

文章编号: 0253-2239(2010)09-2719-05

# 大模面积掺 $\text{Yb}^{3+}$ 七芯光子晶体光纤的设计

耿鹏程<sup>1</sup> 侯蓝田<sup>1,2</sup> 韩伟涛<sup>1</sup> 庞 辉<sup>1</sup> 夏长明<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 燕山大学信息科学与工程学院红外光纤与传感研究所, 河北 秦皇岛 066004)  
(<sup>2</sup> 燕山大学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** 要提高七芯光子晶体光纤激光器的输出功率, 必须要增大七芯光子晶体光纤的有效模面积, 并且需要纤芯间具有较强的耦合作用, 以保证各纤芯输出的光束保持同相位。为了更直观的分析七芯光子晶体光纤的有效模场面积和纤芯间耦合强度的关系, 根据七芯光子晶体光纤 7 个超模的特征, 给出了七芯光子晶体光纤耦合长度的一种计算方法。利用多极法和有限差分光束传播法分析了七芯光子晶体光纤的结构对有效模场面积和耦合长度的影响。通过优化七芯光子晶体光纤的结构, 设计了一种外层空气孔较大, 内层空气孔较小的七芯光子晶体光纤, 其有效模场面积高达  $3703 \mu\text{m}^2$ , 耦合长度仅为  $13310 \mu\text{m}$ 。

**关键词** 光纤光学; 相干合成; 光束传播法; 光子晶体光纤; 超模

中图分类号 TN253 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103009.2719

## Design of Large Mode Area $\text{Yb}^{3+}$ -Doped Seven-Core Photonic Crystal Fiber

Geng Pengcheng<sup>1</sup> Hou Lantian<sup>1,2</sup> Han Weitao<sup>1</sup> Pang Hui<sup>1</sup> Xia Changming<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of Infrared Optical Fibers and Sensors, School of Information Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China  
<sup>2</sup> State Key Laboratory of Metastable Materials Science & Technology, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China

**Abstract** To raise output power of the seven-core photonic crystal fiber laser, the effective mode area of seven-core photonic crystal fiber must be increased, and strong coupling among cores is needed to ensure the same phase output. In order to analyse the relationship between effective mode area and coupling strength among cores more intuitively, according to characteristics of the intensity distribution of the seven-core photonic crystal fiber supermode, a calculation method of coupling length of seven-core photonic crystal fiber is given. The effect of structure of seven-core photonic crystal fiber on the effective mode area and coupling length is analyzed with multi-polar method and finite difference beam propagation method. Through continuous optimization of the structural parameters, a seven-core photonic crystal fiber with large outer layer air holes and small inner layer air holes is designed. Its effective mode area is  $3703 \mu\text{m}^2$  and coupling length is  $13310 \mu\text{m}$ .

**Key words** fiber optics; coherent combining; beam propagation method; photonic crystal fiber; supermode

## 1 引 言

高功率激光器在激光切割、激光焊接和激光武器等领域里具有广泛的应用前景, 高功率激光器的研制越来越受到各国政府的重视<sup>[1]</sup>。

由于受到受激拉曼散射和受激布里渊散射的影响, 单根光纤的最大输出功率受到限制, 而且随着功率的增加光束质量变差。如果采用相干组束技术使多路激光束进行相干叠加, 则输出功率得以提高的

