

全光纤 MOPA 结构高功率脉冲激光器设计

李全法¹,渠彪^{2*},潘诗发²

(1.泉州师范学院 物理与信息工程学院,福建 泉州 362000;2.泉州师范学院 光子技术研究院,福建 泉州 362000)

摘要:为实现高功率、多参数可调的全光纤主振荡功率放大器(MOPA)结构纳秒脉冲激光输出,采用电路直接调制的半导体激光器作为种子源,设计了一种全光纤 MOPA 结构高功率脉冲激光器,优化了有源光纤弯曲半径及光路结构。实验结果表明,当一级和二级泵浦功率分别为 2.2 W 和 34.38 W 时,该激光器可获得平均输出功率为 20.85 W、最大峰值功率为 12.9 kW、中心波长为 1 064.5 nm、线宽为 3.75 nm、平均光束质量 M^2 为 1.345 的稳定输出。

关键词:脉冲激光器;全光纤;掺镱光纤激光器;种子源调制;主振荡功率放大器

中图分类号:TN248.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2025)02-0100-06

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2025.02.019

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Design of high-power pulsed laser with all-fiber MOPA structure

LI Quanfa¹, QU Biao^{2*}, PAN Shifa²

(1. School of Physics and Information Engineering, Quanzhou Normal University, Quanzhou Fujian 362000, China;

2. Institute of Photon Technology Research, Quanzhou Normal University, Quanzhou Fujian 362000, China)

Abstract: To achieve high-power, multi-parameter tunable nanosecond pulsed laser output based on an all-fiber master oscillator power amplifier(MOPA) structure, a semiconductor laser directly modulated by an electrical circuit is employed as the seed source. A high-power pulsed laser with an all-fiber MOPA structure is designed, optimizing the bending radius of the active fiber and the optical path configuration. The experimental results show that when the primary and secondary pump powers are 2.2 W and 34.38 W, respectively, the laser achieves stable output with an average power of 20.85 W, a maximum peak power of 12.9 kW, a central wavelength of 1 064.5 nm, a linewidth of 3.75 nm, and an average beam quality factor M^2 of 1.345.

Key words: pulsed laser, all-fiber, ytterbium-doped fiber laser, seed source modulation, master oscillator power amplifier

0 引言

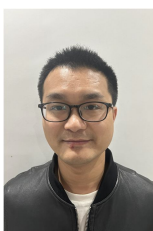
光纤激光器的主要结构类型包括单谐振腔、光束组合和主振荡功率放大器(MOPA)结构。其中,MOPA 结构因其能够实现脉冲宽度和重复频率(简称脉宽和重频)可调的高性能脉冲激光输出,成为当前的研究热点之一^[1]。浙江大学^[2]利用半导体激光器作为种子源,采用 MOPA 结构,实现了脉宽/重频为 4 ns/100 kHz 的全光纤

收稿日期:2024-09-03。

基金项目:福建省教育厅重点项目(JZ160458)资助;福建省中青年科研项目(JAT190503、JAT200567)资助;泉州市科技项目(2017G048)资助;泉州师范学院本科教育类教育教学改革研究项目(2023JGX009)资助。

作者简介:李全法(1990—),男,福建省泉州人,硕士,助理实验师,主要研究方向为光纤激光器、光纤传感、光纤通信及其应用,主持或参加了多个纵向和横向项目,发表论文 4 篇,授权发明专利 2 项。

***通信作者:**渠彪(1981—),男,博士,副教授,主要研究方向为激光器件及技术。



脉冲激光输出。IPG 公司^[3]实现了重频范围为 1~500 kHz、输出功率为 200 W 的激光输出。波尔多大学^[4]采用外腔半导体激光器作为种子源,获得了斜率效率为 80%、输出功率为 365 W 的脉冲激光。ZHOU Y 等人^[5]基于被动调 Q 的 MOPA 结构,实现了脉冲能量为 0.14 mJ、脉冲宽度为 490 ps 的激光输出。SHI C 等人^[6]利用锥形掺镱有源光纤,研制出一种输出波长为 1 μm 、峰值功率为 31.4 kW 的全光纤 MOPA 激光器。REN C 等人^[7]基于 MOPA 结构,实现了功率为 1 kW、斜率效率为 51%的宽调谐光纤激光。天津大学以自制环形腔光纤激光器为种子源,基于 MOPA 结构实现了光谱线宽为 0.08 nm、输出功率为 57 W 的激光输出^[8]。然而,上述文献的激光器通过调 Q 谐振腔产生种子光,其波形和脉宽不可调,峰值功率较低,且无法彻底断光,应用范围受限。相比之下,基于种子源调制的 MOPA 激光器通过直接电脉冲调制半导体种子激光器,能够生

