

文章编号: 0258-7025(2009)06-1352-04

基于闪耀光栅的可调谐 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺光纤激光器

吴卓亮 赵尚弘 楚兴春 李琳 占生宝

(空军工程大学电讯工程学院, 陕西 西安 710077)

摘要 报道了一种结构简单、调谐方便的宽带可调谐 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺光纤激光器。采用半导体激光二极管(LD)作为抽运源,以大模面积 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺双包层光纤为增益介质,利用闪耀光栅作为波长选择器件,实现了 1550 nm 波段稳定的可调谐激光输出,调谐范围达 36 nm,几乎覆盖了整个荧光谱宽度。整个调谐范围内,输出激光线宽小于 0.08 nm。输出功率随波长的变化而变化,在 25 nm 调谐范围内激光功率不低于 400 mW。波长为 1543.86 nm 时获得最大输出功率 510 mW,斜率效率为 26%。这种光纤激光器具有效率高、线宽窄、调谐范围大、输出稳定等优点,可用于密集波分复用(DWDM)光纤通信系统和高精度光纤传感系统。

关键词 激光器; 可调谐; $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺光纤; 闪耀光栅; 线宽

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093606.1352

Tunable $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ Co-Doped Fiber Laser Based on Blazed Grating

Wu Zhuoliang Zhao Shanghong Chu Xingchun Li Lin Zhan Shengbao

(Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710077, China)

Abstract A widely tunable $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ co-doped fiber laser with simple structure is demonstrated. Using a blazed grating as the wavelength selection element, and a semiconductor laser diode as the pumping source, stable tunable output laser in 1550 nm wave-band is obtained with large-mode-area $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ co-doped double-cladding fiber as the gain medium. The tuning range is 36 nm, covering almost the whole fluorescence spectrum. The linewidth is less than 0.08 nm for every tuned laser. For different wavelength, the output power is different, and the output power is higher than 400 mW within 25 nm tuning range. The maximum achieved power is 510 mW with the wavelength of 1543.86 nm and the calculated slope efficiency is 26%. With wide tunable range and narrow linewidth, this stable efficient laser can be used in dense wavelength division multiplexed (DWDM) optical fiber communication systems and high resolution fiber sensor systems.

Key words lasers; tunable; $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ co-doped fiber; blazed grating; linewidth

1 引 言

1550 nm 波段激光处于人眼安全波段,位于光纤通信低损耗窗口,且具有良好的大气传输特性,在光通信、光传感、激光医疗及光谱分析等领域具有广阔的应用前景。 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺光纤激光器具有抽运吸收效率高、量子转换效率高、输出稳定等优点,是该波段的理想光源^[1~4]。随着近年来包层抽运技术的进步以及大模面积双包层光纤的出现, $\text{Er}^{3+}/$

Yb^{3+} 共掺光纤激光器的功率得到很大提高^[5,6],但要把其应用到当前快速发展的密集波分复用(DWDM)光纤通信系统以及高精度光纤传感系统中,必须实现窄线宽的可调谐激光输出。实现这一目标的传统方法是采用光纤布拉格光栅(FBG)作为波长选择器件构成可调谐光纤激光器^[7~10],但对大模面积光纤而言,直接刻制 FBG 的技术难度较大,而采用熔接的方法又会引起较大的损耗,影响激光器的效率,因此必须寻找其他更为合适的波长选择

收稿日期: 2008-11-10; 收到修改稿日期: 2008-12-25

基金项目: 国家自然科学基金(60678018)资助课题。

作者简介: 吴卓亮(1983—),男,博士研究生,主要从事光纤激光器方面的研究。E-mail: wzliang@163.com

导师简介: 赵尚弘(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事光通信与激光技术方面的研究。

E-mail: zhaoshangh@yahoo.com.cn

器件。衍射光栅由于具有良好的分光特性,近年来被许多研究人员用作波长选择器件,所构成的可调谐光纤激光器不仅结构简单、调谐方便,而且调谐范围大、效率高^[11~14],但目前的研究所针对的增益介质大多为掺 Yb³⁺ 光纤,针对 Er³⁺/Yb³⁺ 共掺光纤激光器的研究较少。

