

七芯光子晶体光纤结构优化的数值分析*

方晓惠 胡明列† 栗岩锋 柴路 王清月

(天津大学精密仪器与光电子工程学院, 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

(2008 年 7 月 2 日收到, 2008 年 9 月 26 日收到修改稿)

从耦合模方程出发, 推导了描述七芯光子晶体光纤模场特性的本征方程, 得到了这种结构光纤的本征值和本征矢. 使用频域有限差分法数值模拟, 通过改变传输波长、纤芯间距、包层孔大小分析了纤芯之间的强度分布与耦合系数的关系, 分别实现了模式整形和高阶超模截止. 掌握了具有强耦合特性的七芯光子晶体光纤设计规律, 和这种结构光子晶体光纤的同相位超模的选取方法.

关键词: 光子晶体光纤, 大模场面积光纤, 多芯结构, 频域有限差分法

PACC: 4280M, 6185, 4281F

1. 引言

在高功率脉冲激光光纤放大器以及高功率激光传输方面, 需要光纤具有很大的单模场传输面积. 这样能够有效降低非线性效应并提高损伤阈值, 从而获取高功率高光束质量的激光输出. 传统单模光纤的有效模场面积通常在 $100 \mu\text{m}^2$ 以下, 而光子晶体光纤由于具有灵活的可设计性, 尤其是无截止单模^[1]特性, 使得其能够得到上千平方微米的有效模面积. 这种大模场面积的光子晶体光纤已经在高功率飞秒激光技术中充分应用^[2]. 为了能够进一步提高有效模面积, 多芯光子晶体光纤^[3]提供了一种新的解决方案. 这种结构的光子晶体光纤不仅能进一步提高有效模场面积, 而且由于各个芯之间的离散分布, 热应力^[4]等问题也得到了缓解, 从而能在高功率光纤激光器的应用中进一步提高运转功率, 增益饱和阈值, 并有效降低非线性效应的影响.

多芯光子晶体光纤每个本征模之间有效折射率比较接近, 但是只有同相位超模^[5](每个芯的传输模式之间的相位差为零)的远场才具有较好的高斯分布. 因此以其为介质的激光器面临的主要问题是: 如何保证同相位(锁相)和选择出同相位超模(选模). 在这方面已有相应的研究, 比如通过塔尔博特腔^[6]、

傅里叶变换腔^[7]、熔接普通光纤^[8]、准直透镜外腔^[9]选模等. 纤芯之间渐消场的耦合作用对相位的锁定^[10]具有决定性作用. 光纤结构是影响纤芯之间渐消场耦合强度的根本因素, 因此对光纤结构的优化研究十分必要. Mafi 和 Moloney^[11]最早提出了多芯光子晶体光纤中通过结构优化来进行模式整形. 通过合理的结构来获得需要的模式整形, 能够使同相位超模各个芯的光场均匀分布, 从而保障抽运光能被同相模式有效吸收, 并抑制其他模式的增益. 在多芯光子晶体光纤中, 七芯结构是最具有代表性的一种结构. 因此, 本文将从耦合模方程出发, 利用频域有限差分(FDFD)方法对该结构进行模拟, 详细分析七芯光纤结构参数对模式的影响, 为优化这种光纤结构提供依据.

2. 理论模型

模拟的多芯光子晶体光纤由 7 个芯组成, 光纤端面结构如图 1(a)所示. 材料折射率 $n = 1.45$, 空气孔直径 $d = 2 \mu\text{m}$, 空气孔间距 $\Lambda = 5 \mu\text{m}$, $d/\Lambda = 0.4$ 决定了每个单芯均能保证单模传输^[1]. 波长 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 处对应的同相位超模如图 1(b)所示. 由图 1(b)可见在多芯情况下, 各个纤芯中的模场依然保持单模传输. 这是由于纤芯支持的模式是由材料、几何

* 国家重点基础研究发展规划(批准号: 2006CB806002) 国家高技术研究发展计划(批准号: 2007AA03Z447) 国家自然科学基金(批准号: 60678012, 60838004) 高等学校博士学科点专项科研基金(批准号: 20070056083, 20070056073) 教育部科学技术研究计划重点项目(批准号: 108032) 和教育部新世纪优秀人才支持计划(批准号: NCET-07-0597) 资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: huminglie@tju.edu.cn

结构决定的,纤芯之间的能量耦合只会改变其强度分布,而不会改变其单模传输特性,即每个纤芯仍以单模传输.

