

高功率掺镱光纤激光振荡器研究进展

叶云^{1,2,3}, 王小林^{1,2,3*}, 史尘^{1,2,3}, 张汉伟^{1,2,3}, 奚小明^{1,2,3}, 周朴^{1,2,3}, 许晓军^{1,2,3**}

¹国防科技大学前沿交叉学科学院, 湖南 长沙 410073;

²高能激光技术湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410073;

³大功率光纤激光湖南省协同创新中心, 湖南 长沙 410073

摘要 与采用主振荡功率放大结构的光纤激光器相比, 光纤激光振荡器具有结构紧凑、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, 全光纤激光振荡器实现了 5 kW 近衍射极限输出。围绕掺镱光纤激光振荡器, 详细介绍了空间结构振荡器和全光纤结构振荡器的研究进展及其面临的问题。根据高功率光纤激光振荡器的主要限制因素非线性效应和模式不稳定, 从特殊设计增益光纤和振荡器全局优化设计两方面, 初步探讨了进一步提升高功率光纤振荡器功率的技术途径, 以期为实现万瓦量级单模光纤激光振荡器提供参考。

关键词 激光器与激光光学; 掺镱光纤; 光纤振荡器; 非线性效应; 模式不稳定

中图分类号 TN248

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.120006

Research Progress in High Power Ytterbium Doped Fiber Laser Oscillator

Ye Yun^{1,2,3}, Wang Xiaolin^{1,2,3*}, Shi Chen^{1,2,3}, Zhang Hanwei^{1,2,3}, Xi Xiaoming^{1,2,3},
Zhou Pu^{1,2,3}, Xu Xiaojun^{1,2,3**}

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

²Hunan Provincial Key Laboratory of High Energy Laser Technology, Changsha, Hunan 410073, China;

³Hunan Provincial Collaborative Innovation Center of High Power Fiber Laser, Changsha, Hunan 410073, China

Abstract Compared with master oscillator power amplifiers, fiber laser oscillators have the advantages of compact structure, low cost, strong anti-reflection light return capability, and good stability. With the development of fiber optic devices and processes, all-fiber laser oscillators achieve a near-diffraction limit output of 5 kW. As for the ytterbium-doped fiber laser oscillator, the research progress and problems faced by the space-coupled fiber oscillator and the all-fiber oscillator are introduced in detail. According to the nonlinear effects and mode instabilities that are the main limiting factors of high-power fiber laser oscillators, the technical approach to further increase the power of high-power fiber laser oscillators is discussed preliminarily, from the aspects of specially designed gain optical fibers and global oscillator optimization, in order to provide reference for the realization of single-mode fiber laser oscillators with 10 kW output.

Key words lasers and laser optics; ytterbium-doped fiber; fiber laser oscillator; nonlinear effect; mode instability

OCIS codes 140.3615; 060.2320; 060.2280; 140.3510

1 引言

光纤激光器具有转换效率高、光束质量好、结构紧凑、热管理方便等优点, 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^[1-2]。随着高亮度、高功率抽运源技术和大模场双包层掺镱光纤制作工艺的发展, 光纤激光器输出功率得到了迅速提升^[3-4]。1999年, Dominic等^[5]采用空间耦合双向抽

收稿日期: 2018-06-01; 修回日期: 2018-06-26; 录用日期: 2018-07-05

基金项目: 国家自然科学基金(61505260, 61735007)

* E-mail: chinaphotonics@163.com; ** E-mail: xuxj@21cn.com

运方案,获得 110 W 单模连续激光,从此掺镱光纤激光器实现百瓦级输出。2005 年,美国 IPG 光子公司报道了 2 kW 的掺镱单模激光器^[6],随后美国 Nufern 公司^[7]、美国 JUSD 公司^[8]、芬兰 CoreLase 公司^[9]、英国 SPI 公司^[10]都推出了千瓦级光纤激光器产品。尤其是 2009 年,IPG 光子公司采用级联抽运获得功率为 10 kW 的单模光纤激光器^[11],并在 2012 年和 2013 年分别报道实现了 20 kW 单模和 100 kW 多模激光输出^[12]。

然而,目前国际上实现 3 kW 以上的光纤激光器大多数采用主振荡功率放大(MOPA)结构^[13-15]。在 MOPA 结构中,放大级容易受到材料反射光的影响而造成激光器回光损坏;而且随着输出功率的提升,模式不稳定效应会严重制约激光器的输出功率和光束质量^[16-19]。采用振荡器结构的高功率光纤激光器,不仅结构简单、稳定性好、成本低廉,而且由于谐振腔的光栅对高阶模的反射率小于基模,可抑制高阶模式的产生,从而能在一定程度上抑制模式不稳定^[20]。高功率掺镱光纤激光振荡器包括空间结构和全光纤结构,由于高功率光纤振荡器功率稳定,结构紧凑,在工业材料切割、焊接、清洗、3D 打印等领域具有开创意义。2010 年,芬兰 CoreLase 公司首次推出 1 kW 全光纤激光振荡器产品,并能够实现不锈钢、碳钢、铝、铜等金属材料的切割、焊接、穿孔等^[9];2015 年,国内深圳创鑫激光公司推出

