

# 光学学报

## 双端泵浦 5 kW 环形光束光纤激光振荡器

王鹏<sup>1,2,3,4</sup>, 杨保来<sup>1,2,3</sup>, 张汉伟<sup>1,2,3\*</sup>, 奚小明<sup>1,2,3</sup>, 史尘<sup>1,2,3</sup>, 王小林<sup>1,2,3\*\*</sup>, 许晓军<sup>1,2,3</sup>, 吕品<sup>4\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>国防科技大学前沿交叉学科学院, 湖南 长沙 410073;

<sup>2</sup>脉冲功率激光技术国家重点实验室, 湖南 长沙 410073;

<sup>3</sup>高能激光技术湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410073;

<sup>4</sup>中国科学院自动化研究所, 北京 100190

**摘要** 基于双端泵浦结构搭建了光纤激光振荡器, 采用 25/400  $\mu\text{m}$  (纤芯直径为 25  $\mu\text{m}$ , 包层直径为 400  $\mu\text{m}$ ) 大模场双包层掺镱光纤作为增益介质, 采用波长为 915 nm 的半导体激光器作为泵浦源。通过光纤选型、合理配比前后向泵浦功率及模式控制, 实现了对光纤受激拉曼效应及动态模式不稳定效应的抑制。该光纤激光振荡器在泵浦功率为 7.5 kW 下的最大输出功率达到 5.08 kW, 光光转换效率为 68%, 受激拉曼抑制比为 37 dB, 其时域特性稳定, 没有出现动态模式不稳定现象。最大输出功率下, 出射激光在 X 方向和 Y 方向的光束质量 ( $M^2$ ) 测量结果分别为 2.483 和 2.514, 远场光斑形态为环形, 环状区域与中心区域的光强之比为 1.6。在最大输出功率下该光纤激光振荡器连续工作 1 h 无异常, 各部位光纤器件的温度均处于可接受范围。

**关键词** 激光器; 掺镱光纤; 光纤激光振荡器; 环形光束

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0514004

## 5-kW Monolithic Fibre Laser Oscillator with Ring Beam Output Employing Bidirectional-Pumping Scheme

Wang Peng<sup>1,2,3,4</sup>, Yang Baolai<sup>1,2,3</sup>, Zhang Hanwei<sup>1,2,3\*</sup>, Xi Xiaoming<sup>1,2,3</sup>,  
Shi Chen<sup>1,2,3</sup>, Wang Xiaolin<sup>1,2,3\*\*</sup>, Xu Xiaojun<sup>1,2,3</sup>, Lü Pin<sup>4\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology,  
Changsha, Hunan 410073, China;

<sup>2</sup>State Key Laboratory of Pulsed Laser Technology, Changsha, Hunan 410073, China;

<sup>3</sup>Hunan Provincial Key Laboratory of High Energy Laser Technology, Changsha, Hunan 410073, China;

<sup>4</sup>Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

**Abstract** A fibre laser oscillator is constructed using the bidirectional-pumping structure and a 25/400  $\mu\text{m}$  (the core diameter is 25  $\mu\text{m}$  and the cladding diameter is 400  $\mu\text{m}$ ). The gain medium is a large-mode-area double-cladding ytterbium-doped fibre, and a 915-nm semiconductor laser is utilised as the pump source. The suppression of fibre-stimulated Raman scattering and dynamic mode instability is accomplished via fibre selection, an appropriate ratio of forwarding and backward pump power and mode control. The fibre laser oscillator produced a maximum output power of 5.08 kW at a pump power of 7.5 kW, with a light-light conversion efficiency of 68%, and the suppression ratio of stimulated Raman scattering is 37 dB. The time-domain properties remained constant, with no evidence of dynamic mode instability. The beam quality measurement results of output laser in the X and Y directions at maximum power are 2.483 and 2.514, respectively. The far-field light spot had a ring shape, and the light intensity ratio between the ring area and the central area is 1.6. The fibre laser oscillator worked continuously for 1 h at

收稿日期: 2021-07-20; 修回日期: 2021-08-24; 录用日期: 2021-09-13

基金项目: 国家自然科学基金(62005315)、长沙市杰出创新青年培养计划(kq2009004)

通信作者: \*zhanghanwei100@163.com; \*\*chinaphotonics@163.com; \*\*\*pin.lv@ia.ac.cn

maximum output power without any abnormality, and the temperature of the fibre optic components in all parts is within the acceptable range.

**Key words** lasers; ytterbium-doped fibre; fibre laser oscillator; ring beam

## 1 引言

光纤激光器作为新一代固体激光器的代表,拥有优异的光束质量、良好的单色性与稳定性、高电光转换效率和低维护成本,并且还兼具结构简单、体积紧凑和质量轻等诸多优点<sup>[1-3]</sup>。近年来,随着千瓦级乃至万瓦级高功率光纤激光器的不断兴起<sup>[4-5]</sup>,其在工业加工、光纤通信、汽车制造和医疗诊断等诸多领域都得到了广泛应用<sup>[6-9]</sup>。尤其在工业加工领域,与传统加工技术相比,激光加工技术属于无接触加工技术,具有材料浪费少、在规模生产中成本效应明显、对加工对象具有很强的适应性和不会污染工件等诸多优势,而且其市场规模逐年扩大<sup>[9-10]</sup>。目前,工业加工中常用的光纤激光器一般都输出高斯光束,光束经准直聚焦系统后会聚到材料表面,可以获得最小的作用面积,这能提高加工速度。然而,在大量激光切割实例中发现,如果激光能量密度过于集中,那么切割断面上会产生波浪纹,粗糙度也会增加,从而导致切割质量下降。这种现象在薄板切割中不太明显,而在厚板切割中十分明显。经过长期验证,具有环形光斑的激光器切割厚板得到的断面比具有高斯光斑甚至平顶光斑的激光器更加细腻,粗糙度更低,切割质量更好<sup>[11]</sup>。国内已经有相关激光公司,如飞博激光公司生产出了单腔功率为3 kW及4 kW的环形光斑连续光纤激光器,其大幅度提升了厚板材的切割质量,25 mm厚的碳钢板切割断面的粗糙度比普通激光器减小30%以上<sup>[12-14]</sup>。此外,在大量激光焊接实例中发现,高功率高斯光斑激光聚焦后进行焊接很容易产生飞溅颗粒物,这会附着在熔池及工件表面,极易造成表面粗糙度发生变化,从而划伤母材,污染目镜等光学介质,严重时可导致部件返工、元器件受损,甚至会造成人身安全及公司财产损失等问题。目前,控制激光加工飞溅的一个常用方法就是改变激光光斑的能量分布,避免沸腾,尽可能不用呈高斯分布的光束。相干公司及IPG公司均推出了具有环状和中心光束且光斑形态可调的光纤激光器,这能够极大地减少焊接过程中飞溅物的产生<sup>[15-16]</sup>。总的来说,高功率环形光斑光纤激光器在工业加工领域有着极其重要的用途,但目前公开报道的单纤输出环形光斑光纤激光器的功

