

# 平行阵列芯光纤的超模耦合特性

朱晓亮<sup>1</sup> 苑立波<sup>2</sup>

<sup>1</sup>浙江工商大学信息与电子工程学院, 浙江 杭州 310018

<sup>2</sup>哈尔滨工程大学理学院光子科学与技术研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150001

**摘要** 针对两种不同激励情况, 分别对 5 芯平行阵列芯光纤的超模进行了理论计算, 并对其输出强度分布进行了实验研究。通过对比 5 芯平行阵列芯光纤超模远场强度分布, 分析了两种不同激励情况下输出各超模的光束质量。研究结果可为高功率光纤激光器、出射光斑为特定形状的光纤激光器的设计提供理论依据, 对其他类似微结构光纤在激光器领域的应用具有借鉴意义。

**关键词** 光纤光学; 光纤激光器; 超模; 耦合模理论; 平行阵列芯光纤

**中图分类号** TN252 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0705006

## Supermode Coupling Characteristics of Linear-Core-Array Fiber

Zhu Xiaoliang<sup>1</sup> Yuan Libo<sup>2</sup>

<sup>1</sup> College of Information and Electronic Engineering, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China  
<sup>2</sup> Photonics Research Center, College of Science, Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang 150001, China

**Abstract** The theoretical prediction and experimental study of 5-core-linear-array fiber are implemented in this paper according to two different excitation methods. The far field supermode distributions of 5-core-linear-array fiber are calculated and the beam qualities under two different excitation methods are also analyzed. The results may provide a basis for high power fiber lasers or for fiber lasers which have particular spot shape and are also helpful for similar microstructure fibers applied in laser areas.

**Key words** fiber optics; fiber laser; supermode; coupling mode theory; linear-core-array fiber

**OCIS codes** 060.2310; 130.0130; 230.0230; 220.0220; 260.0260

## 1 引言

自 20 世纪末, 光纤激光器就以其制造成本低、高功率、可调谐等优点受到普遍关注<sup>[1,2]</sup>。然而普通的单模光纤(SMF)激光器由于纤芯直径有限, 限制了输出光功率, 尤其是脉冲光纤激光器, 虽然光纤激光器的主振荡功率放大(MOPA)结构可以获得窄线宽激光输出, 但功率超过 2 W 会出现明显的受激布里渊散射等非线性效应, 限制了光纤激光器向更高功率发展<sup>[3]</sup>。

多芯光纤激光器是解决这一问题的可行方法<sup>[4~6]</sup>。当多芯光纤各纤芯掺杂浓度、直径等参数

均相同且规则排列时, 如纤芯间距离很小, 振荡激光倏逝波的耦合会使各纤芯受激发射的激光相互作用, 可达到同相位的激光输出。相比于传统的单芯光纤, 多芯光纤激光器增加了纤芯有效面积, 有效地提高了诸如受激拉曼散射和受激布里渊散射等非线性效应的阈值功率, 从而可大幅度提高光纤激光器的输出光功率, 获得高质量、高功率的激光光束。此外, 多芯光纤长度不同, 各纤芯间倏逝场相互作用程度也不相同, 因而导致多芯光纤输出光斑形状不同, 可用于制作对光斑形状有特殊要求的光纤激光器。

考虑到平行阵列芯光纤有望应用于高功率激光

收稿日期: 2011-03-01; 收到修改稿日期: 2011-03-18

基金项目: 国家自然科学基金(60877046, 61007053)和教育部博士点基金(20092304120022)资助课题。

作者简介: 朱晓亮(1981—), 女, 博士, 讲师, 主要从事光纤通信、集成光学等方面的研究。

E-mail: zhuxiaoliang@mail.zjgsu.edu.cn

器及特殊光斑激光器,本文对 5 芯平行阵列芯光纤的超模耦合特性进行了研究。针对两种不同光激励情况,对 5 芯平行阵列芯光纤的超模输出进行理论及实验研究,对 5 芯平行阵列芯光纤所支持的各超模远场强度分布进行计算,通过对比各超模模场半径扩散程度,分析了两种激励情况下各超模的光束质量。

