

10 kW 高效率 1070 nm 光纤放大器的 理论与实验研究

陈晓龙^{1,3}, 何宇¹, 徐中巍¹, 郭晓晨¹, 叶韧¹, 刘恺¹, 杨依枫¹, 沈辉¹, 张海波¹,
于春雷², 何兵^{1*}, 胡丽丽², 周军¹

¹中国科学院上海光学精密机械研究所上海市全固态激光器与应用技术重点实验室, 上海 201800;

²中国科学院上海光学精密机械研究所中科院强激光材料重点实验室, 上海 201800;

³中国科学院大学材料与光电研究中心, 北京 100049

摘要 基于掺镱光纤激光放大器理论模型, 分析了光纤放大器中掺镱光纤弯曲半径对模式传输损耗的影响以及掺镱光纤长度对系统光-光转换效率的影响。结合实验中采用的掺镱光纤的特点, 对掺镱光纤的弯曲半径及光纤长度进行了优化设计。基于主振荡放大结构中, 种子光源的输出功率为 170 W, 光束质量为 $M_x^2 = 1.10$, $M_y^2 = 1.05$; 放大器采用双端抽运的方式, 使用自研 30/600 μm 掺镱光纤, 最终实现了输出功率为 10.14 kW, 中心波长为 1070.36 nm, 3 dB 带宽为 5.32 nm 的全光纤激光输出, 光束质量为 $M_x^2 = 3.12$, $M_y^2 = 3.18$ 。放大级最大光-光转换效率为 87.9%, 斜率效率为 89.2%, 输出激光信噪比大于 45 dB。

关键词 光纤光学; 光纤放大器; 掺镱光纤; 主振荡放大; 双端抽运; 高效率

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.1006001

Theoretical and Experimental Investigation of a 10-kW High-Efficiency 1070-nm Fiber Amplifier

Chen Xiaolong^{1,3}, He Yu¹, Xu Zhongwei¹, Guo Xiaochen¹, Ye Ren¹, Liu Kai¹,
Yang Yifeng¹, Shen Hui¹, Zhang Haibo¹, Yu Chunlei², He Bing^{1*}, Hu Lili², Zhou Jun¹

¹Shanghai Key Laboratory of All Solid-State Laser and Applied Techniques, Shanghai Institute of Optics
and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

²Key Laboratory of Materials for High Power Laser, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

³Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences,
Beijing 100049, China

Abstract Based on the theoretical model of ytterbium (Yb^{3+})-doped fiber amplifier, the effect of the bend radius of Yb^{3+} fiber on the mode transmission loss and dependence of optical-optical efficiency on the fiber length were analyzed. By employing the characteristics of the Yb^{3+} fiber used in the experiment, the bend radius and fiber length were optimized. A master oscillation power amplification configuration was used. This configuration had a seed laser source with 170 W power, beam quality $M_x^2 = 1.10$, $M_y^2 = 1.05$, and a power amplifier with homemade 30/600 μm Yb^{3+} fiber as the gain fiber. Dual-end pumping was adopted. We obtained a laser beam with an output power of 10.14 kW, a central wavelength of 1070.36 nm, and a 3 dB bandwidth of 5.32 nm. The beam quality of the output laser was $M_x^2 = 3.12$, $M_y^2 = 3.18$. In the amplification stage, the maximum optical-optical efficiency was 87.9%, and the slope efficiency reached up to 89.2%. The signal-to-noise ratio of the output laser was more than 45 dB.

