

文章编号:1001-5078(2024)05-0692-05

· 激光器技术 ·

高功率线偏振窄线宽光纤激光器 TMI 抑制

崔国栋, 赵 鸿, 张利明, 张大勇, 吕华昌

(中国电子科技集团公司第十一研究所, 北京 100015)

摘要:高功率线偏振窄线宽光纤激光器在功率光谱合成、相干探测等方面具有广泛的应用前景。在高功率线偏振窄线宽光纤激光器中,模式不稳定(TMI)效应是限制其功率提升的主要因素之一。本文分析了TMI效应对高功率线偏振窄线宽光纤激光器输出功率的影响,提出了TMI效应的抑制方法。文章采用长波泵浦技术,输出功率100 mW的单频激光器作为种子源,相位调制器将种子源线宽展宽至25 GHz,经三级放大,最终实现了线宽25 GHz、功率2.2 kW、中心波长1064 nm、消光比98%的线偏振窄线宽激光输出,光束质量 $M_x^2 = 1.2$ 、 $M_y^2 = 1.21$ 。分析了泵浦波长对TMI效应的影响:由于光线芯径较小(20 μm),增益光纤对泵浦光吸收系数较高(1.8 dB/m@976 nm),纤芯温度较高,加上泵浦光子量子亏损引入的热,导致纤芯折射率发生变化,较低功率下发生TMI效应,当泵浦波长向长波偏移时,泵浦光的量子亏损降低,同时泵浦吸收系数也降低,无论在光纤全长、还是单位长度上的热分布均减小,增大了TMI阈值,提升了线偏振窄线宽光纤激光器的输出功率。

关键词:光纤激光器;线偏振;窄线宽;模式不稳定

中图分类号:O437;TN248 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2024.05.005

Suppression of TMI in high-power linearly polarized narrow linewidth fiber laser

CUI Guo-dong, ZHAO Hong, ZHANG Li-ming, ZHANG Da-yong, LV Hua-chang

(The 11th Research Institute of CETC, Beijing 100015, China)

Abstract: Recently, high-power linearly polarized narrow linewidth fiber lasers are widely applied in coherent detection and wavelength beam combining. In high-power linearly polarized narrow linewidth fiber lasers, the effect of mode instability (TMI) is one of the main factors limiting its power increase. In this paper, the influence of TMI effect on the output power of high-power linearly polarized narrow-linewidth fiber laser is analyzed, and the suppression method of TMI effect is proposed. Long-wave pumping technologies are used in this article. A single frequency laser with an output power of 100 mW is used as the seed source. And the phase modulator broadens the linewidth of the seed source to 23 GHz. After three stage amplification, the linewidth of 23 GHz, power of 2.2 kW, and center wavelength of 1064 nm are finally realized. Linearly polarized narrow linewidth fiber laser output with extinction ratio of 98% is achieved. Beam quality is $M_x^2 = 1.2$ and $M_y^2 = 1.21$. The influence of the pump wavelength on the TMI effect is analyzed. Due to the small core diameter of the fiber (20 μm), a high absorption coefficient of the gain fiber for the pump light (1.8 dB/m@976 nm), the core temperature is high. And the heat introduced by the pump photo quantum defect, causes the refractive index of the fiber core to change. Finally, the TMI effect occurs at lower power. When the pump

wavelength is shifted to the long wavelength, the quantum defect of the pump light and the pump absorption coefficient are both reduced. The heat distribution on the entire length of the fiber or on the unit length is reduced. The TMI threshold is increased. And the output power of the linearly polarized narrow linewidth fiber laser is improved.

Keywords: fiber laser; linearly polarized; narrow linewidth; mode instability

1 引言

高功率窄线宽光纤激光器具有电光转换效率高、可靠性好、相干性好、高稳定性和高光束质量等优点,在军事和科研等关键领域具有重要应用^[1]。

本文中窄线宽光纤激光器是指输出激光线宽小于或等于 0.1 nm (26.5 GHz) 的光纤激光器。

2017 年,国防科技大学实现 2.43 kW 的全光纤窄线宽线偏振激光输出,线宽为 68 GHz^[2]。2018 年,美国 IPG 公司实现了 2 kW 全光纤窄线宽线偏振激光输出,线宽为 30 GHz,光束质量因子 M^2 约 1.1,功率的继续提升会受限于 MI 效应^[3]。2019 年,中国工程物理研究院应用电子学研究所采用白噪声(WNS)相位调制技术实现了 1.5 kW 全光纤线偏振激光输出,线宽为 13 GHz, M^2 约为 1.14,功率的继续提升会受限于自脉冲及 SBS 效应^[4]。2020 年,王岩山等人^[5]采用短长来抑制光谱展宽效应实现窄线宽输出。放大器采用双向泵浦方式,可以抑制 TMI 效应。实验中,通过减短振荡腔中的光纤长度使得纵模数量减小,从而控制光谱展宽。最终实现了 3 kW 保偏窄线宽激光输出,光谱线宽为 0.20 nm (53 GHz),光束质量为 $M^2 = 1.4$,偏振消光比(PER)为 94 %。

