

文章编号: 0258-7025(2007)12-1625-04

大模场面积光纤激光器拉锥法模式选择

李立波^{1,2}, 楼祺洪¹, 周 军¹, 董景星¹, 魏运荣¹, 杜松涛¹, 李进延³

(¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800
² 中国科学院研究生院, 北京 100039; ³ 烽火通信科技股份有限公司, 湖北 武汉 430079)

摘要 大模场面积(LMA)光纤激光器的光束质量通常比单模光纤激光器的光束质量差。采用光纤拉锥的方法进行模式选择,从而提高大模场直径光纤激光器的光束质量。拉锥区距光纤激光器的输出端约5 mm,纤芯最小为9 μm ,约为未拉锥部分纤芯直径26 μm 的1/3。实验研究表明,在拉锥后,光纤激光器的光束质量因子 M^2 由3.50减小为1.81,相应的斜率效率由63.6%减小为51.1%。虽然拉锥后最大输出功率减少了约19.8%,但其亮度增大为拉锥前的3倍。

关键词 激光技术;光纤激光器;模式选择;拉锥;亮度;大模场面积

中图分类号 TN 248.1 **文献标识码** A

Mode Selection of a Tapered Large-Mode-Area Fiber Laser

LI Li-bo^{1,2}, LOU Qi-hong¹, ZHOU Jun¹, DONG Jing-xing¹,
WEI Yun-rong¹, DU Song-tao¹, LI Jin-yan³

(¹ Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China
² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China
³ FiberHome Telecommunication Tech Co., LTD, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract For large-mode-area (LMA) fiber laser, the beam quality is not as good as that of single mode fiber laser. A tapered section was introduced to a LMA fiber. The core diameter of the smallest part was 9 μm , which was located 5 mm away from the output end of the fiber and about three times smaller than the conventional fiber core with the diameter of 26 μm . The experimental results show that the beam quality factor M^2 is reduced from 3.50 to 1.81, with the slope efficiency from 63.6% to 51.1%. Although the tapering induces 19.8% power loss, the brightness of the tapered fiber laser is 3 times as much as that of the untapered.

Key words laser technique; fiber laser; mode selection; taper; brightness; large-mode-area

1 引 言

随着包层抽运技术的出现和高功率激光二极管(LD)的发展,近几年,光纤激光器得到了极大的发展。同时,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,如受激布里渊散射(SBS)、受激拉曼散射(SRS)等的影响^[1],使光纤激光器的输出功率迅速增大,单根光纤已能实现千瓦

级的激光输出^[2,3]。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。为获得高亮度的激光输出,通常将大模场面积光纤缠绕为一较小的线圈以实现高阶模式的滤除^[4~6]。但当需要实现更大的功率输出时,需要采用更大直径的纤芯和更大的内包层,这为小直径缠绕带来了困难。J. A. Alvarez-Chavez等^[7]对一大模场面积掺Yb光纤激光器的输

收稿日期:2007-06-18;收到修改稿日期:2007-07-03

基金项目:国家重大基础研究资助项目。

作者简介:李立波(1981—),男,湖北人,博士研究生,主要研究方向为高功率光纤激光器、光纤放大器及其模式控制技术。

E-mail:flone81@163.com

导师简介:楼祺洪(1942—),男,浙江人,研究员,博士生导师,目前研究方向为高功率光纤激光器、光纤放大器及固体激光器。E-mail:qhlou@mail.shcnc.ac.cn

出端进行了拉锥,以抑制纤芯内高阶模的振荡,从而提高其输出光束的亮度。在此基础上,H. Jeong等^[8,9]在一大模场掺Nd光纤激光器的抽运端和输出端拉制了两个锥形区,同样也实现了高光束质量的激光输出。然而,两者的输出功率都较小。为实现高功率高亮度的激光输出,本文对一大模场掺Yb光纤激光器进行了拉锥实验研究,并对拉锥前后光纤激光器的输出特性进行了研究,经比较,拉锥后其输出光束亮度为拉锥前的3倍。

