

文章编号: 0258-7025(2007)06-0755-04

# 高功率掺镱光纤激光器输出特性的实验研究

尚 亮, 宋志强, 毛庆和

(中国科学院安徽光学精密机械研究所激光技术研究中心, 安徽 合肥 230031)

**摘要** 对连续波高功率掺镱光纤激光器(YDFL)的输出特性及影响因素进行了实验研究。结果表明, 双色镜相对于光纤轴向的倾斜角对激光器阈值和输出功率有影响, 当双色镜偏离光纤轴向垂直方向时, 激光器阈值增大、输出功率降低; 当偏离角度小于 $\pm 2^\circ$ 时, 该倾斜角对激光器阈值和输出功率的影响较小。增益光纤有效长度也影响激光器的阈值和输出功率, 并决定激光器自由振荡波长, 增加掺杂光纤有效增益长度, 激光振荡波长向长波长方向移动。

**关键词** 激光器; 高功率光纤激光器; 掺镱双包层光纤; 阈值; 输出功率; 光谱

中图分类号 TN 248.1 文献标识码 A

## Experimental-Research on Output Characteristics of High Power Yb<sup>3+</sup>-Doped Double Clad Fiber Laser

SHANG Liang, SONG Zhi-qiang, MAO Qing-he

(Laser Technology Research Center, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,  
The Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China)

**Abstract** The output characteristics and their influence factors of continuous wave (CW) high power Yb<sup>3+</sup>-doped double clad fiber laser (YDFL) are experimentally investigated. The results show that the slant angle of the dichroic mirror (DM) with respect to the fiber axes affects the threshold and the output power of the laser. The threshold increases and the output power decreases with the increase of the slant angle, however, such influences may be neglected if the slant angle is smaller than  $\pm 2^\circ$ . The effective gain length of the doped fiber may also influence the threshold and the output power, and determine the lasing wavelength. The lasing wavelength shifts to longer wavelength as the effective gain length of the doped fiber increases.

**Key words** lasers; high power fiber laser; Yb<sup>3+</sup>-doped double clad fiber; threshold; output power; spectrum

## 1 引 言

随着双包层光纤的出现和高功率半导体激光抽运源的运用, 光纤激光器单模输出功率已从 1 W 以下增加到数百乃至上千瓦<sup>[1,2]</sup>。目前, 高功率光纤激光器的结构主要有全光纤型和分立器件型, 对于基于透镜组分立器件的端面抽运高功率光纤激光器, 其输出特性已有大量的实验研究<sup>[3~6]</sup>和数值模拟报道<sup>[7~9]</sup>。但是, 双色镜位置和增益光纤长度对激光器阈值和输出功率的影响依然值得研究, 而对涉及高功率光纤激光器的输出谱特性及其演化行为

更是少见报道。本文实验研究了连续波高功率掺镱光纤激光器(YDFL)的双色镜位置和光纤有效增益长度对激光器阈值、输出功率以及激光波长等特性的影响, 并分析了激光振荡波长与增益光纤有效长度间的关系以及激光输出谱特性随抽运光功率的演化。

## 2 实 验

图 1 为高功率掺镱光纤激光器结构示意图, 是常规的透镜组端面直接抽运分立器件方案, DM 为

收稿日期: 2006-12-07; 收到修改稿日期: 2007-02-05

基金项目: 中国科学院“百人计划”和中国科学院知识创新工程方向性项目资助课题。

作者简介: 尚 亮(1981—), 男, 山东人, 博士研究生, 主要从事高功率双包层光纤激光器和放大器方面的研究。

导师简介: 毛庆和(1963—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事纤维光学与激光技术方面的研究。

E-mail: mqinghe@aiofm.ac.cn (通信作者)

