

2 kW 抗反射振荡-放大一体化光纤激光器

舒强**, 李成钰, 林宏奂, 黄志华, 王波鹏, 刘珺, 李泽标, 郭超, 唐选, 赵鹏飞, 王建军*, 景峰

中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900

摘要 提出了一种新结构全光纤激光器。采用振荡-放大一体化结构,有效抑制了反射激光对光纤激光器稳定性的影响,实现了高效率、高功率和高光束质量的输出。实验搭建了光纤激光器系统,实现了大于 2 kW 的输出,抽运光和输出光之间的转换效率为 81.6%,光束质量 M^2 因子优于 1.4。采用高反射金属材料验证了该激光器的抗反射性能,激光器在满功率输出下,能够长时间稳定工作。

关键词 激光器; 光纤激光; 抗反射; 高功率; 光束质量

中图分类号 TN243

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0801004

2 kW Class Antireflection Fiber Laser with Oscillator-Amplifier Integration

Shu Qiang**, Li Chengyu, Lin Honghuan, Huang Zhihua, Wang Bopeng, Liu Yu,

Li Zebiao, Guo Chao, Tang Xuan, Zhao Pengfei, Wang Jianjun*, Jing Feng

Laser Fusion Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 610200, China

Abstract A novel antireflection all-fiber laser is presented. The oscillator-amplifier integration is utilized to suppress the effect of the reflection light on the stability of the fiber laser, and obtain efficient output with high power and beam quality. The fiber laser system is set up. The output power more than 2 kW with an optical-optical efficiency of 81.6% is obtained, and the beam quality M^2 is better than 1.4. The high-reflected metal is used to verify antireflection ability of the laser. The experimental results show that the system has good long-term stability under full power output.

Key words lasers; fiber laser; antireflection; high power; beam quality

OCIS codes 140.3280; 140.3295; 140.3425

1 引 言

光纤具有表面积大、散热好、输出光束质量高、效率高、柔性传输的优点。全光纤结构的激光器体积小、质量小、结构简单、电光效率高,在军事、医疗等领域有着广泛的应用。然而,光纤激光光源在工业加工应用中,还有许多问题亟待解决和优化。特别是在激光切割、焊接等过程中,光纤激光器在加工铜、铝这类具有高反射性的材料时,材料表面产生剧烈反射,部分反射光会沿激光输出端口进入激光器,使得光纤激光器运行工作的可靠性受到严重影响^[1-3]。

目前,主要采用两种方法实现光纤激光器的抗反射。一种是利用一些特殊的器件或结构对反射光

进行隔离或剥除。由于反射激光大部分在光纤包层中传输,因此可以采用包层功率剥离器(CPS)将包层的反射激光剥除。纤芯中传输的反射激光需要使用隔离器进行隔离,但是经过增益光纤后反射激光会被放大,普通的隔离器不再适用。放大后的反射激光会引起主振荡功率放大(MOPA)结构激光器输出功率产生波动,且经过光纤熔点处重新进入包层的反射激光还可能造成抽运激光二极管(LD)等关键器件烧毁。另一种是采用单谐振腔结构光纤激光器。对于这种结构的激光器,其纤芯部分的反射激光再次在腔内形成振荡,不会影响激光器的输出。但是单谐振腔结构的激光器存在光光效率低的缺点,其效率低于 MOPA 结构激光器,并且振荡腔光栅的抽运和信号功率负载高,对光栅的性能要求高。

收稿日期: 2018-01-10; 修回日期: 2018-02-21; 录用日期: 2018-04-08

基金项目: 国家自然科学基金(11474257)

* E-mail: wjjcaep@126.com; ** E-mail: q.shu@foxmail.com

单谐振腔结构光纤激光器目前较难实现大于 2 kW 的输出^[4-5]。

本文提出了一种“振荡-放大一体化”的全光纤激光器结构,结合单振荡腔和 MOPA 结构的激光器的优点,在具备抗反射的功能同时,还能保持高的输出功率、放大效率和光束质量。理论模拟分析了这种结构的可行性,并通过实验实现了高功率、高效率、高光束质量的 2 kW 的激光输出,最后采用高反射金属材料验证了该结构的抗反射性能。

