

文章编号: 0258-7025(2009)07-1866-04

# 高功率窄线宽光纤放大器及放大线宽特性

伍 波 杜伟敏 侯天晋 杨泽后 樊 冬 周鼎富

(西南技术物理研究所激光工程部, 四川 成都 610041)

**摘要** 研制了高功率窄线宽光纤放大器。该放大器采用双级放大结构, 其中第一级预放为掺  $\text{Er}^{3+}$  光纤放大器, 第二级功率放大采用 10 m 长的  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  共掺双包层光纤作为增益介质, 抽运源采用两支波长为 980 nm 的大功率激光二极管。当抽运功率为 10.7 W 时, 得到放大激光输出功率为 1.94 W, 光-光转换效率为 17%, 斜率效率 20%。采用延迟自外差方法对种子激光器及各级放大器输出的激光线宽进行了测量, 测量结果表明窄线宽激光谱线经过掺  $\text{Er}^{3+}$  光纤与双包层光纤放大后均有不同程度的明显展宽。分析认为激光线宽展宽的主要原因是由于种子激光器中弛豫振荡或自脉冲的强度波动引起的自相位调制。

**关键词** 激光技术; 双包层光纤放大器; 窄线宽; 延迟自外差方法

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093607.1866

## High Power Narrow Linewidth Fiber Amplifier and Laser Linewidth

Wu Bo Du Weimin Hou Tianjin Yang Zehou Fan Dong Zhou Dingfu

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

**Abstract** A two-stage high power narrow linewidth fiber amplifier was demonstrated. The first stage was single mode  $\text{Er}^{3+}$  doped fiber amplifier. The double clad  $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  co-doped fiber amplifier was designed as power amplifier in which two 980 nm high power laser diodes were used as the pump sources. With the maximum pump power of 10.7 W, the amplifier output powers was 1.94 W and the optical-optical conversion efficiency was 20%, the slope efficiency was 17%. The 3 dB linewidth of seed laser and each amplifier were measured by the delayed self-heterodyne method with 10 km single mode fiber. The results show that obvious spectral broadening happens during the amplification process. The reason of spectral broadening is owing to self-phase modulation caused by intensity fluctuations of relaxation oscillations or self-pulsing.

**Key words** laser technique; double clad fiber amplifier; narrow linewidth; delayed self-heterodyne method

## 1 引 言

窄线宽高功率激光在光电传感、激光雷达、光谱学等领域有非常广泛的应用。采用光纤放大方式得到的窄线宽激光器具有功率高、体积小、结构简单、可控性和输出频谱特性好等优点。随着包层抽运技术与大功率抽运激光二极管的发展, 窄线宽光纤放大器在转换效率与输出功率都得到大幅度提高, 因其在高功率和线宽特性方面的独特优势而成为人们研究的热点。窄线宽光纤激光器发展迅速, 2003 年, 英国南安普顿大学 S. U. Alam 等<sup>[1]</sup> 进行两级主振荡功率放大, 实现了激光波长 1549 nm, 线宽小于 30 kHz, 功率 14 W 的全光纤结构、窄线宽连续激光输出。2007 年, 德国 Matthias Hildebrandt 等<sup>[2]</sup> 使用光子晶体光纤放大器, 放大得到单频激光输出

功率为 148 W。2007 年, 南安普顿大学的 Y. Jeong 等<sup>[3]</sup> 采用输出信号功率为 80 mW, 线宽为 60 kHz 全光纤分布反馈布拉格 (DFB) 激光器作为种子源, 使用 4 级光纤放大器级联的全光纤结构放大器结构, 得到输出功率为 402 W 的单频保偏连续激光输出。对于窄线宽光纤激光器的应用来说, 激光线宽直接决定了系统的探测距离。因此, 光纤放大后的激光线宽情况也引人关注, 进行了非常多的实验研究。但是从这些实验中得到的关于光纤放大器对激光线宽的影响结论却各不相同。最早在 1990 年, G. J. Cowle 等<sup>[4]</sup> 在掺  $\text{Er}^{3+}$  光纤放大器中观察到了信号光的谱线展宽, 并给出了描述这个现象的数学模型。他们认为放大器中与激光信号异相的自发辐射光子引起了明显的相位波动, 从而导致激光谱线的展宽,

