

文章编号: 1001-3806(2009)05-0512-03

## 光纤激光器凸端面选模理论和实验研究

李晨, 廖素英\*, 周洁, 闫平, 巩马理

(清华大学精密仪器与机械学系光子与电子研究中心 摩擦学国家重点实验室, 北京 100084)

**摘要:** 为了改善光纤激光器的输出光束特性, 将光纤端面加工处理成近似凸球面。从实验上研究了光纤端面为凸球面时对光纤激光器输出光束质量和输出功率的影响。在考虑横向空间烧孔效应的速率方程的基础上, 建立了光纤激光器端面选模的理论模型, 并对凸端面选模方法进行了数值模拟。结果表明, 采取凸端面作为光纤激光器的输出端可以提高输出激光的光束质量。

**关键词:** 激光器; 光纤激光器; 端面选模; 光束质量; 凸端面

**中图分类号:** TN248.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2009.05.019

### Experimental and theoretical study on mode selection of fiber lasers with convex output end

LI Chen, LIAO Su-ying, ZHOU Jie, YAN Ping, GONG Ma-li

(State Key Laboratory of Tribology, Center for Photonics and Electronics, Department of Precision Instruments and Mechatronics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** In order to improve the beam properties of fiber lasers, the fiber-end surface is processed similar to a convex spherical surface. The beam quality and the output power of the fiber lasers were studied experimentally. Based on the rate equation with transverse spatial hole burning taken into account, a theoretical model of mode selection with end face for the fiber lasers was set up and the effect was numerically simulated with the fiber convex output end. Numerical simulation and experimental results show that the output beam quality can be improved taking a convex face as the output end of a fiber laser.

**Key words:** lasers; fiber laser; mode selection with end face; beam quality; convex end

## 引言

光纤激光器与传统固体激光器相比, 具有转换效率高、光束质量好、热控管理方便、结构紧凑灵活等多方面的优势, 在光通信、光传感、激光医疗、工业加工、航空航天等领域得到了广泛的应用。近年来, 随着光纤设计和工艺的改进、抽运源功率的提高和新的抽运耦合技术的出现, 双包层光纤激光器的输出功率已经突破了 1kW 大关<sup>[1-2]</sup>。

然而, 单根光纤输出的光纤激光器的功率的进一步提高主要受制于光纤中的受激喇曼散射、受激布里渊散射和自相位调制等非线性效应。由于这些非线性效应的阈值功率与光纤有效模面积和有效长度的比值成正比, 因此, 采用大模场面积光纤是解决这个问题的最直接有效的途径。但是, 随着光纤芯径的增加, 光纤输出模式也随之增加, 输出光束质量就会恶化。虽然

减小光纤的数值孔径可以减少光纤的输出模式, 从而一定程度上改善输出光束质量, 但是由于当光纤数值孔径小于 0.05 时, 光纤对弯曲非常敏感, 这给光纤封装和实际应用带来很大的困难。为了改善传统光纤激光器中高功率和高光束质量的矛盾, 国内外研究人员采用各种选模方法来提高大模场面积光纤中基模提取效率。这些选模方法包括弯曲选模<sup>[3-4]</sup>、光锥选模<sup>[5]</sup>、增益控制选模<sup>[6-7]</sup>和腔镜选模<sup>[8-9]</sup>等等。这些选模方法的基本原理都是基于在腔内引入对高阶模更高的损耗或者对基模更高的增益从而尽可能提高基模输出的思想。

普通光纤激光器中的光纤端面为切割或者抛磨的高质量平面, 纤芯中的各个模式经过光纤端面反射后其反射率基本相同, 因此这种光纤端面对模式选择基本不起作用。对于光纤端面为非平面的情形(例如凸面或者凹面), 光纤模式在非平面的端面反射作用下, 各个模式的反射率将发生变化, 影响到模式在光纤中的产生和传输。本文中采用大芯径光纤熔接机对光纤端面进行处理, 获得了近似凸球面的光纤端面, 从实验上研究了光纤端面为凸球面时对光纤激光器输出光束

