

文章编号: 0258-7025(2009)07-1900-05

# 百微米芯径光纤激光器及其模式控制技术研究

薛宇豪<sup>1,2,3</sup> 何兵<sup>1,2</sup> 王伟<sup>1,2,3</sup> 李震<sup>1,2,3</sup> 周军<sup>1,2</sup>

董景星<sup>1,2</sup> 魏运荣<sup>1,2</sup> 楼祺洪<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800

<sup>2</sup>上海市全固态激光器与应用技术重点实验室, 上海 201800; <sup>3</sup>中国科学院研究生院, 北京 100039

**摘要** 研究了阶跃折射率分布的百微米芯径双包层光纤激光器的输出特性及其模式控制技术。理论上对光纤缠绕法模式控制技术应用于百微米芯径光纤激光器的可行性进行了分析。实验中,采用腔内小孔法对百微米芯径光纤激光器的输出激光模式进行控制,研究了不同孔径对输出激光光束质量的影响。在腔内不加小孔时输出激光  $x$ ,  $y$  方向的光束质量因子  $M^2$  分别为 4.67 和 4.60,在腔内加入直径为 2 mm 的小孔后, $x$ , $y$  方向的光束质量因子  $M^2$  分别为 1.96 和 2.01,腔内小孔对输出激光的光束质量有明显的改善。

**关键词** 激光技术; 光纤激光器; 大芯径光纤; 模式控制; 小孔限模

**中图分类号** TN 248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093607.1900

## Hundred-Micron Core Diameter Fiber Laser and Its Mode Control

Xue Yuhao<sup>1,2,3</sup> He Bing<sup>1,2</sup> Wang Wei<sup>1,2,3</sup> Li Zhen<sup>1,2,3</sup> Zhou Jun<sup>1,2</sup>

Dong Jingxing<sup>1,2</sup> Wei Yunrong<sup>1,2</sup> Lou Qihong<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China  
<sup>2</sup> Shanghai Key Laboratory of All Solid-State Laser and Applied Techniques, Shanghai 201800, China  
<sup>3</sup> Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

**Abstract** The output characteristic of hundred-micron core diameter fiber laser and its mode control technique are researched. In theory, feasibility of which using winding to control the modes of hundred-micron core diameter fiber laser is analyzed. In experiment, output modes of hundred-micron core diameter fiber laser are controlled by the hole in the laser cavity, and the effects to beam quality are researched with holes of different diameters. When there is no hole in the laser cavity, the beam quality factors  $M^2$  are 4.67 and 4.60 in  $x$  and  $y$  direction. After adding 2 mm diameter holes in the cavity, the beam quality factors  $M^2$  are 1.96 and 2.01 in  $x$  and  $y$  direction. The beam quality is improved remarkably by the holes.

**Key words** laser technique; fiber laser; large-core fiber; mode control; limit mode with hole

## 1 引言

近年来,随着高功率半导体激光器抽运技术和双包层光纤制作工艺的进步,光纤激光器的输出功率不断提高,单根光纤的输出功率已经达到千瓦级以上<sup>[1,2]</sup>。光纤激光器在体积、结构、效率、散热方

面的优势,使得高功率光纤激光器广泛应用于工业、军事等领域,如激光切割焊接、空间激光武器等<sup>[3]</sup>,还可用于光纤激光组束<sup>[4]</sup>来实现更高亮度的激光输出,这些不仅需要高的输出功率,还需要良好的光束质量。为了克服端面损伤和非线性效应,需要增大

收稿日期: 2009-03-11; 收到修改稿日期: 2009-04-22

基金项目: 国家 863 计划(2008AA03Z405)资助课题

作者简介: 薛宇豪(1985—),男,博士研究生,主要从事高功率光纤激光器、光纤放大器等方面的研究。

E-mail: yuhao123105@163.com

导师简介: 周军(1972—),男,研究员,博士生导师,主要从事高功率光纤激光器、光纤放大器等方面的研究。

E-mail: junzhousd@siom.ac.cn(通信联系人)

