

1 μm 全光纤MOPA结构激光器输出特性研究

侯欣宜 吴玲 李保群 李子雄 杜垒 王天枢

Output characteristics of 1 μm all-fiber MOPA structure laser

HOU Xinyi, WU Ling, LI Baoqun, LI Zixiong, DU Lei, WANG Tianshu

引用本文:

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. DOI: 10.5768/JAO202344.0408002

HOU Xinyi, WU Ling, LI Baoqun, et al. Output characteristics of 1 μm all-fiber MOPA structure laser[J]. Journal of Applied Optics, 2023, 44(4): 920–926. DOI: 10.5768/JAO202344.0408002

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0408002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

2 μm 波段宽带可调谐全光纤激光器

Broadband tunable all fiber laser at 2 μm band

应用光学. 2018, 39(4): 569–573 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0405003>

2.1 μm 可调谐多波长掺铥光纤激光器

Tunable multi-wavelength holmium-doped fiber laser operating at 2.1 μm

应用光学. 2019, 40(3): 500–504 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0307003>

高重复频率锁模光纤激光器及其超连续谱产生

High repetition-rate mode-locked fiber laser and generation of supercontinuum

应用光学. 2018, 39(6): 916–920 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0607001>

高信噪比多波长2 μm 主动锁模光纤激光器

High SNR multi-wavelength 2 μm actively mode-locked fiber laser

应用光学. 2021, 42(1): 194–199 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0108001>

基于多波长布里渊光纤激光器的温度传感特性

Temperature sensing characteristics based on multi-wavelength Brillouin fiber laser

应用光学. 2018, 39(4): 585–589 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0408001>

位于第三近红外窗口的平坦光纤超连续谱产生

Flat fiber super-continuum spectrum generation in the third near-infrared window

应用光学. 2021, 42(3): 565–570 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0308002>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2023) 04-0920-07

1 μm 全光纤 MOPA 结构激光器输出特性研究

侯欣宜^{1,2}, 吴玲^{1,2}, 李保群^{1,2}, 李子雄², 杜垒^{1,2}, 王天枢^{1,2}

(1. 长春理工大学空间光电技术国家与地方联合工程研究中心, 吉林 长春 130022;

2. 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要: 主振荡功率放大 (main oscillation power amplification, MOPA) 结构由于其光束质量好和参数可调的优点, 已成为高功率光纤激光器的主流设计之一。为了改善高功率掺镱光纤激光器 (ytterbium-doped fiber laser, YDFL) 的输出性能, 提高系统的光-光转换效率, 文中报道了一台基于 915 nm 泵浦激光器和双包层掺镱光纤 (ytterbium-doped fiber, YDF) 的 MOPA 结构全光纤高功率激光器。该高功率光纤激光器由电调制激光二极管 (laser diode, LD) 泵浦的种子激光器和掺镱光纤放大器 (ytterbium-doped fiber amplifier, YDFA) 组成。连续光 (continuous wave, CW) 工作模式下, 激光种子源经过 YDFA 后, 实现了中心波长为 1 069.96 nm 的激光输出, 最大平均输出功率可达 945.9 W, MOPA 激光器整机的斜率效率高达 74.12%, 具有良好的稳健性。该研究方案对研制高功率 MOPA 光纤激光器具有参考意义。

关键词: 光纤激光器; 掺镱光纤; 主振荡功率放大; 连续光

中图分类号: TN248

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202344.0408002

Output characteristics of 1 μm all-fiber MOPA structure laser

HOU Xinyi^{1,2}, WU Ling^{1,2}, LI Baoqun^{1,2}, LI Zixiong², DU Lei^{1,2}, WANG Tianshu^{1,2}

(1. National and Local Joint Engineering Research Center of Space Optoelectronics Technology, Changchun

University of Science and Technology, Changchun 130022, China; 2. School of Opto-electronic Engineering,

Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: The main oscillation power amplification (MOPA) structure has become one of the mainstream designs of high-power fiber laser due to its good beam quality and adjustable parameters. In order to improve the output performance of high-power ytterbium-doped fiber laser (YDFL) and increase the optical-to-optical conversion efficiency of the system, a MOPA structure all-fiber high-power laser based on 915 nm pump laser and double clad ytterbium-doped fiber (YDF) was reported. The high-power fiber laser was composed of a seed laser pumped by an electrically modulated laser diode (LD) and a ytterbium-doped fiber amplifier (YDFA). In continuous wave (CW) mode, after the laser seed source passing through the YDFA, the laser output with the center wavelength of 1 069.96 nm was realized, and the maximum average output power was up to 945.9 W. The slope efficiency of the MOPA structure laser is as high as 74.12%, which has good robustness. The research scheme has reference significance for the development of high-power MOPA structure fiber laser.