作者简介: 李晨(1979-), 男, 助理研究员, 主要从事光纤激光器方面的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: liaosuying@gmail.com

收稿日期: 2008-11-08; 收到修改稿日期: 2008-12-05

质量和输出功率的影响。此外,在考虑横向空间烧孔效应的速率方程的基础上,建立了光纤激光器端面选模的理论模型,并对这种凸端面选模方法进行了数值模拟。实验结果和数值模拟表明,采取凸端面作为光纤激光器的输出端可以提高输出激光的光束质量。

### 1 端面选模的理论模型

图1是光纤激光器端面选模示意图,其中虚线框

$$\frac{N_2(r, \varphi, z)}{N_1(r, \varphi, z)} = \frac{[\frac{dP_p^+(z)}{dz} + P_p^-(z)] \sigma_{a,p} \Gamma_p(r, \varphi)}{h\nu_p} + \sum_i^N \frac{[\frac{dP_{s,i}^+(z)}{dz} + P_{s,i}^-(z)] \sigma_{a,s} \Gamma_{s,i}(r, \varphi)}{h\nu_s} \quad (1)$$

$$\pm \frac{dP_p^\pm(z)}{dz} = \left\{ \int_0^{2\pi} \int_0^a [\sigma_{e,p} N_2(r, \varphi, z) - \sigma_{a,p} N_1(r, \varphi, z)] \times \Gamma_p(r, \varphi) r dr d\varphi \right\} P_p^\pm(z) - \alpha_p P_p^\pm(z) \quad (2)$$

$$\pm \frac{dP_{s,i}^\pm(z)}{dz} = \left\{ \int_0^{2\pi} \int_0^a [\sigma_{e,s} N_2(r, \varphi, z) - \sigma_{a,s} N_1(r, \varphi, z)] \times \Gamma_{s,i}(r, \varphi) r dr d\varphi \right\} P_{s,i}^\pm(z) - \alpha_{s,i} P_{s,i}^\pm(z) - \sum_{j=1}^N d_{ij} [P_{s,i}^\pm(z) - P_{s,j}^\pm(z)] \quad (3)$$

式中,  $h$  是普朗克常数,  $\tau$  是粒子在激光上能级的寿命,  $\nu_p$  和  $\nu_s$  分别是抽运光和激光的频率,  $a$  是光纤纤芯的半径;  $N_2(r, \varphi, z)$  和  $N_1(r, \varphi, z)$  分别在位置  $(r, \varphi, z)$  上激光上能级和下能级的粒子数,  $N_1(r, \varphi, z)$  和  $N_2(r, \varphi, z)$  满足  $N(r, \varphi, z) = N_1(r, \varphi, z) + N_2(r, \varphi, z)$ ,  $N(r, \varphi, z)$  是掺杂粒子的空间分布;  $P_p^+(z)$  和  $P_p^-(z)$  分别是抽运光沿光纤正向和负向的功率分布;  $P_{s,i}^+(z)$  和  $P_{s,i}^-(z)$  分别是第  $i$  个激光模式沿光纤正向和负向的功率分布;  $\sigma_{a,p}$  ( $\sigma_{e,p}$ ) 和  $\sigma_{a,s}$  ( $\sigma_{e,s}$ ) 分别是抽运光和激光的受激吸收(发射)截面;  $\alpha_p$  和  $\alpha_{s,i}$  分别是抽运光和第  $i$  个激光模式的损耗系数;  $d_{ij}$  是第  $i$  个激光模式和第  $j$  个激光模式功率之间的耦合因子;  $\Gamma_p(r, \varphi)$  和  $\Gamma_{s,i}(r, \varphi)$  分别是抽运光和第  $i$  个激光模式的重叠因子分布函数,其定义如下:

