文章编号:1001-5078(2021)07-0883-05

激光器技术・

## 单谐振腔光纤激光器输出特性优化实验研究

张培培,张 鹏,梁小红 (中国电子科技集团公司第四十六研究所,天津 300220)

**摘 要:**基于单谐振腔结构,搭建了千瓦级掺镱全光纤激光器,实验研究了增益光纤长度、盘绕 半径、制冷温度几种不同参数对输出激光特性的影响。经过参数优化,最终选用镱纤长度 16 m,盘绕半径6 cm,制冷温度 25 ℃,在泵浦功率为1348.3 W 时,实现了1135 W 的连续激光 输出。激光中心波长 1080 nm,光 - 光转换效率 84.2 %,斜率效率 87.7 %,光束质量 M<sup>2</sup>为 1.2,实现了准单模输出。该激光器连续工作 72 h,其功率不稳定性为1.38 %。该实验研究对 高功率光纤激光器的研究具有一定的指导意义。

关键词:光纤激光器;单谐振腔;镱纤长度;盘绕半径;制冷温度

中图分类号:TN248 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2021.07.010

# Experimental study on output characteristics optimization of single cavity fiber laser

ZHANG Pei-pei, ZHANG Peng, LIANG Xiao-hong

(The 46th Research Institute of Chinese Electronic Technology Group, Tianjin 300220, China)

**Abstract**: A kW-class ytterbium-doped all-fiber laser is built based on the single cavity structure. The effects of several different parameters of gain fiber length, coiling radius and cooling temperature on the output laser characteristics are studied experimentally. After parameters optimization, the final selection of ytterbium fiber length is 16 m, the coiling radius is 6 cm, and the cooling temperature is 25 °C, and 1135 W continuous laser output is realized when the pump power is 1348.3 W. The center wavelength of the laser is 1080 nm, the light-to-light conversion efficiency is 84.2 %, and the slope efficiency is 87.7 %, the beam quality  $M^2$  is 1.2, achieving a quasi-single-mode output. And the laser has a power instability of 1.4 % in 72 h continuously work. This experimental study has certain guiding significance for the research of high power fiber lasers.

Keywords: fiber laser; single resonant cavity; length of gain fiber; coiling radius; cooling temperature

1 引 言

光纤激光器以其转换效率高、光束质量好、系统 结构简单紧凑、运作寿命长、性能稳定可靠等诸多优 势被广泛应用在工业加工、军事、医疗、通信等领域。 近几年,随着双包层光纤制备技术、包层泵浦技术以 及关键光纤元器件的研究工作取得突破性进展,光 纤激光器的输出功率水平不断得到提高。国外,德 国耶鲁大学、美国 JDSU 公司、英国的 SPI 公司及日本的 Fujikura 公司等相继实现了千瓦以上的功率输出<sup>[1-3]</sup>,基于同带泵浦技术和分布式侧面耦合技术,美国 IPG 公司分别在 2009 年和 2012 年实现了单纤单模 9.6 kW 和 20 kW 的光纤激光输出<sup>[4-5]</sup>,这也是目前光纤激光器的最高水平。国内,国防科技大学、华中科技大学、清华大学、天津大学、上海光学精

作者简介:张培培(1986-),女,硕士,工程师,主要从事高功率光纤激光器及器件研究。E-mail: zhangpeipei1986@ 126. com

收稿日期:2020-11-08;修订日期:2020-12-05

密机械与物理研究所、西安光纤精密机械研究所等 研究单位以及武汉锐科、深圳创鑫、山东海富等激光 器厂商都在高功率光纤激光器的研究领域取得了突 破性进展,多家单位已经成功实现千瓦级以上的功 率输出<sup>[6-12]</sup>。

众所周知,输出功率是描述激光器输出特性的 一个重要参数,激光器的输出功率大小及其稳定性 直接决定了它的性能和用途。因此,对激光器输出 功率的影响因素进行研究具有重要意义。在激光器 的实际搭建过程中,增益光纤的长度和弯曲半径的 选择将直接影响谐振腔的效率,其中弯曲半径的选 择同时还会影响激光器的模式选择和控制,进而影 响光束质量的优劣,而激光器制冷温度的设定既会 影响激光器的效率,同时也会对激光器整机的稳定 性造成重要的影响。

本文基于单谐振腔结构,对结构紧凑、功率稳定 的全光纤型连续光纤激光器进行了研究。比较分析 了增益光纤长度、盘绕半径、制冷温度等不同条件对 激光器输出功率和激光效率的影响,利用最优化的 参数制作了光纤激光器整机,实现了中心波长 1080.0 nm,光束质量 *M*<sup>2</sup> 1.2,功率 1135 W 的连续 激光输出,光 - 光转换效率 84.2 %,斜率效率 87.7 %。并且该激光器在 72 小时内的功率不稳定 性仅为 1.38 %。