实现高功率和高光束质量光纤激光输出的技术路线,通常采用多路光纤激光进行相干或光谱合成。因此对单个激光器的性能提出了更高的要求,即在保证输出光束质量的前提下,不断提高输出功率。目前一般采用种子源主振荡功率放大(Master Oscillator Power Amplifier, MOPA)的技术方案来提升光

纤激光器的输出功率。但是,随着激光功率不断提升,激光器中会出现如自相位调制(SPM)^[6]、四波混频(FWM)^[7]、受激拉曼散射(SRS)^[8]、受激布里渊散射(SBS)^[9]以及横向模式不稳定(TMI)等非线性效应^[5]。

在高功率线偏振窄线宽光纤激光器中,TMI 效应是限制窄线宽光纤激光器功率提升的主要因素之一,多篇文献已对光纤激光器中的 TMI 效应抑制方法进行了研究,提出了注入提高种子光功率、展宽种子激光线宽、优化泵浦方式、优化光纤掺杂参数和优化光纤缠绕半径等方法来提高 TMI 阈值,但在窄线宽光纤激光器中以上方法大部分仅能局部对 TMI 起到抑制作用,而通过优化泵浦方式,采用后向多波长泵浦方式,可有效抑制 TMI,大幅提高高功率线偏振窄线宽激光器的输出功率。

本文主要分采用后向多波长泵浦方式、单频光纤激光器作为种子源、经线宽调控及三级放大的 MOPA 结构,实现了线宽 23 GHz、中心波长 1063.97 nm、最大功率 2.21 kW 的线偏振窄线宽光纤激光输出,消光比 98 %,光-光转换效率 83.5 %,光束质量 $M_x^2 = 1.2$, $M_y^2 = 1.19$ 。

2 实验方案

后向多波长泵浦线偏振窄线宽光纤激光器的原理如图 1 所示。激光器采用种子源加三级放大的 MOPA 结构,主放大器采用 915、976 和 981 nm 的多波长后向泵浦方式。其中种子源采用输出功率 50 mW、中心波长 1064 nm、线宽小于 70 kHz 的单频光纤激光器。

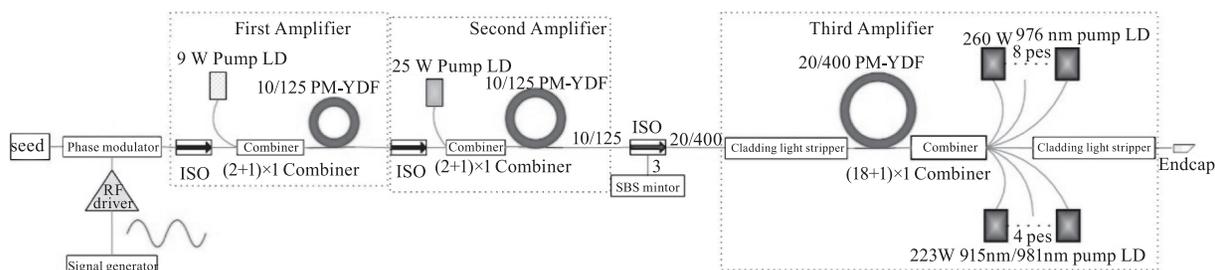


图 1 实验原理

Fig. 1 Experimental schematic diagram

光谱展宽采用频率带宽 10 GHz、半波电压 5 V 的相位调制器,采用带宽 10 GHz、功率 0 dBm 的白噪声源作为线宽调控信号源(Signal Generator),采用射频放大器对白噪声源信号进行放大。

