

# 光纤拉锥法控制光纤激光器模式的理论与实验研究

王 中<sup>1,2</sup> 李立波<sup>1</sup> 陈泽民<sup>2</sup> 闵大勇<sup>1</sup> 卢飞星<sup>1\*</sup>

(<sup>1</sup> 武汉华工激光工程有限责任公司, 湖北 武汉 430074; <sup>2</sup> 华中科技大学, 湖北 武汉 430074)

**摘要** 大模场面积(LMA)双包层光纤的采用,极大地促进了光纤激光器单纤输出功率的提升,但同时也使得激光器变为多模运行,输出光束质量变差。采用光纤拉锥的方法,对大模场面积光纤激光器的输出模式进行了控制。实验采用 43  $\mu\text{m}$  直径,0.08 数值孔径的双包层掺 Yb 大模场面积光纤,在激光输出端前约 10 mm 处拉制了一 20 mm 长、纤芯最小直径 9  $\mu\text{m}$  的锥形区,当抽运功率为 119.1 W 时实现了 56.4 W 的单横模激光输出。在实验的基础上,对拉锥后光纤激光器的热力学特性进行了理论计算,计算结果与实验现象相一致,并为进一步提高拉锥光纤激光器的单模输出功率及其冷却方案的设计提供了一种思路。

**关键词** 激光器; 光纤激光器; 模式控制; 光纤拉锥

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS200929s1.0399

## Theoretical and Experimental Study on Mode Controlling of a Large-Mode-Area Fiber Laser with Fiber Tapering

Wang Zhong<sup>1,2</sup> Li Libo<sup>1</sup> Chen Zeming<sup>2</sup> Min Dayong<sup>1</sup> Lu Feixing<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Wuhan Huagong Laser Engineering Co. Ltd., Wuhan, Hubei 430074, China)  
(<sup>2</sup> Huazhong University of Science & Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

**Abstract** With the use of large-mode-area (LMA) double clad fiber, output powers of a single fiber laser increase dramatically. However, it makes the laser operate with high-order modes and the beam quality degrades at the same time. In this paper, fiber tapering is introduced to control high order modes of a LMA fiber laser, which has a 43  $\mu\text{m}$  core with 0.08 NA. And a 20 mm length tapered zone is employed, 10 mm in front of the output end. And the minimum of the core diameter of the tapered zone is 9  $\mu\text{m}$ . When the launched pump power is 119.1 W, 56.4 W single mode output can be obtained. On the basis of the experiment, thermodynamic characteristics of the tapered fiber laser are calculated theoretically. The experimental results are in agreement with the calculated results. And it offers a reference for achieving higher single mode fiber laser and its cooling scheme.

**Key words** lasers; fiber laser; mode controlling; fiber tapering

## 1 引 言

进入 20 世纪 90 年代以后,光纤激光器得到了蓬勃的发展,单纤输出功率不断提升,在这其中,大模场多模光纤扮演了重要角色<sup>[1~3]</sup>。大模场面积(LMA)光纤的采用,很大程度上减小了各种非线性效应<sup>[4]</sup>,如 SBS, SRS 等的影响,使得光纤激光器的输出功率迅速增大,单根光纤已能实现千瓦级的输出<sup>[5,6]</sup>。另一方面,大模场面积光纤由于纤芯直径比较大,能同时支持高阶模式的振荡,带来了光束质量变差的新问题<sup>[7]</sup>。为使大模场面积光纤激光器获得近衍射极限的光束输出,人们采用了各种方法来

抑制光纤中高阶模的振荡,将光纤的某一段进行拉锥处理便是其中之一。

## 2 实验研究

实验采用的双包层光纤内包层为 650  $\mu\text{m}$ /600  $\mu\text{m}$  的 D 形,数值孔径(NA)为 0.48;纤芯掺 Yb,直径为 43  $\mu\text{m}$ , NA=0.08(在其工作波长 1090 nm 附近的归一化频率  $V$  约为 9.9);光纤长度约 12 m。

