

文章编号:1001-5078(2025)04-0501-04

· 激光器技术 ·

一种高功率窄线宽偏振光纤激光器研究

张雪霞^{1,2}, 张昆^{1,2}, 张利明^{1,2}, 熊文豪^{1,2}, 李尧^{1,2}, 高平^{1,2}, 赵鸿^{1,2}, 解子伊^{1,2}, 邓宇^{1,2}

(1. 中国电子科技集团公司第十一研究所, 北京 100015; 2. 固体激光技术重点实验室, 北京 100015)

摘要:高功率窄线宽光纤激光器因其低噪声、可靠性好、电光转换效率高、相干性好和高光束质量等优异的性能,在精密测量、激光雷达、光谱分析及非线性光学应用等领域展现出巨大的潜力。本文选用种子、多级预放和主放的方式对窄线宽偏振光纤激光器进行了研究。实验中,1056 nm波段的窄线宽种子光经过多级预放后,功率输出20 W,然后注入到双向泵浦的主放大系统中。激光器的包层光剥离器直接在光纤熔点处制作,这样既可以减少光路熔点,又可以简化激光器结构。通过优化主放大系统前后泵浦光比例,当泵浦电流为11.2 A时,激光器的输出功率为2.505 kW,激光器的光-光转化效率为83%。后期继续增加泵浦功率,可以获得更高功率输出。

关键词:激光器; 光纤激光器; 窄线宽; 高功率

中图分类号:TN248;O437 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2025.04.003

Research on high-power narrow linewidth polarized fiber laser

ZHANG Xue-xia^{1,2}, ZHANG Kun^{1,2}, ZHANG Li-ming^{1,2}, XIONG Wen-hao^{1,2}, LI Yao^{1,2},

GAO Ping^{1,2}, ZHAO Hong^{1,2}, XIE Zi-yan^{1,2}, DENG Yu^{1,2}

(1. The 11th Research Institute of CETC, Beijing 100015, China;

2. Science and Technology on Solid-State Laser Laboratory, Beijing 100015, China)

Abstract: High-power narrow linewidth fiber lasers exhibit significant potential in precision measurement, LiDAR, spectral analysis, and nonlinear optical applications, thanks to their exceptional reliability, high electro-optical conversion efficiency, good coherence, and high beam quality. In this paper, the narrow linewidth polarized laser is investigated by using seed, multi-stage pre-amplification and main amplification. In the experiment, the narrow linewidth seed light in the 1056 nm wavelength band is amplified in multi-stages with a power output of 20 W, and then injected into the main amplification system with bidirectional pumping. The cladding pump stripping of the laser is directly fabricated on the melting point of the fiber, which can reduce the melting point and simplify the laser structure. By optimizing the ratio of pump power before and after the main amplification system, the output power of laser is 2.505 kW when the pump current is 11.2 A, and the optical-to-optical conversion efficiency of the fiber laser is 83%. And higher power output can be obtained by continuing to increase the pumping power at a later stage.

