

# 中国激光

## 高功率掺镱光纤振荡器：研究现状与发展趋势

王小林<sup>1,2,3\*\*\*</sup>, 张汉伟<sup>1,2,3</sup>, 杨保来<sup>1,2,3</sup>, 奚小明<sup>1,2,3</sup>, 王鹏<sup>1,2,3</sup>, 史尘<sup>1,2,3</sup>,  
王泽锋<sup>1,2,3</sup>, 周朴<sup>1,2,3\*</sup>, 许晓军<sup>1,2,3\*\*</sup>, 陈金宝<sup>1,2,3</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

**摘要** 近年来,高功率掺镱光纤振荡器的输出功率和光束质量不断提升,在工业、科研等领域得到了越来越广泛的应用。目前,多模掺镱光纤振荡器的输出功率已经突破 17.5 kW,近单模光纤振荡器输出功率已经突破 8 kW。本文对掺镱光纤振荡器在科研和工业领域的研究现状进行详细介绍,分析掺镱光纤振荡器未来的发展趋势;对进一步提升掺镱光纤振荡器功率和光束质量的各项关键技术进行剖析,给出了万瓦级近单模高功率掺镱光纤振荡器的技术方案,以期为更高功率光纤振荡器的发展提供技术参考。

**关键词** 光纤激光器; 光纤振荡器; 非线性效应; 模式不稳定性; 功率提升

中图分类号 O436 文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.0401004

### 1 引言

光纤激光器具有高效率、低热负荷、高光束质量、可柔性传输等优点,在工业加工、材料处理、国防科研等领域具有广泛的应用前景<sup>[1-2]</sup>。与主振荡功率放大(MOPA)结构的光纤放大器相比,光纤振荡器具有结构紧凑、控制逻辑简单、成本低廉、抗反射回光能力强、稳定性好等优点。随着光纤器件和工艺的发展,掺镱光纤振荡器(后文简称光纤振荡器)的输出功率和光束质量不断提升。2018年,国防科技大学<sup>[3]</sup>和日本藤仓公司<sup>[4]</sup>分别报道了全光纤 5 kW 近单模光纤振荡器。2019年,日本藤仓公司将该单模 5 kW 激光器用于铜片材料处理,得到了比多模激光更好的效果<sup>[5]</sup>。2019年,德国 Laserline 公司在 Photonics West 会议上报道了输出功率达 17.5 kW 的空间结构多模光纤振荡器,在报道中他们指出,基于类似平台的功率为 6 kW、光束质量为 4 mm · mrad 的光纤激光器已成为标准商业产品<sup>[6]</sup>。2020年,日本藤仓公司在 Photonics West 会

议上又报道了输出功率突破 8 kW 的近单模光纤振荡器<sup>[7]</sup>。相关研究表明,在输出激光功率与光束质量方面,光纤振荡器与 MOPA 结构光纤放大器的差距逐渐缩小。此外,根据德国耶拿大学的研究结果,表明在某些情况下光纤振荡器具有比光纤放大器更高的模式不稳定(TMI)阈值<sup>[8-9]</sup>。因而,从光纤振荡器的发展可以看出,连续光纤振荡器的输出功率越来越高,在科研和工业领域都得到了广泛的关注,并且可能在今后的工业应用中大规模替代传统 MOPA 结构光纤放大器。

本文首先对高功率光纤振荡器在科研和工业领域的研究现状进行详细介绍,并将相关研究结果与 MOPA 结构光纤放大器的研究结果进行比较,指出光纤振荡器的潜在优势。然后,对高功率光纤振荡器未来发展趋势进行分析,重点指出实现更高功率、更高光束质量光纤振荡器对各个关键技术的发展需求。最后结合各项关键技术的分析,给出了万瓦级甚至更高功率近单模光纤振荡器的技术方案,以期为更高功率的光纤振荡器的发展提供思路。

收稿日期: 2020-06-28; 修回日期: 2020-07-11; 录用日期: 2020-07-20

基金项目: 国家自然科学基金(61735007)

\*E-mail: zhoupu203@163.com; \*\*E-mail: xuxj@163.com; \*\*\*E-mail: chinaphotonics@163.com

## 2 高功率光纤振荡器的研究现状

### 2.1 科研领域光纤振荡器研究现状

表 1 给出了文献中公开报道的光纤振荡器的研究结果,表中  $\varphi$  为光纤纤芯直径,  $A_{\text{eff}}$  为光纤有效模场面积,  $M^2$  为实际光束 BPP 与理想光束 BPP 之比, BPP 为光束参数乘积, NA 为数值孔径。早在 2012 年,美国 Alfalight 公司报道了输出功率为

1 kW 的全光纤振荡器。此后,光纤振荡器几乎每年上一个台阶,在最近两年,光纤振荡器的输出功率更是得到了极大提升。2019 年,德国 Laserline 公司报道了输出功率为 17.5 kW 的空间结构多模光纤振荡器;2020 年,日本藤仓公司报道了输出功率为 8 kW 的近单模全光纤振荡器。下面分别对空间结构和全光纤结构光纤振荡器的典型研究结果和现状进行介绍。

表 1 高功率全光纤振荡器典型研究结果

Table 1 Typical research results of high power all-fiber laser oscillators

Year	Institution	Type	$\varphi$ or $A_{\text{eff}}$	NA	Power /kW	Beam quality	Reference
2012	Alfalight, USA	All fiber	$\varphi=20 \mu\text{m}$	0.065	1.0	$M^2 \approx 1.2$	Ref. [10]
2014	Coherent, USA	Spatial	$A_{\text{eff}}=800 \mu\text{m}^2$	0.048	3.0	$M^2 < 1.15$	Ref. [11]
2014	NUDT, China	All fiber	$\varphi=20 \mu\text{m}$	0.065	1.5	$M^2 < 1.2$	Ref. [12]
2015	TJU, China	All fiber	$\varphi=20 \mu\text{m}$	0.065	1.6	$M^2 < 1.1$	Ref. [13]
2015	Fujikura, Japan	All fiber	$A_{\text{eff}}=400 \mu\text{m}^2$	0.07	2.0	$M^2 = 1.2$	Ref. [14]
2016	NUDT, China	All fiber	$\varphi=20 \mu\text{m}$	0.065	2.5	$M^2 \approx 1.2$	Ref. [15]
2018	TJU, China	All fiber	$\varphi=20 \mu\text{m}$	0.065	2.0	$M^2 \approx 1.5$	Ref. [16]
2017	NUDT, China	All fiber	$\varphi=20 \mu\text{m}$	0.065	3	$M^2 \approx 1.3$	Ref. [17-18]
2017	SUS Tech, China	All fiber	$\varphi=20 \mu\text{m}$	0.065	2	$M^2 < 1.2$	Ref. [19]
2017	Fujikura, Japan	All fiber	$A_{\text{eff}}=400 \mu\text{m}^2$	0.07	3	$M^2 \approx 1.3$	Ref. [20]
2017	NUDT, China	All fiber	$\varphi=25 \mu\text{m}$	—	4	$M^2 \approx 2.2$	Ref. [21]
2018	NUDT, China	All fiber	$\varphi=25 \mu\text{m}$ (GT Wave)	—	3.96	$M^2 \approx 2.0$	Ref. [22]
2018	Fujikura, Japan	All fiber	$A_{\text{eff}}=600 \mu\text{m}^2$	—	5	$M^2 \approx 1.3$	Ref. [4]
2018	NUDT, China	All fiber	$\varphi=25 \mu\text{m}$	0.065	5.2	$M^2 \approx 1.7$	Ref. [3, 23]
2019	Universität Jena, Germany	All fiber	$\varphi=20 \mu\text{m}$	0.06	4.8	$M^2 \approx 1.3$	Ref. [8]
2019	NUDT, China	All fiber	$A_{\text{eff}}=600 \mu\text{m}^2$	—	6.06	$M^2 \approx 2.6$	Ref. [24]
2019	Laserline GmbH, Germany	Spatial	$\varphi=50-90 \mu\text{m}$	0.11	17.5	BPP: 8 mm · mrad	Ref. [6]
2020	Fraunhofer Institute for LT, Germany	Spatial	$\varphi < 100 \mu\text{m}$	—	8.113	—	Ref. [25]
2020	Universität Jena, Germany	All fiber	$\varphi=20 \mu\text{m}$	0.07	5	$M^2 \approx 1.3$	Ref. [26]
2020	Fujikura, Japan	All fiber	$A_{\text{eff}}=600 \mu\text{m}^2$	—	8	BPP: 0.5 mm · mrad	Ref. [7]

#### 2.1.1 空间结构光纤振荡器典型结果

在光纤激光器发展的早期,由于全光纤泵浦合束器、光纤光栅等器件制作工艺不成熟,空间结构振荡器中只能利用空间镜片替代合束器、光纤光栅等器件。在空间结构振荡器中,通过透镜对泵浦光进行耦合,利用反射镜构建谐振腔,利用分色镜将泵浦光和激光分离。早在 2004 年,英国南安普顿大学

Jeong 等<sup>[27]</sup>采用双向泵浦的空间光路结构,在纤芯直径为 43  $\mu\text{m}$ 、数值孔径为 0.09 的光纤中,获得了 1.01 kW 的激光输出。同年,他们优化增益光纤设计,将纤芯直径和数值孔径分别减少到 40  $\mu\text{m}$  和 0.06,获得了 1.36 kW 近衍射极限( $M^2=1.4$ )的激光输出。2009 年,英国南安普顿大学研究人员利用类似的空间结构方案,在纤芯直径为 50  $\mu\text{m}$ 、NA 为

0.06 的增益光纤中,实现了最大输出功率为 2.1 kW 的单模光纤激光输出,激光器光光效率为 74%,光束质量因子  $M^2 = 1.2$ 。在之后的几年内,随着全光纤合束器及大模场光纤光栅等全光纤器件的逐步发展,空间结构全光纤振荡器的研究相对较少。直到 2014 年,美国 Coherent 公司等报道了输出功率为 3 kW 的空间结构单模光纤振荡器<sup>[11]</sup>。他们采用 976 nm 半导体激光器对光纤振荡器进行后向泵浦,在模场面积约为  $800 \mu\text{m}^2$ 、数值孔径为 0.048 的大模场光纤中,获得了输出功率为 3 kW、光束质量因子为  $M^2 = 1.15$  的激光输出。

一直以来,人们容易本能地认为空间结构光纤激光器稳定性较差,难以适合苛刻的工业环境应用要求,所以空间结构光纤振荡器并未受到广泛的关注。直到 2019 年,德国 Laserline 公司<sup>[6]</sup>报道了输出功率为 17.5 kW 的高功率振荡器,一定程度上改变了大家对空间结构光纤激光器的认识。17.5 kW 光纤振荡器的实验结构如图 1 所示,图中 HR、AR、PR 为高反、增透、部分反射镜,实验中采用数值孔径为 0.11、纤芯直径为  $50 \sim 90 \mu\text{m}$  的增益光纤作为增益介质,该增益光纤的内包层直径为 1 mm、数值孔径为 0.24。采用 930~985 nm 的光纤耦合半导体激光器(LD)对谐振腔进行双向泵浦,在泵浦功率为 24 kW 时,获得 17.5 kW 的功率输出,输出光束

质量为  $8 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ ,如图 2 所示。

Laserline 公司研究人员还对单端泵浦情况下的 10 kW 激光器进行大于 10 d(240 h)的稳定性拷机测试,在整个拷机过程中,激光输出功率波动小于 1%,证明该空间结构激光器具有良好的稳定性。在该报道中,Laserline 公司还指出,基于类似结构的 6 kW 激光器已经有成熟的商业产品,证明了空间结构激光器稳定性足以满足工业应用的要求。

2020 年,德国 Fraunhofer 激光技术研究所和 Laserline 公司合作,利用刻写在增益光纤上的光纤光栅,搭建了输出功率为 8 kW 的空间结构光纤振荡器<sup>[25]</sup>。实验结构如图 3 所示,首先在增益光纤一端利用飞秒脉冲刻写光纤光栅,然后利用该增益光纤搭建光纤振荡器。在增益光纤的泵浦注入端,双色镜透过泵浦光的同时对激光进行高反射;该双色镜与增益光纤上刻写的光纤光栅构成激光器的谐振腔,在增益光纤的输出端切  $8^\circ$  角以避免反馈光进入谐振腔。

