

# 腔镜对掺铥光纤激光器输出性能的影响

刘正涛 郑义

北京交通大学理学院 激光研究所, 北京 100044

**摘要** 由于 $2\ \mu\text{m}$ 激光处于人眼安全区和大气弱吸收带,因此掺铥光纤激光器受到了广泛关注。比较了掺铥双包层光纤在激光二极管(LD)抽运时后端分别采用平面镜和凹面镜下激光器输出功率特性。实验和理论表明,由于光纤端面和平面反射镜之间存在着间隙、倾斜以及光纤端面存在缺陷等因素,使得激光腔的损耗增大,激光器输出性能受到严重影响。根据波动理论分析了光纤后端面分别采用平面反射镜和凹面反射镜下谐振腔插入损耗特性,理论表明采用凹面反射镜时谐振腔损耗要比采用平面反射镜时小。光纤后端的腔镜采用凹面镜时,获得最大输出功率为22 W,对应的中心波长为1998.6 nm,相对于入射抽运光功率的斜率效率为43%的激光输出。相比采用平-平腔的激光器其斜率效率提高了10%,镜面承受的热损伤得到大幅缓解。

**关键词** 激光器;凹面镜;光纤端面;激光损伤

中图分类号 TN248 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP51.031404

## Cavity Mirrors Influence on Thulium-Doped Fiber Lasers Output Performance

Liu Zhengtao Zheng Yi

*Institute of Laser, School of Science, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China*

**Abstract** As  $2\ \mu\text{m}$  laser is in eye-safe areas and weak atmospheric absorption band, thulium-doped fiber laser attracts a lot of attentions. The lasers output power characteristics of thulium-doped double-clad fiber under laser diode (LD) backward pumping using a plane mirror and concave mirror are compared. Experiments and theories suggest that the laser cavity losses increase because the gap, tilt, and fiber end face defects between the fiber end face and the plane mirror and mirror thermal damage and other factors, and the laser output performance is severely affected. The cavity insertion loss properties are analyzed after using a plane mirror and concave mirror respectively at the end of the fiber based on the wave theory, which suggests that using a concave mirror cavity the loss is smaller than that using a plane mirror. When using the concave mirror cavity structure after fiber end, the maximum output power of 22 W is obtained, corresponding to the center wavelength of 1998.6 nm and the slope efficiency of 43% relative to the incident pump power. Comparing to the use of plane mirror cavity the laser slope efficiency increases of 10%, and the thermal damage of mirror is alleviated obviously.

**Key words** lasers; concave mirror; fiber end; laser damage

**OCIS codes** 140.3510; 140.3460; 060.3510

## 1 引言

光纤激光器特别是双包层光纤激光器具有转化效率高、光束质量好、散热效率高等优点而受到广泛关注。掺铥光纤激光器因其输出波长位于水分子吸收峰,对人眼安全,在激光雷达、遥感等方面有广泛的应用。 $2\ \mu\text{m}$ 激光对生物组织具有穿透烧蚀功能,因此该波长的激光可以作为性能良好的微创激光手术刀进行精确穿孔、切割和凝血,用来治疗如虹膜、视网膜<sup>[1]</sup>、尿路结石<sup>[2]</sup>等。该波长的光源还可作为光学参量振荡

收稿日期: 2013-11-08;收到修改稿日期: 2013-11-30;网络出版日期: 2014-03-01

基金项目: 北京市自然科学基金(4092032)