#### 2 实验装置

单谐振腔型高功率光纤激光器结构图如图1所示。采用18只凯普林带尾纤输出的半导体激光器(LD)作为泵浦源,LD最大输出功率为70W,中心波长为976 nm,泵浦光经(18+1)×1合束器,以前向泵浦的方式耦合进激光谐振腔,合束器由朗光公司提供,单臂承受功率120W,最大泵浦功率可达2160W。采用中国电子科技集团第四十六所自行研制公司的20/400 μm 掺镱双包层光纤(YDF)作为增益介质,该光纤在976 nm 处的吸收系数为1.32 dB/m。选用ITF 的双包层光纤光栅构成激光谐振腔的前后腔镜,光栅的尾纤为20/400 μm 的无源双包层光纤(GDF),中心波长1080 nm,其中高反光栅的反射率>99%,低反光栅的反射率>10%。最后,采用自行研制的带QBH 端帽结构的20/400 um 传能光纤进行激光输出,并在输出端前通过包层

功率剥离器(Cladding Power Stripper, CPS)对光纤包 层中的残余泵浦光进行剥除。



#### 3 实验结果及分析

图2给出了在盘绕半径为6 cm,制冷温度为 25 ℃条件下,增益光纤长度分别为12 m、16 m、20 m 时,输出激光功率随泵浦功率的变化曲线。从图中 可以看出,增益光纤长度为16 m 时,激光器的光 – 光转换效率最高;增益光纤为12 m 时,激光功率开 始随着泵浦功率增加而增大,但最后因为增益光纤 过短,泵浦光功率未被完全吸收而有剩余,因而导致 激光转换效率下降,泄露点温度升高;而增益光纤为 20 m 时,光纤长度过度增加也不会带来激光功率的 提升反而使激光输出效率降低,这主要是因为此时 光纤长度长于最佳长度,过长的增益光纤会吸收掉 部分信号激光因而造成输出功率和效率的降低。因 此需要合理选择增益光纤的长度来获得最大的功率 输出。



在增益光纤长度为16 m,制冷温度为25 ℃时, 不同盘绕半径条件下输出激光功率随泵浦功率的变 化曲线如图3所示。从图中可以看出,在同一盘绕 半径下,输出激光功率均随泵浦功率增加而迅速增 大,但泵浦功率相同时,增益光纤盘绕半径越小,光 纤吸收效率越高,因此导致输出激光功率越高。但 是,增益光纤的盘绕半径不能一味地减小,若盘绕半 径过小,会导致光纤的弯曲损耗增加,进而导致激光 器的效率下降。



图 3 不同盘绕半径下激光输出功率情况对比图 Fig. 3 Comparison of laser output power under different coiling radii

图 4 为镱纤长度 16 m,盘绕半径 6 cm 时,不 同制冷温度条件下输出激光功率随泵浦功率的变 化曲线。由图中可以看出,20 ℃制冷条件下激光 器的光 – 光转换效率最低,30 ℃时激光器的光 – 光转换效率在开始阶段比 25 ℃时高,但最后却低 于 25 ℃时的光 – 光转换效率,这是因为 30 ℃制 冷条件下,泵浦 LD 的波长随着电流增加最先达到 最佳吸收波长,但随着电流继续增加,LD 波长继 续漂移,偏离了最佳吸收波长,而 25 ℃制冷条件 下,LD 的最佳吸收波长正好出现在最大电流时, 因此导致 25 ℃制冷条件时最高电流下的光 – 光 转换效率要比 30 ℃制冷条件时高。因此,合理选 择激光器的制冷温度可以使得激光器的效率和稳 定性得到进一步提升。





Comparison of laser output power at different cooling temperatures 选用最优化的实验参数,即镱纤长度 16 m,盘

绕半径6 cm,制冷温度 25 ℃,制作了一台千瓦级 激光器,激光器输出功率随泵浦功率的变化曲线 如图5所示。从图中可以看出,随着泵浦功率的 逐渐增大,激光功率几乎呈线性增长,并且最后也 未出现饱和趋势,可以预测,若继续增大泵浦功 率,激光输出功率还会进一步提高。最终在泵浦 功率为1348.3W时,获得的激光输出功率为 1135 W, 激光器的光 - 光转换效率为 84.2 %, 斜 率效率为 87.7 %。输出功率为 1135 W 时测得的 激光器光束质量 M<sup>2</sup>为1.2,激光光斑如图 5 中插 图所示,该激光器实现了准单模输出。激光器最 高输出功率时获得的激光光谱图如图6所示,从 图中可以看出该激光器中心波长为1080.0 nm, 976 nm 波长处无多余泵浦光残留,说明泵光被完 全吸收。并且在1130 nm 波长附近也未出现新的 峰值,说明激光器并未产生受激拉曼散射现象。









考虑到增益光纤涂覆层长时间稳定工作的温度为80℃,实验采用了良好的制冷方法及散热处理方法,监测了不同激光输出功率情况下激光器

系统中最高温度点(增益光纤 YDF 与高反光栅 HR 的熔接点)的温度特性,测试结果如图 7 所示。 结果表明:在最高输出功率为 1135 W 时,熔点的 温度为 37.5 ℃,表明光纤熔点温度在稳定工作范 围内,通过增加抽运功率有望进一步提高激光器 输出功率。