收稿日期: 2009-03-31; 收到修改稿日期: 2009-04-28

作者简介: 伍 波(1979—), 男, 博士后, 主要从事光纤激光器与放大器等方面的研究。E-mail: w\_bo@sohu.com

并且计算得到如果激光线宽为 1.2 MHz, 则增益为 20 dB 的光纤放大器引起的展宽为 4.2 kHz。1998 年, Lothar Moller<sup>[5]</sup> 的实验结果认为光纤放大对激光线宽的影响小于 10 Hz。2001 年, E. Rochat 等<sup>[6]</sup> 分别使用线宽为 5 kHz, 500 kHz, 18 GHz 的激光器作为种子光进行光纤放大, 在 3 个实验中均未观察到任何线宽展宽现象。2001 年, S. Höfer 等<sup>[7]</sup> 以 NPRO 窄线宽激光器为种子光, 通过大模场光纤放大器得到 20 W 的放大信号输出。在实验中观察到了激光线宽从 1.12 kHz 展宽到 1.56 kHz, 并且认为线宽展宽的原因是由于弛豫振荡的强度波动引起的自相位调制。国内对单频光纤激光器与高功率光纤放大器研究较多<sup>[8,9]</sup>, 但是对窄线宽激光放大特性及激光线宽特性研究报道得较少。

本文以 DFB 光纤激光器为种子光, 采用两级光纤放大器, 得到了功率 2 W, 线宽 13.5 kHz 的窄线宽单频激光输出。采用延迟自外差方法对光纤放大器对激光线宽的影响进行了实验分析。

## 2 高功率窄线宽光纤放大器实验

窄线宽光纤放大器的实验装置如图 1 所示, 信号光首先经过掺 Er<sup>3+</sup> 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, 最大输出功率为 330 mW 的半导体激光器

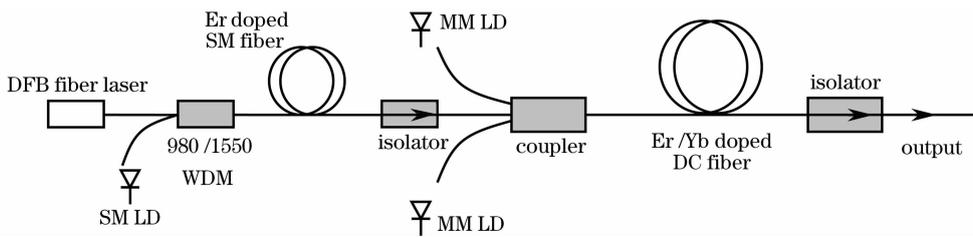


图 1 窄线宽光纤放大器的实验结构

Fig. 1 Experimental setup of narrow linewidth fiber amplifier

实验中首先测试了掺 Er<sup>3+</sup> 光纤放大器的输出功率。调节种子光输出功率为 14 mW, 当掺 Er<sup>3+</sup> 光纤放大器的抽运功率为 300 mW 时, 最大可输出放大信号光功率为 114 mW。将信号光经过一级掺 Er<sup>3+</sup> 光纤放大器预放大到 100 mW, 再注入 10 m 长 Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> 共掺双包层光纤放大器进行二级放大。实验中逐渐增加两只大功率抽运激光器的输出功率, 得到抽运功率与光纤放大器激光输出功率的关系曲线如图 2 所示。