收稿日期: 2020-04-07; 修回日期: 2020-04-30; 录用日期: 2020-05-13

基金项目: 广东省重点领域研发计划(2018B090904001)、国家自然科学基金(61735007, 61705243, 61805261)、上海市自然科学基金(19ZR1464200, 19ZR1464000)、上海市青年英才扬帆计划(17YF1421200)

* E-mail: bryanho@siom.ac.cn

Key words fiber optics; fiber amplifiers; ytterbium-doped fiber; master oscillator power amplification; dual-end pumping; high efficiency

OCIS codes 140.3510; 140.3615; 060.2320

1 引 言

光纤激光器具有转换效率高、光束质量好、热管理方便、结构紧凑等优点,在民用和国防领域应用广泛^[1-4]。激光功率的进一步提升受到受激拉曼散射(SRS)和模式不稳定性(MI)的限制^[5-10],故采用大模场光纤、优化光纤放大器参数是提升激光器效率和激光功率的有效技术途径^[11-14]。2009年,美国IPG Photonics公司率先推出10 kW单模全光纤激光器产品YLS-10000-SM^[15]。近年来,随着光纤制备技术的提升,国内也逐渐实现了10 kW级全光纤激光功率输出。2018年,中国工程物理研究院使用半导体激光器(LD)直接抽运30/900 μm光纤和(8+1)型侧面抽运光纤实现了万瓦级全光纤激光输出,放大级斜率效率分别为86.12%和82.5%^[16-17]。2019年,他们基于同带抽运的方式,使用50/400 μm光纤又实现了9.82 kW的激光功率输出,放大级斜率效率为86.8%^[18]。在使用大模场光纤实现激光功率提升的同时,激光系统效率的优化和高阶模式的抑制(以获得激光高光束质量)成为研究热点。

因此,为实现高功率、高效率、高光束质量的国产10 kW级全光纤激光输出,本文基于激光主振荡放大结构,使用自研的30/600 μm掺镱光纤作为放大级增益光纤,通过理论分析掺镱光纤弯曲半径与光纤内模式传输损耗的关系,以及放大器中激光功率增长与光纤长度的关系,优化系统设计参数,实现了输出功率为10.14 kW,中心波长为1070.36 nm,

3 dB带宽为5.32 nm的全光纤激光输出。输出激光的光束质量 $M_x^2 = 3.12, M_y^2 = 3.18$,放大级最大光-光转换效率为87.9%,斜率效率高达89.2%,输出激光信噪比大于45 dB,且并没有观察到拉曼效应及模式不稳定的现象,有望通过进一步提升抽运功率、优化放大器参数等方式,实现更高功率、更优光束质量的激光输出。

2 理论分析

2.1 理论模型

对于常用的阶跃折射率光纤,光纤纤芯和包层的折射率差较小,可以认为是“弱导光纤”,所以光纤中的本征模式可以通过弱导近似表示为线偏振(LP)模式。LP_{mm}模式的弯曲损耗可以表述为^[19-20]

$$2\alpha = \frac{\pi^{1/2} \frac{U}{a^2} \cdot \exp\left(-\frac{2\gamma^3 R_{\text{eff}}}{3\beta_z^2}\right)}{2R_{\text{eff}}^{1/2} (W^{1/2}/a)^{3/2} V^2 J_{m-1}(\gamma a) J_{m+1}(\gamma a)}, \quad (1)$$

式中: α 表示弯曲损耗; R_{eff} 为等效弯曲半径; a 为光纤纤芯半径;光纤归一化频率 V 值定义为 $V = (2\pi/\lambda) \cdot a \sqrt{n_{\text{core}}^2 - n_{\text{clad}}^2}$, n_{core} 和 n_{clad} 分别为光纤纤芯和包层折射率; J 为修正贝塞尔函数; $U = \left[\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 n_{\text{core}}^2 - \beta_z^2\right] \cdot a^2$ 和 $W = \left[\beta_z^2 - \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 n_{\text{clad}}^2\right] \cdot a^2$ 分别为归一化横向相位参数和归一化横向衰减参数, β_z 为对应模式的传播常数。

在光纤激光振荡器或是放大器中,光纤内激光、抽运等光束功率的变化可以描述为^[21-22]

$$\pm \frac{dP^\pm}{dz} = \left\{ \left[\left(\frac{r_{\text{core}}}{r_{\text{clad}}}\right)^2 \sigma_a n_0 + \left(\frac{r_{\text{core}}}{r_{\text{clad}}}\right)^2 \sigma_e n_0 \right] N - \left(\frac{r_{\text{core}}}{r_{\text{clad}}}\right)^2 \sigma_a n_0 - l \right\} P^\pm + \left(\frac{r_{\text{core}}}{r_{\text{clad}}}\right)^2 \sigma_e n_0 \cdot N \cdot n_{\text{se}} \cdot h\nu \cdot \Delta\nu, \quad (2)$$