本文报道了利用闪耀光栅作为波长选择器件构成可调谐 Er³⁺/Yb³⁺ 共掺双包层光纤激光器的实验结果。实验使用长度为 6 m 的大模面积 Er³⁺/Yb³⁺ 共掺双包层光纤,实现的调谐范围达 36 nm,线宽小于 0.08 nm,最大输出功率 510 mW,在 25 nm 调谐范围内激光功率不低于 400 mW。

2 实验装置及工作原理

可调谐光纤激光器的实验装置如图 1 所示。

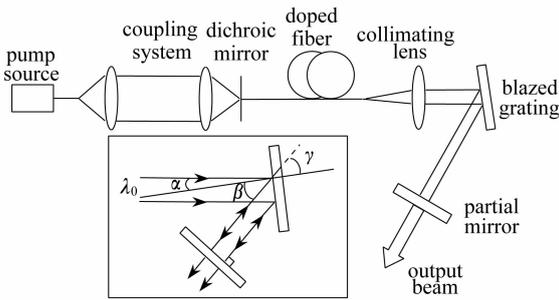


图 1 可调谐光纤激光器的实验装置图

Fig.1 Experiment setup of tunable fiber laser

所用光纤为美国 NUERN 公司生产的 Er³⁺/Yb³⁺ 共掺双包层光纤 LMA-EYDF-025/300,长度为 6 m,纤芯直径 25 μm,纤芯数值孔径 0.1,内包层直径 300 μm,内包层数值孔径 0.46,涂覆层直径 450 μm,包层对抽运光的吸收系数为 0.6 dB/m。

抽运源为 COHERENT 公司生产的带尾纤的半导体激光二极管(LD),最大驱动电流 30 A,此时通过尾纤测得的输出功率为 13 W,中心波长为 976 nm,尾纤直径 800 μm,数值孔径 0.2。抽运光通过非球面镜和显微物镜组成的耦合系统进入光纤,紧贴光纤的入射端放置一只二色镜作为前腔镜,二色镜对抽运光的透过率约为 98%,对信号光的反射率约为 98%。光纤的后端面切成斜面以抑制由于光纤后端面的菲涅耳反射而可能在光纤内(激光器的内腔)形成的激光振荡,并同时提高由光栅和部分反射镜构成的外腔的耦合效率^[12]。光纤输出的光经过透镜准直以后入射到光栅上,所用光栅为定制的闪耀光栅,线密度为 400 line/mm,对 1550 nm 波段激光具有 80% 的一级光衍射效率,经光栅衍射

以后的光入射到部分反射镜上,部分反射镜对 1550 nm 波段的光具有 5% 的反射率,用以提供反馈形成振荡并实现激光的耦合输出。

在激光输出端利用 Anritsu 公司生产的光谱仪 (MS9710B) 观察激光光谱,光谱仪的最小分辨率为 0.07 nm,利用 Spectra-Physic 公司生产的功率计 (407A) 测量功率。

在该实验系统中,假设准直后的光束在光栅上的入射角为 α,出射角为 β,如图 1 中所示,依据光栅方程有

$$\sin \beta - \sin \alpha = m\lambda/d, \quad (1)$$

式中 m 代表衍射级次(这里取为 1), λ 为波长, d 为光栅常数。

经光栅衍射,不同波长的衍射光将以不同的角度入射到部分反射镜上,只有沿部分反射镜法线方向入射的光在反射以后能够完全沿原路返回到光纤中,形成反馈,在谐振腔内具有最大的增益,从而振荡产生特定波长的激光(假设波长为 λ_0),其他波长的自发辐射则被抑制。假设光栅法线与部分反射镜法线之间的夹角为 γ ,则输出激光对应的衍射输出角 $\beta = \gamma$,因此有