实验装置如图 1 所示。由于拉锥区对于多模的抽运光有较强的损耗,为实现对光纤的有效抽运,特将拉锥区选在光纤激光器的输出端附近。此外,对

**基金项目:** 国家科技支撑计划(2007BAF11B02)资助课题。

**作者简介:** 王 中(1965—),男,高级工程师,主要从事光纤激光器和光纤放大器等方面的研究。

E-mail: wz@hgtech.com

\* 通信联系人。E-mail: lfx@hglaser.com

于如图 1 所示的单端抽运光纤激光器而言,其纤芯温度由抽运端至输出端逐渐降低,拉锥区位于输出端附近也能减小热效应对其输出功率的影响。为了

便于拉锥后光纤端面的磨平及抛光,在拉锥区后预留了约 10 mm 的未拉锥光纤。

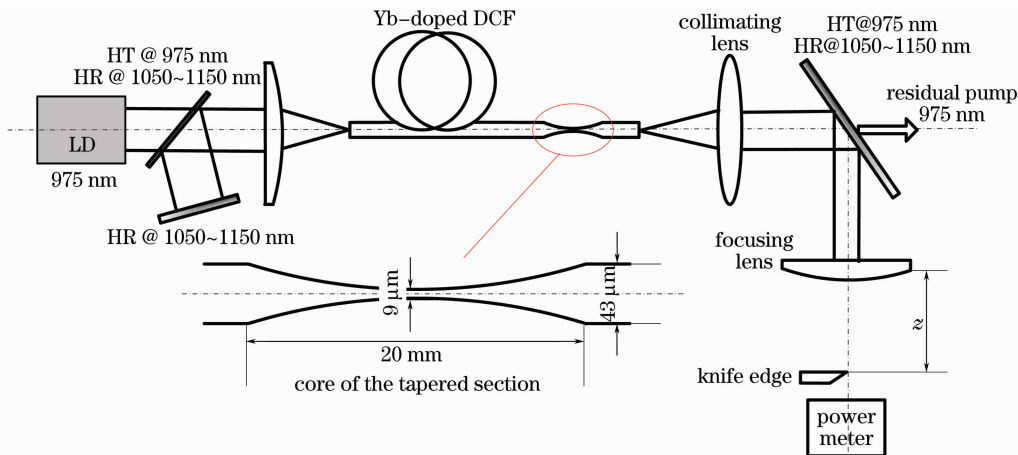


图 1 光纤拉锥进行模式控制实验装置图

Fig. 1 Experimental configuration of a tapered fiber laser

采用 Ericsson 公司生产的 FSU975 型光纤熔接机进行光纤拉锥。先将光纤保护层(涂覆层)去除,然后在熔接机上进行拉锥处理。选用不同的拉锥参数,可实现拉锥区纤芯尺寸的调节。当纤芯 NA 保持不变时,纤芯尺寸的减小,有利于增大拉锥区对高阶模式的损耗,进而抑制高阶模式在腔内的振荡。考虑到熔接机自身的限制,光纤进行拉锥处理后,其纤芯直径最小处约为  $9 \mu\text{m}$ ,拉锥区长度约为 20 mm,经计算光纤在拉锥前后的长度变化量约为 12 mm。在拉锥区最小直径处,光纤的归一化频率  $V$  约为 2.1,这就保证了只有基横模能够通过该区域实现振荡输出,而高阶模式则被滤除。

实验还采用 CCD 测量了拉锥前后光纤激光器的输出光斑的分布图样,如图 2 所示。由图 2(a)可看出,在拉锥前,光斑能量分布不太规则,表现出明显的多模输出特性;而在图 2(b)中,光斑能量在  $x$  和  $y$  两个方向上均为近似理想的高斯分布,这也是

光纤激光器处于单横模运行的特征。

实验同时还测量了光纤激光器在拉锥前后的输出功率,如图 3 所示。拉锥前后光纤激光器的斜率效率分别为 71.8% 和 54.1%,当最大抽运功率为 119.1 W 时,相应的输出功率分别为 77.9 W 和 56.4 W。实验还发现,在对光纤进行拉锥处理后,光纤激光器的抽运阈值略有上升。