## 2 熔接激励 5 芯平行阵列芯光纤

以 5 芯平行阵列芯光纤为例,对单芯单模光纤与 5 芯平行阵列芯光纤熔接激励情况下,5 芯平行阵列芯光纤超模耦合特性进行了理论及实验研究。实验所用单模光纤纤芯及包层折射率分别为  $n'_1 = 1.4544$ ,  $n'_2 = 1.45$ ; 所用 5 芯平行阵列芯光纤如图 1 所示,各纤芯物理参数相同,纤芯半径  $r = 4.8 \mu\text{m}$ ,相邻两纤芯间距离  $d = 12.1 \mu\text{m}$ 。纤芯及包层折射率分别为  $n_1 = 1.460$  和  $n_2 = 1.457$ 。5 芯平行阵列芯光纤在光波长  $\lambda = 1.31 \mu\text{m}$  的条件下,各纤芯只存在一个模式。

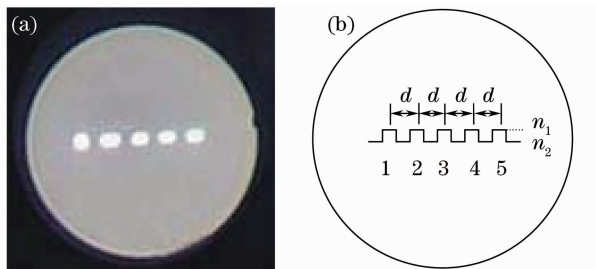


图 1 5 芯平行阵列芯光纤。(a)端面照片;  
(b)折射率分布

Fig. 1 5-core-linear-array fiber. (a) Cross section photo; (b) refractive index

熔接激励法如图 2 所示,波长为  $1.31 \mu\text{m}$  的激光器作为光源与单模光纤相连,单模光纤与 5 芯平行阵列芯光纤熔接后利用 CCD 对其输出光场进行监测。由图 2 可见,5 芯平行阵列芯光纤各纤芯芯

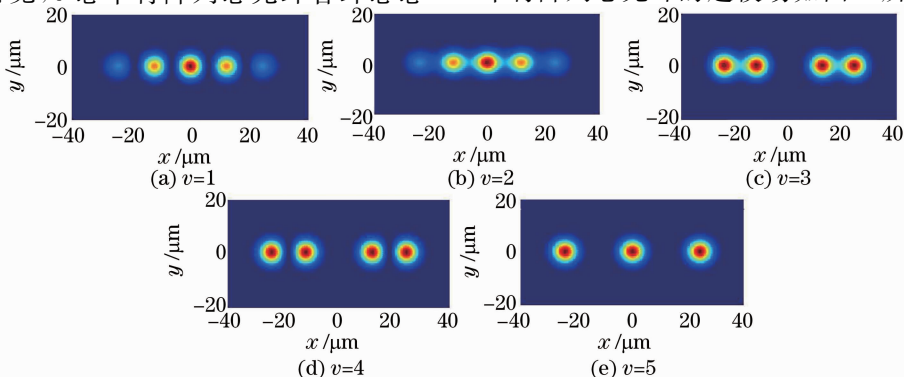


图 3 熔接激励所得 5 个超模场分布

Fig. 3 Intensity distribution of 5 supermodes excited by fusion splice

间距极近,由于倏逝场的作用,单模光纤与 5 芯平行阵列芯光纤熔接后即可实现对所有纤芯的光激励,输出光功率约为 80%。

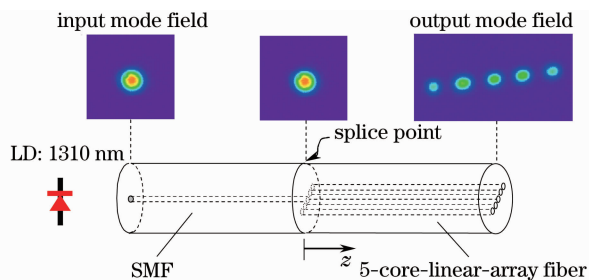


图 2 熔接激励 5 芯平行阵列芯光纤

Fig. 2 Inspirit 5-core-linear-array fiber by fusion splice

在一阶近似的条件下,5 芯平行阵列芯光纤非相邻纤芯间耦合远小于相邻纤芯间的耦合,因此只考虑相邻两纤芯间的耦合。设初始激发光功率为 1,根据耦合模理论及模场叠加理论<sup>[7,8]</sup>,5 芯平行阵列芯光纤从左至右各纤芯(参见图 1)入射光功率分别为  $0, 0, 1, 0, 0$ 。求解耦合模方程特征值及特征向量(参照文献<sup>[9]</sup>)。基于超模的线性叠加理论,超模的振幅分布为<sup>[10]</sup>

$$E^v(x, y, z) = \left[ \sum_m E_m^v E_m(x, y) \right] \exp(\lambda_v z), \quad (1)$$

