

高功率全光纤放大器的高阶模激发阈值特性研究

雷 敏^{1,2} 漆云凤¹ 刘 驰¹ 杨依枫^{1,2} 郑 也^{1,2} 陈晓龙¹ 叶 青¹ 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中国科学院大学,北京 100049

摘要 在基于大模场面积的高功率光纤放大器中,随着放大激光功率的提升而出现的高阶模激发现象,将会导致放大激光的光束质量严重下降。以光纤模式的弯曲损耗特性为基础,研究了光纤弯曲半径对高功率全光纤放大器高阶模激发阈值特性的影响。搭建了掺镱全光纤窄线宽高功率主振荡放大系统,设计了不同弯曲半径的水冷光纤盘,进行了相应对比实验。通过优化光纤盘半径,成功抑制了高功率光纤放大器中的高阶模激发,得到了千瓦量级的近单模激光输出,在输出功率为1.31 kW时光束质量因子 M^2 约为1.4。

关键词 激光光学; 光纤放大器; 大模场面积; 高功率; 高阶模

中图分类号 TN248 文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0605002

High-Order Modes Threshold Study on High Power All-fiber Amplifier

Lei Min^{1,2} Qi Yunfeng¹ Liu Chi¹ Yang Yifeng^{1,2} Zheng Ye^{1,2} Chen Xiaolong¹
Ye Qing¹ 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

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract In high power fiber amplifier which uses large mode area (LMA) fiber, the high-order modes(HOM) appear with the increase of laser output power, and the beam quality degrades severely. The influence of fiber bending on thresholds of HOM is studied in experiments based on the fiber bending loss theory. A ytterbium-doped all-fiber narrow-linewidth and high power master-oscillator power amplifier (MOPA) system is built. Novel watering cooling plates of different sizes are designed and used in the main amplifier stage. By using these plates, a series of optimizing experiments are done with the LMA fiber bending at different radii. The threshold of high-order modes are raised successfully and kW-class nearly single mode laser output is obtained. The beam quality factor (M^2) is about 1.4 at 1.31 kW.

Key words laser optics; fiber amplifier; large mode area; high power; high-order modes

OCIS codes 140.3510; 140.3280; 060.2320; 060.2430

1 引 言

光纤激光器具有结构紧凑、转换效率高、光束质量好、易于散热和易于实现高功率等特点,在工业、国防、医疗等领域都有巨大的应用潜力。随着双包层光纤的出现以及半导体激光器抽运技术的不断成熟,掺镱光纤激光器的输出功率不断得到提高^[1-5],使得掺镱高功率光纤放大器成为高亮度激光领域的研究热点。

收稿日期: 2015-01-15; 收到修改稿日期: 2015-03-01

基金项目: 上海市青年科技启明星计划(12QH1401100)、国家自然科学基金(U1330134、61308024)、上海市自然科学基金(11ZR1441400)

作者简介: 雷 敏(1991—),女,硕士研究生,主要从事高功率窄线宽光纤放大器方面的研究。

E-mail: 710205374@qq.com

导师简介: 周 军(1972—),男,研究员,博士生导师,主要从事高功率光纤激光器和准分子激光器等方面的研究。

E-mail: junzhouhd@siom.ac.cn(通信联系人)

由于光纤端面损伤以及各种非线性效应,使得单根光纤的输出功率受限,研究者提出了组束的方法来获得更高的输出功率,如相干组束^[6-7]和光谱组束^[8]。然而,组束需要光源具有高功率、窄线宽以及好的光束质量等特点,对单链路激光光源提出了更为严苛的要求。在高功率的情况下,窄线宽放大器中更容易出现各种非线性效应,如受激拉曼散射(SRS)和受激布里渊散射(SBS)。为了降低功率密度以抑制各种非线性效应,研究者采用大模场面积(LMA)光纤作为主放增益光纤。但是,由于大模场面积光纤支持多个模式运转,在高功率输出时会激发高阶模,使得输出激光的光束质量严重变差。

为了得到高功率的单模激光输出,通常采用以下各种方法来抑制光纤中高阶模的振荡,包括优化光纤折射率的分布和掺杂浓度^[9-11]、锥形光纤和弯曲选模^[12]等。通过弯曲主放光纤来抑制高阶模的原理是:高阶模的模场面积大于基模,光纤弯曲时高阶模泄露得更多,使得高阶模式的损耗比基模高的多^[13]。通过选取合适的弯曲半径,使高阶模式部分能量通过包层逸出,而基模的损耗很小,经过一段传输距离后最终能够得到高功率的单模激光输出^[14]。