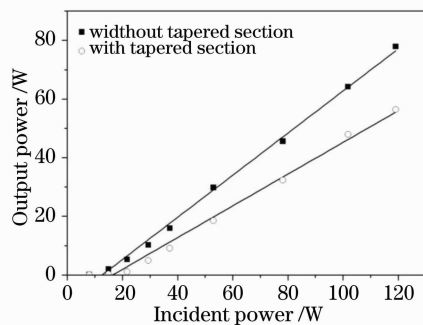


图 3 拉锥前后光纤激光器的输出功率

Fig. 3 Output powers versus incident pump powers of the fiber laser

### 3 热力学分析

光纤激光器虽然具有较其他固体激光器更优越的散热性能,但如果抽运功率足够大,光纤端面由于相对较强的抽运吸收还是会造成热损伤,严重时还会出现光纤端面炸裂的现象。因此在高功率光纤激光器中,一般都需要对光纤端面进行冷却处理。将光纤的一小段进行拉锥后,纤芯内部的热功率分布将会发生变化,因此有必要考查拉锥对纤芯内部温

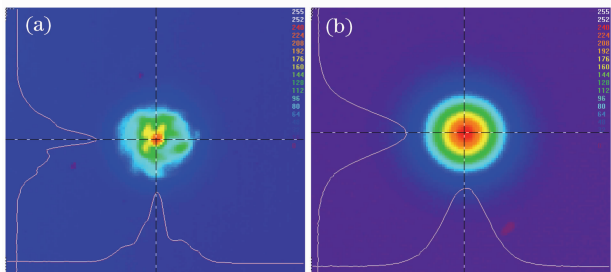


图 2 拉锥前(a)和拉锥后(b)光纤激光器光斑远场分布图样

Fig. 2 Beam profiles of the fiber laser without tapered section (a) and with tapered section (b)

度分布的影响。本文在实验研究的基础上,对拉锥后光纤激光器内的纤芯温度分布进行了分析计算,计算结果可为进一步提高拉锥光纤激光器的单模输出功率及其冷却方案的设计提供一种思路。

### 3.1 拉锥光纤激光器内的抽运功率密度分布

双包层光纤激光器中光纤内部的温度分布与光纤内的热沉积分布密切相关,在理想情况下,抽运光子与激光光子之间的能量亏损是激光介质内唯一的发热因素,此时光纤介质内的热沉积分布与抽运光的功率分布是基本一致的<sup>[8,9]</sup>。因此,如果确定了光纤内吸收的抽运功率的分布就能解出光纤内的热沉积分布。以下采用速率方程来求解抽运光在光纤内的功率分布。

图4为双包层光纤激光器的结构简图。纤芯半

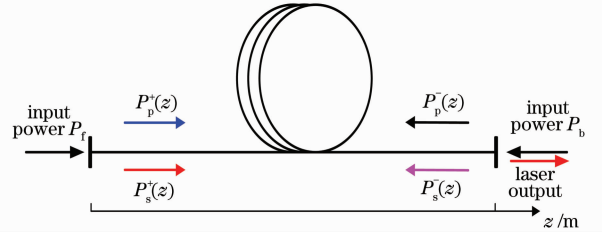


图4 双包层光纤激光器结构简图

Fig. 4 Schematic drawing of double cladding fiber laser

径为  $r$ , 两端的抽运功率分别为  $P_f$  和  $P_b$ ,  $P_p^+(z)$  和  $P_p^-(z)$  分别表示沿  $z$  轴正向和反向传输的抽运功率,  $P_s^+(z)$  和  $P_s^-(z)$  分别表示沿  $z$  轴正向和反向传输的信号光(激光)功率。则光纤纤芯内任一处吸收的抽运功率密度  $p(z)$  可表示为

$$p(z) = \frac{1}{\pi r^2} \left( \left| \frac{dP_p^+}{dz} \right| + \left| \frac{dP_p^-}{dz} \right| \right) = \frac{1}{\pi r^2} \left( \frac{dP_p^+}{dz} - \frac{dP_p^-}{dz} \right), \quad (1)$$