双色镜, LMA-YDCF 为大模场面积掺镱双包层光纤。所用大功率半导体抽运激光器的中心波长为 975 nm, 最大光纤耦合输出功率为 50 W, 尾纤芯径和数值孔径分别为  $400\ \mu\text{m}$  和 0.22。抽运耦合系统由准直镜和聚焦镜组成, 该准直透镜对 975 nm 抽运光的透射率大于 95%, 聚焦镜为专门设计的显微物镜, 可承受高光功率密度, 固定安装在光纤耦合器上, 以便精密调节和保证抽运光至掺杂光纤的高效耦合。增益光纤为大模场面积双包层光纤, 纤芯直径和数值孔径分别为  $20\ \mu\text{m}$  和 0.06, 内包层直径和数值孔径分别为  $400\ \mu\text{m}$  和 0.46, 内包层为正八边形结构, 该结构可打破旋转对称性, 避免抽运光在其中产生螺旋光, 从而有利于提高抽运吸收效率, 因其在结构上与圆形相近, 还有利于与具有圆对称性的抽运光实现模场匹配, 提高抽运耦合效率。实验分别采用两种大模场面积双包层掺镱光纤 (YDCF<sub>1</sub> 和 YDCF<sub>2</sub>), YDCF<sub>1</sub> 和 YDCF<sub>2</sub> 在 975 nm 波长处的吸收系数分别为 2 dB/m 和 3 dB/m。经研磨抛光的增益光纤后端面与位于准直镜和聚焦镜之间的双色镜构成法布里-珀罗 (F-P) 激光谐振腔, 由于双色镜并不接触增益光纤, 可避免高功率密度激光对双色镜表面可能造成的损伤<sup>[4]</sup>, 双色镜对 975 nm 抽运光具有高透特性, 透射率大于 96%, 对 1020~1100 nm 波段的激光具有高反特性, 反射率大于 98%。对于图 1 所示的高功率掺镱光纤激光器, 抽运耦合系统的优劣将直接影响激光器的性能, 为确定抽运光入纤功率的大小, 采用与增益光纤结构参数完全相同的非掺杂光纤对抽运光耦合效率预先进行了考察, 经优化准直镜与聚焦镜之间的距离后, 当抽运源输出功率为 50 W 时, 非掺杂光纤输出功率约为 34.1 W, 若不考虑光纤传输损耗, 抽运耦合效率达 70%。

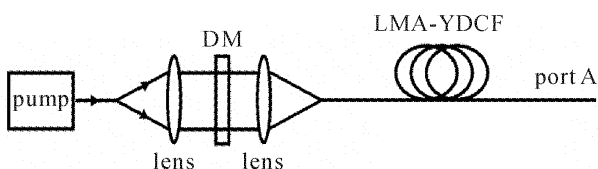


图 1 高功率掺镱光纤激光器结构示意图

Fig. 1 Schematic configuration of the high power ytterbium-doped fiber laser

### 3 结果与讨论

实验首先用一段 10 m 长的 YDCF<sub>1</sub> 构成图 1 所示的光纤激光器 (简称 YDFL<sub>1</sub>), 通过测量激光器

端口 A 的输出功率研究双色镜与光纤之间角向相对位置偏差对激光器阈值和转换效率的影响。图 2 给出了 YDFL<sub>1</sub> 阈值和端口 A 处输出功率与双色镜偏离光纤轴向垂直方向角度的变化关系。由该图可见, 随着双色镜相对于光纤轴向垂直方向偏离角度的增大, 激光器阈值上升, 输出功率下降。当偏离角度由  $0^\circ$  (双色镜与光纤轴向严格垂直) 增加到  $2^\circ$  时, 阈值由 4.8 W 上升到 5.2 W (约 8%), 而输出功率 (入纤抽运功率为 34.1 W 时) 则由约 14 W 下降到 12.8 W (约 8.6%); 偏离角度由  $2^\circ$  继续增大到  $5^\circ$  时, 阈值和输出功率急剧提高和下降, 分别至 7.1 W 和 5.9 W; 进一步增大偏离角度, 阈值上升和输出功率下降的速度趋于平缓, 偏离角度为  $15^\circ$  时的阈值和输出功率比  $10^\circ$  时分别仅提高和下降了 0.2 W 和 0.4 W。

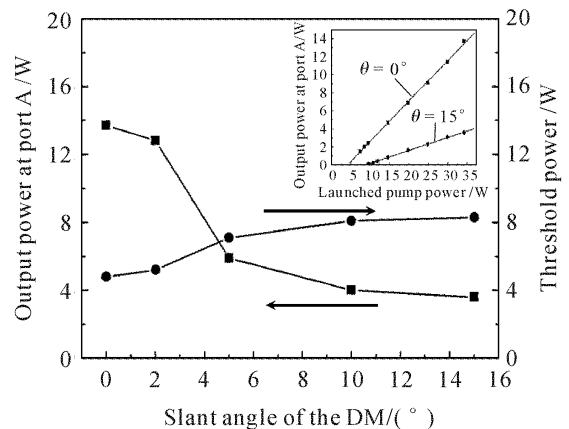


图 2 YDFL<sub>1</sub> 阈值和端口 A 处激光输出功率与双色镜相对于光纤轴向角度的变化关系

Fig. 2 Threshold and output power of YDFL<sub>1</sub> at port A as functions of the slant angle of the DM with respect to the fiber axes

