

文章编号: 0258-7025(2008)Supplement2-0009-04

# Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> 共掺双包层光纤放大器实验研究

杜伟敏 伍波 侯天晋 周鼎富

(西南技术物理研究所激光工程部, 四川 成都 610041)

**摘要** 对 1550nm 高功率窄线宽光纤放大器进行了实验研究。该放大器采用双级放大(MOPA)结构, 其中第一级预放采用 5 m 长的掺 Er<sup>3+</sup> 光纤, 将种子光信号放大到约 90 mW; 采用 15 m 长的 Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> 共掺双包层光纤放大器作为二级放大, 抽运源采用 2 支工作波长为 980 nm 的大功率激光二极管(LD), 抽运阈值功率约 1.3 W。当抽运功率为 10.8 W 时, 得到放大激光输出功率为 1.97 W, 光-光转换效率为 18%, 斜率效率为 21%, 增益大于 13 dB。所采用的种子光源为 1550 nm 单频窄线宽(DFB)LD, 输出功率为 10 mW; 采用延迟自外差方法对种子源及放大器输出的线宽进行测量, 测量结果显示该种子源及放大后的激光输出的 3 dB 线宽均约为 220 kHz, 在目前的实验条件下, 没有观察到放大后的激光线宽展宽现象。

**关键词** 光纤光学; 窄线宽; 单频; 光纤放大器; 自外差

中图分类号 TN253; TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL200835s2.0009

## Experimental Study on Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> Co-Doped Double-Clad Fiber Amplifier

Du Weimin Wu Bo Hou Tianjin Zhou Dingfu

(Laser Department, Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu, Sichuan 610041, China)

**Abstract** A 1550 nm high efficient narrow line width fiber amplifier was demonstrated. In this amplifier double-stages amplification (MOPA) structure was employed. For the 1<sup>st</sup> stage (preamplifier), a piece of 5 m Er<sup>3+</sup> doped fiber amplifier was used to amplify the seed laser signal to about 90 mW. And for the second-stage amplifier, a piece of 15 m Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> co-doped double-clad fiber amplifier which was pumped by two high power 980 nm LDs was employed to exhibit 1.97 W output with 10.8 W pump power. The conversion efficiency and slope efficiency reached 18% and 21% respectively, and a gain of more than 13 dB was obtained. In the experiment, a single frequency narrow line width(DFB) semiconductor laser with a pigtail was used as the seed source. The wavelength of the laser was 1.5 μm, and the output power may reached to about 10 mW. The line width of laser was measured by the delayed self-heterodyne method, The 3 dB line width of seed source and amplified laser was about 220 kHz. Under our current environment and conditions, the phenomenon that amplified laser line width was broadened was not found.

**Key words** fiber optics; narrow line width; single frequency; fiber amplifier; self-heterodyne

## 1 引 言

单频窄线宽(DFB)光纤放大器相比与固体单频激光器和稳频 CO<sub>2</sub> 激光器, 具有小型模块化、可靠性高、寿命长、不需要水冷、使用灵活及维护方便等特点, 在整机系统集成中其体积、重量、紧凑性及可靠性等方面都具有很大优势, 并且在价格上也具有较大优势, 因此 DFB 光纤放大器在激光雷达、激光测距、光电传感及科学仪器等领域有广泛的应用<sup>[1,2]</sup>。国外对窄线宽光纤激光器的研究技术成

熟, 目前已经有商用产品出售, 如美国 NP 公司采用 Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> 共掺光纤作为放大增益介质, 将短腔光纤光栅(DBR)激光器作为种子源并进行放大, 得到单纵模窄线宽连续激光输出, 放大后的激光线宽小于 3 kHz, 中心波长为 1550 nm, 最大输出功率可以达到 5 W。北京理工大学采用 10 m 长掺 Yb<sup>3+</sup> 双包层光纤, 以 976 nm LD 为抽运源, 将输出功率为 200 mW 的 1064 nm 连续单频激光信号光放大, 获得最大功率 16.1 W 的连续单频激光输出。国内

