

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

许阳¹, 房强^{1,3}, 谢兆鑫², 李锦辉¹, 崔雪龙¹, 史伟^{2,3*}

¹山东海富光子科技股份有限公司, 山东 威海 264209;

²天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072;

³天津市现代激光与光学研究院, 天津 300384

摘要 设计了一种基于 915 nm 半导体激光单端抽运的单纤准单模全光纤激光振荡器, 其工作波长为 1080 nm, 输出功率可达 2.02 kW。结合理论和实验, 研究了增益光纤长度、受激拉曼散射(SRS)和输出功率之间的关系。通过对增益光纤长度进行优化, 在保证大于 2 kW 激光功率的前提下, 实现了高 SRS 抑制比的激光输出, 输出激光中 SRS 功率占比约为 0.8%。180 min 内激光器的功率不稳定性小于 ±1%, 光-光转换效率约为 70%。通过合理设计光纤盘绕, 有效抑制了光纤中光的高阶模式, 在满功率输出时成功地获得了准单模激光(光束质量因子 $M^2 \approx 1.5$), 并对该激光器在激光切割中的应用进行了研究。

关键词 激光器; 激光谐振器; 915 nm 抽运; 单端前向抽运; 准单模激光器

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0401003

Single Fiber Quasi-Single Mode 2 kW All-Fiber Laser Oscillator Based on Single-End 915 nm Semiconductor Laser Forward-Pumping

Xu Yang¹, Fang Qiang^{1,3}, Xie Zhaoxin², Li Jinhui¹, Cui Xuelong¹, Shi Wei^{2,3}

¹HFB Photonics Co. Ltd., Weihai, Shandong 264209, China;

²College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

³Tianjin Institute of Modern Laser & Optics Technology, Tianjin 300384, China

Abstract We design a single fiber quasi-single mode all-fiber laser oscillator based on single-end 915 nm semiconductor laser forward-pumping, which produces 2.02 kW output power at 1080 nm. We study the relationship among the gain fiber length, stimulated Raman scattering (SRS), and the output power theoretically and experimentally. We optimize the length of the gain fiber to achieve a laser with a high SRS suppression ratio of 0.8%, which has an output power of more than 2 kW. The optical to optical conversion efficiency of the laser oscillator is about 70%, and the power fluctuation is less than ±1% within 180 min running. The fiber coiling technique is adopted to effectively depress the high-order laser modes to obtain a quasi-single-mode laser (beam quality factor $M^2 \approx 1.5$) at the maximum output power. What is more, the application of the laser in laser cutting is investigated.

Key words lasers; laser oscillator; 915 nm pump; single end forward-pumping; quasi-single mode laser

OCIS codes 140.3480; 140.3510; 140.3570; 140.3615

1 引言

近年来, 掺镱光纤激光器(YDFL)由于具有诸

多优势, 被广泛应用于工业加工领域^[1-2]。现代工业的高速发展对光纤激光器的输出功率和光束质量也提出了更高的要求。然而, 非线性效应等技术瓶颈

收稿日期: 2017-09-22; 收到修改稿日期: 2017-10-20

基金项目: 山东省自然科学基金(ZR2014FP015)

作者简介: 许阳(1986—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事高性能光纤激光器方面的研究。E-mail: xuy@hfbphotonics.com

* 通信联系人。E-mail: shiwei@tju.edu.cn

在很大程度上限制了大功率光纤激光器输出功率和光束质量的提高。主振荡功率放大(MOPA)技术既能进一步提高光纤激光器的输出功率,又能保证较高的输出光束质量。目前,许多研究人员应用MOPA结构实现了功率大于1 kW的高光束质量光纤激光输出^[1-8]。但是,MOPA结构的光纤激光器存在着模式不稳定(MI)阈值低、结构复杂、对光学器件要求高等缺点^[9-10],这在很大程度上限制了MOPA结构光纤激光器的工业应用。单谐振腔结构的光纤激光振荡器则不存在上述问题,是用于激光工业加工的理想光源。