率水平均较低,未有5 kW级的相关报道。

基于以上考虑,本文设计了一种单纤输出功率为5 kW级的环形光斑全光纤激光振荡器。该激光器采用商业化的25/400  $\mu\text{m}$ (纤芯直径为25  $\mu\text{m}$ ,包层直径为400  $\mu\text{m}$ )大模场双层掺镱光纤和波长为915 nm的半导体泵浦源分别作为增益介质和泵浦源,利用双端泵浦结构并通过对光纤类型、纤芯模式及前后向泵浦功率的合理设计,在总泵浦功率为7.5 kW时最大输出功率达到5080 W,光光转换效率为68%。实验中采用商业化的5 m长光纤输出头输出激光,在最大输出功率下测得激光光谱的受激拉曼抑制比为37 dB,时域特性稳定,没有出现动态模式不稳定效应。在最大输出功率下测得X方向和Y方向的激光光束质量分别约为2.483和2.514,远场光斑形态为环形,环形区域的光强约为中心区域的1.6倍。此外,该光纤激光振荡器在最大输出功率下连续工作1 h未出现异常,输出特性十分稳定,各部位光纤器件的温度也处于可接受范围,表明该种光纤激光振荡器完全可以应用于激光工业加工领域。

## 2 光纤选型

若获得贴近实际应用的高功率环形光束光纤激光器,则增益光纤的选择需要满足以下两个条件。

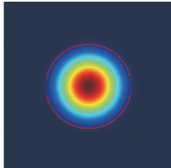
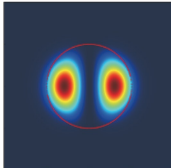
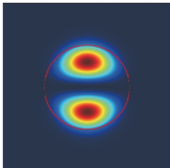
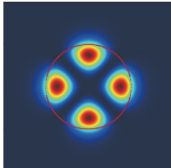
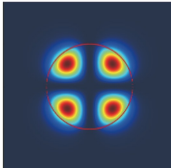
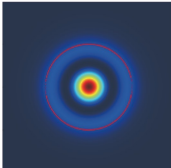
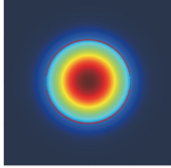
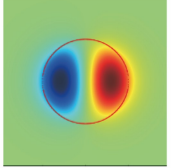
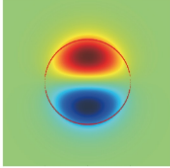
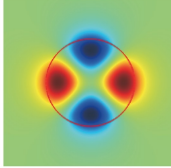
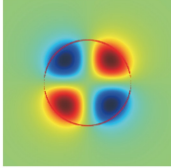
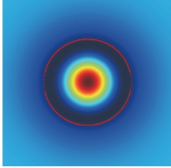
1) 商业化成熟,性能稳定,可以大批量购买。不宜采用特殊拉制或特殊结构的增益光纤,如异形光纤(锥形和纺锤形等)、限制掺杂光纤和低数值孔径(NA)光纤等,采用这些光纤不仅会增加采购成本,还会难以在大批量生产的同时保证光纤性能、参数的一致稳定性。

2) 光纤尺寸需合适。首先,若实现环形光束的输出,增益光纤必须是多模光纤,而且能够支持多种模式,纤芯直径在15  $\mu\text{m}$ 及以上的增益光纤都是满足要求的;其次,为了抑制受激拉曼现象的产生,增益光纤的纤芯尺寸不宜过小。根据目前光纤激光器的发展现状,纤芯尺寸为20  $\mu\text{m}$ 的增益光纤可以实现3 kW级的激光输出<sup>[17]</sup>,纤芯尺寸为25  $\mu\text{m}$ 的增益光纤可以实现5~6 kW级的激光输出<sup>[18-19]</sup>,纤芯尺寸在30  $\mu\text{m}$ 及以上的增益光纤可以实现更高功率的激光输出<sup>[20-21]</sup>。因此,搭建5 kW级的环形光

束光纤激光器可以采用纤芯直径为  $25\ \mu\text{m}$  或更大的掺镱光纤,该类掺镱光纤主要有  $25/250\ \mu\text{m}$ 、 $25/400\ \mu\text{m}$ 、 $30/250\ \mu\text{m}$ 、 $30/400\ \mu\text{m}$ 、 $30/600\ \mu\text{m}$  及  $30/900\ \mu\text{m}$  等。若抑制动态模式不稳定效应,实验中需要选用纤芯与包层尺寸比例小的掺镱光纤<sup>[22]</sup>,因此可以剔除  $25/250\ \mu\text{m}$  及  $30/250\ \mu\text{m}$  这两款掺镱光纤。此外,考虑到光纤切割及熔接的难易程度,本文

表 1  $25/400\ \mu\text{m}$  掺镱光纤所支持的激光模式及其对应的光强分布和振幅分布

Table 1 Laser modes supported by  $25/400\ \mu\text{m}$  ytterbium doped fiber and their corresponding intensity and amplitude distributions

