

光子晶体光纤带隙及模场的一种综合模拟分析方法

张晓娟 赵建林[†]

(西北工业大学理学院, 陕西省光信息技术重点实验室, 教育部空间

应用物理与化学重点实验室, 西安 710072)

(2009 年 9 月 18 日收到; 2009 年 12 月 1 日收到修改稿)

提出直接由 MATLAB 读入光纤端面图实现复杂结构光子晶体光纤 (PCF) 模型的快速建立, 并综合平面波法 (PWM) 和频域有限差分 (FDFD) 法, 模拟分析带隙型光子晶体光纤 (PBG-PCF) 的带隙和模场分布. 利用 PWM 计算得到了在 PBG-PCF 中传输的光波频率及模式有效折射率范围; 基于 FDFD 法在给定波长及模式有效折射率范围情况下, 模拟得到了 PBG-PCF 中可能存在的模场分布及其他特性. 以市售的 PBG-PCF 为例, 验证了数值模拟的正确性, 随后系统地分析了结构参数 (晶格结构、“原子”占有率、背景材料折射率及“原子”折射率) 对光子带隙的影响. 这种分析方法及相应分析结果对大带隙 PCF 的设计和制备研究具有一定的参考价值.

关键词: 光子晶体光纤 (PCF), 光子带隙 (PBG), 平面波法 (PWM), 频域有限差分法 (FDFD)

PACC: 4280M, 4225B

1. 引 言

光子晶体光纤 (photonic crystal fiber, PCF) 以其独特的性质 (如无截止波长的单模传输特性^[1]、易于产生超连续谱^[2,3]、高双折射^[4-6]及良好的色散特性^[7]等) 引起了人们极大的关注. 根据不同导光机理, PCF 可分为全内反射 (total internal reflection, TIR) 型和光子带隙 (photonic band-gap, PBG) 型. TIR-PCF 的导光机理与普通光纤基本相同, 光在纤芯中以全内反射方式传播; PBG-PCF 的纤芯折射率小于包层等效折射率, 通过周期性包层结构所具有的 PBG 效应, 将光束限制在纤芯区域传播. 理论上讲, PBG-PCF 是在纤芯中的空气孔中传光的, 因而作为材料属性的吸收、色散和非线性效应都不复存在. 这样, 光纤对传输光信号的损耗以及失真的影响均非常小. 但目前报道的 PBG-PCF 的最小损耗仍大于传统的单模光纤, 限制了其在光纤通信领域的应用. 研究表明, 大带隙的 PCF 结构可以有效限制光传输模式, 降低光纤损耗.

PBG 是否存在主要取决于 PCF 的三个因素: 晶格结构、“原子”占有率及材料折射率 (或介电常数). 起初, 制作 PCF 材料的折射率不能随意改变,

设计大带隙 PCF 的方法主要是针对某个特定晶格结构, 通过调控其结构参数来实现大带隙优化^[8,9], 这就限制了优化和设计大带隙研究工作的深入. 现阶段, 可以通过在空气孔中注入一定介质^[10,11] (如 EIT 原子气体或不同固体介质) 实现填充材料折射率的改变, 进而得到不同频率范围内的 PBG. 因此, 研究 PBG 与晶格结构、“原子”占有率及材料折射率之间的关系对制作大带隙 PCF 至关重要. 目前, 围绕 PBG 型 PCF 的研究主要集中在损耗方面. Saitoh 等^[12] 和 Hu 等^[13] 分别在 2003 年和 2007 年研究了损耗随包层空气孔层数、“原子”占有率及背景材料折射率的变化关系. 但已报道的文献中, 对于 PBG 与晶格结构、“原子”占有率及材料折射率之间的关系, 尚没有一个全面系统的研究.

本文综合平面波法 (PWM) 和频域有限差分 (FDFD) 法分析两种 (正方和三角) 结构的 PBG-PCF. 首先利用 PWM 分析在面外入射情况下两种周期结构中的 PBG 分布, 依据其特征得到可以在 PBG-PCF 中传输的光波的入射角度及频率; 然后依据光波入射角度确定模式有效折射率 n_{eff} 的计算范围, 进一步利用 FDFD 法模拟分析在给定波长情况下 PBG-PCF 中可能存在的模场分布; 最后给出 PBG 与晶格结构、“原子”占有率、背景材料折射率、“原

[†] 通讯联系人. E-mail: jlzha@nwpu.edu.cn

子”折射率之间的关系.