在光纤光栅最高温度为  $130^\circ\text{C}$  时,实验得到了最高输出功率为 8113 W 的激光。实验中,研究了输出功率与中心波长、光谱宽度之间的关系,得到的结果如图 4 所示,在最高功率时,激光中心波长在 1079.5 nm 左右,光谱的 3 dB 带宽为  $0.67 \text{ nm}$ <sup>[25]</sup>。

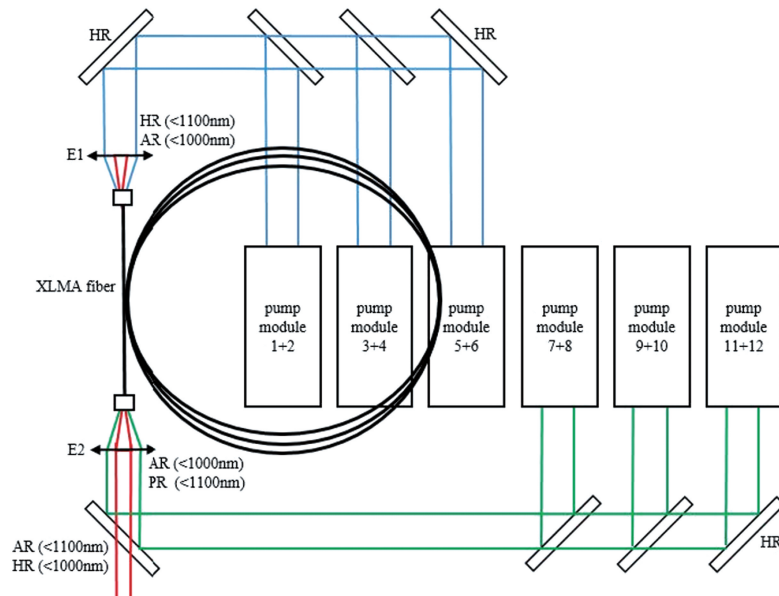


图 1 17.5 kW 空间结构光纤振荡器实验结构<sup>[6]</sup>

Fig. 1 Experimental setup of the 17.5 kW laser oscillator with spatial configuration<sup>[6]</sup>

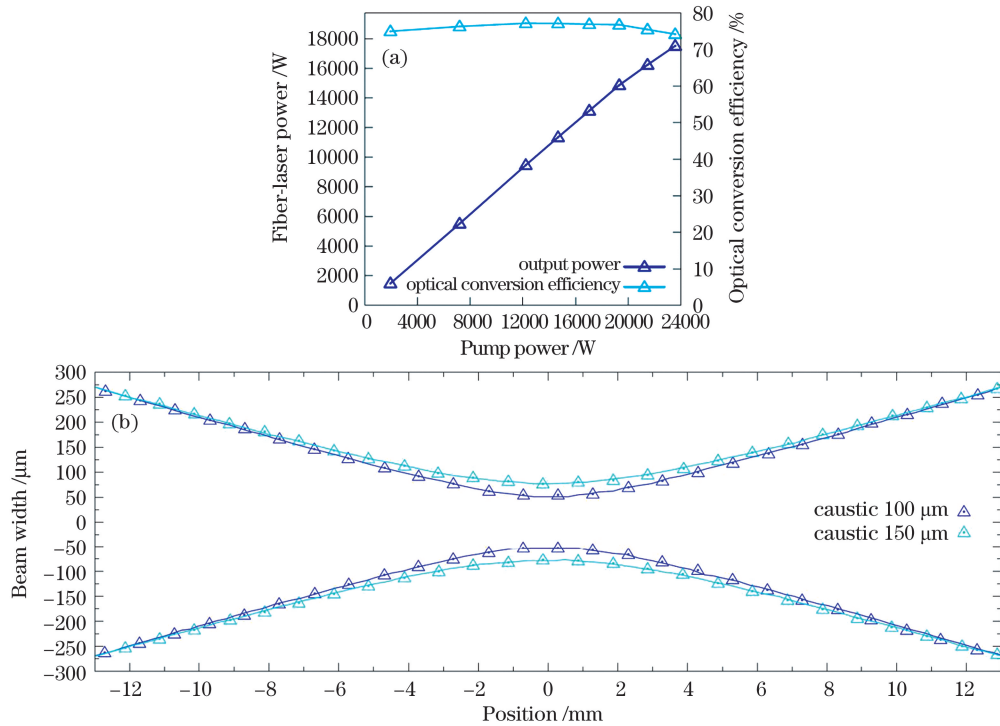


图 2 17.5 kW 空间结构光纤振荡器输出功率与光束质量<sup>[6]</sup>。(a) 泵浦功率-输出功率曲线;(b) 光束质量测试结果  
Fig. 2 Output power and beam quality of 17.5 kW laser oscillator with spatial configuration<sup>[6]</sup>. (a) Pump power versus output power; (b) beam quality measurement results

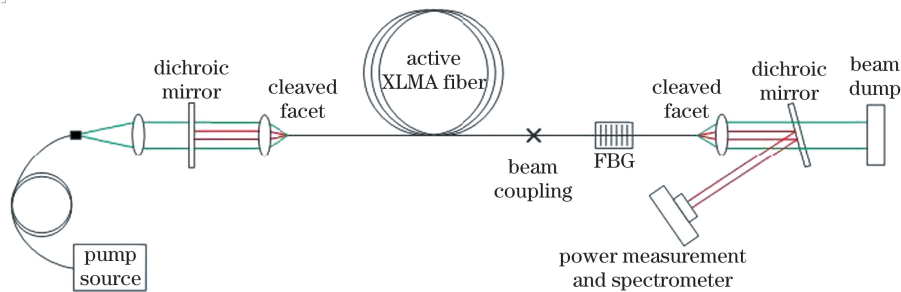


图 3 基于增益光纤刻写光纤光栅的空间结构光纤振荡器实验结构<sup>[25]</sup>  
Fig. 3 Experiment setup of the spatial configured laser oscillator based on gain fiber with fiber grating<sup>[25]</sup>

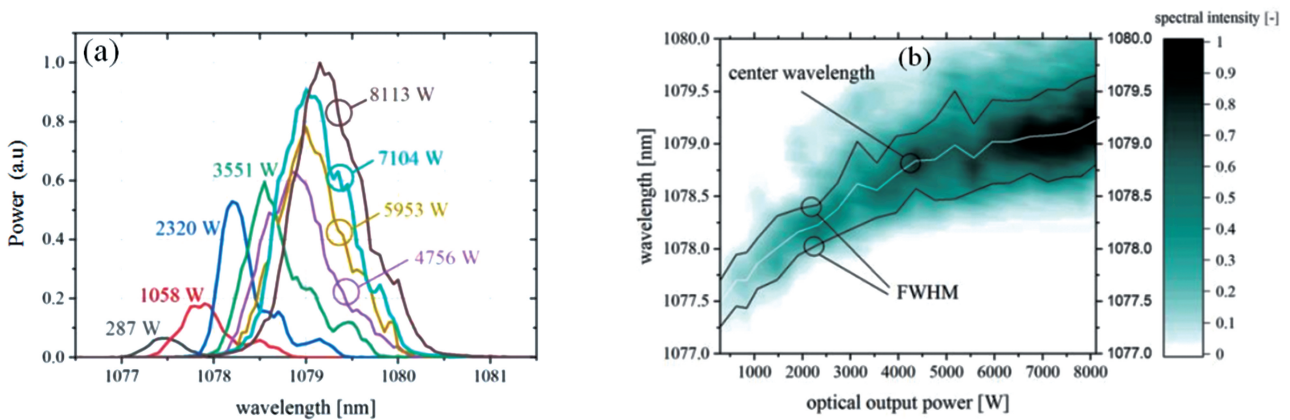


图 4 基于增益光纤刻写光纤光栅的空间结构光纤振荡器实验结果<sup>[25]</sup>。(a) 不同功率时输出光谱;(b) 不同功率时的中心波长  
Fig. 4 Experimental results of the spatial configured laser oscillator based on gain fiber with fiber grating<sup>[25]</sup>. (a) Spectra in different power; (b) center wavelength in different power



2.1.2 全光纤结构光纤振荡器最新研究现状

一般认为,全光纤结构振荡器结构紧凑、稳定性好,在光纤光栅、高功率合束器等全光纤器件工艺进步的基础上,全光纤振荡器得到了快速的发展。2010 年,芬兰 CoreLase 公司推出 1 kW 全光纤振荡器产品,之后一段时间,全光纤振荡器发展较为缓慢。直到 2016 年以后,国内外多家单位对全光纤振荡器开展了深入的研究,输出功率也迅速从 2015 年的 2 kW 提升到 2020 年的 8 kW。这里主要介绍 2020 年以来最新的高功率全光纤振荡器实验报道。

2020 年 1 月,本课题组报道了输出功率为 6 kW 的全光纤振荡器。实验结构如图 5 所示,高

反射光栅(HRFBG)、低反射光栅(OCFBG)和掺镱光纤(YDF)构成激光谐振腔。光纤光栅中心波长为 1080 nm,高反射和低反射光栅的反射率分别为 99%和 10%;双包层大模场增益光纤的模场面积为 700  $\mu\text{m}^2$ 。采用两个  $(6+1)\times 1$  合束器将 6 组 900 W 的 915 nm 泵浦光注入到增益光纤。在泵浦功率为 9.2 kW 时,振荡器输出功率为 6.03 kW,光-光效率为 65%,如图 6 (a)所示。在最高输出功率时,激光器的 3 dB 带宽为 4.3 nm,输出激光中无泵浦光和放大自发辐射(ASE),受激拉曼散射(SRS)峰值比信号光峰值低 21 dB,如图 6 (b)所示。在最高输出功率时,测得的光束质量因子  $M^2$  约为 2.6,典型的远场光斑形态如图 6 (c)所示。

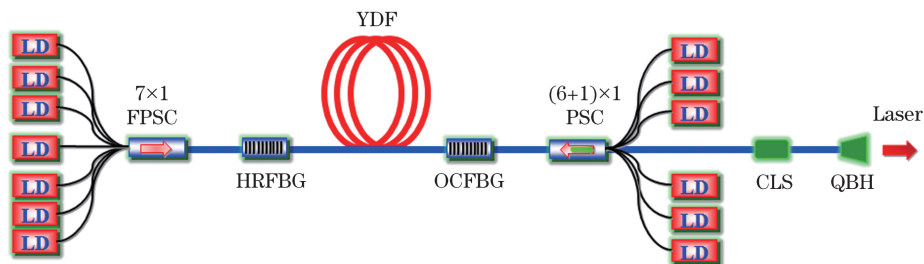


图 5 6 kW 全光纤振荡器实验结构<sup>[24]</sup>

Fig. 5 Experimental setup of 6 kW all-fiber laser oscillator<sup>[24]</sup>

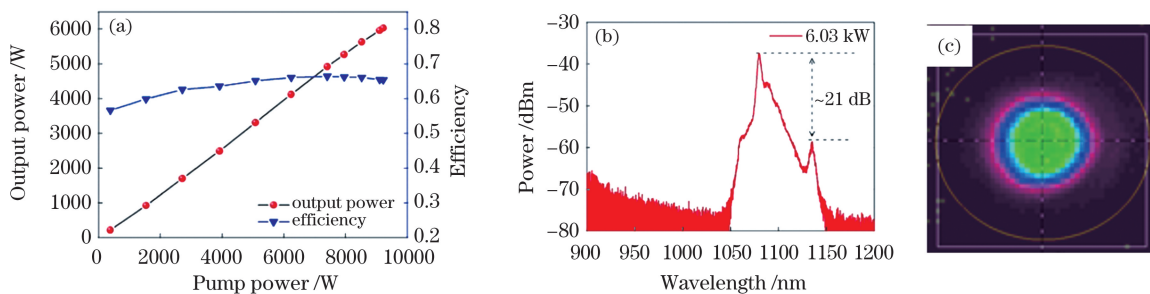


图 6 6 kW 全光纤振荡器实验结果<sup>[24]</sup>。(a)功率效率曲线;(b)输出光谱;(c)输出光斑特性

Fig. 6 Experimental results of 6 kW all-fiber laser oscillator<sup>[24]</sup>. (a) Power and efficiency curve; (b) output spectrum; (c) output beam profile