收稿日期: 2009-12-07; 收到修改稿日期: 2010-01-11

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(60637010)资助课题。

作者简介: 耿鹏程(1983—), 男, 硕士研究生, 主要从事光纤激光器和相干组束等方面的研究。

E-mail: gengpengcheng@126.com

导师简介: 侯蓝田(1939—), 男, 教授, 主要从事光子晶体光纤和红外光纤等方面的研究。E-mail: hlt8068853@163.com

同时可以保证好的光束质量<sup>[2~6]</sup>,其中多芯光纤激光器是一种可行的方案。多芯光纤是在较大的内包层中有多个掺杂纤芯,每个纤芯的直径和掺杂浓度等均相同,且均为单模,纤芯间的距离很近,利用倏逝波的耦合作用达到同相位激光输出<sup>[7]</sup>。国外多家机构对多芯光纤进行了理论与实验研究<sup>[8,9]</sup>,L. Michaille等<sup>[10]</sup>利用六芯光子晶体光纤(PCF)得到了 44 W 的同相位模输出,后来又利用小孔选择同相位模,将六芯 PCF 用于调 Q 激光器增益介质,得到的单脉冲能量高达 2.2 mJ<sup>[11]</sup>。国内对多芯光纤激光器的研究则刚刚开始,还处于探索阶段,方晓惠等<sup>[12,13]</sup>对多芯 PCF 的结构优化和锁模过程进行

了数值模拟,王春灿等<sup>[14]</sup>和周朴等<sup>[15]</sup>对多芯 PCF 的超模及模式选择进行了相关研究。多芯 PCF 中纤芯间倏逝波的耦合作用对相位的锁定具有决定性的作用,所以在增加纤芯面积的同时必须保证纤芯间有足够大的耦合强度。本文利用多级法和有限差分光束传播法(FD-BPM)对七芯 PCF 的结构对模场面积和耦合强度的影响进行了分析,为设计七芯 PCF 的结构提供了理论依据。

## 2 七芯 PCF 耦合长度的算法

模拟中采用的七芯 PCF 的横截面结构如图 1 所示。

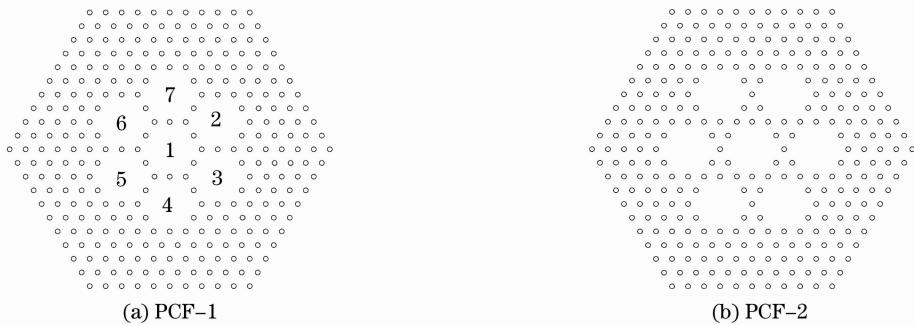


图 1 七芯 PCF 的横截面

Fig. 1 Cross-section of seven-core photonic crystal fiber (PCF)