2. 理论分析方法

假设所研究的 PBG 结构中无源,且介质为非磁性材料,将模场分解为平面波分量的叠加,并将折射率展开为傅里叶级数,得到关于 \mathbf{H} 的本征方程^[14]

$$\sum_{\mathbf{G}'} |\mathbf{k} + \mathbf{G}| |\mathbf{k} + \mathbf{G}'| \varepsilon^{-1}(\mathbf{G} - \mathbf{G}') \times \begin{bmatrix} \mathbf{e}_2 \cdot \mathbf{e}_2' & -\mathbf{e}_2 \cdot \mathbf{e}_1' \\ -\mathbf{e}_1 \cdot \mathbf{e}_2 & \mathbf{e}_1 \cdot \mathbf{e}_1' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \end{bmatrix} = \frac{\omega^2}{c^2} \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中 ε 为介电常数, \mathbf{k} 为波矢量, \mathbf{G} 为倒格矢, $\mathbf{e}_{\mathbf{k}+\mathbf{G}}$ 表示垂直于 $\mathbf{k} + \mathbf{G}$ 的单位矢量,可将其分解为两个正交分量 $\mathbf{e}_{1,\mathbf{k}+\mathbf{G}}, \mathbf{e}_{2,\mathbf{k}+\mathbf{G}}$. (1) 式是矢量 PWM 的基本方程,对各个维度的光子晶体都适用.

当光波自二维光子晶体面 (xy 平面) 外入射时, TE 和 TM 模式之间存在耦合,不能分开,因此本征方程的形式不能简化,需要直接求解 (1) 式得到 PBG 关系.

假设光纤中传输着频率为 ω 的单色光波,其电场强度矢量 \mathbf{E} 或磁场强度矢量 \mathbf{H} 的坐标分量可以表示为 $\Phi = \psi \exp[i(\beta z - \omega t)]$, 式中传播常数 $\beta = k_0 n_{\text{eff}}$, 相应地,将麦克斯韦方程组中两个旋度方程按 FDFD 法在一个差分格点上进行离散化,并采用各向异性完全匹配吸收层,可得本征方程^[15]

$$\mathbf{P} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{xx} & P_{xy} \\ P_{yx} & P_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \beta^2 \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\mathbf{Q} \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{xx} & Q_{xy} \\ Q_{yx} & Q_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \end{bmatrix} = \beta^2 \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \end{bmatrix}. \quad (3)$$

对于特定波长的光波,通过求解上述本征方程,可以得到传输模式的有效折射率和相应的模场分布,具体见文献[15]. 并且,还可以由此方法计算得到 PCF 的其他传输特性,如根据模式 n_{eff} 随波长的变化关系拟合出 PCF 的色散曲线;通过模场的空间强度分布计算出相应模场的有效面积;由 β 的虚部 β_i 计算 PCF 的泄露损耗 ($L_{\text{loss}} = 8.686\beta_i$) 等.

3. 数值模拟结果及分析

对于不同晶格结构,其“原子”占有率(‘atom’ filling fraction) f 的定义不同. 常用的三角晶格和正方晶格的 f 分别定义为^[16]

$$f = \frac{2\pi R^2}{\sqrt{3}a^2} \quad (\text{三角晶格,最大值为 } 0.9069), \quad (4)$$

$$f = \frac{\pi R^2}{a^2} \quad (\text{正方晶格,最大值为 } 0.7854), \quad (5)$$

式中, R 为“原子”半径, a 为晶格常数即相邻“原子”间距.

3.1. HC-1550-02 型 PCF 的带隙及模场分析

选取图 1 所示的由 Blaze Photonics^[17] 公司生产的 HC-1550-02 型空气芯 PBG-PCF 为样品. 该结构 PCF 的包层为“原子”间距 $a = 3.8 \mu\text{m}$ 的周期结构, f 达到 90% 以上,纤芯为一个直径等于 $10.9 \mu\text{m}$ 的空气孔. 这种结构又被称为低损耗空气芯薄壁六角形 PBG-PCF. Blaze Photonics 公司提供的资料显示,这种 PBG-PCF 可以将 95% 以上的光功率限制在纤芯中传输,而在中心波长 $1.55 \mu\text{m}$ 处,基模模式 n_{eff} 约为 0.99.