$$\sin \gamma - \sin \alpha = \lambda_0/d, \quad (2)$$

从而得到

$$\Delta\lambda_0 = d \cos \gamma \Delta\gamma. \quad (3)$$

可见,在入射角确定的情况下,输出激光的波长由部分反射镜与光栅之间的夹角决定。在一定范围内旋转部分反射镜,将改变输出激光的波长,实现光纤激光器的可调谐输出,调谐范围由荧光谱范围和光栅的工作波长范围共同决定。由于谐振腔只能反馈某一特定波长的光,具有良好的选频特性,因而输出激光具有窄线宽、低噪声的特点。

3 实验结果与讨论

在加入光栅之前,调整光路使光纤输出端功率最大,利用光谱仪测得荧光谱如图 2 所示。可以看出,所用双包层 Er³⁺/Yb³⁺ 共掺光纤具有很宽的荧光谱范围(约 1530~1570 nm),从而为较宽范围内的波长调谐提供了前提。

在光路末端加上光栅和部分反射镜后,调整光路使得功率计读数达到最大值,可认为此时谐振腔实现了最佳的反馈效果。改变抽运功率,测量不同抽运功率条件下的输出激光功率,图 3 所示为输出激光功率随入纤功率的变化曲线。可见,随着入纤功率的增大,输出激光功率近似线性增加,且没有出

现饱和的迹象,最大抽运条件下的输出功率为 510 mW。如果抽运功率可以继续增大,则能够实现更高功率的激光输出。计算的斜率效率为 26%,与光纤厂商给定的斜率效率(35%)相比有一定差距。一方面是受光栅衍射效率的影响,另一方面是光纤端面的斜切没有经过专业的抛光处理,在一定程度上影响了激光器的效率。

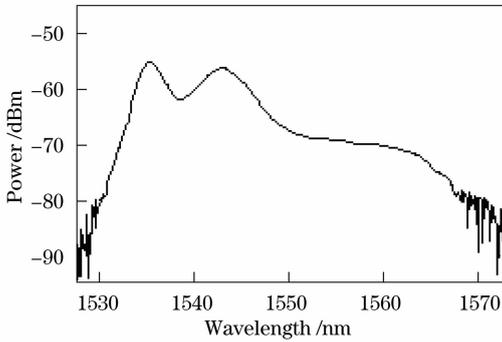


图 2 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺双包层光纤的荧光谱
Fig. 2 Fluorescence spectrum of $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ co-doped double-cladding fiber

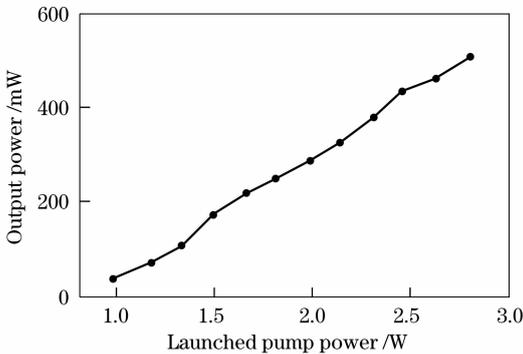


图 3 输出激光功率随入纤功率的变化曲线
Fig. 3 Output power versus launched pump power

利用光谱仪观察此时的激光谱,如图 4 所示。光谱仪扫描带宽设置为 1 nm,分辨率设置为 0.07 nm(该光谱仪的最小分辨率)。测得此时激光的峰值位于 1543.86 nm 处,显示的 3 dB 线宽为 0.072 nm,接近光谱仪的最小分辨率。在 2 min 内对该光谱进行 10 次重复扫描,结果显示输出激光的峰值和线宽没有发生变化,输出非常稳定。

保持抽运功率不变,调整部分反射镜的角度,实现激光器的调谐输出,对不同峰值的激光分别观测其输出光谱,如图 5 所示。激光器在不同波长下均获得了稳定的单模输出,调谐范围 1532~1568 nm,跨度约为 36 nm,几乎覆盖了整个荧光谱带宽,与目前其他形式的可调谐 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺光纤激光器的调谐范围相比^[15~17],具有一定的优势。不同峰值激

