

文章编号: 0258-7025(2009)01-0096-04

# 宽带可调谐掺镱双包层光纤激光器

范元媛 叶陈春 蔡志平 吴彩缘 罗正钱 戴贤哲

(厦门大学电子工程系, 福建 厦门 361005)

**摘要** 采用高功率 975 nm 多模半导体激光器(LD)作为抽运源,以大模场掺  $\text{Yb}^{3+}$  双包层光纤(YDCF)作为激光增益介质,运用能够承受较高功率运行的利特罗(Littrow)光栅外腔调谐结构,实现了宽带可调谐激光输出。实验中,双包层光纤采用最优光纤长度 14 m,光栅经仔细调整后有效入纤反馈效率约 20%,当入纤抽运功率约 1.3 W 时,激光器达到阈值并开始振荡。通过连续旋转光栅,激光输出波长能在 1046 ~ 1121 nm 之间实现可调谐,可调范围达 75 nm。当入纤抽运功率为 48 W 时,在 1089 nm 波长处获得最大输出功率 23.7 W,相应斜率效率为 53%。最后,基于数值模拟简单地分析了激光输出特性,实验结果与数值模拟结果基本保持一致。

**关键词** 激光器;光纤激光器;调谐;双包层光纤

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL20093601.0096

## Broad-Band Tunable $\text{Yb}^{3+}$ -Doped Double-Clad Fiber Lasers

Fan Yuanyuan Ye Chenchun Cai Zhiping Wu Caiyuan Luo Zhengqian Dai Xianzhe

(Department of Electronic Engineering, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005, China)

**Abstract** A tunable  $\text{Yb}^{3+}$ -doped double-clad fiber (YDCF) laser has been demonstrated experimentally using a high-power 975 nm laser diode (LD) as the pump source, a large-mode-area YDCF as the gain medium and a blaze grating-based Littrow configuration as the tunable mechanism. With the optimal fiber length of 14 m and the effective reflectivity 20% of the blaze grating, the threshold pump power of the laser is ~ 1.3 W. Through rotating the blaze grating, the output lasing wavelength can be broadly tuned from 1046 nm to 1121 nm. When the injected pump power is 48 W, a tunable output of 23.7 W at 1089 nm is achieved with a slope efficiency of 53%. Numerical simulation is performed to analyze the laser output characteristics, and the experimental results are in good agreement with those by numerical simulation.

**Key words** lasers; fiber laser; tunable; double-clad fiber

## 1 引言

采用双包层光纤和包层抽运技术,可大幅度提高能量转换效率和输出功率,并能有效地抑制各种非线性效应,已成为发展高功率激光器的重要途径之一。与目前已有的传统高功率激光器相比,双包层光纤激光器具有维护简便、可靠性高、工作寿命长、功率消耗低及性价比高优点,并适合在特殊的环境工作。因此,高功率双包层光纤激光器在通信、激光加工、激光医疗、激光测距等方面都有广阔的应用前景。2004年,英国南安普敦大学采用大模

场面积、小数值孔径光纤,单根光纤获得光束质量近衍射极限的 1.36 kW 的激光输出,并预言通过改进光纤制造技术和采用高功率抽运源,单根光纤可以得到近万瓦的激光输出<sup>[1]</sup>。2006年,中国科学院上海光学精密机械研究所与烽火通信公司合作,采用国产大模场面积光纤实现了 714 W 连续激光输出<sup>[2]</sup>。

由于  $\text{Yb}^{3+}$  离子能级结构简单,不存在激发态吸收和浓度淬灭效应,具有很高的量子效率和光光转换效率,因此掺镱双包层光纤(YDCF)激光器是

收稿日期:2008-04-22;收到修改稿日期:2008-06-26

基金项目:福建省科技重点项目(2005H059)和厦门大学人才引进科研启动费(0630-X01125)资助课题。

作者简介:范元媛(1984—),女,硕士研究生,主要从事双包层光纤激光器的研究。

E-mail: yuan840101@hotmail.com

导师简介:叶陈春(1956—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤激光器和光纤传感器的研究。