用光束传播法计算了图 1 中 PCF-1 的超模,几个主要模式的电场分布如图 2 所示,图中给出的 4

个超模的传输常数是由小到大排列的,其中第 7 模式如图 2(d)所示为共相位模式。

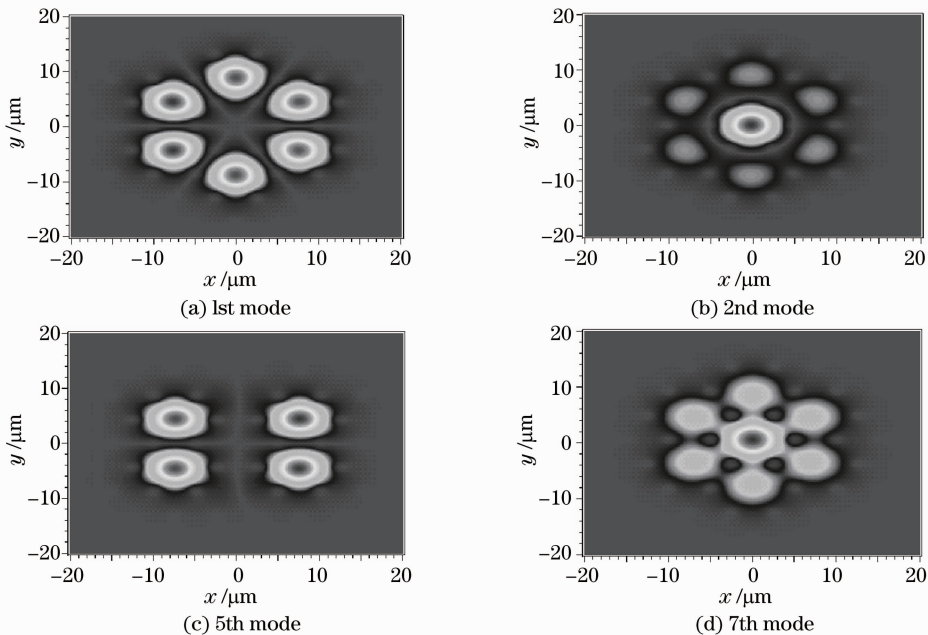


图 2 七芯 PCF 中主要模式分布

Fig. 2 Major supermodes of 7-core PCF

由文献[12]可知七芯 PCF 的 7 个超模对应的 7 个本征矢分别为  $[0, -1, 1, -1, 1, -1, 1]$ ,  $[-\sqrt{7}-1, 1, 1, 1, 1, 1, 1]$ ,  $[0, -1, -1, 0, 1, 1, 0]$ ,  $[0, 1, 0, -1, -1, 0, 1]$ ,  $[0, -1, 1, 0, -1, 1, 0]$ ,  $[0, -1, 0, 1, -1, 0, 1]$ ,  $[\sqrt{7}-1, 1, 1, 1, 1, 1, 1]$ 。本征矢给出了纤芯之间相对强度的大小和相位关系,如第 2 超模对应的本征矢  $[-\sqrt{7}-1, 1, 1, 1, 1, 1, 1]$  表示纤芯 1 和其它纤芯的强度比为  $-\sqrt{7}-1$ , 相位相反, 而第 7 超模对应的本征矢  $[\sqrt{7}-1, 1, 1, 1, 1, 1, 1]$  表示纤芯 1 和其它纤芯的强度比为  $\sqrt{7}-1$ , 相位相同。另外除第 2 和第 7 超模外的 5 个超模在纤芯 1 即中间纤芯的电场强度分布都为零, 所以中间纤芯内的电场强度变化仅与第 2 和第 7 超模有关, 因此可以借助双芯 PCF 耦合长度的算法<sup>[16]</sup>来计算七芯 PCF 的耦合长度, 此处耦合长度代表中间纤芯中功率由极大值到极小值所需的传播距离。下面推导七芯 PCF 耦合长度的计算公式, 中间纤芯中的场函数为

$$\psi(x, y, z) = \sum_{m=1}^7 A_m(z) \psi_m(x, y) \exp(i\beta_m z), \quad (1)$$

式中  $z$  表示光束的传播距离,  $x$  和  $y$  的方向如图 2 所示,  $A_m$  表示各超模的振幅,  $\psi_m(x, y)$  表示各超模的模场函数,  $\beta_m$  代表各超模的传播常数。由 7 个本征矢的特点可知, 在中间纤芯内的区域为

$$\begin{aligned} \psi_1(x, y) &= \psi_3(x, y) = \psi_4(x, y) = \\ \psi_5(x, y) &= \psi_6(x, y) = 0. \end{aligned} \quad (2)$$

所以(1)式可化简为

$$\begin{aligned} \psi(x, y, z) &= A_2(z) \psi_2(x, y) \exp(i\beta_2 z) + \\ &A_7(z) \psi_7(x, y) \exp(i\beta_7 z). \end{aligned} \quad (3)$$

因为第 2 超模和第 7 超模的相速不同, 所以沿  $z$  方向传播时  $\psi_2(x, y)$  和  $\psi_7(x, y)$  发生周期性的相加和相减。结果就发生中间纤芯和外围纤芯之间的场功率周期性交换。经过距离  $l$  后, 有

$$|\psi(x, y, l)|^2 = A_7^2(l) \psi_7^2(x, y) + A_2^2(l) \psi_2^2(x, y) + 2A_7(l)A_2(l) \psi_7(x, y) \psi_2(x, y) \cos(\beta_7 - \beta_2)l, \quad (4)$$