1.5 kW 光纤激光振荡器产品,在工业焊接、切割加工等领域取得良好效果^[21]。

本文对国内外高功率光纤激光振荡器的研究进展进行系统梳理,在此基础上详细分析空间结构振荡器和全光纤结构振荡器的特性及其面临的问题,并从特殊设计增益光纤和振荡器全局优化两方面讨论高功率光纤振荡器进一步发展的技术途径,旨在为高功率光纤振荡器的技术进步提供参考。

2 研究进展

2.1 空间结构振荡器

早期,由于光纤器件发展的限制,光纤振荡器以空间耦合结构为主。在空间结构振荡器中,通过空间光学透镜、分色镜、反射镜等实现抽运光的耦合和谐振腔的构建。2004 年,英国南安普顿大学 Jeong 等^[22]采用双向抽运的空间光路结构,利用 975 nm 的半导体激光器抽运纤芯直径为 43 μm 、数值孔径(NA)为 0.09 的 D 形双包层掺镱光纤,获得了 1.01 kW 的 1.1 μm 激光输出,斜率效率为 80%,光束质量因子 M^2 为 3.4。同年,他们优化增益光纤设计,将纤芯直径减小到 40 μm ,NA 降为 0.05,光纤长度改为 12 m,最终获得 1.36 kW 近衍射极限激光输出, $M^2=1.4$,光束质量得到了极大的优化,实验结构如图 1 所示^[23]。

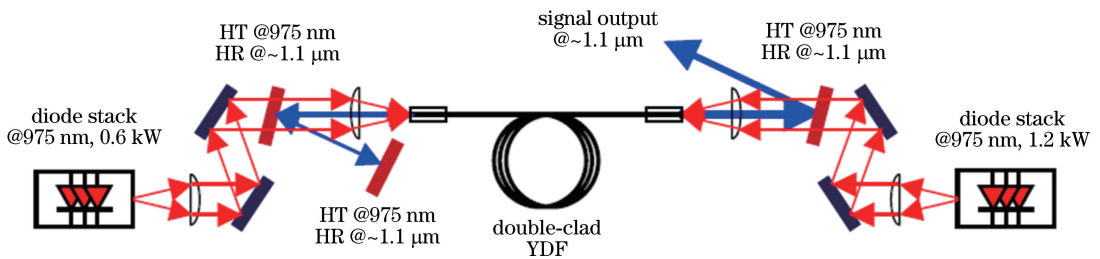


图 1 1.36 kW 空间耦合光纤振荡器实验结构

Fig. 1 Experimental setup of 1.36 kW space-coupled fiber laser oscillator

2009 年,该课题组基于同样的空间耦合结构使用 3 组半导体激光抽运源,获得了最大输出功率大于 2.1 kW 的 1.1 μm 单模光纤激光器,光光转换效率为 74%,光束质量因子 $M^2=1.2$,实验装置如图 2 所示^[24]。该激光器采用更大纤芯直径的双包层掺镱光纤,纤芯直径为 50 μm ,NA=0.06,内包层直径为 850 μm ,NA=0.85。由此计算得到归一化频率

$V \approx 8.57 > 2.405$,为了获得近衍射极限的激光光束,实验中通过缠绕增益光纤、增加弯曲损耗来减少高阶模增益。在最大输出功率时,激光效率接近 90%,输出功率波动小于 1.6%。但是,经过改进升级后整个系统的结构更为复杂,调节精度要求更高,而且光纤端面需要特殊的金属 V 形槽温控保护措施,难以实现工程化应用。