成波形、脉宽和重频均可调的种子光,从而实现相应参数可调的脉冲激光输出,具有更高的峰值功率和更广泛的应用前景。因此,本文采用电路直接调制的半导体激光器作为种子源,设计一种全光纤 MOPA 结构高功率脉冲激光器(下文简称 MOPA 激光器)。

1 MOPA 激光器设计

本文设计的 MOPA 激光器由主电路系统与光路系统两部分构成,其工作原理如下:主振荡器(MO)为高性能种子源半导体激光器,通过直接脉冲调制生成参数可调的种子信号光。现场可编程门阵列(FPGA)主控输出可调参数的脉冲电流信号,经驱动电路控制种子源工作,完成种子光的初始调制。泵浦源驱动电路接收 FPGA 主控板的控制指令后启动泵浦源,产生泵浦光。种子光与泵浦光经合束器耦合后,分别注入 2 级光放大模块中的掺 Yb³⁺双包层光纤(YDDCF)。在此过程中,Yb³⁺离子吸收泵浦光能量形成粒子数反转分布,随后基于行波放大与受激辐射原理,种子信号光在 2 级光放大模块中实现高功率增益,最终输出高功率纳秒脉冲激光。

由于峰值功率提升,放大后的脉冲信号可能因增益钳制效应导致脉宽压缩^[9]。实际应用中,多级放大结构常被采用以进一步提升输出功率与增益效率^[10-11]。

1.1 电路系统

MOPA 激光器电路系统如图 1 所示,由 FPGA 主控板、泵浦源、种子源、驱动电路板、放大器等组成。FPGA 主控板通过生成波形、脉宽(5~200 ns)和重频(30~900 kHz)可调的脉冲电信号,驱动种子源输出参数可调的 mW 级原始种子光脉冲。该信号经隔离器输入至预放大器和主放大器构成的 2 级光放大模块,最终通过带准直功能的光隔离器输出高能短脉冲激光。种子源内置光电探测器,实时监测输出功率并反馈至 FPGA 主控板。主控板通过控制泵浦驱动电路 1、

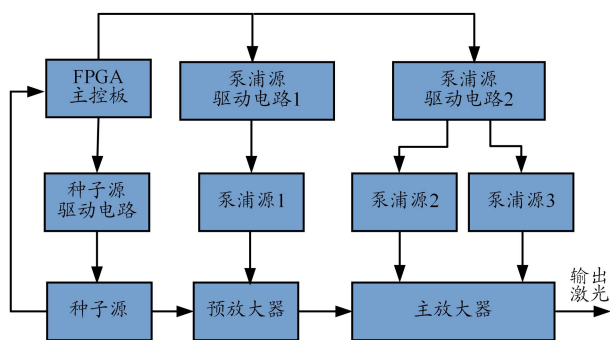


图 1 MOPA 激光器电路系统示意图

2,实现对泵浦源 1、2、3 的启闭操作。当光电探测器未检测到信号光输出时,主控板将关闭泵浦源,避免因无种子光输入导致 YDDCF 及光器件损毁^[12]。

1.2 光路系统

MOPA 激光器光路系统如图 2 所示,采用全光纤结构,包含主振荡模块和 2 级放大模块^[13]。主振荡模块以中心波长为 1 064 nm、线宽为 3 nm、最大连续输出功率为 400 mW 的半导体激光二极管(LD)为种子源,配合反射率为 99%@1 063.94 nm、线宽为 3.5 nm 的光纤布喇格光栅(FBG)构成波长选择系统。2 级放大模块采用反向泵浦设计,分别配置芯径为 8、30 μm 的 YDDCF 作为增益介质,对应包层泵浦吸收系数分别为 1.0、2.1 dB/m @915 nm。