Distribution	LP01	LP11E	LP11O	LP21E	LP21O	LP02
Intensity distribution						
Amplitude distribution						

当光纤弯曲时,不同激光模式下的光纤会产生不同的弯曲损耗<sup>[24]</sup>。使用 See Fiber Tool 软件可以计算出光纤在 LP01、LP11、LP21 及 LP02 模式下不同弯曲半径的弯曲损耗  $L$ ,结果如图 1 所示。从图 1 可以看出:在弯曲半径相同的情况下,4 个模式的弯曲损耗大小顺序为 LP02、LP21、LP11 和 LP01;随着光纤弯曲半径的变大,所有模式的弯曲损耗均逐渐降低,LP01 模式的降低速度最快,LP11 模式和 LP21 模式次之,LP02 模式的降低速度最慢,4 种模式间的弯曲损耗差距越来越大,呈指数增长。因此,

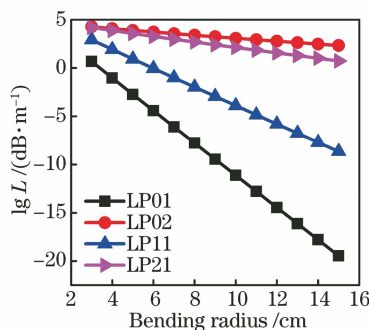


图 1  $25/400\ \mu\text{m}$  的掺镱光纤在不同模式下不同弯曲半径的弯曲损耗

Fig. 1 Bending loss of ytterbium doped fiber at different bending radii in different modes

最终选用  $25/400\ \mu\text{m}$  的掺镱光纤作为增益光纤。

利用光纤激光仿真软件 See Fiber Tool<sup>[23]</sup>可以仿真得到  $25/400\ \mu\text{m}$  的掺镱光纤所支持的所有激光模式,如表 1 所示,表内插图圆圈代表纤芯尺寸。从表 1 可以看到, $25/400\ \mu\text{m}$  掺镱光纤所支持的激光线偏振模式有 LP01、LP11E、LP11O、LP21E、LP21O 及 LP02 这几种。

若搭建环形光束光纤激光器,则需要采用合适的光纤弯曲盘绕方式,从而保证高阶模式的激光主要是 LP11 模式且光纤弯曲损耗较小,使其能够产生振荡并输出至腔外,进而与 LP01 模式的激光组成环形光束。

不同的模式成分可以组合为不同形态的激光,因此根据上述仿真结果,利用 See Fiber Tool 软件可以仿真得到  $25/400\ \mu\text{m}$  的掺镱光纤中不同模式成分占比下输出激光的光斑形态及光束质量。当 LP01、LP11E、LP11O、LP21E 和 LP21O 模式成分占比分别为组合一(模式成分占比为 22.6%、32.2%、32.2%、6.5% 和 6.5%)、组合二(7.70%、38.50%、38.50%、7.65% 和 7.65%)、组合三(3.70%、37.00%、37.00%、11.15% 和 11.15%)及组合四(10.50%、26.30%、26.30%、18.45% 和 18.45%)时,输出的激光光斑形态如图 2(a)~2(d)所示。从图 2(a)~2(d)可以看到,激光光斑均呈现为环-心强度比不同的环形光束,对应的光束质量因子  $M^2$  分别为 2.1、2.3、2.4 及 2.5。

综上所述,在考虑光纤光栅对各个模式的激光具有反射率一致的情况下,可以通过控制各模式的弯曲损耗来实现环形光束激光输出。



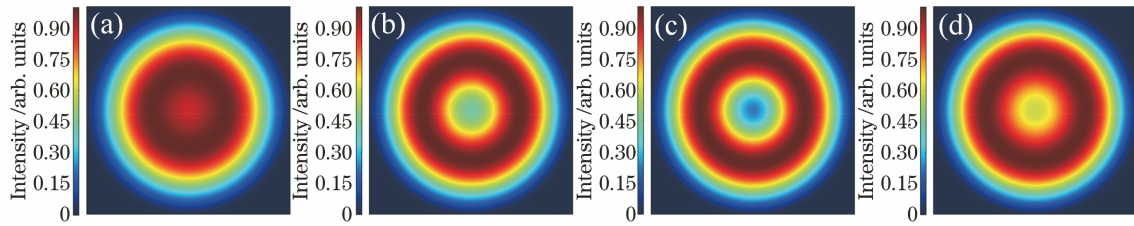


图 2 25/400  $\mu\text{m}$  的掺镱光纤中各模式成分占比不同时输出激光的光斑形态。(a)组合一;(b)组合二;(c)组合三;(d)组合四

Fig. 2 Spot shape of output laser with different mode components in 25/400  $\mu\text{m}$  ytterbium-doped fiber.

(a) Combination one; (b) combination two; (c) combination three; (d) combination four

### 3 实验结构

与光纤激光放大器相比,光纤激光振荡器具有更为优异的抗反射特性,更加适用于工业加工领域,因此本文搭建光纤激光振荡器来实现高功率环形光束激光输出。图 3 为该环形光束光纤激光振荡器的结构示意图。整个激光谐振腔由高反光栅(HR FBG)、前向泵浦/信号合束器(FPSC)、大模场掺镱光纤(LMA YDF)、后向泵浦/信号合束器(BPSC)及耦合输出光栅(OC FBG)构成。高反光栅和耦合输出光栅的反射带宽分别为 3 nm 和 1 nm,反射率分别为 99%和 10%,中心波长均为 1080 nm。两支  $(6+1)\times 1$  的泵浦/信号合束器形成了双端泵浦机制,各将 6 组功率为 900 W、波长为 915 nm 的泵浦源从两端注入到增益光纤中。实验所用的增益光纤

