

文章编号: 0253-2239(2010)03-0692-04

高功率单频保偏光纤放大器输出特性研究

刘 驰^{1,2} 漆云凤¹ 周 军^{1*} 杜松涛¹ 何 兵¹ 董景星¹ 魏运荣¹ 楼祺洪¹ 王之江¹

(¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所,上海市全固态激光器与应用技术重点实验室,上海 201008)
² 中国科学院研究生院,北京 100049)

摘要 研制了输出功率达 17.3 W 的单频保偏掺镱光纤放大器,并对其输出激光特性进行了实验研究。该光纤放大系统以 Nd:YVO₄ 单频固态激光器为种子源,以保偏光纤为增益介质,通过二级光纤放大,获得了波长为 1064 nm 的单频线偏振激光输出,输出激光功率达 17.3 W。功率放大级光纤放大器的斜率效率为 62.8%,光-光转换效率为 57.6%,偏振消光比为 24.3 dB。

关键词 光纤光学;光纤放大器;偏振保持;消光比

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103003.0692

Study on Characteristics of High-Power Single-Frequency Polarization Maintaining Fiber Amplifier

Liu Chi^{1,2} Qi Yunfeng¹ Zhou Jun¹ Du Songtao¹ He Bing¹ Dong Jingxing¹

Wei Yunrong¹ Lou Qihong¹ Wang Zhijiang¹

¹ Key Laboratory of All Solid-State Laser and Applied Techniques of Shanghai, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China
² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract We report on a single-frequency polarization maintaining (PM) ytterbium-doped fiber (YDF) amplifier by using a single-frequency Nd:YVO₄ oscillator seed source and a large-mode-area panda polarization maintaining fiber. The system generates single-frequency radiation up to 17.3 W at 1064 nm wavelength with 62.8% slope efficiency, 57.6% optical-optical power conversion efficiency and the polarization extinction ratio is better than 24.3 dB. The spectral characteristic, output power characteristic and polarization characteristic of the single-frequency PM YDF amplifier are discussed in detail.

Key words fiber optics; fiber amplifier; polarization maintaining (PM); extinction ratio

1 引 言

单频、线偏振和高功率激光在激光雷达、光谱学和精密测量等领域有非常广泛的应用^[1~4],特别是在集成光学光纤相干通信、光纤传感器和光纤陀螺仪的应用中,需要光束有良好的偏振稳定以保证系统的高性能^[5~7]。随着包层抽运技术的出现,以双

包层保偏光纤为放大介质的单频光纤放大器的输出功率和转换效率得到了大幅度提高^[8]。近年来,基于振荡-功率放大(MOPA)方式的光纤激光器因其独特的优势而成为人们研究的热点。1999年 I. Zawischa 等^[9]利用 30 m 掺 Nd³⁺ 光纤放大,获得了波长 1064 nm、功率 5.5 W 的单频输出。2001年 S.

收稿日期: 2009-03-31; **收到修改稿日期**: 2009-06-26

基金项目: 国家 863 计划(2008AA03Z405)资助课题。

作者简介: 刘 驰(1978—),男,博士研究生,主要从事高功率双包层光纤激光器和放大器等方面的研究。

E-mail: xu.chil@163.com

导师简介: 楼祺洪(1942—),研究员,博士生导师,主要从事光学、激光技术及其应用等方面的研究。

E-mail: qhlou@mail.shenc.ac.cn

* 通信联系人。E-mail: junzhousd@siom.ac.cn

Höfer 等^[10]利用 9 m 长的掺 Yb³⁺ 双包层光纤, 获得 20 W, 1064 nm 的单频激光输出。2003 年 A. Liem 等^[11]以 NPRO 为种子源, 以 9.4 m 大模场面积双包层光纤为增益介质, 获得了 100 W 的单频输出。2005 年 Y. Jeong 等^[12,13]利用分布反馈式 (DFB) 激光器为种子光源, 采用四级光纤级联放大的方式, 获得了输出功率 264 W 的窄线宽 (大于 60 kHz)、近衍射极限的偏振激光输出。2007 年孙文峰等^[14]采用 10 m 的掺 Yb³⁺ 双包层光纤为放大器, 得到了 16.1 W 的放大激光输出。张芳沛等^[15,16]获得 7.3 W 的单频脉冲输出。