对于双包层光纤激光器,其稳态速率方程组<sup>[10,11]</sup>为

$$\pm \frac{dP_p^\pm(z)}{dz} = -\Gamma_p P_p^\pm(z) \{ \sigma_a(\lambda_p) N - [\sigma_a(\lambda_p) + \sigma_c(\lambda_p)] N_2(z) \} - \alpha_p P_p^\pm(z), \quad (2)$$

$$\pm \frac{dP_s^\pm(z)}{dz} = -\Gamma_s P_s^\pm(z) \{ [\sigma_a(\lambda_s) + \sigma_c(\lambda_s)] N_2(z) - \sigma_a(\lambda_s) N(z) \} + \Gamma_s \sigma_c(\lambda_s) N_2(z) P_0(\lambda_s) - \alpha_s(z) P_s^\pm(z), \quad (3)$$

$$\frac{N_2}{N} = \left\{ \frac{[P_p^+(z) + P_p^-(z)] \sigma_a(\lambda_p) \Gamma_p}{h\nu_p A} + \frac{[P_s^+(z) + P_s^-(z)] \sigma_a(\lambda_s) \Gamma_s}{h\nu_s A} \right\} \left\{ \frac{[P_p^+(z) + P_p^-(z)] [\sigma_a(\lambda_p) + \sigma_c(\lambda_p)] \Gamma_p}{h\nu_p A} + \frac{1}{\tau} + \frac{[P_s^+(z) + P_s^-(z)] [\sigma_a(\lambda_s) + \sigma_c(\lambda_s)] \Gamma_s}{h\nu_s A} \right\}, \quad (4)$$

式中  $\Gamma_p, \Gamma_s$  分别为抽运光和激光与纤芯的交叠因子;  $\sigma_c(\lambda_p), \sigma_a(\lambda_p)$  和  $\sigma_c(\lambda_s), \sigma_a(\lambda_s)$  分别是抽运光和激光的受激发射截面积和吸收面积;  $N$  为掺杂纤芯中  $\text{Yb}^{3+}$  离子数密度,  $N_2$  为激光上能级粒子数密度;  $\alpha_p$  和  $\alpha_s$  分别为抽运光和激光的损耗系数;  $\nu_p, \lambda_p$  和  $\nu_s, \lambda_s$  分别为抽运光和激光的频率及波长;  $h$  为普朗克常数;  $A$  为纤芯横截面积;  $\tau$  为激光跃迁上能级自发辐射寿命。

对于拉锥所用 12 m 长光纤,上述速率方程组满足边界条件

$$P_p^+(z=0) = R_{pf} P_p^-(z=0) + P_f, \quad (5)$$

$$P_p^-(z=12) = R_{pb} P_p^+(z=12) + P_b, \quad (6)$$

$$P_s^+(z=0) = R_{sf} P_s^-(z=0), \quad (7)$$

$$P_s^-(z=12) = R_{sb} P_s^+(z=12), \quad (8)$$

式中  $R_{pf}, R_{pb}$  和  $R_{sf}, R_{sb}$  分别为谐振腔前后(左右)端面对抽运光和激光的反射因子。

对于拉锥实验所用光纤,表1给出了各参数的数值。为简化分析,不考虑抽运光通过锥形区时的损失。根据实验所采用的单端抽运结构,选取  $P_f = 120 \text{ W}, P_b = 0 \text{ W}$ , 根据(1)式~(8)式,即可利用 MATLAB 分析软件求得单端抽运拉锥光纤内的抽运功率密度分布,如图5所示。

表1 实验所用光纤的各项参数

Table 1 Parameters of the fiber employed in the experiment

Parameter	Value	Parameter	Value
$\Gamma_p$	0.0046	$\alpha_s$	$0.005 \text{ cm}^{-1}$
$\Gamma_s$	0.9	$\lambda_p$	975 nm
$\sigma_c(\lambda_p)$	$2.5 \times 10^{-24} \text{ m}^2$	$\lambda_s$	1090 nm
$\sigma_a(\lambda_p)$	$2.5 \times 10^{-24} \text{ m}^2$	$\tau$	0.84 ms
$\sigma_c(\lambda_s)$	$1.4 \times 10^{-27} \text{ m}^2$	$R_{pf}$	0.004
$\sigma_a(\lambda_s)$	$2 \times 10^{-25} \text{ m}^2$	$R_{pb}$	0.004
$N$	$4 \times 10^{26} \text{ m}^{-3}$	$R_{sf}$	0.98
$\alpha_p$	$0.006 \text{ cm}^{-1}$	$R_{sb}$	0.04