2 实验原理及装置

“振荡-放大一体化”的光纤激光器示意图如图 1 所示。该结构类似于双端抽运的单谐振腔,不同的是,低反光栅位于掺镱光纤的中间位置,这样使得光纤激光器变成了振荡-放大结构。激光器光纤光栅(FBG)中心波长为 1080 nm,高反光栅(HR)和低

反光栅(OC)对信号光的反射率分别是 99.9% 和 9.3%,光栅尾纤的芯径为 20 nm,包层直径为 400 nm。掺镱光纤(YDF)为 Nufern 20/400 光纤,对 976 nm 波长的抽运光的吸收系数为 $1.2 \text{ dB}\cdot\text{m}^{-1}$,振荡级掺杂光纤长度为 2 m。振荡级低反光栅输出直接连接另一段 Nufern 20/400 掺镱光纤,长度为 15 m。振荡级高反光栅一端接 $(6+1)\times 1$ 抽运/信号合束器(MPC),7 个输出功率约为 60 W 的 LD 由一个 7×1 合束器合束后,接入该 $(6+1)\times 1$ 抽运/信号合束器的一根抽运光纤。15 m 掺镱光纤另一端接另一个 $(6+1)\times 1$ 抽运/信号合束器,35 个输出功率约为 60 W 的 LD 经 5 个 7×1 合束器合束后,接入该 $(6+1)\times 1$ 抽运/信号合束器的 6 根抽运光纤。上述 6 组共 42 个抽运 LD 中心波长均在 976 nm 左右。合束器的信号输出光纤连接 CPS 和输出石英端帽(QBH)。

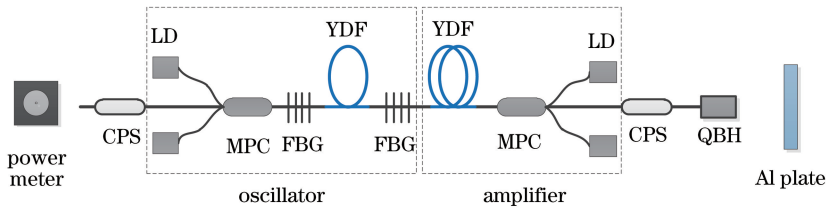


图 1 “振荡-放大一体化”全光纤激光器示意图

Fig. 1 Schematic of oscillator-amplifier integration of all-fiber laser system

对于这种“振荡-放大一体化”结构,振荡级和放大级之间没有任何器件,纤芯中的反射激光直接进入激光器并最终被高反 FBG 反射出激光器,不会造成任何器件的烧毁,因此可以有效提高激光的抗反射性能。

由于振荡级掺镱光纤很短,前向抽运光未被完全吸收,可直接进入放大级的掺镱光纤并被吸收,因此放大级等效实现了双向抽运的作用,并且反向抽运光的功率远大于正向抽运的功率。振荡级的腔长短有利于提高振荡级产生的种子光的光束质量,并且放大级高功率反向抽运也有利于提高模式不稳定阈值^[6],因此“振荡-放大一体化”结构能够输出高光束质量的信号激光。

这种“振荡-放大一体化”的光纤激光器本质上具有 MOPA 结构的特点,因此该结构能保证较高的功率效率,并通过增加放大级抽运功率进一步提升输出激光功率,具备定标放大的能力。而且,高反光栅承载的抽运功率比较低,低反光栅承载的抽运功率是被放大级的掺镱光纤吸收后的功率,因此相比于传统单谐振腔结构,“振荡-放大一体化”的光

纤激光器对光栅器件的抽运功率负载要求更低,可靠性也更好。

3 理论分析及模拟

3.1 理论分析

以速率方程理论为基础,建立数值模型分析“振荡-放大一体化”结构的光纤激光器的功率分布情况。实验采用的掺镱光纤是熔融石英光纤中掺杂离子 Yb^{3+} , Yb^{3+} 为准四能级结构。为计算方便,将 Yb^{3+} 的能级结构简化为二能级结构,利用速率方程模型,数值求解掺镱石英光纤激光器和放大器中的问题。

光纤激光器-放大器模型如图 2 所示。振荡级和放大级增益光纤总长度为 L ,其中谐振腔增益光纤长为 L_1 ; P 为光功率,下标 p 、 ase 分别表示抽运光和 ASE 光; z 为光传输方向的坐标; R 表示界面处抽运光和信号光的反射率。