Keywords: laser; fiber laser; narrow linewidth; high power

基金项目:高功率线偏振窄线宽光纤激光器横向模式不稳定性研究项目(No. H202201030941)资助。

收稿日期:2024-09-23

1 引言

高功率窄线宽光纤激光器具有光束质量好、相干性好、稳定性高等优点,在激光通讯、非线性光学等领域具有重要的应用^[1]。近年来,随着光纤器件和光纤技术的不断发展,全光纤化的高功率窄线宽光纤激光器得到广泛的发展和应用。目前一般采用种子源和主振荡功率放大(Master Oscillator Power Amplifier, MOPA)的技术方案来提高光纤激光器的输出功率,国内外已有很多相关文献报导,如:2018年,国防科技大学等单位采用种子光加多级预放和主放大的方式实现了2.4 kW的窄线宽激光功率放大器。在主放大器中,采用一种长度为8.5 m的掺镱随机的20/400 μm 增益光纤作为增益介质,最高功率输出时3 dB线宽为0.23 nm,激光器的光束质量 $M^2 \sim 1.28$ 。同时,他们在实验中发现:主放大系统的增益光纤长度缩短或者纤芯直径增大能够进一步抑制激光器的光谱展宽^[2]。2019年,Shen等人通过白噪声信号和正弦信号级联调制获得功率为3 mW、线宽为48 GHz的种子源,然后经过三级预放后,将14 W的功率注入到主放大器中,主放大器的增益光纤为20/400 μm 的大芯径掺镱光纤。在后向泵浦放大方式中,近衍射极限的激光功率输出为3.01 kW,光束质量 $M^2 \sim 1.17$ ^[3]。2021年,国防科技大学研究了一种基于振荡器加一级功率放大结构的高功率窄线宽光纤激光器。在激光系统中,1080 nm的光纤振荡器为放大系统提供种子源,该种子源由一个高反射的布拉格光栅、一个窄线宽反射的输出光栅和10/130 μm 的单模掺镱光纤组成。在后向泵浦的放大结构中,为了抑制横向模式不稳定性,后向泵浦合束器和激光功率传输光纤之间加入了一个啁啾布拉格光栅;11.5 m的20/400 μm 掺镱光纤作为增益介质,最终实现2576 W的激光功率输出,测得3 dB线宽为0.87 nm,最高功率输出时,光束质量 M^2 在1.6左右^[4]。2022年,国防科技大学课题组对线偏窄线宽光纤激光器进行了研究,在MOPA结构的基础上,采用相位调制的单频激光器作为放大系统的种子源,主放大结构选用双向泵浦的方式,增益光纤为20/400 μm 的PM YDF,当泵浦功率为5.02 kW时,成功实现近衍射极限的3.96 kW功率输出的线偏窄线宽光纤激光器,最大功率输出时,测试激光器的线宽为0.62 nm,光束质量(M^2 因子)为 $M_x^2 = 1.31, M_y^2 = 1.41$ ^[5]。同年,国防科技大学课题组又实

现了输出功率为6 kW级的近单模窄线宽光纤激光器。在激光系统中,窄线宽主振荡源由中心波长为1080 nm的超短单种子光经过相位调制产生,其3 dB线宽约为0.78 nm,该种子光经过级联预放大器后输出功率放大到50 W,放大后的激光依次经过滤波环形器(Filter circulator)和模场适配器(MFA)后注入到主放大器。在主放大器双向泵浦结构中,976 nm泵浦光通过两个(6+1)×1的合束器注入到20/400 μm 的保偏掺镱光纤,该光纤的长度为14.5 m,在976 nm附近的吸收系数为1.2 dB/m。当前向和后向分别注入泵浦功率为3.79 kW和4.5 kW时,实现输出功率6.12 kW的窄线宽线偏振光纤激光器,为了有效抑制TMI效应,20/400 μm 增益光纤两端的弯曲直径分别为8.5 cm,激光最大功率输出时,3 dB线宽为0.86 nm,光束质量 M^2 因子为 $M_x^2 = 1.31, M_y^2 = 1.41$ ^[6]。2023年,中国工程物理研究院报道了5 kW窄线宽偏振光纤激光器,该全光纤激光器基于MOPA结构进行功率放大,输出功率为50 mW的1064 nm单频连续激光器作为种子源,经过多级预放,进入主放大结构,主放大系统选用双向泵浦的方式,6个976 nm激光二极管为泵浦光源,最终实现1064 nm激光功率输出5.04 kW,最高功率输出时测得 M^2 因子1.3,3 dB线宽为0.23 nm,实验中没有出现TMI效应,泵浦光功率限制了激光功率的进一步提升^[7]。

从目前报道的窄线宽光纤激光器可以看出,基于MOPA结构的窄线宽光纤激光器,最高功率输出为5 kW。

本文选用种子、多级预放和主放的方式对窄线宽偏振光纤激光器进行了实验研究。功率为100 mW的1056 nm波段的窄线宽种子光经过多级预放后,功率输出20 W,然后注入到双向泵浦的主放大系统中。激光器的包层光剥离器直接在光纤熔点处制作,这样既可以减少光路熔点,又可以简化激光器结构。通过优化主放大系统前后泵浦光比例,当泵浦电流为11.2 A时,激光器的输出功率为2.505 kW,激光器的光-光转化效率为83%。后期继续增加泵浦功率,可以获得更高功率输出。

2 实验结构

高功率光纤激光器的结构如图1所示,主放大级选用双向泵浦的方式,预放功率通过50 W隔离器、保偏CPS和前向合束器注入到主放大增益光

纤,输出光通过保偏 CPS 和光纤输出头连接。

一般激光器结构中,包层光剥离器是作为一个独立的光纤器件被接入到激光器的光路中,通常需要通过熔接技术与其他光纤组件相连。该种技术方案虽然可以实现剥离功能,但会增加激光器的结构复杂度,因为每增加一个熔接点都可能