本文报道了高功率单频保偏光纤放大器研制方面的实验结果。在单频光纤放大系统中, 以 Nd:YVO₄ 单频激光器作为种子源, 经过光纤预放大和光纤功率放大, 获得了 17.4 W 的 1064 nm 的单频线偏振放大激光输出, 线偏输出光消光比达到 24.3 dB; 并对该保偏光纤放大系统的输出特性进行了详细的实验研究。

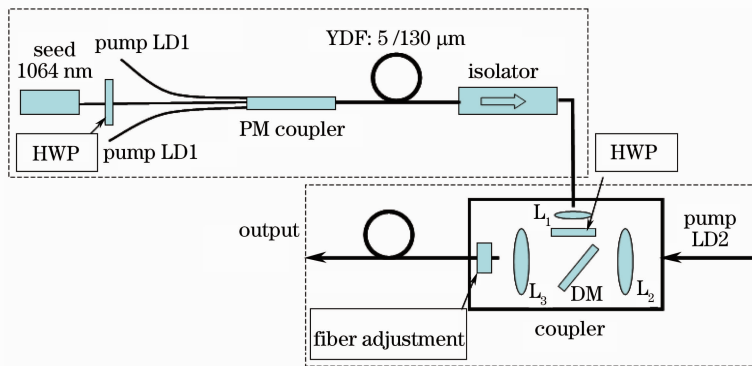


图 1 单频保偏 YDF 放大器实验装置图

Fig. 1 Experimental setup of single-frequency polarization maintaining (PM) YDF amplifier

在光纤功率放大模块中, 采用分立光学元件的抽运耦合方式, 以 14 m 的大模场面积保偏掺镱双包层光纤 (纤芯 20 μm, NA=0.07; 内包层 400 μm, NA=0.46) 为放大介质, 以光纤预放大模块的输出为信号光, 抽运源是 30 W 的半导体光纤耦合模块 (波长 976 nm), 输出尾纤芯径为 200 μm, NA=0.22。为抑制光纤放大中的放大自发辐射 (ASE) 及自激振荡, 双包层光纤的两端都磨抛成 8° 的倾角, 信号光和抽运光首先分别通过透镜 L₁ 和 L₂ 准直, 并利用一 45° 双色片 DM (976 nm 高透, 1064 nm 高反) 合成一束, 最后通过非球面透镜 L₃ 实现抽运光到光纤内包层、信号光到纤芯的高效率耦合。同光纤预放大类似, 通过调节半波片来实现信号光沿双包层光纤的慢轴传输和放大。所用的大模场面积增

2 实验装置

单频保偏光纤放大器的结构如图 1 所示, 主要包括种子光源、光纤预放大模块和光纤功率放大模块三部分。种子源波长为 1064 nm、输出功率 60 mW 的全固态 Nd:YVO₄ 单频固体激光器。在光纤预放大中, 13 m 的掺镱保偏双包层光纤 (纤芯 5 μm, NA=0.15; 内包层 130 μm, NA=0.46) 为放大介质, 抽运源为中心波长为 1064 nm、功率 5 W 的尾纤输出 (纤芯 100 μm, NA=0.11) 的半导体激光器, 通过 (2+1)×1 的光纤耦合器将种子光和抽运光耦合到放大光纤中。由于功率放大中背向散射等后向传输光的存在, 将会影响种子光源的正常工作, 因此采用光隔离器对种子光源进行保护。在光纤预放大模块中所有的光学器件均通过光纤熔接而成, 构成稳定性小型化模块。图 1 中的 HWP 为半波片, 通过转动半波片可以实现种子激光的慢轴对准传输和放大。