图中反射率为 $R_{p,0}/R_{ase,0}$ 处是高反光栅,反射率为 $R_{p,L_1}/R_{ase,L_1}$ 处是低反光栅,反射率为 $R_{p,L}/R_{ase,L}$ 处是激光器输出端口。采用双向抽运方式分

别将功率 $P_p^+(0, v_p)$ 和 $P_p^-(L, v_p)$ 的抽运光从前后两个合束器抽运到增益光纤中, 谐振腔中受激振荡产生信号光, 信号光经过放大级的增益光纤传输放

大, 最后输出激光。

对连续工作的谐振腔或放大器, 功率随时间不变, 简化的速率方程为

$$\frac{n_2(z)}{n} = \frac{\Gamma_p \sum_l \sigma_{a,p,l} \times \{ [P_{p,l}^+(z) + P_{p,l}^-(z)] / (h v_{p,l} A_{\text{dope}}) \} + \Gamma_{\text{ase}} \sum_k \sigma_{a,\text{ase},k} \{ [P_{\text{ase},k}^+(z) + P_{\text{ase},k}^-(z)] / (h v_{\text{ase},k} A_{\text{dope}}) \}}{\tau \left\{ \sum_l \{ [P_{p,l}^+(z) + P_{p,l}^-(z)] / P_{p,l}^{\text{sat}} \} + 1 + \sum_k \{ [P_{\text{ase},k}^+(z) + P_{\text{ase},k}^-(z)] / P_{\text{ase},k}^{\text{sat}} \} \right\}}, \quad (1)$$

$$\pm \frac{dP_{p,l}^{\pm}(z)}{dz} = \left\{ \Gamma_p n \left[(\sigma_{a,p,l} + \sigma_{e,p,l}) \frac{n_2}{n} - \sigma_{a,p,l} \right] - \alpha_p \right\} P_{p,l}^{\pm}, \quad (2)$$

$$\pm \frac{dP_{\text{ase},k}^{\pm}(z)}{dz} = P_{\text{ase},k}^{\pm} \left\{ \Gamma_{\text{ase}} n \left[(\sigma_{e,\text{ase},k} + \sigma_{a,\text{ase},k}) \frac{n_2}{n} - \sigma_{a,\text{ase},k} \right] - \alpha_{\text{ase}} \right\} + 2\Gamma_{\text{ase}} \sigma_{e,\text{ase},k} P_{\text{ase},k}^{\text{SE}} n_2, \quad (3)$$

式中: τ 为上能级粒子自发辐射寿命; 上标 \pm 表示正向 (+) 和反向 (-) 传输的光; h 为普朗克常数; $v_{p,l}$ 和 $v_{\text{ase},k}$ 分别为抽运光和 ASE 光的传输群速度; σ_a 和 σ_e 分别为吸收和发射截面, 其数据可从吸收发射谱中得到; n 为掺杂离子数密度, 通常认为掺杂浓度在光纤中是恒定的; n_2 为上能级粒子数密度; α 为线性吸收系数; A_{dope} 为掺杂区域面积; P^{sat} 为饱和功

率; Γ 为功率填充因子, 与信号光光场横向分布有关; $P_{\text{ase}}^{\text{SE}}$ 表征自发辐射, 是激光器的初始噪声源, 在整个 ASE 光谱范围内都存在。

对于给定的边界条件和实验参数, 如增益光纤长度、光栅反射率、抽运光功率等, 采用四阶龙格-库塔方法, 求解上述稳态速率方程, 即可得出光纤激光器中的功率分布情况。