$$\begin{cases} \Gamma_p(r, \varphi) = \frac{1}{A_{clad}} \\ \int_0^{2\pi} \int_0^a \Gamma_p(r, \varphi) r dr d\varphi = \Gamma_p = \frac{A_{core}}{A_{clad}} \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \Gamma_{s,i}(r, \varphi) = \frac{\psi_i(r, \varphi)}{\int_0^{2\pi} \int_0^a r \psi_i(r, \varphi) r dr d\varphi} \\ \int_0^{2\pi} \int_0^a \Gamma_{s,i}(r, \varphi) r dr d\varphi = \Gamma_{s,i} = \frac{P_{i,core}}{P_{i,core} + P_{i,clad}} \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $\psi_i(r, \varphi)$  是光纤中第  $i$  个模式的归一化强度分布函数,  $A_{core}$  和  $A_{clad}$  分别是光纤纤芯面积和内包层面积。

为了求解耦合常微分方程组(1)式~(3)式,必须引入边界条件,假设图1中插入的端面选模装置是紧

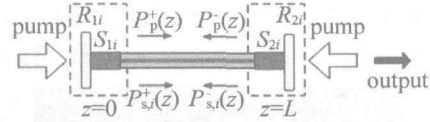


Fig. 1 Schematic diagram of mode selection for fiber lasers with end face. 内是端面选模装置,包括腔镜和额外插入的选模装置(比如光锥)。假设光纤中有  $N$  个激光模式,在柱坐标系下,考虑横向空间烧孔效应,稳态时的腔内多横模振荡的速率方程可以描述如下<sup>[10]</sup>:

贴着光纤端面的,边界条件可以写为:

$$P_{s,i}^+(0) = R_{1i} \cdot (1 - S_{1i})^2 \cdot P_{s,i}^-(0) \quad (6)$$

$$P_{s,i}^-(L) = R_{2i} \cdot (1 - S_{2i})^2 \cdot P_{s,i}^+(L) \quad (7)$$

式中,  $L$  是光纤长度,  $R_{1i}$  和  $R_{2i}$  分别是光纤激光器左腔镜和右腔镜对第  $i$  个激光模式的反射率。  $S_{1i}$  和  $S_{2i}$  分别是位于左腔镜和右腔镜处选模装置对第  $i$  个激光模式的单程插入损耗。利用边界条件(6)式和(7)式,微分方程组(1)式~(3)式转化成了两点边值问题,可以利用打靶法进行求解。第  $i$  个激光模式的输出功率可以表示为:

$$P_{s,i}^+(L) = (1 - R_{2i}) \cdot (1 - S_{2i}) \cdot P_{s,i}^-(L) \quad (8)$$

如果忽略模式之间的相位因子,腔内电场分量可以表示为:

$$E(r, \varphi) = \sum_i \sqrt{\rho_i} E_i(r, \varphi) \quad (9)$$

式中,  $\rho_i$  是第  $i$  个激光模式的输出功率占输出总功率的比例因子,  $E_i(r, \varphi)$  是第  $i$  个激光模式的归一化电场分布函数,利用参考文献[11]中的方法可以计算输出光束的光束质量。

### 2 端面选模实验

为了研究在凸端面情况下光纤激光器的输出功率和输出光束质量的变化,在如图2所示的光纤激光器

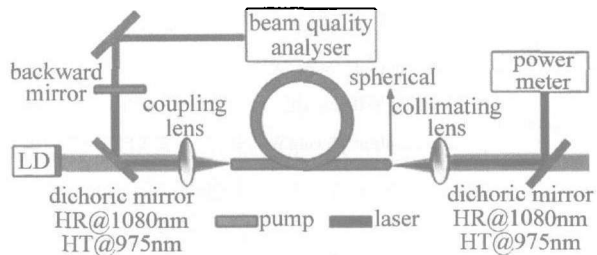


Fig. 2 Experimental setup of mode selection with fiber end

的输出端和后腔镜端分别采用功率计和光束质量分析仪监控输出光束的功率和光束质量。在光纤的输出端,采用大芯径光纤熔接机对光纤的输出端面进行处理,可以获得近似凸球面并且表面光滑的光纤端面。实验中根据光纤的芯径、材料,通过控制不同的熔融参量(比如放电电流、放电时间等),可以得到不同曲率