光纤的纤芯直径来增大模场面积。随着所用光纤芯径的增大,纤芯中的激光振荡模式增多,其输出激光的光束质量也逐渐变差,因此对大芯径光纤激光器进行模式控制十分必要。为了改善大芯径光纤激光器的光束质量,人们提出了许多方法进行模式控制,主要有缠绕法、拉锥法、小孔法。缠绕法是将光纤缠绕为不同的直径,利用弯曲损耗掉高阶模,从而提高光束质量。美国 Livemore 实验室的 D. A. V. Kliner 小组利用缠绕法实现了多模双包层光纤的单模输出<sup>[5]</sup>。J. A. Alvarez-Chavez 等<sup>[6]</sup>将粗芯双包层掺 Yb<sup>3+</sup> 光纤进行拉锥,在拉锥区域内纤芯变细,抑制光纤内高阶模振荡,从而提高了输出光束质量。李立波等<sup>[7,8]</sup>分别采用缠绕法和拉锥法对大模场多模光纤进行模式控制,实现了光束质量因子  $M^2$  为 1.67 和 1.81 的激光输出。

本文对国产阶跃型折射率分布的百微米芯径光纤的输出激光特性进行了研究。在理论上研究了光纤缠绕法应用于百微米芯径光纤激光器模式控制的可行性,结果表明缠绕法不适用于这种光纤的模式控制。在实验上,研究了不同孔径腔内小孔对这种大芯径光纤激光器输出激光光束质量的影响,结果表明,腔内小孔法可使这种大芯径光纤激光器的输出激光光束质量得到有效改善。最后分析了百微米芯径光纤实现高效率、高光束质量激光输出的技术途径。

## 2 理论分析

缠绕法是基于光纤宏弯损耗的模式控制技术,

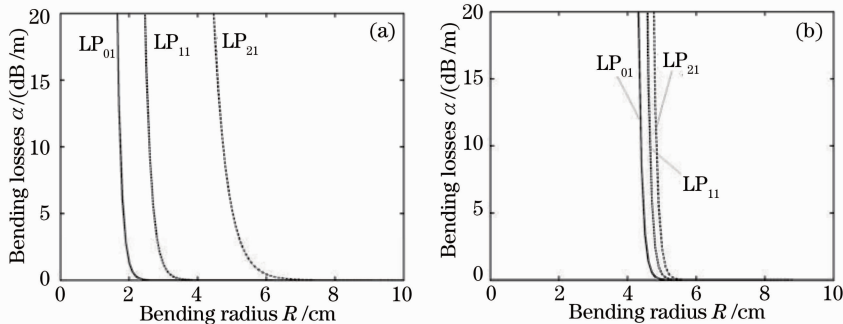


图 1 不同激光模式的弯曲损耗曲线。(a)芯径 24  $\mu\text{m}$ ; (b)芯径 90  $\mu\text{m}$

Fig. 1 Bending losses curves of different modes. (a) $d=24 \mu\text{m}$ ; (b) $d=90 \mu\text{m}$

小孔法是在谐振腔内插入小孔光阑作为选模元件,是固体激光器中常用的选模方法。由激光原理可知,一台激光器的谐振腔内可能有若干个稳定的振荡模,只要某一模的单程增益大于其单程损耗,即满足激光振荡条件,该模式就有可能被激发而起振。即需要满足

根据 Marcuse 的弯曲损耗理论<sup>[9]</sup>,光纤弯曲会引起光信号的损耗,不同模式的弯曲损耗不同,且高阶模的损耗更高,对于特定的光纤,其弯曲损耗表示为

$$2\alpha = \frac{2ak^2 \exp\left(2\gamma a - \frac{2\gamma^3 R}{3\beta_g^2}\right)}{e_\nu \sqrt{\pi\gamma R V^2}}, \quad (1)$$

其中  $\gamma = (\beta_g^2 - n_2^2)^{1/2}$ ,  $e_\nu = \begin{cases} 2, \nu = 0 \\ 1, \nu \neq 0 \end{cases}$ ,  $\nu$  为第一类