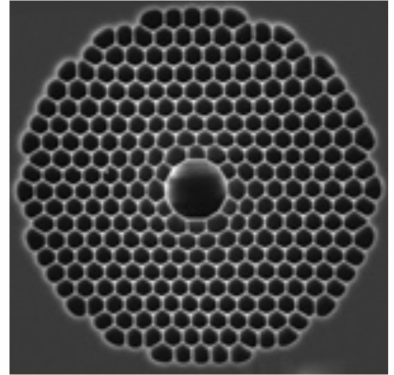


图 1 HC-1550-02 型 PCF 端面图

由于光纤包层中空气孔形状大小不规则,具体 f 不能确定,故采用图 2 所示 $f = 0.9$ 的规则三角晶格近似分析其带隙,且取 $a = 3.8 \mu\text{m}$.

首先采用 PWM 计算图 2 所示三角晶格在面外入射时的带隙. 主要思路是:将波矢 \mathbf{k} 分解为沿传播方向的轴向分量 k_z 和垂直于传播方向的横向分量 \mathbf{k}_t , 并且先设置一个固定的轴向波矢 k_z , 再在横向取任意波矢 \mathbf{k}_t 计算其带隙;接着再取另一个 k_z , 同样取任意的横向 \mathbf{k}_t 计算得到带隙... 这样便可以得到在不同 k_z 和 \mathbf{k}_t (即任意波矢) 情况下的带隙图,结果如图 3 所示,其中横坐标和纵坐标分别为归一化传输常数 $k_z a$ (即 βa) 和归一化频率 ka ($\omega a/c$). 由图 3 可以通过简单的计算得到能够在光纤中传输的光波的人射角度和频率范围. 因为空气纤芯中可能存

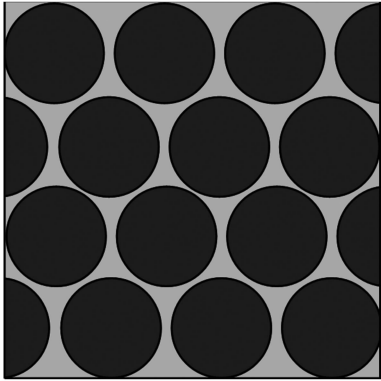


图2 三角晶格

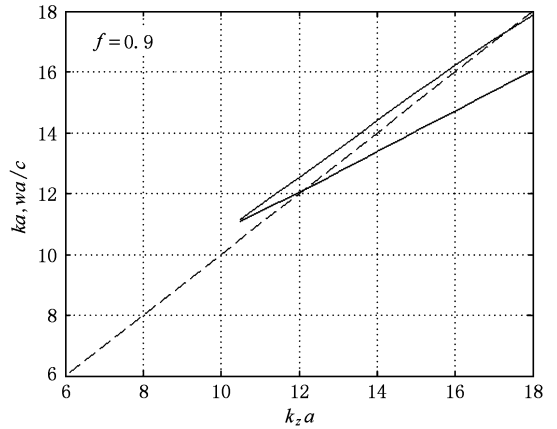


图3 带隙随纵向传播常数的变化

在模式的 n_{eff} 应小于 1, 所以由图 3 所示带隙中高于空气折射率曲线的部分才可以在光纤纤芯中传输. 图中横坐标与纵坐标之比 $k_z a / ka = \cos(\theta_z)$, 即等于光波由光纤端面入射时波矢量与光纤轴线间夹角 θ_z 的余弦值. 由于模式的 $n_{\text{eff}} = n_{\text{air}} \cos(\theta_z)$, 所以基于图 3, 经过简单的横坐标与纵坐标之比的计算, 便可得出能够在光纤中传输的模式的 n_{eff} 范围为 0.941—1, 能够在此结构 PCF 中传输的光波与光纤轴线的夹角必须小于 19.7798° . 进而, 通过分析计算, 得到可以在光纤中传输光波的波长范围为 1.34—2.1505 μm .

模拟计算 PCF 模场分布的方法很多, 但从文献 [18] 看, 理论模拟与实际测量结果之间总是存在较大差异. 主要原因是模拟过程中所采用的 PCF 端面与拉制的实际端面存在差异. 这里基于 FDFD 原理提出一种能够较为精确地模拟实际 PCF 中模场分布的方法. 首先, 利用 MATLAB 直接读入实际光纤端面图, 并对读入的端面图进行二值化域值处理,

最后利用处理过的二值化结果表示光纤端面中不同的介质, 带入本征方程中进行求解即可得到能够在其中传输的模式及对应模式的 n_{eff} .

依据模式的 n_{eff} 范围, 代入光纤端面的介电常数分布, 通过求解特征方程 (2) 和 (3), 可以计算得到在特定波长处, 能够在光纤中传输的模场分布及模式的 n_{eff} .