2020 年 3 月,德国耶拿大学在之前普通的 5 kW 光纤振荡器基础上<sup>[9]</sup>,报道了基于飞秒激光器刻写高功率光纤光栅的 5 kW 全光纤振荡器<sup>[26]</sup>,实验结构如图 7(a)所示。首先,利用飞秒激光在 Nufern 公司的纤芯直径和内包层直径分别为 20  $\mu\text{m}$  和 400  $\mu\text{m}$ (常用 20/400  $\mu\text{m}$  表示)的光纤上刻写高反射和低反射光纤光栅。高反射光纤光栅反射率为 99.7%,3 dB 谱宽为 4 nm;低反射光纤光栅反射率为 13%,3 dB 谱宽为 1.5 nm;如图 7(b)所示。然后,基于该光栅搭建激光振荡器,将长度为 20 m 的

增益光纤弯曲到直径为 10 cm 的光纤盘上,以抑制模式不稳定效应,采用前后向泵浦的  $(6+1)\times 1$  合束器将 976 nm 稳波长的泵浦光耦合到激光谐振腔中。在前向泵浦功率为 2.5 kW、后向泵浦功率为 3.7 kW 时,最高输出功率为 5 kW。在输出功率为 4.8 kW 时,测试得到光束质量  $M^2$  为 1.3,如图 8(a)所示。不同功率时激光输出光谱如图 8(b)所示,从结果可知,在功率为 5 kW 时,受激拉曼散射部分光谱积分功率占总功率的 2%,功率的进一步提升受限于 SRS。

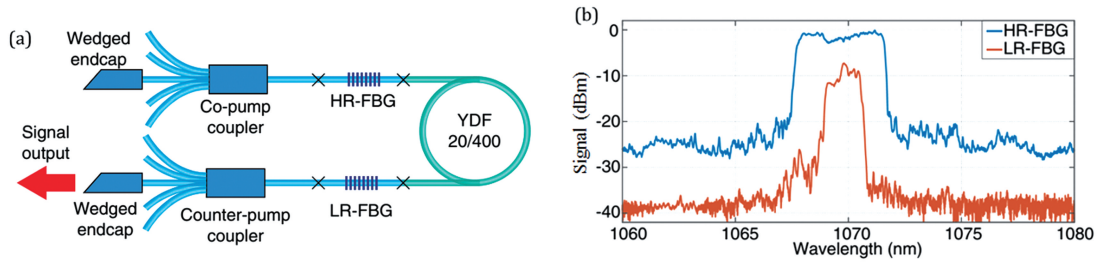


图 7 基于飞秒激光器刻写光栅的 5 kW 全光纤振荡器<sup>[26]</sup>。(a) 实验结构; (b) 光栅光谱特性

Fig. 7 5 kW all-fiber laser oscillator based on fs laser written fiber grating<sup>[26]</sup>. (a) Experimental setup; (b) spectrum of the fiber gratings

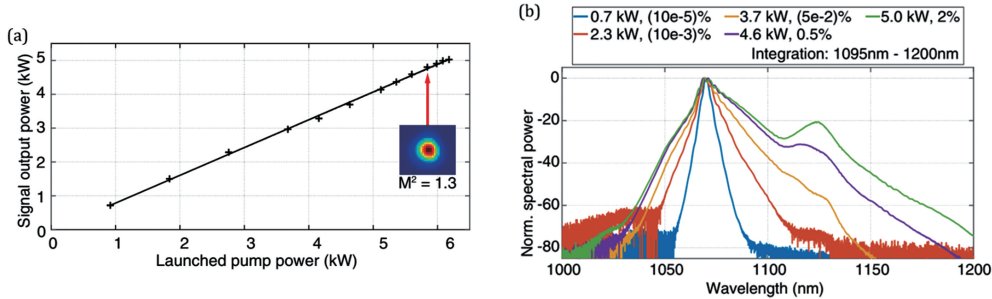


图 8 基于飞秒激光器刻写光栅的 5 kW 全光纤振荡器实验结果<sup>[26]</sup>。(a) 功率与光斑; (b) 输出光谱

Fig. 8 Experimental results of 5 kW all-fiber laser oscillator based on fs laser written fiber grating<sup>[26]</sup>. (a) Power and beam profile; (b) output spectrum

在 2020 年的西部光电子会议上, 日本藤仓公司<sup>[7]</sup>报道了 8 kW 全光纤振荡器, 实验结构如图 9 所示。该振荡器采用双端泵浦结构, 利用多台功率为 300 W、泵浦波长 976 nm 的 LD 对谐振腔进行泵浦。采用有效模场面积为 600  $\mu\text{m}^2$  增益光

纤, 通过优化纤芯设计使得基模光束获得较高的增益, 通过降低输出耦合光栅反射率来提升 SRS 的阈值。整个激光器中, 光纤端帽的传能光纤长度为 3 m, 谐振腔高反射光栅到光纤端帽输出端总的光纤长度为 32 m。

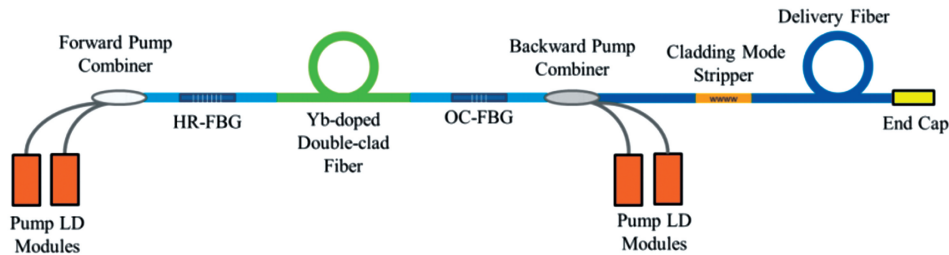


图 9 8 kW 全光纤振荡器实验结构<sup>[7]</sup>

Fig. 9 Experimental setup of the 8 kW all-fiber laser oscillator<sup>[7]</sup>

在泵浦功率为 10 kW 时, 获得输出功率为 8 kW。在最高功率时, 激光器输出光谱如图 10(a) 所示, 激光器的中心波长为 1070 nm 的光谱中拉曼抑制比大于 22 dB。激光器输出光束质量与光斑形态如图 10(b) 所示, 光束质量为 0.5 mm · mrad, 对应的  $M^2$  在 1.5 左右。

### 2.2 工业领域光纤振荡器现状

由于光纤振荡器具有很好的抗反射能力, 在工业领域得到了广泛的应用。表 2 给出了近年来国内

外部分公司的高功率光纤振荡器产品<sup>[28]</sup>。早在 2010 年, 芬兰 CoreLase 公司推出 1 kW 全光纤振荡器产品; 2015 年, 该公司又推出了 2 kW 的光纤振荡器产品<sup>[29]</sup>。2015 年, 深圳创鑫激光股份有限公司 (下文简称创鑫激光) 与国防科技大学合作, 在国内最早推出了 1.5 kW 的全光纤振荡器产品。2017 年以后, 美国 Lumentum, 国内光惠激光科技有限公司 (下文简称 GW 激光)、北京热刺激光技术有限责任公司 (下文简称热刺激光)、上海飞博激光科技有限

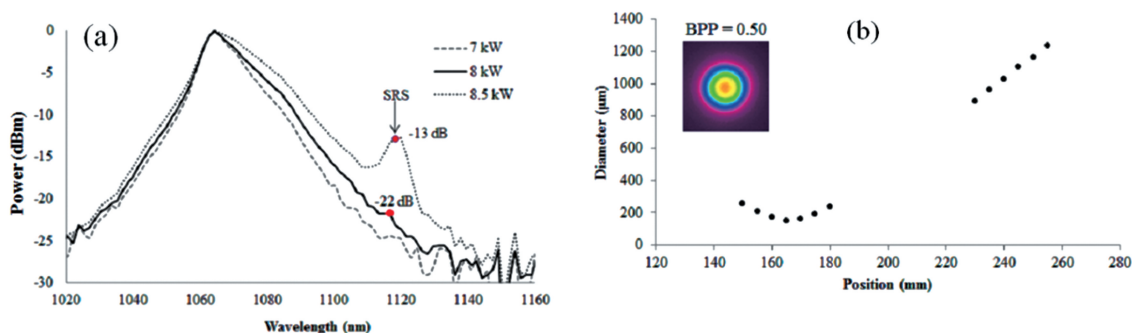


图 10 8 kW 全光纤振荡器实验结果<sup>[7]</sup>。(a)不同功率输出光谱特性;(b) 8 kW 时光束质量特性

Fig. 10 Experimental results of the 8 kW all-fiber laser oscillator<sup>[7]</sup>. (a) Spectrum in different power; (b) beam quality in 8 kW

公司(下文简称飞博激光)、湖南大科激光有限公司(下文简称大科激光)等公司都先后推出了各自高功率的光纤振荡器产品<sup>[30-37]</sup>。尤其是 2019 年以来, Lumentum、GW 激光、热刺激光、飞博激光等公司都实现了输出功率大于 4 kW 的光纤振荡器。其中:GW 激光、热刺激光的 4 kW 光纤振荡器为单模输出,具有很好的光束质量<sup>[35-36]</sup>;飞博激光的 4 kW

光纤振荡器输出光斑为环形光斑,在特殊领域有很好的应用。

对比科研领域的研究发现,高功率光纤振荡器从科研领域到公司产品化,大约需 1~2 年。我们相信,随着光纤器件和工艺的进步,在 2020 年 12 月左右,5 kW 的光纤振荡器也会从实验室走向市场。

表 2 部分厂家光纤振荡器产品

Table 2 Typical products of high power all-fiber laser oscillator in some company

Year	Company	Pump scheme	$\varphi / \mu\text{m}$	Power /kW	Beam quality	Reference
2010	CoreLase, Finland	976 nm LD pump	20	1	$M^2 < 1.6$	Ref. [29]
2015	Maxphotonics, China	—	—	1.5	$M^2 < 1.3$	Ref. [28]
2015	CoreLase, Finland	976 nm LD pump	20	2	$M^2 < 1.6$	Ref. [29]
2018	GW laser, China	976 nm LD pump	20	3	$M^2 < 1.3$	Ref. [36-37]
2018	DK laser, China	—	—	3	$M^2 < 1.3$	Ref. [33]
2018	FeiBo laser, China	LD pump	—	3	Ring laser	Ref. [32]
2019	Lumentum, USA	915 nm LD pump	—	4.2	BPP: 1.5 mm · mrad	Ref. [30]
2019	GW laser	LD pump	—	4	Single mode	Ref. [36]
2019	Reci laser, China	LD pump	—	4	Single mode	Ref. [35]
2019	FeiBo laser, China	LD pump	—	4	Ring laser	Ref. [31]

### 2.3 光纤振荡器与光纤放大器研究现状对比

在光纤激光器领域,基于 MOPA 结构的光纤放大器和基于单谐振腔结构的光纤振荡器是两种可行的方案。表 3 给出了光纤放大器的研究与产业现状,其中  $\beta$  定义为实际光束远场发散角与理想光束远场发散角之比。众所周知,早在 2009 年,美国 IPG 公司就实现了输出功率大于 10 kW 的单模光纤放大器。此后,在科研领域,全光纤放大器得到了蓬勃发展,国内外相关研究机构都先后实现了 5~10 kW 的光纤放大器。其中,国防科技大学、清华大学、中国工程物理研究院、中国科学院上海光学精

密机械研究所等单位都在实验室获得了输出功率大于 10 kW 功率输出<sup>[38-40]</sup>。在国内的 10 kW 光纤放大器中,包括了三种技术方案:第一种是国防科技大学采用的级联泵浦双包层增益光纤的方案;第二种是中国工程物理研究院采用的 LD 泵浦复合增益光纤的方案<sup>[38]</sup>;第三种是中国科学院上海光学精密机械研究所采用的 LD 泵浦双包层增益光纤的方案<sup>[40]</sup>。目前的光纤振荡器中,一般都是采用 LD 泵浦双包层增益光纤的方案。考虑到级联泵浦和泵浦复合增益光纤的潜在优势,光纤振荡器也可以采用级联泵浦和泵浦复合增益光纤来实现。