式中  $E^v(x, y, z)$  为第  $v$  个超模的振幅,  $E_m^v$  表示本征矢  $E^v$  的第  $m$  个分量,  $\lambda_v$  为耦合模方程的第  $v$  个本征值。  $E_m(x, y)$  为第  $m$  个纤芯的横向场分布,其表达式为

$$E_m(x, y) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{1}{\omega_0} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{\omega_0^2}\right), \quad (2)$$

式中  $\omega_0$  为模场半径。

由(1)式可知,在 5 芯平行阵列芯光纤折射率确定的情况下,各超模强度分布仅与芯间距有关,而与传输长度  $z$  无关。将(2)式代入(1)式计算可得 5 芯平行阵列芯光纤的超模场如图 3 所示,各模式用整

数  $v$  标记,其中  $v=2$  的超模为同相超模(所有纤芯同相位)。

单模光纤与 5 芯平行阵列芯光纤熔接后,5 芯平行阵列芯光纤输出光场强度分布为各超模线性叠加构成的混合模,模场强度与各纤芯初始入射光功率及传输长度  $z$  有关。5 芯平行阵列芯光纤各纤芯入射光功率分别为 0,0,1,0,0 的情况下,各纤芯的耦合效率可由耦合模方程计算得到<sup>[9]</sup>,如图 4 所示。以熔接激励法为例,在 5 芯平行阵列芯光纤长度为  $z=1,2,3$  mm 处分别进行截取,理论所得 5 芯平行阵列芯光纤输出各超模构成的混合模强度分布分别如图 5 中左列所示,实验所得输出混合模场强度如图 5 中右列所示。由于切割精度等原因,实验结果与理论结果并不完全一致,但仍可反映出理论趋势。

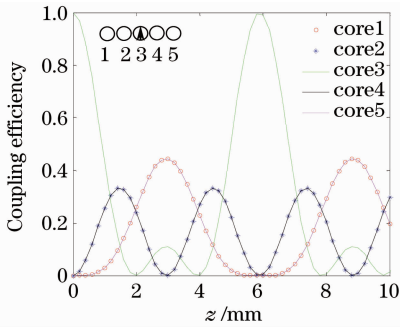


图 4 熔接激励 5 芯平行阵列芯光纤的耦合效率  
Fig. 4 Coupling efficiency when excited middle core of 5-core-linear-array fiber

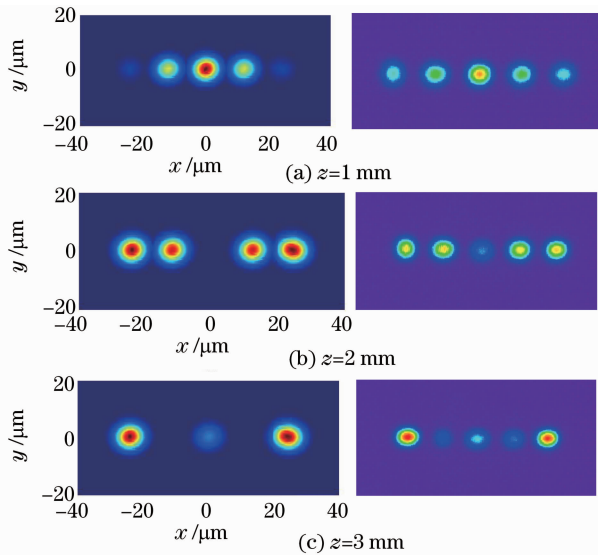


图 5 熔接激励时 5 芯平行阵列芯光纤的输出场分布。左列为理论值,右列为实验值

Fig. 5 Field distribution when 5-core-linear-array fiber excited by fusion splice. Left is theoretical results, right is experimental results