先考虑增益饱和后的情况, 此时  $A_7(l)$  和  $A_2(l)$  不再变化, 由上式可知中间纤芯内光能量的大小  $|\psi(x, y, l)|^2$  的变化周期与  $\cos(\beta_7 - \beta_2)l$  相同, 从模式理论角度来定义, 耦合长度就是第 2 超模和第 7 超模产生拍的长度的一半。因此, 七芯 PCF 的耦合长度可由  $(\beta_7 - \beta_2)l = \pi$  得到, 即耦合长度

$$l_c = \frac{\pi}{\beta_7 - \beta_2} = \frac{\lambda}{2(n_7 - n_2)}. \quad (5)$$

式中  $n_7$  和  $n_2$  分别代表第 7 超模和第 2 超模的有效

折射率。

当增益未达到饱和时,  $A_7(l)$  和  $A_2(l)$  随着传播距离  $l$  的增加而增加, 功率较低时, 第 2 超模和第 7 超模的增益系数大小基本一致<sup>[17]</sup>,  $A_7(l)$  和  $A_2(l)$  的比值几乎不变, 功率较高时, 第 7 超模的增益系数要大于第 2 超模,  $A_7(l)$  和  $A_2(l)$  的比值会不断增大, 由 4 式可知,  $\psi(x, y, l)$  的相对变化幅度会不断变小。

### 3 数值模拟及结果分析

#### 3.1 有效模面积和耦合长度随孔间距的变化

计算七芯 PCF 的有效模面积  $A_{\text{eff}}$ , 模拟采用图 1 中 PCF-1 的结构, 因为 Yb<sup>3+</sup> 的激发波长在  $1.03 \mu\text{m}$  附近, 所以模拟采取的传输波长为  $1.03 \mu\text{m}$ , 保持  $d/\Lambda = 0.25$  不变, 纤芯和包层材料折射率均为  $n = 1.45$ 。图 3 给出了七芯 PCF 的有效模面积随孔间距大小的变化规律。由图 2 可知, 每个纤芯中的模场分布都是基模分布, 因此可以分别计算 7 个纤芯的有效模面积, 然后相加得到七芯 PCF 的有效模面积。由图 3 可知, 随着孔间距的增大, 七芯 PCF 的有效模面积不断增大, 当孔间距  $\Lambda = 10 \mu\text{m}$  时, 七芯 PCF 的有效模面积可达  $3016 \mu\text{m}^2$ 。

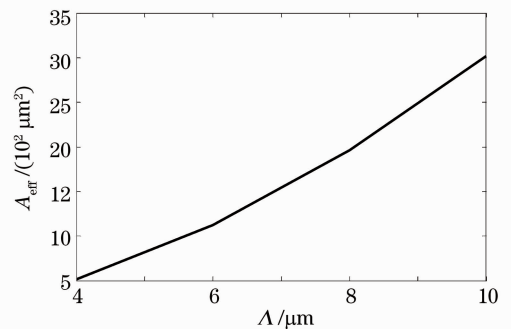


图 3 有效模面积随孔间距的变化

Fig. 3 Effective mode area versus hole space

分析七芯 PCF 的耦合长度和孔间距的关系, 模拟中采用 PCF-1 和 PCF-2 两种结构, 传输波长均为  $1.03 \mu\text{m}$ ,  $d/\Lambda = 0.25$  均保持不变, 纤芯和包层材料折射率均为  $n = 1.45$ 。由图 4 可知 PCF-1 和 PCF-2 的耦合长度随着孔间距的增大而增大, 但是 PCF-2 的耦合长度始终大于 PCF-1 的耦合长度, 这是因为 PCF-2 纤芯间的距离要大于 PCF-1 纤芯间的距离, 并且 PCF-2 纤芯间的空气孔数目要大于 PCF-1 结构, 空气孔的存在使模场能量更多的限制在纤芯中, 倏逝波的能量减小, 导致纤芯间的耦合作用变弱, 从而耦合长度增加。由图可见当孔间距为  $10 \mu\text{m}$  时, PCF-1 的耦合长度为  $36026 \mu\text{m}$ , 约  $36 \text{mm}$ , 而 PCF-