除此之外,光路系统的关键组件还包括:

- 1) 泵浦合束器:采用(1+1)×1 光纤合束器(FC)和(2+1)×1 FC 结构,实现 95%的泵浦耦合效率;
- 2) 模式匹配器(MFA):连接 2 级不同芯径 YDDCF,消除模场失配损耗;
- 3) 包层模式剥离器(CMS):有效去除残余泵浦光和反射信号光;
- 4) 带通隔离器(BPF-ISO):抑制放大大自发辐射(ASE),确保信号光单向传输。

热管理方面,将 YDDCF 盘绕于导热硅脂涂覆的 V 型铝槽表面,通过高温胶带固定实现有效散热。光路系统设计中采用斜 8°端面处理技术,配合 0.1:99.9 分光比耦合器,可同时抑制菲涅尔反射并实现前/反向光功率实时监测^[14-15]。该全光纤架构通过熔接工艺连接各组件,在确保光学性能的同时提升了系统稳定性。

2 实验分析与讨论

2.1 种子源与一级放大模块输出特性分析

实验过程中,本文在相应的测试点(图 2 中的 TP₁、TP₂、TP₃、TP₄、TP₅、TP₆、TP₇)使用示波器、光谱分析仪和功率计进行信号的波形、光谱与功率测试。改变种子源输出脉宽和重频,在 TP₁ 处测得的种子源输出功率、输出波形分别如表 1 和图 3 所示。当脉宽/重频为 200 ns/50 kHz 时,在 TP₄ 处测试得到一级放大器的输出功率与泵浦源功率的关系如图 4 所示。由表 1 可知:随着种子源脉宽的减小,种子源和一级放大模块的输出功率降低,而一级放大模块的放大倍数依次增大,范围为 22.8~56.8 倍;不同脉宽/重频下,种子源的输出光谱中心波长和 3 dB 带宽存在微小差异。从图 3 可以看出,通过脉冲电流调制种子源的脉宽和重频,