式中:“+”对应光束的正向传播;“−”对应光束的反向传播; r_{core} 和 r_{clad} 分别为光纤的纤芯半径及内包层半径; n_0 为Yb掺杂粒子浓度; σ_a 和 σ_e 分别是Yb离子的吸收截面和发射截面; l 是光束的背景

损耗,包括光纤的弯曲损耗; n_{se} 是自发辐射光子数,通常取值为2; $h\nu \cdot \Delta\nu$ 是光束在 $\Delta\nu$ 频谱范围内的光子能量; N 是光纤内的反转分布,表示为^[22]

$$N = \frac{\sum P\lambda \left(\frac{r_{\text{core}}}{r_{\text{clad}}}\right)^2 \sigma_a n_0}{\sum P\lambda \left[\left(\frac{r_{\text{core}}}{r_{\text{clad}}}\right)^2 \sigma_a n_0 + \left(\frac{r_{\text{core}}}{r_{\text{clad}}}\right)^2 \sigma_e n_0 \right] + \frac{hc \cdot \pi r_{\text{core}}^2 \cdot n_0}{\tau}}, \quad (3)$$

其中 λ 是光束的波长, h 是普朗克常数, c 是真空光速, τ 是 Yb 离子上能级寿命, 通常取 0.8 ms, $\Sigma(\cdot)$ 是对所有光束的求和。方程(1)式和(2)式的边界条件包括光束在光纤两侧的反射, 对于给定光束, 满足^[22]

$$\begin{cases} P^+(0) = P_{in}^+ + r_{z=0} P^-(0) \\ P^-(L) = P_{in}^- + r_{z=L} P^+(L) \end{cases}, \quad (4)$$

式中: P_{in}^+ 是正向注入功率; P_{in}^- 是反向注入功率; $r_{z=0}$ 和 $r_{z=L}$ 是光纤两侧对特定光束的反射率, 通常用于表述振荡腔对激光的反射; L 是光纤长度。

2.2 数值计算

对掺镱光纤激光器的模拟, 包括对放大过程中不同掺镱光纤(YDF)的弯曲半径下模式的损耗以及放大器在双端抽运情况下激光功率的增长, 即对上述方程的求解。以种子源一级放大的主振荡功率放大(MOPA)结构为例, 掺镱光纤为 30/600 μm , 数值孔径(NA)为 0.063, 求解方程(1)式, 计算得到不同弯曲半径时 30/600 μm 光纤各模式损耗如图 1 所示, 为了保证最终输出激光光束质量, 降低输出激光高阶模占比, 结合 30/600 μm 光纤的弯曲能力, 选取弯曲半径 7.5 cm 作为后续计算及实验的掺镱光纤弯曲半径。

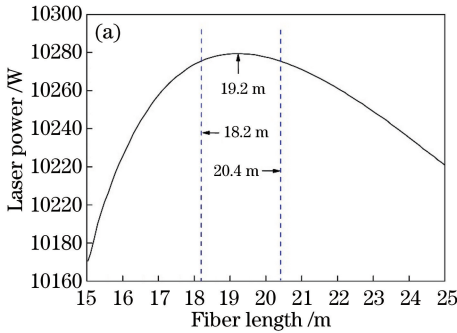


图 2 掺镱光纤的输出激光功率变化图。(a)放大器输出激光功率随掺镱光纤长度的变化; (b)掺镱光纤长度为 19.2 m 时光纤内双端抽运功率和激光功率沿光纤长度方向的变化趋势

Fig. 2 Ytterbium doped fiber output laser power. (a) Relationship between the output laser power and the Yb³⁺ doped fiber length; (b) variation of the dual-end pump power and the output laser power along the fiber when the Yb³⁺ doped fiber length is 19.2 m