为进一步验证激光器的稳定性,监测了整机输 出功率长时间下的稳定情况。经过72h满功率连 续激光输出,功率输出稳定性如图8所示,根据图8 中数据,我们得到该激光器的功率不稳定性为 1.38%。实验结果证明该激光器工艺成熟,性能稳 定可靠,可以满足工业化应用要求。



#### 4 结 论

基于单谐振腔结构,研究了增益光纤长度、盘绕 半径、制冷温度等条件对激光输出功率的影响。结 果表明,选用最优的参数,在同等水平的泵浦功率 下,激光器可获得更高的输出功率及效率。最终在 镱纤长度16 m,盘绕半径6 cm,制冷温度25 ℃条件 下,搭建的光纤激光器获得了 1135 W 的功率输出, 光束质量 M<sup>2</sup>为1.2,中心波长 1080.0 nm,光 - 光转 换效率 84.2 %,斜率效率 87.7 %。该激光器光路 温度安全可控,经过 72 h 满功率连续激光输出,功 率不稳定性仅为 1.38 %。使用本文实验装置搭建 的激光器整机结构更加紧凑,维护更加简单,这极大 的提高了其在激光切割、焊接、精密打孔等激光加工 领域的实用性。

### 参考文献:

- Wih C, Schmidt O, Kliner A, et al. High-power tandem pumped fiber amplifier with an output power of 2.9 kW
   [J]. Optics Letters, 2011, 36(11): 3061 3063.
- [2] Yu H B, Kliner D A V, Liao K H, et al. 1. 2 kW singlemode fiber laser based on 100W high-brightness pump diodes[J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8237:82370G.
- [3] Shima K, Ikoma S, Uchiyama K, et al. 5kW single stage all-fiber Yb-doped single-mode fiber laser for materials processing [ J ]. Proceedings of SPIE, 2018, 10512:105120C.
- [4] IPG Photonics Corporation. IPG photonics successfully tests world's first 10 kilowatt single-mode production laser[EB/OL]. 2009. http://www.ipgphotonics.com/Collateral/Documents/English-US/PR-Final-10kW-SM-laser.
- [5] Shiner B. The impact of fiber laser technology on the world wide material processing market [C]//CLEO: Applications and Technology, Optical Society of America, 2013: AF2J. 1.
- [6] Li Tenglong, Sun Yinhong, Ma Yi, et al. Theoretical and experimental study on kW all fiber laser[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26(8):081001 - 1 ~ 081001 - 6. (in Chinese)
  李腾龙,孙殷宏,马毅,等. KW 级全光纤激光器理论与 实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(8):081001 -1-081001 - 6.
- [7] Dong Fanlong, Ge Tingwu, Zhang Xuexia, et al. Heat management of 1 kW Yb-doped all-fiber amplifier[J]. Laser & Infrared, 2015, 45(7):790-794. (in Chinese)
  董繁龙, 葛廷武, 张雪霞, 等. 1 kW 掺 Yb 全光纤放大器的 散热处理[J]. 激光与红外, 2015, 45(7):790-794.
- [8] Jianming Wang, Dapeng Yan, Songsong Xiong, et al. High

power all-fiber amplifier with different seed power injection [ J ], OPTICS EXPRESS, 2016, 24 (13): 14463 – 14469.

- [9] Wang Xuejiao, Xiao Qirong, Yan Ping, et al. 3000 W direct-pumping all-fiber laser based on domestically produced fiber [J]. Acta Phys. Sin. 2015,64(16):164204 1~164204 6. (in Chinese)
  王雪娇,肖起榕, 闫平,等. 国产光纤实现直接抽运全 光纤化 3000 W 级激光输出[J]. 物理学报,2015,64 (16):164204 ~ 1~164204 6.
- [10] Xu Yang, Fang Qiang, Xie Zhaoxin, et al. Single fiber quasisingle mode 2 kW all-fiber laser oscillator based on single-end 915 nm semiconductor laser forwardpumping[J]. Chinese Journal of Laser, 2018, 45 (4):0401003 1 ~ 0401003 5. (in Chinese)

许阳,房强,谢兆鑫,等.基于915 nm 半导体激光单端 前向抽运的单纤准单模2 kW 全光纤激光振荡器[J]. 中国激光,2018,45(4):0401003-1~0401003-5.

- [11] Wang Xiaolin, Zhang Hanwei, Tao Rumao, et al. Laser diode pumped 4.1 kW all-fiber laser with master oscillator power amplification configuration [J]. Chinese Journal of Laser, 2016, 43(5):1105001. (in Chinese)
  王小林,张汉伟,陶汝茂,等. LD 抽运主振荡功率放大 结构 4.1 kW 全光纤激光器 [J]. 中国激光, 2016, 43 (5):1105001.
- [12] Chen Xiaolong, Lou Fengguang, He Yu, et al. Home-made 10 kW fiber laser with high efficiency [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(3):0336001. (in Chinese) 陈晓龙, 楼风光, 何宇, 等. 高效率全国产化 10 kW 光 纤激光器[J]. 光学学报, 2019, 39(3):0336001.