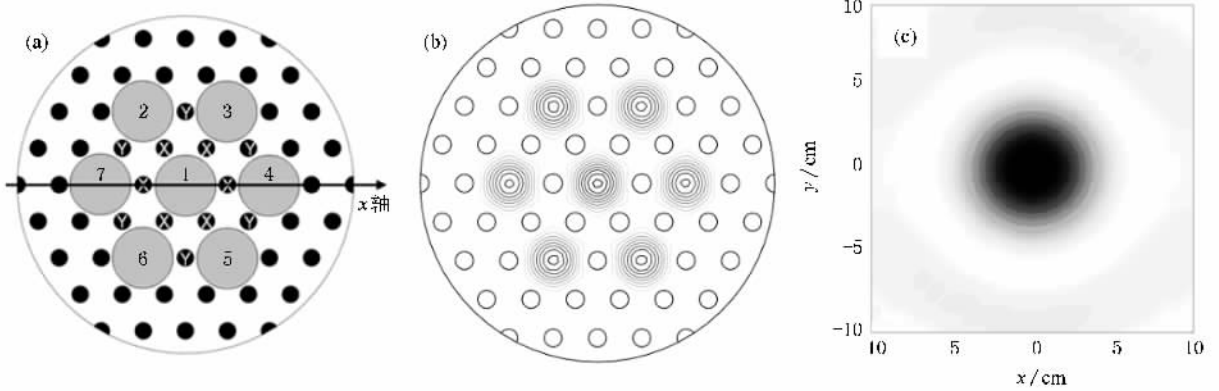


图 1 模拟用多芯光子晶体光纤的端面图和模式分布 (a)端面示意图 (b)计算得到的同相位超模 (c)通过傅里叶变换得到的远场模式分布

每个芯单独存在时,各个芯的电场分布为

$$E_m(x, y) \exp(i\beta_m z). \quad (1)$$

由于发生耦合,总的电场分布为^[12]

$$E(x, y, z) = \sum_m A_m(z) E_m(x, y) \exp(i\beta_m z) \quad (m = 1, 2, \dots, 7). \quad (2)$$

构造一个矢量

$$\mathbf{E}(z) = \begin{bmatrix} A_1(z) \exp(i\beta_1 z) \\ A_2(z) \exp(i\beta_2 z) \\ \dots \\ A_7(z) \exp(i\beta_7 z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_1(z) \\ E_2(z) \\ \dots \\ E_7(z) \end{bmatrix}. \quad (3)$$

假设只有相邻的纤芯之间才能发生耦合,则根据耦合模理论,不同纤芯之间的耦合关系可以用如下耦合方程描述:

$$\frac{d\mathbf{E}(z)}{dz} = \tilde{\mathbf{C}}\mathbf{E}(z), \quad (4)$$

这里

$$\tilde{\mathbf{C}} = \begin{bmatrix} is_1 & ik_{12} & ik_{13} & ik_{14} & ik_{15} & ik_{16} & ik_{17} \\ ik_{21} & is_2 & ik_{23} & & & & ik_{27} \\ ik_{31} & ik_{32} & is_3 & ik_{34} & & & \\ ik_{41} & & ik_{43} & is_4 & ik_{45} & & \\ ik_{51} & & & ik_{54} & is_5 & ik_{56} & \\ ik_{61} & & & & ik_{65} & is_6 & ik_{67} \\ ik_{71} & ik_{72} & & & & ik_{76} & is_7 \end{bmatrix},$$

其中 k_{mn} 为纤芯 m, n 之间的互耦合系数, s_n 为第 n 个芯的自耦合系数. 每一个传播的超模就是场分量的解,除了相位因子待确定外,超模的场分布与坐标 z 无关, $\mathbf{E}(z)$ 可表示为

$$\mathbf{E}(z) = \mathbf{E}(0) \exp(i\Gamma z), \quad (5)$$

其中 Γ 为该超模对应的传播常数. 将 (5) 式代入 (4) 式可得

$$\tilde{\mathbf{C}}\mathbf{E}(z) = i\Gamma\mathbf{E}. \quad (6)$$

解此本征方程就可得到本征值 Γ 和本征矢 $\mathbf{E}(z)$.