**作者简介:** 杜伟敏(1982—), 女, 硕士研究生, 主要从事光纤放大器的研究。E-mail: duwm2006@163.com

**导师简介:** 侯天晋(1956—), 男, 研究员, 主要从事激光技术的研究。E-mail: tianjinhou@gmail.com

对 1550 nm 波段的窄线宽激光器, 其放大特性及激光线宽特性研究报道的较少。

本文主要研制了 1.5  $\mu\text{m}$  高功率窄线宽光纤放大器。以 DFB LD 为种子源, 该放大器采用双级放大(MOPA)结构, 其中第一级预放采用 5 m 长的掺  $\text{Er}^{3+}$  光纤, 将种子光信号放大到约 90 mW; 采用 15 m 长的  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  共掺双包层光纤放大器作为二级放大, 得到高功率窄线宽激光输出; 并采用延迟自外差法<sup>[3]</sup>对窄线宽激光信号的线宽在放大前后的变化进行了测量和分析。

## 2 实验装置

掺  $\text{Er}^{3+}$  光纤放大器和  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  共掺双包层光纤放大器, 广泛用于 1.5  $\mu\text{m}$  波段光信号放大技术。其中掺  $\text{Er}^{3+}$  光纤放大器的增益光纤为单模单包层光纤, 纤芯耦合面积有限, 导致耦合效率低、增益性能弱。另外掺  $\text{Er}^{3+}$  光纤存在激发态吸收、浓度淬灭、能量转换等不利因素, 直接影响抽运转换效率和激光能量输出, 不适合高功率激光信号的放大, 一般将其用作低功率的光纤放大器, 或作为高功率放大器的前级预放大。对于高功率的光纤放大器, 一般采用  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  共掺双包层放大光纤, 利用  $\text{Yb}^{3+}$  和  $\text{Er}^{3+}$  离子间的能量传递, 使  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  共掺光纤放大器的吸收谱加宽, 以便在较宽的波长范围选择合适的抽运源, 提高光纤放大器的能量转换效率。以双包层光纤为基础的包层抽运技

术, 由于耦合面积比传统的单模光纤增加 2 个数量级<sup>[2, 3]</sup>, 降低了对抽运光模式的要求, 抽运耦合效率可达 84 % 以上, 且放大特性具有优良的噪声特性和增益平坦特性, 使放大器的放大功率提高到新的水平。

DFB 光纤放大器的实验装置如图 1 所示, 实验中采用 DFB LD 作为信号光源, 该激光器工作波长为 1.5  $\mu\text{m}$ , 输出功率约为 10 mW。设计制作了相应的驱动电路, 和 LD 集成在同一模块中, 采用精密的温度控制技术, 使 LD 的温度控制在 0.01  $^{\circ}\text{C}$  范围内变化, 保证输出激光的波长稳定。信号光首先经过掺  $\text{Er}^{3+}$  光纤放大器进行一级预放大, 然后进入双包层光纤放大器进行二级放大, 预放大的目的是提高注入到双包层光纤放大器的信号功率, 以得到尽可能高的放大功率。预放大级由波长 980 nm 的单模抽运源, 980/1550 nm 波分复用, 10 m 长吸收系数为 5 dB/m 的掺  $\text{Er}^{3+}$  光纤, 以及输出隔离器组成。实验中预放大级的抽运功率为 280 mW, 可以将种子光放大到约为 90 mW。二级放大采用 15 m Nufern 公司生产的  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  共掺双包层光纤作为放大增益介质, 该双包层光纤的纤芯直径 7  $\mu\text{m}$ , 在 1532 nm 波长处的峰值吸收系数为 30 dB。抽运源为两支 Lumics 公司的大功率激光二极管, 工作波长 980 nm, 单支最大输出功率为 6.5 W。信号光与抽运光通过  $(2+1)\times 1$  光纤合束器进入  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  共掺双包层光纤。