为美国 Nufern 公司生产的 25/400  $\mu\text{m}$  大模场双包层掺镱光纤,其在 915 nm 泵浦波长处的吸收系数约为 0.5 dB。为了保证泵浦光能够被掺镱光纤充分吸收,实验中掺镱光纤的长度设定为 40 m,总吸收系数为 20 dB。为了获得环形光束,实验中通过对光纤弯曲和光纤熔接的控制来降低高阶模式的损耗。为了增强散热效果,将导热胶水涂覆在掺镱光纤水冷盘上,所有无源光纤器件也均放置在水冷盘上,水冷温度设置为 20  $^{\circ}\text{C}$ 。高反光栅和低反光栅的空闲臂均与包层光滤除器(CLS)熔接,用于滤除剩余的包层泵浦光。前向激光由一支 5 m 长的 25/400  $\mu\text{m}$  光纤输出头(QBH)输出,之后利用测量设备对输出激光的特性进行测量。后向回光经 QBH 输出后进入废光收集桶中。

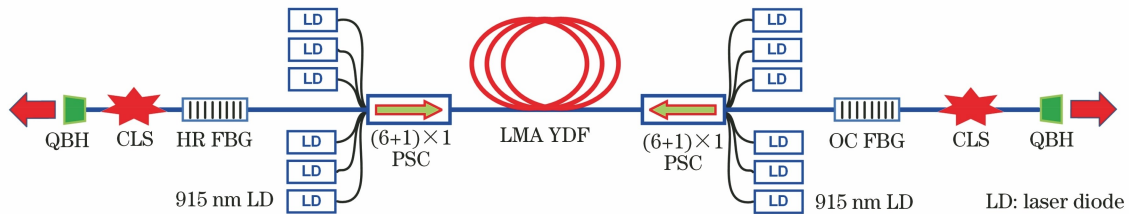


图 3 5 kW 环形光束光纤激光振荡器的结构示意图

Fig. 3 Structure diagram of 5 kW annular fiber laser oscillator

### 4 实验结果与讨论

实验中首先测试了该光纤激光振荡器的前向泵浦输出特性。图 4(a)为前向泵浦下的输出功率曲线及对应的光光转换效率曲线。从图 4(a)可以看出,当泵浦功率为 4008 W 时,测得的最大输出功率为 2670 W,对应的光光转换效率为 66.61%,斜率效率  $\eta$  为 66.9%。为了确保实验系统的安全稳定性,实验中未继续增大泵浦功率,因此功率曲线及转换效率曲线没有出现拐点和下降趋势,此时还可以继续增大泵浦功率来实现更高功率的激光输出。图 4(b)为最大输出功率下测得的激光光谱。从图 4(b)可以看到,激

光光谱的中心波长为 1080 nm,半峰全宽(FWHM)为 2.91 nm,底部出现了较为明显的 4 波混频(FWM)现象,两支次峰分别出现在 1063 nm 和 1097 nm 处,表明输出激光中含有较大成分的高阶模式激光,这有利于环形光束的形成。输出激光的时域特性可利用大靶面光电探测器测量激光入射到功率计中的散射光来得到,图 4(c)为最大输出功率下测得的激光时域特性曲线及其对应的傅里叶变换曲线。从图 4(c)可以看到,激光时域特性曲线十分稳定,没有明显的强度波动,傅里叶变换曲线也没有出现明显的频率峰,表明此时振荡器未出现动态模式不稳定效应,这可以实现更高功率的激光输出。

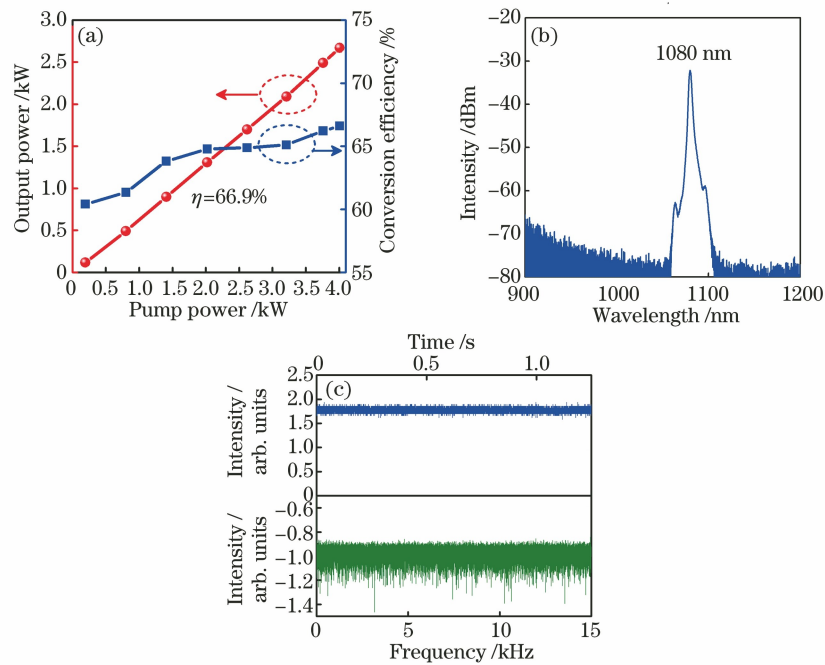


图 4 光纤激光振荡器的前向泵浦输出特性。(a)输出功率曲线及对应的光光转换效率;最大输出功率下,(b)激光的光谱特性,(c)激光的时域特性曲线及对应的傅里叶变化曲线

Fig. 4 Forward pumping output characteristics of fiber laser oscillator. (a) Output power curve and corresponding light-light conversion efficiency; at maximum output power, (b) spectral characteristics of laser, (c) time-domain characteristic curve of laser and corresponding Fourier transform curve