李全法,渠彪,潘诗发:全光纤 MOPA 结构高功率脉冲激光器设计

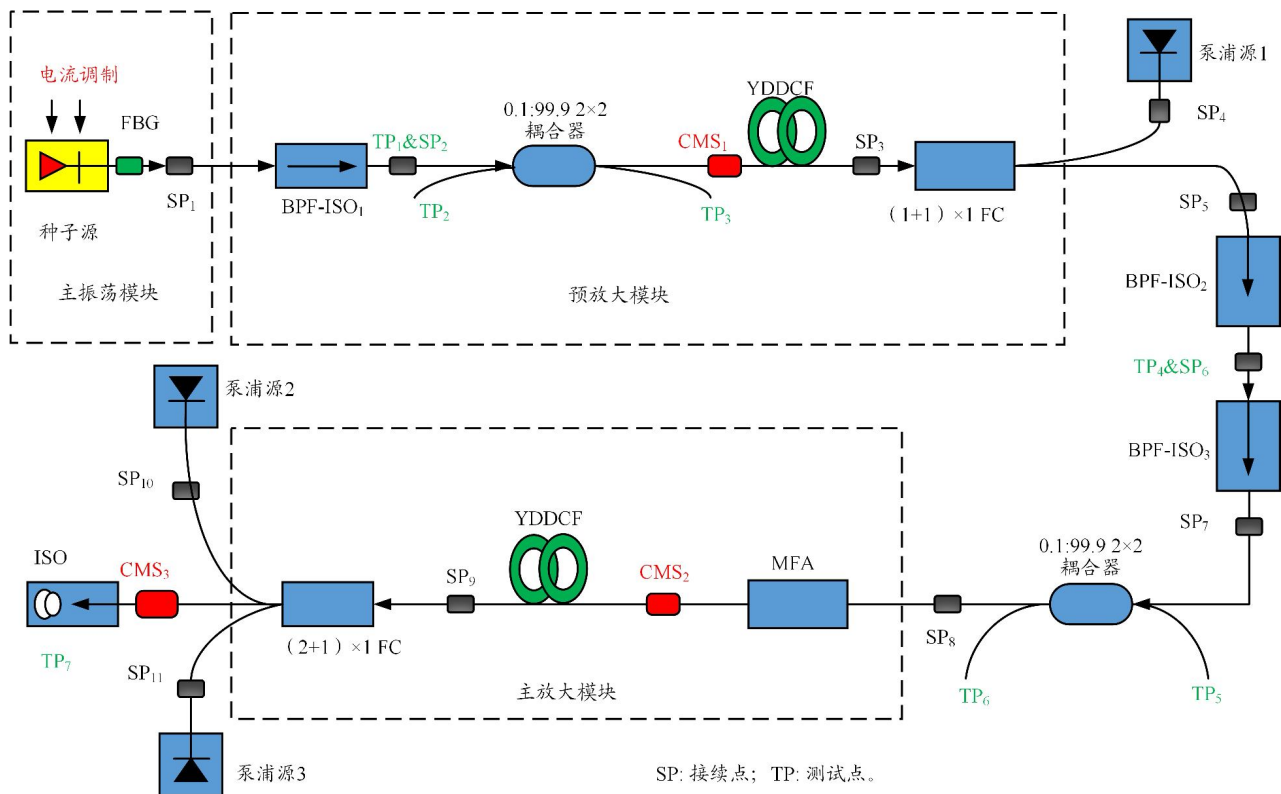


图 2 MOPA 激光器光路示意图

表 1 不同脉宽/重频情况下,种子源功率和第一级放大输出功率情况

脉宽/重频	泵浦源 1 输出功率/mW		种子源中心 波长/3 dB 带宽	种子源输出 功率/mW	一级放大器 放大倍数
	在 1 V 驱动电压下	在 2 V 驱动电压下			
200 ns/50 kHz	2 230	12.5	1 065.03 nm/2.3 nm	285	22.8
100 ns/60 kHz	2 250	8.5	1 064.56 nm/2.7 nm	245	28.8
50 ns/100 kHz	2 233	5.5	1 063.98 nm/2.2 nm	223	40.5
20 ns/200 kHz	2 250	3.55	1 063.37 nm/1.73 nm	185	52.1
5 ns/900 kHz	2 225	1.85	1 062.93 nm/2.86 nm	105	56.8