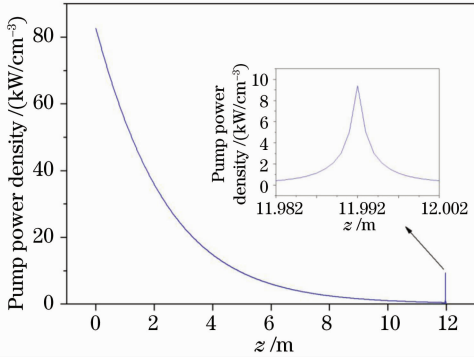


图5 单端抽运条件下拉锥光纤内的抽运功率密度轴向分布图

Fig. 5 Axial distribution curve of pump power density of the single end-pumped tapered fiber laser

### 3.2 拉锥光纤激光器纤芯内的温度分布

对于高功率双包层光纤激光器,由于增益光纤长度远大于光纤横向尺寸,因此可将光纤视作无限长,且假定热流仅限于径向方向。对于实验所采用的D形内包层光纤,由于光纤发热主要来源于纤芯,且纤芯横截面积远小于内包层横截面积,为简化分析可将其等效为圆形内包层来进行计算,如图6所示。其中区域I, II和III分别表示掺杂纤芯、等效内包层和外包层,半径分别为 $a$ ,  $b$ 和 $c$ 。

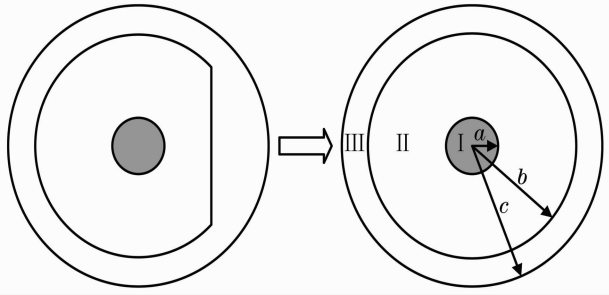


图6 求解双包层光纤温度分布的几何模型

Fig. 6 Geometry model of temperature distribution of double cladding fiber

当双包层光纤激光器稳定运行时,其温度分布也为稳态分布,对应的温度分布应满足导热方程<sup>[12]</sup>

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \frac{\partial T(r)}{\partial r} \right] = -\frac{q}{C}, \quad (9)$$

式中 $r$ 为距离纤芯中心的距离, $T(r)$ 为 $r$ 处的温度, $q$ 为单位体积的热功率密度, $C$ 为导热系数。上述导热方程的解为

$$T(r) = -\frac{qr^2}{4C} + A \ln r + B, \quad (10)$$

式中 $A, B$ 为积分常数。根据(10)式,可得到 I, II, III 区内的温度分布分别为

$$T_1(r) = -\frac{q_1 r^2}{4C_1} + A_1 \ln r + B_1, \quad 0 \leq r < a \quad (11)$$

$$T_2(r) = -\frac{q_2 r^2}{4C_2} + A_2 \ln r + B_2, \quad a \leq r < b, \quad (12)$$

$$T_3(r) = -\frac{q_3 r^2}{4C_3} + A_3 \ln r + B_3, \quad b \leq r < c, \quad (13)$$