作者简介: 刘正涛(1989—),男,硕士研究生,主要从事光纤激光器方面的研究。E-mail: 15120075176@163.com

导师简介: 郑义(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事激光技术、太赫兹波技术方面的研究。

E-mail: zhengyi00000@126.com

器(OPO)的抽运源以实现波长3~5  $\mu\text{m}$  激光输出<sup>[3]</sup>。

目前,国内外对掺铥双包层光纤激光器进行了大量的理论与实验研究<sup>[4-7]</sup>取得了很多成果。2007年,上海光学精密机械研究所报道了用波长为790 nm的激光抽运长度为7 cm掺铥光纤获得了最大功率为1.09 W,斜率效率为9.6%的激光输出<sup>[8]</sup>。2008年,哈尔滨工业大学机电工程学院报道了利用800 nm的飞秒激光器采用相位掩模法直接在掺铥多模双包层光纤的纤芯刻蚀光栅,在抽运功率为29.8 W时,获得斜率效率为45%,光-光转换效率为38.6%,功率为11.5 W的激光输出<sup>[9]</sup>。2009年, Moulton等<sup>[10]</sup>采用Nufern公司生产的长度为7 m,内包层直径为25  $\mu\text{m}$ 的掺铥硅基质光纤,在最大抽运功率为500 W时得到了功率为300 W的激光输出,斜率效率64.5%,中心波长为2040 nm的激光。2012年,国防科学技术大学报道了采用全光纤的MOPA方案获得了斜率效率为43%,中心波长为1950 nm,功率为30 W的激光输出<sup>[11]</sup>。以光纤光栅为腔镜的全光纤激光器具有结构紧凑、激光输出线宽窄,抽运效率高等优点,由于目前调Q、锁模光纤激光器中需要插入主动或被动的调制器件,系统结构仍然很难实现全光纤化,同时光纤光栅在高功率激光输出时容易失效,因此非全光纤的结构仍然有研究的必要。传统的光纤激光器结构是将增益光纤放置在二色镜之间构成谐振腔,由于光纤端面输出的光为发散光,因此腔镜需要紧靠光纤端面,这种结构的腔调整困难,损耗也较大,对光纤端面的抛光质量要求较高,而且由于光纤两端温度较高,腔镜的介质膜容易被烧坏。本文根据波动理论参照光纤连接原理分析了光纤后端面分别采用平面反射镜和凹面反射镜时谐振腔插入损耗特性,在光纤后端的腔镜采用凹面镜时,获得了斜率效率为43%,最大输出功率为22 W的激光,相比采用平面镜构成的激光器由于损耗的降低斜率效率提高了10%,镜面承受的热损伤也得到大幅缓解。

## 2 实验装置

实验原理如图1(a)所示。双包层光纤具有大的表面积与体积比,比传统固体激光器散热性能好,但由于掺铥石英光纤属于准三能级系统,因此低的工作温度有助于降低激光器的阈值和提高转化效率。采用北京长流科学仪器公司的冷却水循环机对其冷却,并维持铝盘温度在15  $^{\circ}\text{C}$ 。实验采用长度为3 m Nufern公司生产的双包层光纤,纤芯的直径为25  $\mu\text{m}$ ,数值孔径为0.09,外包层直径为250  $\mu\text{m}$ ,数值孔径为0.46。抽运源输出波长为793 nm(Nlight公司生产)。抽运光通过光斑比1:0.8的透镜组聚焦到光纤端面。由原理图可以看出,光纤前端面既是抽运光入射端也充当谐振腔的输出镜,因此光纤端面质量对输出光功率和光束质量有重要影响<sup>[12]</sup>。未处理的光纤端面通常存在着很多缺陷,如边沿破碎、凹坑、划痕、炸裂等。因此需要对其采取研磨和抛光处理措施。所用研磨机为ULTRA TEC公司生产的光纤专用研磨机,抛光后的光纤端面如图1(b)所示。对光纤后端面进行大约7 $^{\circ}$ 的抛光处理,以消除光纤端面与空气交界处由菲涅耳反射引起的不利影响。

如图2所示,为避免采用平面镜做光纤激光器后端腔镜时所带来的不利影响,采用口径为30 mm,曲率半径为30 mm的凹面镜来替代。

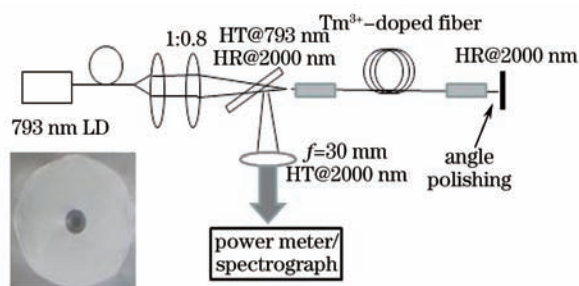


图1 (a)后向抽运结构的实验原理图;(b)经抛光处理的光纤端面

Fig.1 (a) Experimental schematics of backward pumping structure; (b) polished fiber end

