

文章编号: 0253-2239(2007)10-1812-5

多芯光纤激光器的超模及模式选择问题研究*

周 朴 侯 静 陈子伦 刘泽金

(国防科技大学光电科学与工程学院 湖南, 长沙 410073)

摘要: 根据耦合模理论, 分析了多芯光纤支持的超模, 推导了超模场分布函数的解析表达式, 并利用柯林斯 (Collins) 公式计算这些超模光束的二阶矩, 分析各超模的光束质量。为了获得较好质量的光束输出, 还对利用塔尔博特腔进行多芯光纤激光器的模式选择进行了数值分析。计算结果表明, 只要选择合适的距离参量, 塔尔博特腔可以有效地进行模式选择。

关键词: 激光器; 光纤激光器; 模式选择; 超模; 塔尔博特腔; 多芯光纤

中图分类号: TN248 文献标识码: A

Study on the Supermode and Mode Selection in Multicore Fiber Laser

Zhou Pu Hou Jing Chen Zilun Liu Zejin

(College of Optoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073)

Abstract: The supermode in multicore fiber was analyzed by using coupled-mode theory, and analytical expression for the mode distribution in multicore fiber was derived. The beam quality of the supermode were numerically calculated. Among all the supermodes, only the in-phase mode has preferable far-field intensity distribution, and mode selection scheme using Talbot cavity was proposed and studied numerically on the isometric and ring distribution multicore fiber lasers. The results show that the in-phase mode can be selected effectively in Talbot cavity using appropriate parameters.

Key words: lasers; fiber laser; mode selection; supermodel; Talbot cavity; multicore fiber

1 引 言

光纤激光器是近年来光电子领域的研究热点。由于纤芯面积、非线性效应等因素的限制, 通常单模光纤激光器的输出功率有限。将若干个中等功率的光纤激光器输出光束进行合成是获得高功率、高光束质量激光输出的有效途径^[1~3], 其中多芯光纤激光器^[4~6]是一种可行的方案。它在较大的内包层中有多个掺杂纤芯, 每个纤芯的直径、掺杂浓度等均相同, 且均为单模, 纤芯间的距离很近。由于振荡激光瞬逝波的耦合, 使得各纤芯受激发射的激光相互作用, 达到同相位的激光输出。由于多芯光纤激光器的独特优势, 以美国 PC Photonics 公司为代表的国

外研究机构已经开展了大量的理论和实验研究^[4~8]。根据耦合模理论, 多芯光纤的输出光束模式是由光纤结构决定的超模。现有文献关于多芯光纤的超模模场都是直接给出^[4,9,10], 没有进行理论推导, 而且文献中关于超模模场的表达式互不相同, 所以有必要对多芯光纤的超模模场进行详细的理论分析。本文从耦合模理论出发, 推导多芯光纤支持的超模模场的解析表达式, 并分析利用塔尔博特腔对多芯光纤激光器进行模式选择的可行性。