2 实验测量及分析

实验采用武汉烽火通信科技股份有限公司研制的掺Yb双包层光纤(DCF),长13.6 m。光纤参数为:D形内包层400 μm /450 μm ,数值孔径(NA)0.37;掺Yb纤芯直径26 μm ,数值孔径0.16。

对于单端抽运光纤激光器,其纤芯温度由抽运端至输出端逐渐降低。为减小热效应对其输出功率的影响,拉锥区选在其输出端前约5 mm处。同时,拉锥区对于多模的抽运光有较强的损耗,将拉锥区选在输出端附近,也有利于实现光纤的有效抽运。实验装置如图1所示,抽运光波长为975 nm,抽运端双色镜对抽运光透射率超过95%(高透),而对1050~1150 nm的激光反射率大于99%(高反);输出端4%的非涅耳(Fresnel)反射作为输出耦合镜。

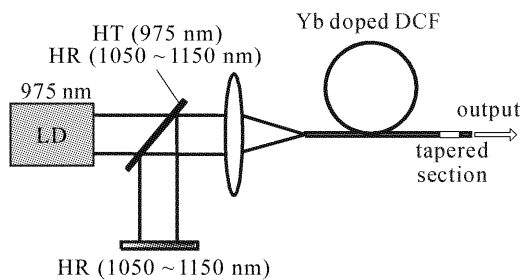


图1 实验装置图

Fig. 1 Experimental setup of fiber laser

采用Ericsson公司生产的FSU975型光纤熔接机进行光纤拉锥。先将光纤外包层去除,然后在熔接机上进行拉锥。选用不同的拉锥参数,可实现拉锥区纤芯尺寸的调节。当纤芯数值孔径保持不变时,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 μm ,拉锥区长度约为15 mm,拉锥区的纤芯如图2所示。

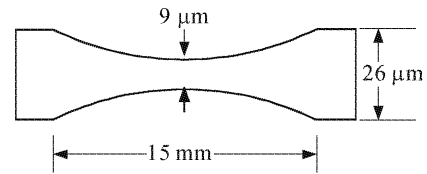


图2 拉锥区纤芯示意图

Fig. 2 Schematic of the tapered section of fiber core

2.1 光纤激光器的输出光束质量和功率

在激光输出端,采用刀口法^[10]测量了拉锥前后光纤激光器的光束质量,所得结果如图3所示。

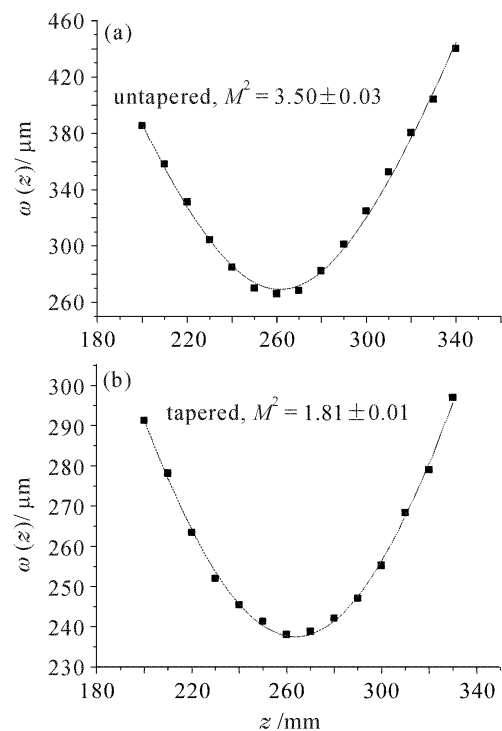


图3 拉锥前(a)和拉锥后(b)的激光光束质量

Fig. 3 Beam quality of untapered (a) and tapered (b) fiber laser

由图3可知,拉锥前输出激光光束质量因子 M^2 为3.50,拉锥后输出光束质量因子 M^2 为1.81。实验结果表明,拉锥有利于激光器输出光束质量的改善。实验同时也测量了光纤拉锥前后激光器的输出功率,结果如图4所示。拉锥前,光纤激光器的斜率效率为63.6%,抽运吸收功率为155.8 W时,最大输出功率为94.5 W。拉锥后,激光器斜率效率为51.1%,同样条件下的最大输出功率为75.8 W,与拉锥前相比,最大输出功率减少了约19.8%。