通过以上计算结果分析可知, 1070 nm 波长的 MOPA 结构, 可以通过优化选取放大器掺镱光纤长度和弯曲半径的方法来提高放大器的抽运光-激光转换效率, 并保持最终激光以少模的形式输出, 降低了 30/600 μm 大模场光纤的输出光束质量的劣化程度。

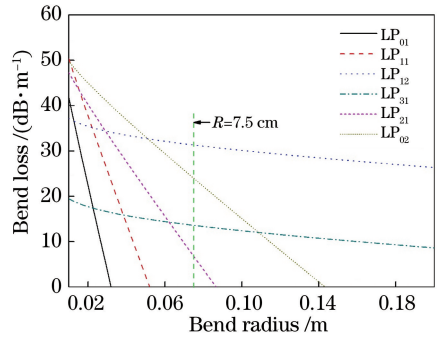
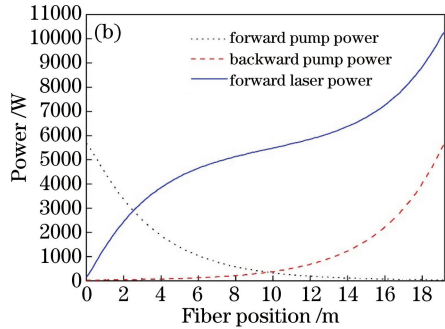


图 1 30/600 μm 掺镱光纤模式弯曲损耗随弯曲半径的变化关系

Fig. 1 Mode bend loss dependent on the bend radius of the 30/600 μm Yb-doped fiber

联合求解方程(2)~(4)式, 计算光纤放大器掺镱光纤不同长度下输出激光功率增长情况。其中, 种子源注入功率为 160 W, 中心波长取 1070 nm; 放大器抽运波长取 976 nm, 双端抽运功率各 5.7 kW, 增益光纤吸收系数为 1.2 dB/m@976 nm。当光纤长度取值范围选择 15~20 m, 计算结果如图 2(a)所示, 特别在掺镱光纤长度为 18.2~20.4 m 的区间内, 计算得到的激光输出总功率大于 10275.5 W, 抽运-激光转换效率大于 88%, 且当光纤长度为 19.2 m 时, 最高转换效率为 88.77%, 激光功率可达 10279.4 W。



3 实验结果分析与讨论

10 kW 全光纤 MOPA 激光器实验结构如图 3 所示, 图中 LD 为激光二极管, HR-FBG 为高反光栅, LR-FBG 为低反光栅, CLS 为包层光剥离器, DC-YDF 为双包层掺镱光纤, MFA 为模场适配器。

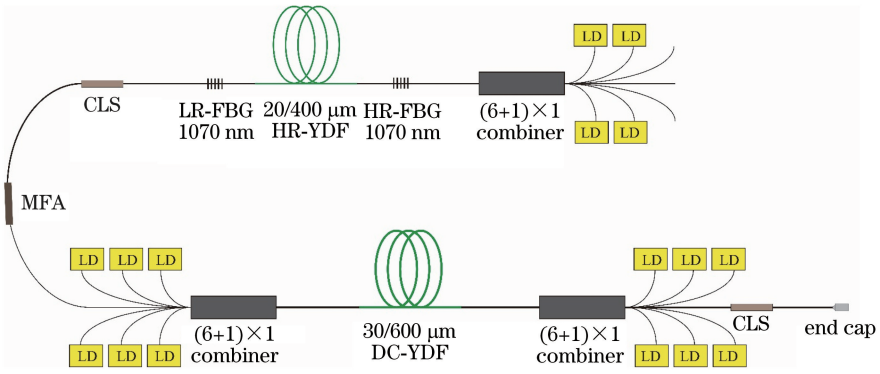


图 3 激光系统实验装置示意图

Fig. 3 Experimental setup of the laser system

3.1 高光束质量种子源

种子光源为振荡器结构。振荡器采用正向抽运方式,使用的抽运光源的中心波长约为 915 nm,光纤光栅(FBG)的中心波长为 1070 nm,高反光栅反射率为 99.5%,3 dB 带宽约为 3 nm,低反光栅反射率为 10%,3 dB 带宽约为 1.2 nm,增益光纤使用自研 20/400 μm 掺镱光纤,吸收系数为 0.4 dB/m@