2 多芯光纤的本征模——超模

目前研究较多的多芯光纤有等距式和圆环式两

* 国家自然科学基金青年科学基金(60608008)和国防科学技术大学科研项目(JC05-07-04)资助课题。

作者简介: 周 朴(1984—), 男, 安徽枞阳人, 博士研究生, 主要从事光纤激光器等方面的研究。

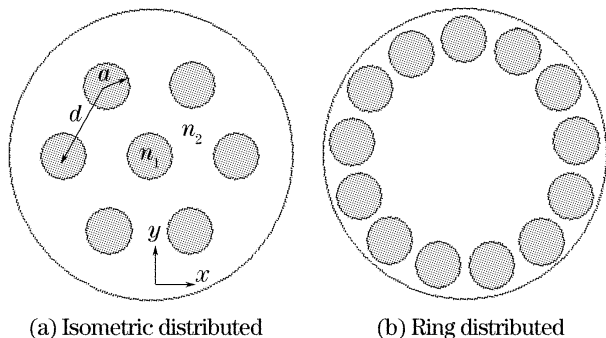
E-mail: jnck621@163.com

导师简介: 刘泽金(1963—), 男, 山东人, 教授, 博士生导师, 主要从事高能激光技术等方面的研究。

E-mail: zejinliu@vip.sina.com

收稿日期: 2006-12-15; 收到修改稿日期: 2007-04-09

种^[4,8],如图 1 所示。首先分析有 7 个纤芯的等距式多芯光纤超模模场,对于圆环式多芯光纤的模场可以类推。按图 2 对等距式多芯光纤的纤芯进行编号。



(a) Isometric distributed (b) Ring distributed

图 1 多芯光纤结构图。(a) 等距式,(b)圆环式
Fig. 1 The structure of multicore fiber. (a) Isometric distributed, (b) ring distributed

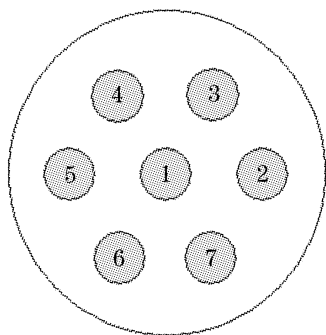


图 2 等距式多芯光纤的纤芯编号

Fig. 2 Numbering the cores in a isometric multicore fiber

在多芯光纤中,由于发生耦合,总的电场分布为^[11]

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

式中 $E_m(x, y) \exp(i\beta_m z)$ 即为第 m 个纤芯的导模。在多芯光纤中,由于不同纤芯发生了能量耦合,各纤芯中光场的复振幅将发生改变,但纤芯支持的模式是由材料、几何结构决定的,单模光纤不会因为与其他纤芯的耦合转而支持高阶模,因此在多芯光纤中每个纤芯仍只支持单模光纤的本征模场。 $E_m(x, y)$ 为单模光纤本征模场归一化的横向场分布函数。 β_m 为对应的传输常量,第 m 个纤芯中总的光功率为 $|A_m(z)|^2$ 。 v 是多芯光纤模式本征模(超模)的模式序数,每一个超模就是单个孤立导模不同相位锁定的线性组合。

根据(1)式,构造一个矢量

$$E(z) = \begin{bmatrix} A_1(z) \exp(i\beta_1 z) \\ A_2(z) \exp(i\beta_2 z) \\ \dots\dots \\ A_7(z) \exp(i\beta_7 z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_1(z) \\ E_2(z) \\ \dots\dots \\ E_7(z) \end{bmatrix}. \quad (2)$$

假设每个纤芯发射激光的模式仅仅耦合到与它相邻的纤芯中去,则根据耦合模理论^[11],不同纤芯之间的耦合关系可以用下面的耦合方程组描述:

$$\frac{dE(z)}{dz} = \tilde{C}E(z), \quad (3)$$

其中

$$\tilde{C} = \begin{bmatrix} i\beta_1 & k_{12} & k_{13} & k_{14} & k_{15} & k_{16} & k_{17} \\ k_{21} & i\beta_2 & k_{23} & & & & k_{27} \\ k_{31} & k_{32} & i\beta_3 & k_{34} & & & \\ k_{41} & & k_{43} & i\beta_4 & k_{45} & & \\ k_{51} & & & k_{54} & i\beta_5 & k_{56} & \\ k_{61} & & & & k_{65} & i\beta_6 & k_{67} \\ k_{71} & k_{72} & & & & k_{76} & i\beta_7 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

(4) 式中 $k_{m,n}$ 为纤芯 m, n 之间的耦合系数。

根据定义,每一个传播的超模就是场分布的解,除了相位因子待确定外,超模的场分布与坐标 z 无关。 $E(z)$ 可以用下式来表示:

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

式中 Γ 是相位因子,反映了同一超模在不同纵向位置上的相位差异。

由(3)式、(5)式,有

$$(\tilde{C} - i\Gamma \tilde{I})E(z) = 0, \quad (6)$$

式中 \tilde{I} 是大小为 7×7 的单位矩阵。

(6) 式有解的条件是

$$|\tilde{C} - i\Gamma \tilde{I}| = 0. \quad (7)$$

由上述久期方程求得 7 个本征值 $i\Gamma_1, i\Gamma_2, \dots, i\Gamma_7$, 将本征值 $i\Gamma_v$ 代入(6)式,即得相对于 $i\Gamma_v$ 的本征矢 E^v , 由此可以确定系统的 7 个超模

$$E^v(x, y, z) = \left[\sum_m E_m^v E_m(x, y) \right] \exp(i\Gamma_v z), \quad (8)$$

E_m^v 是本征矢 E^v 的第 m 个元素的值。

考虑最理想的情况,假设多芯光纤各纤芯参量完全一样,纤芯之间的距离相同,则在理想情况下,(4)式中的耦合系数满足 $\beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_7$, 并且,由于(4)式只考虑了相邻纤芯之间的耦合,那么,式中所有的耦合系数取值均为 $k_{m,n} = -k_{n,m}^* = ik$, 代入(7)式,可解得 7 个本征值为

$$i(\beta - 2k), \quad i(\beta - k), \quad i(\beta - k), \quad i(\beta + k), \quad i(\beta + k), \quad i(\beta + k - \sqrt{7}k), \quad i(\beta + k + \sqrt{7}k), \quad (9)$$

对应的 7 个本征矢为

$$\begin{aligned} & [0 \quad -1 \quad 1 \quad -1 \quad 1 \quad -1 \quad 1], \quad [0 \quad -1 \quad 0 \quad 1 \quad -1 \quad 0 \quad 1], \\ & [0 \quad -1 \quad 1 \quad 0 \quad -1 \quad 1 \quad 0], \quad [0 \quad 1 \quad 0 \quad -1 \quad -1 \quad 0 \quad 1], \\ & [0 \quad -1 \quad -1 \quad 0 \quad 1 \quad 1 \quad 0], \quad [-3.64575 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1], \\ & [1.64575 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1], \end{aligned} \quad (10)$$

将(9)式、(10)式代入(8)式即得多芯光纤支持的超模模场分布为

$$\begin{aligned} E^1(x, y, z) &= [-E_2(x, y) + E_3(x, y) - E_4(x, y) + E_5(x, y) - E_6(x, y) + E_7(x, y)] \times \\ & \quad \exp[i(\beta - 2k)z], \\ E^2(x, y, z) &= [-E_2(x, y) + E_4(x, y) - E_5(x, y) + E_7(x, y)] \exp[i(\beta - k)z], \\ E^3(x, y, z) &= [-E_2(x, y) + E_3(x, y) - E_5(x, y) + E_6(x, y)] \exp[i(\beta - k)z], \\ E^4(x, y, z) &= [E_2(x, y) - E_4(x, y) - E_5(x, y) + E_7(x, y)] \exp[i(\beta + k)z], \\ E^5(x, y, z) &= [-E_2(x, y) - E_3(x, y) + E_6(x, y) + E_7(x, y)] \exp[i(\beta + k)z], \\ E^6(x, y, z) &= [-3.64574E_1(x, y) + E_2(x, y) + E_3(x, y) + E_4(x, y) + E_5(x, y) + \\ & \quad E_6(x, y) + E_7(x, y)] \exp[i(\beta + k - \sqrt{7}k)z], \\ E^7(x, y, z) &= [1.64574E_1(x, y) + E_2(x, y) + E_3(x, y) + E_4(x, y) + E_5(x, y) + \\ & \quad E_6(x, y) + E_7(x, y)] \exp[i(\beta + k + \sqrt{7}k)z], \end{aligned} \quad (11)$$