益光纤纤芯归一化频率 $V=4.13$, 属于多模光纤, 因此要想获得高光束质量的放大激光输出, 必须采取一定的模式控制技术。理论和实验表明, 对大模场面积双包层光纤进行适当地弯曲缠绕, 可以增大高阶模的损耗, 从而得到近基模的激光输出。为保证放大激光具有近衍射极限的光束质量, 将光纤缠绕在直径为 10 cm 的圆筒内壁。

3 实验结果

3.1 输出功率特性

光纤预放大模块的单频输出功率可达 1.5 W, 在本文实验装置中, 将 60 mW 的种子光放大到 300 mW 足以满足后续功率放大的要求。因此, 从散热和稳定性等方面考虑, 将该光纤预放大模块的输出功率标定

为 300 mW。在光纤功率放大模块中,耦合光学系统可将放大的信号光高效耦合进入功放光纤的纤芯,耦合效率约为 80%。图 2 为光纤功率放大模块的输出功率曲线。当抽运功率为 30 W 时,获得了 17.3 W 的放大激光功率输出,斜率效率为 62.8%,光-光转换效率为 57.6%。实验发现,光纤的端面处理是影响功率放大模块的重要因素之一。通过对光纤输出端面

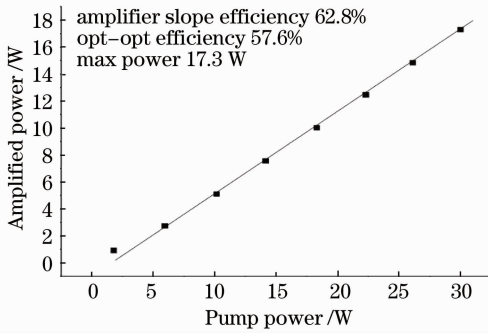


图 2 单频保偏 YDF 放大器的输出功率特性

Fig. 2 Output power characteristic of single-frequency PM YDF amplifier

磨处理,的研可以有效地抑制 ASE 及自激,获得较高的激光转换效率。由图 2 可知,放大激光功率随抽运功率增加而线性增大,表明继续提高抽运功率,该光纤功率放大模块可实现更高功率的放大激光输出。

3.2 输出光谱特性

采用分辨率为 0.02 nm 的光纤光谱仪对放大激光的输出光谱特性进行了测量。图 3(a)为单频种子光 60 mW 所对应的激光谱线、光纤预放大模块输出 300 mW 时的激光光谱和光纤功率放大模块输出 17.3 W 时的激光光谱。从三个光谱的对比可以看出,除了强度有所不同外,放大激光的光谱特性和种子光的光谱特性几乎是完全相同,说明放大后的激光保持了种子激光的单频特性。从涵盖抽运光波段的光谱曲线[图 3(b)]中,可以看到在最大激光功率输出时,没出现 ASE 和自激震荡,表明增加更大抽运功率,可以获得更高的单频激光输出功率。同时,可以看出,在输出光谱中还有部分未被吸收的抽运光(976 nm)存在,但已经非常少,可以在输出端加一 976 nm 的滤光片或采用抽运滤除器将抽运光滤除。