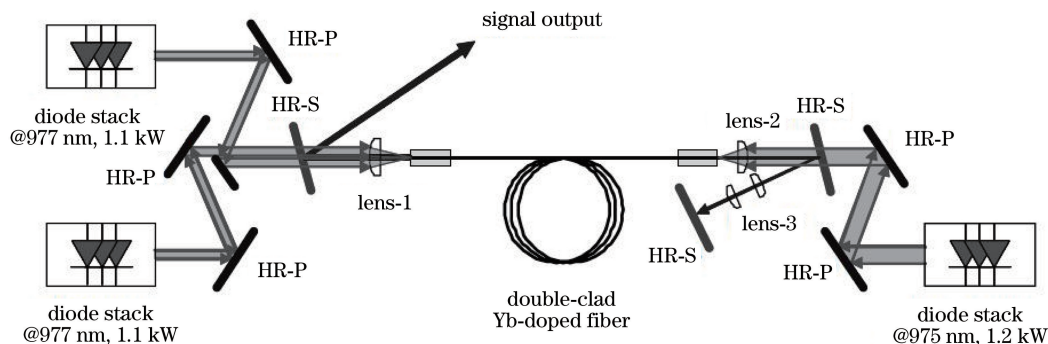


图 2 2.1 kW 空间耦合光纤振荡器实验装置图

Fig. 2 Experimental setup of 2.1 kW space-coupled fiber laser oscillator

2014年,美国 Coherent 公司 Khitrov 等^[25]报道了输出功率 3 kW 的空间结构单模光纤振荡器,这也是目前报道的功率最高的空间结构光纤振荡器。该振荡器中,抽运光由半导体激光叠阵输出后,通过分色镜和透镜聚焦后进入增益光纤中。增益光纤采用化学气相沉积(CVD)工艺制作的低 NA ($NA=0.048$)大模场双包层掺镱光纤,模场面积约

为 $800 \mu\text{m}^2$,较低的 NA 有利于降低光纤的 V 值,实现单模激光输出。整体光路采用 976 nm 后向抽运方式,最终获得最大输出功率 3 kW、光束质量因子 $M^2=1.15$ 的近衍射极限输出,实验结构如图 3 所示。但整体电光转换效率为 36%,而且通过输出光谱可以发现,在 1150 nm 附近存在明显的受激拉曼散射(SRS),这严重制约该振荡器进一步提升输出功率。

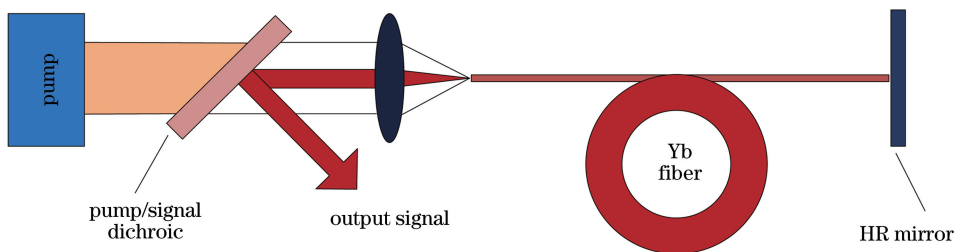


图 3 空间耦合结构 3 kW 振荡器结构示意图

Fig. 3 Schematic of 3 kW space-coupled fiber laser oscillator

上述空间结构振荡器尽管可以获得千瓦级近单模激光输出,但由于都在激光器腔内引入了不同数量的分立光学器件,因而激光器结构的稳定性受到影响,激光器维护难度增大。而且随着光纤激光振荡器功率提高,裸露在空间中承受高功率密度的光纤端面容易损坏,增加实验风险,进一步限制空间结构光纤振荡器的功率提升。

2.2 全光纤结构振荡器

全光纤振荡器结构简单稳定,对外界环境的变化不敏感。因此,在高功率光纤激光器中具有非常明显的优势。该结构采用一对高反射率和低反射率的光纤光栅构成谐振腔,通过光纤耦合半导体激光器、光束合束器等全光纤器件以及光纤熔接技术实现全光纤化结构。在全光纤器件和熔接处理设备快速发展的推动下,全光纤结构迅速取代了空间结构。

自 2010 年芬兰 CoreLase 公司推出 1 kW 全光纤激光振荡器产品以来,高功率全光纤振荡器发展迅速。2012 年,美国 Alfalight 公司实现 1 kW 近单模全光纤激光振荡器^[26];2014 年,国防科技大学利用 915 nm 前向抽运获得 1.5 kW 全光纤振荡器,随后实现量产^[27];2018 年,日本 Fujikura 公司报道了 5 kW 全光纤单模激光振荡器^[28]。表 1 列出了近些年公开报道的高功率全光纤振荡器典型研究结果。

从表 1 可知,全光纤振荡器主要采用 915 nm 和 976 nm 抽运大模场双包层掺镱光纤。相比于国外高功率全光纤振荡器的研究,国内起步较晚,但是发展相对迅速。近年来,已有天津大学^[33]、南方科技大学^[34]、华中科技大学^[38]、国防科技大学^[39-42]等单位成功实现了全光纤振荡器千瓦量级功率输出,并向国产化发展。