915 nm,数值孔径为 0.062,长度为 32 m,腔内光纤长度的增加可提升激光输出纵模的数量,同时选用大于 1 nm 的宽带光栅,有助于实现种子光源输出光谱宽度的增加,从而提升了放大过程中的拉曼效应的阈值^[23]。当抽运功率为 253 W 时,种子源输出激光功率为 178 W,3 dB 光谱宽度为 2.1 nm,输出激光光束质量 $M_x^2 = 1.10$, $M_y^2 = 1.05$,如图 4 所示。

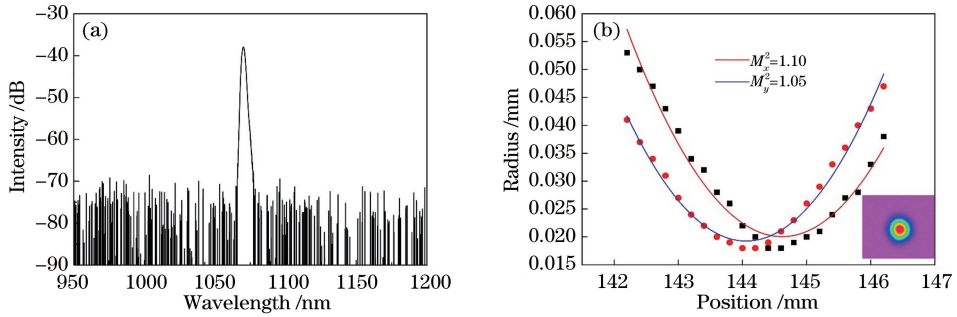


图 4 种子光源输出光谱及光束质量。(a)激光光谱;(b)光束质量

Fig. 4 Spectrum and beam quality of the seed laser. (a) Spectrum; (b) beam quality

3.2 高效率放大器

种子光源经过一个 20~25 μm 的模场适配器进入放大器。放大器使用双端抽运结构,前后向抽运各 6 组光源,每组功率约为 950 W,抽运光波长约为 976 nm,输出尾纤为 300/330 μm ,通过 $(6+1) \times 1$ 合束器耦合后注入掺镱光纤中,其中前向 $(6+1) \times 1$ 合束器信号纤的纤芯直径为 25 μm 、数值孔径为 0.065,反向合束器信号纤纤芯为 50 μm 、数值孔径为 0.12,前后向合束器输出尾纤芯径均为 30/600 μm ,纤芯数值孔径为 0.065,注入功率分别为 5679 W 和 5680 W。放大采用增益光纤为自研 30/600 μm 掺镱光纤,纤芯数值孔径为 0.063,吸收系数为 1.2 dB/m@976 nm,系统最终经过包层光剥离器剥离包层光后,使用光纤端帽输出,系统实际使用的掺镱光纤长度为 19.5 m。结合

理论分析及 30/600 μm 实际缠绕的能力,实验对比分析了在开启正反向各一组泵浦的状态下,掺杂光纤弯曲半径分别为 5,6,7.5,9,10 cm 时,放大器的输出功率及输出激光光束质量。如图 5 所示,随着掺杂光纤弯曲半径的增加,高阶横模弯曲损耗减小,在相同泵浦条件下,光-光转换效率提升,但输出激光光束质量 M^2 明显降低。综合考虑,最终选择掺镱光纤弯曲半径为 7.5 cm。

系统输出功率结果如图 6 所示,随着抽运功率的增长,激光功率增长线性度较好,在放大级吸收抽运光功率达到 11359 W 时最终激光输出功率达到 10140 W,光-光效率达到 87.8%,放大级斜率效率为 89.2%。激光功率增长过程中光谱变化如图 7(a)所示,整个过程没有观察到明显的 SRS 及 MI 现象,满功率输出激光的光束质量 $M_x^2 = 3.12$,