在拉锥前,由于纤芯直径较大, $\lambda = 1090 \text{ nm}$ 时归一化频率 $V \approx 11.98$,能支持较多高阶模式的振荡,因而光束质量较差。当其输出端存在一拉锥区

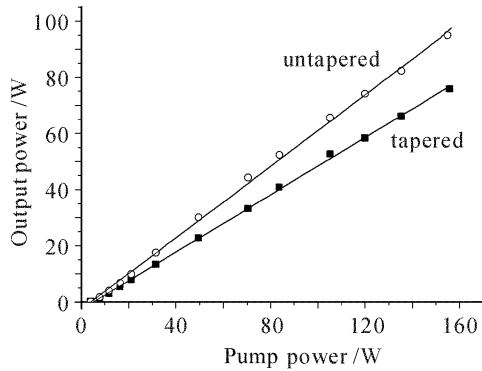


图 4 输出功率与抽运功率关系

Fig. 4 Output power versus pump power

后,最小处纤芯仅为 $9\ \mu\text{m}$,相同条件下 $V \approx 4.15$ 。由于锥形区的形成,使得原来满足全反射条件的高阶模式不再满足导波条件而通过包层逸出,而只有较低阶的激光模式仍能通过该区域形成有效振荡。高阶模式的减少,使得激光器输出光束质量因子 M^2 变小,光束质量也得到了提高。与此同时,高阶模式的减少带来了一部分能量的损失,导致激光器的最大输出功率和斜率效率同时降低。

2.2 光纤激光器的输出波长

在拉锥前后,分别测量了光纤激光器的输出光谱,如图 5 所示。拉锥前后光纤激光器激发中心波长分别为 $1085.5\ \text{nm}$ 和 $1082.8\ \text{nm}$ 。结果表明,光纤拉锥会使激光器波长向短波方向移动。

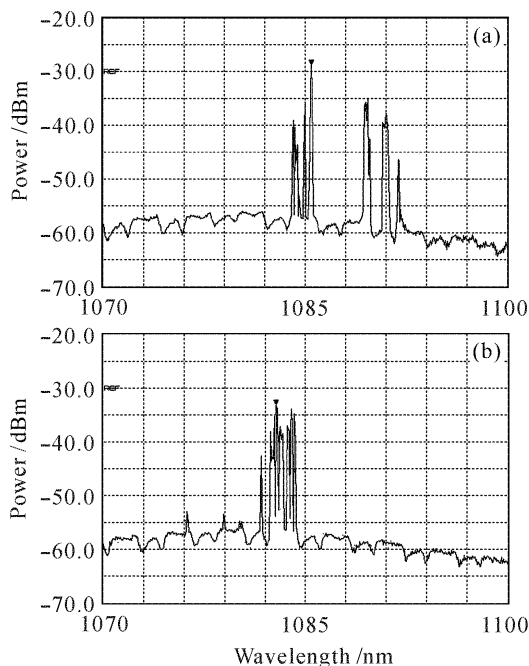


图 5 拉锥前(a)和拉锥后(b)的激光光谱

Fig. 5 Spectra of untapered (a) and tapered (b) fiber laser

光纤激光器的激光波长与光纤长度和激发阈值有关^[11]。拉锥前后,光纤长度的变化小于 $5\ \text{mm}$,可认为其长度基本没有发生变化。而在输出端拉制一锥形区后,纤芯内激发光的腔内损耗增大,从而使得激光器的激发阈值提高,这与实验过程中所观察到的现象相一致。对于确定的光纤长度,激发阈值的提高对应于较短的激光波长。因此,光纤拉锥使得激光器的激光波长向短波漂移。