在不改变光纤结构之前,由于 7 个芯周围空气孔大小和间隔排布完全相同,所以自耦合系数和互耦合系数之间满足如下关系:

$$s_1 = s_2 = \dots = s_7 = s, \quad k_{mn} = -k_{nm}^* = k. \quad (7)$$

解得 7 个本征值为 $s + k + \sqrt{7}k, s + k, s + k, s - k, s - k, s - 2k, s + k - \sqrt{7}k$. 对应的 7 个本征矢为 $[\sqrt{7} - 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1], [0, -1, -1, 0, 1, 1, 0], [0, 1, 0, -1, -1, 0, 1], [0, -1, 1, 0, -1, 1, 0], [0, -1, 0, 1, -1, 0, 1], [0, -1, 1, -1, 1, -1, 1], [-\sqrt{7} - 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1]$.

从上面解得的本征矢和本征值可以得到两个重要结论. 一方面,只有与本征矢 $[\sqrt{7} - 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1]$ 相对应的超模各个芯为同相位分布,也只有这个本征模具有远场高斯分布^[5],如图 1(c)所示. 另一方面,本征矢给出了纤芯之间的相对强度大小,即对应图 1(a)中纤芯 1 与周围其他芯的强度比为 $\sqrt{7} - 1$, 是一个定值,而不随自耦合强度 s 和互耦合强度 k 变化.

上述两个结论的得出都是基于 (7) 式的假设. 如果芯 1 与其他 6 个芯不同,即

$$s_2 = s_3 = \dots = s_7 = s \neq s_1,$$

$$\begin{aligned} k_{m,n} &= -k_{m,n}^* = ik(m, n \neq 1) \neq k_{1n} \\ &= -k_{m1}^* = k_1, \end{aligned} \quad (8)$$

则此时得到的同相位超模的本征值为 $[E_1, 1, 1, 1, 1, 1, 1]$ 其中,

$$\begin{aligned} E_1 &= - \left[k - \frac{s_1}{2} + \frac{s}{2} - \frac{1}{2}(4k^2 - 4ks_1 + 4ks \right. \\ &\quad \left. + s_1^2 - 2ss_1 + s^2 + 24k_1^2)^{1/2} \right] k_1. \end{aligned} \quad (9)$$

芯 1 与周围 6 个芯的强度比为 E_1 , 与传播常数和耦合系数有关, 而不再为定值. 因此, 通过调整光纤结构参数可以改变传播常数或耦合系数, 使得 $E_1 = 1$, 即可达到模式整形的目的.

3. 数值模拟及结果分析

下面将使用 FDFD 对七芯光子晶体光纤进行数值模拟, 分析不同工作波长对耦合强度的影响, 并通过改变光纤结构调整耦合强度, 以实现各个纤芯具有一致的光强度.

3.1. 波长对耦合强度的影响

由以上的耦合模理论可知, 同相位超模情况下

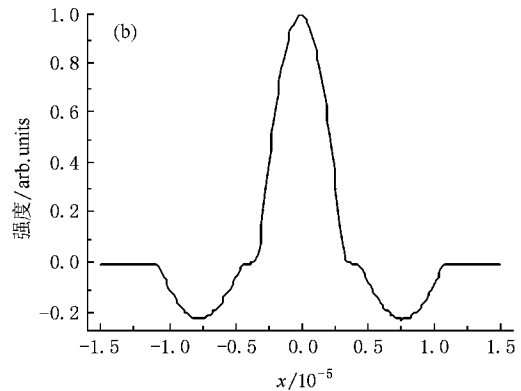
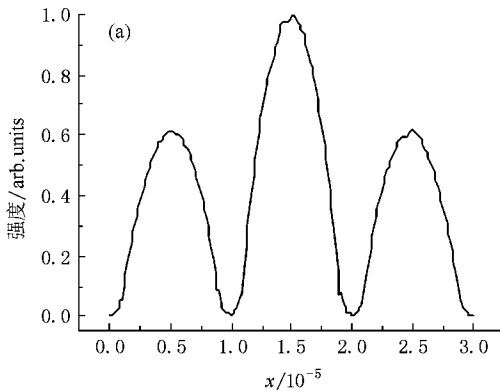


图 2 本征矢 1 和 7 对应的超模电场强度在 x 方向的分布 (a) 本征矢 1 对应的超模 (b) 本征矢 7 对应的超模

3.2. 纤芯间距对耦合强度的影响

通过改变纤芯间距能够实现纤芯之间耦合强度的变化. 图 4 给出了两种包层空气孔大小与间距都相同的光子晶体光纤, 区别仅为纤芯位置不同. I 型的纤芯间距为 2Λ , II 型的芯间距为 $\sqrt{3}\Lambda$, 因此 I 型的耦合强度比 II 型弱.