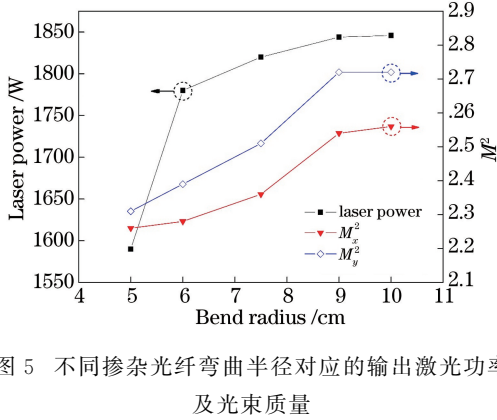


图 5 不同掺杂光纤弯曲半径对应的输出激光功率及光束质量

Fig. 5 Output laser power and beam quality dependent on the bend radius of the Yb-doped fiber

$M_y^2 = 3.18$ 。受限于可用的抽运功率,激光输出功率有望进一步提升。

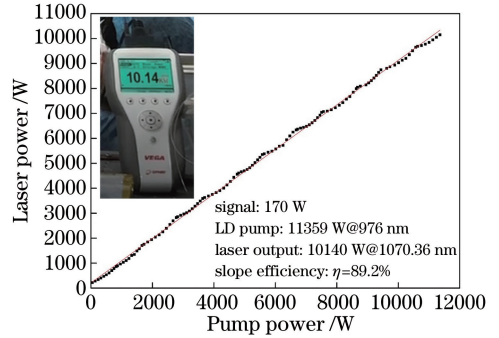


图 6 系统输出激光功率和斜率效率

Fig. 6 Laser power and slope efficiency measured

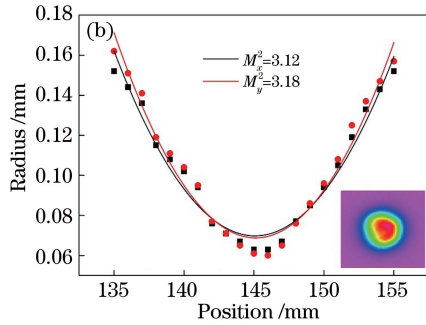
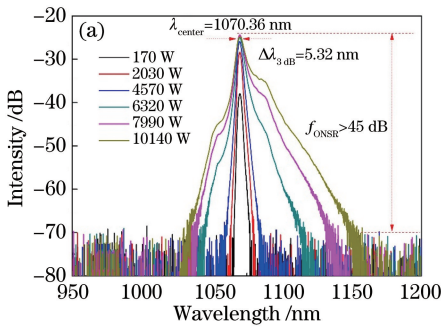


图 7 放大器输出激光光谱及光束质量。(a)激光光谱;(b)激光光束质量

Fig. 7 Spectra and beam quality of the output signal laser. (a) Spectra; (b) beam quality

放大器使用温度为 20 °C 的循环水冷方式进行冷却。在满功率运行状态下,使用 Flir T620 热像仪测量放大器各主要位置的温度,最高的温度熔点为放大反向合束器输出尾纤与 30/600 μm 掺杂光纤的熔点,结果为 35.2 °C,如图 8(a)中 Ar2 所示,掺杂光纤运行温度为 35 °C,如图 8(a)中 Ar1 所示。

放大器输出包层光剥离器封装壳体最高温度为 50 °C,如图 8(b)中 Ar1 所示。放大器正向合束器最高温度为 35.7 °C,如图 8(c)中 Ar2,反向合束器最高温度为 96.1 °C,位于合束器输出尾纤末端,如图 8(c)中 Ar1 所示。系统在满功率状态下运行 90 s,功率起伏小于 0.3%,如图 9 所示。