相较于其他选模方式,光纤弯曲限模比较容易实现,本课题组之前对光纤弯曲限模进行过理论分析,并通过弯曲限模在实验上得到了百瓦内的单横模激光输出^[15]。本文在更高功率量级下运用光纤弯曲限模来抑制高阶模的激发,实验得到了主放光纤的盘绕限模半径与高阶模激发阈值的关系。实验中设计了不同半径的主放光纤绕线盘,利用这些绕线盘做了一系列的优化实验,取得了良好的效果,最终获得了窄线宽的1.31 kW 近单模激光输出。

2 弯曲损耗理论分析

光纤弯曲对基模和高阶模的弯曲损耗不同,以基模 LP01 和高阶模 LP11 为例,用实验中主放光纤所用的 Nufern 的 LMA-YDF-20/400 参数计算,其数值孔径(NA)约为 0.065。由光纤弯曲损耗的表达式^[16]

$$\alpha_R = \frac{\sqrt{\pi} U^2 \exp\left(-\frac{2W^3}{3R_c^3 \beta^2} R\right)}{2e_v W^{3/2} \sqrt{R_c R} V^2 K_{m-1}(W) K_{m+1}(W)}, \quad (1)$$

可以计算出 LP01 和 LP11 模的弯曲损耗随弯曲半径变化的情况,式中 $U = \sqrt{k^2 n_1^2 - \beta^2} R_c$, $W = \sqrt{\beta^2 - k^2 n_2^2} R_c$, $V = k R_c NA$, $k = 2\pi/\lambda$ 为自由空间中传播的波数, n_1 为纤芯折射率, n_2 为包层折射率, R_c 为纤芯半径, R 为光纤弯曲半径, β 是传播常数,基模的 e_v 为 2,高阶模的 e_v 为 1。将相应参数带入, $n_1 = 1.45$, 数值孔径 $NA = 0.065$, $R_c = 10 \mu\text{m}$, $\lambda = 1064 \text{ nm}$,可以得到基模和高阶模的损耗如图 1 所示。

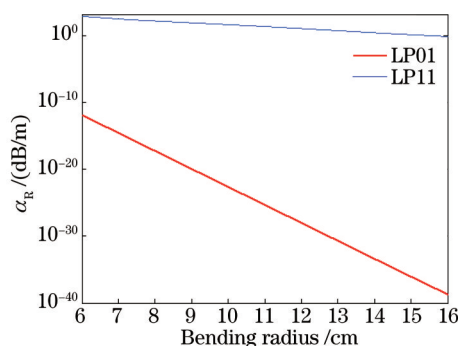


图1 光纤中 LP01 模和 LP11 模的弯曲损耗随弯曲半径的变化

Fig.1 Bending loss of mode LP01 and LP11 versus bending radius

可以看出,光纤弯曲时基模的弯曲损耗很小,相同弯曲半径下高阶模比基模有大得多的损耗,可以判断出,光纤的弯曲半径越小,高阶模越难激发出来。

3 高阶模抑制实验方案

搭建了高功率窄线宽主振荡功率放大器(MOPA)的实验系统,通过改变主放增益光纤的盘绕半径进行了模式控制实验,实验装置如图 2 所示。实验用线宽为 0.06 nm 的窄线宽种子源,波长为 1064 nm。经过三级