### 3 熔融拉锥激励 5 芯平行阵列芯光纤

为了研究激励方法对超模耦合特性的影响,还对另一种光激励情况下 5 芯平行阵列芯光纤的超模耦合特性进行了研究。熔融拉锥激励法是对单模光纤与 5 芯平行阵列芯光纤熔点处进行熔融拉锥操作实现各纤芯光激励的一种方法,实验方法如图 6 所示。拉锥过程中,耦合光功率的大小与光纤熔锥区长度有关,熔锥区长度约为 1 mm 时,耦合光功率可高达 90%,这是由于单模光纤的基模场与 5 芯平行阵列芯光纤的基模场匹配程度增大造成的。随着拉锥动作的进行,5 芯平行阵列芯光纤输出光场功率逐渐减小,插入损耗逐渐增加,这是因为熔拉区芯径过细使得光功率大部分转换为辐射模泄露掉造成的。

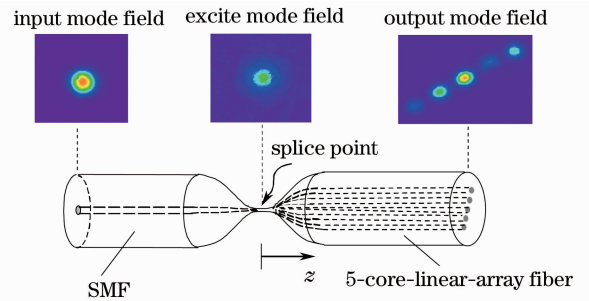


图 6 熔融拉锥法激励 5 芯平行阵列芯光纤

Fig. 6 Inspirit 5-core-linear-array fiber by splicing and tapering excited method

由参考文献[11]可知,当拉锥长度为 9 mm 时,单模光纤与 5 芯平行阵列芯光纤芯径分别为  $2.06 \mu\text{m}$  与  $2.57 \mu\text{m}$ ,熔点处 5 芯平行阵列芯光纤相邻两纤芯芯间距约为  $6.48 \mu\text{m}$ 。将上述参数代入(1)式,可得熔锥激励情况下超模场分布如图 7 所示。由图 7 可见,在熔锥激励情况下,同相超模( $v=2$  的超模)接近于线性场分布;与图 3 相比,熔锥区各纤芯耦合作用显著增强,这是由于芯间距减小,各纤芯模场重叠增大造成的。

与熔接激励情况相类似,根据耦合模理论及模场叠加理论<sup>[7,8]</sup>,可算出拉锥长度为 9 mm 时 5 芯平行阵列芯光纤从左至右各纤芯激发光功率分别为 0.01,0.21,0.56,0.21,0.01。由耦合模方程<sup>[9]</sup>计算可得各纤芯耦合效率。同理,在 5 芯平行阵列芯光纤长度为  $z=1,2,3$  mm 处分别进行截取,即可获得 5 芯平行阵列芯光纤输出各超模构成的混合模场强度分布理论情况及实验情况。

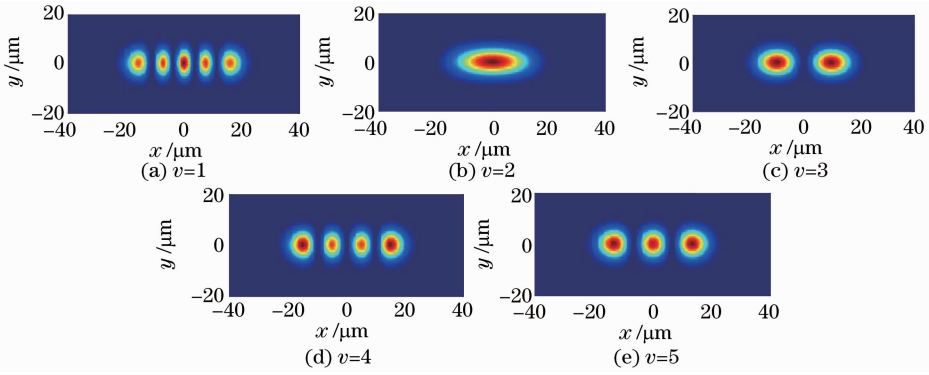


图 7 熔锥激励情况下 5 芯平行阵列芯光纤的超模场分布

Fig. 7 Intensity distribution of supermodes when 5-core-linear-array fiber inspired by splicing and tapering

#### 4 超模质量对比

通过两种激励情况下各超模近场强度分布的计算,利用柯林斯(Collins)公式可对其远场强度分布进行计算,在传输距离  $l$  处各超模复振幅分布为

$$E_l^v(x_l, y_l, l) = \frac{\exp(-jk l)}{j\lambda l} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E^v(x_0, y_0, z_0) \times \exp\left\{\frac{-jk}{2l} [(x - x_l)^2 + (y - y_l)^2]\right\} dx_0 dy_0, (3)$$