在空气孔大小都不改变的情况下, 芯 1—7 的模场面积可视为相等, 因此两种结构并没有较大区别.

芯 1 与周围 6 个芯的相对强度为 $\sqrt{7} - 1$, 最高阶超模情况下芯 1 与周围 6 个芯的相对强度为 $-\sqrt{7} - 1$. 图 2 为 FDFD 计算得到的结果, 给出了同相位超模和最高阶超模场强在如图 1(a) 中 x 轴方向的分布, 芯 1 与芯 4 和芯 7 的强度比分别约为 1:0.6 和 1:-0.26, 两者均与理论结果符合较好. 在这种相对完美的对称结构下, 改变波长虽能改变纤芯之间的耦合强度, 但是纤芯之间的相对强度保持不变, 如图 3(a) 所示. 如果将图 1 中芯 1 周围的 6 个空气孔 X 的半径由 $1 \mu\text{m}$ 变为 $1.05 \mu\text{m}$, 此时纤芯之间的相对强度随波长变化明显, 如图 3(b) 所示. 可见在标准的六次对称结构下, 纤芯之间的相对场强不随传播常数和耦合强度变化. 但是如果改变部分空气孔结构, 使某一纤芯区别于其他纤芯, 那么纤芯之间的相对强度将与耦合强度密切相关, 也会随纤芯结构而改变. 在这方面, 光子晶体光纤极大的设计自由度充分发挥了优势, 通过简单地改变空气孔的大小就可以实现纤芯传播常数以及它们之间耦合强度的调整. 另外, 耦合模理论得到的结果与 FDFD 数值模拟结果能够完美地符合, 充分说明了适用于弱耦合条件的耦合模理论在多芯光子晶体光纤中也是适用的.

各芯之间的相对强度相同, 都为 $\sqrt{7} - 1$, 如图 5 所示.

当空气孔 X 或空气孔 Y 大小改变时, 芯 1 与芯 2 之间的相对强度变化趋势有很大差异. 图 6 为这两种结构的纤芯之间场强差随空气孔 X 和空气孔 Y 孔径的变化关系. 从图 6 可以明显看到, I 型结构对空气孔孔径的变化十分敏感, 而 II 型结构则没有如此敏感. 因此, II 型结构比 I 型结构更适合光纤的实际控制. 在这一点上, 纤芯之间强的耦合作用更适合于实际操作. 另外, 通过图 6(a) 和 6(b) 的对比还可以