引入损耗、不稳定性,以及对准和安装的难度,同时也会占用更多的物理空间,不利于系统的小型化和集成化。

本实验中,激光器结构中的保偏 CPS 直接制作在光纤熔接点处,既可以减少光路熔点,又可以简化激光器结构。

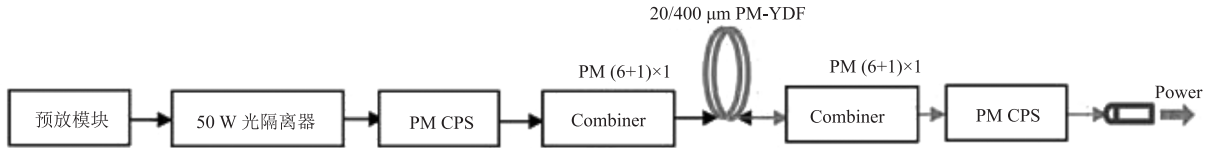


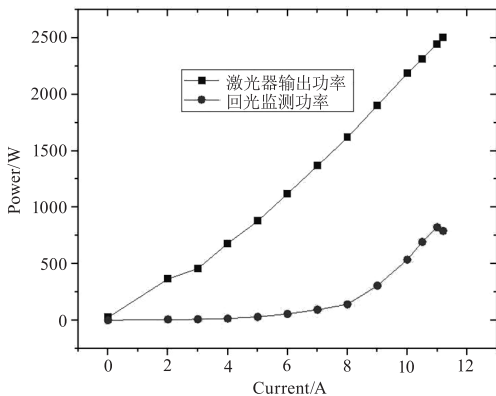
图1 高功率光纤激光器结构示意图

Fig. 1 The structure of high-power fiber laser

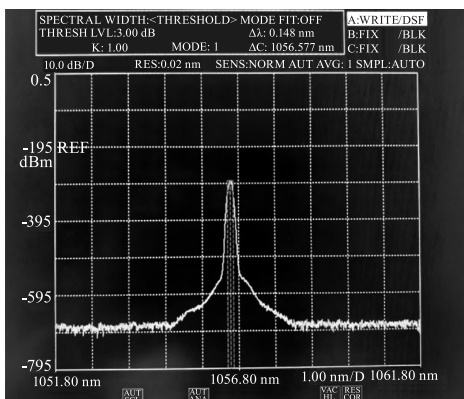
3 结果与讨论

3.1 实验结果分析

实验中,放大级泵浦光前后分布比例为7 : 17。当泵浦电流为 11.2 A 时,激光器的输出功率为 2.505 kW,同时,监测的回光功率为 791 mW,激光器的光-光转化效率为 83 %。从激光器的功率输出曲线(图 2(a))可以看出:激光器的输出功率随着泵浦电流线性增加。



(a) 双端泵浦光纤激光器功率输出



(b) 激光器光谱图

图2 双端泵浦光纤激光器输出参数

Fig. 2 Output parameters of dual end pumped fiber laser

激光器的种子光波长为 1056 nm,激光器最高功率输出时,测得光谱如图 2(b)所示:激光放大器的中心波长为 1056 nm,激光器的线宽为 0.3 nm@20 dB。结合激光器的输出参数可以看出:激光器输出功率稳定,没有出现 TMI 效应。

3.2 横向模式不稳定(TMI)效应

TMI 效应是激光器的输出功率超过某一特定阈值后,光纤的输出模式发生随机变化,且激光输出功率发生滞涨的一种现象(如图 3 所示)。模式不稳定的根源在于光纤中的热效应,目前高功率光纤激光器的增益光纤纤芯直径都较大,支持多个模式传输,基模和高阶模在纤芯中形成干涉,经过干涉后的光场会在光纤中对抽运光进行周期性提取,导致周期性的量子亏损,最终转化为长周期折射率光栅,热致折射率光栅和干涉模式使能量发生转移,导致模式不稳定现象的出现^[8],如图 4 所示。