近年来,很多学者研究了单谐振腔结构的光纤激光振荡器。2015年,Yu等^[9]使用915 nm抽运激光以及长度为41 m、包层直径为400 μm、纤芯直径为20 μm(20/400 μm)的增益光纤,实现了单纤单振1.5 kW的激光输出,光束质量因子 M^2 小于1.2。然而,由于受激拉曼散射(SRS)、MI等非线性效应的限制,光纤激光振荡器的最高输出功率被限制在2 kW以下^[9,11]。2016年,Yang等^[10]混合使用915 nm与976 nm的抽运激光,通过单端抽运方式,获得了高SRS抑制比、高MI阈值的2 kW准单模激光输出, $M^2 \approx 1.6$ 。Yang等指出,相比于976 nm抽运激光,使用915 nm抽运激光的光纤激光器可获得较高的MI阈值。2016年,Yang等^[12]又使用976 nm的抽运激光,通过双向抽运方式,得到了2.5 kW准单模激光输出, $M^2 \approx 1.3$ 。近年来,研究者在相关领域取得了较多的成果^[12-14],但这些技术方案多采用976 nm抽运或双端抽运方式,功率稳定度较低,结构复杂且成本较高。目前,使用915 nm半导体激光单端抽运方式获得输出功率大于2 kW的高SRS抑制比、高光束质量激光输出的光纤激光振荡器鲜有报道。

本文报道了一种使用915 nm半导体激光单端前向抽运的单谐振腔全光纤激光振荡器,其最高输出功率为2.02 kW, $M^2 \approx 1.5$,并且有效地抑制了SRS。此外,本课题组还对本文实验装置在激光切割方面的应用进行了初步的讨论和研究。

2 实验设置

实验装置结构示意图如图1所示,18个最高输出功率约为160 W的915 nm光纤耦合半导体激光器(LD)充当激光振荡器的抽运源,输出尾纤均为105/125 μm多模光纤。将(18+1)×1光纤合束器的18根抽运尾纤分别焊接在18个半导体激光器上,将抽运光耦合进激光振荡器谐振腔内。光纤合束器的输入信号光纤与输出信号光纤分别为10/125 μm和20/400 μm无源双包层光纤,实验中对输入信号光纤进行了8°的斜切处理,以避免端面反射。两个刻写于20/400 μm无源双包层光纤上的、反射率分别为99.9%和10%的光纤布拉格光栅(FBG)分别充当高反光栅(HR FBG)和部分反射光栅(PR FBG),并构成谐振腔,HR FBG和PR FBG的3 dB反射带宽分别为2 nm和1 nm,反射中心波长都在1080 nm附近。本装置使用20/400 μm双包层掺镱光纤(YDF)作为增益光纤,其纤芯与内包层的数值孔径NA分别为0.06和0.46,在915 nm附近的包层吸收系数约为0.48 dB/m。在PR FBG的输出光纤焊接一个自制的包层功率滤除器(CPS),用于滤除包层中的剩余抽运光和纤芯泄漏的信号光。考虑到实验及工业应用的实际需要,激光振荡器使用一个传输光纤长度为10 m的QBH(quartz block head)来输出激光,传输光纤为25/400 μm无源双包层光纤。

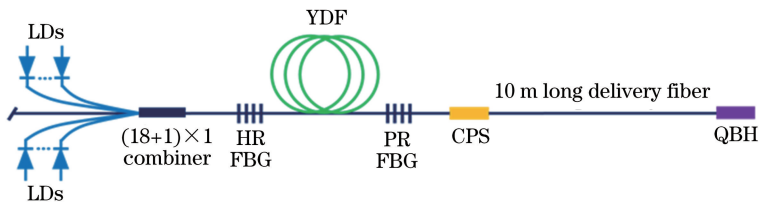


图1 实验装置结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of experimental setup