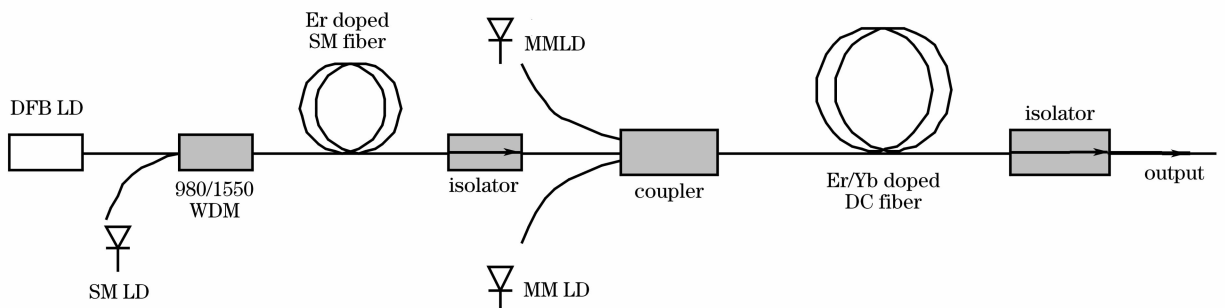


图 1 窄线宽光纤放大器的实验结构

Fig. 1 Structure of narrow line width fiber amplifier

在  $(2+1)\times 1$  光纤合束器信号输入端接入一个双级光纤隔离器, 并且在放大器输出端接入一个高功率光纤隔离器, 以防止放大器内部出现激光振荡<sup>[4, 5]</sup>。双包层  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  共掺放大器在 980 nm 抽运光的作用下, 会产生一定的放大自发辐射 (ASE)<sup>[3]</sup>, 但是注入一定功率信号光情况下, 由于增益竞争, ASE 将会得到极大的抑制, 信号光的信

噪比得到增强。由于放大的信号光功率远大于前向 ASE 光功率, 因此在放大器输出端可以不接入窄带滤波器。

## 3 实验结果与分析

信号光经过掺  $\text{Er}^{3+}$  光纤放大器预放大后的输出功率约为 90 mW, 再注入 15 m 长  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  共掺双

包层光纤放大器进行二级放大。逐渐增加 2 只抽运激光器输出功率至最大 10.8W, 抽运输入功率与光纤放大器激光输出功率的变化曲线如图 2 所示。

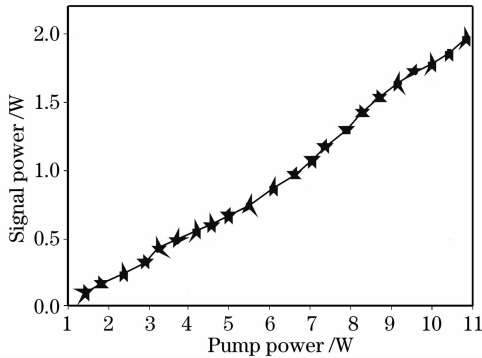


图 2 抽运功率与光纤放大器输出功率的关系  
Fig. 2 Curve of pump power and fiber amplifier output power

实验结果表明, 当输入的抽运功率为 1.3 W 时, 双包层光纤放大器输出信号光功率达到 90 mW, 放大功率随抽运功率的增加成线性增加, 当输入的最大抽运功率为 10.8 W 时, 光纤放大器的输出功率为 1.97 W, 斜率效率为 21%。实验得到的信号光放大功率较低, 其原因为光纤器件的插入损耗与连接损耗大, 实际有效信号光功率与有效抽运光功率较小, 最后导致放大功率较低。如实验中采用的滤波器、隔离器及合束器的插入损耗都大于 0.5 dB, 另外由于光纤合束器输出光纤与双包层增益光纤的包层形状不能完全匹配, 估计此处的连接损耗大于 1 dB, 光纤之间的熔接损耗至少达 0.1 dB, 信号通道的总损耗不少于 3.5 dB。

信号光放大后经衰减器衰减后的光谱如图 3 所示, 中心波长为 1549.48 nm, 3 dB 谱宽小于 0.05 nm(光谱仪最高精度)。在实验中, 没有发现有剩余抽运光输出。