式中  $x_0, y_0, z_0$  为光纤输出端位置坐标,  $x_l, y_l$  分别为出射光传输  $z = l$  处光场横向位置坐标,  $E^v(x_0, y_0, z_0)$  由(1)式代入.对熔接激励情况,当  $l = 75 \mu\text{m}$  时计算所得模序数分别为  $v = 1, 2, 3, 4, 5$  的超模远场强度分布如图 8 所示.同理,对熔锥激励情况,  $l = 75 \mu\text{m}$  时计算所得各超模远场强度分布如图 9 所示.

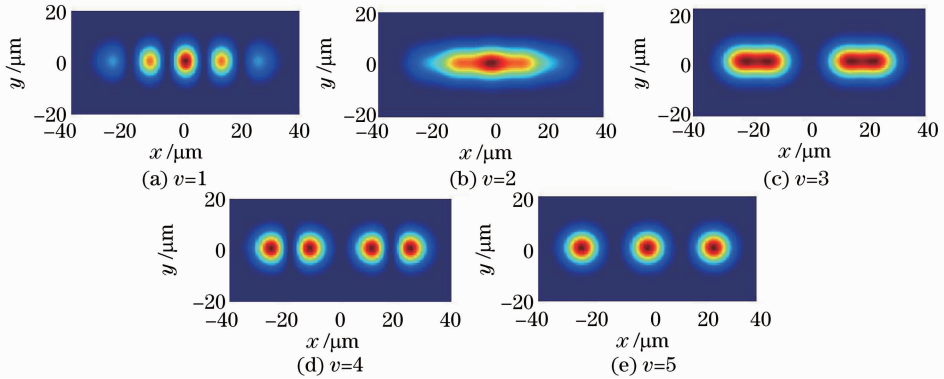


图 8 熔接激励情况下 5 芯平行阵列芯光纤的远场强度分布

Fig. 8 Far field intensity distribution of supermodes when 5-core-linear-array fiber excited by fusion splice

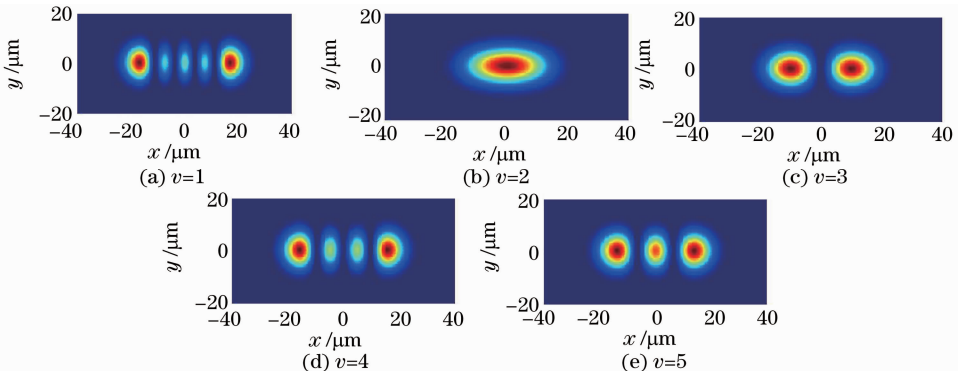


图 9 熔锥激励情况下 5 芯平行阵列芯光纤的远场强度分布

Fig. 9 Far field intensity distribution of supermodes when 5-core-linear-array fiber inspired by splicing and tapering

若定义模场半径  $r_m$  与光场强度最大值  $E_{\max}$  之间关系为  $r_m = E_{\max}/e$ , 对  $v=1, 2, 3, 4, 5$  各超模光束的远场光斑半径进行计算, 可得单芯单模光纤与 5 芯平行阵列芯光纤直接熔接的激励情况下, 在  $l=75 \mu\text{m}$  处, 对应于各超模远场光斑半径分别为  $30.43, 19.68, 29.12, 30.23, 29.83 \mu\text{m}$ 。类似地, 在熔融拉锥激励情况下, 对模序数为  $v=1, 2, 3, 4, 5$  各超模远场光斑半径进行计算, 可得当  $l=75 \mu\text{m}$  处各超模远场光斑半径分别为  $21.33, 11.48, 16.68, 20.60, 19.13 \mu\text{m}$ 。由各超模远场光斑半径比较可知, 不管在何种激励条件下, 第二个超模即同相超模相较于其他超模远场光束扩散最小, 光束质量最好。