3 实验结果

根据激光器的结构建立了单端抽运单谐振腔全光纤单模激光振荡器的相关数值模型,以模拟实验中激光谐振腔内的功率分布,并以此为指导优化实

验参数,得到最佳的输出指标。相关方程为

$$\pm \frac{dP_s^\pm(z)}{dz} = -\Gamma_s [\sigma_{as} N_0(z) - (\sigma_{as} + \sigma_{es}) N_2(z)] P_s^\pm(z) - \alpha_s P_s^\pm(z), \quad (1)$$

$$\pm \frac{dP_p^\pm(z)}{dz} = -\Gamma_p[\sigma_{ap}N_0(z) - (\sigma_{ap} + \sigma_{ep})N_2(z)]P_p^\pm(z) - \alpha_p P_p^\pm(z), \quad (2)$$

$$N = 8 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}, \quad (3)$$

式中： $P_s^\pm(z)$ 为谐振腔内正向和反向传输的信号光功率，+代表正向(激光输出方向)，-代表反向； z 为增益光纤长度； Γ_s 为纤芯中的信号功率填充系数，不同的模式对应不同的值，可利用光纤参数计算得到； σ_{as} 为信号光的受激吸收截面； σ_{es} 为信号光的受激发射截面； $N_0(z)$ 为随增益光纤长度变化的总粒子数密度； $N_2(z)$ 为激发态能级的粒子数密度； $P_p^\pm(z)$ 为谐振腔内正向和反向传输的抽运光功率； Γ_p 为纤芯中的抽运功率填充系数，这里可简化为纤芯与包层的面积比； σ_{ap} 为抽运光的受激吸收截面； σ_{ep} 为抽运光的受激发射截面； N 为纤芯 Yb^{3+} 掺杂浓度。

结合特定的边界条件，输入相关实验参数，其中光纤合束器对抽运功率的插入损耗约为 3%。对以

上方程组进行求解，即可得到谐振腔内的功率分布，其模拟结果如图 2(a)所示。

由模拟结果可知，在满抽运功率下，增益光纤的最佳长度约为 34 m，当增益光纤取 34 m 时，最大输出功率约为 2.04 kW。由图 2(a)给出的理论模拟结果还可得出，如果计入 QBH 1%~2%的插入损耗，那么要实现 2 kW 的激光功率输出，增益光纤长度的最小值约为 28 m。图 2(b)给出了实验测得的不同光纤长度下的输出功率，增益光纤长度为 36.5 m 和 34 m 时，输出功率基本一致，而当增益光纤长度小于 34 m 时，输出功率明显降低，该结果与模拟结果相符合。图 2(b)中抽运功率未加至最高，是因为当增益光纤长度较长时，若抽运功率加到一定值，SRS 效应明显变强，影响输出功率对比结果的准确性。为方便对比，图 2(b)只给出了当增益光纤长度取 36.5 m 且 SRS 未明显出现时的(SRS 功率占总激光功率的 1%)功率值。

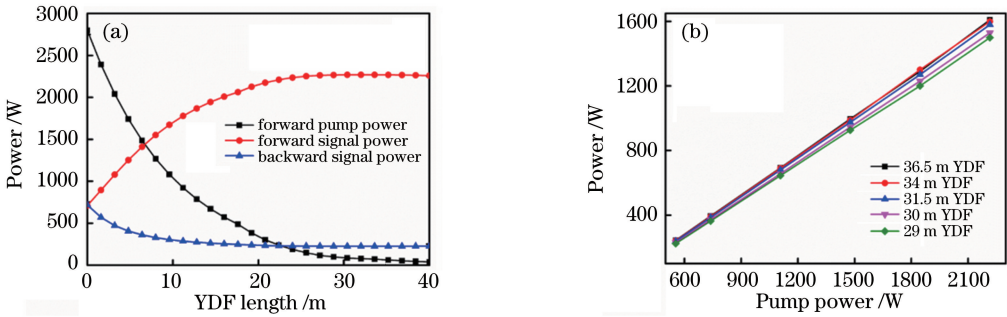


图 2 (a)模拟腔内信号与抽运功率随 YDF 长度的变化;(b)不同 YDF 长度下的输出功率
Fig. 2 (a) Simulation of signal and pump power changed along YDF length;
(b) variation in output power with YDF length