之后测试了该光纤激光振荡器的后向泵浦输出特性。图 5(a)为后向泵浦下的输出功率曲线及对应的光光转换效率曲线。从图 5(a)可以看出,当泵浦功率为 4076 W 时,测得的最大输出功率为 2690 W,对应的光光转换效率为 66%,斜率效率为 66%。图 5(b)为最大输出功率下测得的激光光谱。从图 5(b)可以看到,激光光谱的中心波长为 1080 nm,FWHM 为 2.28 nm,光谱纯净度较高,没有出现前向泵浦的 FWM 现象,表明此时输出激光中高阶模的成分较少。在后向泵浦和前向泵浦的泵浦功率及输出功率均基本一致的情况下,前向泵浦输出激光中高阶模的成分明显比后向泵浦输出激光多,这是因为该光纤激光振荡器的后向泵浦光从最内圈进入谐振腔,光纤弯曲较大致高阶模损耗较大,而前向泵浦光从最外圈进入谐振腔,光纤弯曲较小致高阶模损耗较小,最终前向泵浦输出激光中高阶模的成分大于后向泵浦输出激光。若实现环形光束输出,高阶模式的激光必须占据主要地位,因此后向泵浦输出激光的功率不宜加至很高,同时考虑到激光器的安全稳定性,实验中未继续增大后向泵浦功率。图 5(a)中的功率曲线及转换效率曲线均未出现拐点和下降趋势,表明还可以通过继续增大泵浦

功率来实现更高功率的激光输出。图 5(c)为最大输出功率下测得的激光时域特性曲线及对应的傅里叶变换曲线。从图 5(c)可以看到,激光时域特性曲线十分稳定,没有明显的强度波动,傅里叶变换曲线也未出现明显的频率峰,表明此时振荡器未出现动态模式不稳定效应,这还可以实现更高功率的激光输出。

在该光纤激光振荡器的前向泵浦和后向泵浦特性分别测试结束之后,对其双向泵浦下的激光特性进行详细的测试和分析。为了确保在实现环形光束输出的同时不能产生显著的受激拉曼效应,将前向泵浦输出功率控制在 2300 W,后向泵浦输出功率加至最高,总输出功率及转换效率曲线如图 6(a)所示。从图 6(a)可以看到,当双向总泵浦功率达到 7507 W 时,最大输出功率为 5080 W,光光转换效率为 67.67%,斜率效率为 68.7%。最大输出功率下的光谱及时域测量结果分别如图 6(b)和图 6(c)所示。从图 6(b)和图 6(c)可以看到,出射激光产生明显的 FWM 现象,表明其含有较高成分的高阶模式,此外输出激光光谱在 1130 nm 波长处已经出现受激拉曼效应,但强度很低,与 1080 nm 波长处的主峰强度差为 37 dB。较弱的受激拉曼效应主要得益

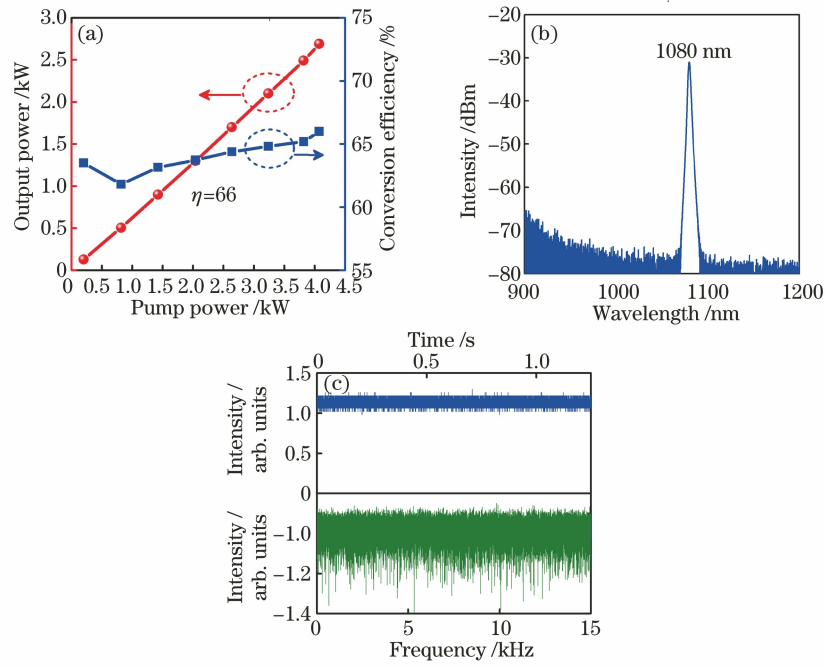


图 5 光纤激光振荡器后向泵浦输出特性。(a)输出功率曲线及对应的光光转换效率;最大输出功率下,

(b)激光的光谱特性,(c)激光的时域特性曲线及对应的傅里叶变化曲线

Fig. 5 Backpump output characteristics of fiber laser oscillator. (a) Output power curve and corresponding light-light conversion efficiency; at maximum output power, (b) spectral characteristics of laser, (c) time-domain characteristic curve of laser and corresponding Fourier transform curve

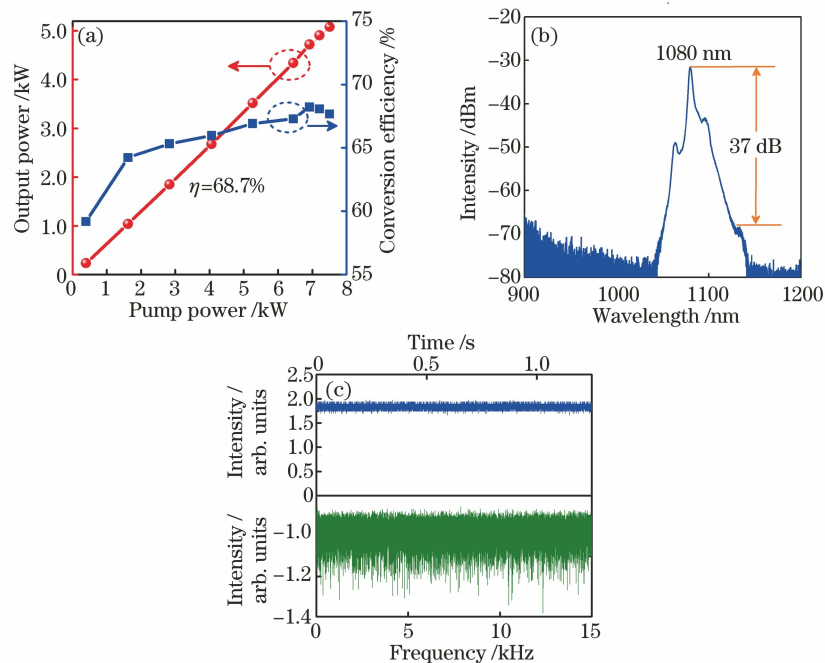


图 6 光纤激光振荡器双向泵浦输出特性。(a)输出功率曲线及对应的光光转换效率;最大输出功率下,

(b)激光的光谱特性,(c)激光的时域特性曲线及对应的傅里叶变化曲线

Fig. 6 Bidirectional pumping output characteristics of fiber laser oscillator. (a) Output power curve and corresponding light-light conversion efficiency; at maximum output power, (b) spectral characteristics of laser, (c) time-domain characteristic curve of laser and corresponding Fourier transform curve