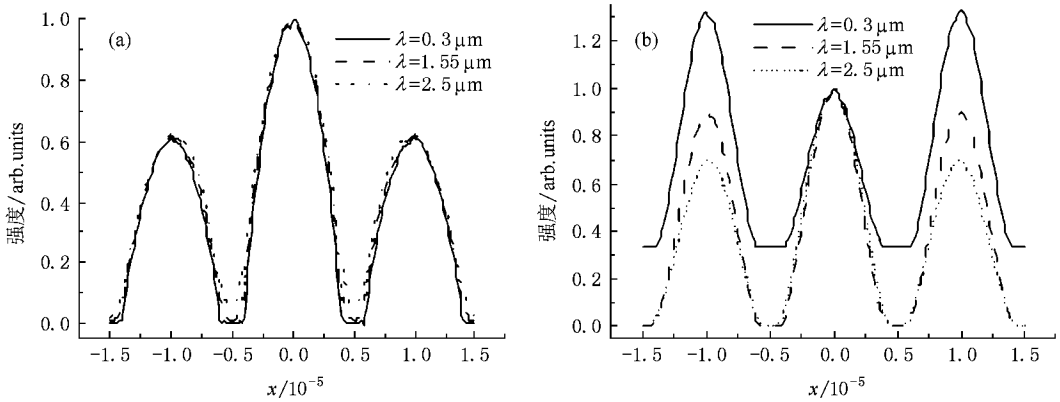


图3 x 方向电场相对强度分布随波长的变化 (a)光纤结构参数不改变 (b)空气孔 X 的半径变为 $1.05 \mu\text{m}$

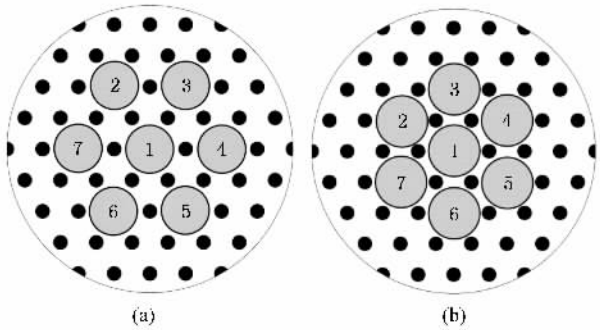


图4 孔间距和孔半径相同,仅外围纤芯排布不同的两种多芯光子晶体光纤端面示意图 (a) I 型 (b) II 型

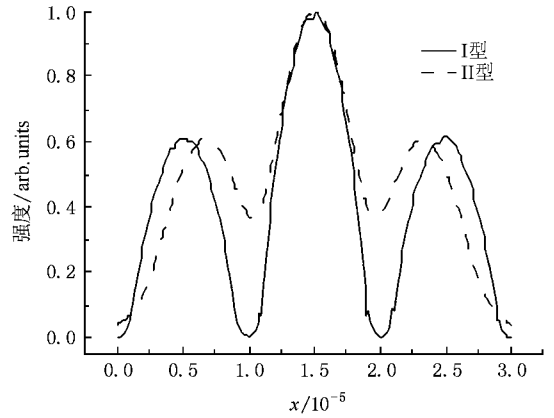


图5 对应图4两种结构同相位超模的相对强度分布

看出,纤芯之间相对强度随空气孔 Y 的改变比随空气孔 X 的改变要缓慢得多,而且模式整形是通过减小空气孔 Y 而增大空气孔 X 来实现的.空气孔的减小一方面增大了有效模面积,另一方面纤芯之间的耦合也加强了.因此,在保持基模传输的前提下,改变空气孔 Y 比改变空气孔 X 更合适.耦合强度的增加也更有利于同相位模式的选定^[11].

或空气孔 Y 的大小(如图 6 中的点线所示).当纤芯 1 与纤芯 2 的强度差为零时,空气孔 X 的半径为 $1.05 \mu\text{m}$ 或空气孔 Y 的半径为 $0.82 \mu\text{m}$,I 型结构实现了模式整形,空气孔 X 的半径为 $1.13 \mu\text{m}$ 或空气孔 Y 的半径为 $0.68 \mu\text{m}$ 时,II 型结构实现了模式整形.两种结构实现模式整形后场强等值线分布如图

从图 6 可以看出,达到模式整形时的空气孔 X

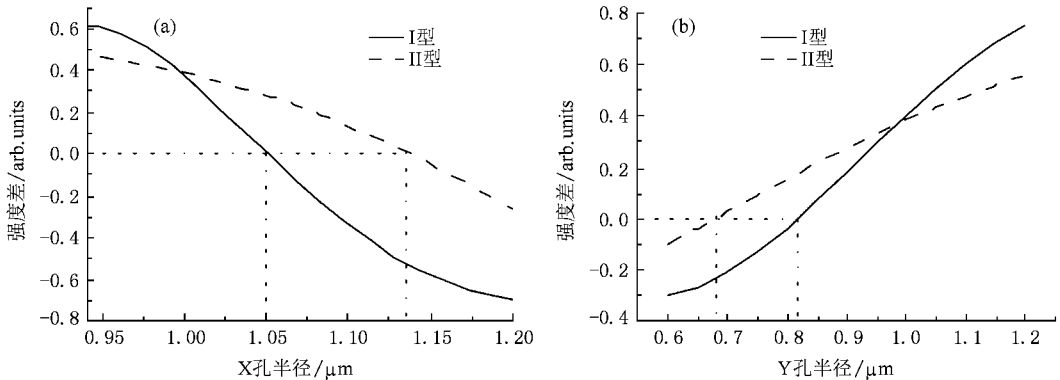


图6 I 型和 II 型两种结构光纤芯 1 与芯 2 之间的强度差 (a)空气孔 X 半径变化 (b)空气孔 Y 半径变化

7 所示.