## 5 结 论

研究了两种不同激励条件下, 5 芯平行阵列芯光纤近场及远场的超模耦合特性。研究表明, 1) 在任何激励情况下, 同相超模远场光束扩散最小, 光束质量最好; 2) 与熔接激励情况相对比, 熔融拉锥激励时所得各超模远场光斑扩散程度明显小于熔接激励情况下相应超模的扩散程度。这是由于熔融拉锥后, 平行阵列芯光纤芯间距减小, 纤芯半径减小, 模场半径增大, 各纤芯之间超模耦合增强造成的。因此, 将平行阵列芯光纤用于光纤激光器时, 选择芯间距及芯径更小的平行阵列芯光纤, 或采用熔融拉锥法对其进行光激励, 通过进行模式选择, 抑制质量较差的模式输出<sup>[12,13]</sup>, 可获得较高的光束质量, 提高激光器的输出功率。3) 5 芯平行阵列芯光纤输出场为线性场且输出光斑形状取决于各纤芯初始入射光功率及超模传输距离。因此, 通过选择适当的激励条件及平行阵列芯光纤长度, 可将高斯光场转变为光斑形状可控的线性光场。该研究结果可为高功率光纤激光器、出射光斑为特定形状的光纤激光器的设计提供理论依据, 对其他类似微结构光纤在激光器领域的应用研究具有借鉴意义。

## 参 考 文 献

- 1 Li Pingxue, Zhang Xuexia, Zou Shuzhen *et al.*. A quasi-continuous-wave 980 nm Yb-doped single-mode fiber laser and amplifier[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(7): 1688~1691  
李平雪, 张雪霞, 邹淑珍等. 980 nm 准连续单模掺镱光纤激光器及放大器实验研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(7): 1688~1691
- 2 Wang Yuanxiang, Jiang Peipei, Yang Dingzhong *et al.*. All-fiberized master oscillator power amplifier structured pulsed Yb fiber laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1861~1965  
汪园香, 姜培培, 杨丁中等. 全光纤结构主振荡功率放大大型掺镱脉冲光纤激光器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(7): 1861~1965
- 3 Li Jinyan, Li Haiqing, Jiang Zuowen *et al.*. Development of double cladding ytterbium doped fiber [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2006, **43**(7): 3~8  
李进延, 李海清, 蒋作文等. 双包层掺镱光纤研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2006, **43**(7): 3~8
- 4 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
- 5 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
- 6 Yanming Huo, Peter K. Cheo, George G. King. Fundamental mode operation of a 19-core phase-locked Yb-doped fiber amplifier [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(25): 6230~6239
- 7 Xiaoliang Zhu, Libo Yuan, Jun Yang *et al.*. Coupling model of standard single-mode fiber and capillary fiber[J]. *Appl. Opt.*, 2009, **48**(29): 5624~5628
- 8 Zhu Xiaoliang, Yuan Libo. Coupling approach and mechanism on single core fiber and capillary optical fiber[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(5): 0505009  
朱晓亮, 苑立波. 单芯光纤与毛细管光纤的耦合方法及机理研究[J]. *中国激光*, 2011, **38**(5): 0505009
- 9 Chunying Guan, Libo Yuan, Qiang Dai *et al.*. Supermodes analysis for linear-core-array microstructured fiber [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2009, **27**(11): 1741~1745
- 10 J. A. Besley, J. D. Love. Supermode analysis of fibre transmission[J]. *IEE Proc. Optoelectron.*, 1997, **144** (6): 411~419
- 11 T. A. Birks, Y. W. Li. The shape of fiber tapers[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1992, **10**(4): 432~438
- 12 Wang Chuncan, Zhang Fan, Tong Zhi *et al.*. Enhancing in-phase supermode selection for multicore fiber laser[J]. *High Power Laser & Particle Beams*, 2007, **19**(10): 1594~1598  
王春灿, 张帆, 童治等. 多芯光纤激光器中共相位模式功率的提高[J]. *强激光与粒子束*, 2007, **19**(10): 1594~1598
- 13 Zhou Pu, Hou Jing, Chen Zilun *et al.*. Study on the supermode and mode selection in multicore fiber laser [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