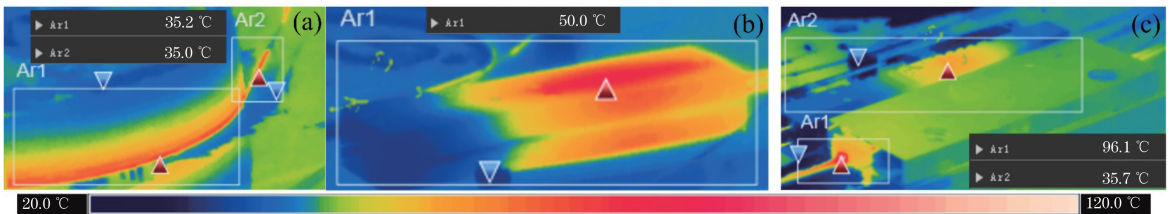


图 8 放大器满功率状态下主要位置的温度。(a)放大器反向合束器与掺杂光纤熔点及掺杂光纤温度;(b)放大器输出包层光剥离器温度;(c)放大器正反向合束器温度

Fig. 8 Temperature measurements of the amplifier compositions when operating at the full laser power. (a) Yb-doped fiber temperature and temperature of the splicing point between the backward combiner and the doped fiber; (b) temperature of the output cladding light stripper; (c) temperature of the forward and backward combiners

3.3 讨论

通过对以上放大器输出功率曲线、光谱及光束质量的测试分析,推断可知若进一步提高抽运激光功率,放大器系统仍然可以在保证较高光-光转换效

率和信噪比的前提下实现更高激光功率的输出。同时,在实验中发现,受到系统熔接质量的影响,种子激光注入放大系统的熔接质量较差,导致经过 MFA 后光束质量劣化明显,进而对放大光束质量劣化的

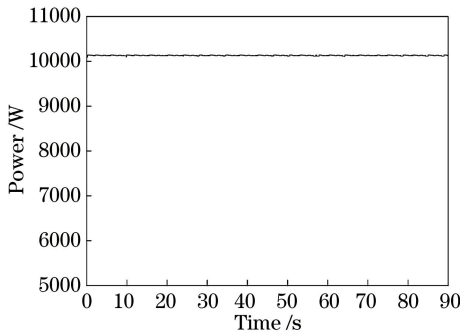


图9 90 s内放大器输出功率测试记录

Fig. 9 Measurement of the power stability during 90 s

抑制产生影响,需要通过降低放大级掺镱光纤弯曲半径来增大模场光纤内高阶模的损耗,但这一操作会对激光器的稳定性产生不良影响。因此,对于使用大模场掺镱光纤的放大器,系统搭建过程中熔接细节等的处理尤为重要。

4 结 论

基于主振荡放大结构,采用本所自研的 30/600 μm 掺镱光纤作为放大级增益光纤,在理论计算的基础上通过对实验中掺镱光纤的弯曲半径及光纤长度进行优化设计,实现了高功率、高效率、高光束质量的国产 10 kW 级 1070 nm 全光纤激光输出。输出激光的光束质量 $M_x^2 = 3.12, M_y^2 = 3.18$, 放大级最大光-光转换效率为 87.9%,斜率效率高达 89.2%,输出激光信噪比大于 45 dB。且通过对放大器输出功率曲线、光谱及光束质量的测试分析,有望通过进一步提升抽运激光功率、优化熔接质量等方式,在保证较高光-光转换效率和信噪比的前提下实现更高功率、更优光束质量的激光输出。

参 考 文 献

[1] Richardson D J, Nilsson J, Clarkson W A. High power fiber lasers: current status and future perspectives (Invited) [J]. Journal of the Optical Society of America B, 2010, 27(11): B63-B92.

[2] Zervas M N. High power ytterbium-doped fiber lasers: fundamentals and applications [J]. International Journal of Modern Physics B, 2014, 28(12): 1442009.

[3] Zervas M N, Codemard C A. High power fiber lasers: a review[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2014, 20(5): 219-241.

[4] Zhou J, Wang P, Zhou P. The introduction of “High-power fiber laser technology” special issue[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(2): 0201000.

周军,王璞,周朴.“高功率光纤激光技术”专题前言[J]. 中国激光, 2017, 44(2): 0201000.

[5] Agrawal G P. Nonlinear fiber optics [M]. New York: Academic Press, 2001.