图 4(a) 所示为 HC-1550-02 型空气芯 PBG-PCF 经过二值化域值处理后, 其中心处的端面图. 图 4(b) 为模拟计算得到的能够在该 PCF 中传输的基模模场的光强分布. 图 4(c) 为实测的光纤近场光强分布. 可以看出, 经二值化处理得到的 PCF 端面 and 实际端面基本一致. 模拟结果与实测结果符合很好, 光斑均呈现出明显的六角形形状, 且周围都分布着许多小光斑, 但中心的光斑略有不同. 这主要是由于在理论模拟时, 计算机计算精度所致. 在数值模拟过程中, 格点数越多精度越高, 但对计算机的要

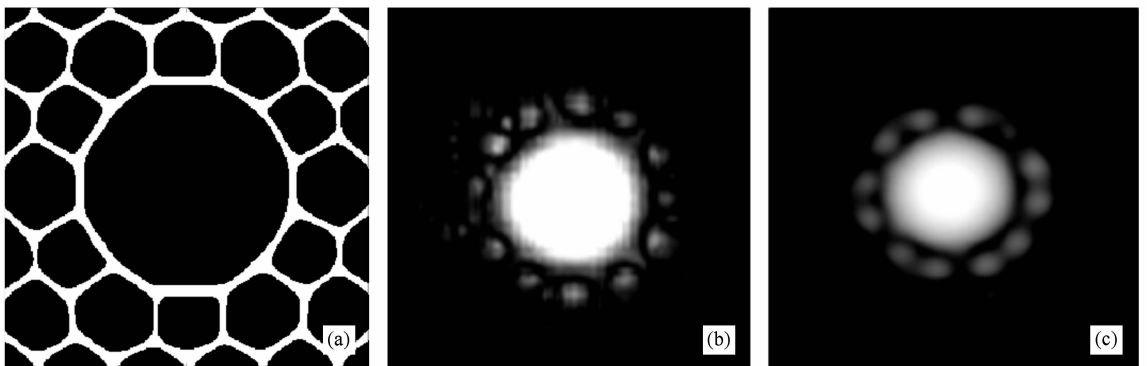


图4 HC-1550-02 型 PBG-PCF 模拟与实测基模模场分布 (a) 二值化域值处理后的 PCF 端面; (b) 数值模拟结果; (c) 实际拍摄结果

求也就更高. 因此在计算中需要合理设置晶格个数使之不超过计算机的容量. 计算得到的基模模式的 $n_{\text{eff}} = 0.9936$, 与厂家提供的该结构的 n_{eff} 约为 0.99 相符合. 由此可见, 利用 MATLAB 直接读入实际 PCF 端面图, 大大降低了复杂结构 PCF 模型建立的难度, 也在很大程度上减小了由模型误差导致的计算结果误差, 是分析实际 PCF 较为实用的一种方法.

3.2. PCF 结构参数对光子带隙的影响

3.2.1. 晶格结构的影响

固定“原子”折射率 $n_1 = 1$ 、背景材料折射率 $n_2 = 1.45$ 及相邻“原子”间距 $a = 3.8 \mu\text{m}$, 分别计算三角晶格和正方晶格在最大“原子”占有率 f 情况下的 PBG, 结果如图 5 所示. 其中图 5(a)

为三角晶格带隙图, 图 5(b) 为正方晶格带隙图. 可以看出, 固定其他结构参数, 在最大 f 情况下, 三角和正方晶格分布所形成的能带差别很大. 在三角结构情况下, 归一化频率 ka 在 11.1—17.8 范围(即波长 λ 在 1.34—2.1505 μm) 内, 并且位于高于红线的区域的光波模式才可以在光纤纤芯中稳定传输. 而正方晶格情况下, 共有三个稳定传输的区域, 其归一化频率 ka 分别位于 5.7—7.57, 10.1—10.7 和 10.55—12.15(即工作波长 λ 分别位于 1.965—2.26 μm , 2.36—2.38 μm 和 3.154—4.189 μm) 范围. 可以看出, 相比三角晶格情况, 正方晶格带隙数目增多, 但能够传输的波长范围减小, 因此三角晶格更容易形成 PBG, 这与文献[19,20]结果一致. 故下面仅讨论三角晶格情况.