半径的凸球面。图3是几种不同熔融参量下获得的凸球面的显微照片。实验中采用的光纤由武汉烽火科技

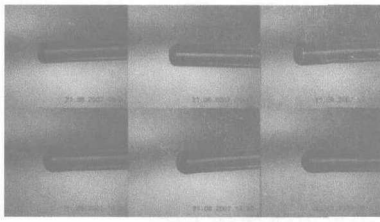


Fig. 3 Micro-photos of convex spherical for different curvature radius

有限公司提供,光纤具体参量如表1所示。

Table 1 Fiber parameters used in experiment

parameter	value	parameter	value
core diameter	20 $\mu\text{m}$	core NA	0.1
inner-cladding diameter	400 $\mu\text{m}$	inner-cladding NA	0.46
inner-cladding shape	D shape	fiber length	10m
absorption	1.5dB/m@975nm	guiding mode number	6

实验中选取近似半球面(凸球面曲率半径约为200 $\mu\text{m}$ )的光纤端面进行输出的光束质量测试,并和普通垂直端面的光纤进行对比。输出光斑和光束质量如图4所示。可以看到,将光纤端面加工为凸球面后,输出光斑分布明显变好,用光束质量分析仪测量得到的 $M^2$ 值从 $M_x^2 = 3.88, M_y^2 = 3.67$ 提高到 $M_x^2 = 2.10, M_y^2 = 2.51$ 。图5是在输出端面分别为凸球面和普通垂直端面的情况下,输出激光的功率随抽运电流的变化关系。从图5可以看出,在输出端面为凸球面的情况下,输出功率有所损失。在抽运电流为10A时,输出功率由18W减小为12W。

利用第1节中的光纤端面选模模型和表1中的参量,对上述实验进行了数值模拟,表2中给出了数值模拟结果。从表2可以看出,采用凸球面后,尽管模式的反射率较垂直平面时有所下降,但基模的输出功率比

Table 2 Numerical simulation results of mode selection for fiber lasers with convex output end (pump power is 25W)

output end		LP <sub>01</sub>	LP <sub>11</sub>	LP <sub>21</sub>	LP <sub>02</sub>	LP <sub>31</sub>	LP <sub>12</sub>	$M^2$
plane	reflectivity	0.034	0.034	0.034	0.034	0.034	0.034	2.98
	output power/W	2.92	7.16	7.39	2.82	0	0	
spherical	reflectivity	0.0226	0.0222	0.0217	0.0214	0.0203	0.0195	2.37
	output power/W	6.91	0.10	11.01	0.61	0	0	

### 3 结论

采用大芯径光纤熔接机对光纤端面进行处理,获得了近似凸球面的光纤端面;选取近似半球面的光纤端面进行了光束输出特性的测试实验,并和普通垂直端面的结果进行对比,从实验上研究了光纤端面为凸球面时对光纤激光器输出光束质量和输出功率的影响。此外,在考虑横向空间烧孔效应的速率方程的基础上,建立了光纤激光器端面选模的理论模型,并对这