2 的耦合长度高达  $170120 \mu\text{m}$ , 约  $170 \text{ mm}$ 。显然, PCF-2 纤芯间的耦合强度要比 PCF-1 弱得多, 不利于多个纤芯相位的锁定。因此以下的模拟均采用 PCF-1 结构。

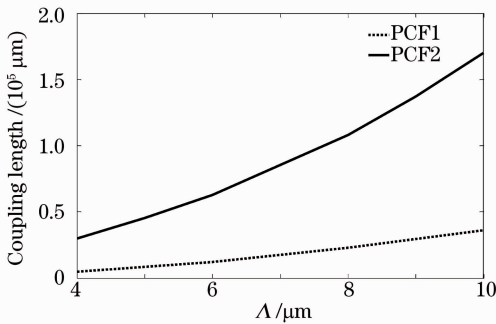


图 4 耦合长度随孔间距的变化

Fig. 4 Coupling length versus hole space

综上可知有效模面积和耦合长度都会随着孔间距的增大而增大, 所以增加纤芯面积就会导致纤芯间的耦合作用减弱, 因此有必要对 PCF-1 结构进行改进, 使七芯 PCF 具有大的有效模面积的同时纤芯间仍具有较强的耦合作用。

### 3.2 内层空气孔大小对有效模面积和耦合长度的影响

因为外层空气孔的大小对七芯 PCF 有效模面积和耦合长度的影响不大, 因此模拟中仅改变内 5 层空气孔的大小, 外 4 层保持  $d/\Lambda = 0.3$  不变。分别计算了当内 5 层空气孔  $d/\Lambda = 0.1$ ,  $d/\Lambda = 0.25$ ,  $d/\Lambda = 0.4$  时有效模面积和耦合长度随孔间距大小的变化, 模拟采取 PCF-1 结构, 传输波长为  $1.03 \mu\text{m}$ , 纤芯和包层材料折射率  $n = 1.45$ 。结果如图 5, 6 所示。

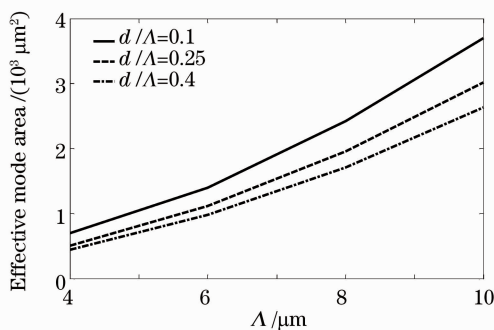


图 5 有效模面积随孔间距的变化

Fig. 5 Effective mode area versus hole space

由图 5 可知, 在相同孔间距下, 当内层空气孔减小时, 七芯 PCF 的有效模面积会增大, 如图 5 所示, 当孔间距  $\Lambda = 10 \mu\text{m}$ ,  $d = 4 \mu\text{m}$  时, 七芯 PCF 的有效模面积为  $2632 \mu\text{m}^2$ , 当  $d = 2.5 \mu\text{m}$  时, 有效模面积

为  $3016 \mu\text{m}^2$ , 当  $d = 1 \mu\text{m}$  时, 有效模面积增加至  $3703 \mu\text{m}^2$ 。这是由于纤芯周围空气孔较大时, 模场能量更多的集中在纤芯中心附近。随着空气孔的减小, 空气孔对模场能量的限制能力变弱, 离纤芯中心较远的地方分布的能量开始增加, 所以有效模面积会随着空气孔的减小而增大。