[6] Dawson J W, Messerly M J, Beach R J, et al. Analysis of the scalability of diffraction-limited fiber lasers and amplifiers to high average power [J]. Optics Express, 2008, 16(17): 13240-13266.

[7] Smith R G. Optical power handling capacity of low loss optical fibers as determined by stimulated Raman and Brillouin scattering [J]. Applied Optics, 1972, 11(11): 2489-2494.

[8] Haarlammert N, Sattler B, Liem A, et al. Optimizing mode instability in low-NA fibers by passive strategies[J]. Optics Letters, 2015, 40(10): 2317-2320.

[9] Jauregui C, Eidam T, Otto H J, et al. Physical origin of mode instabilities in high-power fiber laser systems[J]. Optics Express, 2012, 20(12): 12912-12925.

[10] Tao R M, Ma P F, Wang X L, et al. Polarization effects on thermal-induced mode instabilities in high power fiber lasers[EB/OL]. (2015-03-30)[2020-03-28]. <https://arxiv.org/abs/1503.08132>.

[11] Zhu J J, Zhou P, Ma Y X, et al. Power scaling analysis of tandem-pumped Yb-doped fiber lasers and amplifiers [J]. Optics Express, 2011, 19(19): 18645-18654.

[12] Jauregui C, Limpert J, Tünnermann A. High-power fibre lasers[J]. Nature Photonics, 2013, 7(11): 861-867.

[13] Eidam T, Wirth C, Jauregui C, et al. Experimental observations of the threshold-like onset of mode instabilities in high power fiber amplifiers[J]. Optics Express, 2011, 19(14): 13218-13224.

[14] Zhou P, Huang L J, Leng J Y, et al. High-power double-cladding fiber laser: 30th anniversary of the development process [J]. SCIENTIA SINICA Technologica. 2020, 50(2): 123-135.

周朴,黄良金,冷进勇,等.高功率双包层光纤激光器:30周年的发展历程[J].中国科学技术科学, 2020, 50(2): 123-135.

[15] Stiles E. New developments in IPG fiber laser technology[C]//Proceedings of the 5th International Workshop on Fiber Lasers, September 30-October 1, Dresden, Germany. New York: ACM, 2009: 1-2.

[16] Lin H H, Tang X, Li C Y, et al. The localization single-fiber laser system obtained 10.6 kW laser output[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(3): 0315001.

林宏奂,唐选,李成钰,等.全国产单纤激光系统获

- 得 10.6 kW 激光输出 [J]. 中国激光, 2018, 45(3): 0315001.
- [17] Lin A X, Zhan H, Peng K, et al. 10 kW-level pump-gain integrated functional laser fiber [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2018, 30(6): 060101.
林傲祥, 湛欢, 彭昆, 等. 国产复合功能光纤实现万瓦激光输出 [J]. 强激光与粒子束, 2018, 30(6): 060101.
- [18] Gao C, Dai J Y, Li F Y, et al. Homemade 10-kW ytterbium-doped aluminophosphosilicate fiber for tandem pumping [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(3): 0315001.
高聪, 代江云, 李峰云, 等. 自研万瓦级同带泵浦掺镱石英玻璃光纤 [J]. 中国激光, 2020, 47(3): 0315001.
- [19] Marcuse D. Curvature loss formula for optical fibers [J]. Journal of the Optical Society of America, 1976, 66(3): 216-220.
- [20] Schermer R T, Cole J H. Improved bend loss formula verified for optical fiber by simulation and experiment [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2007, 43(10): 899-909.
- [21] Hansen K R, Alkeskjold T T, Broeng J, et al. Thermo-optical effects in high-power Ytterbium-doped fiber amplifiers [J]. Optics Express, 2011, 19(24): 23965-23980.
- [22] Gong M L, Yuan Y Y, Li C, et al. Numerical modeling of transverse mode competition in strongly pumped multimode fiber lasers and amplifiers [J]. Optics Express, 2007, 15(6): 3236-3246.
- [23] Wang J M, Yan D P, Xiong S S, et al. High power all-fiber amplifier with different seed power injection [J]. Optics Express, 2016, 24(13): 14463-14469.