Key words: fiber laser; ytterbium-doped fiber; main oscillation power amplification; continuous wave

引言

与固体激光器和气体激光器相比, 光纤激光器

具有能量转换效率高、结构紧凑、可靠性高等独特优势, 广泛应用于工业加工、军事和医疗美容等领

收稿日期: 2022-11-16; 修回日期: 2023-01-09

基金项目: 吉林省自然科学基金 (20200201263JC, YDZJ202101ZYTS139)

作者简介: 侯欣宜 (1998—), 女, 硕士研究生, 主要从事光纤激光器研究。E-mail: 2020100352@mails.cust.edu.cn

通信作者: 王天枢 (1975—), 男, 博士, 教授, 主要从事无线光通信技术、超快光纤激光器及应用、光纤传感技术等研究。

E-mail: wangts@cust.edu.cn

域^[1-5]。目前, 1 μm 波段的光纤激光器结构主要有三种类型: 单谐振腔结构、主振荡功率放大(main oscillation power amplification, MOPA)结构和光束组合结构^[6], 单谐振腔结构和 MOPA 结构主要用于开发中高功率的光纤激光器, 而光束组合结构则主要用于超高功率光纤激光器的制造。其中, 基于 MOPA 结构的光纤激光器由于其光束质量高和参数可调谐等优点, 已成为目前学术界的研究热点之一。掺杂稀土离子光纤中, 双包层掺镱光纤(ytterbium-doped fiber, YDF)具有光-光转换效率高、吸收和发射光谱宽等优点。近年来, 国内外学者对基于 MOPA 结构的 1 μm 高功率掺镱光纤激光器(ytterbium-doped fiber laser, YDFL)进行了大量的理论分析与实验研究, 相关研究快速发展。

早在 1997 年, PASCHOTTA R 等人就对 YDFA 的基本理论进行了研究, 讨论分析了其结构、增益及输出特性^[7]。2005 年, 英国南安普顿大学的 JEONG Y 等人报道了一台拥有 4 级放大的 YDFL, 其光-光转换效率可高达 67.9%, 输出光功率高达 264 W^[8]。2007 年, 美国学者 GRAY S 采用受激布里渊散射(stimulated Brillouin scattering, SBS)阈值高的 YDF 组成了一个 2 级光纤放大器, 实现了高功率、窄线宽的激光输出, 最大平均功率可达 502 W^[9]。2012 年, 美国的 ZAYTSEV AK 等人通过搭建 MOPA 结构 YDFL, 输出了中心波长为 1 024 nm、重复频率为 500 kHz 的脉冲激光, 光-光转换效率大于 70%^[10]。

2020 年, VALERO N 等人搭建了一台基于大模场直径双包层 YDF 的连续光 MOPA 激光器, 输出功率最高可达 39 W, 光-光转换效率为 19%^[11]。

虽然国内对 YDFL 的研究起步较晚, 与国外的研究成果还存在一定差距, 但近年来的研究成果也在迅猛发展中。2009 年, 浙江大学的姜培培等人以声光调 Q 激光器作为种子源, 研制了基于 YDF 的 MOPA 结构光纤激光器, 获得了工作波长为 1 064 nm 的线性偏振脉冲激光输出, 平均功率为 30 W, 重复频率为 40 kHz, 脉冲宽度约为 30 ns^[12]。2011, 来自清华大学的郑超等人采用多级脉冲泵浦技术, 最大限度地消除了放大自发辐射(amplified spontaneous emission, ASE), 减轻了系统的热负荷, 产生重复频率 100 Hz, 峰值功率大于 12 kW 的输出激光^[13]。同年, 天津大学的张伟毅对超高功率连续和脉冲状态下的 YDFA 进行了理论模拟和实验研究, 研究了不同泵浦功率下, 脉冲宽度、重复频率等激光参数变化对放大效果的影响^[14]。2022 年, 天津大学的石争等人采用 2 级包层预放大器 and 1 级主放大器进行功率放大, 研究了增益光纤长度对输出激光峰值功率、非线性阈值及光-光转换效率的影响, 平均输出功率为 4.37 W, 峰值功率高达 91 kW^[15]。