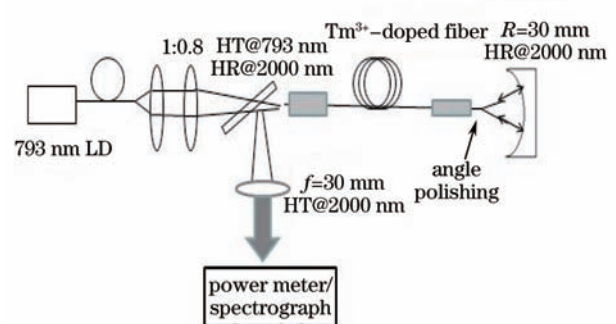


图2 采用平-凹腔光纤激光器的原理图

Fig.2 Fiber lasers schematics with plano-concave cavity

### 3 理论和数值分析

光纤后端面分别采用平面镜和凹面镜时产生的插入损耗分析如下。当光纤后端放入平面反射镜来充当激光器的谐振腔镜时,参照光纤连接器插入损耗的理论可知,振荡光经光纤端面输出,然后经平面镜反射再次进入光纤端面,这一过程的传输损耗主要受到角度倾斜、端面间隙、端面粗糙度等因素影响。由于光纤端面温度较高,为了避免平面镜的介质膜被烧坏,通常光纤端面与平面镜之间留有一定的间隙。而由于光纤端面输出的振荡光和未被吸收的抽运光为发散光,因此当光纤端面与平面镜有间隙时,将导致部分输出光不能反射回光纤,最终泄露出去,由此造成输出激光的损耗。

由于光纤激光器所得光束质量较好,因此可以采用单模光纤连接的损耗来分析光纤后端面采用平面镜时谐振腔产生的损耗。如图3(a)所示,光纤端面离反射镜距离为 $d$ 时经平面镜反射后,相当于该光纤与另一根参数相同的光纤在距离为 $2d$ 处进行连接。

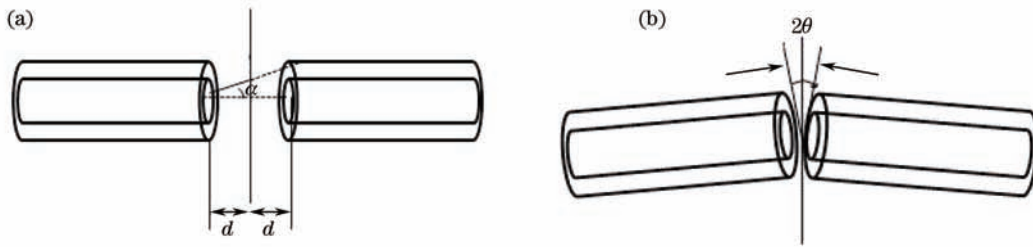


图3 光纤连接存在(a)径向对准误差; (b) 角度对准误差

Fig.3 (a) Fiber connection exists radial alignment errors; (b) angle alignment errors

如图3(b)所示,当光纤后端面的平面镜与光纤端面存在大小为 $\theta$ 的倾斜角时,光束从光纤输出经反射后再次进入光纤时相当于两根参数相同的光纤连接时存在角度为 $2\theta$ 对准误差。

光纤的连接损耗可以用波动理论来分析计算<sup>[13]</sup>,如图4所示,当两根单模光纤的参数相同时,由于平面镜与光纤端面存在间隙,由径向对准误差所产生的插入损耗可表示为

$$L_s = -10 \lg \left[ \frac{1}{1 + \left( \frac{s}{k_g w_0^2} \right)^2} \right]$$

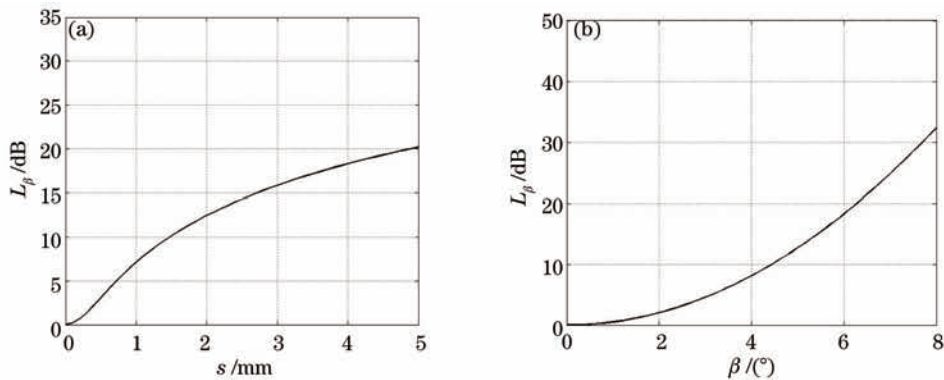


图4 (a)平面镜与光纤端面存在间隙产生的损耗; (b)平面镜与光纤端面不平行产生的损耗

Fig.4 (a) Losses of between fiber end and plane mirror existing gap; (b) generated losses when plane mirror is not parallel the fiber end