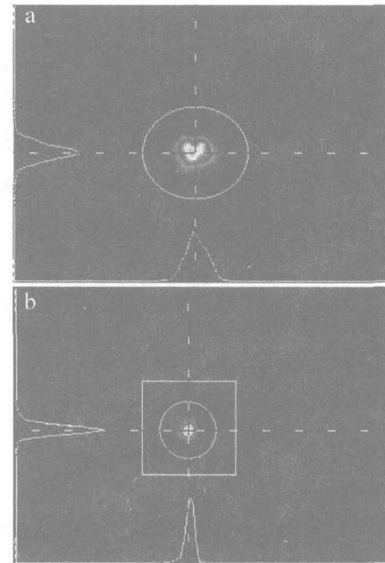


Fig. 4 Output laser spot

a—vertical end, b—convex spherical end

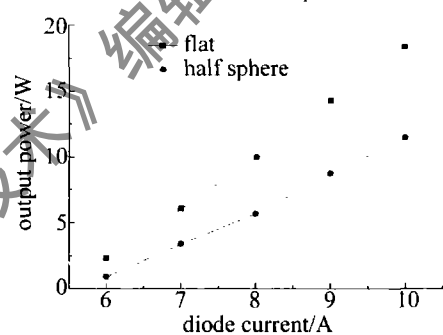


Fig. 5 Output power changes with the pump current

种凸端面选模方法进行了数值模拟。实验结果和数值模拟均表明,采取凸端面作为光纤激光器的输出端可以提高输出激光的光束质量。

### 参考文献

- [1] JEONG Y, SAHU J K, PAYNE D N, et al. Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1.36kW continuous-wave output power [J]. Optics Express, 2004, 12(25):6088-6092.

(下转第517页)

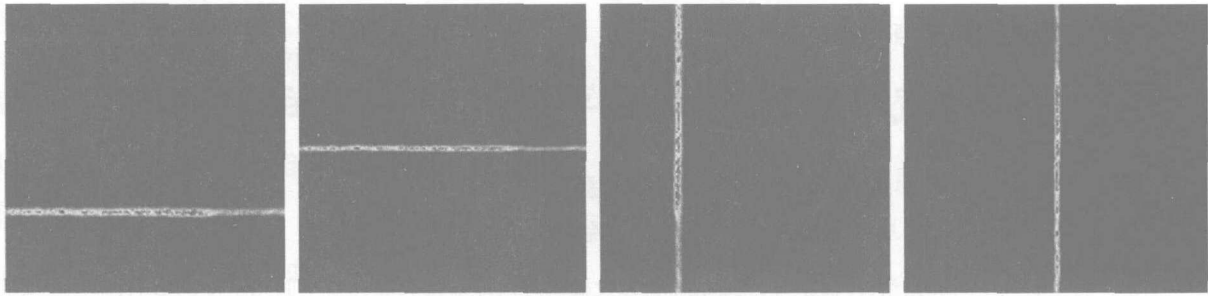


Fig. 4 The extended beam captured by CCD

在对瞄时先进行横向对准,然后将波导器件旋转 $90^\circ$ ,进行纵向对准。

图5所示为未经平板波导拍摄到的激光光斑以及在远距离观测时扩束线的成像情况。

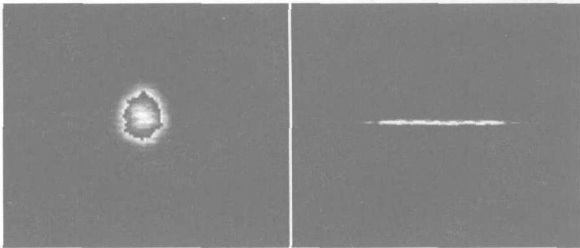


Fig. 5 The laser spot and the extended beam at a long distance

由图4及图5可发现,扩束后的激光较原激光光斑在对瞄观测时具有明显的优势。

### 3 结论

从理论上分析了用有限远目标模拟无穷远的星体,并用光波导系统对瞄及高精度测角来完成舰载武器系统零位一致性检测任务的可行性,并通过实验对该系统进行了模拟。结果表明,该系统在近距离对瞄观测时具备了较好的实验效果;当距离增大到一定程度,观测系统中激光扩束线的长度有所减小。通过平板波导对激光1维扩束,有效地解决了激光光斑成像