由图 6 可知, 在相同孔间距下, 七芯 PCF 的耦合长度会随着内层空气孔减小而减小, 当孔间距  $\Lambda = 10 \mu\text{m}$ ,  $d = 4 \mu\text{m}$  时, 七芯 PCF 的为耦合长度为  $106580 \mu\text{m}$ , 约  $107 \text{ mm}$ , 当  $d$  减小至  $1 \mu\text{m}$  时, 七芯 PCF 的为耦合长度仅为  $13310 \mu\text{m}$ , 约  $13.3 \text{ mm}$ 。这是因为当空气孔减小时, 包层中的倏逝波能量增加, 纤芯间的耦合作用增强, 从而耦合长度减小。

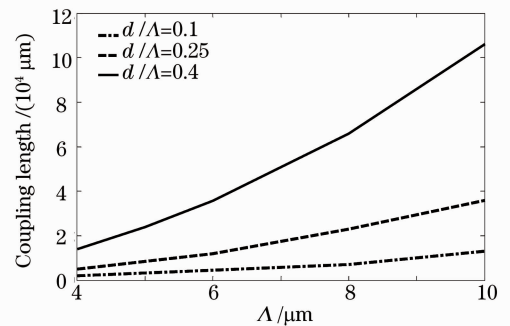


图 6 耦合长度随孔间距的变化

Fig. 6 Coupling length versus hole space

综上, 当纤芯周围的空气孔减小时, 既可以增大有效模面积, 又可以减小耦合长度, 即增强纤芯间的耦合作用。同时外 4 层合适的空气填充比可以保证七芯 PCF 各个纤芯保持单模传输, 同时使七芯 PCF 具有较低的损耗。需要注意的是由于 PCF 在拉制过程中材料的受热膨胀会造成空气孔的塌缩, 因此  $d/\Lambda$  不能太小, 否则 7 个纤芯将熔合在一起形成单芯光纤, 此时有可能出现高阶模, 进而影响出射激光的光束质量, 所以不再考虑  $d/\Lambda < 0.1$  的情形。

图 7 中 PCF-3 结构是在 PCF-1 基础上改进而来的, 结构参数为: 孔间距  $\Lambda = 10 \mu\text{m}$ , 外 4 层空气孔

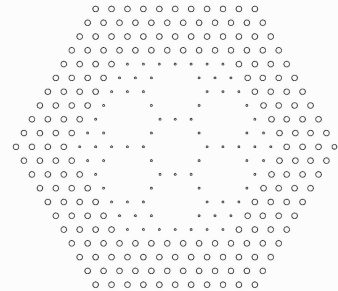


图 7 七芯 PCF-3 的横截面

Fig. 7 Cross-section of seven-core PCF-3

直径为 3  $\mu\text{m}$ , 内 5 层空气孔直径为 1  $\mu\text{m}$ 。由以上分析可知, 该结构在传输波长为 1.03  $\mu\text{m}$ , 包层材料折射率  $n=1.45$  时, 有效模面积可达 3703  $\mu\text{m}^2$ , 耦合长度为 13310  $\mu\text{m}$ , 约 13.3 mm。

## 4 结 论

多芯 PCF 大的有效模面积可以保证每个纤芯输出较高功率的激光, 而纤芯间足够的耦合强度可以保证各个纤芯输出的光束保持同相位, 这些激光束进行相干叠加就可以得到更高功率密度的激光。因此, 以上提出的可以同时保持大的有效模面积和纤芯间耦合强度的多芯 PCF 设计方法对高功率多芯 PCF 激光器的研究具有重要意义。