表 3 光纤放大器研究与产业现状

Table 3 Research and industry status of high power all-fiber laser amplifiers

Year	Institution	Pump scheme	Fiber type	Power	Beam quality	Reference
2009	IPG photonics, USA	Tandem pump	DCF	10	$M^2 \approx 1.3$	Ref. [28]
2015	NUDT, China	LD pump	30/400 $\mu\text{m}$ DCF	4.1	$M^2 \approx 2.1$	Ref. [41]
2016	Universität Jena, Germany	LD pump	23/460 $\mu\text{m}$ DCF	4.3	$M^2 \approx 1.27$	Ref. [42]
2016	Xi'an IOPM, China	LD pump	30/600 $\mu\text{m}$ DCF	4.62	$M^2 \approx 1.67$	Ref. [43]
2016	Huazhong UST, China	LD pump	25/400 $\mu\text{m}$ DCF	3.5	$M^2 \approx 1.28$	Ref. [44]
2016	NUDT, China	Tandem pump	DCF	10	$\beta \approx 1.886$	Ref. [45]
2016	Tsinghua Univ., China	LD pump	DCF	10	—	Ref. [46]
2016	CEAP, China	LD pump	GT Wave	5	$M^2 \approx 2.2$	Ref. [47]
2017	TJU, China	LD pump	30/600 $\mu\text{m}$ DCF	5.01	$M^2 < 1.8$	Ref. [48]
2017	CEAP, China	LD pump	30 $\mu\text{m}$ DCF	6.03	$M^2 < 2.38$	Ref. [49]
2018	CEAP, China	LD pump	30/520 $\mu\text{m}$ PIFL	10.45	—	Ref. [38]
2018	CEAP, China	LD pump	30/900 $\mu\text{m}$ DCF	10.6	$\beta < 2$	Ref. [39]
2019	SIOM, China	LD pump	30/600 $\mu\text{m}$ DCF	10	—	Ref. [40]
2019	Raycuslaser, China	LD pump	—	3	—	Ref. [34,50]
2019	Scyglight, China	LD pump	—	3	Single mode	Ref. [51]
2019	JPT laser, China	LD pump	—	4	Single mode	Ref. [34]
2019	Maxphotonics, China	LD pump	—	5	BPP: 1.8~3.0 mm · mard	Ref. [52]
2019	Raypower Laser, China	—	—	5	Single mode	Ref. [53]
2019	DK laser, China	—	—	5	$M^2 \approx 1.8$	Ref. [33,54]
2020	DK laser, China	—	—	6	$M^2 < 2$	Ref. [55]

表 3 同时给出了国内部分公司的光纤放大器产品情况。自 2019 年以来,武汉锐科光纤激光技术股份有限公司、创鑫激光等基于放大器方案,实现了单模块 3~6 kW 功率输出。其中,创鑫激光的光纤放大器为多模输出,其他公司以单模或近单模为主。对比科研报道的激光器与工业激光器产品可知,在光纤放大器中,从科研领域首先报道高功率输出至商业公司推出相应的商品,需要 3 年甚至更长的时间。这可能有两方面原因:一方面是由于知识产权的限制;另一方面是由于振荡器具有比放大器更好的抗回反光能力,在工业应用领域更受青睐。

对比表 1~3 可以得到以下结论。首先,从发展阶段来看,在光纤激光器发展的前期,光纤放大器发展速度远超光纤振荡器;早在 2009 年,光纤放大器就实现了 10 kW 功率输出;然而,在 2018 年以后,光纤振荡器输出功率才得到了较大的提升。其次,在输出功率方面,光纤振荡器与光纤放大器功率水平已经没有明显区别,尤其是藤仓公司 8 kW 单模光纤振荡器和 Laserline 公司的 17.5 kW 多模光纤

振荡器的报道,使得光纤振荡器输出功率逐步追赶上了光纤放大器。再次,在工业化应用方面,由于抗回反光能力强、控制逻辑简单等优势,光纤振荡器比光纤放大器具有更好的工业应用前景,光纤振荡器从实验室走向产业市场的时间也短于光纤放大器所用的时间。

一直以来,光纤放大器被认为是获得高功率激光输出的有效技术途径。事实上,耶拿大学的论文中报道,在使用相同增益光纤搭建的光纤振荡器和光纤放大器的对比研究中,全光纤振荡器具有比光纤放大器更好的功率提升能力<sup>[8-9]</sup>。如图 11 所示,耶拿大学的实验表明,利用纤芯直径和内包层直径分别为 20  $\mu\text{m}$  和 400  $\mu\text{m}$  的增益光纤搭建的光纤激光器,其模式不稳定阈值小于振荡器的模式不稳定阈值。尽管这个结论不一定有普适性,但是可以看出,光纤振荡器的优势还是相当明显的,随着未来光纤振荡器高功率新型器件的研发和市场需求的推动,振荡器的输出功率很有可能超越光纤放大器的输出功率。



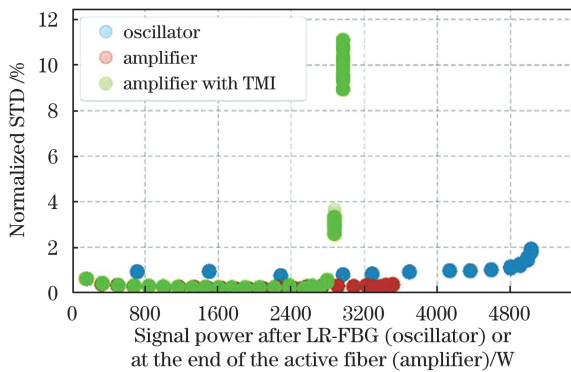


图 11 光纤振荡器和放大器中时域归一化均方差与输出功率的关系<sup>[9]</sup>

Fig. 11 Relationship between output power and time domain normalized STD in fiber amplifier and fiber oscillator<sup>[9]</sup>

### 3 高功率光纤振荡器的发展趋势与功率提升方法

#### 3.1 光纤振荡器发展趋势

##### 3.1.1 高功率输出是永恒的追求

在传统的科研、国防和某些特定的工业应用领域,光纤激光器不仅要有较高的输出功率,还要有较好的光束质量。比如,湖南大科激光有限公司认为,采用高功率高光束质量的单模光纤激光器进行材料焊接,相比采用多模光纤激光器,具有更大的熔深、更平整细腻的焊缝、更致密的内部结构等<sup>[33]</sup>。因此,继续提升激光器的输出功率和光束质量,是光纤振荡器发展永恒不变的追求。

在一般工业应用领域中,多模高功率光纤振荡器也可以替代传统的基于多路单模激光功率合束的多模激光器,如深圳市创鑫激光的 5 kW 多模光纤激光器<sup>[52]</sup>、Laserline 的 17.5 kW 多模光纤振荡器,他们不仅能够降低成本,还可以提高系统的稳定性。

##### 3.1.2 功率提升与效率提升并重

在实际应用中,光纤振荡器的效率同样受到广泛的重视。由于掺镱光纤在 915 nm 附近的吸收波段较宽,激光输出功率不易受到工作环境温度变化的影响,因此,在较早的工业产品中,为了保证激光器的稳定性,一般采用 915 nm 波段的 LD 作为光纤激光器的泵浦源。但是由于 LD 的量子效率较低,基于 915 nm 泵浦源的掺镱光纤激光器的电光效率较低。为了降低运行成本,提高激光器的电光效率,最近几年工业领域逐步开始采用 976 nm 的 LD 作为泵浦源。分析认为,利用 976 nm 的 LD 作为泵浦源时,可以使用更短的光纤,激光器的电光效率可以

提升至 33.3% 以上,因此比 915 nm 具有更低的运行成本<sup>[56]</sup>。典型的产品就是 GW 公司的 3 kW 光纤振荡器,他们采用 976 nm 非稳波长 LD 作为泵浦源,通过优化热管理设计,可以提高激光器的稳定性,使得激光器电光效率达到了 42%<sup>[37]</sup>。但是,由于 976 nm 泵浦时增益光纤的单位长度热负荷比 915 nm 泵浦时增益光纤的单位长度热负荷高,976 nm 泵浦光纤激光器的模式不稳定阈值比同等情况下 915 nm 泵浦光纤激光器的模式不稳定阈值低<sup>[57]</sup>,因此,如果需要在保证激光效率的同时继续提升输出功率,还需要进一步优化激光器的泵浦波长。

##### 3.1.3 面向实际应用的特种形态激光光斑

在传统的科研和工业领域,追求高亮度的单模激光输出是终极目标。但是,随着应用领域的扩展,尤其是对材料切割速度和光束质量要求的提高,非单模环形光斑等特种形态的激光得到了越来越广泛的应用。2018 年之前,国外 IPG、Coherent、NLIGHT 等公司为了提升材料切割质量,采用多模块激光合束方式实现环形光斑输出<sup>[58-60]</sup>,其中最为典型的产品是 NLIGHT 公司的 Corona 系列可变光斑的光纤激光器<sup>[59]</sup>。2018 年前后,飞博激光基于光纤振荡器推出了 3 kW 的环形光斑激光器产品,该激光器的典型光斑形态如图 12(a) 所示<sup>[61]</sup>。该激光器在切割板材范围、速度和质量的效果基本与普通 4 kW 激光器的效果相同<sup>[61]</sup>。2019 年,飞博激光又推出了基于光纤振荡器的 4 kW 环形光斑激光器产品。国防科技大学在多年的高功率振荡器的研制的基础上,在 2019 年也实现了输出功率大于 5 kW 的高功率环形激光器,在输出功率为 5.08 kW 时,典型输出光斑如图 12(b) 所示。

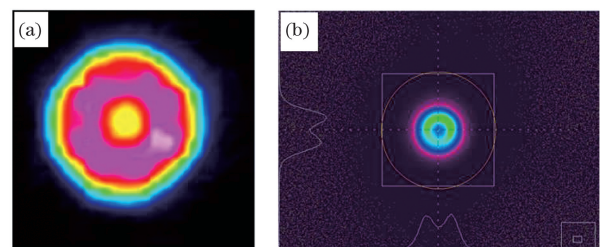
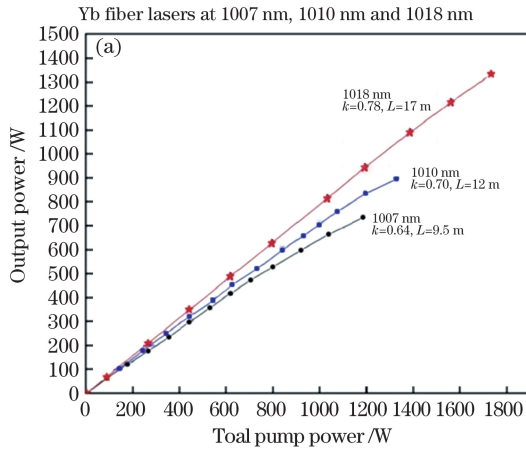


图 12 基于光纤振荡器的环形光斑激光器光斑形态。(a) 飞博激光, 3 kW 环形激光光斑形态<sup>[61]</sup>; (b) 国防科技大学, 5 kW 环形激光光斑形态

Fig. 12 Beam profile of ring laser employing fiber laser oscillator. (a) Beam profile of 3 kW ring laser from Shanghai FeiBo laser Technologies Co. Led.<sup>[61]</sup>; (b) beam profile of 5 kW ring laser from NUDT

### 3.1.4 激光波段向短波和长波扩展

一般工业领域的光纤振荡器,输出波段在 1060~1080 nm,随着非线性频率变换、级联泵浦等应用领域的发展,光纤振荡器输出波长同时向短波(<1040 nm)和长波(>1100 nm)发展<sup>[62-63]</sup>。以短波为例,2020 年,美国 IPG 公司利用光纤振荡器在波长为 1007,1010,1018,1030 nm 上分别实现了 0.75,0.90,1.33,1.40 kW 的功率输出,输出激光



光束质量都小于 1.1,这是目前该波段最高功率的系列光纤振荡器。图 13(a)给出了 1007,1010,1018 nm 不同波长短波激光器的输出功率曲线,可以看出,随着波长的增加,输出功率和斜率效率  $k$  也增加,图中  $L$  表示光纤长度。图 13(b)给出了 1018 nm 激光器在不同功率水平的光谱曲线,结果表明,1018 nm 在最高功率时,泵浦抑制比大于 50 dB,拉曼抑制比大于 40 dB。