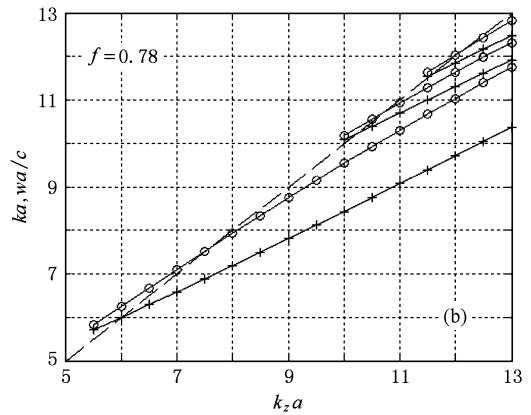
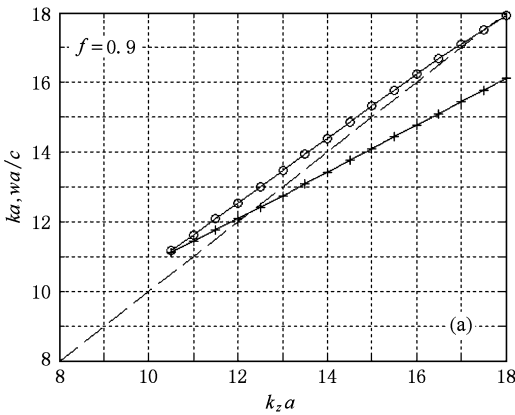


图 5 不同晶格结构的光子带隙 (a) 三角晶格; (b) 正方晶格

3.2.2. “原子”占有率 f 的影响

固定 $n_1 = 1, n_2 = 1.45, a = 3.8 \mu\text{m}$, 仅改变 f , 得到如图 6 所示的带隙图. 由图 6 可以看出, f 减小, 带隙数目增多, 但带隙宽度减小(即波长范围变窄). 因此要实现在很宽的波长范围内稳定传输, 则应增加 f , 即在实际制作各光纤过程中应使包层“原子”排列尽量密集.

3.2.3. 背景材料折射率 n_2 的影响

固定 $n_1 = 1, f = 0.9, a = 3.8 \mu\text{m}$, 改变 n_2 , 得到如图 7 所示的带隙图. 可以看出, 当 $n_2 = 1.49$ 时, 对应的归一化频率为 10.65—16.5, 波长为 1.447—2.242 μm , 工作波长宽度为 0.795 μm ; 当 $n_2 = 1.58$ 时, 对应的归一化频率为 10.05—14.73, 波长为 1.62—2.376 μm , 工作波长宽度为 0.756 μm ; 当 n_2

进一步增大到 1.8 时, 对应的归一化频率为 8.65—11.66, 波长为 2.048—2.76 μm , 工作波长宽度为 0.712 μm . 说明增大 n_2 时, 工作波长的上、下限均上移, 且波长范围减小.

3.2.4. “原子”折射率 n_1 的影响

固定 $n_2 = 1.8, f = 0.9, a = 3.8 \mu\text{m}$, 改变 n_1 , 得到如图 8 所示的带隙图. 可以看出, 当 $n_1 = 1.2$ 时, 归一化频率为 8.85—13.6, 波长为 1.76—2.7 μm , 工作波长宽度为 0.94 μm ; 当 $n_1 = 1.45$ 时, 归一化频率为 10.56—17.8, 波长为 1.34—2.26 μm , 工作波长宽度为 0.92 μm ; 当 $n_1 = 1.58$ 时, 归一化频率为 12.24—21.8, 波长为 1.095—1.95 μm , 工作波长宽度为 0.855 μm . 说明 n_1 增加时, 工作波长的上、下限均下移, 且波长范围减小.