第一放大级(First Amplifier)的增益光纤采用长 4 m、纤芯/包层直径 10/125 μm 的掺 Yb^{3+} 双包层保偏光纤(10/125 PM-YDF),其对 976 nm 泵浦光的吸收系数为 3.9 dB/m。泵浦源采用 1 支最大输出功率为 9 W、中心波长 976 nm 的激光二极管(9 W Pump LD),其输出尾纤直径为 105/125 μm 。泵浦耦合采用 $(2+1) \times 1$ 合束器($(2+1) \times 1$ Combiner),其泵浦臂直径为 105/125 μm ,主纤直径为 10/125 μm 。

第二放大级(Second Amplifier)的泵浦源采用 1 支最大输出功率为 50 W、中心波长 976 nm 的激光二极管(50 W Pump LD),其输出尾纤直径为 105/125 μm 。其余器件与第一放大级相同。

第三放大级(Third Amplifier)的增益光纤采用长 10 m、纤芯/包层直径 20/400 μm 的掺 Yb^{3+} 双包层保偏光纤(20/400 PM-YDF),其对 976 nm 附近泵浦光的吸收系数为 1.8 dB/m。泵浦源采用 8 支最大输出功率为 260 W、中心波长 976 nm 的激光二极管(260 W 976nm Pump LD),和 4 支最大输出功率为 223 W、中心波长 915 nm/981 nm 的激光二极管(223 W 915 nm/981 nm Pump LD),其输出尾纤直径为 135/155 μm 。泵浦耦合采用反向 $(18+1) \times 1$ 合束器($(18+1) \times 1$ Combiner),其泵浦臂直径为 135/155 μm ,主纤直径为 20/400 μm 。

为了防止反馈,在种子源和各放大级间连接光隔离器(ISO);为了防止 SBS 产生的后向散射光打坏前级器件,反向光由三端口光隔离器第 3 端口导出,其功能为监测反向 SBS 光功率(SBS monitor),当反向功率出现非线性增长时表明已发生 SBS,应迅速关掉放大级电源,以防止前级器件被反向光打坏;为了消除包层光,在第二放大级和第三放大级、第三放大级和输出端之间连接包层光泄漏器(Cladding Light Stripper)。为防止反馈,采用 QBH 作为输出端,其尾纤长度为 0.5 m。整个系统采用水冷方式进行散热。

3 实验结果与分析

3.1 输出功率

为了提升光光转换效率低,本文采用了组合波长

的泵浦方式,分别采用 976 nm LD、981 nm + 976 nm LD 和 915 nm + 976 nm LD 作为第三放大级泵浦源,探索了在不同泵浦波长下线偏振窄线宽光纤激光器的输出功率变化情况。如图 2 不同泵浦波长时,输出激光功率(Laser Power)随泵浦光功率(Pump Power)的变化,当第三放大级泵浦光为 915 nm 和 976 nm 两种波长(915 nm + 976 nm Pump)时,注入第三放大级激光功率为 26 W、泵浦功率为 2.602 kW(915 nm 泵浦功率 892 W、976 nm 泵浦功率 1.71 kW)时,输出激光功率为 1.7 kW,第三放大级光光转换效率为 64.3%,进一步增大泵浦功率,输出激光功率急剧下降;当第三放大级泵浦波长为 976 nm(976 nm Pump)时,注入第三放大级激光功率为 26 W、泵浦功率为 2 kW 时,输出激光功率为 1.8 kW,第三放大级光光转换效率为 88.7%,进一步增大泵浦功率,输出激光功率急剧下降;当第三放大级泵浦光为 981 nm 和 976 nm 两种波长(981 nm + 976 nm Pump)时,注入第三放大级激光功率为 26 W、泵浦功率为 2.642 kW(981 nm 泵浦功率 892 W、976 nm 泵浦功率 1.75 kW)时,输出激光功率为 2.207 kW,第三放大级光光转换效率为 82.6%,此时 981 nm 泵浦功率已达到最大值。

当泵浦光为 981 nm 和 976 nm 组合波长时,激光功率随泵浦功率的变化如图 3 所示。总注入泵浦功率 2.682 kW,最大输出功率 2.207 kW,总光光效率 82.3%。其中,第三放大级注入泵浦功率 2.642 kW,提取激光功率 2.181 kW,光光效率 82.6%,斜效率 86.9%。泵浦功率与激光功率具有较好的线性关系。实验过程中没有发生 TMI 效应。因此,进一步增加 981 nm 波长泵浦功率能够实现更高功率的激光输出。