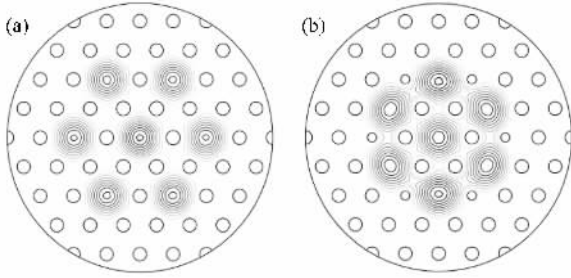


图 7 I 型和 II 型结构实现模式整形后的场强等值线分布 (a) 空气孔 X 的半径为 $1.05 \mu\text{m}$ 或 Y 孔半径为 $0.82 \mu\text{m}$ (b) 空气孔 X 的半径为 $1.13 \mu\text{m}$ 或 Y 孔半径为 $0.68 \mu\text{m}$

3.3. 包层空气孔对耦合强度的影响

下面讨论通过改变包层空气孔大小来改变耦合系数的大小,从而影响场强分布.将 I 型光纤的包层空气孔半径由 $1.0 \mu\text{m}$ 减小为 $0.5 \mu\text{m}$,计算得到 7 个超模的模场等值线分布如图 8 所示.从图 8 可以看出,此时只有 3 个超模能够被局限在纤芯区域(如图 8(a)所示),另 4 个高阶超模大部分能量已经泄露到包层中(如图 8(b)所示),即这 4 个超模已经被截止.这可以从以上推导的本征值得到很好理解.从上述 7 个本征值 $s+k+\sqrt{7}k, s+k, s+k, s-k, s-k, s-2k, s+k-\sqrt{7}k$ 可以看出,当互耦合强度大大增加使得 $s < k$ 时,4 个本征值 $s-k, s-k, s-2k, s+k-\sqrt{7}k$ 将为负,意味着这 4 个模式将被截止,而

只保留剩余的 3 个模式.而空气孔的减小大大增加了纤芯之间的互耦合强度,达到了高阶模截止的目的.由交叉增益原理^[13]可知,模场面积与增益分布乘积的积分较大者能得到更大的增益.假设增益在各纤芯是均匀分布的,只有传播常数为 $s-2k$ 的反相位模的模场面积能与同相位超模相接近,而此模式由于传播常数最小,最容易被截止,从而非常有利于同相位超模的选定.

4. 结 论

在相对完美的对称结构下,无论耦合强度大小,七芯光纤中间芯与周围芯的强度比始终保持为 $\sqrt{7}-1$,而要实现模式整形,必须改变部分空气孔使中间芯区别于周围的 6 个芯.此时,强度分布随耦合强度的变化很敏感.耦合强度受到工作波长影响,可通过改变纤芯间距、包层空气孔大小等来实现.当耦合强度增大到一定程度使得 $s < k$ 时,部分高阶超模将截止,尤其是具有较大模场面积的反相位模将首先被截止,这将大大有利于同相位超模的选取.这些结论可以简单推广到 19 芯等更多芯光纤中.进一步研究发现,纤芯之间强的耦合作用大大降低了对实际多芯光纤拉制工艺的要求,同时提高了输出的光束质量,为大功率光纤激光器提供了一种新的解决方案.