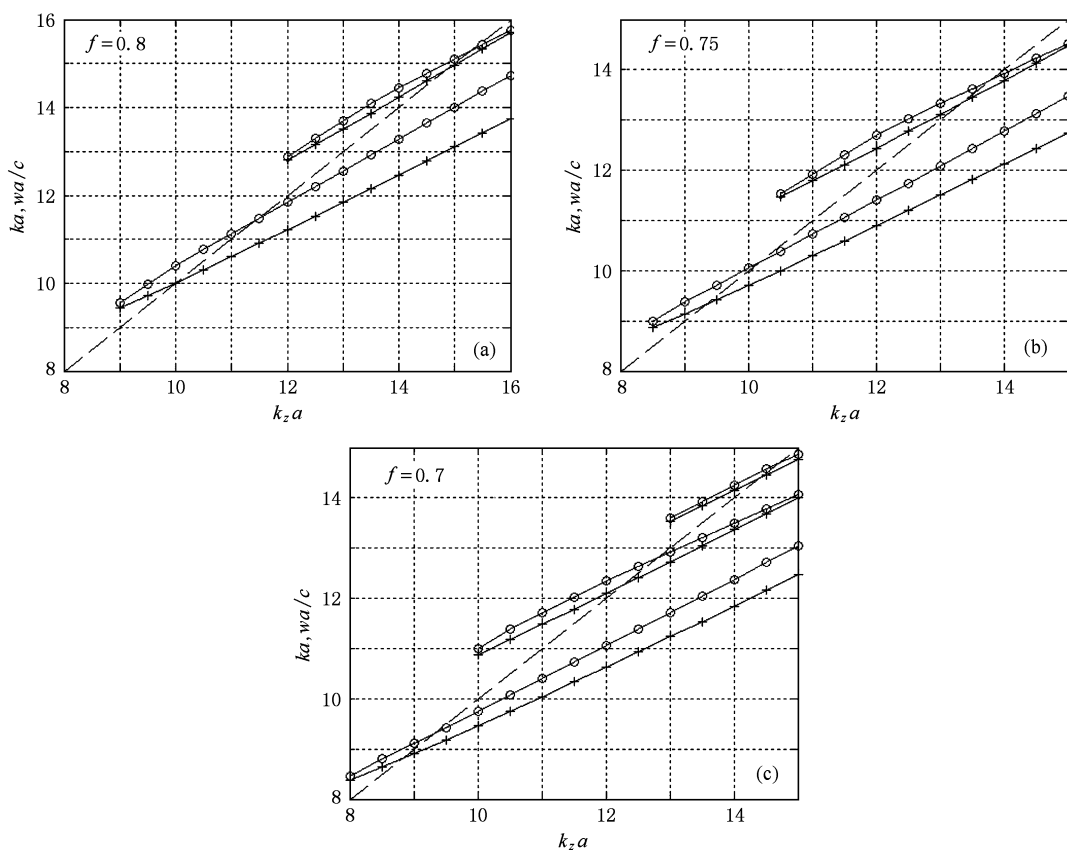


图 6 不同“原子”占有率 f 的光子带隙

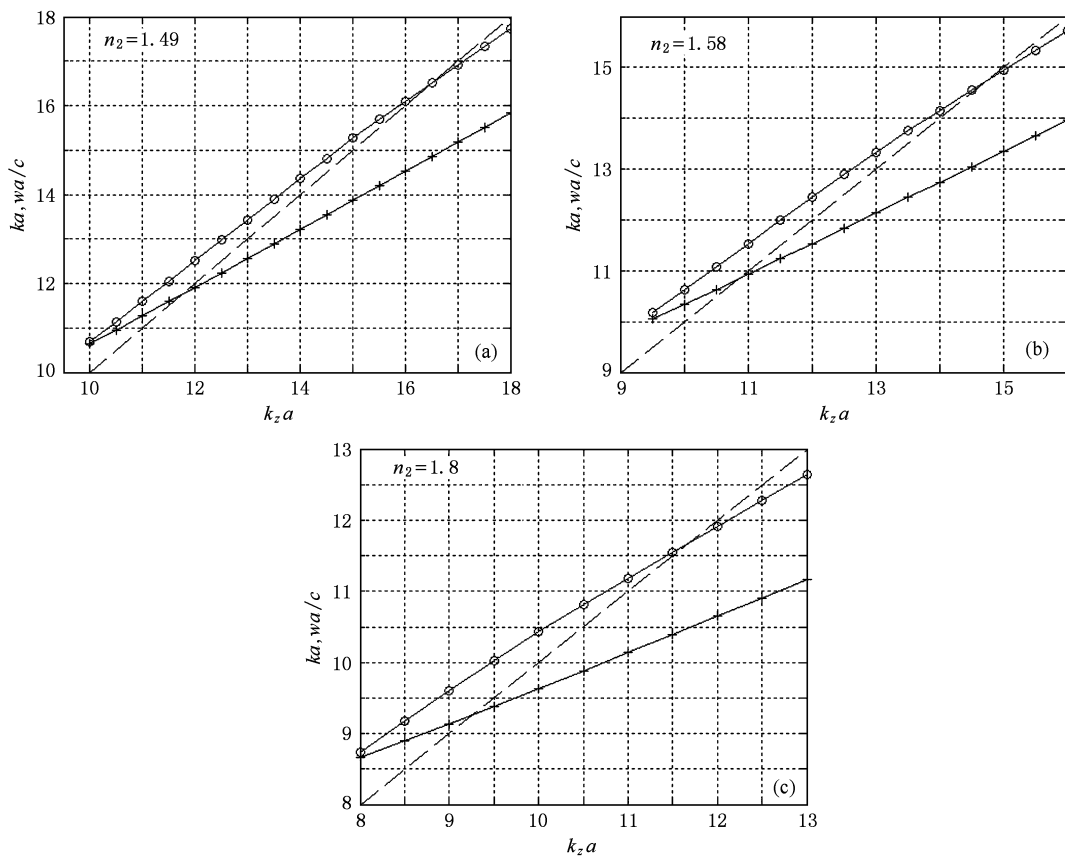


图 7 不同背景材料折射率 n_2 的光子带隙

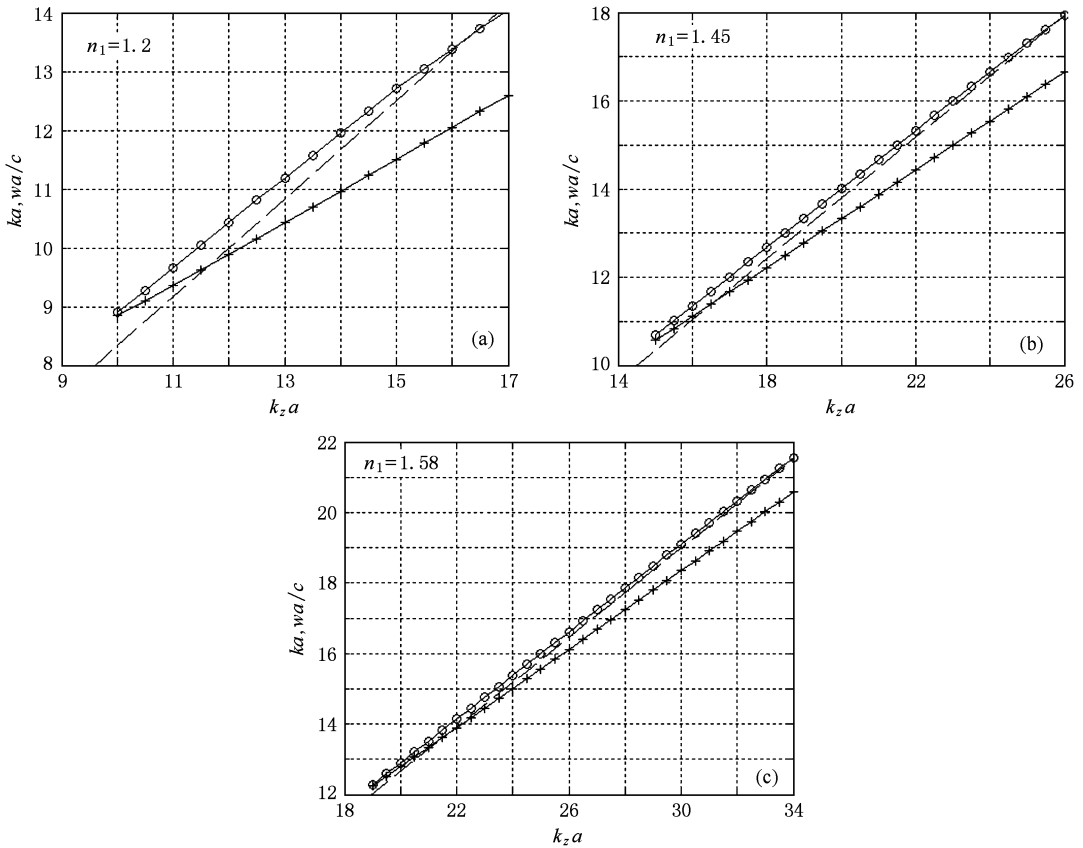


图 8 不同“原子折射率” n_1 的光子带隙

4. 结 论

综合利用 PWM 和 FDFD 模拟分析了空气芯 PBG-PCF 的带隙和模场分布,详细讨论了 PBG 与 PCF 晶格结构、“原子”占有率 f 、背景材料折射率 n_2 及“原子”折射率 n_1 之间的关系,提出直接由 MATLAB 读入光纤端面图以实现复杂结构 PCF 传输特性的便捷分析.结果表明:1)就三角晶格和正方晶

格而言,三角晶格更易获得宽波长范围的 PBG,但大带隙的 PCF,需要“原子”占有率 f 大的三角晶格;2)“原子”占有率 f 越大,带隙范围越宽;3)“原子”折射率 n_1 不变,增加背景材料折射率 n_2 ,工作波长的下限、上限均上移,且波长范围减小;4)背景材料折射率 n_2 不变,增加“原子”折射率 n_1 ,工作波长的上、下限均下移,且波长范围减小;5)实测模场和数值模拟结果符合很好.这种分析方法及相应分析结果对大带隙 PCF 的设计和制备研究具有一定的参考价值.