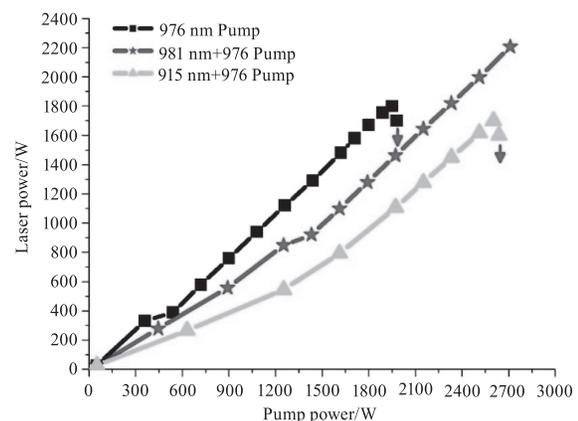


图2 不同泵浦波长下激光功率随泵浦光功率的变化
Fig. 2 Laser power variety with pump power under different pump wavelength

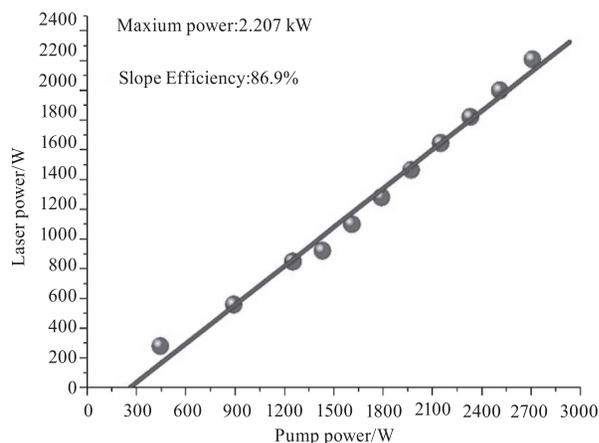


图3 981 nm + 976 nm 泵浦源泵浦斜效率

Fig. 3 Laser power variety with pump power under 981 nm + 976 nm pump wavelength

3.2 输出光谱

采用测量光谱范围为 400 ~ 1700 nm、分辨率为 0.02 nm 的光谱分析仪对输出激光的光谱进行了测量。光谱测量结果如图 4 所示,输出功率为 2.207 kW 时中心波长 (λ_c) 为 1063.965 nm,谱宽 ($\Delta\lambda$) 为 0.087 nm (线宽 23 GHz)。

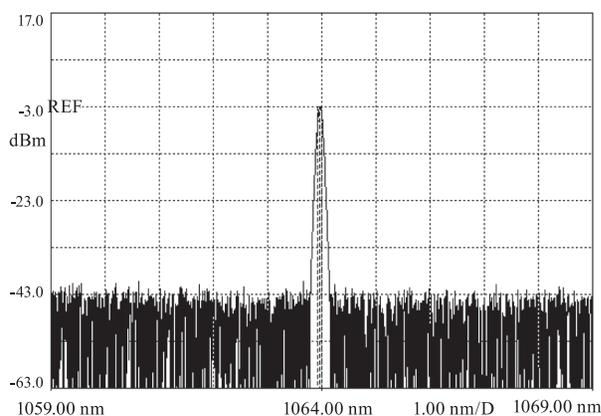


图4 输出功率为 2.207 kW 时的激光光谱

Fig. 4 Laser spectrum at power of 2.207 kW

3.3 输出光束质量

采用光束质量分析仪对输出激光光束质量进行了测量,当输出功率为 2.207 kW 时,光束质量 $M_x^2 = 1.2$ 、 $M_y^2 = 1.19$,光束质量的实测结果如图 5 所示。

3.4 输出消光比

采用消光比测试仪对输出激光消光比进行了测量,当输出功率为 2.207 kW 时,消光比为 98 %。

在同等泵浦功率下(892 W),915 nm 与 976 nm 波长组合泵浦,TMI 阈值功率最低,仅 1.7 kW,进一步增大泵浦功率,输出功率骤降;976 nm 波长泵浦,

TMI 阈值功率增大到 1.8 kW,进一步增大泵浦功率,输出功率骤降;进一步延长泵浦波长到 981 nm 与 976 nm 波长,激光输出功率提升到 2.207 kW。分析了线偏振窄线宽光纤激光器发生功率骤降的原因,由于增益光纤芯径较小(20 μm),增益光纤对泵浦光吸收系数较高(1.8 dB/m@976 nm),纤芯温度较高,加上泵浦光量子亏损引入的热,导致纤芯折射率发生变化,发生 TMI 效应,较低功率下,大量的纤芯激光瞬间转化为高阶模传输到光纤内包层中形成包层光,在激光器输出端被包层光泄漏器(Cladding Light Stripper)泄漏掉,激光器输出功率骤降。当泵浦波长向长波偏移时,泵浦光的量子亏损降低,同时泵浦吸收系数也降低,无论在光纤全长、还是单位长度上的热分布均减小,增大了 TMI 阈值,提升了线偏振窄线宽光纤激光器的输出功率。