为了与现有 YDFL 的性能进行全面对比, 表 1 对近年来国内外研究的 YDFL 的技术参数、主要研究内容及应用领域进行了一个直观展示。

表 1 国内外 YDFL 性能对比

Table 1 Performance comparison of YDFL at home and abroad

研究机构	浙江大学	清华大学	天津大学	国立清华大学	天津大学	南安普顿大学	纽约康宁公司	波尔多大学	长春理工大学(本文)
技术类型	脉冲				连续				
优势	能够在短时间内实现高峰值功率输出				能够在长时间内连续出光, 具有稳定的工作状态, 光束质量好				
不足	光脉冲输出状态不稳定, 转换效率较低				热效应强, 需采取适当的冷却措施				
最大平均功率/W	30	0.022		28	4.37	264	502	39	945.9
峰值功率/kW	25	12.2		87.5	91				
转换效率/%	74.6			56	21	68		19	74.12
研究内容	调整重复频率和泵浦功率来抑制非线性效应	优化脉冲时间序列	模拟 ASE 的动态变化	皮秒 YDFA 非线性光谱展宽后的脉冲压缩	有源光纤长度对峰值功率、SBS 阈值、光-光转换效率的影响	分析热诱导 SBS 增益展宽的有效 SBS 阈值	减少光纤的声、光模式间的重叠	大模场直径柔性 YDF 的参数优化	种子激光器的泵浦功率对 ASE 现象和受激拉曼散射的影响
应用领域	高功率非线性波长转换	同步脉冲泵浦技术	低重复频率的高功率脉冲激光放大器	脉冲压缩技术	有源光纤最佳长度的确定	提高 SBS 阈值	提高 SBS 阈值	高功率单片式 MOPA 激光器	MOPA 结构种子激光器泵浦功率范围的确定

从以上总结的国内外研究结果可以发现, 1 μm MOPA 激光器的研究大多集中于脉冲信号的放大

方面, 而连续光放大方面的研究则相对较少, 且连续光工作状态下的输出功率及斜率效率仍有待提

升。除此之外,在表 1 的“研究内容”一栏中可发现,以往相关的研究很少关注 MOPA 结构中种子激光器的泵浦功率输出对 ASE 现象和受激拉曼散射(stimulated Raman scattering, SRS)的影响。因此,对 CW 工作模式下,1 μm 全光纤 MOPA 结构激光器的输出特性进行研究,对于提高激光效率具有重要意义。本文提出了一种 CW 工作模式下,利用光纤光栅对实现全光纤结构的高功率 YDFL。实验探究了小比例功率放大 MOPA 结构中,种子光功率对激光输出特性的影响,在抑制放大级 ASE 现象和抑制 SRS 之间寻找到一个适宜的功率输出区间,为 1 μm 波段 MOPA 结构 YDFL 激光输出性能的提升提供参考价值。

1 器件结构

YDFL 泵浦波长的选择取决于 YDF 的吸收和发射光谱,YDF 有两个吸收峰,分别在 915 nm 和 976 nm 波段附近^[16]。915 nm 处的吸收系数约为 976 nm 处的 1/3,且 915 nm 处的吸收峰宽度远远大于 976 nm 处的吸收峰宽度。半导体激光器输出激

光的中心波长与温度呈正相关,当温度升高时,会产生温度漂移现象,即输出激光的中心波长向长波长方向发生偏移,温漂系数约为 0.3 nm/°C。如果使用中心波长为 976 nm 的半导体激光器进行泵浦,对激光器的冷却和温控系统会有很高的要求。因此,915 nm 泵浦多用于工业激光生产,它的优点是能使激光器结构简单、可靠性高。在接下来的研究中,使用中心波长为 915 nm 的半导体激光器作为泵浦源,对基于 MOPA 结构的 YDFL 的关键技术进行了研究与分析。

低噪声窄线宽光纤激光器受限于增益光纤长度及激光器谐振腔结构,导致输出功率有限(毫瓦量级),因此采用 MOPA 技术以获得高功率的单频激光输出,即采用低噪声窄线宽的光纤激光器作为种子激光器,后接 1 级 YDFA,结合了低功率种子源和高功率放大器的优点,保留种子激光器的窄线宽、低噪声等特性,与此同时,实现高功率、高能量的激光输出^[17]。根据前向泵浦结构光束质量好的特点,设计了 1 级放大的 MOPA 结构光纤激光器,全光纤激光器结构如图 1 所示。