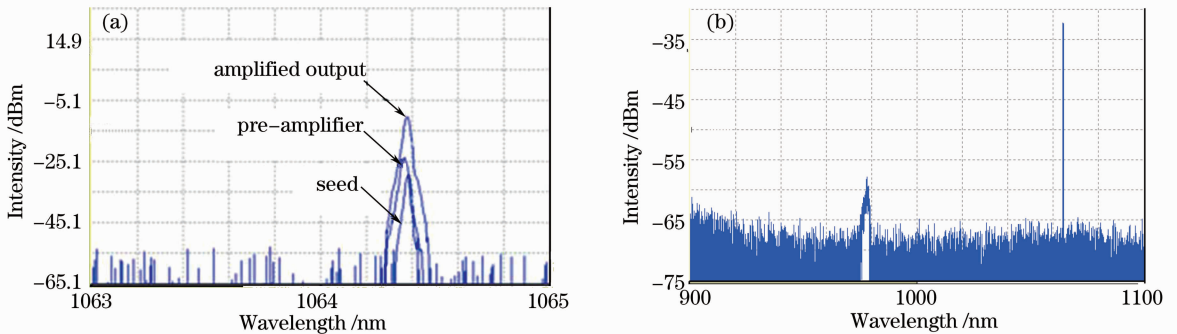


图 3 单频保偏 YDF 放大器输出光谱。(a)种子光、预放大模块及功率放大模块输出光谱;
(b)功率放大模块输出光谱(包含抽运光)

Fig. 3 Output spectrum of single-frequency PM YDF amplifier. (a) output spectrum of seed, pre-amplifier and power amplifier module; (b) output spectrum of power amplifier module (including pump laser)

3.3 输出偏振特性

在装置中,激光偏振的调节是通过转动半波片来实现的。放大激光的偏振特性或消光比的测量可通过旋转半波片时,测量透过检偏镜的输出功率来进行。所用检偏镜为消光比可达 50 dB 的方解石偏光棱镜。图 4 给出了放大输出激光功率为 15 W 时信号光偏振角度转过 180°时输出激光消光比的变化曲线图,消光比最高可达 24.3 dB。固定此时半波片的位置,即可获得消光比达 24.3 dB 的线偏振激光输出。实验中测得的光纤预放大模块输出激光的消光比可达 30 dB,可见通过光纤功率放大模块后,输出激光的偏振消光比有所降低。引起消光比降低的原因有:1)

在两级光纤放大模块间,是通过半波片的转动来匹配光路中对偏振方向的要求的。半波片的转动和定位精度影响了光路中偏振相关光学元件偏振方向对准。光纤环偏振控制器相对半波片稳定性和偏振方向匹配精度更高,但在光纤功率放大模块中不太合适,作为增益介质的光场光纤弯曲的曲率半径不能太小。2)14 m 的增益光纤相对较长,在保证转换效率的前提下,适当缩短放大光纤长度,将有利于消光比的保持。3)保偏增益光纤的夹持可能会引起光纤的微小形变,也在一定程度上影响了光纤的保偏能力,通过改进光纤夹具,可以减少夹具对光纤形变的影响。

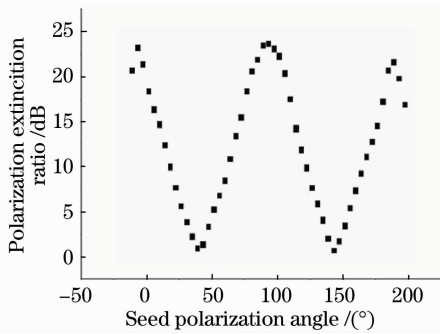


图 4 消光比随种子光偏振角变化曲线

Fig. 4 Polarization extinction ratio versus seed polarization angle

4 结 论

研制出了由两级光纤放大模块构成的高功率单频保偏光纤放大器, 两级光纤放大均采用保偏双包层掺镱光纤, 获得了 17.3 W 的线偏振、单频激光输出, 消光比可达 24.3 dB。对该单频保偏光纤放大器系统的功率、光谱和偏振特性进行了详细的研究。