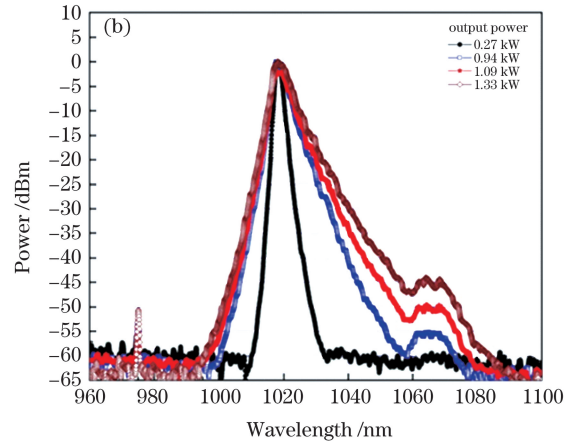


图 13 短波光纤激光器实验结果。(a)不同波长输出功率;(b)1018 nm 激光光谱

Fig. 13 Experiment results of fiber laser in short wavelength. (a) Output power of different wavelengths; (b) spectrum of 1018 nm laser

## 3.2 光纤振荡器功率进一步提升的关键技术

当前,全光纤振荡器输出功率已经达到 8 kW,但是由于受到受激拉曼散射、模式不稳定等效应的限制,光纤振荡器功率提升遭遇一定的技术瓶颈。为了进一步提升光纤振荡器输出功率,下面首先对未来可以提升光纤振荡器功率的关键技术进行分析,然后在此基础上给出 10 kW 级近单模全光纤振荡器的技术方案。

### 3.2.1 高效率、低损耗泵浦合束器是获得高功率高光束质量的前提

在光纤振荡器中,要获得足够高的输出功率,首先要能够注入足够高的泵浦功率。除了提高泵浦源的亮度外,研制高功率、高效率、低损耗的双向泵浦合束器是提升光纤振荡器输出功率的前提。

在端面泵浦合束器中,一方面要降低信号损耗,另一方面要增加泵浦注入功率。为了降低信号损耗,可以采用弱拉锥或纤芯不拉锥的工艺<sup>[64]</sup>,确保在合束器制作过程中传输激光的信号光纤的纤芯直径沿长度方向不变。这样,在端面泵浦的双向合束器中,信号光束通过合束器时不存在模式劣化和模式损耗,在提高纤芯功率承受能力的同时,可以避免由于模式劣化导致的模式不稳定效应。为了增加泵浦注入功率,可以增大信号光纤的内包层直径,从而

增加泵浦注入臂的数量。

另一种能够确保信号光不存在损耗的合束器是侧边泵浦合束器。侧边泵浦合束器是通过在泵浦光纤的内包层粘接泵浦臂而成的,制作过程不但不会损坏光纤纤芯,而且还省去了端泵合束器中传输光纤与合束器的熔接。但是,侧边粘接方式,使得在一个位置注入泵浦臂的数量有限,为了获得更多的泵浦注入臂和更高的功率泵浦能力,可以从以下两个方面着手:一是增加信号光纤的内包层直径,增大单个位置处泵浦注入臂纤芯直径;二是在信号光纤不同位置级联设置不同的泵浦注入光纤,以增加总的泵浦注入光纤数量。

目前,国内端面泵浦合束器的工艺比较成熟,一般的 $(6+1)\times 1$ 合束器具备承受总泵浦功率为 5 kW、信号功率为 5 kW 的能力。在确保亮度守恒的前提下,要进一步提升泵浦注入功率,需要通过增加合束器信号臂内包层来提升泵浦功率,比如采用包层为 600  $\mu\text{m}$  的信号光纤,可以研制出单臂最大承受功率为 0.5 kW 的 $(18+1)\times 1$ 合束器。侧边泵浦合束器的工艺难度较大,对应的高功率商业产品很少。国防科技大学 2019 年研制了单臂注入 1000 W 的 $(2+1)\times 1$ 侧边泵浦合束器,基于该合束

器实现了输出功率为 2 kW 的光纤振荡器。考虑到侧边泵浦合束器不存在信号光损耗的天然优势,随着工艺的进步,侧边泵浦合束器未来有可能会成为高功率光纤振荡器合束器的重要选择。

### 3.2.2 高效率、低吸收的 LD 是提高激光器输出功率和效率的关键

采用 976 nm 的泵浦源替代 915 nm 的泵浦源

可以提高光纤激光器的输出效率,但是如果要进一步提升激光器输出功率,976 nm 泵浦源不一定是最佳选择。众所周知,在光纤振荡器中,影响激光输出功率最主要的因素是模式不稳定效应和受激拉曼散射效应。其中,模式不稳定效应与增益光纤内部的产热有关,在光纤内部,热源可以描述为<sup>[65]</sup>

$$Q(r, z) = N_0(r, z) \left( \frac{\nu_p - \nu_s}{\nu_p} \right) [\sigma_{ap} - (\sigma_{ep} + \sigma_{sp}) n_u(r, z, t)] \frac{P_p(r, z)}{A_p} + \alpha_s(r) I_s(r, z), \quad (1)$$

式中:  $Q$  为热量;  $N_0$  为掺杂粒子浓度;  $\nu_p$  和  $\nu_s$  为泵浦光和信号光频率;  $\sigma_{ap}$  和  $\sigma_{ep}$  为泵浦光吸收截面和发射截面;  $n_u$  为上能级粒子数比例;  $P_p(r, z)$  为泵浦光功率;  $A_p$  为传输泵浦光的内包层面积;  $\alpha_s(r)$  为

信号光吸收损耗系数;  $I_s(r, z)$  为信号光强。

考虑  $\frac{\nu_p - \nu_s}{\nu_p} = \frac{\lambda_s - \lambda_p}{\lambda_s}$ ,  $\sigma_{ap}(\lambda) = \frac{\beta_p(\lambda)}{N_0 k_0 \Gamma_p}$ , 热量为

$$Q(r, z) = \left( \frac{\lambda_s - \lambda_p}{\lambda_s} \right) \left[ \frac{\beta_p(\lambda)}{k_0 \Gamma_p} - (\sigma_{ep} + \sigma_{sp}) N_2(r, z, t) \right] \frac{P_p(r, z)}{A_p} + \alpha_s(r) I_s(r, z), \quad (2)$$

式中:  $\lambda_s$  和  $\lambda_p$  为泵浦光和信号光波长;  $\beta_p(\lambda)$  为泵浦光的吸收系数;  $N_2$  为上能级粒子数;  $k_0$  为常数 4.34;  $\Gamma_p$  为泵浦填充因子。

从(2)式可知,光纤振荡器中的热量不仅与量子亏损有关,还与泵浦光的吸收系数  $\beta_p(\lambda)$  有关。为了降低热量,一方面可以提高量子效率,另一方面可以降低泵浦吸收系数。在光纤振荡器的实验中,915 nm 泵浦的激光器比 976 nm 泵浦的激光器具有更高的模式不稳定阈值<sup>[57]</sup>,这是由于增益光纤在 915 nm 处的吸收系数只有 976 nm 处吸收系数的 1/3 左右,因此,976 nm 泵浦源并不是提高光纤振荡器输出功率的最优方案。为了同时提高

光纤激光器的效率和功率,要综合考虑模式不稳定效应、受激拉曼散射效应,需要优选一个可以平衡模式不稳定效应和受激拉曼散射效应的泵浦源。本课题组通过探索研究,初步找到一类合适的泵浦源,能够在保证效率不变的情况下,将 976 nm 稳波长 LD 泵浦光纤振荡器的模式不稳定阈值提升至 1 倍左右,典型的实验结果如图 14 所示。在同一个基于国产增益光纤的振荡器中,使用 976 nm 稳波长 LD 泵浦时,模式不稳定阈值为 730 W,如图 14(a)所示;使用优化的泵浦源进行泵浦时,激光器的模式不稳定阈值为 1500 W,如图 14(b)所示。

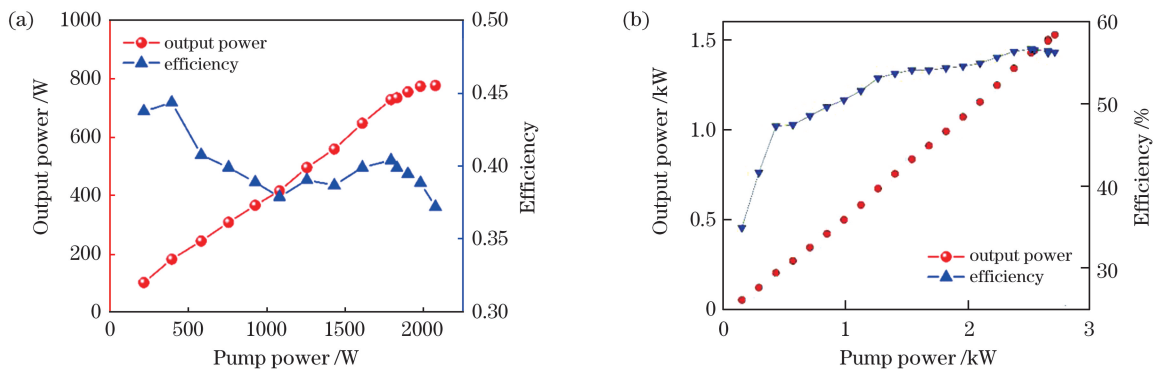


图 14 优化泵浦波长前后光纤激光器实验结果。(a) 976 nm 波长泵浦时输出激光功率和效率;(b)优化泵浦波长泵浦时输出激光功率和效率

Fig. 14 Experiment results of fiber laser before and after optimizing of pump wavelength. (a) Output power and efficiency at 976 nm wavelength; (b) output power and efficiency at optimized pump wavelength



### 3.2.3 新型增益光纤是平衡非线性和模式不稳定效应的有效技术手段

在影响光纤激光器输出功率和光束质量的诸多因素中,增益光纤是尤为关键的一个。增益光纤的模场面积,决定了支持模式的数量,影响模式不稳定的阈值,从而影响激光器输出功率和光束质量;增益光纤吸收系数,决定了激光器中使用增益光纤的长度,影响受激拉曼散射强度,从而影响激光器输出功率。为了平衡高功率光纤激光器中的非线性效应和模式不稳定阈值,国内外研究单位提出了多种体制的光纤,包括传统的低 NA 光纤、部分掺杂光纤、新型的 3C 光纤<sup>[66]</sup>、全固态光子带隙光纤<sup>[67]</sup>等。

低 NA 光纤可以在增加纤芯直径的同时保持近单模输出,耶拿大学的 Beier 等<sup>[68]</sup>利用低 NA 光纤,有效抑制了模式不稳定效应,实现了 4.4 kW 近单模光纤放大器。但是,过低的 NA 使其光纤损耗对弯曲过于敏感,降低损耗需要使用较大的缠绕半径,比如在耶拿大学的实验中,光纤弯曲直径达到了 1.1 m,这在一定程度上抵消了光纤激光器结构紧凑的优点。因此,一般光纤的 NA 以不小于 0.045 为宜。部分掺杂光纤能够在一定程度上降低高阶模的增益、确保基模光束得到有效放大。华中科技大学利用掺杂直径为 23  $\mu\text{m}$ 、纤芯高折射率直径为 33  $\mu\text{m}$  的部分掺杂光纤,将传统非部分掺杂光纤放大器的模式不稳定阈值提升到 1.74 倍<sup>[69]</sup>。3C 光纤是近年来研发的一种新型光纤,2018 年, nLIGHT 公司的研究人员基于 3C 光纤实现了 2.6 kW 的窄线宽激光输出,实验表明,采用 30 cm 弯曲的 3C 光纤的模式不稳定阈值比使用弯曲直径为 10 cm 的 20/400 双包层光纤的模式不稳定阈值更高,同时,该光纤的 SBS 增益系数也明显低于普通双包层光纤,这说明该光纤可以较好地提升非线性

和模式不稳定阈值。全固态光子带隙光纤可以通过结构设计实现不同的截止波长,故也被认为是一种可以有效提升受激拉曼散射阈值的光纤,日本藤仓公司指出,在后续大于 8 kW 的光纤振荡器中,他们可能会采用全固态光子带隙光纤作为增益光纤<sup>[7]</sup>。