由图 2 可知, 当输入的信号光功率约为

单模抽运源, 980/1550 nm WDM, 10 m 长吸收系数为 5 dB/m 的掺 Er<sup>3+</sup> 光纤, 以及输出隔离器组成。二级放大采用 10 m Nufern 公司生产的 Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> 共掺双包层光纤作为放大增益介质, 光纤型号为 SM-EYDF-7/130, 该双包层光纤的纤芯直径为 7 μm, 在 1535 nm 波长处的峰值吸收系数为 30 dB/m, 在 915 nm 波长处的峰值吸收系数为 0.6 dB/m。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)×1 光纤合束器进入 Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> 共掺双包层光纤。实验中在 (2+1)×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。双包层 Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> 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)。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。为了防止双包层光纤中 1030 nm 波段的后向 ASE 对抽运源的损伤, 在单模及多模抽运源输出端都连接了滤波保护器, 可以阻止 1000 nm 以上波长的激光进入抽运源。实验中采用的种子激光器为短腔 DFB 光纤激光器, 中心波长 1545.8 nm, 输出功率可调, 最大输出功率约 50 mW。

100 mW 时, 双包层光纤放大器输出信号光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 10.7 W 时, 光纤放大器的输出功率为 1.94 W, 斜率效率约为 20%, 光-光转换效率为 17%。放大器效率较低的原因主要在于合束器输出光纤与增益光纤包层形状不匹配造成的熔接损耗过大以及各元器件的插入损耗等, 导致放大器有效抽运功率远小于抽运激光器输出功率。实验采用光谱分析仪进行实验记录, 光谱仪最高精度为 0.05 nm。将双包层光纤放大器输出激光经衰减后测量的光谱如图 3 所

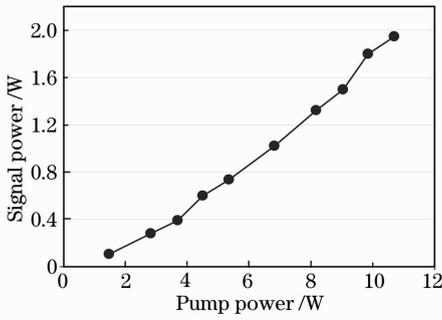


图2 输出功率随抽运功率的变化

Fig. 2 Output power versus pump power

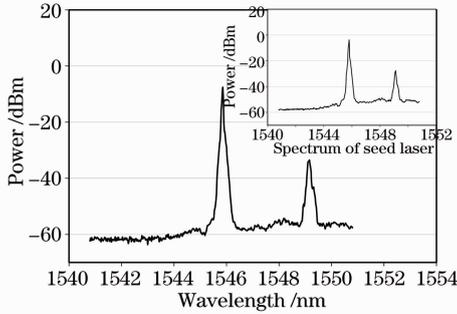


图3 种子激光器光谱与双包层光纤放大器输出光谱

Fig. 3 Output spectrum of the seed laser and double clad fiber amplifier

示,由光谱仪分析得到信号光中心波长为1545.8 nm, 3 dB 谱宽小于 0.05 nm(光谱仪最高精度)。通过光

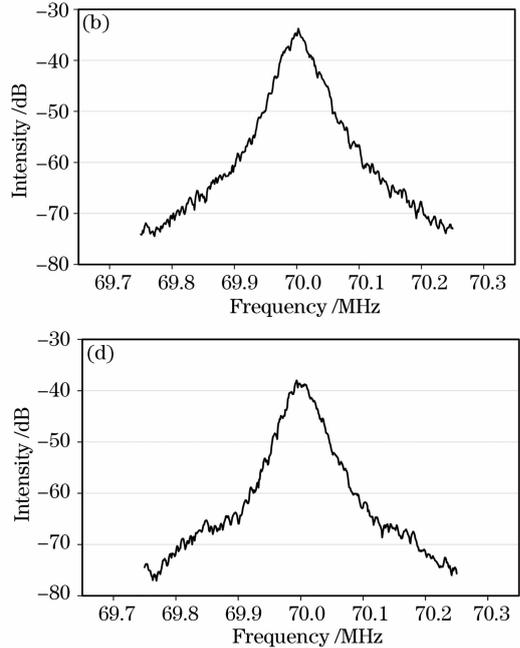
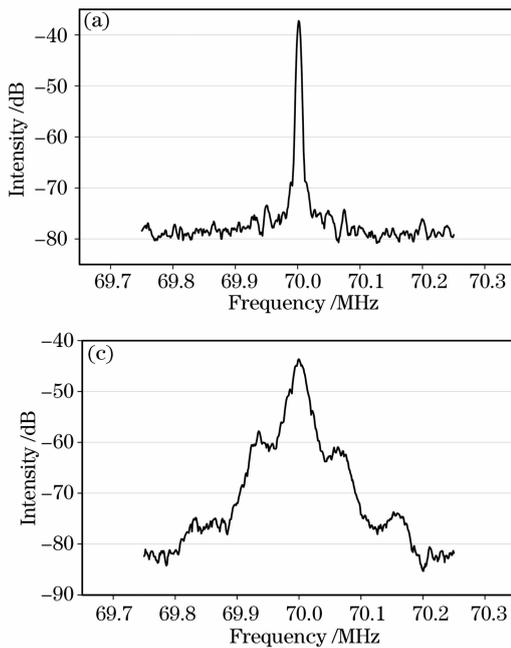


