为空间坐标;$\vec{H}(\vec{r})$为磁场;$\varepsilon(\vec{r})$为介电常数分布;ω为角频率;c为真空中的光速;k为波数。从方程(1)出发,将磁场 $\vec{H}(\vec{r})$和介电常数 $\varepsilon(\vec{r})^{-1}$展开为平面波分量,可以将方程(1)变换为代数特征值问题。同时,利用傅立叶变换的平移性质和叠加性质,可以得到 $\varepsilon(\vec{r})^{-1}$的傅立叶变换的解析表达式,求解特征值问题,就能够得到光纤的带隙结构。这是一个由已知光波的传播常数 β来求解波数 k的过程,计算结果常表示为归一化频率 $k\Lambda$随归一化传播常数 $\beta\Lambda$变化的形式。

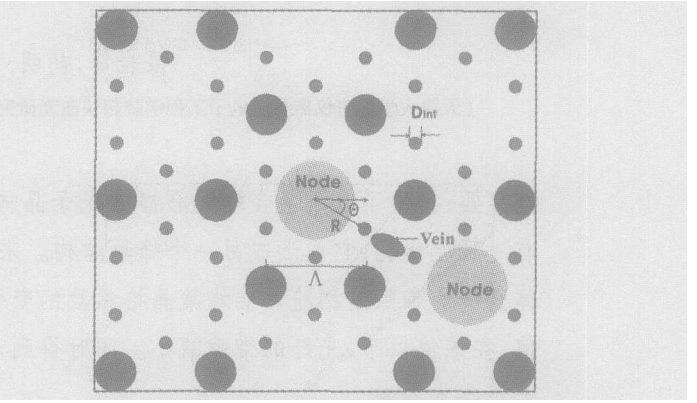


图 1 复合蜂巢晶格光子晶体光纤横截面结构及特征参数示意图

Fig 1 schematic of the structure of a CHPBF and its parameters

3 数值计算结果

取石英的折射率为 1.45,采用平面波法计算了 $D/\Lambda = 0.7$时没有内层蜂巢结构时光子晶体光纤的带隙特征,如图 2所示。计算结果表明,在计算参数范围内,有 4个带隙,其中最宽的两条带隙称为主带隙和次带隙,分别出现在第 2条和第 3条能带以及第 6条和第 7条能带之间。当考虑到内层蜂巢结构时,更高阶的带隙随晶格参数变化很大,因而不再考虑,而主带隙和次带隙几乎一直存在,而且也随内层蜂巢晶格参数而变化。

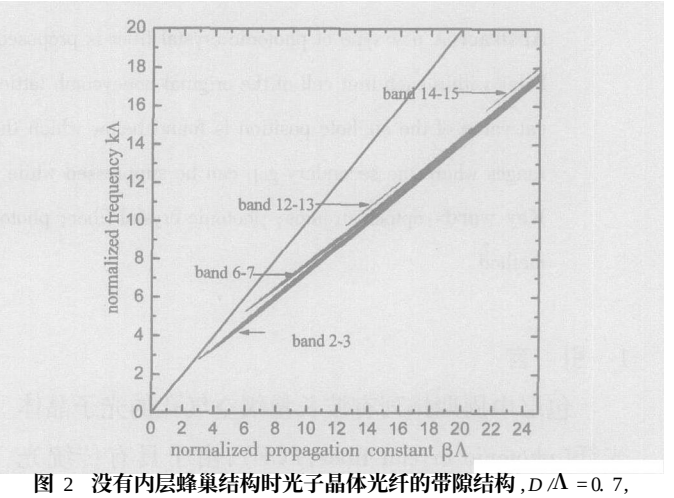


图 2 没有内层蜂巢结构时光子晶体光纤的带隙结构,$D/\Lambda = 0.7$,其中数字表明带隙出现的位置

Fig 2 the bandgap diagram for $D/\Lambda = 0.7$ without the internal structure where the numbers indicate where the gaps appear

© 1994-2006 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

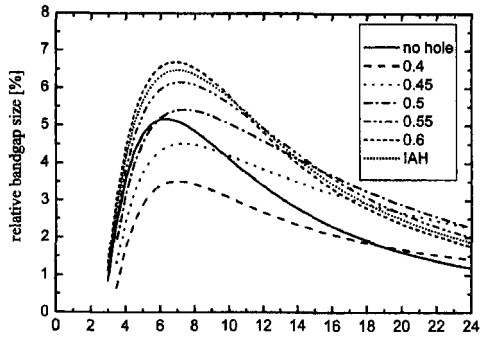


图 3 主带隙相对大小随内层蜂巢晶格位置 R/Λ 的变化，$D/\Lambda=0.7, D_{int}/\Lambda=0.2, \theta=30°$

Fig 3 the relative size of the primary gap as a function of internal hole position R/Λ for $D/\Lambda=0.7, D_{int}/\Lambda=0.2, \theta=30°$