## 参 考 文 献

- Shen Hongbin, Li Gang, He Haijun *et al.*. Study and development of coherent combining of fiber laser beams[J]. *OME Information*, 2008, **25**(6): 9~15  
沈洪斌, 李刚, 何海军等. 光纤激光器相干组束技术研究进展[J]. 光机电信息, 2008, **25**(6): 9~15
- Wang Jianming, Duan Kailiang, Wang Yishan *et al.*. Experimental study of coherent beam combining of two fiber laser[J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(9): 5627~5631  
王建明, 段开棕, 王屹山等. 两光纤激光器相干合成的实验研究[J]. 物理学报, 2008, **57**(9): 5627~5631
- Li Jianfeng, Duan Kailiang, Wang Jianming *et al.*. Experiment of coherence-locking of two photonic crystal fiber lasers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(5): 923~926  
李剑峰, 段开棕, 王建明等. 两光子晶体光纤激光器相干锁定的实验研究[J]. 光学学报, 2008, **28**(5): 923~926
- Hou Jing, Xiao Rui, Jiang Zongfu *et al.*. Coherent beam combination of three Ytterbium fiber amplifiers[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(10): 1585~1588  
侯静, 肖瑞, 姜宗福等. 三路掺镱光纤放大器的相干合成实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2006, **18**(10): 1585~1588
- Zhou Pu, Ma Yanxing, Wang Xiaolin *et al.*. Coherent beam combination based on active phase controlling at the high-power output port[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(9): 2503~2505  
周朴, 马阎星, 王小林等. 基于高功率激光输出端相位控制的光纤激光相干合成[J]. 光学学报, 2009, **29**(9): 2503~2505
- Hongcheng Dong, Xiao Li, Chaoyang Wei *et al.*. Coaxial combination of coherent laser beams[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(11): 1012~1014
- P. K. Cheo, A. Liu, G. G. King *et al.*. A high-brightness laser beam from a phase-locked multicore Yb-doped fiber laser array[J]. *Photon. Technol. Lett.*, 2001, **13**(5): 439~441
- Arash Mafi, Jerome V. Moloney. Shaping modes in multicore photonic crystal fibers[J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2005, **17**(2): 348~350
- Arash Mafi, Jerome V. Moloney. Phase locking in a passive multicore photonic crystal fiber[J]. *Opt. Soc. Am. B*, 2004, **21**(5): 897~902
- L. Michaille, C. R. Bennett, D. M. Taylor *et al.*. Phase locking and supermode selection in multicore photonic crystal fiber lasers with a large doped area[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(13): 1668~1670
- Laurent Michaille, David M. Taylor, Charlotte R Bennett *et al.*. Characteristics of a Q-switched multicore photonic crystal fiber laser with a very large mode field area[J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(1): 71~73
- Fang Xiaohui, Hu Minglie, Li Yanfeng *et al.*. Numerical analysis for structure optimization of seven-core photonic crystal fibers[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(04): 2495~2500  
方晓惠, 胡明列, 栗岩峰等. 七芯光子晶体光纤结构优化的数值分析[J]. 物理学报, 2009, **58**(04): 2495~2500
- Fang Xiaohui, Hu Minglie, Li Yanfeng *et al.*. Numerical analysis mode locking multi-core photonic crystal fiber laser[J]. *Chinese Sci Bull*, 2009, **54**(19): 2944~2949  
方晓惠, 胡明列, 栗岩峰等. 多芯光子晶体光纤锁模过程的数值模拟[J]. 科学通报, 2009, **54**(19): 2944~2949
- Wang Chuncan, Zhang Fan, Tong Zhi *et al.*. Theory study on the improved high-power 19-core fiber laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(1): 61~66  
王春灿, 张帆, 童治等. 改进的高功率 19 芯光纤激光器的理论分析[J]. 中国激光, 2008, **35**(1): 61~66
- Zhou Pu, Hou Jing, Chen Zilun *et al.*. Study on the supermode and mode selection in multicore fiber lasers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(10): 1812~1816  
周朴, 侯静, 陈子伦等. 多芯光纤激光器的超模及模式选择问题研究[J]. 光学学报, 2007, **27**(10): 1812~1816
- Zhu Ridan, Luo Aiping, Wang Xude *et al.*. Broadband directional coupler based on dual core PCF[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(9): 1810~1814  
朱日丹, 罗爱平, 汪徐德等. 双芯光子晶体光纤宽带定向耦合器研究[J]. 光子学报, 2008, **37**(9): 1810~1814
- Zhou Pu, Xu Xiaojun, Chen Zilun *et al.*. Study on mode filtering by gain structure in multicore lasers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(s1): 114~117  
周朴, 许晓军, 陈子伦等. 多芯光纤激光器增益场选模效应研究[J]. 光学学报, 2008, **28**(s1): 114~117