多芯光纤的出射光束的复振幅分布为这 7 种超模的线性组合,即混合模。

根据(11)式,设单根纤芯处于单模传输的临界情况,即归一化频率 $V=2.40483^{[11]}$,并设纤芯半径 $a=5 \mu\text{m}$,纤芯之间的距离 $d=15 \mu\text{m}$ 。计算得到图 1(a)所示的等距式多芯光纤输出的 7 种超模强度分布如图 3 所示(第二行、第三行分别为超模强度的三维分布和等高线分布)。

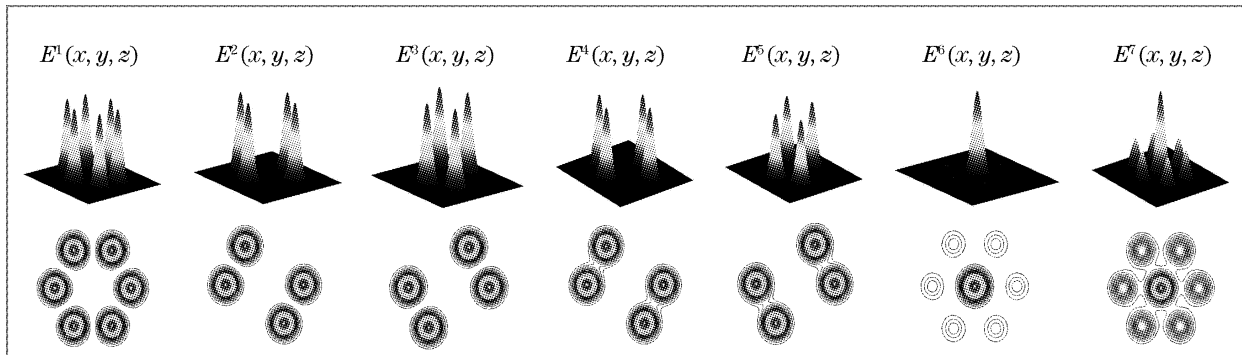


图 3 等距式多芯光纤输出的 7 种超模强度分布

Fig. 3 Intensity distribution of 7 supermodes supported by a isometric multicore fiber

得到多芯光纤出射光束的模场分布,可以根据柯林斯(Collins)公式计算这些光束的远场特性,并分析其光束质量。各超模在距离 l 处的复振幅分布为

$$\begin{aligned} E_{l,m}^o(x_l, y_l, l) &= \\ & \left(-\frac{i}{\lambda l}\right) \exp(ikl) \int_{-\infty-\infty}^{+\infty+\infty} \int \mathbf{E}_m^o(x, y, z) \cdot \exp\left\{\frac{ik}{2l}\{x^2 + y^2 + x_l^2 + y_l^2 - 2(xx_l + yy_l)\}\right\} dx dy, \end{aligned} \quad (12)$$

式中 l 为传输距离。对应于模序数 $m=1, 2, \dots, 7$ 的超模依次计算其远场强度分布,如图 4 所示(第二行、第三行分别为远场强度的三维分布和等高线分布)。

利用(12)式计算图 3 所示的 7 种超模光束的远场光斑半径(取二阶矩^[12]定义),分别为与多芯光纤相同口径基模高斯光束远场光斑半径的 4.56, 4.91, 4.91, 4.79, 4.79, 2.69, 3.30 倍,光束质量最好的是第六个超模光束 E^6 。