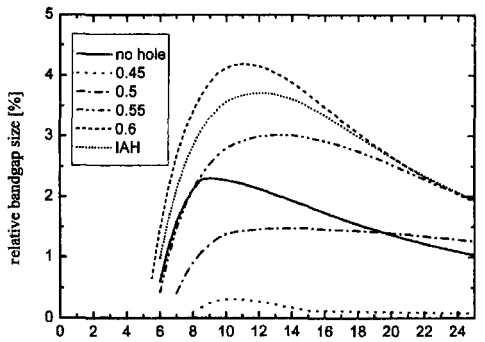


图 4 次带隙相对大小随内层蜂巢晶格位置 R/Λ 的变化，$D/\Lambda=0.7, D_{int}/\Lambda=0.2, \theta=30°$

Fig 4 the relative size of the secondary gap as a function of internal hole position R/Λ for $D/\Lambda=0.7, D_{int}/\Lambda=0.2, \theta=30°$

图 3和图 4分别给出了主带隙和次带隙相对大小(定义为带隙宽度与带隙中心位置之比)随内层蜂巢晶格位置 R/Λ 的变化情况，其中光纤其它参数为 $D/\Lambda=0.7, D_{int}/\Lambda=0.2, \theta=30°$。可以看出，这两条带隙随着空气孔位置的改变而变化，其中 R/Λ 存在着一个临界值，在此值以下，带隙减小。对主带隙而言，这个临界值在 0.45～0.5之间，在 $R/\Lambda=0.45$、$\beta\Lambda\leq10$时，带隙减小。对次带隙而言，这个临界值在 0.5～0.55之间，在 $R/\Lambda=0.5$、$\beta\Lambda\leq20$时，带隙减小。图中的 IAH是我们在文献[11]中研究的带隙孔的情况，这是一种有利于带隙增大的情形。图 3和图 4的结果可以用节点 -脉络(node-and-vein)的方法[11]来解释：由光子晶体理论可知[3]，完全的光子带隙容易在相对孤立的高折射率区被相互连接在一起的称为节点 -脉络的晶格结构中出现。如图 1所示，被空气孔包围的熔石英区域可视为节点，连接节点的狭窄熔石英区域可视为脉络结构，内层蜂巢结构的引入引起了这种节点 -脉络结构的变化，从而影响了光纤的带隙特征。空气孔位置 R 的增大，能够使得高折射率的石英区域(节点)孤立，有利于带隙的产生，而 R 减小到一定程度(临界值)时节点太小从而使得带隙减小。主带隙和次带隙临界值不同，因而在某些参数下，比如 $R=0.5\Lambda$ 时，可以抑制次带隙，这在某些应用中是有利的。

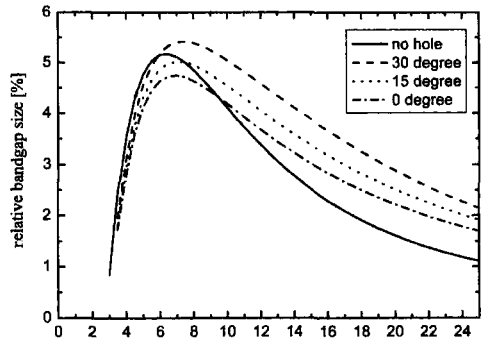


图 5 主带隙相对大小随内层蜂巢晶格相对取向 θ的变化，$D/\Lambda=0.7, D_{int}/\Lambda=0.2, R/\Lambda=0.5$

Fig 5 The relative size of the primary gap as a function of internal hole orientation θ for $D/\Lambda=0.7, D_{int}/\Lambda=0.2, R=0.5$

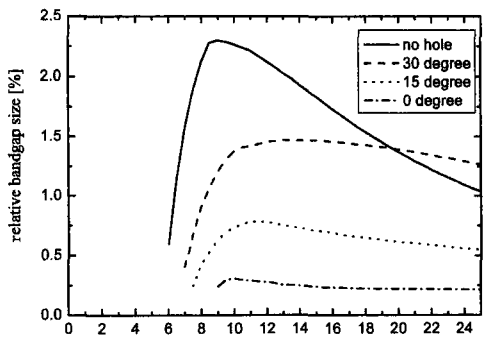


图 6 次带隙相对大小随内层蜂巢晶格相对取向 θ的变化，$D/\Lambda=0.7, D_{int}/\Lambda=0.2, R/\Lambda=0.5$

Fig 6 the relative size of the secondary gap as a function of internal hole orientation θ for $D/\Lambda=0.7, D_{int}/\Lambda=0.2, R/\Lambda=0.5$