用来估算 SRS 阈值的一个经典公式为^[15]

$$P_0^{cr} \approx \frac{16A_{eff}}{g_R L_{eff}}, \quad (4)$$

式中 P_0^{cr} 为 SRS 阈值功率， A_{eff} 为光纤的纤芯有效面积， g_R 为光纤的 SRS 增益， L_{eff} 为光纤的有效长度。此处 SRS 阈值功率的定义为：经过介质传输后，在输出端使 SRS 光与信号光功率相等的初始信号光功率。由(4)式给出的 SRS 阈值与各光纤参数之间的关系可知，对于确定的光纤规格及工作波长，SRS 阈值功率与光纤的有效长度成反比。因此，抑制 SRS 需要尽量减小光纤的长度。图 3 给出了实验中测得的不同增益光纤长度下的 SRS 阈值功率，此处定义 SRS 阈值功率为 SRS 功率占总激光功率 1%时的激光功率。实验中发现，在系统中其余光纤长度基本保持不变的情况下，SRS 阈值功率与增益光纤的长度基本上呈线性关系。根据图 3 中的拟合

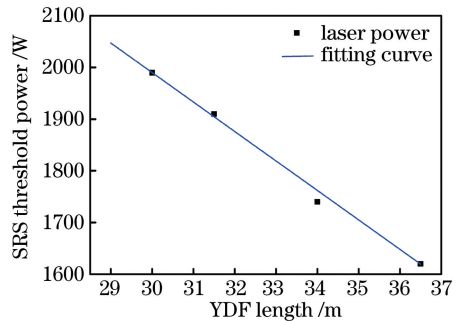


图 3 不同 YDF 长度下的 SRS 阈值功率
Fig. 3 Variation in SRS threshold power with YDF length
曲线，推断当增益光纤取 29 m 时，SRS 阈值功率约为 2.05 kW。

实验中，为获得大于 2 kW 的激光输出功率，同时抑制 SRS，依照图 2 和图 3 的模拟和实验结果对激光器谐振腔内的光纤长度进行了优化。将增益光纤

长度减小为 29 m, 抽运功率增至满功率(约为 2.88 kW)时, 采用功率计(10K-W-BB-45-v3, Ophir Inc., 以色列)测得的激光器最大输出功率为 2.02 kW, 光-光转换效率约为 70% [图 4(a)], 与模拟结果基本一致。图 4(b) 给出了激光器的功率稳定度测试结果,

在 180 min 内激光器输出功率的抖动小于 $\pm 1\%$, 较高的功率稳定度得益于使用 915 nm 波长抽运。在 915 nm 附近, 增益光纤中 Yb^{3+} 的吸收截面随波长的变化很小, 在很大程度上减小了抽运激光器工作波长随温度漂移造成的输出激光功率抖动。

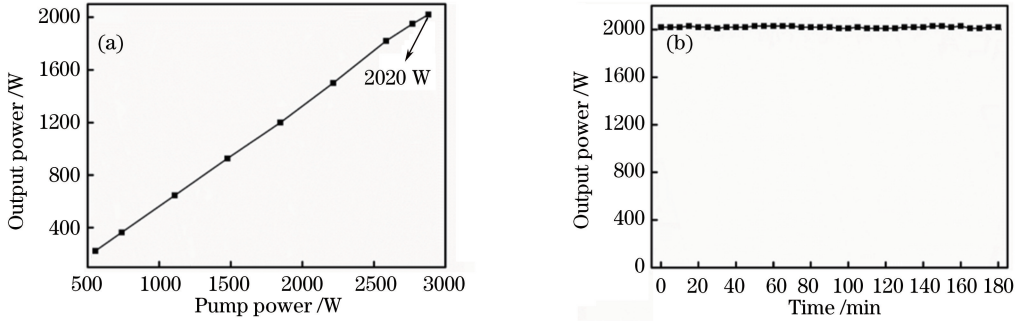


图 4 (a) 激光器输出功率随抽运功率的变化; (b) 180 min 内激光器输出功率随时间的变化

Fig. 4 (a) Variation in output power with pump power; (b) variation in output power with time in 180 min