用非掺杂光纤考察抽运光耦合效率时发现, 偏离角度的变化对抽运光入纤功率的影响可忽略, 那么, 阈值上升表明激光器腔损耗增大。事实上, 当双色镜与光纤轴向严格垂直时, 激光腔由双色镜与掺杂光纤后端面构成, 而双色镜的高反特性导致了腔损耗较低。当双色镜逐渐偏离光纤轴向垂直方向时, 由于受到掺杂光纤纤芯数值孔径 (0.06) 的限制, 掺杂光纤前端输出光经双色镜反射回掺杂光纤的比例将随偏离角度的增大而减小, 表现为腔损耗逐渐增大, 造成阈值逐渐上升。但是, 如图 2 所示, 当双色镜相对于光纤轴向垂直方向的偏离角度小于  $\pm 2^\circ$  (考虑两个方向) 时, 虽然腔损耗有所增大, 但掺杂光纤提供的增益却因双色镜反馈作用的减弱而增加,

补偿了由其引起的腔损耗的增加,使得激光器阈值变化不大;当偏离角度大于 $\pm 2^\circ$ 时,这种增益补偿已不足以抵消腔损耗的增加,使得激光器阈值显著提高;进一步增大偏离角度至 $\pm 5^\circ$ 以上时,双色镜对由掺杂光纤前端的输出已无反馈作用,使得激光腔由掺杂光纤前后端面构成,而光纤端面的反射率仅为4%(菲涅耳反射),从而导致腔损耗远大于双色镜与光纤轴向严格垂直时的腔损耗,使得激光器阈值大且基本不受双色镜偏离角度的影响。

图2所示的端口A处输出功率随双色镜偏离角度增加而降低的原因同样来源于双色镜偏离角度的增大。随着偏离角度增大,腔损耗增大,这样,为保持激光振荡,掺杂光纤提供的增益必须增加,而抽运光功率一定时,使得掺杂光纤增益增大源自腔内光功率的降低,从而导致了具有固定反射率的光纤后端口A处的输出功率下降。图2的插图为当双色镜与光纤轴向严格垂直和双色镜偏离光纤轴线垂直方向约 $15^\circ$ 时,YDFL<sub>1</sub>端口A处激光输出功率与入纤抽运功率之间的关系。可见,在入纤抽运功率34.1 W,双色镜与光纤轴向严格垂直时,YDFL<sub>1</sub>端口A处输出功率约为14 W,对应的光-光转换效率为40.2%,而当双色镜偏离角度为 $15^\circ$ 时,输出功率仅约为3.6 W,即使考虑到前端口的激光输出(假设两端口输出功率相同),总输出功率也仅为7.2 W,从而光-光转换效率下降至20.9%。

图3为将掺杂光纤换为长10 m的YDCF<sub>2</sub>(简称YDFL<sub>2</sub>)且保持双色镜与光纤轴向严格垂直时测得的端口A处激光输出功率与入纤抽运功率之间的关系。由图可见,YDFL<sub>2</sub>的阈值为2.2 W,输出功率和相应的光-光转换效率分别约为23 W和

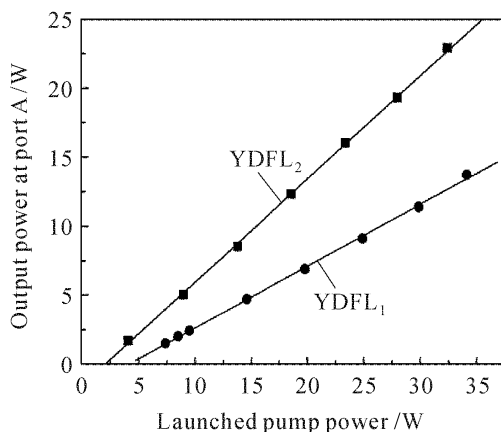


图3 YDFL<sub>1</sub>, YDFL<sub>2</sub>在端口A处激光输出功率与入纤抽运功率之间的关系

Fig. 3 Output power at port A of YDFL<sub>1</sub> and YDFL<sub>2</sub> as a function of the launched pump power