同理,对于图 1(b)所示的圆环式多芯光纤,计算纤芯数为 6 时多芯光纤支持的超模模场分布为

$$\begin{aligned}
 E^1(x, y, z) &= [-E_1(x, y) + E_2(x, y) - E_3(x, y) + E_4(x, y) - E_5(x, y) + E_6(x, y)] \exp[i(\beta - 2k)z], \\
 E^2(x, y, z) &= [-E_1(x, y) + E_3(x, y) - E_4(x, y) + E_6(x, y)] \exp[i(\beta - k)z], \\
 E^3(x, y, z) &= [-E_1(x, y) + E_2(x, y) - E_4(x, y) + E_5(x, y)] \exp[i(\beta - k)z], \\
 E^4(x, y, z) &= [E_1(x, y) - E_3(x, y) - E_4(x, y) + E_6(x, y)] \exp[i(\beta + k)z], \\
 E^5(x, y, z) &= [-E_1(x, y) - E_2(x, y) + E_4(x, y) + E_5(x, y)] \exp[i(\beta + k)z], \\
 E^6(x, y, z) &= [E_1(x, y) + E_2(x, y) + E_3(x, y) + E_4(x, y) + E_5(x, y) + E_6(x, y)] \exp[i(\beta + 2k)z],
 \end{aligned}
 \tag{13}$$

限于篇幅,省去(13)式所示的超模及其远场的强度分布图。

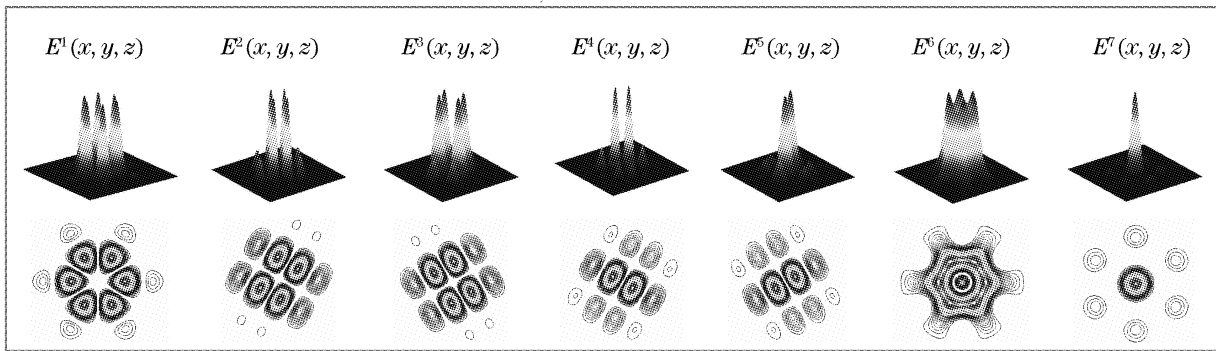


图 4 等距式多芯光纤输出的 7 种超模远场强度分布

Fig. 4 Far-field intensity distribution of 7 supermodes supported by a isometric multicore fiber

3 利用塔尔博特腔进行模式选择

多芯光纤出射光束的复振幅分布为混合模。为了在保持高的输出功率的同时获得较好的光束质量,必须进行模式选择,抑制光束质量较差的模式输出。对于图 1(a)所示的等距式多芯光纤,PC Photonics 公司的 P. K. Cheo 等^[4,6]提出用非线性光学的方法进行模式选择,指出当抽运光功率超过一定阈值时,由于在光线内部发生的非线性光学效应,使得等距式多芯光纤选择光束质量最好的模式(in-phase mode)输出,并给出了相应的数学模型^[5,6,13]。对于图 1(b)所示的圆环式多芯光纤,M. Wragge 等^[14]利用塔尔博特腔进行了模式选择实验是在没有推导模场分布的前提下进行的。我们根据第 2 部分推导的多芯光纤超模模场的解析表达式,对利用塔尔博特腔选择等距式、圆环式多芯光纤激光器输出模式进行数值分析。

强度分布具有一定周期性的相干光在传输一定距离后会出现自身的像,这个距离 Z_t 称为塔尔博特距离。对于多芯光纤这样的周期性物体,不同的超模具有不同的塔尔博特距离。如在某一模式的 $Z_t/2$ 处放置一个具有一定反射率的平面镜,这样经反射后耦合进激光器的将是该超模自身的像,从而起到模式选择的作用。