图 5 给出了输出功率为 2.02 kW 时的输出光谱, 可见激光器中心波长在 1080 nm 附近, 没有明显的剩余抽运, SRS 被抑制在约 23 dB 以下, 计算得到 SRS 功率占比约为 0.8%, 与图 3 中的拟合结果基本一致。

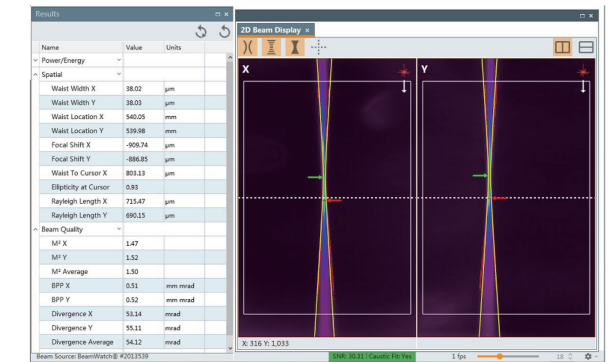


图 6 输出功率为 2.02 kW 时激光器的输出光束质量

Fig. 6 Beam quality of laser with output power of 2.02 kW

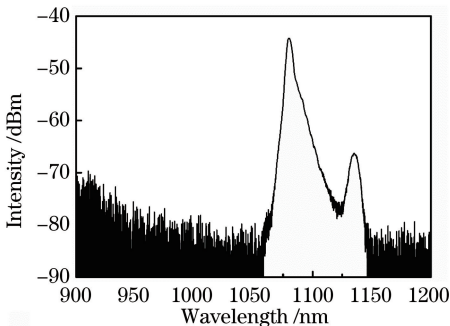


图 5 激光器输出功率在 2.02 kW 时的输出光谱

Fig. 5 Output spectrum of 2.02 kW laser output power

由于激光器所用增益光纤的归一化频率 (V_{number}) 约为 3.84, 而所用的 25/400 μm 传输光纤的 QBH V_{number} 约为 4.4, 因此理论上激光器可输出多个激光模式。借助光纤盘绕技术可以有效地抑制高阶模式, 提高光束质量。图 6 给出了使用光束质量测试仪(Beamwatch, Ophir Inc., 以色列)测得激光器的输出功率为 2.02 kW 时的 M^2 在 x 、 y 方向的光束质量因子分别为 $M_x^2 = 1.47$, $M_y^2 = 1.52$, 激光器实现了准单模输出。

果, 在 180 min 内激光器输出功率的抖动小于 $\pm 1\%$, 较高的功率稳定度得益于使用 915 nm 波长抽运。在 915 nm 附近, 增益光纤中 Yb^{3+} 的吸收截面随波长的变化很小, 在很大程度上减小了抽运激光器工作波长随温度漂移造成的输出激光功率抖动。

此外, 使用上述激光系统进行切割测试, 图 7 为本文实验装置对不同金属材料的切割效果, 可见切割断面质量良好。表 1 对比了本文实验装置与 1.5 kW 商用光纤激光器对不同厚度的不同金属材

Table 1 Comparison of cutting speed of designed system and 1.5 kW commercial laser

Material	Cutting speed of 1.5 kW laser / ($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)	Cutting speed of designed system / ($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)
12 mm carbon steel	0.84	1.08
5 mm stainless steel	2.00	3.20
7 mm stainless steel	—	1.10
2 mm red copper	5.80	7.00
3 mm red copper	2.00	2.20



图 7 激光切割效果图

Fig. 7 Results of laser cutting

4 结 论

设计了基于 915 nm 半导体激光单端抽运的 2 kW 单纤准单模全光纤激光振荡器, $M^2 \approx 1.5$, 180 min 内满功率输出状态下激光器的功率抖动在 $\pm 1\%$ 以内, SRS 功率占比约为 0.8%。使用本文实验装置进行了激光切割测试, 对其切割性能进行了初步研究。本文实验装置在工业加工领域有着广阔的应用前景。

参 考 文 献

[1] Fang Q, Shi W, Qin Y, *et al.* 2.5 kW monolithic continuous wave (CW) near diffraction-limited fiber laser at 1080 nm [J]. *Laser Physics Letters*, 2014, 11(10): 105102.