MOPA 结构进行功率放大。第三级放大器的输出激光经过抽运滤除(PS)滤掉未吸收的抽运光和包层中的部分高阶模,经过透镜准直输出。

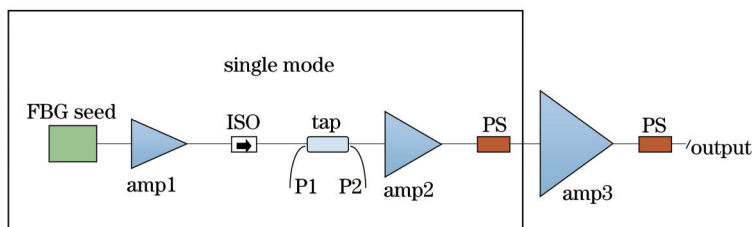


图2 搭建的MOPA系统的结构图

Fig.2 Schematic setup of MOPA system

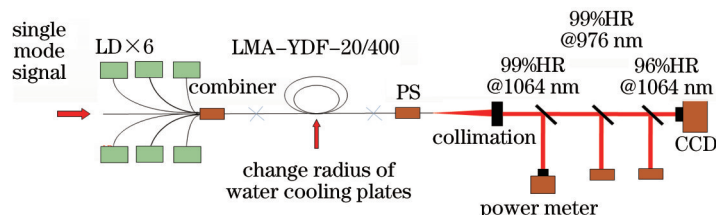


图3 主放的结构图

Fig.3 Detail structure of main amplifier stage

第三级主放结构如图3所示,单模的信号光和抽运光经过 $(6+1)\times 1$ 合束器进入20/400的增益光纤,经抽运滤除后输出。输出光准直后在99%的信号光高反镜反射端探测输出功率大小,透射端通过抽运光高反(HR)镜去除掉残余的抽运光,再用信号光高反镜反射一次,在透射端用电耦合器件(CCD)探测光斑。设计的新型光纤绕线盘用来放置第三级的主放增益光纤,采用这种绕线盘的优点在于能够将增益光纤中产生的热量及时地散出去,使得增益光纤支持更高功率的运转。为了得到最高功率的窄线宽激光输出,分别使用了不同半径的水冷盘,将增益光纤盘在上面进行对比优化。

4 实验结果分析

通过用CCD观测输出光斑图样来判断高阶模激发的阈值功率,当未采取限模措施时,输出激光为570 W时的光斑图样如图4所示,输出光斑分瓣产生了明显的高阶模,将此时的输出功率作为高阶模激发的阈值功率。并且由于抽运滤除器对包层激光的滤除作用,高阶模的激发限制了输出功率的进一步提升。实验中不同光纤盘绕半径下能得到的最大输出功率如图5所示。

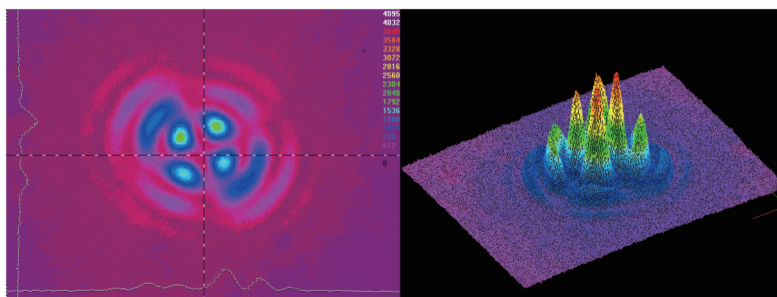


图4 未采取限模措施且输出激光为570 W时的光斑

Fig.4 Beam patterns before taking mode controlling measures at output of 570 W

除了从CCD中观察到光斑图样的变化,实验中还出现了另一个明显的高阶模激发阈值到达的现象:当抽运功率提高时,抽运滤除之后的输出功率不能按正常比例增加,甚至会降低,而出现这个情况后降低抽运功率,输出功率仍会恢复正常。产生这种现象的原因如下,当达到高阶模激发阈值后,高阶模迅速激发出来,很大部分会在抽运滤除器中被滤掉,所以经过抽运滤除后输出激光功率不能正常增加。当分别使用不同半径的主放光纤绕线盘时,高阶模激发的阈值有明显的变化规律,如图6所示。实验结果表明,随着绕线

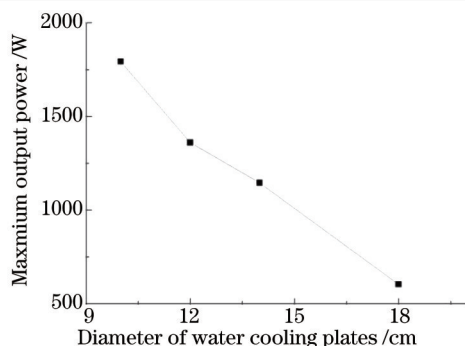


图5 不同盘绕直径时实验得到的最高功率输出

Fig.5 Maximum output power at different bending diameters in experiments

盘半径的减少, 阈值功率逐渐增加。

然而, 在实验上绕线盘的半径不能无限减小下去, 因为当光纤弯曲半径减小到一定程度时, 抽运光和基模的损耗也会明显增加, 使得泄露到光纤外面的功率太多而无法及时散热。通过优化主放光纤绕线盘的半径, 在水冷盘内圈直径为 10 cm 时得到了最好的实验结果。实验系统中前两级放大器输出信号功率取 90 W 左右, 第三级增益光纤盘绕在最优尺寸的水冷盘上, 得到的实验结果如下: 主放大器在抽运功率约 1450 W 条件下, 放大光经包层光滤除后准直输出功率达到 1310 W。整个放大系统的光光转换效率约为 80.6%, 斜率效率约为 84.5%。