70.7%,与YDFL<sub>1</sub>相比,YDFL<sub>2</sub>的阈值降低54%,光-光转换效率则提高约76%。虽然YDFL<sub>1</sub>和YDFL<sub>2</sub>的腔损耗一致,所对应的几何长度也相同,但YDFL<sub>2</sub>的阈值比YDFL<sub>1</sub>低的原因在于所用YDCF<sub>2</sub>的抽运吸收系数高,使得其有效长度约为YDCF<sub>1</sub>的1.5倍,从而能更有效地利用抽运光功率,导致了在抽运光功率相同情况下提供了更高的增益,进而使激光输出功率增大,光-光转换效率提高。

图4为光谱分析仪(Agilent 86140B)在端口A处测得的YDFL<sub>1</sub>和YDFL<sub>2</sub>输出谱特性随抽运光的变化关系。由图4可以明显地看出,YDFL<sub>2</sub>的剩余抽运光功率相对幅度低于YDFL<sub>1</sub>时的情况,表明YDFL<sub>2</sub>中所用的增益光纤更有效地吸收了抽运光,这也进一步证实YDFL<sub>2</sub>相比YDFL<sub>1</sub>阈值低和转换效率高的原因来源于增益光纤有效长度的增加。此外,在阈值附近时,激光输出波长在1045 nm处,而YDFL<sub>2</sub>则处于1085 nm附近,表明YDFL<sub>1</sub>的增益光纤有效长度较短<sup>[10]</sup>。这时,YDFL<sub>1</sub>是通过在相对较短的增益光纤上提高抽运光功率以获得足够增益实现激光振荡的,从而使得YDCF<sub>1</sub>工作在相对较高的平均粒子数反转状态下,而平均反转粒子数密度较高时,掺杂光纤增益峰向短波长移动,从而使得激光输出波长较短,同时,在较高的粒子数反转下,掺杂光纤对抽运光的吸收也偏离小信号吸收状态,这就表现出输出谱中存在相对较高的剩余抽运光(如图4(a)所示)。YDFL<sub>2</sub>的激光振荡波长处于1085 nm,表明这时增益光纤有效长度较长,重吸收效应导致掺杂光纤增益峰向长波长移动。同时,由于增益光纤有效长度较长,使得YDCF<sub>2</sub>工作在相对较低的平均粒子数反转状态下仍然可以获得足够的增益以实现激光振荡,相对较低的平均反转粒子数密度还导致了掺杂光纤对抽运光的充分吸收,剩余抽运光功率也相对较低(如图4(b)所示)。由此可见,增益光纤有效长度决定了自由运转掺镱光纤激光器的振荡波长。由图4还可看出,在阈值附近时,YDFL<sub>1</sub>和YDFL<sub>2</sub>的激光输出均在约5 nm光谱范围内有多个振荡波长,随着抽运电流的增大,起振波长的光谱范围都逐渐增大,波长数目均明显增多,且振荡波长表现出剧烈的不稳定,表明存在强烈的波长竞争效应<sup>[11]</sup>,这与室温下掺镱光纤主要表现为均匀加宽效应相一致。对于YDFL<sub>1</sub>,当抽运功率增大到约47.6 W时,在1060~1070 nm处也开始出现激光振荡;而对于YDFL<sub>2</sub>,当抽运功率增大到41 W时,在1100 nm处出现激光振荡,继续增加到