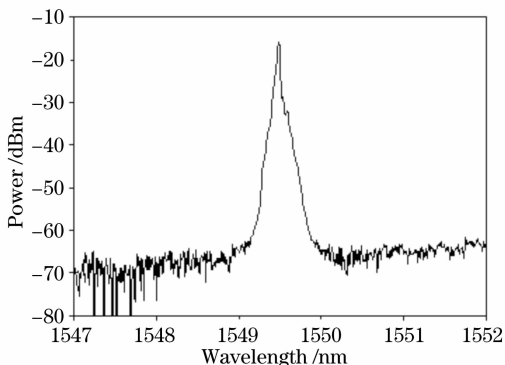


图 3 放大后的信号光谱

Fig. 3 Spectrum of magnified signal

## 4 激光线宽测量分析

在窄线宽激光器中, 由于不可避免地受到外界条件, 如温度、振动、抽运电源的波动等影响, 造成谐振腔腔长的变化和谱线频率的变化, 所以实际激光器的输出线宽总是比激光线宽极限大很多<sup>[6]</sup>。另外, 激光器中增益和损耗的无规涨落也会导致激光器纵模频率的漂移。而在窄线宽光纤放大器中, 放大器输出激光线宽的稳定性主要决定于主振激光器的性能。光纤放大器对激光线宽的影响主要是放大器中的相位噪声<sup>[7]</sup>。放大器中相位噪声对激光线宽的作用表现在放大器中具有随机相位的自发辐射光子叠加到信号光场中, 这些相位改变增加了信号光的本征相位波动, 从而引起激光谱线的增加。但是这种相位噪声引起的激光谱线展宽极不明显, 不容易观察到<sup>[8]</sup>。

实验中要求线宽测量精度达到千赫兹量级, 用普通的光谱分析仪或法布里-珀罗干涉仪测线宽, 无法满足测量精度的要求。目前测量千赫兹量级激光器线宽有延迟自外差及自零差测谱法等。自零差方法与自外差方法相比, 在实验中不需要使用声光移频器, 但是不能直接用标准射频频谱仪进行测量<sup>[9, 10]</sup>, 不利于实验分析。为了得到精确的激光器线宽, 选择采用延迟自外差方法测量光纤激光器线宽。

采用延迟自外差方法测量线宽, 线宽测量精度  $\Delta$  与延迟光纤长度  $L$  有直接的关系, 为

$$\Delta = \frac{0.5}{\tau_a} = \frac{0.5c}{Ln} \quad (1)$$

根据(1)式计算表明, 当采用 10 km 的延迟光纤时, 可以满足 10 kHz 线宽测量精度的要求。使用延迟自外差法, 其测量系统如图 4 所示, 系统包括 2 个 1×2 型 3 dB 的光纤耦合器, 中心频率为 70 MHz 的声光移频器(AOM), 10 km 的光纤延迟线, 光电探测器, 以及高精度频谱分析仪。

利用该测量装置, 对种子源输出激光线宽与放大后激光线宽进行了测量, 激光器发出的信号光经衰减器由耦合器分为两路, 一路经声光调制器移频 70 MHz, 另一路径约 10 km 的光纤延迟, 然后两路经耦合器合束差拍进入光电转换器, 再由频谱分析仪观察差拍后的频率谱, 其测量结果如图 5 所示。