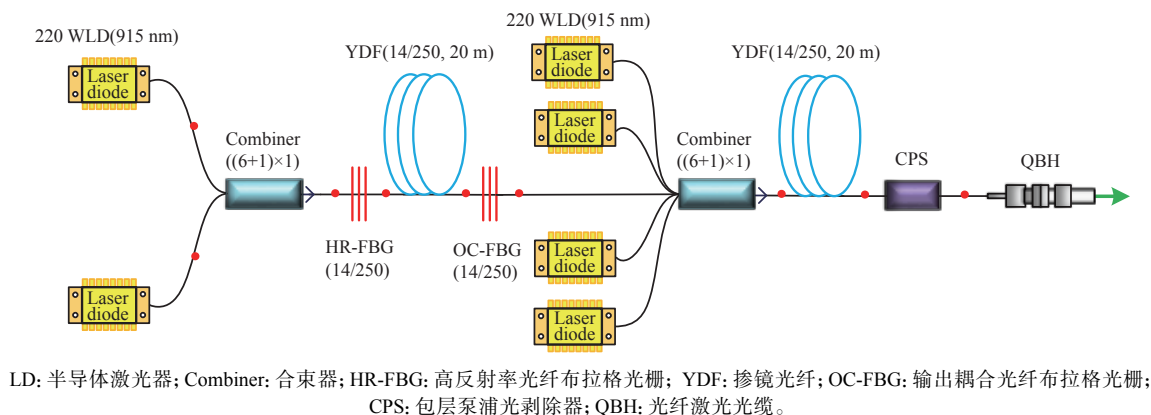


图 1 MOPA 结构全光纤激光器光路结构

Fig. 1 Structure diagram of optical path of all-fiber laser with MOPA structure

种子激光器和放大器的泵浦源均采用 915 nm 多模半导体激光器(220 W-135/155),其最大输出功率为 220 W。使用(6+1)×1 的泵浦/信号光合束器将种子激光器的 2 个 LD 输出的泵浦光以 95% 的效率耦合进入 YDF,剩下 4 根多余的输入光纤则两两对熔。YDF 选用 14 μm /250 μm 双包层掺镜光纤(915 nm 处包层泵浦吸收系数为 0.74 dB/m)。种子激光器和放大器均采用前向泵浦方式,窄带均匀高反射率光纤布拉格光栅(high reflectivity fiber Bragg grating, HR-FBG)和低反射率输出耦合光纤

布拉格光栅(output coupler fiber Bragg grating, OC-FBG)形成谐振腔。YDF 内包层为八边形结构,可以防止泵浦光在内包层中形成螺旋效应,提高了光纤纤芯对泵浦光的利用效率。利用 HR-FBG 一端作为泵浦光的输入端,用于波长选择;利用 OC-FBG 一端作为激光的输出端,连接光放大级模块,可以保证线性谐振腔内激光的稳定激射。

掺镜光纤放大器采用 4 个 LD 泵浦,同样采用(6+1)×1 的泵浦/信号光合束器将其输出的泵浦光耦合进入放大级 YDF,在放大器的输出端使用包

层泵浦光剥除器(cladding power stripper, CPS)剥离包层中残留的泵浦光。此外,输出部分采用光纤激光光缆(quartz block head, QBH)。输出光纤的长度,即由合束器输出到 QBH 的距离约为 3 m。种子源输出的激光经过 1 级放大,可将种子源输出的 326 W 信号光放大至 945.9 W。

种子激光器和 YDFA 的有源光纤均盘绕于直径约为 14 cm 的椭圆形刻槽中,刻槽与光纤间的空隙用导热硅脂填充以充分接触散热,并固定在水冷散热器上,水冷机的温度设置为 25 $^{\circ}\text{C}$ 。在全光纤结构中,有源光纤、合束器和 FBG 的光纤具有不同的波导参数和构成,因此,在对熔前对熔接电流和放电时间等熔接参数进行优化,以获得最小的熔接损耗(范围 0~0.03 dB)。使用双组分导热凝胶对熔接区域进行涂覆,以正确引导多模泵浦光通过熔接区域到达有源光纤。因此,通过对局部温度的控制,熔点燃烧的可能性较小^[18]。

2 实验结果与讨论

2.1 种子源输出特性

使用激光功率计(Gentec-EO, UP55)测量激光输出,并通过光谱分析仪(Yokogawa, AQ6374)捕获种子激光器的激光光谱。由图 2(a)可见,输出激光的中心波长为 1 070.194 nm,与实验用的光纤布拉格光栅(fiber Bragg grating, FBG)的中心反射波长一致,边模抑制比为 30.143 dB,激光中心波长处的最大平均功率可达到 326 W。为了考察种子激光器在输出最大平均功率时的稳定性,对激光光谱进行 30 min 内每 5 min 记录一次的连续扫描。30 min 内激光的功率抖动与中心波长偏移情况如图 2(b)所示,可见其中心波长偏移量小于 0.24 nm,功率抖动范围小于 0.04 dB,表明搭建的种子激光器可实现长时间的激光稳定输出。