图5 延迟自外差线宽测量结果。(a)种子光线宽;(b)掺 Er<sup>3+</sup> 光纤放大后线宽;(c)双包层光纤放大后线宽;(d)两级光纤放大后线宽

Fig. 5 Heterodyne signal. (a) Linewidth of seed laser; (b) laser linewidth of EDFA; (c) laser linewidth of double clad fiber amplifier; (d) laser linewidth of two-stage fiber amplifier

谱仪观察没有发现剩余抽运光输出。

### 3 激光线宽测量与结果分析

采用延迟自外差方法分别测量了 DFB 光纤种子激光器的激光线宽、种子光经掺 Er<sup>3+</sup> 光纤放大器放大后的激光线宽、种子光经掺 Er<sup>3+</sup> 光纤放大与双包层光纤二级放大后的线宽以及种子光直接经过双包层光纤放大后的激光线宽。延迟自外差激光线宽测量的整个实验系统结构如图 4 所示,系统组成包括:10 km 单模光纤延迟线,中心频率为 70 MHz 的声光移频器,2 个 1×2 型 3 dB 光纤耦合器,2 GHz 带宽低噪声光电探测器以及带傅里叶频谱分析功能的 Tektronix TDS7404 示波器,该示波器测量频率宽度为 4 GHz,采样率为 2×10<sup>-3</sup> T/s。激光线宽测量结果如图 5 所示。

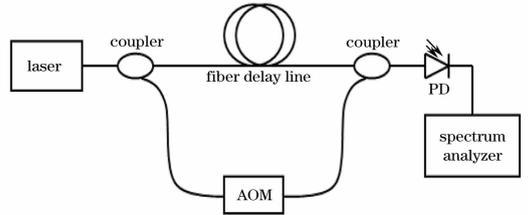


图4 延迟自外差实验结构示意图

Fig. 4 Experimental setup for delayed self-heterodyne measurement

由示波器分析图 5 所示的光电流谱线可以得到 DFB 光纤种子激光器的 3 dB 线宽为 3 kHz, 由于测量精度的限制, 可以认为种子激光器的 3 dB 线宽小于 10 kHz. 测量得到只经过掺  $\text{Er}^{3+}$  光纤放大后的激光 3 dB 线宽为 11.5 kHz, 只经过双包层光纤放大后的激光 3 dB 线宽为 9 kHz, 经过二级光纤放大后的激光 3 dB 线宽为 13.5 kHz. 由线宽测量结果可知, 窄线宽激光谱线经过掺  $\text{Er}^{3+}$  光纤与双包层光纤放大后均有不同程度的明显展宽。

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荡激光器的性能. 光纤放大器对激光线宽影响的一个主要因素是光纤放大器中的相位噪声. 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, 不容易观察到放大激光的线宽变化. 光纤放大器对激光线宽产生影响的另一个主要因素是光纤放大器将种子激光器中的弛豫振荡或自脉冲放大导致产生自相位调制效应而引起激光谱线展宽. 脉冲抽运的静态固体激光器输出是由一连串不规则振荡的尖峰脉冲构成的, 这种现象称为激光的弛豫振荡, 另外在连续光纤激光器中也经常观察到自脉冲现象<sup>[10~12]</sup>. DFB 种子激光器中的弛豫振荡脉冲或自脉冲经过光纤放大后, 在光纤介质中产生自相位调制现象, 它将导致脉冲的频谱展宽. 实验中发现的放大后激光线宽明显展宽的原因应该是由种子激光器中出现弛豫振荡或自脉冲现象引起的。