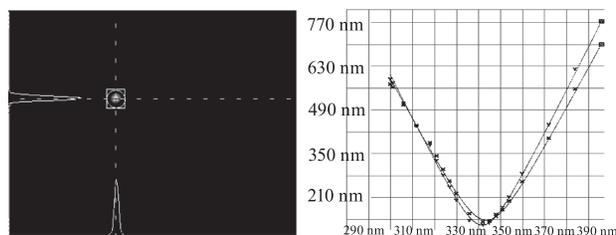


图5 输出功率为 2.207 kW 时的光束质量图

Fig. 5 Beam quality at power of 2.207 kW

4 结论

本文分析了 TMI 效应对输出激光功率的影响。通过实验研究了泵浦波长对输出激光功率的影响。结果表明,增加泵浦波长可减弱 TMI 的影响,提高输出激光功率。

最终实现了中心波长为 1063.359 nm、线宽 23 GHz、功率 2.207 kW 的线偏振窄线宽光纤激光输出,光光效率 82.3 %,光束质量 $M_x^2 = 1.2$ 、 $M_y^2 = 1.19$ 。其中,第三放大级注入泵浦功率 2.642 kW,提取激光功率 2.181 kW,光光效率 82.6 %,斜效率 86.9 %。泵浦功率与激光功率具有较好的线性关系。实验过程中没有发生 TMI 效应。因此,进一步增加 981 nm 波长泵浦功率能够实现更高功率的激光输出。

分析了线偏振窄线宽光纤激光器发生功率骤降的原因,由于级增益光纤芯径较小,增益光纤对泵浦光吸收系数较高,纤芯温度较高,加上泵浦光量子亏损引入的热,导致纤芯折射率发生变化,发生 TMI 效应,较低功率下,大量的纤芯激光瞬间转

化为高阶模传输到光纤内包层中形成包层光,在激光器输出端被包层光泄漏器泄漏掉,激光器输出功率骤降。

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] Su R T, Tao R M, Wang X L, et al. 2.43 kW narrow linewidth linearly polarized all fiber amplifier based on mode instability suppression [J]. Laser Physics Letters, 2017, 14(8): 085102.
- [3] Platonov N, Yagodkin R, Cruz J D L, et al. Up to 2.5 kW on non-PM fiber and 2.0 kW linear polarized on PM fiber narrow linewidth CW diffraction-limited fiber amplifiers in all-fiber format [J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10512: 105120E.
- [4] Chang Z, Wang Y S, Sun Y H, et al. 1.5 kW polarization-maintained Yb-doped amplifier with 13 GHz linewidth by suppressing the self-pulsing and stimulated Brillouins scattering [J]. Applied Optics, 2019, 58(23): 6419 – 6425.
- [5] Gao W, Fan W, Ju P, et al. Thermally-induced transverse mode instability; hopf bifurcation in high-power fiber laser [J]. Results in Physics, 2022, 43: 106098.
- [6] Lai W C, Ma P F, Xiao H, et al. High-power narrow-line-width fiber laser technology [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2020, 32(12): 121001. (in Chinese)
来文昌, 马鹏飞, 肖虎, 等. 高功率窄线宽光纤激光技术 [J]. 强激光与粒子束, 2020, 32(12): 121001.
- [7] Wang Y, Peng W, Sun Y, et al. Effect of the number of longitudinal modes on spectral broadening in a high power fiber amplifier [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2018, 30(12): 1107 – 1110.
- [8] Song J X, Ren S, Wang G J, et al. Domestic tapered fiber achieves 4.2 kW near-single-mode narrow linewidth laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(8): 264 – 265. (in Chinese)
宋家鑫, 任帅, 王广建, 等. 国产锥形光纤实现 4.2 kW 近单模窄线宽激光 [J]. 中国激光, 2022, 49(8): 264 – 265.
- [9] Shi M Y, Wu Y, Li J, et al. Advances in high power narrow linewidth lasers based on spectral broadening [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(15): 1500001. (in Chinese)
石梦悦, 吴勇, 李洁, 等. 基于光谱展宽的高功率窄线宽激光器研究进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(15): 1500001.