除了上述增益光纤以外,本课题组<sup>[70-71]</sup>提出一种纤芯直径沿着光纤长度方向渐变的增益光纤,该类光纤用于光纤振荡器中时,能够较好地平衡非线性效应和模式不稳定效应。其中一类纤芯直径渐变的增益光纤如图 15(a)、(b)所示,因纤芯直径两端小、中间大,称之为纺锤形增益光纤。图 15(a)的光纤纤芯与包层比例沿光纤长度方向变化,在实际光纤拉制前需要对不同位置的预制棒进行打磨来控制纤芯直径;图 15(b)的光纤纤芯与包层比例沿光纤长度方向不变,可以利用常规的预制棒,在光纤拉制过程中通过控制拉丝速度来实现不同的纤芯直径。利用该类光纤搭建光纤振荡器时,对于小芯径区域,通过设计为严格单模或少模光纤,结合弯曲选模的方式,可以有效保证激光的单模特性、提高模式不稳定阈值;对于大纤芯区域,通过提高有效模场面积,可以提高受激拉曼散射阈值。这样,可以有效平衡非线性效应和模式不稳定效应,在提高输出功率的同时,获得高光束质量的激光输出。

基于该思路,本课题组设计并联合国内合作单位研制了如图 15(b)所示的纺锤形增益光纤。该光纤中间的大端纤芯直径为 30  $\mu\text{m}$ 、长度为 6 m,左右两个小段纤芯直径都为 20  $\mu\text{m}$ 、长度都为 3.5 m。利用该光纤,搭建了 976 nm 后向泵浦的光纤振荡器,获得了功率为 1.836 kW、光光效率为 83.5% 的激光输出,如图 16(a)所示。在不同功率下,激光器输出光束质量  $M^2$  都在 1.6 左右,如图 16(b)所示。实验初步验证了该类光纤在功率提升和光束质量保持方面的可行性。



图 15 纺锤形增益光纤。(a)纤芯包层比变化;(b)纤芯包层比固定不变

Fig. 15 Spindly gain fiber. (a) With variable core-to-cladding diameter ratio; (b) with invariable core-to-cladding diameter ratio

### 3.2.4 特种光纤光栅是获得可控光束质量的有效技术方法

在影响模式不稳定阈值的诸多方法中,降低高阶模反馈也是一种有效的方法。一般认为,普通光纤光栅中高阶模式和低阶模式的反射率不同, Mohammed 等<sup>[72]</sup>报道的光栅中  $LP_{11}$  模式的反

射率比  $LP_{01}$  模式的反射率低 3 dB<sup>[72]</sup>。假设通过特种工艺刻写光纤光栅,使得光纤光栅对于基模高反射、对于高阶模高透射,那么,利用该光纤光栅搭建光纤振荡器时,可以通过谐振腔的反射特性优先支持基模起振来滤除高阶模式、提高模式不稳定阈值。此外,对于工业领域使用的环形光



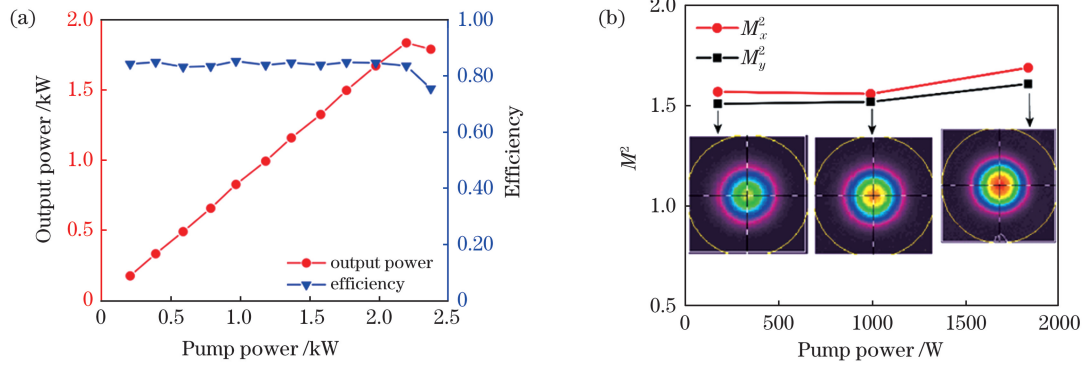


图 16 基于纤芯包层比固定不变纺锤形光纤振荡器的实验结果。(a)输出功率和效率;(b)不同功率的光束质量

Fig. 16 Experimental results of laser oscillator employing spindly gain fiber laser with constant core-to-cladding diameter ratio. (a) Output power and efficiency; (b) beam quality in different power

束等特种光束,可以通过在光纤包层刻写对  $LP_{11o}$  和  $LP_{11e}$  等阶模式对应波段全反射的光栅,在纤芯中不刻写光纤光栅,来搭建光纤振荡器,提升输出功率。基于该思路,本课题组利用 SeeFiberLaser 光纤激光仿真软件<sup>[73]</sup>搭建光纤振荡器,设高反和

低反光栅都仅支持  $LP_{11o}$  和  $LP_{21e}$  模式,仿真得出光纤振荡器的输出光斑如图 17 所示。仿真结果表明,如果利用仅支持单一高阶模式的光纤光栅,可以在光纤振荡器输出端获得所需要的模式输出。

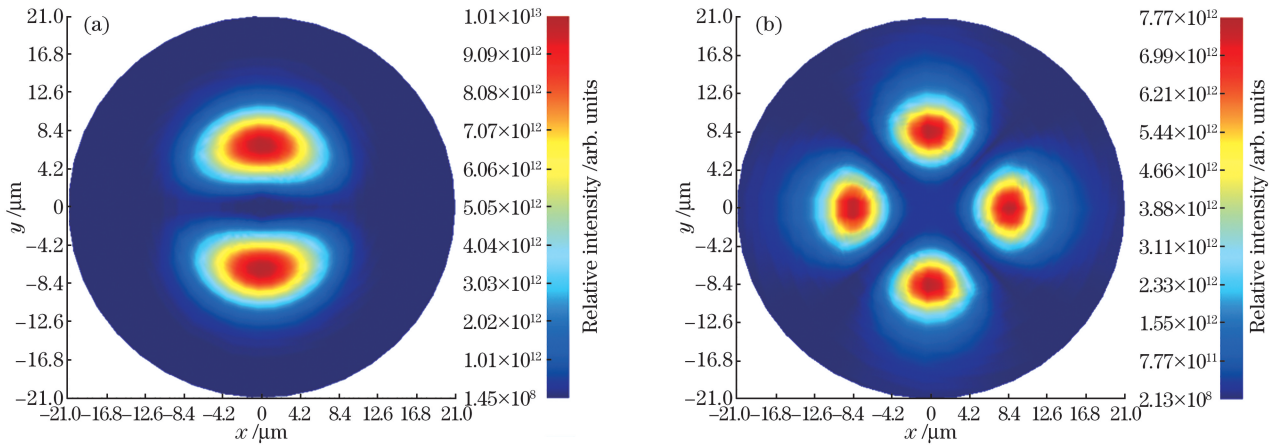


图 17 基于高阶模反射光纤光栅振荡器的输出激光光斑形态。(a) $LP_{11o}$  模;(b) $LP_{21e}$  模

Fig. 17 Output laser beam patterns of laser oscillator based on high-order mode reflected fiber grating. (a)  $LP_{11o}$  mode; (b)  $LP_{21e}$  mode

### 3.2.5 10 kW 级近单模高功率振荡器的技术方案

综上所述,从国内外知识产权和我国现有技术水平出发,本课题组给出一种较易实现的 10 kW 级高功率光纤振荡器的技术方案,如图 18 所示,即采用 LD 双端泵浦方案,增益光纤置于前后向泵浦信号合束器(PSC)之间,光纤光栅置于合束器的信号输入臂上。基于该方案,通过优化前后向泵浦功率比例可以提升受激拉曼散射和模式不稳定阈值。

在该方案中,研究的重点是使用特种新型器件来提高光纤振荡器的受激拉曼散射和模式不稳定阈值,主要包括:

- 1) 采用高亮度、增益光纤较低吸收波段的 LD,

在提高激光效率的同时提升光纤振荡器的模式不稳定阈值。

- 2) 采用对信号激光无模式劣化和模式损耗的端面泵浦或侧边泵浦合束器,在提升泵浦注入能力的同时提高光纤振荡器的模式不稳定阈值。

- 3) 采用低 NA 部分掺杂的纺锤形光纤(FYDF)或低 NA 部分掺杂且纤芯包层比较小的均匀光纤(SC2CR-YDF)。这两类光纤中,除了考虑纤芯直径、纤芯包层比以外,同时考虑低 NA 和部分掺杂设计。利用纺锤形增益光纤,可以均衡受激拉曼散射和模式不稳定,考虑低 NA 和部分掺杂设计,可以进一步提升模式不稳定的阈值;利用纤芯包层比较小

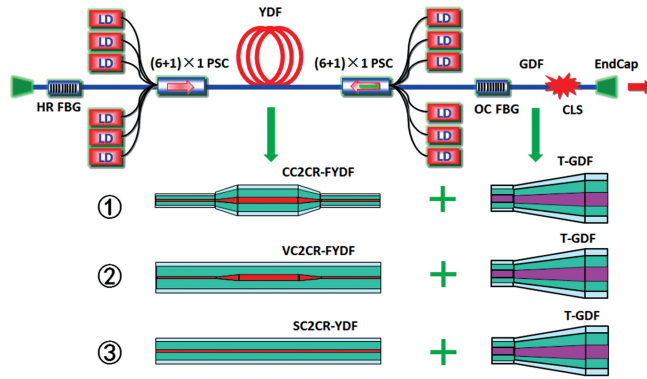


图 18 10 kW 级高功率光纤振荡器技术方案

Fig. 18 Technical proposal of 10 kW level high power fiber laser oscillator

的均匀光纤,可以通过降低泵浦吸收系数来提升激光器模式不稳定阈值,在此基础上同时考虑低 NA 和部分掺杂设计,同样可以进一步提升模式不稳定的阈值。

4) 采用锥形光纤制作光纤端帽<sup>[74]</sup>,在提升受激拉曼散射阈值的同时保证激光的光束质量,避免了普通大模场均匀尺寸光纤难以兼顾非线性和光束质量的问题。

此外,在实际激光器的研发过程中,光纤光栅的纤芯需要与前后向合束器纤芯相匹配,如果工艺可行,可以采用对高阶模透射、对基模反射的光纤光栅。

综合上述器件的优势,可以从不同角度来抑制受激拉曼散射和模式不稳定效应,有望将近单模光纤振荡器输出功率提升至 10 kW 乃至以上量级。

## 4 结 论

掺镱光纤振荡器是光纤激光器实现高功率输出的有效技术方案之一,近年来,国内外诸多研究机构开展了高功率光纤振荡器研究,并且使其在工业市场上得到了广泛的应用。目前,全光纤振荡器已经实现了 8 kW 近单模激光输出,空间结构振荡器已经实现了 17.5 kW 的多模激光输出。在工业领域,国内相关企业也已经推出了 4 kW 近单模光纤振荡器。与光纤放大器相比,光纤振荡器在特定的情况下具有更高的模式不稳定阈值,具备输出更高功率的潜力。随着应用领域的扩展,对光纤振荡器的需求将越来越多,对光纤振荡器输出功率、光束质量的要求也会越来越高。然而,基于传统技术方案的近单模光纤振荡器,在功率提升过程中遇到了较为显著的技术瓶颈。综合采用增益光纤较低吸收波段的特种波长 LD、特种泵浦信号合束器、纤芯直径渐变的增益光纤、锥形光纤端帽等新器件和新技术,可以

进一步提升非线性效应和模式不稳定效应的阈值,有望实现输出功率大于 10 kW 的近单模光纤振荡器。目前,国防科技大学已经初步掌握了大部分特种器件的工艺,在突破各个器件工艺的基础上,实现输出功率大于 10 kW 的近单模光纤振荡器指日可待。