注:一级放大输出功率是在种子源功率驱动电压为 2 V 和泵浦源 1 驱动电压为 1 V 时测试得到的。

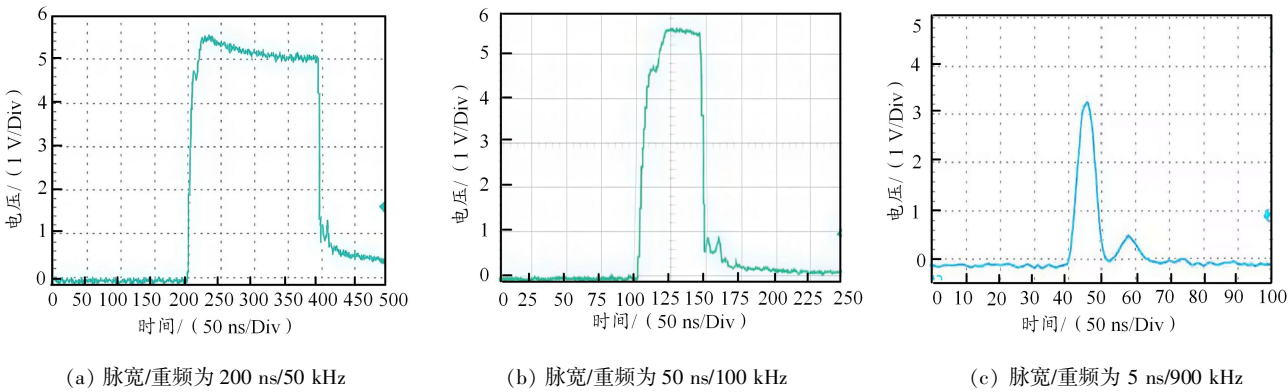


图 3 不同脉宽/重频对应的种子源的输出波形

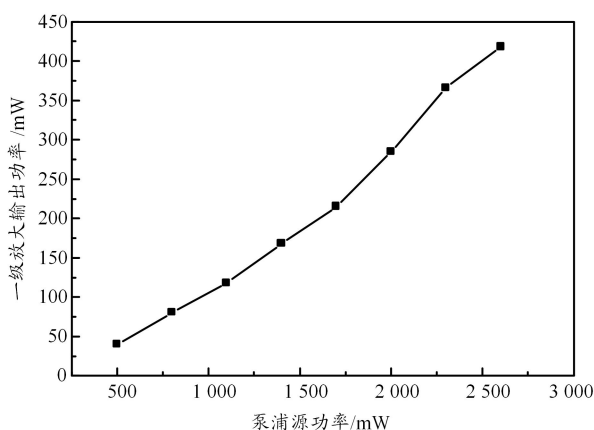


图4 一级放大输出功率与泵浦源功率关系图

可生成相应参数可调的原始光脉冲信号。从图4可以看出,当脉宽/重频为200 ns/50 kHz时,一级放大输出功率与泵浦源功率基本呈线性关系。实验结果表明,虽然一级放大输出功率会随着泵浦功率的增大(提高驱动电压)而增大,但超过一定值时,一级输出波形会出现不规则甚至尖锐脉冲。综合考虑一级放大输出功率、波形以及最终的放大效果,本文选择一级泵浦源的驱动电压为1 V(此时泵浦源输出功率约为2.2 W)。

2.2 激光器输出特性测试与分析

激光器输出特性测试包括光功率、脉冲波形、光谱、光斑和光束质量的测试,其测试原理图如图5所示。通过上位机控制激光器,将激光器输出头对准光功率计探头即可进行光功率测试;同理,通过光衰减器/分光测色仪进行光衰减后,利用光电探测器和示波器可测试脉冲波形;通过光束质量分析仪可测试光斑和光束质量;通过积分球和光谱分析仪可测试光谱。按照图5搭建测试光路,当脉宽/重频为200 ns/50 kHz

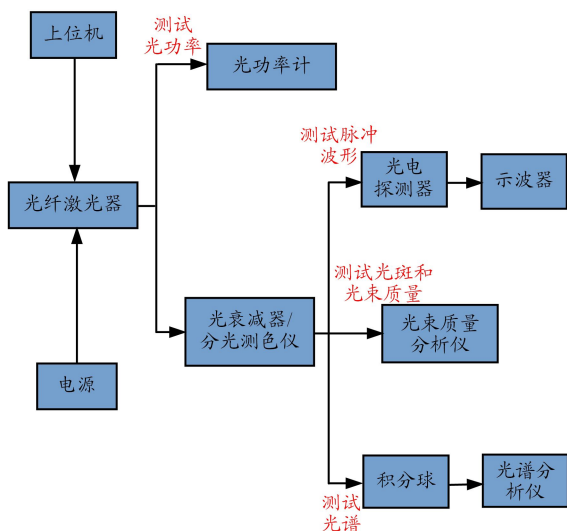


图5 激光器输出特性测试原理图

时,可测得不同泵浦功率对应的激光器最终输出功率如图6所示。可以看出,最终输出功率与泵浦源功率呈线性关系,当泵浦功率为34.38 W时,可获得输出功率为20.85 W(总放大倍数为32.22 dB、转换效率为60.65%)的功率可调节脉冲激光输出。经过48 h长时间的最大功率运行,激光器均能正常工作,输出功率稳定性 $\geq 95\%$ 。