参 考 文 献

- Xutao Sun, Jiqiao Liu, Jun Zhou *et al.*. Frequency stabilization of a single-frequency all-solid-state laser for doppler wind lidar[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(9): 679~680
- Zhang Haiyang, Zhao Changming, Jiang Qijun *et al.*. Laser detection on micro-doppler effect in coherent lidar[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(12): 1981~1985
张海洋, 赵长明, 蒋奇君等. 基于相干激光雷达的激光微多普勒探测[J]. *中国激光*, 2008, **35**(12): 1981~1985
- Wang Chuncan, Zhang Fan, Lu Yuchun *et al.*. Study of stimulated brillouin scattering effect in high-power single-frequency fiber amplifiers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(12): 1630~1635
王春灿, 张帆, 陆玉春等. 单频大功率光纤放大器中抑制受激布里渊散射的理论分析[J]. *中国激光*, 2006, **33**(12): 1630~1635
- Ning Tigang, Qin Xi, Pei Li *et al.*. A novel way to measure the temperature characteristic of polarization-maintaining fiber[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(8): 1078~1080
宁提纲, 秦曦, 裴丽等. 新型保偏光纤温度特性的测试方法[J]. *中国激光*, 2006, **33**(8): 1078~1080
- Xu Nan, Liu Liren, Liu Dean *et al.*. Technologies and recent progress of coherent optical communications in free space[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2007, **44**(8): 44~51
许楠, 刘立人, 刘德安等. 自由空间相干光通信技术及其发展[J]. *激光与光电子学进展*, 2007, **44**(8): 44~51
- Li Peng, Zhao Zhimin, Hong Xiaoqin. Design and study on a new fiber sensor with self-repairing functions[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(4): 573~576
李鹏, 赵志敏, 洪小芹. 新型快速自修复光纤传感器的设计与性能[J]. *中国激光*, 2008, **35**(4): 573~576
- Zhang Xulin, Ma Huilian, Ding Chun *et al.*. Analysis on phase modulation spectroscopy of resonator fiber optic gyro[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(11): 1529~1533
张旭琳, 马慧莲, 丁纯等. 谐振式光纤陀螺调相检测分析[J]. *中国激光*, 2005, **32**(11): 1529~1533
- Yin Shupeng, Yan Ping, Li Chen *et al.*. Extraction efficiency in continuous-wave ytterbium-doped fiber amplifier[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(6): 835~839
殷树鹏, 闫平, 李晨等. 连续掺镱光纤放大器的提取效率[J]. *中国激光*, 2008, **35**(6): 835~839
- I. Zawischa, K. Plamann, C. Fallnich *et al.*. All-solid-state neodymium-based single-frequency master-oscillator fiber power-amplifier system emitting 5.5 W of radiation at 1064 nm[J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(7): 469~471
- 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
- A. Liem, J. Limpert, H. Zellmer *et al.*. 100-W single-frequency master-oscillator fiber power amplifier[J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**: 1537~1539
- Y. Jeong, J. Nilsson, J. K. Sahu *et al.*. Single-frequency, single-mode, plane-polarized ytterbium-doped fiber master-oscillator power amplifier source with 264 W of output power[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(5): 459~461
- Y. Jeong, J. Nilsson, J. K. Sahu *et al.*. Power scaling of single-frequency ytterbium-doped fiber master-oscillator power-amplifier source up to 500 W[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.*, 2007, **13**(3): 546~551
- Sun Xinpeng, Zhao Changming, Yang Suhui *et al.*. Experimental study of a 16.1 W output 1064 nm CW single frequency fiber amplifie[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2007, **27**(06): 532~535
孙鑫鹏, 赵长明, 杨苏辉等. 16.1 W 输出 1064 nm 连续单频光纤放大器的实验研究[J]. *北京理工大学学报*, 2007, **27**(06): 532~535
- Fangpei Zhang, Qihong Lou, Jun Zhou *et al.*. 7.3-W single-frequency master-oscillator fiber power amplifier with China-made double-clad fiber[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(6): 322~324
- Fangpei Zhang, Qihong Lou, Jun Zhou *et al.*. Impacts of seed power on amplification performance in pulsed double-clad fiber amplifier[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(1): 19~21