## 参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] Shima K, Ikoma S, Uchiyama K, et al. 5-kW single stage all-fiber Yb-doped single-mode fiber laser for materials processing[J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10512: 105120C.
- [5] Takubo Y, Ikoma S, Uchiyama K, et al. Dynamic analysis of materials processing with 5-kW single-mode fiber laser [J]. Proceedings of SPIE, 2019, 10897: 1089712.
- [6] Ackermann M, Rehmann G, Lange R, et al. Extraction of more than 10 kW from a single ytterbium-doped MM-fiber[J]. Proceedings of SPIE, 2019, 10897: 1089717.
- [7] Wang Y, Kitahara R, Kiyoyama W, et al. 8-kW single-stage all-fiber Yb-doped fiber laser with a BPP of 0.50 mm · mrad[J]. Proceedings of SPIE, 2020, 11260: 1126022.
- [8] Möller F, Krämer R G, Matzdorf C, et al. Multi-kW performance analysis of Yb-doped monolithic single-mode amplifier and oscillator setup [J]. Proceedings

- of SPIE, 2019, 10897: 108970D.
- [9] Möller F, Krämer R G, Matzdorf C, et al. Comparison between bidirectional pumped Yb-doped all-fiber single-mode amplifier and oscillator setup up to a power level of 5 kW [C]//Advanced Solid State Lasers, Boston, Massachusetts United States. Washington, D. C.: Optical Society of America, 2018, AM2A: AM2A.3.
- [10] Xiao Y, Brunet F, Kanskar M, et al. 1-kilowatt CW all-fiber laser oscillator pumped with wavelength-beam-combined diode stacks [J]. Optics Express, 2012, 20(3): 3296-3301.
- [11] Khitrov V, Minelly J D, Tumminelli R, et al. 3 kW single-mode direct diode-pumped fiber laser [J]. Proceedings of SPIE, 2014, 8961: 89610V.
- [12] Yu H, Wang X, Tao R, et al. 1.5 kW, near-diffraction-limited, high-efficiency, single-end-pumped all-fiber-integrated laser oscillator [J]. Applied Optics, 2014, 53(34): 8055-8059.
- [13] 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 单纤单振单模连续全光纤激光器 [J]. 光电子·激光, 2015, 26(4): 662-666.
- [14] 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, 2015, 9728: 972805.
- [15] Yang B, Zhang H, 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.
- [16] Xu Y, Fang Q, Xie Z X, et al. Single fiber quasi-single mode 2 kW all-fiber laser oscillator based on single-end 915 nm semiconductor laser forward-pumping [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(4): 0401003.  
许阳, 房强, 谢兆鑫, 等. 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 [J]. 中国激光, 2018, 45(4): 0401003.
- [17] Yang B L, Zhang H W, Shi C, et al. 3.05 kW monolithic fiber laser oscillator with simultaneous optimizations of stimulated Raman scattering and transverse mode instability [J]. Journal of Optics, 2018, 20(2): 025802.
- [18] Yang B L, Zhang H W, Shi C, et al. Experimental study of the transverse mode instability in a 3 kW-level bidirectional-pumped all-fiber laser oscillator [C]//Advanced Solid State Lasers, Nagoya, Aichi. Washington, D. C.: Optical Society of America, 2017, JM5A: JM5A.15.
- [19] Zhang F, Zheng W Y, Shi P Y, et al. 2-kW single-mode fiber laser employing bidirectional-pump scheme [J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10619: 106190G.
- [20] 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.
- [21] Yang B L, Zhang H W, Ye Q, et al. 4.05 kW monolithic fiber laser oscillator based on home-made large mode area fiber Bragg gratings [J]. Chinese Optics Letters, 2018, 16(3): 031407.
- [22] Chen H, Cao J Q, Huang Z H, et al. 4-kilowatt all-fiber distributed side-pumped oscillators [C]//Laser Congress 2018 (ASSL), Boston, Massachusetts. Washington, D. C.: Optical Society of America, 2018, AM6A: AM6A.18.
- [23] Zhang H W, Yang B L, Wang X L, et al. All fiber laser oscillator with output power of 5.2 kW employing China made FBG [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(4): 0415002.  
张汉伟, 杨保来, 王小林, 等. 基于国产光栅的全光纤振荡器输出功率突破 5.2 kW [J]. 中国激光, 2018, 45(4): 0415002.
- [24] Yang B L, Wang X L, Ye Y, et al. The output power of the all fiber laser oscillator break through to 6 kW [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(1): 0116001.  
杨保来, 王小林, 叶云, 等. 全光纤激光振荡器输出功率突破 6 kW [J]. 中国激光, 2020, 47(1): 0116001.
- [25] Klein S, Giesberts M, Baer P, et al. Fiber Bragg gratings in active multimode XLMA fibers for high-power kW-class fiber lasers [J]. Proceedings of SPIE, 2020, 11260: 1126025.
- [26] Krämer R G, Möller F, Matzdorf C, et al. Extremely robust femtosecond written fiber Bragg gratings for an ytterbium-doped fiber oscillator with 5 kW output power [J]. Optics Letters, 2020, 45(6): 1447-1450.
- [27] Jeong Y, Sahu J K, Payne D N, et al. Ytterbium-doped large-core fibre laser with 1 kW of continuous-wave output power [J]//Electronics Letters, 2004, 40(8): 470-472.
- [28] Maxphotonics. MFSC 700 W-1500 W Single mode CW fiber laser [EB/OL]. [2020-06-12]. <http://www.maxphotonics.com/Products/MFSC700W->

- 1500Wdanmol.html. 2016.
- 创鑫激光. MFSC 700 W-1500 W 单模连续光纤激光器 [EB/OL]. [2020-06-12]. <http://www.maxphotonics.com/Products/MFSC700W-1500Wdanmol.html>. 2016.
- [29] Highlight FL compact high-power single-and multi-mode fiber lasers [EB/OL]. [https://www.coherent.com/assets/pdf/COHR\\_HighLightFL\\_Compact\\_DS\\_0121.pdf](https://www.coherent.com/assets/pdf/COHR_HighLightFL_Compact_DS_0121.pdf).
- [30] Lumentum Operations LLC. CORELIGHT series fiber laser modules YLE 3005/4005 [EB/OL]. [2020-06-12]. <https://resource.lumentum.com/s3fs-public/technical-library-items/corelight-ds-cl-ae.pdf>. 2020.
- [31] Feibolaser. Batch on new lead hot, FeiBo laser have well packaged in China International Industry Fair [EB/OL]. [2020-06-12]. [http://www.feibolaser.com/news\\_view.aspx?TypeId=139&Id=424&Fid=t2:139:2](http://www.feibolaser.com/news_view.aspx?TypeId=139&Id=424&Fid=t2:139:2). 2019.
- 飞博激光. 批量上新引热议, 飞博激光完美收官工博会 [EB/OL]. [2020-06-12]. [http://www.feibolaser.com/news\\_view.aspx?TypeId=139&Id=424&Fid=t2:139:2](http://www.feibolaser.com/news_view.aspx?TypeId=139&Id=424&Fid=t2:139:2). 2019.
- [32] Feibolaser. Introduction to ring spot laser and 3000 W single-cavity laser [EB/OL]. [2020-06-12]. [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). 2019.
- 飞博激光. 环形光斑与单腔 3000 W 激光器介绍 [EB/OL]. [2020-06-12]. [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). 2019.
- [33] DK Laser. The advantages in the application of welding employing high power single-mode/quasi-single-mode fiber laser [EB/OL]. [2020-06-12]. <https://laser.ofweek.com/2020-02/ART-240002-8300-30426944.html>. 2020.
- 大科激光. 高功率单模/准单模光纤激光器在焊接应用中的优势 [EB/OL]. [2020-06-12]. <https://laser.ofweek.com/2020-02/ART-240002-8300-30426944.html>. 2020.
- [34] Ofweek laser net. New products of fiber laser are all in China International Industry Fair: what is the future development trend? [EB/OL]. [2020-06-12]. <https://laser.ofweek.com/2019-09/ART-240002-8500-30408054.html>. 2019.
- Ofweek 激光网. 光纤激光器新品齐聚工博会 未来发展趋势向何处? [EB/OL]. [2020-06-12]. <https://laser.ofweek.com/2019-09/ART-240002-8500-30408054.html>. 2019.
- [35] Industry sourcing. MWCS 2019 | Reci laser: pay close attention to the fusion market [EB/OL]. [2020-06-12]. <http://www.industrysourcing.cn/article/366644>. 2019.
- 荣格. MWCS 2019 | 热刺激光: 重点关注焊接市场 [EB/OL]. [2020-06-12]. <http://www.industrysourcing.cn/article/366644>. 2019.
- [36] Gtlasertech. GW strong login in laser world of photonics, leading the new trend of the single-cavity single-mode fiber laser [EB/OL]. [2020-06-12]. [https://mp.weixin.qq.com/s/qOpLo9\\_dEyLC\\_2XD26omtg](https://mp.weixin.qq.com/s/qOpLo9_dEyLC_2XD26omtg). 2019.
- Gtlasertech. GW 强势登陆光博会, 引领单腔单模光纤激光器新潮流 [EB/OL]. [2020-06-12]. [https://mp.weixin.qq.com/s/qOpLo9\\_dEyLC\\_2XD26omtg](https://mp.weixin.qq.com/s/qOpLo9_dEyLC_2XD26omtg). 2019.
- [37] Tech GW Laser. 3 kW middle power CW fiber laser [EB/OL]. [2020-06-12]. <http://www.gwlasertech.com/portfolio-item/low-power-fiber-lasers/>. 2019.
- Tech GW Laser. 3 kW 中功率连续光纤激光器 [EB/OL]. [2020-06-12]. <http://www.gwlasertech.com/portfolio-item/low-power-fiber-lasers/>. 2019.
- [38] 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.
- [39] Lin H H, Tang X, Li C Y, et al. National single-fiber laser system obtained 106 kW laser output [J]. Chinese Journal of Lasers. 2018, 45(3): 0315001.
- 林宏兔, 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.
- [40] 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.
- [41] Wang X L, Zhang H W, Tao R M, et al. Laser diode pumped 4.1 kW all-fiber laser with master oscillator power amplification configuration [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(5): 0502002.
- 王小林, 张汉伟, 陶汝茂, 等. LD 抽运主振荡功率放大结构 4.1 kW 全光纤激光器 [J]. 中国激光, 2016, 43(5): 0502002.
- [42] Beier F, Hupel C, Kuhn S, et al. Single mode 4.3 kW output power from a diode-pumped Yb-doped fiber amplifier [J]. Optics Express, 2017, 25(13): 14892-14899.
- [43] Zheng J K, Zhao W, Zhao B Y, et al. 462 kW excellent beam quality laser output with a low-loss Yb/Ce co-doped fiber fabricated by chelate gas phase