式中 $q_1, q_2$ 和 $q_3$ 分别表示纤芯、内包层和外包层的热功率密度,对于双包层光纤激光器 $q_2$ 和 $q_3$ 均为0; $C_1, C_2$ 和 $C_3$ 为三个区域所对应的导热系数;各积分常数由边界条件来确定。考虑到实际的物理意义,在纤芯中心 $r=0$ 处的温度应为有限值,其温度梯度 $\partial T/\partial r$ 应为0,在纤芯与等效内包层的边界以及等效内包层与外包层的边界,温度和热流均连续,则边界条件可写为

$$\begin{cases} \frac{\partial T_1(r=0)}{\partial r} = 0, \\ T_1(r=0) = T_0, \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} C_1 \frac{\partial T_1(r=a)}{\partial r} = C_2 \frac{\partial T_2(r=a)}{\partial r}, \\ T_1(r=a) = T_2(r=a), \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} C_2 \frac{\partial T_2(r=b)}{\partial r} = C_3 \frac{\partial T_3(r=b)}{\partial r}, \\ T_2(r=b) = T_3(r=b), \end{cases} \quad (16)$$

由(11)式~(13)式,并利用(14)式~(16)式的边界条件,可解得各区的温度分布分别为

$$\begin{cases} T_1(r) = T_0 - \frac{q_1 r^2}{4C_1}, \\ T_2(r) = T_0 - \frac{q_1 a^2}{4C_1} - \frac{q_1 a^2}{2C_2} \ln\left(\frac{r}{a}\right), \\ T_3(r) = T_0 - \frac{q_1 a^2}{4C_1} - \frac{q_1 a^2}{2C_2} \ln\left(\frac{r}{a}\right) + \frac{q_1 a^2}{2C_3} \ln\left(\frac{r}{b}\right). \end{cases} \quad (17)$$

假设外包层的表面与外界直接接触,根据牛顿冷却定律有

$$C_3 \frac{\partial T_3(r=c)}{\partial r} = h[T_E - T_3(r=c)], \quad (18)$$

式中 $T_E$ 为环境温度或冷却温度, $h$ 为传热系数。将(18)式代入(17)式,即可解得纤芯中心的温度

$$T_0 = T_E + \frac{q_1 a^2}{2hc} + \frac{q_1 a^2}{4C_1} + \frac{q_1 a^2}{2C_2} \ln\left(\frac{b}{a}\right) + \frac{q_1 a^2}{2C_3} \ln\left(\frac{c}{b}\right), \quad (19)$$

假定整个拉锥区都很均匀,即拉锥区与未拉锥区的光纤参数满足

$$a_i : b_i : c_i = a : b : c, \quad (20)$$

其中  $a_i, b_i$  和  $c_i$  分别为拉锥区任一截面处的纤芯半径、等效内包层半径和外包层半径。根据(19)式并利用(20)式,可得拉锥区纤芯中心温度为

$$T_0 = T_E + \frac{q_1 a_i^2}{2hc_1} + \frac{q_1 a_i^2}{4C_1} + \frac{q_1 a_i^2}{2C_2} \ln\left(\frac{b}{a}\right) + \frac{q_1 a_i^2}{2C_3} \ln\left(\frac{c}{b}\right), \quad (21)$$

根据已经求得的拉锥光纤内的抽运功率密度分布,使用表 2 中的参数,并利用(19)式和(21)式即可求得拉锥光纤激光器纤芯中心的温度分布(取环境温度  $T_E=298$  K,即不采用任何冷却措施),如图 7 所示。

表 2 计算拉锥光纤激光器纤芯温度分布所需参数

Table 2 Parameters used for core temperature calculating of the tapered fiber laser

Parameter	Value
$a / \mu\text{m}$	21.5
$b / \mu\text{m}$	325
$c / \mu\text{m}$	350
$C_1 / [\text{W}/(\text{cm} \cdot \text{K})]$	$1.38 \times 10^{-2}$
$C_2 / [\text{W}/(\text{cm} \cdot \text{K})]$	$1.38 \times 10^{-2}$
$C_3 / [\text{W}/(\text{cm} \cdot \text{K})]$	$2.0 \times 10^{-3}$
$h / [\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{K})]$	$5.0 \times 10^{-3}$

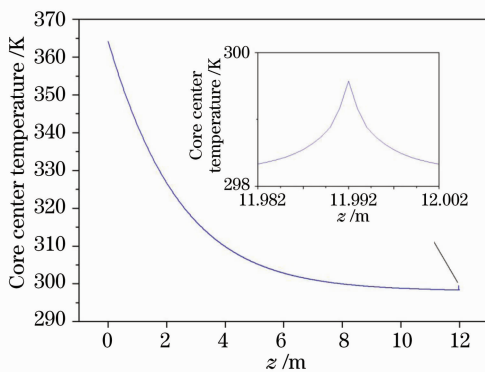


图 7 单端抽运条件下拉锥光纤纤芯中心的温度分布

Fig. 7 Temperature distribution of center of the fiber core of the single end-pumped tapered fiber laser