E-mail: ccye@xmu.edu.cn

目前很受重视的一种双包层光纤激光器<sup>[3,4]</sup>。如果利用掺杂于玻璃介质中的  $\text{Yb}^{3+}$  离子发射谱线极宽的特性,可实现宽范围激光波长调谐(约在 1010 ~ 1120 nm之间)<sup>[5]</sup>。最近几年,采用各种波长调谐技术,可调谐掺  $\text{Yb}^{3+}$  双包层光纤激光器的研究已取得了一定的进展。但是由于激光腔中各种调谐及偏振控制元件的使用,引入了腔体附加损耗,从而降低了激光输出功率<sup>[6]</sup>。直接在掺  $\text{Yb}^{3+}$  双包层光纤上刻蚀光纤光栅作为激光腔镜,并通过应力调谐光纤光栅中心波长,Fu Shenggui 等<sup>[7]</sup>获得了 15.6 nm 调谐范围,117 mW 的功率输出。利用光纤可调谐滤波器,A. Hideur 等<sup>[8]</sup>获得了 800 mW, 1040 ~ 1100 nm 的可调谐输出。目前最为成熟、广泛使用的波长调谐技术仍然是利用外腔衍射光栅方法来控制激光输出波长<sup>[9~14]</sup>。采用该方法,M. Auerbach 等<sup>[9]</sup>实现了输出功率 10 W,可调谐范围 92 nm 的掺  $\text{Yb}^{3+}$  双包层光纤激光器。国内南开大学研究小组<sup>[10~12]</sup>利用该调谐技术在掺  $\text{Yb}^{3+}$  双包层光纤和光子晶体光纤中均实现了宽调谐范围的激光输出,但他们所获得的输出功率相对较低。

本文采用后向输出利特罗(Littrow)结构、大模场掺  $\text{Yb}^{3+}$  双包层光纤和多模半导体激光器(LD)抽运源,获得了 1046 ~ 1121 nm 范围内的可调谐输出,在波长 1089 nm 处,当抽运入纤功率为 48 W 时,获得了最高输出功率为 23.7 W 的激光输出。

## 2 实验装置

宽带可调谐掺镱双包层光纤激光器的实验装置如图 1 所示。采用尾纤输出最大功率 200 W,中心波长 975 nm 的多模半导体激光器作为抽运源。抽运光经透镜  $L_1$  (焦距 25 mm) 准直,再经两个双色镜  $M_1$  和  $M_2$  反射,最后经透镜  $L_2$  (焦距 25 mm) 聚焦后注入双包层光纤。光纤左端面作为抽运注入端被垂直抛光以提供 4% 的菲涅耳反射,与闪耀光栅一起构成后向 Littrow 谐振腔。光纤右端面 8 角倾斜抛光以抑制双包层光纤两端面因菲涅耳反射而造成的

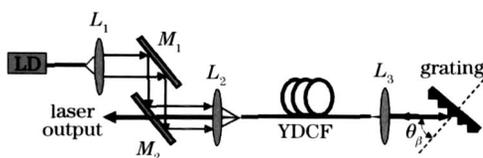


图 1 可调谐掺镱双包层光纤激光器示意图

Fig. 1 Schematic diagram of a tunable  $\text{Yb}^{3+}$ -doped double-clad fiber laser

寄生振荡,同时提高外腔耦合效率。通过光纤输出的光束经透镜  $L_3$  准直后照射到闪耀光栅上,利用闪耀光栅的一级衍射分光效应,调节其转角,从而选择不同的反馈波长,实现可调谐波长激光输出。