于高阶模式激光的存在及前向泵浦功率的控制,此外本实验所用的  $25/400 \mu\text{m}$  QBH 长度为 5 m,因此

在控制受激拉曼散射强度以确保激光器系统安全稳定的前提下还可以继续增大 QBH 的长度,这能够更好地满足工业加工领域对光纤激光器具较长 QBH 的需求。图 6(c)显示了激光时域特性曲线十分稳定,没有出现明显的动态模式不稳定现象,表明此时还可以进一步增大输出功率,此外时域稳定的高功率光纤激光在实现高质量的工业加工方面也有着很好的技术优势。

为了确认双向泵浦下的输出激光为环形光束,利用 Spiricon 公司生产的 M2-200s 光束质量分析仪对不同输出功率下激光的光束质量进行测量,结果如图 7 所示。从图 7 可以看出,随着输出功率的增大,出射激光的  $M^2$  值呈现出先增大后平稳再增大的趋势。初步分析认为在  $M^2$  值的初始上升阶段(输出功率小于 2.0 kW),出射激光中高阶模式的激光含量较多,且随着输出功率的增大而增加,所以  $M^2$  值也不断增大。此外,从焦点处的光斑形态也可以看出,1.0 kW 的输出功率下光斑呈现出明显的 LP11 模形态,而 2.0 kW 的输出功率下光斑呈现出

环形形态,表明有更多的且其余阶数的高阶模激光在谐振腔内得到了起振并输出到了腔外。在  $M^2$  值的平稳阶段(输出功率为 2.0~3.5 kW),出射激光中高阶模式和基模的激光含量基本不再变化,所以出射激光的  $M^2$  值也保持稳定不变。此外,从焦点处的光斑形态也可以看到,出射激光光斑一直是环形光束,没有出现明显的变化,圆环处光强与中心光强的强度比例也保持恒定(约为 1.2),说明了模式成分没有显著变化。在  $M^2$  值的最终上升阶段(输出功率为 3.5~5.0 kW),出射激光的  $M^2$  值又随着输出功率的增大而同步增大,表明出射激光中高阶模式的激光含量又不断增加,基模的激光含量逐渐减少。当输出激光功率达到最大值 5.08 kW 时,出射激光在 X 方向和 Y 方向的  $M^2$  值分别为 2.483 和 2.514。此外,从焦点处光斑形态也可以看出,光斑呈现出了标准的环形形态,环形区域与中心区域的强度比约为 1.6,比平稳阶段的强度更大。综上所述,该光纤激光振荡器实现了 5 kW 级高功率环形光束激光输出,达到了实验预期。

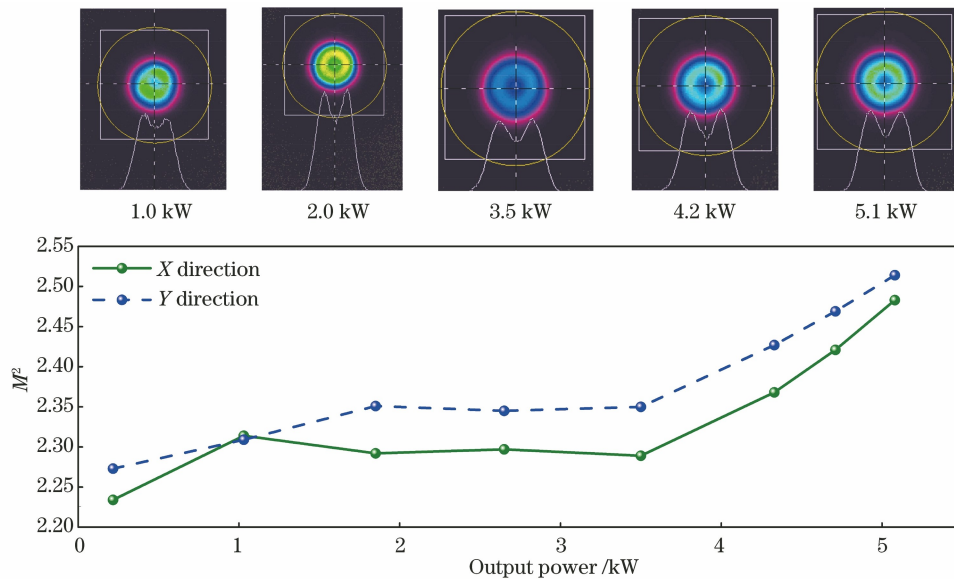


图 7 不同输出功率下的激光光束质量,插图为不同功率下焦点处的光斑形态

Fig. 7 Laser beam quality under different output powers, illustration shows shape of light spot at focus under different powers

为了验证该光纤激光振荡器的长期工作稳定性,对其进行了 1 h 的满功率运行测试,输出功率的监测结果如图 8(a)所示。从图 8(a)可以看到,输出功率的最大值达到 5100 W,最小值为 5060 W,平均功率为 5078 W,功率波动仅为 0.4%,说明该激光器的输出功率十分稳定,结合光纤激光振荡器优异的抗反射特性,该光纤激光器完全可以应用在工业