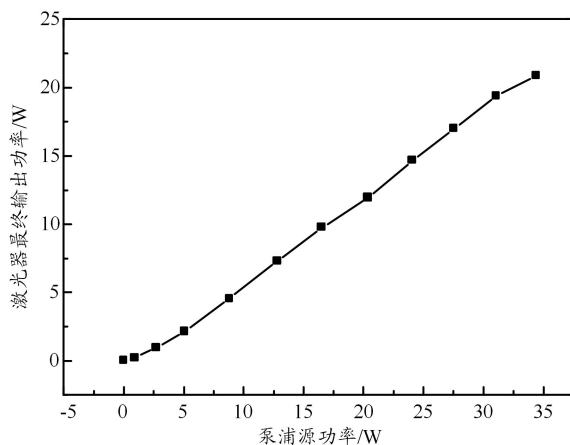


图6 激光器最终输出功率与泵浦源功率关系图

2.3 不同脉宽与重频下的输出波形与峰值功率分析

将泵浦激光器的功率百分比设为100%,调节不同的脉宽和重频,可测得不同脉宽和重频对应的激光输出波形如图7所示。对比图3可知,放大后的激光输出波形脉宽有被压缩的现象。具体表现为:脉宽越小,放大后的输出波形与种子源波形相似度越高;脉宽越大,放大后的输出波形与种子源波形相似度越低,且出现尖锐脉冲。

在非线性效应允许的范围内,保持平均功率为20 W不变的情况下,通过测试多组不同脉宽、重频下的输出激光波形,可计算得出相应的峰值功率如表2所示。可以看出,当增加重频以维持平均功率恒定时,脉宽通常会减小,导致峰值功率降低;相反,若降低重频,则脉宽增大,峰值功率升高。具体而言,当脉宽/重频分别为200 ns/30 kHz和20 ns/180 kHz时,对应的峰值功率分别达到最高值12.9 kW和最低值6.0 kW。

2.4 输出光谱与光束质量分析

本文使用AQ6370光谱分析仪,将脉宽和重频分别设为200 ns/50 kHz和100 ns/60 kHz,测得相应的输出激光光谱参数如表3所示。可以看出,输出光谱中心波长较为稳定。此外,实验过程中未观察到明显的放大自发辐射(ASE)和受激喇曼散射(SRS)非线性效应;在快速打标和慢速打标测试中,激光光谱基本保持不变。

李全法,渠彪,潘诗发:全光纤 MOPA 结构高功率脉冲激光器设计

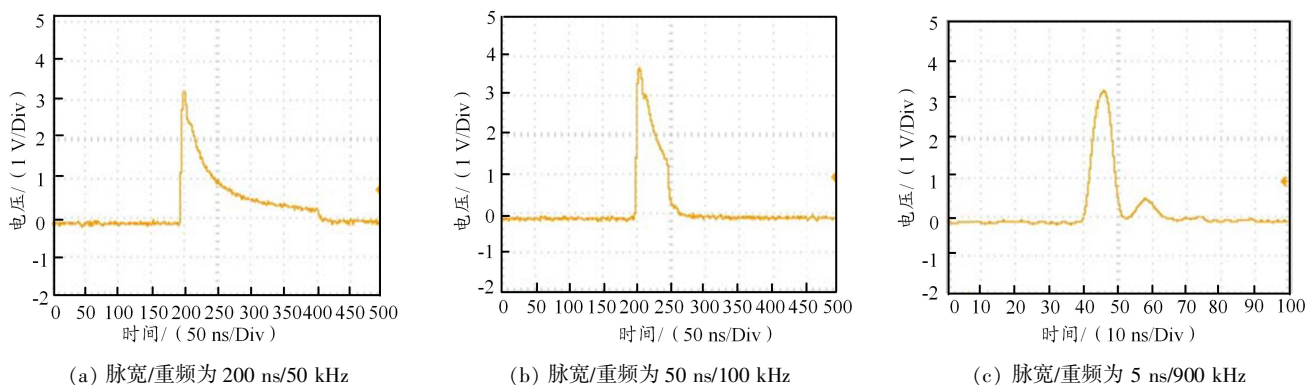


图7 不同脉宽和重频对应的激光输出波形图

表2 不同脉宽和重频对应的输出激光峰值功率

脉宽/ns	重频/kHz	峰值功率/kW (计算值)	峰值功率/V(示波器上的显示值)
20	180	6.0	0.435
30	120	7.6	0.620
40	90	6.3	0.458
60	65	7.6	0.573
80	55	8.3	0.616
100	50	8.3	0.585
150	35	11.5	0.895
200	30	12.9	1.030