- [1] Birks T A, Knight J C, Russell P St J 1998 *Opt. Lett.* **23** 961
 [2] Choi H G, Kee C S, Sung J H, Yu T J, Ko D K, Lee J M, Park H Y, Kim J E 2008 *Phys. Rev. A* **77** 035804
 [3] Zhang H, Yu S, Zhang J, Gu W Y 2007 *Opt. Express* **15** 1147
 [4] Ortigasta-Blanch A, Knight J C, Wadsworth W J 2000 *Opt. Lett.* **25** 1325
 [5] Zhang X J, Zhao J L, Hou J P 2007 *Acta Phys. Sin* **56** 4668 (in Chinese) [张晓明、赵建林、侯建平 2007 物理学报 **56** 4668]
 [6] Yang Q Q, Hou L T 2009 *Acta Phys. Sin* **58** 8345 (in Chinese)

- [杨倩倩、侯蓝田 2009 物理学报 **58** 8345]
 [7] Matsui T, Nakajima K, Sankawa I 2007 *J. Lightw. Technol.* **25** 757
 [8] Yoshino K, Shimoda Y, Kawagishi Y, Nakayama K, Ozaki M 1999 *Appl. Phys. Lett.* **75** 932
 [9] Zhuang F, Wu L, He S L 2002 *Chin. Phys. Lett.* **11** 834
 [10] Liu J F, Zhang W G, Kai G Y, Wang Z, Zhang C S, Yuan S Z, Dong X Y 2007 *Acta Photo. Sin.* **36** 1837 (in Chinese) [刘剑飞、张伟刚、开桂云、王志、张春书、袁树忠、董孝义 2007 光子学报 **36** 1837]

- [11] Pottage J M, Bird D M, Hedley T D, Birks T A, Knight J C, Russell P S J 2003 *Opt. Express* **11** 2854
- [12] Saitoh K, Koshiba M 2003 *Opt. Express* **11** 3100
- [13] Hu J, Menyuk C R 2007 *Opt. Express* **15** 339
- [14] Guo Sh P, Albin S 2003 *Opt. Express* **11** 167
- [15] Zhu Zh M, Brown Th G 2002 *Opt. Express* **10** 853
- [16] Couny F, Sabert H, Roberts P J, Tomlinson D A, Mangan B J, Farr L 2005 *Opt. Express* **13** 558
- [17] Knight J C, Broeng J, Birks T A, Russell P S J 1998 *Science* **282** 1476
- [18] Li Z Y, Gu B Y, Yang G Z 1998 *Phys. Rev. Lett.* **81** 2574
- [19] Guo S P, 2003 *Ph. D. Dissertation* (OLD DOMINION UNIVERSITY)
- [20] Anderson C M, Giaps K P 1996 *Phys. Rev. Lett.* **77** 2949

A synthetical simulation and analysis of band-gap and modal field of photonic crystal fiber

Zhang Xiao-Juan Zhao Jian-Lin[†]

(*Shaanxi Key Laboratory of Optical Information Technology, School of Science, Northwestern Polytechnical University, The Key Laboratory of Space Applied Physics and Chemistry, Ministry of Education, Xi'an 710072, China*)

(Received 18 September 2009; revised manuscript received 1 December 2009)

Abstract

We present a method for quickly setting up the complex structure model of photonic crystal fiber (PCF) through directly reading the cross-section of photonic crystal fiber (PCF) by MATLAB, and numerically analyzing the band-gap and the modal field distribution in band-gap PCF (PBG-PCF) by combining plane wave method (PWM) with finite difference frequency domain (FDFD) method. Firstly, the frequency and modal effective index in PBG-PCF can be calculated by using PWM. Then, the modal field distribution and others properties of the PBG-PCF can be obtained in certain wavelength and index ranges by using the calculation results above and FDFD method. To validate its applicability, a type of commercial PBG-PCF was discussed and the influences of the structure parameters (crystal lattice structure, “atom” filling fraction, background material index and “atom” index) on the band-gap were systemically analyzed. This analytic method and calculation results may be useful for the design and preparation of the PCF with large band-gap.

Keywords: photonic crystal fiber (PCF), photonic band-gap (PBG), plane wave method (PWM), finite difference frequency domain (FDFD)

PACC: 4280M, 4225B

[†] Corresponding author. E-mail: jlzha@nwpu.edu.cn