Hankel 函数的阶数,  $V = 2\pi a \sqrt{n_1^2 - n_2^2}/\lambda$  为归一化频率,  $n_1, n_2$  分别为纤芯和包层折射率,  $\beta_g$  为波导模式传播常数,  $a$  为纤芯半径,  $R$  为光纤弯曲的曲率半径。实验常用的光纤数值孔径为 0.08,对于纤芯直径为 24  $\mu\text{m}$  和 90  $\mu\text{m}$  的光纤,理论模拟了弯曲直径对激光模式的损耗特性。

在图 1(a), (b)中,从左到右 3 条曲线分别表示  $LP_{01}, LP_{11}, LP_{21}$  模的弯曲损耗,可以看到,对于纤芯直径为 24  $\mu\text{m}$  的光纤,基模的损耗曲线和其他高阶模的损耗曲线分开得很明显,也就是说通过缠绕成一定的直径大小,很容易把高阶模损耗掉,而对基模的损耗很小,在对输出激光功率影响很小的情况下提高光束质量。但是当纤芯直径增加到 90  $\mu\text{m}$  以后,基模的损耗曲线和其他高阶模的损耗曲线越来越近,当缠绕光纤直径比较大的时候,对高阶模和基模的损耗都比较小,光束质量改善不明显,而弯曲直径比较小时,对高阶模和基模的损耗又都比较大,激光功率会下降很多。因此对于大芯径的光纤,利用缠绕法进行模式控制效果不理想。

$$\sqrt{r_1 r_2} (1 - \delta) \exp(GL) > 1, \quad (2)$$

其中  $r_1, r_2$  为谐振腔两个腔镜的反射率,  $\delta$  为单程损耗,  $G$  为单程增益系数,  $L$  为激光工作物质长度<sup>[10]</sup>。如图 2 所示,由于高阶模的光腰比基模的大,如果小孔的直径选择得适当,就可以将高阶模的光束遮住一部分,而基模则可顺利通过。再由衍射理论可知,

腔内插入小孔相当于减小腔镜的横截面积,即减小了腔的非涅耳数  $N$ ,因而各阶模的衍射损耗加大。只要小孔的直径选择适当,就可以使低阶模满足(2)式,被激发起振,而高阶模不能满足,得到抑制,从而改善输出激光光束质量。

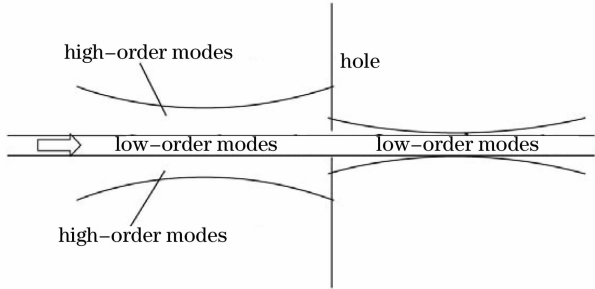


图 2 小孔限模示意图

Fig. 2 Schematic of limit mode with hole

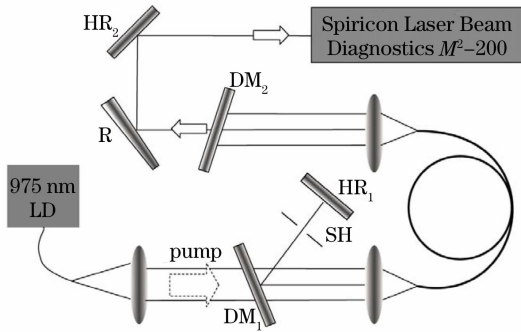


图 3 实验装置图

Fig. 3 Experimental setup

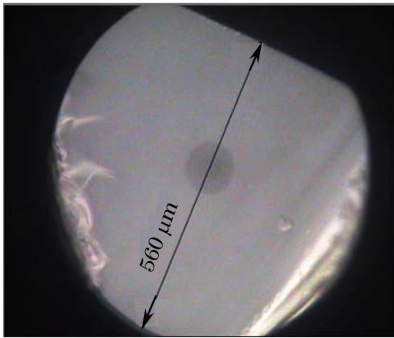


图 4 光纤端面图

Fig. 4 Cross section of fiber

### 3 实验装置

利用小孔法对百微米芯径光纤激光器的输出光束质量进行了实验研究,实验装置图如图 3 所示。LD 为中心波长为 975 nm 的半导体激光器,由尾纤耦合输出,经过准直透镜和透镜后耦合到双包层光纤中。DM<sub>1</sub> 为 975 nm 激光高透,1080 nm 激光高反的双色镜,HR<sub>1</sub> 为腔镜,对 1080 nm 激光高反,其