所采用的双色镜 ( $M_1, M_2$ ) 对抽运波长激光具有高反射率 ( $R > 97\%$  @ 975 nm),而对 1050 ~ 1100 nm 波长激光具有高透射率 ( $T > 85\%$ )。两个双色镜以 45° 平行放置,将抽运光与输出激光分开,避免激光入射到抽运源。LD 尾纤直径 400  $\mu\text{m}$ ,数值孔径 (NA) 0.22。选用一个相对大焦距的透镜  $L_3$  (焦距 50 mm) 来准直光束,以扩大光栅反射面上的光斑直径,从而减小对闪耀光栅的损害,并增强光栅的分光能力。用作激光增益介质的双包层掺镱双包层光纤(美国 Nufern, LMA-YDF) 内包层为圆形,直径 400  $\mu\text{m}$ ,数值孔径 0.46,纤芯直径 20  $\mu\text{m}$ ,纤芯数值孔径 0.06,975 nm 处包层吸收系数为 2.0 dB/m,通过数值模拟优化选取光纤长度为 14 m。实验中采用 Thorlabs 公司 GR50-0610 闪耀光栅作为调谐元件,光栅闪耀波长为 1.0  $\mu\text{m}$ ,600 line/mm,闪耀角为  $17.27^\circ$ ,在 1080 nm 波长附近一级衍射平均效率达 60% 以上。

## 3 实验结果与讨论

通过测量激光腔损耗及剩余抽运功率,并利用光纤参数分析,估计从尾纤输出的抽运光耦合到掺镱双包层光纤的入纤效率大约为 80%。调节闪耀光栅转角,获得了波长可调谐激光输出。图 2 给出了在入纤功率为 15 W 时,利用光谱分析仪测量得到的典型调谐光谱图,光谱分析仪的分辨率为 0.01 nm。激光波长能在很宽的范围内(1046 ~ 1121 nm)实现可调谐,调谐范围达 75 nm。如此宽的可调范围主要受益于双包层光纤中镱离子的宽增益

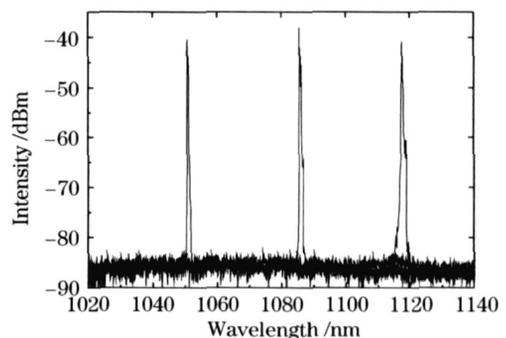


图 2 可调谐掺  $\text{Yb}^{3+}$  双包层光纤激光器的输出激光谱线

Fig. 2 Spectra of the tunable  $\text{Yb}^{3+}$ -doped fiber laser output

谱以及实验中闪耀光栅的良好性能。

测量了在不同激光波长处可调谐激光器的输入输出关系曲线,如图 3 所示。图 3(a)为入纤抽运功率分别为 4.2 W, 8.4 W, 12.5 W, 18.8 W 和 23 W 时的调谐曲线。当较长波长(大于 1070 nm)激光时,激光输出功率随波长的变化较小;然而,一旦激光波长小于 1070 nm,激光输出功率随波长的变短而明显下降,这主要是由镜离子的增益特性决定的。值得指出的是,在不同抽运功率下,激光器都在 1089 nm 处获得最大的输出功率。图 3(b)给出了不同调谐波长处的输出功率随入纤抽运功率变化的特性曲线。对所有波长,激光输出功率随抽运功率的增长尚未出现饱和,说明更高的输出功率是可能获得的。同时也发现激光器在 1089 nm 处有最高的转换效率。

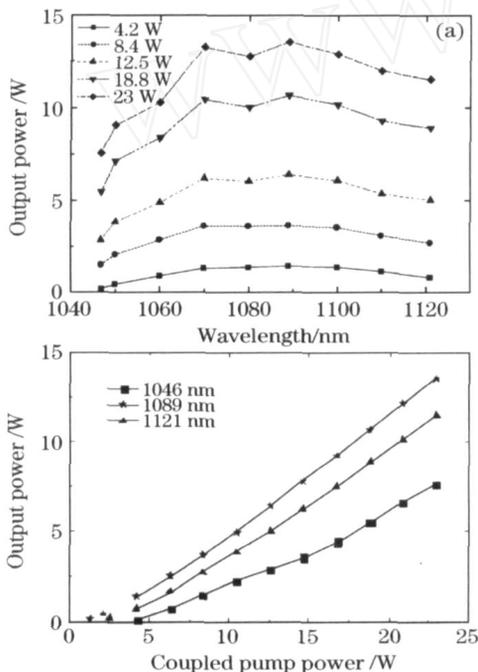


图 3 (a) 不同入纤抽运功率时输出功率随调谐波长的变化;(b) 不同调谐波长处的输出功率随入纤抽运功率变化的特性曲线

Fig. 3 (a) Output power versus lasing wavelength under different coupled pump powers; (b) output laser power versus coupled pump power for different laser wavelengths