- deposition technique[J]. *Optical Materials Express*, 2017, 7(4): 1259-1266.
- [44] 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.
- [45] Fan D Y. Development overview of high power laser in China[R]// The 12<sup>nd</sup> National Conference on Laser Technology and Optoelectronics. Shanghai: Chinese Laser Press, 2017.  
范滇元. 我国高功率激光的进展概述[R]//第十二届全国激光技术与光电子学学术会议. 上海: 中国激光杂志社, 2017.
- [46] Yan P, Xiao Q R, Sun J Y, et al. Study of SRS in high power fiber laser[C]// The 22<sup>nd</sup> National Laser Conference. Beijing: [s. n.], 2016.  
闫平, 肖起榕, 孙俊逸, 等. 高功率光纤激光器拉曼特性研究[C]. 第二十二届全国激光学术会议. 北京: [s. n.], 2016.
- [47] Zhan H, Liu Q, Wang Y, et al. 5 kW GTWave fiber amplifier directly pumped by commercial 976 nm laser diodes [J]. *Optics Express*, 2016, 24(24): 27087-27095.
- [48] 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.
- [49] Lin A X, Tang X, Zhan H, et al. 6 kW Yb-doped laser fiber fabricated by chelate precursor doping technique [C] // Optical Fiber Communication Conference, Los Angeles, California. Washington, D. C.: Optical Society of America, 2017, W1F.1.
- [50] Raycus laser. Single module CW fiber laser[EB/OL]. <http://www.raycuslaser.com/view/8.html>. 2020.  
锐科激光. 单模组连续光纤激光器[EB/OL]. <http://www.raycuslaser.com/view/8.html>. 2020.
- [51] Scyglight. 2000-3000 W single-mode CW fiber laser [EB/OL]. [2020-06-12]. <http://www.scyglight.com/index.php?m=content&c=index&a=show&catid=75&id=16>. 2020.  
思创优光. 2000-3000 W 单模连续光纤激光器[EB/OL]. [2020-06-12]. <http://www.scyglight.com/index.php?m=content&c=index&a=show&catid=75&id=16>. 2020.
- [52] Maxphotonics. MFSC 5000 W single module CW fiber laser [EB/OL]. [2020-06-12]. <http://www.maxphotonics.com/Products/MFSC5000Wdanmokuaili.html>. 2020.  
创鑫激光. MFSC 5000 W 单模块连续光纤激光器[EB/OL]. [2020-06-12]. <http://www.maxphotonics.com/Products/MFSC5000Wdanmokuaili.html>. 2020.
- [53] Beijing Ray Power Laser Technologies. 5 kW single mode CW fiber laser [EB/OL]. [2021-01-12]. [http://www.raypowerlaser.com/product\\_info5000-SM.html](http://www.raypowerlaser.com/product_info5000-SM.html).  
中科先为激光科技(北京)有限公司. 5 kW 单模连续光纤激光器[EB/OL]. [2021-01-12]. [http://www.raypowerlaser.com/product\\_info5000-SM.html](http://www.raypowerlaser.com/product_info5000-SM.html).
- [54] DK laser. Grand meeting of laser industry | discussion of laser cutting & laser fusing in the application of car industry [EB/OL]. [2020-06-12]. <http://www.dklaser.com/news/show-1535.html>. 2019.  
大科激光. 激光产业盛会 | 探讨激光切割 & 焊接在汽车行业的应用[EB/OL]. [2020-06-12]. <http://www.dklaser.com/news/show-1535.html>. 2019.
- [55] DK laser. DK-YQM 6000AR quasi-single-mode CW fiber laser [EB/OL]. [2020-06-12]. <http://www.dklaser.com/case/show/1561.html>. 2020.  
大科激光. DK-YQM 6000AR 准单模连续波光纤维激光器[EB/OL]. [2020-06-12]. <http://www.dklaser.com/case/show/1561.html>. 2020.
- [56] Ofweek laser net. A paper help to read the past and present of 976 nm pump technique [EB/OL]. [2020-06-12]. <https://laser.ofweek.com/2020-02/ART-240002-8300-30427862.html>. 2020.  
Ofweek 激光网. 一文看懂 976 nm 泵浦技术的前生今世[EB/OL]. [2020-06-12]. <https://laser.ofweek.com/2020-02/ART-240002-8300-30427862.html>. 2020.
- [57] 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.
- [58] Rofin C. HighLight™ FL-ARM[EB/OL]. [2020-06-12]. [https://www.rofin.com/fileadmin/user\\_upload/downloads/bilder/produkte/macro\\_produkte/COHR\\_HighLightFL-ARM\\_DS\\_0719.pdf](https://www.rofin.com/fileadmin/user_upload/downloads/bilder/produkte/macro_produkte/COHR_HighLightFL-ARM_DS_0719.pdf). 2020.
- [59] Nlight. High-power fiber lasers[EB/OL]. [2020-06-12]. [https://static1.squarespace.com/static/5d5d8be5c16a590001b58605/t/5e8242c79bb76a70f2e7efaf/1585595080142/nLIGHT\\_CFX\\_3-4-5000.pdf](https://static1.squarespace.com/static/5d5d8be5c16a590001b58605/t/5e8242c79bb76a70f2e7efaf/1585595080142/nLIGHT_CFX_3-4-5000.pdf). 2020.
- [60] FeiBo Laser. FeiBo Laser Li X J: the main battlefield of fiber laser in 2019 is power in 3000 W-8000 W [EB/OL]. [2020-06-12]. [https://www.sohu.com/a/301133076\\_100028208](https://www.sohu.com/a/301133076_100028208). 2019.  
飞博激光. 飞博激光李骁军: 2019 光纤激光器的主战场在 3000 W-8000 W 区间[EB/OL]. [2020-06-12]. [https://www.sohu.com/a/301133076\\_100028208](https://www.sohu.com/a/301133076_100028208). 2019.
- [61] Feibo Laser. 3 kW ring laser [EB/OL]. [2020-06-12]. <https://mp.weixin.qq.com/s/tm5v3yLIE1->

- OqKVwN3IqsQ. 2018.
- [62] Zhang H W, Xiao H, Zhou P, et al. High-power 1120-nm Yb-doped fiber laser and amplifier [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2013, 25(21): 2093-2096.
- [63] Platonov N, Shkurikhin O, Fomin V, et al. High-efficient kW-level single-mode ytterbium fiber lasers in all-fiber format with diffraction-limited beam at wavelengths in 1000–1030 nm spectral range [J]. Proceedings of SPIE, 2020, 11260: 1126003.
- [64] Kong L C. Research of high power weak-tapering pump/signal fiber combiner[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2013.  
孔令超. 弱拉锥型大功率泵浦/信号合束器研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2013.
- [65] Smith A V, Smith J J. Steady-periodic method for modeling mode instability in fiber amplifiers [J]. Optics Express, 2013, 21(3): 2606-2623.
- [66] Ma X, Liu C H, Chang G, et al. Angular-momentum coupled optical waves in chirally-coupled-core fibers [J]. Optics Express, 2011, 19(27): 26515-26528.
- [67] Kashiwagi M, Saitoh K, Takenaga K, et al. Effectively single-mode all-solid photonic bandgap fiber with large effective area and low bending loss for compact high-power all-fiber lasers [J]. Optics Express, 2012, 20(14): 15061-15070.
- [68] Beier F, Möller F, Nold J, et al. TMI-threshold investigations of low NA Yb-doped single mode fibers [J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10512: 1051203.
- [69] Zhang F F, Wang Y B, Lin X F, et al. Gain-tailored Yb/Ce codoped aluminosilicate fiber for laser stability improvement at high output power [J]. Optics Express, 2019, 27(15): 20824-20836.
- [70] Wang X L, Ye Y, Xi X M, et al. Gain optical fiber with longitudinally and gradually varied core size: CN108614323A[P]. 2018-10-02.  
王小林, 叶云, 奚小明, 等. 一种纤芯尺寸纵向渐变的增益光纤: CN108614323A[P]. 2018-10-02.
- [71] Wang X L, Xu X J, Ye Y, et al. Gain optical fiber with fiber core size changed longitudinally, continuously and gradually: CN110007395A [P]. 2019-07-12.  
王小林, 许晓军, 叶云, 等. 一种纤芯尺寸纵向连续渐变的增益光纤: CN110007395A[P]. 2019-07-12.
- [72] Mohammed W, Gu X. Fiber Bragg grating in large-mode-area fiber for high power fiber laser applications [J]. Applied Optics, 2010, 49(28): 5297-5301.
- [73] 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.
- [74] Wang X L, Shi C, Yang B L, et al. High-power fiber end cap based on tapered fiber: CN207081848U [P]. 2018-03-09.  
王小林, 史尘, 杨保来, 等. 一种基于锥形光纤的高功率光纤端帽: CN207081848U [P]. 2018-03-09.

## High-Power Ytterbium-Doped Fiber Laser Oscillator: Current Situation and Future Developments

Wang Xiaolin<sup>1,2,3\*\*\*</sup>, Zhang Hanwei<sup>1,2,3</sup>, Yang Baolai<sup>1,2,3</sup>, Xi Xiaoming<sup>1,2,3</sup>, Wang Peng<sup>1,2,3</sup>, Shi Chen<sup>1,2,3</sup>, Wang Zefeng<sup>1,2,3</sup>, Zhou Pu<sup>1,2,3\*</sup>, Xu Xiaojun<sup>1,2,3\*\*</sup>, Chen Jinbao<sup>1,2,3</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 Power Laser Technology, Changsha, Hunan 410073, China;

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

### Abstract

**Significance** In recent years, with the continually improved power and beam quality of the high-power Ytterbium-doped fiber laser oscillator, laser oscillators are being extensively used in industry, scientific research, and other areas. Compared with the master oscillator power amplification (MOPA) fiber laser configuration, fiber laser oscillators hold the advantages of compact volume, easy control logic, low cost, anti-reflection, and high stability. With the development of fiber components and processing technology, the output power and beam quality of fiber laser oscillators will improve, and may be used instead of the MOPA fiber laser in the future.

**Progress** In scientific research, early in 2012, the Alfalight company reported all fiber laser oscillators with output power of 1 kW. Since then, the output power of the laser oscillator continued to increase every year and increased a lot in the last two years. In 2014, the Coherent company reported single-mode fiber laser with power of 3 kW in spatial structure. Soon, Laserline GmbH reported 17.5 kW multi-mode fiber laser in spatial structure in 2019 (Fig. 2). Compared with the oscillators in spatial structure, all fiber laser oscillators got more attention by the researchers. After 2016, many institutions studied single-mode laser oscillators in detail, and the output power increased from 2 kW in 2015 to 8 kW in 2020. In 2020, Fujikura reported the highest single-mode, all-fiber laser oscillator with output power of 8 kW (Fig. 9). In our group, we are studying laser oscillator from 2010. In 2012—2020, we also demonstrated all-fiber laser oscillators with output power from 1 kW to 6 kW (Fig. 6).

In 2010, the CoreLase company launched the fiber laser oscillator product with output power of 1 kW. After 5 years, the CoreLase company launched a 2 kW laser oscillator product. In 2015, Maxphotonics company in China also launched a 1.5 kW laser oscillator product in cooperation with our group. Since 2017, a lot of laser companies such as Lumentum, GW laser, Reci laser, Feibo Laser, and DK laser launched fiber laser oscillator products with output power from 2 kW to 4 kW (Table 2).

As we know, IPG photonics demonstrated a 10 kW single mode fiber laser with MOPA configuration. After that time, fiber laser with MOPA configuration was being developed. Many institutions demonstrated output power from 5 kW to 10 kW in recent years (Table 3). In China, some institutions including CEAP, Tsinghua University, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, and our group demonstrated MOPA laser with power more than 10 kW (Table 3). However, in the industry, only after 2019, Raycus laser and Maxphotonics launched MOPA laser products with power 3–6 kW (Table 3), and most of these were not single mode products. On comparing the production of fiber laser in scientific research and in industry, we can see that the time from scientific reported laser to the industry product in fiber laser with MOPA configuration needs almost three years, which is longer than that of the fiber laser oscillator. The possible reason could be that the laser oscillator holds the advantages of anti-reflection and high stability than the fiber laser with MOPA configuration, which gives the fiber laser oscillator a more practical option in industry. So, we can see that laser oscillators are widely used than the MOPA fiber lasers in industry. And also, in some experiment, researchers found that the fiber laser oscillator held a higher mode instability threshold than that in fiber laser with the MOPA configuration (Fig. 11).

For the future, the develop tendency of Ytterbium-doped fiber laser includes scaling both power and efficiency with good beam quality, generating special beam pattern in practice application, and extending the laser wavelength to short and long wavelengths.

To scale the fiber laser performance, close attention needs to be paid to these key technologies: high efficiency and loss pump & signal combiner are the essential preconditions for high power and good beam quality fiber laser; high efficiency and relative low absorption laser diode as the pump source for the gain fiber is the key component for increasing laser power and efficiency; new types of gain fiber such as spindly fiber are an effective method for balancing the nonlinear effect and mode instability; specific fiber grating is an effective way for lasers with controllable beam quality. Considering these technologies, a technical proposal for 10 kW high-power Ytterbium-doped laser oscillator is provided. In this proposal, we have used most of the above-mentioned technologies.

**Conclusions and Prospect** With further expansion in the fiber laser, the requirements for the power and beam quality of the fiber laser oscillator will increase. If using the conventional technology method for the near single-mode fiber laser oscillator, technical bottleneck will be encountered during the power increasing. Our new technical proposal combined the special high efficiency and loss pump & signal combiner, high efficiency and relative low absorption laser diode, gain fiber with vibrational core diameter and end cap with tapered fiber, which can provide a breakthrough regarding the power limitation of the conventional fiber laser, and help scale the power of single mode fiber laser oscillator to more than 10 kW.

**Key words** fiber lasers; fiber laser oscillators; nonlinear effect; mode instability; power scaling

**OCIS codes** 140.3410; 140.3510; 140.3615