表3 输出激光光谱主要参数

主要参数	输出光谱	
	200 ns/50 kHz	100 ns/60 kHz
中心波长/nm	1 064.9	1 064.38
3 dB 带宽/nm	3.75	4.66
信号功率/SRS 功率/dB	55.5	56.4
信号功率/ASE 功率/dB	40.5	41.5
在快速打标和慢速打标时, 频谱差异情况	无	无

2.5 激光器高反能力与稳定性测试

本文使用德国 Cinogy 公司生产的 CinSquare-CS300 紧凑型高精光束质量测量仪进行光斑和光束质量测量,初始测得光束质量 $M_x^2=1.83$, $M_y^2=1.75$, 光束平均质量 M^2 为 1.79, 表明光束质量一般。根据 Marcuse 的弯曲损耗理论^[16], 为优化输出功率、损耗及光束质量的平衡, 需调整有源光纤的弯曲半径与盘绕形状。为此, 本文将 YDDCF 盘绕成梅花结构^[17], 优化后测得 $M_x^2=1.37$, $M_y^2=1.32$, M^2 降至 1.345, 光束质量显著提升。

将激光器安装于配备振镜和场镜的打标机台, 调整焦距后对标刻不锈钢片光滑面进行测试, 设置打标速度为 6 000 mm/s, 填充密度为 0.01 mm。标刻过程中拖动不锈钢片以模拟动态工况, 并实时监测 TP₅ 的光谱。经连续运行监测表明, 系统工作稳定性良好。主放大模块的背向反射光谱中, 短波长(激光器输出波长小于信号光中心波长)成分未受影响, 而长波长(激光器输出波长大于信号光中心波长)成分干扰显著降低, 这表明激光器的抗高反射能力得到增强。

3 结束语

本文以电路直接调制的半导体激光器作为种子源, 设计了一种 MOPA 激光器。实验研究表明, 通过改变种子源的脉宽和重频等特性, 可获得相应参数可调的激光输出。种子光放大良好, 放大后的光谱无明显的 ASE 和 SRS 等非线性效应。通过优化有源光纤的弯曲半径、形状及光路结构, 显著改善了光束质量和抗高反能力, 满足工业材料激光加工需求。本文的研究对 MOPA 激光器的研发、制备、产业化及应用具有重要的参考价值。

参考文献:

- [1] 侯欣宜, 吴玲, 李保群, 等. 1 μm 全光纤 MOPA 结构激光器输出特性研究[J]. 应用光学, 2023, 44(4): 920-926.
- [2] HUA D C H, SU J J, CUI W, et al. All-fiberized SBS-based high repetition rate sub-nanosecond Yb fiber laser for supercontinuum generation[J]. Laser Physics Letters, 2014, 11(12): 125103-1-125103-6.
- [3] MARYASHIN S, UNT A, GAPONTSEV V P. 10mJ pulse energy and 200 W average power Yb-doped fiber laser[C]//SPIE. Proceedings of Fiber Lasers III: Technology, Systems, and Applications. Washington: SPIE, 2006: 610200-1-610200-5.
- [4] DIXNEUF C, GUIRAUD G, BARDIN Y V, et al. Ultra-low intensity noise, all fiber 365 W linearly polarized single frequency laser at 1064 nm[J]. Optics Express, 2020, 28(8): 10960-10969.