鉴于激光阈值的高低也是评判激光器的重要因素之一,因而测量了不同激光波长时的入纤抽运光阈值功率,结果如图 4 所示。在波长 1046 ~ 1121 nm 之间,入纤抽运光阈值功率分布在 1.3 ~ 4.2 W 范围内。最低抽运光阈值所对应的波长为

1089 nm。可调谐掺镱双包层光纤激光器有较高的阈值功率,主要由于激光腔具有较大的损耗。由于闪耀光栅的使用,当激光由 8 角光纤一端出射到自由空间,然后经闪耀光栅衍射原路返回再次注入光纤时,引入较大的谐振腔附加损耗。尽管闪耀光栅的一级衍射效率能达 ~ 60%,然而其实际反馈回激光腔的效率相当低,约为 20%<sup>[6]</sup>。

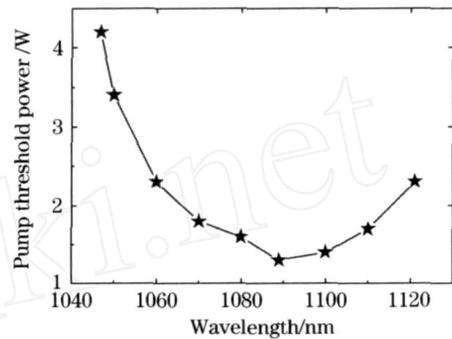


图 4 不同调谐波长处的入纤抽运阈值功率  
Fig. 4 Threshold pump power with different lasing wavelengths

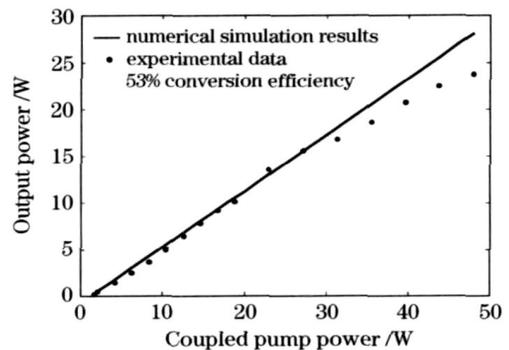


图 5 调谐波长为 1089 nm 时的输出功率特性曲线  
Fig. 5 Output power versus input pump power at 1089 nm

由于在 1089 nm 波长处具有最高转换效率和最低阈值功率,因此特别测量了 1089 nm 波长处的输入输出关系。调节光栅转角,使调谐激光波长固定在 1089 nm 处,加大抽运激光功率,当入纤抽运功率为 48 W 时,得到最大激光输出功率 23.7 W,相应斜率效率为 53%,输入输出关系如图 5 所示。由于实验中所采用的闪耀光栅损伤阈值的限制,因而没有进一步加大抽运功率以获得更高功率输出。同时,基于稳态掺 Yb<sup>3+</sup> 双包层光纤激光器的速率方程及 Newton-Raphson 方法<sup>[15]</sup>,采用实际实验参数,数值模拟了 1089 nm 波长处的输出功率特性曲线,如图 5 所示。由图可见,实验结果与数值模拟结果基本保持线性一致,两者稍有偏离可能是由于抽运

光入纤效率在各种抽运功率下不是常数,透镜、二向色镜的损耗以及闪耀光栅损伤阈值附近的衍射效率有变化等引起。

## 4 结 论

报道了一个宽调谐范围、高输出功率的可调谐掺镱双包层光纤激光器。利用最优长度掺  $\text{Yb}^{3+}$  大模场面积双包层光纤作为增益介质,闪耀光栅作为波长调谐元件,构成了 Littrow 方式光栅外腔可调谐激光器,获得了波长调谐范围 1046 ~ 1121 nm 的激光输出。在波长 1089 nm 处获得最高输出功率 23.7 W,对应的斜率效率为 53%。通过进一步优化实验装置,减小透镜、二向色镜的损耗,改进激光耦合注入光纤方式,提高环境清洁度等措施,有望使调谐功率进一步提高。