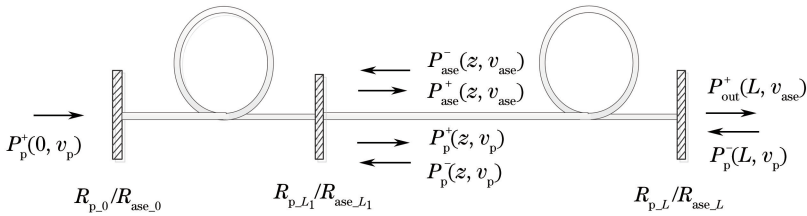


图 2 光纤激光器-放大器模型

Fig. 2 Oscillator-amplifier analytical model

3.2 模拟结果

根据速率方程理论, 计算了“振荡-放大一体化”结构的激光器稳态功率分布, 如图 3 所示。掺镱光纤总长度为 17 m, 其中振荡级长度为 2 m, 放大级长度为 15 m。注入抽运光总和为 2.4 kW, 前向注入的抽运光为 0.4 kW, 反向抽运光 2.0 kW。前向信号光曲线突变处为低反光栅位置, 即增益光纤长度为 2 m 处。模拟结果显示, 注入 2.4 kW 抽运光的情况下, 总输出功率为 2.0 kW, 抽运光和输出光之间的转换效率达 83.6%, 低反光栅处承受的信号光功率为 95 W。

根据模拟结果可以推测, 这种结构的光纤激光器具有效率高的特点, 而且光栅处的光功率分布较低, 对器件的性能要求更低。

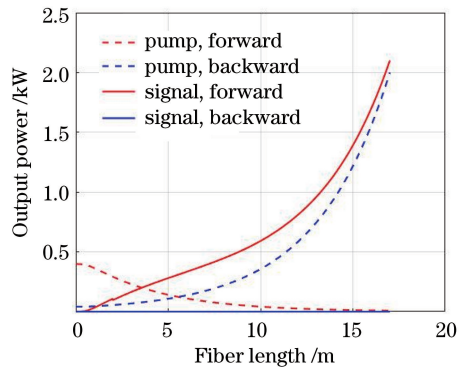


图 3 “振荡-放大一体化”激光器的稳态功率分布

Fig. 3 Steady power distribution of oscillator-amplifier integration of all-fiber laser system

4 实验结果

4.1 激光器输出特性

按照“振荡-放大一体化”的光纤激光器结构搭建激光器。输出功率随抽运功率的曲线图如图 4 所示,输出功率随抽运光功率呈线性分布,斜率效率为 82.7%,实现了最高 2031 W 的功率输出,相对于全谐振腔结构的光纤激光器具有明显优势。

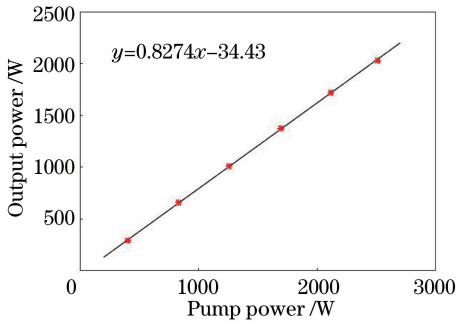


图 4 激光输出功率随注抽运光功率的变化

Fig. 4 Laser output power versus pump power

测量了不同输出功率下光束质量的 M^2 因子如图 5 所示。 M^2 因子随着功率上升变化不大,输出功率为 2031 W 时仍保持较好的光束质量, M^2 数值均小于 1.4。图 5 右下角是输出功率为 2031 W 时的光斑图像,光斑未出现畸变。

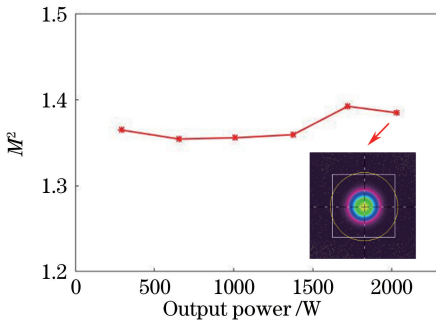


图 5 M^2 随输出功率的变化

Fig. 5 M^2 versus output power

实验记录了输出功率为 2031 W 时的激光光谱,如图 6 所示,中心波长为 1080 nm,未见明显受激拉曼散射(SRS)光谱成分,信噪比超过 20 dB。

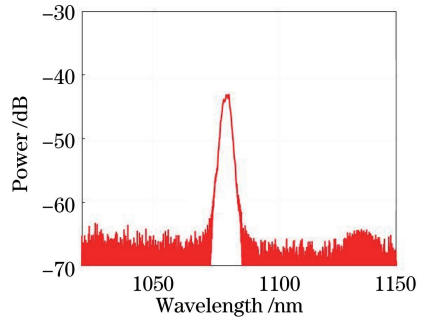


图 6 2031 W 输出时的光谱

Fig. 6 Spectra of the fiber laser with output power of 2031 W

由上述实验结果可知,当激光器输出功率在 2031 W 以下时,输出激光的多项指标都处在较好的范围,实现了高效率、高光束质量的优质激光输出。

4.2 抗反射实验结果

为模拟光纤激光器在工业应用中遇到的强反射光的情形,设计了如下实验:

第一步,将激光入射到功率计收光桶中,逐渐增加入射激光的功率,测量背向返回光的功率变化。

第二步,将激光垂直入射到通有冷却水的铝板,逐渐增加入射激光的功率,测量背向返回光的功率变化。对比两组数据可以分析反射光对光纤激光系统的影响。

第三步,撤去铝板,测量激光器输出功率随时间的变化情况,以评估激光器在经历强反射光情况工作后的稳定性。

表 1 为激光照射功率计与照射铝板时的返回光功率。当激光输出功率为 2030 W 时,入射到功率计的返回光为 0.29 W,垂直入射铝板时的返回光为 0.36 W,相比增长了 0.07 W。撤去铝板之后测量 2.5 h 内激光器的输出功率稳定性如图 7 所示。

表 1 激光照射功率计与照射铝板时的返回光功率

Table 1 Backward power with and without aluminum plate

Output power /W	Backward power (without aluminum plate) /W	Backward power (with aluminum plate) /W	Increase of backward power /W
275	0.16	0.18	0.02
1350	0.20	0.23	0.03
1880	0.26	0.33	0.07
2031	0.29	0.36	0.07

实验结果表明,“振荡-放大一体化”结构的光纤激光器在垂直入射金属铝板时,反射光对光纤激光系统没有形成明显的扰动,具有良好的防反射能力。

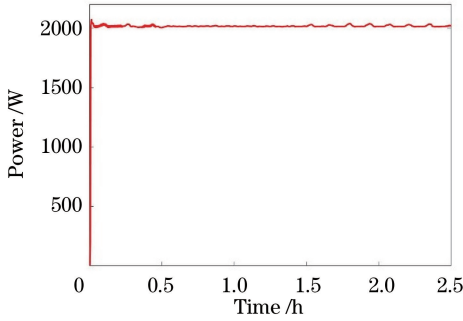


图 7 输出功率稳定性

Fig. 7 Stability of output power

5 结 论

提出了一种抗高反的“振荡-放大一体化”全光纤激光器结构,建立了以速率方程理论为基础的理论模型,计算并讨论这种结构的可行性以及优势。“振荡-放大一体化”全光纤激光器是一种新型的结构简单的光纤激光器,具备传统单谐振腔光纤激光器的抗反射能力,对光栅等光学器件的性能要求较低,还兼具有较高的光光效率,理论效率可达83.6%。激光器实际输出功率最高达2031 W,抽运光和输出光之间的转换效率为81.6%,输出稳定性高。激光输出功率为2 kW时,光束质量 M^2 因子仍小于1.4。利用该激光器垂直入射铝板的实验,验证了其良好的抗反射光性能。

参 考 文 献

- [1] Tamura K, Ishigami R, Yamagishi R. Laser cutting of thick steel plates and simulated steel components using a 30 kW fiber laser [J]. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 2016, 53(6): 916-920.
- [2] Baumeister M, Dickmann K, Hoult T. Fiber laser micro-cutting of stainless steel sheets [J]. *Applied Physics A*, 2006, 85(2): 121-124.
- [3] Stelzer S, Mahrle A, Wetzig A, *et al.* Experimental investigations on fusion cutting stainless steel with fiber and CO₂ laser beams [J]. *Physics Procedia*, 2013, 41: 399-404.
- [4] 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 [J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10083: 100830Y.
- [5] 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 [J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9728: 972805.
- [6] Li Z B, Guo C, Zhao P F, *et al.* Mode instability mitigation by counter-pumped scheme in high power fiber laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(8): 0801010.
李泽标, 郭超, 赵鹏飞, 等. 高功率光纤激光器中反向抽运结构对模式不稳定的抑制 [J]. *中国激光*, 2017, 44(8): 0801010.