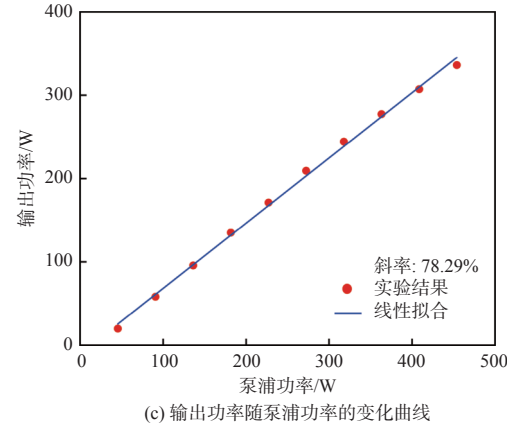
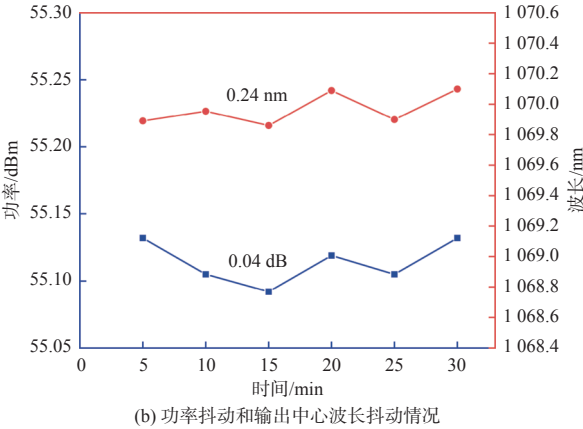
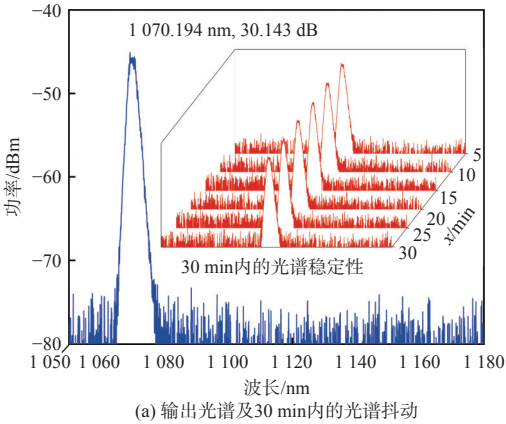


图 2 种子源输出特性
Fig. 2 Output characteristics of seed source

由于高浓度 YDF 的增益特性,915 nm 泵浦的 1 070 nm 全光纤掺镱激光器的设计需要进行严格的参数优化。在低增益区域,有源光纤的长度和输出耦合器的反射率已经通过多次反复实验,针对输出功率和最大斜率效率进行了优化。使用激光功率计测量不同泵浦功率时的激光输出功率,如图 2(c)所示,可见斜率效率为 78.29%。激光输出功率随泵浦功率的线性增加表明了功率能够被进一步放大的可能性,且适当的冷却技术能够减少由于量子亏损累积的热量对光学谐振腔造成的热损伤,从而保证稳定的激光器工作效率。

2.2 MOPA 激光器输出特性

以上实验完成后,将种子激光器输出端与 YDFA 信号输入端进行熔接,构成具备单级放大功能的 MOPA 结构光纤激光器。相较于单腔结构的种子源光纤激光器,MOPA 结构中由于放大级光路的加入,势必对种子激光的输出产生一定的影响。完成 MOPA 结构熔接后,在只开启种子激光器泵浦的条件下,对其输出特性进行了研究,输出功率与泵浦输入功率之间的关系如图 3 所示。