46 W时,甚至在1200 nm附近也有激光振荡波长出现,表明掺镱光纤在室温下也存在一定的非均匀加宽效应<sup>[12]</sup>。因此,室温下,掺镱双包层光纤在3~

5 nm局域波长范围内主要表现为均匀加宽效应(波长竞争),而在相对较大波长范围内则存在一定的非均匀加宽效应(新波长出现)。

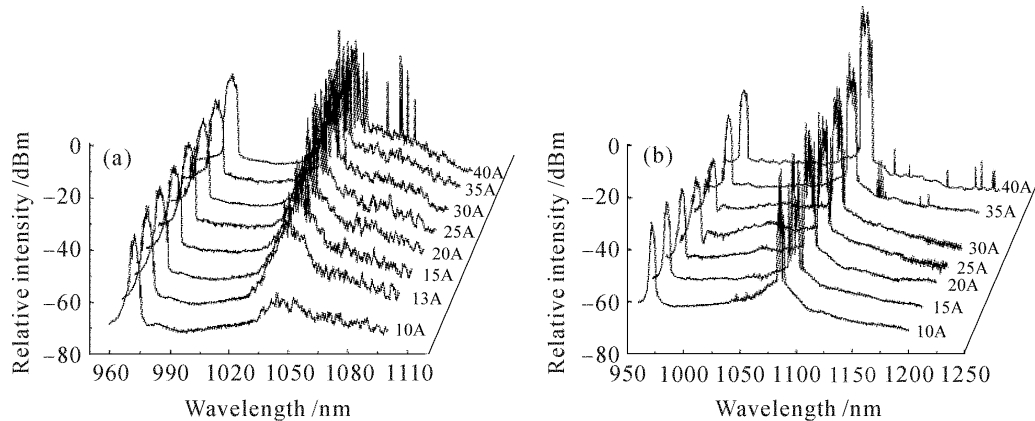


图4 不同抽运电流下光纤激光器的输出光谱  
Fig. 4 Measured spectra for different pump currents  
(a) YDFL<sub>1</sub>; (b) YDFL<sub>2</sub>

## 4 结 论

利用大模场双包层掺镱光纤,实验研究了连续波高功率掺镱双包层光纤激光器的输出特性及其影响因素。结果表明,双色镜是否与光纤轴向严格垂直对激光器阈值和输出功率有影响,当双色镜与光纤轴向严格垂直时,激光器阈值低、输出功率高;当双色镜偏离该方向时,激光器阈值上升、输出功率下降,但当偏离角度在 $\pm 2^\circ$ 以内时,阈值和输出功率变化不大。增益光纤有效长度既影响激光器阈值和输出功率,也影响着光纤激光器的振荡波长,当有效长度增大(减小)时,激光振荡波长向长(短)波长方向移动。此外,对高功率双包层掺镱光纤激光器的输出谱的研究表明,室温下掺镱光纤在局域波长范围内主要表现为均匀加宽效应,而在相对较宽的光谱范围内也存在一定的非均匀加宽效应。

## 参 考 文 献

- 1 J. Limpert, A. Liem, H. Zellmer *et al.*. 500 W continuous-wave fibre laser with excellent beam quality [J]. *Electron. Lett.*, 2003, **39**(8):645~647
- 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 He Bing, Lou Qihong, Zhou Jun *et al.*. Phase-locking and high coherent power output of two fiber lasers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(9):1153~1158

- 何兵,楼祺洪,周军等. 两个光纤激光器的相位锁定及高相干功率输出[J]. *中国激光*, 2006, **33**(9):1153~1158
- 4 Li Kang, Zhao Wei, Wang Yishan *et al.*. High power Yb<sup>3+</sup>-doped double-clad fiber laser with improved F-P cavity [J]. *J. Optoelectron · Laser*, 2006, **17**(3):302~305
- 李康,赵卫,王屹山等. 改进的F-P腔大功率掺Yb<sup>3+</sup>双包层光纤激光器[J]. *光电子·激光*, 2006, **17**(3):302~305
- 5 Ping Yan, Mali Gong, Pan Ou *et al.*. 10-W cladding-pumped fiber laser with single transverse mode output [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(6):332~333
- 6 Fan Yaxian, Hu Shuling, Lü Fuyun *et al.*. Dynamics characteristic of D-shape inner cladding Yb<sup>3+</sup>-doped fiber laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(4):303~306
- 樊亚仙,胡殊玲,吕福云等. D形内包层掺Yb<sup>3+</sup>光纤激光器动态特性的研究[J]. *中国激光*, 2003, **30**(4):303~306
- 7 Ido Kelson, Amos A. Hardy. Strongly pumped fiber lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1998, **34**(9):1570~1577
- 8 A. Bertoni, G. C. Reali. A model for the optimization of double-clad fiber laser operation [J]. *Appl. Phys. B*, 1998, **66**(5):547~554
- 9 Wu Zilu, Chen Guofu, Wang Xianhua *et al.*. Numerical analysis of Yb<sup>3+</sup> doped double clad fiber laser [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(3):332~336
- 武自录,陈国夫,王贤华等. 掺Yb<sup>3+</sup>双包层光纤激光器的数值分析[J]. *光子学报*, 2002, **31**(3):332~336
- 10 H. M. Robert, J. Carman, David C. Hanna *et al.*. Ytterbium-doped silica fiber lasers: versatile sources for the 1~1.2  $\mu\text{m}$  region [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 1995, **1**(1):2~13
- 11 Qinghe Mao, John W. Y. Lit. Multiwavelength erbium-doped fiber lasers with active overlapping linear cavities [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2003, **21**(1):160~169
- 12 Rüdiger Paschotta, Johan Nilsson, Anne C. Tropper *et al.*. Ytterbium-doped fiber amplifiers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1997, **33**(7):1049~1056