光谱的线宽有所区别,但均小于 0.08 nm。

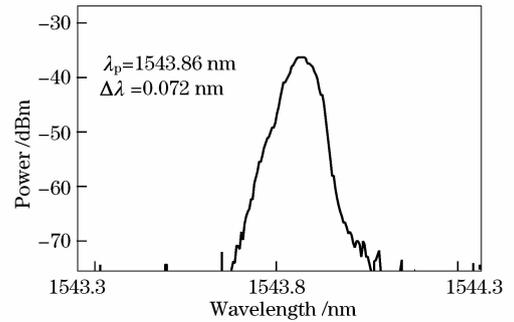


图 4 典型激光谱

Fig. 4 Typical laser spectrum

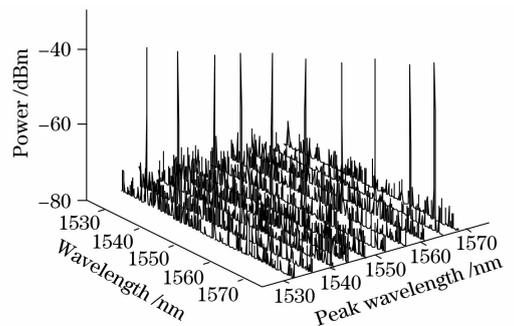


图 5 调谐输出激光谱

Fig. 5 Tunable output laser spectrum

图 6 给出了输出激光功率随波长的变化曲线。由图可以看出,在 36 nm 的调谐范围内,输出激光功率均高于 260 mW,且在 1533~1558 nm 范围内保持在 400 mW 以上,波长为 1543.86 nm 时获得最大输出功率 510 mW。输出功率随波长的变化而出现起伏,整体变化趋势与荧光谱形状相近,不能完全吻合的原因在于闪耀光栅对不同波长激光的衍射效率不同。

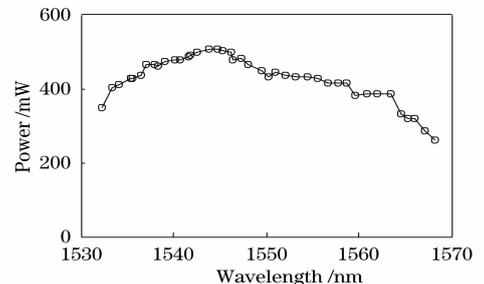


图 6 输出激光功率随波长的变化曲线

Fig. 6 Output power versus wavelength

4 结 论

利用闪耀光栅作为波长选择器件,实现了大模

面积 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺光纤激光器的宽带可调谐输出。波长调谐范围达 36 nm, 几乎覆盖了整个荧光谱宽度, 整个调谐范围内激光的 3 dB 线宽小于 0.08 nm。波长为 1543.86 nm 时获得最大输出功率 510 mW, 斜率效率为 26%。在 25 nm 调谐范围内, 激光功率高于 400 mW。若能够采用更高功率的抽运源, 并对光纤后端面进行专业的斜切抛光处理, 将能够进一步提高输出功率, 从而为 DWDM 光纤通信系统和高精度光纤传感系统提供较为理想的光源。