由图 7 可知,与拉锥前相比,未拉锥区纤芯中心的温度分布基本保持不变,而拉锥区纤芯中心温度略有上升(小于 2 K)。这就说明,对于实验所采用的单端抽运结构,光纤的温度在抽运端最高,而拉锥区的温度跟与其相邻的未拉锥区的温度基本相同。在实验过程中,随着抽运功率的增加最后光纤端面烧损,而拉锥区并未发现烧伤痕迹,实验现象与

理论计算结果相符。理论计算结果表明,若要进一步提高单端抽运拉锥光纤激光器的单模输出功率,光纤抽运端的冷却是必要的,而拉锥区不需进行特殊的冷却处理。

## 4 结 论

利用光纤拉锥的方法,实验采用大模场面积光纤实现了 56.4 W 的单横模激光输出。在实验的基础上,对拉锥后光纤激光器的纤芯内温度分布进行了理论计算,计算结果与实验现象相一致。

## 参 考 文 献

- Dong Xue, Qihong Lou, Jun Zhou *et al.*. A 110 W fiber laser with homemade double-clad fiber[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(6): 345~347
- Lingfeng Kong, Qihong Lou, Jun Zhou *et al.*. 133 W pulsed fiber amplifier with large-mode-area fiber[J]. *Opt. Eng.*, 2006, **45**(1): 010502Q
- Zhou Jun, Lou Qihong, Zhu Jianqiang *et al.*. A continuous-wave 714 W CW fiber laser with China-made large-mode-area double-clad fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(7): 1119~1120  
周 军,楼祺洪,朱健强等. 采用国产大模场面积双包层光纤的 714 W 连续光纤激光器[J]. *光学学报*, 2006, **26**(7): 1119~1120
- J. Limpert, F. Röser, F. Schreiber *et al.*. High-power ultrafast fiber laser systems[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2006, **12**(2): 233~244
- Y. Jeong, J. K. Sahu, D. N. Payne *et al.*. Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1.36 kW continuous-wave output power[J]. *Opt. Express*, 2004, **25**(12): 6088~6092
- Li Wei, Wu Zichun, Chen Xi *et al.*. High power fiber laser exceed 1 kW[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(6): 1053~1056  
李 伟,武子淳,陈 曦等. 大功率光纤激光器输出功率突破 1 kW[J]. *强激光与粒子束*, 2006, **18**(6): 1053~1056
- Li Libo, Lou Qihong, Zhou Jun *et al.*. Influence of bending diameter on the output capability of multimode fiber laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(3): 323~326  
李立波,楼祺洪,周 军等. 弯曲直径对多模光纤激光器输出性能的影响[J]. *中国激光*, 2007, **34**(3): 323~326
- M. K. Davis, M. J. F. Digonnet, R. H. Pantell. Thermal effects in doped fibers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1998, **16**(6): 1013~1023
- N. A. Brilliant, K. Lagonik. Thermal effect in a dual-clad ytterbium fiber laser[J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(21): 1669~1671
- I. Kelson, A. A. Hardy. Strongly pumped fiber lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1998, **34**(9): 1570~1577
- D. Xue, Q. Lou, J. Zhou. Comparison of Yb-doped fiber laser with one-end and double-end pumping configuration[J]. *Opt. & Laser Technol.*, 2007, **39**(4): 871~874
- Zhu Hongtao, Lou Qihong, Zhou Jun *et al.*. Experimental and theoretical study on designing of cooling device for the kilowatt-level double cladding fiber laser[J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(8): 4966~4971  
朱洪涛,楼祺洪,周 军等. 千瓦级双包层光纤激光器冷却方案设计理论和实验研究[J]. *物理学报*, 2008, **57**(8): 4966~4971