图 5 为利用塔尔博特腔进行模式选择的基本实验方案。为了定量地描述模式选择的过程,定义如

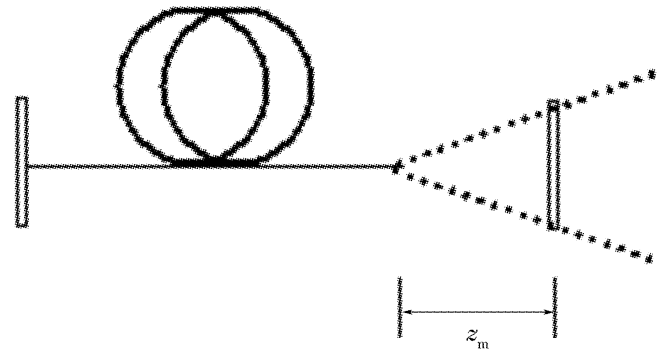


图 5 利用塔尔博特腔进行模式选择示意图

Fig. 5 Mode selection using Talbot cavity

下函数^[9,14]：

$$\gamma^v = \frac{\left| \int \int_{-\infty}^{+\infty} [E^v(x, y, z = 0)]^* [E^v(x, y, z)] dx dy \right|}{\int \int_{-\infty}^{+\infty} |[E^v(x, y, z = 0)]|^2 dx dy},
 \tag{14}$$

γ^v 就表示经平面镜反射后,第 v 个超模被反馈到激光器中的部分,也可以称为反馈系数。如果在特定距离 z_m 上某一模式的反馈系数很大而其他模式的耦合系数均很小,该模式就在图 5 所示的结构中被选择出来,作为多芯光纤激光器的主要输出模式。

设单根纤芯处于单模传输的临界情况,即归一化频率 $V = 2.40483$ ^[11],仍设纤芯半径 $a = 5 \mu\text{m}$,纤芯之间的距离 $d = 15 \mu\text{m}$,出射激光波长为 $1 \mu\text{m}$ 。

将(11)式、(13)式代入(14)式,可以计算出各超模的反馈系数与 z_m 的关系,如图6所示。

分析图6不难发现,对于等距式多芯光纤激光器,在 $z_m=1$ mm处,模式7(in-phase模式)的反馈系数远大于其他模式;而对于圆环式多芯光纤激光

器,在 $z_m=1$ mm处,模式6(in-phase模式)的反馈系数较其他模式而言也相对较大。从而构造 $z_m=1$ mm的塔尔博特腔可以有效地对多芯光纤激光器进行选模。当然,由图6可知, z_m 还有一些其他合理的取值。

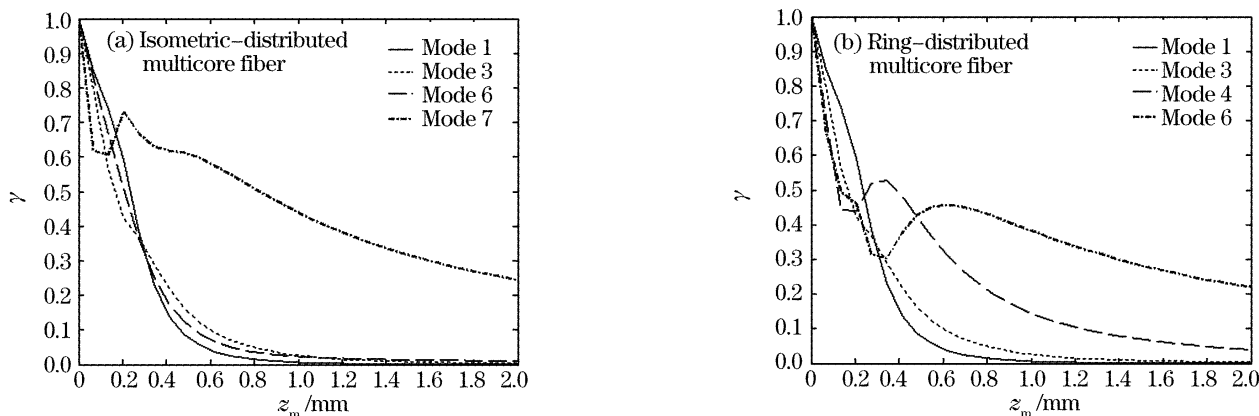


图6 不同超模光束的反馈系数与 z_m 的关系。(a) 等距式多芯光纤,(b) 圆环式多芯光纤

Fig. 6 Relationship between feedback coefficient and z_m . (a) Isometric-distributed multicore fiber, (b) ring-distributed multicore fiber