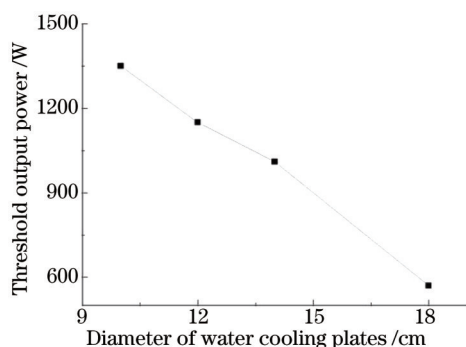


图6 不同盘绕直径时高阶模激发的阈值功率

Fig.6 Threshold power of high-order mode at different coiling diameters

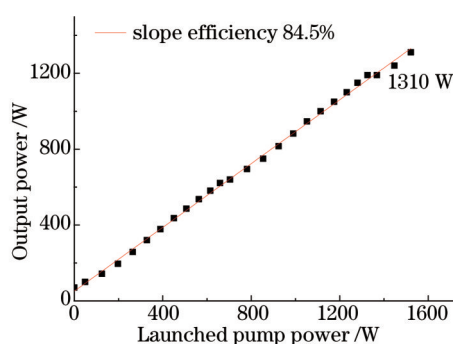


图7 输出激光功率与抽运光功率曲线

Fig.7 Output power from delivery fiber versus launched pump power

优化后经 CCD 采样的横模特性如图 8 所示。在 1310 W 激光输出功率下, 系统能够保持良好的基模特性, 未达到高阶模激发的阈值。

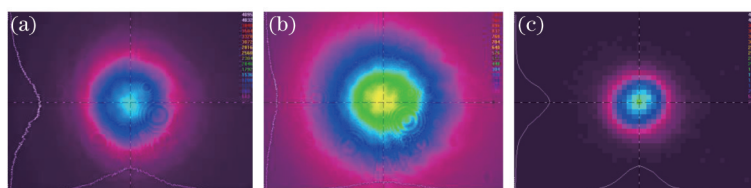


图8 采取弯曲限模措施时 1310 W 输出激光的光斑($R < 5$ cm)。(a) 近场(输出纤不弯曲); (b) 近场(输出纤弯曲); (c) 远场

Fig.8 Beam patterns after taking mode controlling measures ($R < 5$ cm) at output of 1310 W. Near-field (a) with and (b) without bending of output fiber; (c) far-field

利用激光光束分析仪(PRIMES Laser Quality Monitor)测试激光光束质量, 图9为激光光斑形状以及 M^2 因子的测试结果, 当输出功率为 1.31 kW 时, $M^2=1.42$ 。可以看出, 采用弯曲限模的实验方案成功提高了高阶模激发的阈值, 得到了 1.31 kW 的近单模激光输出。

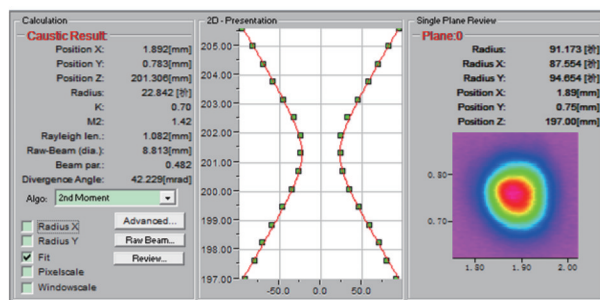


图9 输出 1.31 kW 时的光束质量测量结果

Fig.9 Beam quality measurement at 1.31 kW

5 结 论

单模信号进入 LMA 光纤中进行功率放大时,高阶模的激发具有明显的阈值特性,随着光纤盘绕半径的减小,该阈值逐渐增加。在千瓦量级激光输出功率下进行了弯曲限模实验,设计了散热良好的新型光纤水冷盘,通过优化主放增益光纤的盘绕半径,成功地抑制了高阶模的激发,实验中得到了 1.31 kW 的近单模激光输出。