与光纤输出端面构成一对谐振腔,DM<sub>2</sub> 为 1080 nm 激光高透,975 nm 激光高反的双色片,从光纤输出的激光经过透镜准直,通过 DM<sub>2</sub> 滤掉残余的抽运光后进行激光的功率和光束质量因子的测量。所用有源光纤为中国电子科技集团公司第四十六研究所研制的阶跃型折射率分布的大芯径掺 Yb<sup>3+</sup> 双包层光纤,图 4 为该光纤的端面图,纤芯直径为 95 μm,纤芯数值孔径为 0.06,内包层为 D 形,560 μm × 630 μm,数值孔径为 0.46,光纤长度为 4.7 m。SH 为腔内限模小孔,小孔的直径分别为 10 mm,8 mm,6 mm,4 mm 和 2 mm,放入腔内进行输出激光的模式控制。在腔内不放置限模小孔和放置不同孔径小孔的情况下分别对激光输出功率和光束质量因子进行了测量。

### 4 实验结果及讨论

在不加限模小孔的情况下对百微米芯径光纤激光器的输出特性进行了测量,实验获得的最高输出功率为 30.2 W,斜率效率约为 15.8%;采用光束质量测量仪(Spiricon Laser Beam Diagnostics M<sup>2</sup>-200)测得  $x, y$  方向的光束质量因子  $M^2$  分别为 4.67 和 4.60。

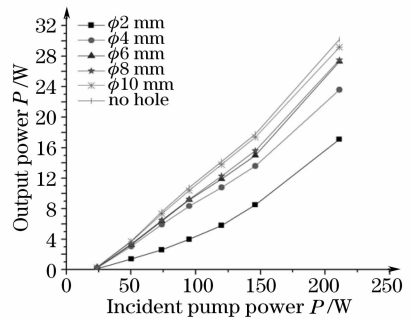


图 5 入纤抽运功率与输出功率曲线

Fig. 5 Curves of output power versus incident pump power

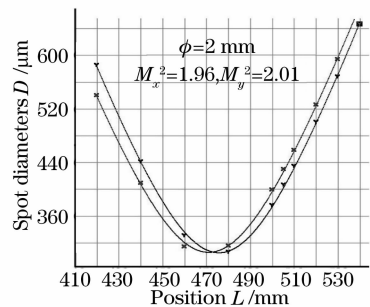


图 6 光束质量因子  $M^2$  曲线

Fig. 6 Curve of beam quality factors  $M^2$

在腔内分别放置不同孔径的限模小孔, 研究小孔直径对该光纤激光器的输出功率和光束质量因子的影响, 所得结果如图 5 和表 1 所示。图 5 为采用不同直径限模小孔时输出激光功率随入纤抽运功率的变化曲线, 可见, 随着限模小孔直径的减小, 光纤激光器的输出激光功率也逐渐减小, 在小孔直径为 10 mm 时, 功率下降不多, 斜率效率约为 15.3%; 但

表 1 不同孔径下的光束质量因子  $M^2$

Table 1 Beam quality factors  $M^2$  with holes of different diameters

Hole diameter /mm	Beam quality factors $M_x^2$	Beam quality factors $M_y^2$
no hole	4.67	4.60
10	4.58	4.47
8	4.36	4.24
6	4.09	3.91
4	3.57	3.37
2	1.96	2.01