2.3 光纤激光器亮度比较

激光束的亮度可表示为^[12]

$$B = \frac{P}{\Delta S \cdot \Delta \Omega}, \quad (1)$$

其中 P 为激光束的功率, ΔS 和 $\Delta \Omega$ 分别为激光的发光面积和发射立体角,它们分别可用激光束腰直径 d_0 和激光束远场发散角 θ 来表示

$$\Delta S = \frac{1}{4} \pi d_0^2, \quad (2)$$

$$\Delta \Omega = \frac{1}{4} \pi \theta^2, \quad (3)$$

将(2),(3)式代入(1)式,可得

$$B = \frac{P}{(\pi^2/16)d_0^2\theta^2} = \frac{P}{(M^2)^2\lambda^2}. \quad (4)$$

将拉锥前后所得到的激光功率 P ,激光波长 λ ,光束质量因子 M^2 代入(4)式,即可得

$$B_{\text{tapered}}/B_{\text{untapered}} \approx 3.0, \quad (5)$$

式中 B_{tapered} 和 $B_{\text{untapered}}$ 分别为拉锥后和拉锥前输出光束的亮度。结果表明,虽然拉锥带来了一定量的功率损失,但同时光束质量也变好,使得激光束的能量更为集中,亮度提高了3倍。

3 结 论

实验研究了大模场掺Yb光纤激光器拉锥前后的输出特性。在所采用的拉锥条件下,实现了光束质量因子 M^2 为1.81的75.8 W激光输出,拉锥后激光束亮度为拉锥前的3倍。同时,由于所采用光纤纤芯的数值孔径比较大,使得拉锥后光纤仍不能实现单模输出。下一步拟采用具有更小数值孔径的光纤,以实现单模输出。

参 考 文 献

- 1 Jens Limpert, Fabian Röser, Thomas Schreiber *et al.*. High-power ultrafast fiber laser systems [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2006, **12**(2):233~244
- 2 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

- 3 Zhou Jun, Lou Qihong, Zhu Jianqiang *et al.*. A continuous-wave 714 W 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
- 4 Jeffrey P. Koplow, Dahv A. V. Kliner, Lew Goldberg. Single-mode operation of a coiled multimode fiber amplifier [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(7):442~444
- 5 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
- 6 Libo Li, Qihong Lou, Jun Zhou *et al.*. High power low-order modes operation of a multimode fiber laser [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(4):221~222
- 7 J. A. Alvarez-Chavez, A. B. Grudinin, J. Nilsson *et al.*. Mode selection in high power cladding pumped fibre lasers with tapered section [C]. CLEO, 1999. 247~248
- 8 H. Jeong, S. Choi, K. Oh. Continuous wave single transverse mode laser oscillation in a Nd-doped large core double clad fiber cavity with concatenated adiabatic tapers [J]. *Opt. Commun.*, 2002, **213**(1-3):33~37
- 9 H. Jeong, K. Oh, H. S. Seo *et al.*. Enhancement of butt-coupling pump efficiency in a new Nd-doped large core double clad fiber laser cavity adiabatically tapered at both ends [C]. CLEO, 2001. 320~321
- 10 Thomas F. Johnston, Jr.. Beam propagation (M^2) measurement made as easy as it gets; the four-cuts method [J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(21):4840~4850
- 11 Guijun Hu, Chengyu Shan, Xiaoying Deng *et al.*. Threshold characteristics of linear cavity Yb³⁺-doped double-clad fiber laser [J]. *Opt. & Laser Technol.*, 2004, **37**(1):3~7
- 12 Wu Hanping. Evaluation and applied analysis of laser beam quality [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2000, **8**(2):128~132
吴晗平. 激光光束质量的评价与应用分析[J]. 光学精密工程, 2000, **8**(2):128~132