[2] Shi W, Fang Q, Zhu X S, *et al.* Fiber lasers and their applications [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(28): 6554-6568.

[3] Li T L, Li Y, Peng W J, *et al.* 1.1 kW narrow band spectra random fiber laser amplifier [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(2): 0201015.
李腾龙, 李阳, 彭万敬, 等. 1.1 kW 窄光谱随机光纤激光放大 [J]. *中国激光*, 2017, 44(2): 0201015.

[4] 王岩山, 颜宏, 彭万敬, 等. 基于主动偏振控制的 1 kW 窄线宽偏振光纤激光器 [J]. *中国激光*, 2016, 43(5): 0519001.

[5] 粟荣涛, 马鹏飞, 王小林, 等. 线偏振窄线宽单模光纤放大器实现 2.43 kW 的功率输出 [J]. *中国激光*, 2017, 44(3): 0315001.

[6] Xu Y, Fang Q, Qin Y G, *et al.* 2 kW narrow spectral width monolithic continuous wave in a near-diffraction-limited fiber laser [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(32): 9419-9421.

[7] Yu H L, Zhang H W, Lü H B, *et al.* 3.15 kW direct diode-pumped near diffraction-limited all-fiber-integrated fiber laser [J]. *Applied Optics*, 2015, 54

(14): 4556-4560.

[8] Lin A X, Tang X, Zhan H, *et al.* 6 kW Yb-doped aluminophosphosilicate laser fiber [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2016, 28(12): 129901.
林傲祥, 唐选, 湛欢, 等. 国产有源光纤成功实现 6 kW 激光输出 [J]. *强激光与粒子束*, 2016, 28(12): 129901.

[9] Yu H L, Wang X L, Tao R M, *et al.* 1.5 kW near-diffraction-limited, high-efficiency, single-end-pumped all-fiber-integrated laser oscillator [J]. *Applied Optics*, 2015, 53(34): 8055-8059.

[10] Yang B L, Zhang H W, Wang X L, *et al.* Mitigating transverse mode instability in a single-end pumped all-fiber laser oscillator with a scaling power of up to 2 kW [J]. *Journal of Optics*, 2016, 18(10): 105803.

[11] Shi W, Fang Q, Xu Y, *et al.* 1.63 kW monolithic continuous-wave single-mode fiber laser oscillator [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2015, 26(4): 662-666.
史伟, 房强, 许阳, 等. 1.63 kW 单纤单模连续全光纤激光器 [J]. *光电子 • 激光*, 2015, 26(4): 662-666.

[12] Yang B L, Zhang H W, Shi C, *et al.* Mitigating transverse mode instability in all fiber laser oscillator and scaling power up to 2.5 kW employing bidirectional-pump scheme [J]. *Optics Express*, 2016, 24(24): 27828-27835.

[13] Mashiko Y, Nguyen H K, Kashiwagi M, *et al.* 2 kW single-mode fiber laser with 20-m long delivery fiber and high SRS suppression [C]. *SPIE*, 2016, 9728: 972805.

[14] Ikoma S, Nguyen H K, Kashiwagi M, *et al.* 3 kW single stage all-fiber Yb-doped single-mode fiber laser for highly reflective and highly thermal conductive materials processing [C]. *SPIE*, 2017, 10083: 100830Y.

[15] Agrawal G P. *Nonlinear Fiber Optics*, Fourth Edition [M]. Cambridge: Academic Press, 2006: 274-279.