4 结 论

多芯光纤有望获得高功率、高光束质量的激光输出,已经成为了光纤激光器领域的一个研究热点。而在国内关于多芯光纤的研究较少。本文根据耦合模理论,推导了多芯光纤激光器超模模场的解析表达式,并对光束质量进行了分析。多芯光纤激光器的输出光束是不同超模的线性叠加,由于不同模式的光束质量因子不尽相同,人们期望只含有光束质量较好的模式(in-phase mode)的激光输出。对多芯光纤激光器的模式选择问题进行了简单分析,对利用塔尔博特腔进行模式选择的可行性进行了计算验证,表明了该方法的有效性。文章的推导和分析可以进一步推广,用于分析更多纤芯和其他复杂结构的多芯光纤激光器。

参 考 文 献

- Xiao Rui, Hou Jing, Jiang Zongfu. Coherent combining of fiber lasers[J]. *Laser Technology*, 2005, **29**(5): 516~518 (in Chinese)
肖 瑞, 侯 静, 姜宗福. 光纤激光器的相干合成技术[J]. *激光技术*, 2005, **29**(5): 516~518
- Li Yongzhong, Fan Dianyuan. Beam combining of fiber laser[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2006, **42**(9): 26~29 (in Chinese)
李永忠, 范滇元. 光纤激光器光束的叠加技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2005, **42**(9): 26~29
- He Bing, Lou Qihong, Zhou Jun *et al.*. Coherent beam combination of fiber lasers [J]. *Laser & Optoelectronics*

- Progress*, 2006, **43**(9): 47~54 (in Chinese)
- 何 兵, 楼祺洪, 周 军等. 光纤激光器相干组束技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2006, **43**(9): 47~54
- P. K. Cheo, A. Liu, G. G. King. A high-brightness laser beam from a phase-locked multicore Yb-doped fiber laser array[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, **13**(5): 439~441
- E. J. Bochove, P. K. Cheo, G. G. King. Self-organization in a multicore fiber laser array[J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(14): 1200~1202
- Yanming Huo, Peter K. Cheo, George G. King. Fundamental mode operation of a 19-core phase-locked Yb-doped fiber amplifier[J]. *Opt. Exp.*, 2004, **12**(25): 6230~6239
- 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
- L. Li, A. Schülzgen, S. Chen *et al.*. Phase locking and in-phase supermode selection in monolithic multicore fiber lasers[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(17): 2577~2579
- Arash Mafi, Jerome V. Moloney. Phase locking in a passive multicore photonic crystal fiber[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2004, **21**(5): 897~902
- M. Wrage, P. Glas, M. Leitner. Combined phase locking and beam shaping of a multicore fiber laser by structured mirrors[J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(13): 980~982
- J. A. Besley, J. D. Love. Supermode analysis of fibre transmission [J]. *IEE Proc.-Optoelectron.*, 1997, **144**(6): 411~419
- A. E. Sigman. New developments in laser resonators[C]. *Proc. SPIE*, 1990, **1224**: 2~14
- Yanming Huo, Peter K. Cheo. Analysis of transverse mode competition and selection in multicore fiber lasers[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2005, **22**(11): 2345~2349
- M. Wrage, P. Glas, D. Fischer *et al.*. Phase locking in a multicore fiber laser by means of a Talbot resonator[J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(19): 1436~1438