由于平面镜与光纤端面不平行,角度对准误差产生的插入损耗为

$$L_\beta = -10 \lg \left[ \exp \left( - \frac{k_g w_0 \sin \beta}{2} \right)^2 \right]$$

式中  $s = 2d$ ,  $2\theta = \beta$ ,  $k_g = \frac{2\pi n_g}{\lambda_0}$  是光纤端面间隙中的波数,  $n_g$  是间隙介质的折射率,  $w_0$  是高斯光束束腰半峰

全宽。此处将高斯光束束腰半峰全宽近似等于光纤纤芯半径得到  $w_0 = 12.5 \mu\text{m}$ ,  $n_0 = 1$ ,  $\lambda_0 = 2 \mu\text{m}$ , 由 Matlab 可以得出光纤后端采用平面镜带来的插入损耗为

如果将平面镜更换为凹面镜, 当光纤端面位于凹面镜焦点时, 由凹面镜反射聚焦特性可知从光纤端面输出的光经凹面镜反射后绝大部分的光将能沿原路返回, 从而在很大程度上避免光从端面泄露到外界, 降低了谐振腔的损耗。由于光纤端面温度较高, 因此采用凹面镜时, 光纤端面与凹面镜之间的距离相比与平面镜的距离增加了, 照射在介质膜上的功率密度也将大幅降低, 因此可以有效地避免腔镜的介质膜被烧坏。

## 4 实验结果与讨论

实验结果如图 5 所示, 由图可以看出激光功率随着抽运功率的升高而线性增长, 光纤后端采用凹面镜时激光器相对于入射抽运光功率的斜率效率为 43%, 而采用平面镜的激光器斜率效率为 33%。实验结果符合理论分析, 采用凹面镜时由于激光器的损耗小, 光-光转换效率明显高于采用平面镜时的激光器。

图 6 所示为采用平-凹腔时掺铥光纤激光器在输出功率分别为 18、20、22 W 时的光谱图, 采用 Andor 公司型号为 SR500-B1 的光谱仪采集。从图中可以看出, 不同输出功率下的光谱形状以及光谱线宽基本保持不变, 输出激光中心波长随输出功率的升高而逐渐红移。在最大功率处, 输出激光中心波长为 1998.6 nm。由图还可以看出由于掺铥光纤激光器的增益谱线较宽, 因此单独采用镀有介质膜的镜片作为激光器的谐振腔镜来选频时, 难以实现窄线宽的激光输出, 如果有必要可以插入标准具、双折射滤光片等来进一步压窄线宽。