加工领域中。此外,在运行过程中还对相关熔点及器件的温度特性进行监控,结果如图 8(b)所示。从图 8(b)可以看到,在最大输出功率下整个光纤水冷盘温度最高处的位置是在后向合束器,其壳体中心温度达到 53.8 °C。众所周知,后向合束器壳体的温升主要由其对高阶模式激光的滤模效应引起,由此表明在最大输出功率下有一定含量的高阶模式激光



没有输出到谐振腔外,而是被后向合束器滤除了。后续若进一步提升输出激光的环围能量以及获得更接近于纯净的环形光束,可以考虑将后向合束器的信号臂更换为更大纤芯尺寸的光纤,这样可以防止高阶模式的激光在通过后向合束器时被滤除掉。前

向合束器、前向掺镱光纤及后向掺镱光纤的最高熔点分别为 39.3, 51.0, 36.1 °C, 均处于可接受范围,这表明该光纤激光振荡器的温度特性可以满足工业加工领域的需求。

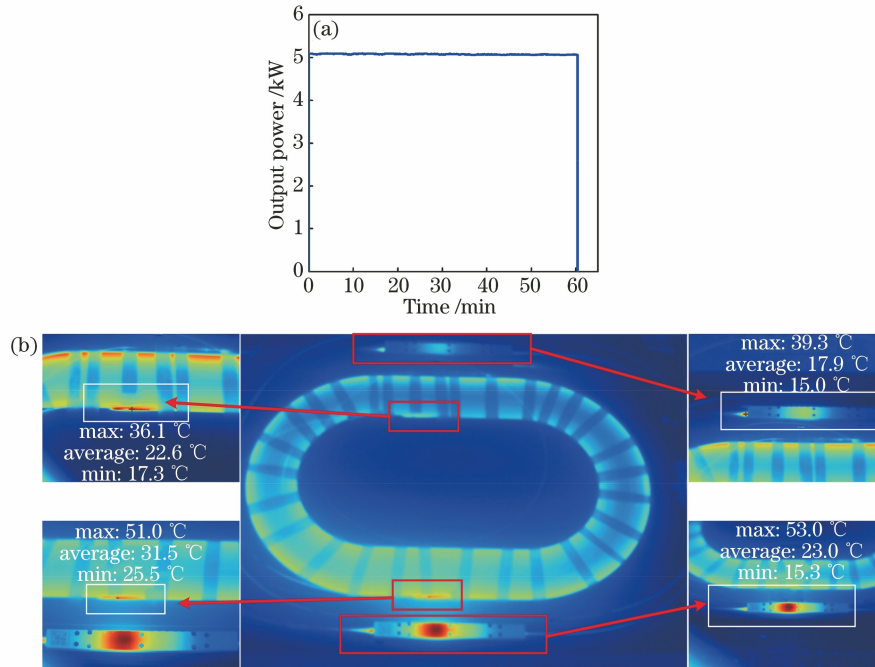


图 8 光纤激光振荡器在满功率运行下测得的结果。(a) 1 h 输出功率数据曲线;(b) 光纤器件热像图

Fig. 8 Measured results of fiber laser oscillator under full power operation. (a) 1 h output power data curve; (b) thermal image of optical fiber devices

## 5 结 论

高功率环形光束光纤激光器具有与普通高斯光束光纤激光器完全不同的能量分布特性,在工业加工领域有着广泛的用途。然而,受限于动态模式的不稳定效应和受激拉曼效应,传统光纤激光器难以直接实现高功率环形激光输出。本文利用 25/400  $\mu\text{m}$  的大模场掺镱光纤搭建了光纤激光振荡器,通过对光纤模式的控制及前后向泵浦功率的合理设计,实现了环形光束激光输出,最大输出功率达到 5 kW,而且未出现显著的受激拉曼现象和动态模式不稳定效应。光束质量测试结果表明,该光纤激光振荡器可以在输出功率为 2 kW 以上实现标准的环形光束出射,光斑能量分布均匀,环形区域与中心区域的强度比最大可达 1.6。此外,还对该光纤激光振荡器进行 1 h 的满功率运行实验,测得其输出功率波动仅为 0.4%,十分稳定。各部位光纤器件的温度也处于可接受范围,可以满足工业加工对其安全稳定性的要求。结合光纤激光振荡器优异的抗反

射特性,本文搭建的高功率环形光束光纤激光振荡器在工业加工领域有着很大的应用潜力,后续还可以继续对其结构和相关参数进行改进,实现更高功率和更高环-心能量比的激光输出。

**致谢** 本文工作感谢国防科技大学高能激光技术研究所陈子伦老师在光纤端帽及包层光滤除器方面给予的支持,感谢实验室张坤、宋涛及徐小勇技术员在测试过程中给予的帮助。

## 参 考 文 献

- [1] Nilsson J, Payne D N. High-power fiber lasers[J]. Science, 2011, 332(6032): 921-922.
- [2] 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.
- [3] Brown D C, Hoffman H J. Thermal, stress, and thermo-optic effects in high average power double-clad silica fiber lasers[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2001, 37(2): 207-217.
- [4] Fomin V, Gapontsev V, Shcherbakov E, et al.