## 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 of continuous-wave output power [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(25):6088 ~ 6092
- 2 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
- 3 Shang Liang, Song Zhiqiang, Mao Qinghe. Experimental-research on output characteristics of high power  $\text{Yb}^{3+}$ -doped double clad fiber laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(6):755 ~ 758  
尚 亮,宋志强,毛庆和. 高功率掺镱光纤激光器输出特性的实验研究[J]. *中国激光*, 2007, **34**(6):755 ~ 758
- 4 Jixin Chen, Zhan Sui, Fushen Chen *et al.*. Output characteristic of  $\text{Yb}^{3+}$ -doped fiber laser at different temperatures [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(3):173 ~ 174
- 5 J. K. Sahu, C. C. Renaud, K. Furusawa *et al.*. Jacketed air-clad cladding pumped ytterbium-doped fibre laser with wide tuning range [J]. *Electron. Lett.*, 2001, **37**(18):1116 ~ 1117
- 6 J. Nilsson, W. A. Clarkson, R. Selvas *et al.*. High-power wavelength-tunable cladding-pumped rare-earth-doped silica fiber lasers [J]. *Optical Fiber Technol.*, 2004, **10**(1):5 ~ 30
- 7 Fu Shenggui, Fan Wande, Zhang Qiang *et al.*. Tunable Yb-doped double-clad fibre laser based on fibre Bragg grating with narrow linewidth [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2004, **21**(7):1279 ~ 1281
- 8 A. Hideur, T. Chartier, C. Özkul *et al.*. All-fiber tunable ytterbium-doped double-clad fiber ring laser [J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(14):1054 ~ 1056
- 9 M. Auerbach, P. Adel, D. Wandt *et al.*. 10 W widely tunable narrow linewidth double-clad fiber ring laser [J]. *Opt. Express*, 2002, **10**(2):139 ~ 145
- 10 Li Yigang, Hou Guofu, Lü Kecheng *et al.*. Tunable  $\text{Yb}^{3+}$ -doped double-cladding fiber laser with a double-grating configuration [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(11):969 ~ 972  
李乙钢,侯国付,吕可诚等. 双光栅外腔可调谐掺  $\text{Yb}^{3+}$  双包层光纤激光器[J]. *中国激光*, 2003, **30**(11):969 ~ 972
- 11 Liu Shengli, Li Yigang, Cao Yanli *et al.*. High-power widely tunable Yb-doped photonic crystal fiber laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(9):1663 ~ 1667  
刘胜利,李乙钢,高艳丽等. 高功率宽调谐范围掺  $\text{Yb}^{3+}$  光子晶体光纤激光器[J]. *光学学报*, 2007, **27**(9):1663 ~ 1667
- 12 Hou Guofu, Li Yigang, Lü Kecheng *et al.*. Widely tunable  $\text{Yb}^{3+}$ -doped double-clad fiber laser [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(12):1510 ~ 1513  
侯国付,李乙钢,吕可诚等. 宽带可调谐掺  $\text{Yb}^{3+}$  双包层光纤激光器的研究[J]. *光子学报*, 2002, **31**(12):1510 ~ 1513
- 13 P. Jelger, F. Laurell. Efficient skew-angle cladding-pumped tunable narrow-linewidth Yb-doped fiber laser [J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(24):3501 ~ 3503
- 14 M. Laroche, P. Jander, W. A. Clarkson *et al.*. High power cladding-pumped tunable Er, Yb-doped fibre laser [J]. *Electron. Lett.*, 2004, **40**(14):31 ~ 32
- 15 Zhengqian Luo, Chenchun Ye, Guoyong Sun *et al.*. Simplified analytic solutions and a novel fast algorithm for  $\text{Yb}^{3+}$ -doped double-clad fiber lasers [J]. *Opt. Commun.*, 2007, **277**:118 ~ 124