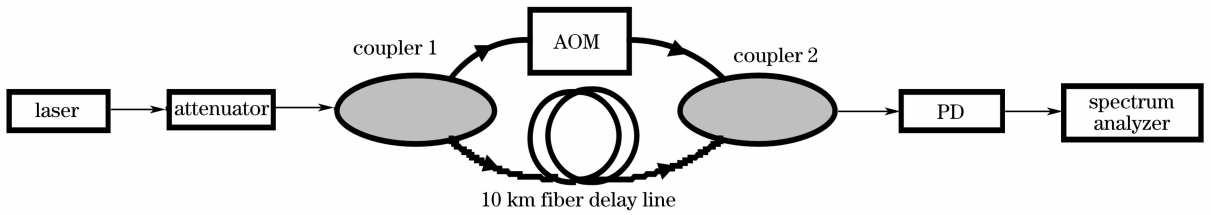


图 4 延迟自外差实验结构示意图

Fig. 4 Configurations of self-heterodyne

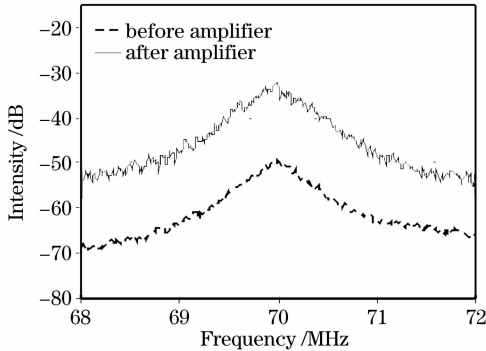


图 5 激光的自外差光电流曲线

Fig. 5 Self-heterodyne photocurrent curve of laser

从图 5 可看出, 半导体种子源输出激光的 3 dB 线宽为 220 kHz, 信号激光经光纤放大器放大后, 放大器输出激光的 3 dB 线宽仍然为 220 kHz, 说明半导体种子源输出的窄线宽激光经过放大后, 在目前的工作环境与条件下没有发现放大后激光线宽被展宽的现象。该结论与国内外其他的实验研究结果一致<sup>[6~8]</sup>。

## 5 结 论

研究了 1.5  $\mu\text{m}$  波长的高功率窄线宽光纤放大器。输出为 10 mW 的种子光信号先通过掺  $\text{Er}^{3+}$  光纤放大器进行一级预放大, 再通过  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  共掺双包层增益光纤进行二级放大后, 实现了激光信号的增益大于 22 dB。采用高功率接入光纤隔离器的方式, 以防止放大器内部出现激光振荡。采用延迟自外差法测量了激光通过光纤放大器放大前后的线宽都为 220 kHz, 没有观察到光纤放大器对窄线宽激光线宽的影响。

## 参 考 文 献

- 1 Lei Xu, Ivan Glesk, Darren Rand *et al.*. Suppression of beating noise of narrow linewidth erbium-doped fiber ring lasers by use of a semiconductor optical amplifier[J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(10): 780~782
- 2 G. de Geronimo, S. Taccheo, P. Laporta. Optoelectronic feedback control for intensity noise suppression in a codoped erbium-ytterbium glass laser [J]. *Electron. Lett.*, 1997, **33**(15): 1336~1337
- 3 Sun Wenfeng, Zhao Changming, Wei Guanghui. LD pump fiber amplifier with high power and single frequency [J]. *Opt. Technique*, 2005, **31**(6): 827~830
- 4 Xia Guijin, Zhang Jumei, He Haiguang. Study on the upper state population distribution of double cladding erbium-ytterbium co-doped fiber amplifiers [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(6): 654~657  
夏贵进, 张居梅, 何海光. 双包层 Er-Yb 共掺光纤放大器上能级粒子数分布研究[J]. *光子学报*, 2004, **33**(6): 654~657
- 5 Wu Bo, Liu Yongzhi, Li Shuang *et al.*. 1550 nm high efficient narrow linewidth fiber laser[J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2007, **18**(7): 770~772  
伍波, 刘勇智, 刘爽等. 1550 nm 高效窄线宽光纤激光器[J]. *光子学报*, 2007, **18**(7): 770~772
- 6 H. Okamura, K. Iwatsuki. Spectral linewidth broadening in Er-doped-fiber amplifiers measure with less than 1.4 kHz linewidth light source[J]. *Electron. Lett.*, 1990, **26**(23): 1965~1967
- 7 D. Simeonidou, S. Hamidi, A. S. Siddiqui. Spectral linewidth broadening in erbium-doped and Raman fibre amplifier [J]. *Electron. Lett.*, 1992, **28**(18): 1765~1766
- 8 G. J. Cowle, P. R. Morkel, R. I. Laming *et al.*. Spectral broadening due to fiber amplifier phase noise [J]. *Electron. Lett.*, 1990, **26**(7): 424~425
- 9 Hame Ludvigsen, Mika Tossavainen, Matti Kaivola. Laser linewidth measurements using self-homodyne detection with shot delay[J]. *Opt. Commun.*, 1998, **155**: 180~186
- 10 Jay W. Dawson, Namkyoo Park, Kerry J. Vahala. An improved delayed self-heterodyne interferometer for line width measurements[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1992, **4**(9): 1063~1066