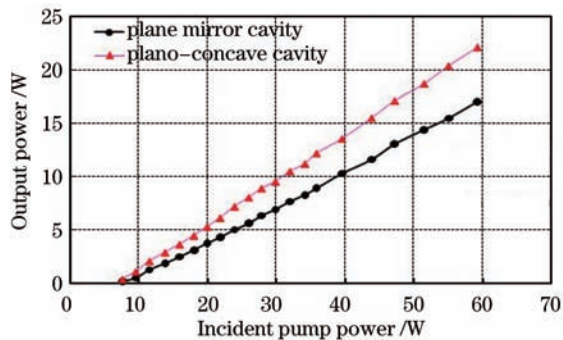


图 5 激光器输出功率随抽运光功率的变化

Fig.5 Change of lasers output power with the pump power

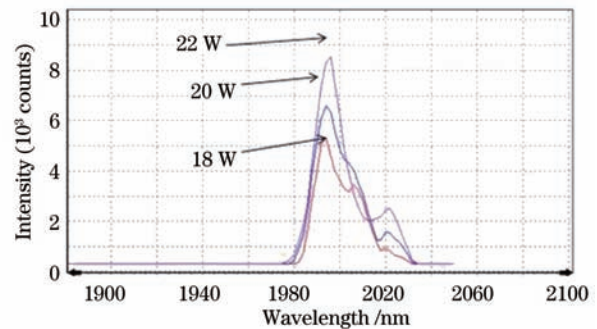


图 6 掺铥光纤激光器输出光谱图

Fig.6 Thulium-doped fiber lasers output spectrum

## 5 结 论

根据波动理论参照光纤连接器原理分析了光纤后端面采用平面反射镜和凹面反射镜下谐振腔插入损耗特性, 结果表明采用凹面反射镜时谐振腔损耗要比采用平面反射镜时小。光纤后端采用凹面镜时, 获得了最大输出功率为 22 W 的激光, 相对入射抽运光功率的斜率效率为 43%, 相比采用平-平腔的激光器其斜率效率提高了 10%, 镜面介质膜承受的热损伤得到大幅缓解。由于采用了端面抽运方式, 因此激光器斜率效率受限于耦合系统的耦合效率, 实验中观察到仍有一部分抽运光没有耦合进掺铥光纤中, 通过进一步降低耦合系统的像差, 以及提高光纤的数值孔径和包层直径, 优化增益光纤的长度等方式, 端面抽运结构的光纤激光器斜率效率将有进一步提高。

## 参 考 文 献

- 1 Jelínková H, Pasta J, Koranda P, *et al.*. Diode pumped Tm: YAP laser for eye microsurgery[C]. Proceedings of SPIE, 2008, 6871: 68712N-8
- 2 Scott N J, Cilip C M, Fried N M. Thulium fiber laser ablation of urinary stones through small-core optical fibers[J]. IEEE J Sel Top, 2009, 15(2): 435-440.
- 3 Creeden D, Ketteridge P A, Budni P A, *et al.*. Mid-infrared ZnGeP<sub>2</sub> parametric oscillator directly pumped by a pulsed 2  $\mu\text{m}$  Tm-doped fiber laser [J]. Opt Lett, 2008, 33(4): 315-317.



- 4 Xu Lin, Tang Yulong, Zhang Shuaiyi, *et al.*. High power pulsed 2  $\mu\text{m}$  fiber main-oscillator power-amplifier system [J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(9): 2384-2388.  
徐 林, 唐玉龙, 张帅一, 等. 高功率脉冲 2  $\mu\text{m}$  光纤主振荡功率放大器系统[J]. 中国激光, 2010, 37(9): 2384-2388.
- 5 Liu Jiang, Wang Pu. High-power passively mode-locked thulium-doped femtosecond fiber laser at 2.0  $\mu\text{m}$  [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(9): 0902001.  
刘 江, 王 璞. 高功率被动锁模 2.0  $\mu\text{m}$  掺铥飞秒脉冲光纤激光器[J]. 中国激光, 2012, 39(9): 0902001.
- 6 Liu Jiang, Xu Jia, Wang Qian, *et al.*. High pulse energy passively mode-locked 2.0  $\mu\text{m}$  thulium-doped ultrafast all-fiber laser [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(6): 0602009.  
刘 江, 徐 佳, 王 潜, 等. 高能量全光纤结构被动锁模 2.0  $\mu\text{m}$  掺铥超短脉冲光纤激光器[J]. 中国激光, 2012, 39(6): 0602009.
- 7 Slobodtchikov, Evgueni, Peter F Moulton, *et al.*. Efficient, high-power, Tm-doped silica fiber laser [C]. Advanced Solid-State Photonics, Opt Soc Am, 2007.
- 8 Yulong Tang, Yong Yang, xianjin Cheng, *et al.*. Short Tm<sup>3+</sup>-doped fiber lasers with watt-level output near 2 microns [J]. Chin Opt Lett, 2008, 6(1): 44-46.
- 9 Song C W, Zhang Y J, Yao B Q, *et al.*. Double-clad Tm<sup>3+</sup>-doped silica fiber laser with Bragg grating inscribed directly into active core by femtosecond laser [J]. Laser Phys, 2009, 19(5): 1009-1012.
- 10 Moulton P F, Rines G A, Slobodtchikov E V, *et al.*. Tm-doped fiber lasers: fundamentals and power scaling [J]. IEEE J Sel Top Quantum Electron, 2009, 15(1): 85-92.
- 11 Haibin Lü, Pu Zhou, Hu Xiao, *et al.*. All-fiberized Tm-doped fiber MOPA with 30 W output power [J]. Chin Opt Lett, 2012, 10(5): 051403.
- 12 Zhu Chen, Li Yao, Wang xiongfei, *et al.*. Fiber end treatment on the performance of fiber laser output [J]. Laser & Infrared, 2008, 38(5): 448-450.  
朱 辰, 李 尧, 王雄飞, 等. 光纤端面处理对光纤激光器输出性能的影响[J]. 激光与红外, 2008, 38(5): 448-450.
- 13 Ou Pan. Advanced Optics Simulation [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2011. 194-196.  
欧 攀. 高等光学仿真(MATLA版) [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2011. 194-196.