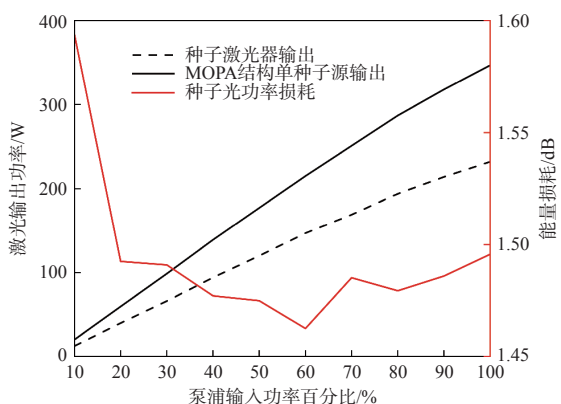


图3 MOPA结构单种子源输出特性

Fig. 3 Output characteristics of single seed source with MOPA structure

由于现有功率计量程是千瓦级的,低功率泵浦输入时总体输出功率低,导致测量误差变大,因此高功率泵浦输入时的损耗应该更接近真实损耗情况。因此,由图3可知,种子激光器在连接放大级后,输出功率明显降低,能量损失在1.49 dB左右。

分析认为,相较于单纯的种子激光器,种子光在以MOPA结构传输时,增加了放大级合束器损耗(典型损耗值为0.5 dB)、放大级增益光纤损耗(长度为20 m左右,典型损耗为20 dB/km,则总损耗约为0.4 dB)、放大级剥除器CPS损耗(典型损耗值为0.2 dB)以及相关器件连接处的熔接点损耗(4个熔接点,典型熔接损耗0.02 dB~0.05 dB,则总损耗约为0.08 dB~0.2 dB)等多处附加损耗,是造成种子光能量出现损失的主要原因。其中,器件的插入损耗改善程度十分有限,而熔接点损耗可以通过优化熔接程序和工艺进行改善,降低能量损失。

在完成以上内容测试后,进行MOPA结构的光纤激光放大实验。种子激光器泵浦总功率为454 W,放大级泵浦总功率为908 W。在此实验条件下,放大级泵浦不同条件下的MOPA激光器输出特性如图4所示,可见对应的斜率效率为74.12%。这是由于光路器件的增加,导致种子光在传输过程中出现能量损失,因此光路实际损耗明显高于单谐振腔结构,这就决定了其斜率效率会明显低于单腔结构。在种子激光器和放大级LD泵浦均为满功率输出时,MOPA激光器的最大平均输出功率达到945.9 W。在放大级泵浦满功率输出,种子源泵浦输入功率百分比不同情况下,MOPA激光器的光谱特性如图5所示。

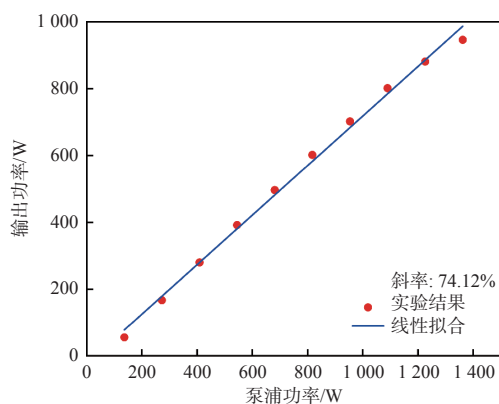


图4 MOPA激光器输出特性

Fig. 4 MOPA laser output characteristics

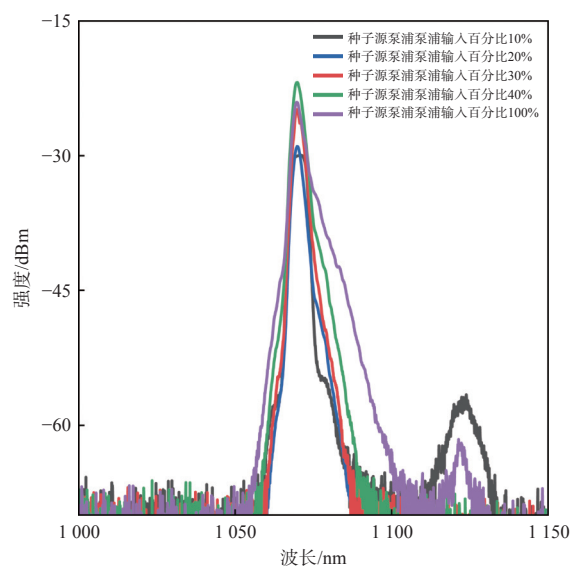


图5 放大级泵浦满功率输出,种子源泵浦输入功率百分比不同时,MOPA激光器的光谱

Fig. 5 Spectral characteristics of MOPA laser with full-power output of amplifier pump and different input power percentage of seed source pump