尺寸较小、不易对瞄观测的问题,对于开发新型舰载武器对瞄技术的研究具有积极的意义。该系统在远距离观测时的成像效果有待进一步提高。

### 参考文献

- [1] SUN Sh Ch, GAO J D, LI M Y. The associative regulation of shipborne gun weapon system [M]. Wuhan: Naval University of Engineering Press, 2003: 20-27 (in Chinese).
- [2] KONG X J, WANG J A, LIU Q Zh, et al. Research on the zero collimation of the warship weapon systems [J]. Journal of Naval University of Engineering, 2001, 13(6): 59-62 (in Chinese).
- [3] FAN Zh G. Electric-optic measuring and testing technique [M]. Beijing: Electronics Industry Press, 2004: 11-20 (in Chinese).
- [4] LIANG Y P, DAI T L. An improvement of collimating performance using column collimator of semiconductor laser [J]. Chinese Journal of Laser, 2004, 31(11): 1305-1311 (in Chinese).
- [5] HE X J, YANG H J, QIU Q. The collimating design of array semiconductor laser beam [J]. Laser Technology, 2004, 28(6): 658-660 (in Chinese).
- [6] LI Y Q, CUI M. Waveguide theory and technique [M]. Beijing: Posts & Telecommunications Press, 2002: 77-88 (in Chinese).
- [7] YU D Y, TAN H Y. Engineering optics [M]. Beijing: China Machine Press, 2006: 477-481 (in Chinese).
- [8] LI J Zh, SU Sh X, ZHAO J M, et al. Optical manual [M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 1985: 254-256 (in Chinese).
- [9] KONG X J, HUANG D X, LIU D M, et al. Research on gradient-index strip waveguide coupler [J]. Infrared and Laser Engineering, 2004, 33(2): 204-208 (in Chinese).
- [10] GONG M L, YUAN Y Y, LI C, et al. Numerical modeling of transverse mode competition in strongly pumped multimode fiber lasers and amplifiers [J]. Optics Express, 2007, 15(6): 3236-3246.
- [11] HIDEHIKO Y, PANEL P, MASUD M. Beam quality factor of higher order modes in a step-index fiber [J]. Journal of Lightwave Technology, 2006, 24(3): 1350-1355.
- [12] BONATI G, VOELCKEL H, GABLER T, et al. 1.53kW from a single Yb-doped photonic crystal fiber laser [C]//Late Breaking Developments. San Jose: Photonics West, 2005: 5709-2a.
- [13] FERMAN M E. Single-mode excitation of multimode fibers with ultra-short pulses [J]. Opt Lett, 1998, 23(1): 52-54.
- [14] KOPLOW J P, KLINER D A V, GOLDBERG L. Single-mode operation of a coiled multimode fiber amplifier [J]. Opt Lett, 2000, 25(7): 442-444.
- [15] ALVAREZ-CHAVEZ J A, GRUDININ A B, NILSSON J, et al. Mode selection in high power cladding pumped fiber lasers with tapered section [C]//Conference on Lasers and Electro-Optics CLEO'99. Washington, DC: The Optical Society of America, 1999: 247-248.
- [16] LIMPERT J, ZELLMER H, TUNNERMANN A, et al. Suppression of high order modes in a multimode fiber amplifier using efficient gain-loss-management (GLM) [C]//Advanced Solid-State Lasers. Paper MB20. Washington, DC: The Optical Society of America, 2002: 112-114.
- [17] HOTOLEANU M, SODERLUND M, KLINER D, et al. High order modes suppression in large mode area active fibers by controlling the radial distribution of the rare earth dopant [J]. Proc SPIE, 2006, 6102: 61021T1-61021T8.
- [18] GRIEBNER U, KOCH R, SCHÖNNAGEL H, et al. Efficient laser operation with nearly diffraction-limited output from a diode-pumped heavily Nd-doped multimode fiber [J]. Opt Lett, 1996, 21(4): 266-268.
- [19] GRIEBNER U, SCHÖNNAGEL H. Laser operation with nearly diffraction-limited output from a Yb: YAG multimode channel waveguide [J]. Opt Lett, 1999, 24(11): 750-752.

(上接第514页)