参 考 文 献

- 1 D J Richardson, W A Clarkson. High power fiber lasers: current status and future perspectives[Invited][J]. Opt Soc Am B, 2010,27 (11): B63-B92.
- 2 Y Jeong, J K Sahu, D N Payne, *et al.*. Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1 kW continuous-wave output power[C]. OSA, 2004: PDP13.
- 3 Y Jeong, J K Sahu, D N Payne, *et al.*. Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1.36 kW continuous-wave output power[J]. Opt Express, 2004, 12(25): 6088-6092.
- 4 G Bonati, H Voelckel, T Gabler, *et al.*. 1.53 kW from a single Yb-doped photonic crystal fiber laser[C]. Late Breaking Developments San Jose: Photonics West, 2005: 5709-2a.
- 5 Lou Qihong, He Bin, Xue Yuhao, *et al.*. 1.75 kW Yb-doped double cladding fiber laser made in China[J]. Chinese J Lasers, 2009, 3 (5): 1277.
楼祺洪, 何 兵, 薛宇豪, 等. 1.75 kW 国产掺 Yb 双包层光纤激光器[J]. 中国激光, 2009, 36(5): 1277.
- 6 S J Augst, J K Ranka, T Y Fan, *et al.*. Beam combining of ytterbium fiber amplifiers (Invited)[J]. J Opt Soc Am B, 2007, 24(8): 1707-1715.
- 7 C X Yu, S J Augst, S M Redmond, *et al.*. Coherent combining of a 4 kW, eight-element fiber amplifier array[J]. Opt Lett, 2011, 36 (14): 2686-2688.
- 8 C Wirth, O Schmidt, I Tsybin, *et al.*. High average power spectral beam combining of four fiber amplifier to 8.2 kW[J]. Opt Lett, 2011, 36(16): 3118-3120.
- 9 M Devautour, P Roy, S Fevrier. 3D modeling of modal competition in fiber laser: application to HOM suppression in multi-layered fiber[C]. CLEO, 2009: JWA54.
- 10 Wang Wenliang, Leng Jinyong, Cao Jianqiu, *et al.*. Effect of different Yb³⁺ dopant profiles on output characteristics of multimode fiber oscillator[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(7): 0702010.
王文亮, 冷进勇, 曹涧秋, 等. 不同 Yb³⁺ 掺杂分布对多模光纤振荡器的影响[J]. 中国激光, 2013, 40(7): 0702010.
- 11 Sha Jianbo, Gao Kan, Dong Xiaopeng. Investigation of the power transmission characteristics of fundamental mode of large-core fiber and their relation with the type of refractive index profile[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(3): 030601.
沙剑波, 高 侃, 董小鹏. 大芯径光纤基模功率传输特性与折射率分布形式关系的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50 (3): 030601.
- 12 J P Koplow, D A V Kliner, L Goldberg. Single-mode operation of a coiled multimode fiber amplifier[J]. Opt Lett, 2000, 25(7): 442-444.
- 13 Liao Suying, Gong Mali. Analysis of mode evolution between straight and curved fiber transition in large mode area fibers[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(3): 0305006.

- 廖素英, 巩马理. 大模场光纤直弯过渡中的模场演变分析[J]. 中国激光, 2013, 40(3): 0305006.
- 14 Li Libo, Lou Qihong, Zhou Jun, *et al.*. Influence of bending diameter on the output capability of multimode fiber laser[J]. Chinese J Lasers, 2007, 34(3): 323-326.
- 李立波, 楼祺洪, 周 军, 等. 弯曲直径对多模光纤激光器输出性能的影响[J]. 中国激光, 2007, 34(3): 323-326.
- 15 Li Libo, Lou Qihong, Zhou Jun, *et al.*. 79.4 W single-transverse-mode output of large-mode-area fiber laser[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2007, 19(7): 1089-1092.
- 李立波, 楼祺洪, 周 军, 等. 大模场面积光纤激光器 79.4 W 单横模输出[J]. 强激光与粒子数, 2007, 19(7): 1089-1092.
- 16 D Marcuse. Curvature loss formula for optical fibers[J]. J Opt Soc Am, 1976, 66(3): 216-220.

栏目编辑: 宋梅梅