由图5及实验数据分析可得:当种子光功率较低,放大级泵浦功率较大时,容易出现ASE现象,导致输出激光质量下降,光-光转换效率降低;当种子光功率较大时,随着放大级泵浦光功率注入的增加,极易出现SRS现象,且两者呈明显的反比关系,同时导致激光质量下降,光-光转换效率降低。相对于本实验,放大级泵浦功率为908 W的情况下,较为适宜的种子光输入应为种子源泵浦输出功率的20%~30%之间,考虑到本次实验中种子光功率损耗较大的现实情况,种子源合理的泵浦输出功率应在10%~30%(即45.4 W~136.2 W)之间。

由以上分析可知,小比例功率放大MOPA结

构中, 种子光功率是影响 SRS 阈值的主要因素。种子光功率过小或过大都将导致光束质量的恶化, 且种子源合理的泵浦输出功率在 10%~30% (即 45.4 W~136.2 W) 范围内, 光束质量较好。接下来, 在放大级注入泵浦功率为最大值的情况下, 对种子源泵浦输入功率百分比在 10%~30% 范围时的光谱进行了进一步分析, 典型光谱如图 6 所示。

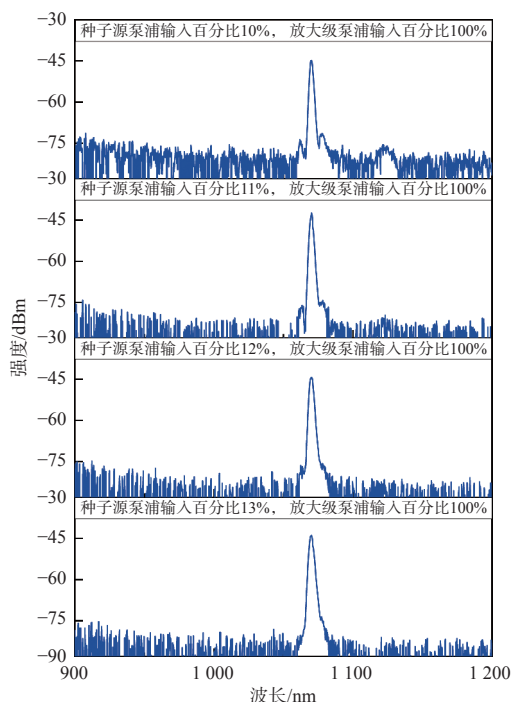


图 6 放大级泵浦满功率输出, 种子源泵浦输入功率百分比为 10%~30% 时的典型光谱

Fig. 6 Typical spectrum with full-power output of amplifier pump and seed source pump input power percentage of 10%~30%

分析图 6 光谱可知, 当种子光功率高于 13% (即 59.02 W) 时, MOPA 结构放大级光路的 ASE 现象已经得到了很好地抑制。从而得出结论, 种子光功率的提高有助于抑制光路的 ASE 现象。

3 结论

本文设计了一种基于 MOPA 结构的连续光全光纤高功率 YDFL。种子源的最大输出激光功率为 326 W, 对应的斜率效率为 78.29%。MOPA 激光器整机的最大平均输出功率可达 945.9 W, 斜率效率为 74.12%。输出激光中心波长为 1 069.96 nm, 3 dB 光谱线宽为 3.401 nm。

种子源合理的泵浦输出功率应在 10%~30% (即 45.4 W~136.2 W) 范围内, 此时未出现 SRS 效应,

光束质量较好; 种子光功率的提高有助于抑制光路的 ASE 现象, 当种子光功率高于 13% (即 59.02 W) 时, MOPA 结构放大级光路的 ASE 现象可以得到很好抑制。总而言之, 综合考虑到 ASE 现象和 SRS 效应的影响, 种子源泵浦功率在 59.02 W~136.2 W 范围内时, 能够实现良好的激光输出, 此时放大过程未观察到 ASE 和 SRS, 种子光放大良好, 光谱特征无明显变化。研制的 1 μm 波段 MOPA 结构高功率 YDFL 可广泛应用于国防军事、工业加工等领域, 具有良好的应用前景。

参考文献:

- [1] ZHANG X J, LI W W, LI J, et al. Mid-infrared all-fiber gain-switched pulsed laser at 3 μm [J]. *Opto-Electronic Advances*, 2020, 3(5): 6-15.
- [2] MA W Z, ZHAO D S, LIU R M, et al. Observation and optimization of 2 μm mode-locked pulses in all-fiber net anomalous dispersion laser cavity [J]. *Opto-Electronic Advances*, 2020, 3(11): 13-20.
- [3] LEE E, SUN B, LUO J Q, et al. Compact pulsed thulium-doped fiber laser for topographical patterning of hydrogels [J]. *Opto-Electronic Advances*, 2020, 3(6): 13-21.
- [4] 洪瑶, 张靓, 纪海莹, 等. 多模光纤作可饱和吸收体的锁模光纤激光器 [J]. *光电工程*, 2021, 48(5): 36-42.
- HONG Yao, ZHANG Jing, JI Haiying, et al. Mode-locked fiber laser with multimode fiber as saturable absorber [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2021, 48(5): 36-42.
- [5] 尧涵, 石帆, 黄译平, 等. 基于模式耦合器的锁模掺镱光纤激光器 [J]. *光电工程*, 2020, 47(11): 87-92.
- YAO Han, SHI Fan, HUANG Yiping, et al. Mode-locked Yb-doped fiber laser based on mode coupler [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2020, 47(11): 87-92.
- [6] LIAO L, ZHANG F F, HE X L, et al. Confined-doped fiber for effective mode control fabricated by MCVD process [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(12): 3244-3249.
- [7] PASCHOTTA R, NILSSON J, TROPPER A C, et al. Ytterbium-doped fiber amplifiers [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1997, 33(7): 1049-1056.
- [8] JEONG Y, NILSSON J, SAHU J K, et al. Single-frequency, single-mode, plane-polarized ytterbium-doped fiber master oscillator power amplifier source with 264 W of output power [J]. *Optics Letters*, 2005, 30(5): 459-461.
- [9] GRAY S, LIU A P, WALTON D T, et al. 502 Watt, single transverse mode, narrow linewidth, bidirectionally

- pumped Yb-doped fiber amplifier[J]. *Optics Express*, 2007, 15(25): 17044.
- [10] ZAYTSEV A K, WANG C L, LIN C H, et al. Effective pulse recompression after nonlinear spectral broadening in picosecond Yb-doped fiber amplifier[J]. *Laser Physics*, 2012, 22(2): 447-450.
- [11] VALERON N, FERAL C, LHERMITE J, et al. 39 W narrow spectral linewidth monolithic ytterbium-doped fiber MOPA system operating at 976 nm[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(6): 1495-1498.
- [12] JIANG P P, YANG D Z, WANG Y X, et al. All-fiberized MOPA structured single-mode pulse Yb fiber laser with a linearly polarized output power of 30 W[J]. *Laser Physics Letters*, 2009, 6(5): 384-387.
- [13] ZHENG C, ZHANG H T, CHENG W Y, et al. Single mode MOPA structured all-fiber Yb pulse fiber amplifier at low repetition[J]. *Laser Physics*, 2011, 21(6): 1081-1084.
- [14] 张伟毅, 宁继平, 陈博, 等. 脉冲泵浦的掺镱光纤放大器中放大自发辐射动态变化模拟[J]. *光子学报*, 2011, 40(5): 699-704.
- ZHANG Weiyi, NING Jiping, CHEN Bo, et al. Simulation the ASE dynamics in the pulsed-pumped ytterbium-doped fiber amplifiers[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, 40(5): 699-704.
- [15] 石争, 盛泉, 史朝督, 等. 高峰值功率掺Yb³⁺石英光纤脉冲单频mopa[J/OL]. *光学学报*, 2022: 1-13. (2022-07-25). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1252.O4.20220722.2119.034.html>.
- SHI Zheng, SHENG Quan, SHI chaodu, et al. High peak power Yb³⁺-doped quartz fiber pulse single frequency MOPA[J/OL]. *Journal of Optics*, 2022: 1-13. (2022-07-25). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1252.O4.20220722.2119.034.html>.
- [16] ZHANG J H, YANG C, HUANG C, et al. 10 W CW ytterbium-doped fiber laser with 4 × 1 fused fiber bundle combiner[J]. *Frontiers of Optoelectronics in China*, 2009, 2(1): 61-63.
- [17] 魏珊珊, 刘元煌, 陈群峰, 等. 面向Rb原子精密测量的边带锁定 780 nm高功率激光源[J]. *中国激光*, 2021, 48(7): 48-56.
- WEI Shanshan, LIU Yuanhuang, CHEN Qunfeng, et al. Sideband-locked high-power 780 nm laser source for precise measurement based on Rb atoms[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(7): 48-56.
- [18] PAL D, SEN R, PAL A. Design of all-fiber thulium laser in CW and QCW mode of operation for medical use[J]. *Physica Status Solidi C*, 2017, 14(1/2): 1600127.