## 4 结 论

进行了两级高功率窄线宽光纤放大器实验研究, 最后得到放大激光输出功率为 1.94 W, 光-光转换效率为 17%, 斜率效率 20%. 采用延迟自外差方法对种子激光器及各级放大器输出的激光线宽进行了测量, 测量结果表明窄线宽激光谱线经过掺  $\text{Er}^{3+}$

光纤与双包层光纤放大后均有不同程度的明显展宽. 分析认为激光线宽展宽的主要原因是由于种子激光器中弛豫振荡或自脉冲的强度波动引起的自相位调制。

## 参 考 文 献

- 1 S. U. Alam, R. Wixey, L. Hickey *et al.*. High power, single mode, single frequency DFB fibre laser at 1550 nm in MOPA configuration[C]. *CLEO*, 2004, CMKT: 1~2
- 2 Matthias Hildebrandt, Maik Frede, R. Wilhelm *et al.*. Single-frequency master-oscillator photonic crystal fiber amplifier with 148 W output power [J]. *Opt. Express*, 2006, **14** (23): 11071~11076
- 3 Yoonchan Jeong, Johan Nilsson, K. Jayanta *et al.*. Power scaling of single frequency ytterbium-doped fiber master-oscillator power amplifier sources up to 500 W [J]. *IEEE Sel. Top. Quantum Electron.*, 2007, **13**(3): 546~551
- 4 G. J. Cowle, P. R. Morkel, R. I. Aming *et al.*. Spectral broadening due to fiber amplifier phase noise [J]. *Electron. Lett.*, 1990, **26**(7): 424~425
- 5 Lothar Moller, Novel aspects of spectral broadening due to fiber amplifier phase noise [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1998, **34**(9): 1554~1558
- 6 E. Rochat, R. Dandliker. New investigations on the effect of fiber amplifier phase noise [J]. *IEEE Sele. Top. Quantum Electron.*, 2001, **1**(7): 49~54
- 7 S. Höfer, A. Liem, J. Limpert *et al.*. Single-frequency master-oscillator fiber power amplifier system emitting 20 W of power [J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(17): 1326~1328
- 8 Wang Li, Chen Bai, Chen Jialin *et al.*. Fabrication of Yb-doped phase-shifted fiber grating laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(12): 1617~1620  
王 利, 陈 柏, 陈嘉琳 等. 一种制作掺 Yb 相移光纤光栅激光器的实验方案 [J]. *中国激光*, 2007, **34**(12): 1617~1620
- 9 Chang Liping, Fan Wei, Wang Li *et al.*. Amplification performance of large- and small-mode-area ytterbium-doped double-clad fiber amplifier [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(11): 1492~1497  
常丽萍, 范 薇, 王 利 等. 掺镱双包层光纤放大器的放大特性 [J]. *中国激光*, 2007, **34**(11): 1492~1497
- 10 Hongmin Chen, Guanghao Zhu, Niloy K. Dutta *et al.*. Suppression of self-pulsing behavior in erbium-doped fiber lasers with a semiconductor optical amplifier [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(18): 3511~3516
- 11 Bulend Ortac, Ammar Hideura, Thierry Chartier *et al.*. Influence of cavity losses on stimulated Brillouin scattering in a self-pulsing side-pumped ytterbium-doped double-clad fiber laser [J]. *Opt. Commun.*, 2003, **215**: 389~395
- 12 A. Martinez-Rios, I. Torres-Gomez, G. Anzueto-Sanchez *et al.*. Self-pulsing in a double-clad ytterbium fiber laser induced by high scattering loss [J]. *Opt. Commun.*, 2008, **281**: 663~337