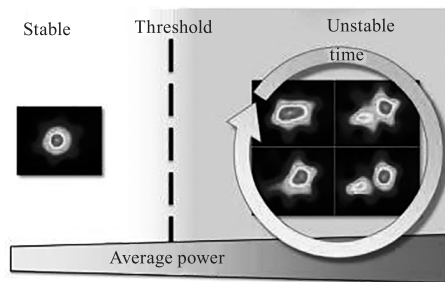


图3 模式不稳定示意图

Fig. 3 Schematic representation of TMI

影响 TMI 阈值功率的主要因素有纤芯/包层直径、光子暗化、掺杂限制、信号光水平、泵浦波长、中的相干特性和线宽等。本实验中,主要选用多波长泵浦,改变种子光波长,优化光纤盘绕的方式抑制 TMI 效应。当激光高功率输出 2.5 kW 时,没有出现

功率不稳定现象。

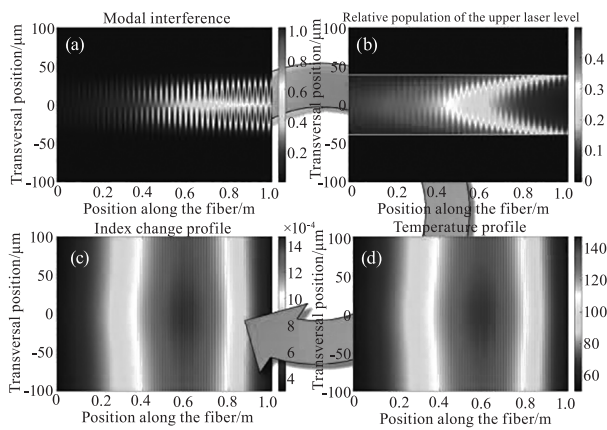


图 4 热致折射率光栅形成示意图

Fig. 4 Generation of a thermally-induced index grating in an active optical fiber

4 总结

本实验选用种子加多级放大的方式,实验中,放大级泵浦光前后分布比例为 7 : 17。当泵浦电流为 11.2 A 时,激光器的输出功率为 2.505 kW,同时,监测的回光功率为 791 mW,激光器的光 - 光转化效率为 83 %。激光器的输出功率随着泵浦电流线性增加,激光器输出功率稳定,没有出现 TMI 效应。后续实验中,可以采取增加泵浦光泵浦功率;优化放大级前后向泵浦光源分布比例;优化增益光纤长度;选用新型结构的增益光纤等方式,获得更高功率输出。

参考文献:

- [1] Zervas M N, Codemard C A. High power fiber lasers : a review[J]. IEEE Journal of selected topics in Quantum Electronics, 2014, 20(5) : 219 - 241.
- [2] Li T, Li Y, Ke W, et al. Power scaling of narrow-linewidth fiber amplifier seeded by Yb-doped random fiber laser [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2018, 24(5) : 1 - 8.
- [3] Shen H, Lou Q, Quan Z, et al. Narrow-linewidth all-fiber amplifier with up to 3.01 kW output power based on commercial 20/400 μm active fiber and counter pumped configuration[J]. Applied Optics, 2019, 58(12) : 3053 - 3058.
- [4] Tian X, Gao C, Wang C, et al. 2.58 kW narrow linewidth fiber laser based on a compact structure with a chirped and tilted fiber Bragg grating for Raman suppression[J]. Photonics, 2021, 8(12) : 532.
- [5] Ren S, Ma P, Li W, et al. 3.96 kW all-fiberized linearly polarized and narrow linewidth fiber laser with near-diffraction-limited beam quality[J]. Nanomaterials, 2022, 12(15) : 2541.
- [6] Ma Pengfei, Song Jiabin, Wang Guangjian, et al. High power narrow linewidth fiber laser breakthrough in 6 kW class with near single mode output[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(9) : 212 - 213. (in Chinese)
马鹏飞, 宋家鑫, 王广建, 等. 高功率窄线宽光纤激光突破 6 kW 级近单模输出[J]. 中国激光, 2022, 49(9) : 212 - 213.
- [7] Yan Sh W, Wang J P, et al. 5 kW narrow linewidth linearly polarized fiber amplifier with record output power and near-diffraction-limited beam quality[J]. Optical Letters, 2023, 48(11) : 2909 - 2912.
- [8] Wang K, Mizuno Y, Su X, et al. Core diameter and numerical aperture dependences on the performance of fiber-optics multimode interference sensing[J]. Applied Physics Express, 2020, 16: 012003.