李全法,渠彪,潘诗发:全光纤 MOPA 结构高功率脉冲激光器设计

- [5] ZHOU Y, LI X, XU H, et al. High-pulse-energy passively Q-switched sub-nanosecond MOPA laser system operating at kHz level[J]. Optics Express, 2021, 29(11): 17201–17214.
- [6] SHI C, TIAN H, SHENG Q, et al. High-power single-frequency pulsed fiber MOPA via SPM suppression based on a triangular pulse[J]. Results in Physics, 2021, 28: 104594-1–104594-5.
- [7] REN C, SHEN Y, ZHENG Y, et al. Widely-tunable all-fiber Tm doped MOPA with >1 kW of output power[J]. Optics Express, 2023, 31(14): 22733–22739.
- [8] 罗学文,张露,付士杰,等. 57 W 2.05 μm 单横模掺铥光纤激光 MOPA [J]. 中国激光, 2024, 51(8): 40–45.
- [9] 苏君愚,邱琪,谢军,等. 1 064 nm 可编程半导体激光脉冲种子源的研究[J]. 激光技术, 2009, 33(5): 526–528.
- [10] 孙若愚,刘江,谭方舟,等. 百皮秒激光脉冲的全光纤放大及应用[J]. 激光技术, 2013, 37(4): 417–420.
- [11] LIAO L, ZHANG F F, HE X Y, et al. Confined-doped fiber for effective mode control fabricated by MCVD process[J]. Applied Optics, 2018, 57(12): 3244–3249.
- [12] 严杰. MOPA 结构高功率脉冲光纤激光器研究[D]. 武汉:武汉邮电科学研究院, 2019.
- [13] 徐伟腾. MOPA 光纤激光器的嵌入式控制系统设计[D]. 武汉:华中科技大学, 2020.
- [14] 古权. 1.0 μm 高功率窄线宽光纤激光器研究[D]. 广州:华南理工大学, 2022.
- [15] 秦冲. 新型主振荡器功率放大系统的研究[J]. 压电与声光, 2022, 44(8): 125–129.
- [16] 文焱. 基于 MOPA 结构的 200 W 纳秒脉冲光纤激光器研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2019.
- [17] 居剑,刘一然,李全法,等. 一种光纤激光器:中国, CN201510861306.0 [P]. 2016–11–16.

征稿启事

一、征稿范围

本刊刊登在光通信技术领域具有领先水平或创新意义的学术论文,论文内容至少符合下列栏目之一:专家论坛、光传感、空间光(可见光)通信、光器件、光传输、光网络、光纤光缆、算法研究、量子通信、太赫兹通信、光测量、光监控、微波光子学技术、物联网与区块链、5G/6G 光传输和光学技术。

二、文字和篇幅

- 1、论文主题突出、立意新颖、论点正确、论据充分、数据真实可靠,文章内容重复率不高于 10%。
- 2、论文题目长度不超过 25 个汉字。
- 3、题目、作者姓名、作者单位、摘要分别采用三号黑体字体、小四号楷体_GB2312 字体、六号宋体字体、小五号楷体_GB2312 字体;文中一级标题采用小四号宋体字体,其它标题及正文文字则采用五号宋体字体。
- 4、全文通栏编排,单倍行距。
- 5、文章字数(中英文摘要和参考文献除外)不少于 3000 字。

三、图形和表格

- 1、文中图形力求少而精,采用 Microsoft Office Visio 软件画或者修改,并且保存为 Visio 格式。
- 2、图中英文用 Times New Roman 字体,中文用楷体_GB2312 字体。
- 3、文中表格使用三线表,表格内容与图形、正文内容不能重复。

四、参考文献

参考文献在正文中所引用之处以上脚带方括号的形式标出,文献格式按《信息与文献-参考文献著录规则》(GB/T 7714-2015)标准执行。

五、投稿要求

- 1、在线投稿,投稿时请上传 Word 格式稿件。
在线投稿网址: <http://gtxs.cbpt.cnki.net/EditorDN/index.aspx?t=1>
- 2、在论文题目右上角标注所投栏目名称(可多选)。
- 3、推荐 1-3 位同行评审专家(副教授及以上职称),将他们的信息(主要研究方向、单位和 E-mail)附在论文末尾处。

六、审稿流程

- 1、一个工作日内完成初审。
- 2、三周内完成复审。
- 3、作者按复审意见修改后,一周内完成终审。

七、特别声明

- 1、来稿务必做到诚信规范,切勿一稿多投、抄袭和泄漏国家秘密等,否则责任自负,编辑部概不负责。
- 2、被录用的稿件作者,需签署“保密、基金证明及版权协议”。
- 3、稿件刊出后,当月赠当期杂志 2 册;2 个月内向第一作者支付稿酬(通过银行转账方式)。
- 4、凡是向本刊投稿的作者,视为已同意加入 OSID 开放科学计划和在《中国学术期刊(网络版)》(CAJ-N)平台首发。

《光通信技术》编辑部

2025 年 3 月