类似地，当内层蜂巢晶格相对于外部晶格的取向 θ变化时，两个带隙的大小也发生变化，如图 5和图 6所示。主带隙随 θ变化不是很明显，而次带隙

© 1994-2006 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

随 θ有显著的变化,且当内外晶格取向一致 (θ = 0)时,带隙最小,这是因为此时内层空气孔的位置分布使得连接节点的脉络变宽,因而带隙减小。主次带隙随 θ变化的程度不同,这跟低阶模和高阶模的场分布有关[3]。高阶模的场分布更为复杂,因而次带隙对空气孔位置的分布变化较为敏感。同时发现,当内外晶格取向一致 (θ = 0)时,次带隙也能够被抑制,而主带隙的大小没有大的变化。

最后,可以预料,当内层晶格空气孔尺寸增大时,复合晶格光子晶体光纤的两个带隙都增大,如图 7和图 8所示。

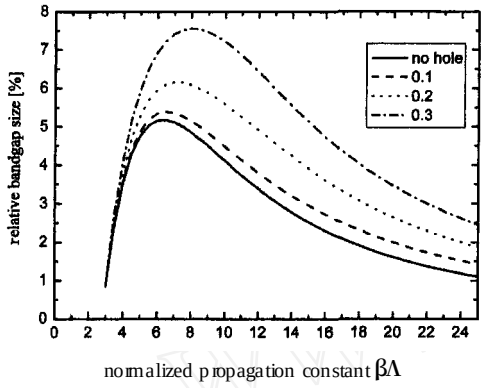


图 7 主带隙相对大小随内层蜂巢晶格空气孔大小 D_{int}/Λ的变化,$D/\Lambda = 0.7$, $R/\Lambda = 0.55$, $\theta = 30°$

Fig 7 the relative size of the primary gap as a function of relative internalhole diameter D_{int}/Λ for $D/\Lambda = 0.7$, $R/\Lambda = 0.55$, $\theta = 30°$

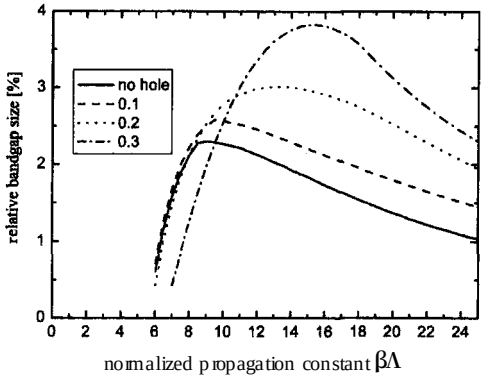


图 8 次带隙相对大小随内层蜂巢晶格空气孔大小 D_{int}/Λ的变化, $D/\Lambda = 0.7$, $R/\Lambda = 0.55$, $\theta = 30°$

Fig 8 the relative size of the secondary gap as a function of relative internal hole diameter D_{int}/Λ for $D/\Lambda = 0.7$, $R/\Lambda = 0.55$, $\theta = 30°$

4 结 论

采用平面波展开法研究了具有复合蜂巢晶格的光子晶体光纤的带隙特征随内层蜂巢晶格参数的变化。计算表明,在一定的参数下,可以抑制次带隙,而保持主带隙大小不变。当内层蜂巢晶格位置小于临界值时,带隙减小。

参考文献:

[1] P, Russell. Photonic crystal fibers[J]. Science, 2003, 299 (5605): 358～362.

[2] J C Knight. Photonic crystal fibres[J]. Nature, 2003, 424 (6950): 847 - 851.

[3] J D Joannopoulos, R D Meade, J N Winn. Photonic Crystals: Molding the Flow of Light[M]. Princeton: Princeton University Press, 1995.

[4] D G Ouzounov, F R Ahmad, D MUller, et al. Generation of megawatt optical solitons in hollow - core photonic band - gap fibers[J]. Science, 2003, 301 (5640): 1702 - 1704.

[5] J C Knight, J Broeng, T A Birks, et al. Photonic band gap guidance in optical fibers [J]. Science, 1998, 282 (5393): 1476 - 1478.

[6] M Chen, R Yu. Analysis of photonic bandgaps in modified honeycomb structures[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2004, 16 (3): 819 - 821.

[7] M Yan, X Yu, P Shum, et al. Honeycomb photonic bandgap fiber with a modified core design[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2004, 16 (9): 2051 - 2053.

[8] M Yan, P Shum. Air guiding with honeycomb photonic bandgap fiber[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2005, 17 (1): 64 - 66.

[9] M Yan, P Shum, J Hu. Design of air - guiding honeycomb photonic bandgap fiber[J]. Opt. Lett., 2005, 30 (5): 465 - 467.

[10] J Broeng, S E Barkou, A Bjarklev, et al. Highly increased photonic band gaps in silica/air structures[J]. Opt. Commun., 1998, 156 (4 - 6): 240 - 244.

[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] S Guo, S Albin. Simple plane wave implementation for photonic crystal calculations[J]. Opt. Express, 2003, 11 (2): 167 - 175.

© 1994-2006 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net