- 100 kW CW fiber laser for industrial applications[C]//2014 International Conference Laser Optics, June 30-July 4, 2014, St. Petersburg, Russia. New York: IEEE Press, 2014.
- [5] Xi X M, Zeng L F, Ye Y, et al. 3 kW single-mode fiber laser oscillator based on domestic bi-conical tapered fiber[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(9): 0916001.  
奚小明, 曾令筏, 叶云, 等. 基于国产双锥形光纤实现 3 kW 单模全光纤振荡器[J]. 中国激光, 2020, 47(9): 0916001.
- [6] Chen J Y, Wang X N, Lü F, et al. Microstructure and mechanical properties of welded joints of low carbon steels welded by laser beam oscillating welding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(3): 0302006.  
陈靖雨, 王晓南, 吕凡, 等. 激光束摆动焊接低碳钢焊接接头的组织和力学性能[J]. 中国激光, 2020, 47(3): 0302006.
- [7] Yang Y Q, Wu S B, Zhang Y, et al. Application progress and prospect of fiber laser in metal additive manufacturing[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(5): 0500012.  
杨永强, 吴世彪, 张越, 等. 光纤激光器在金属增材制造中的应用进展及展望[J]. 中国激光, 2020, 47(5): 0500012.
- [8] Liu D M, Yan C L. Key technologies and applications for high power fibre laser[J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(S3): 105-109.  
刘德明, 阎嫦玲. 高功率光纤激光器的关键技术及应用[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(S3): 105-109.
- [9] Shiner B. The impact of fiber laser technology on the world wide material processing market [C] // 2013 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), June 9-14, San Jose, California. Washington, D.C.: OSA, 2013: AF2J.1.
- [10] Li X, Guan Y C. Study on typical laser processing technologies and applications in aeronautical manufacturing [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(Z2): 38-45, 65.  
李兴, 管迎春. 浅述几种典型激光加工技术在航空制造领域的应用现状[J]. 航空制造技术, 2019, 62(Z2): 38-45, 65.
- [11] OESHOW. Influence of laser intensity distribution on laser cutting-scientifically explaining the advantage of 3000 W single-cavity fiber laser produced by Fiber Technology Laser Co., Ltd [EB/OL]. [2021-06-26]. <http://www.oeshow.cn/informationdetail/8825>.  
光电汇. 光斑能量分布对激光切割的影响——科学解释飞博单腔 3000 W 激光器优势[EB/OL]. [2021-06-26]. <http://www.oeshow.cn/informationdetail/8825>.
- [12] Feibo Laser. Batch on new lead hot, FeiBo laser have well packed in China International Industry Fair[EB/OL]. [2021-06-26]. [https://www.sohu.com/a/343016137\\_157139](https://www.sohu.com/a/343016137_157139).  
飞博激光. 批量上新引热议, 飞博激光完美收官工博会[EB/OL]. [2021-06-26]. [https://www.sohu.com/a/343016137\\_157139](https://www.sohu.com/a/343016137_157139).
- [13] Feibo Laser. Introduction to ring spot laser and 3000 W single-cavity laser[EB/OL]. [2021-06-26]. [http://www.feibolaser.com/news\\_view.aspx?TypeId=140&Id=416&Fid=t2:140:2](http://www.feibolaser.com/news_view.aspx?TypeId=140&Id=416&Fid=t2:140:2).  
飞博激光. 环形光斑与单腔 3000 W 激光器介绍[EB/OL]. [2021-06-26]. [http://www.feibolaser.com/news\\_view.aspx?TypeId=140&Id=416&Fid=t2:140:2](http://www.feibolaser.com/news_view.aspx?TypeId=140&Id=416&Fid=t2:140:2).
- [14] Feibo laser. Medium-power continuous-wave fiber laser-3000 W[EB/OL]. [2021-06-26]. [http://www.feibolaser.com/prod\\_view.aspx?TypeId=121&Id=191&Fid=t3:121:3](http://www.feibolaser.com/prod_view.aspx?TypeId=121&Id=191&Fid=t3:121:3).  
飞博激光. 中功率连续光纤激光器-3000 W [EB/OL]. [2021-06-26]. [http://www.feibolaser.com/prod\\_view.aspx?TypeId=121&Id=191&Fid=t3:121:3](http://www.feibolaser.com/prod_view.aspx?TypeId=121&Id=191&Fid=t3:121:3).
- [15] Zhihu. Brief talk about several kinds of mainstream laser welding technology with low splash[EB/OL]. [2021-06-26]. <https://zhuanlan.zhihu.com/p/79010366>.  
知乎. 浅谈几种主流的低飞溅激光焊接技术[EB/OL]. [2021-06-26]. <https://zhuanlan.zhihu.com/p/79010366>.
- [16] Coherent. HighLight FL-ARM[EB/OL]. [2021-06-26]. <https://www.coherent.com/content/dam/coherent/site/en/resources/datasheet/lasers/highlight-fl-arm-standard-ds.pdf>.
- [17] Luo X X, Xi X M, Shi C, et al. 3 kW near-single-mode all-fiber amplifier based on 20/400  $\mu\text{m}$  gain fiber and its long time operation characteristics [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(2): 0201004.  
罗雪雪, 奚小明, 史尘, 等. 基于 20/400  $\mu\text{m}$  增益光纤的 3 kW 近单模全光纤放大器及其长时工作特性[J]. 中国激光, 2019, 46(2): 0201004.
- [18] Xiao Q R, Li D, Huang Y S, et al. Directly diode and bi-directional pumping 6 kW continuous-wave all-fibre laser [J]. Laser Physics, 2018, 28(12): 125107.
- [19] Yang B L, Shi C, Zhang H W, et al. Monolithic fiber laser oscillator with record high power [J]. Laser Physics Letters, 2018, 15(7): 075106.
- [20] Fang Q, Li J H, Shi W, et al. 5 kW near-diffraction-

- limited and 8 kW high-brightness monolithic continuous wave fiber lasers directly pumped by laser diodes [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(5): 1-7.
- [21] Chen X L, Lou F G, He Y, et al. Home-made 10 kW fiber laser with high efficiency [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(3): 0336001.  
陈晓龙, 楼风光, 何宇, 等. 高效率全国产化 10 kW 光纤激光器 [J]. *光学学报*, 2019, 39(3): 0336001.
- [22] Tao R M, Wang X L, Zhou P. Comprehensive theoretical study of mode instability in high-power fiber lasers by employing a universal model and its implications [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2018, 24(3): 1-19.
- [23] Wang X L, Lü P, Zhang H W, et al. Fiber laser simulation software See Fiber Laser and fiber laser tool collection SFTool [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(5): 0506002.  
王小林, 吕品, 张汉伟, 等. 光纤激光仿真软件 See Fiber Laser 与光纤激光工具集 SFTool [J]. *中国激光*, 2017, 44(5): 0506002.
- [24] Marcuse D. Bend loss of slab and fiber modes computed with diffraction theory [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1993, 29(12): 2957-2961.