表 1 列出了不同限模小孔下对应光纤激光器输出光束质量因子的测量结果, 对应 10 mm 的限模小孔, 输出激光的  $x, y$  方向的光束质量因子  $M^2$  分别为 4.58 和 4.47, 此时由于限模小孔孔径较大, 模式改善效果不明显。随着小孔直径的减小, 光束质量也逐渐变好, 在放置直径为 2 mm 的限模小孔时,  $x, y$  方向的光束质量因子  $M^2$  分别为 1.96 和 2.01, 图 6 为所测得的光束质量因子  $M^2$  曲线。

由此可见, 对于这种百微米芯径的双包层光纤, 利用小孔法模式控制的确可以使光纤激光器的输出激光光束质量得到明显改善。但是, 由于限模小孔的采用, 腔损耗增加, 使得激光输出功率下降较多。因此对于这种超大芯径光纤激光器的模式控制, 应根据实际需求, 综合考虑输出功率和光束质量, 选择合适大小的限模小孔来实现最佳激光输出。光纤拉锥法模式控制同小孔限模的原理接近, 因此, 通过对这种大芯径光纤进行适当拉锥也将能实现模式控制的效果。

## 5 结 论

理论计算和实验测量表明, 缠绕法不适用于阶跃折射率分布百微米芯径光纤激光器的模式控制, 采用限模小孔法虽然可以明显改善百微米芯径光纤激光器的输出光束质量, 但对光纤激光器的输出功率和效率的影响都较大。对于芯径达百微米量级的高功率光纤激光器, 即使采用模式控制技术, 传统的阶跃折射率分布的光纤设计也很难实现低阶模的激

在小孔直径为 2 mm 时, 输出激光功率下降明显, 斜率效率下降为 9.0%。这是由于谐振腔内的小孔限制了高阶模的振荡, 激光腔损耗增加, 从而使得斜率效率下降, 输出功率减少。实验中, 由于所采用的光纤长度比较短, 且抽运光波长偏离掺镱光纤的吸收峰 975 nm 较多, 抽运光没有被完全吸收, 导致激光转换效率比较低。

光输出。基于泄漏模或增益导引结构的新型大模场面积光纤将是今后发展的重要方向。

**致谢:** 感谢中国电子科技集团公司第四十六研究所宁鼎、潘蓉在双包层光纤拉制方面提供的帮助!

## 参 考 文 献

- 1 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, **12**(25): 6088~6092
- 2 G. Bonati, H. Voelckel, T. Gabler *et al.*. 1.53 kW from a single Yb-doped photonic crystal fiber laser[R]. *Photonics West, San Jose, Late Breaking Developments*, 2005, Session 5709~2a
- 3 Ren Guoguang. Current situation and development trend of high energy laser weapon [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, **45**(9): 62~69  
任国光. 高能激光武器的现状与发展趋势[J]. *激光与光电子学进展*, 2008, **45**(9): 62~69
- 4 He Bing, Lou Qihong, Zhou Jun *et al.*. Coherent output power of 60 W from two large-core double-cladding fiber lasers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(8): 1279~1280  
何兵, 楼祺洪, 周军等. 两根大芯双包层光纤激光器获得 60 W 相干输出[J]. *光学学报*, 2006, **26**(8): 1279~1280
- 5 J. P. Koplow, D. A. V. Kliner, L. Goldberg. Single-mode operation of a coiled multimode fiber amplifier[J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(7): 442~444
- 6 J. A. Alvarez-Chavez, A. B. Grudinin, J. Nilsson *et al.*. Mode selection in high power cladding pumped fibre lasers with tapered section[C]. *Conference on Lasers and Electro-Optics*, 1999, 247~248
- 7 Li Libo, Lou Qihong, Zhou Jun *et al.*. Mode selection of a tapered large-mode-area fiber laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(12): 1625~1628  
李立波, 楼祺洪, 周军等. 大模场面积光纤激光器拉锥法模式选择[J]. *中国激光*, 2007, **34**(12): 1625~1628
- 8 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,楼棋洪,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
- 9 Dietrich Marcuse. Curvature loss formula for optical fibers[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1976, **66**(3): 216~220
- 10 Lan Xinju. Laser Tecology[M]. Beijing: Science Press, 2005. 223~230
- 蓝信钜. 激光技术[M]. 北京:科学出版社,2005. 223~230