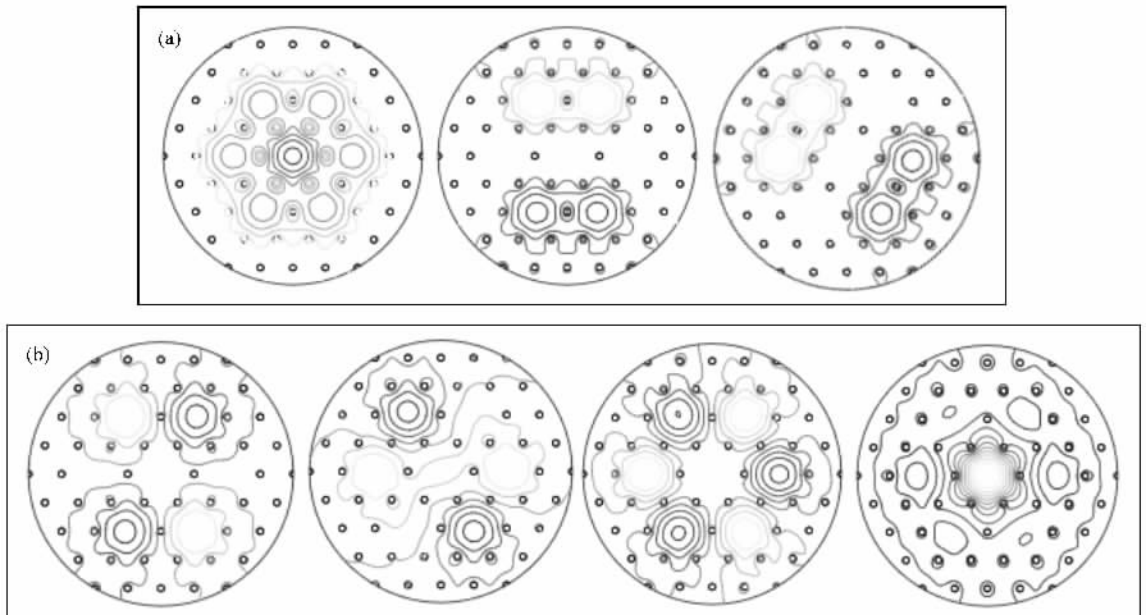


图 8 耦合系数增加后 7 个超模的模场分布 (a) 仍能存在的 3 个超模的模场分布 (b) 被截止的 4 个高阶超模的模场分布

- [1] Birks T A , Knight J C , Russell P S J 1997 *Opt. Lett.* **22** 961
- [2] Song Y J , Hu M L , Chai L , Liu B W , Wang Q Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 6425 (in Chinese) [宋有建、胡明列、柴路、刘博文、王清月 2008 *物理学报* **57** 6425]
- [3] Roberts P J , Shepherd T J 2001 *J. Opt. A* **3** 133
- [4] Huo Y M , Cheo P K 2004 *Photon. Technol. Lett.* **16** 759
- [5] Michaille L , Bennett C R , Taylor D M , Shepherd T J , Broeng J , Simonsen H R , Petersson A 2005 *Opt. Lett.* **30** 1668
- [6] Wragge M , Glas P , Fischer D , Leiter M , Vysotsky D V , Napartovich A P 2000 *Opt. Lett.* **25** 1436
- [7] Corcoran C J , Pasch K A 2004 *J. Phys. A* **37** L461
- [8] Li L , Schülzgen A , Li H , Temyanko V L , Moloney J V , Peyghambarian N 2007 *J. Opt. Soc. Am. B* **24** 1721
- [9] Huo Y M , Cheo P K 2005 *J. Opt. Soc. Am. B* **22** 2345
- [10] Cheo P K , Liu A , King G G 2001 *Photon. Technol. Lett.* **13** 439
- [11] Mafi A , Moloney J V 2005 *Photon. Technol. Lett.* **17** 348
- [12] Zhou P , Hou J , Chen Z L , Liu Z J 2007 *Acta Opt. Sin.* **27** 1812 (in Chinese) [周朴、侯静、陈子伦、刘泽金 2007 *光学学报* **27** 1812]
- [13] Napartovich A P , Vysotsky D V 2007 *Phys. Rev. A* **76** 063801

Numerical analysis for structure optimization of seven-core photonic crystal fibers^{*}

Fang Xiao-Hui Hu Ming-Lie[†] Li Yan-Feng Chai Lu Wang Qing-Yue

(Key Laboratory of Opto-electronic Information Science and Technology of Ministry of Education , College of Precision Instruments and Opto-electronics Engineering , Tianjin University , Tianjin 300072 , China)

(Received 2 July 2008 ; revised manuscript received 26 September 2008)

Abstract

The eigenvalue equation associated with seven-core photonic crystal fiber was derived from coupled-mode equation. Mode properties were analyzed by its eigenvalues and eigenvector. Using the frequency domain finite difference method , the relationship between fiber structure and coupling coefficient was fully discussed through changing the wavelength , hole pitch and core distance. Mode shaping and higher-order supermode cut off was realized. The results were helpful to the fiber structure design and in-phase supermode selection.

Keywords : photonic crystal fiber , large mode area fiber , multi-core , frequency domain finite difference

PACC : 4280M , 6185 , 4281F

^{*} Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant Nos. 2003CB314904 , 2006CB806002) , the National High Technology Development Program of China (Grant No. 2007AA03Z447) , the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60678012 , 60838004) , the Doctoral Program Foundation of Institution of Higher Education of China (Grant Nos. 20070056083 , 20070056073) , the Key Program of Science and Technology Research of Ministry of Education , China (Grant No. 108032) and the Program for the New Century Excellent Talents in University of Ministry of Education , China (Grant No. NCET-07-0597).

[†] Corresponding author. E-mail : huminglie@tju.edu.cn