参 考 文 献

- Zhan Shengbao, Zhao Shanghong, Dong Shufu *et al.*. Effects of suppressing energy transfer upconversion in $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ codoped fiber laser[J]. *Laser & Infrared*, 2002, **32**(6): 400~403
占生宝, 赵尚弘, 董淑福等. $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺光纤激光器中能量上转换的抑制[J]. *激光与红外*, 2002, **32**(6): 400~403
- M. Laroche, S. Girard, J. K. Sahu *et al.*. Accurate efficiency evaluation of energy-transfer processes in phosphosilicate $\text{Er}^{3+}-\text{Yb}^{3+}$ -codoped fibers[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2006, **23**(2): 195~202
- Pei Xin, Xiang Wanghua, Tan Li *et al.*. Effect of Yb : Er codoping on suppressing self-pulsing in Er-doped fiber laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(1): 94~98
裴新, 向望华, 谭莉等. Yb : Er 共掺杂对掺铒光纤激光器中自脉冲行为的抑制作用[J]. *光学学报*, 2004, **24**(1): 94~98
- Wang Tianshu, Guo Yubin, Li Jun *et al.*. All-fiber type short cavity Er/Yb co-doped fiber laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(10): 1161~1164
王天枢, 郭玉彬, 李军等. 全光纤型 Er/Yb 共掺光纤短腔激光器[J]. *中国激光*, 2004, **31**(10): 1161~1164
- J. K. Sahu, Y. Jeong, D. J. Richardson *et al.*. A 103 W erbium-ytterbium co-doped large-core fiber laser [J]. *Opt. Commun.*, 2003, **227**: 159~163
- Y. Jeong, S. Yoo, C. A. Codemard *et al.*. Erbium : Ytterbium codoped large-core fiber laser with 297-W continuous-wave output power[J]. *IEEE J. Sele. Top. Quantum Electron.*, 2007, **13**(3): 573~579
- Guan Bai'ou, Guo Zhuanyun, Liu Zhiguo *et al.*. Tunable all fiber erbium-doped fiber ring laser with large tuning range[J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **A27**(3): 197~199
关柏鸥, 郭转运, 刘志国等. 宽带调谐全光纤环形激光器[J]. *中国激光*, 2000, **A27**(3): 197~199
- M. Ibsen, S. Y. Set, G. S. Goh *et al.*. Broad-band continuously tunable all fiber DFB laser [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2002, **14**(1): 21~23
- Jia Baohua, Sheng Qiuqin, Chen Kai *et al.*. A practical wavelength continuously tunable fiber laser with high-powered and low-noised[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(2): 133~136
贾宝华, 盛秋琴, 陈凯等. 一种实用化的高功率低噪声波长连续可调光纤激光器[J]. *中国激光*, 2004, **31**(2): 133~136
- Li Lijun, Fan Wande, Fu Shenggui *et al.*. Yb-doped double-clad fiber laser with frequency selecting by double-clad fiber Bragg grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(1): 55~58
李丽君, 范万德, 付圣贵等. 双包层光纤光栅选频双包层光纤激光器[J]. *光学学报*, 2005, **25**(1): 55~58
- 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): 139~144
- Li Yigang, Hou Guofu, Lü Kecheng *et al.*. Tunable 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 Yb^{3+} 双包层光纤激光器[J]. *中国激光*, 2003, **30**(11): 969~972
- Dong Fajie, Dai Wutao, Hu Shuling *et al.*. Tunable grating external-cavity Yb^{3+} double-cladding fiber laser with Littman setup[J]. *Chin. J. Quantum Electronics*, 2003, **20**(4): 419~421
董法杰, 戴武涛, 胡姝玲等. Littman 光栅外腔可调谐 Yb^{3+} 双包层光纤激光器[J]. *量子电子学报*, 2003, **20**(4): 419~421
- Liu Shengli, Li Yigang, Gao 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 Yb^{3+} 光子晶体光纤激光器[J]. *光学学报*, 2007, **27**(9): 1663~1667
- M. Salhi, H. Leblond, F. Sanchez. High power tunable all fiber double-clad Er : Yb : silicate fiber laser [J]. *Opt. Commun.*, 2005, **247**: 181~185
- Zhang Shumin, Lu Fuyun, Yang Xiufeng *et al.*. Wavelength tunable linear cavity cladding pump $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ co-doped fiber laser operating in L-band[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2005, **37**: 417~424
- J. W. Kim, P. Jelger, J. K. Sahu *et al.*. High-power and wavelength-tunable operation of an Er, Yb fiber laser using a volume Bragg grating[J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(11): 1204~1206