表 1 高功率全光纤振荡器典型研究结果

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

Year	Institution	Power /kW	Pumping scheme	Fiber ^a	Reference
2010	CoreLase, Finland	1	975 nm bi-pump	20 μm , 0.065 NA	[9]
2012	Alfalight, USA	1	915 nm co-pump	20 μm , 0.065 NA	[26]
2014	NUDT, China	1.5	915 nm co-pump	20 μm , 0.065 NA	[27]
2015	TJU, China	1.6	976 nm co-pump	20 μm , 0.065 NA	[29]
2015	CoreLase, Finland	2	915 nm bi-pump	20 μm , 0.065 NA	[9]
2016	Fujikura, Japan	2	915 nm bi-pump	A_{eff} 400 μm^2 , 0.07 NA	[30]
2016	NUDT, China	2.5	976 nm bi-pump	20 μm , 0.065 NA	[31]
2016	NUDT, China	3	976 nm bi-pump	20 μm , 0.065 NA	[32]
2017	TJU, China	2	915 nm co-pump	20 μm , 0.065 NA	[33]
2017	SUSTech, China	2	976 nm bi-pump	20 μm , 0.065 NA	[34]
2017	Fujikura, Japan	3	915 nm bi-pump	A_{eff} 400 μm^2 , 0.07 NA	[35]
2017	NUDT, China	4	915 nm bi-pump	25 μm , 0.065 NA	[36]
2018	Fujikura, Japan	5	976 nm bi-pump	A_{eff} 600 μm^2	[28]
2018	NUDT, China	5.2	915 nm bi-pump	25 μm , 0.065 NA	[37]

^a A_{eff} represents the effective mode area of fiber.

在最初实现千瓦级全光纤振荡器的方案中,为了获得功率稳定、光束质量高的输出,主要采用 915 nm 抽运源抽运纤芯内包层直径为 20/400 μm 的双包层掺镱光纤。2012 年,美国 Alfalight 公司利用 7 个功率为 200 W 的 915 nm 激光二极管 (LD) 耦合进高反射光栅,在总抽运功率为 1.485 kW 时,获得最大输出功率 1 kW 的单模全光纤振荡器,光束质量因子 $M^2 < 1.3$ ^[26]。同年,美国 JDSU 公司采取同样的抽运结构,通过增加抽运源功率至 1.8 kW 得到 1.2 kW 单模输出^[8]。2014 年,国防科技大学 Yu 等^[27]采用两级合束的 915 nm LD 实现 1.5 kW 近衍射极限激光输出,光光转换效率为 74%。但是该实验中拉曼斯托克斯光强度仅为 -13 dB,这是因为 Yb 在 915 nm 波段吸收较低,实验中需要使用较长的增益光纤(41 m)来完全吸收抽运光。然而增益光纤长度过长又会导致 SRS 效应,进而限制功率增长。2015 年,国防科技大学采

用高吸收系数的增益光纤缩短谐振腔内光纤长度,利用该方案获得了大于 2 kW 的功率输出。

由于掺镱光纤对 915 nm 光的吸收较低,研究人员选择吸收更高的 976 nm LD 抽运源。2015 年,天津大学史伟^[29]等采用 7 个功率为 300 W 的 976 nm LD 抽运纤芯内包层直径为 20/400 μm 、长度为 25 m 的双包层掺镱光纤,实验装置如图 4 所示。在抽运功率增至约 2.16 kW 时,振荡器获得了 1.63 kW 的单模功率输出,光光转换效率为 75.46%,并未观察到 SRS 现象。但随着输出功率的增加,增益光纤温度过高,出现的模式不稳定(TMI)效应成为主要限制因素。由于 976 nm 抽运导致光纤热负载增大,TMI 阈值降低。2017 年,该课题组又采用 18 个输出功率约 160 W 的 915 nm LD 前向抽运 20/400 μm 掺镱光纤,最终获得 2 kW 近单模激光输出,光光转换效率约为 70%,光束质量因子 $M^2 = 1.5$,SRS 强度约为 -23 dB。

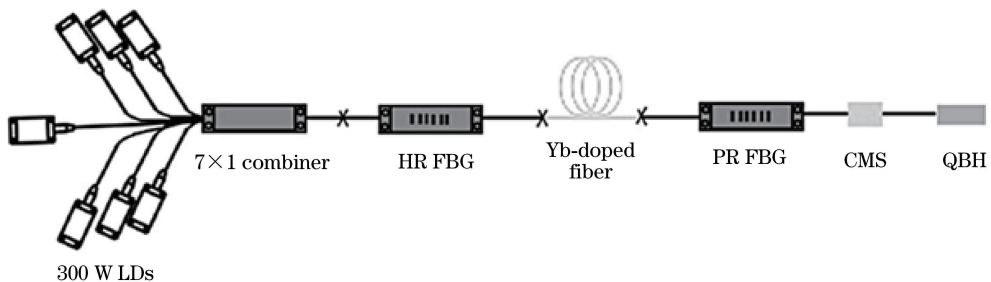


图 4 1.6 kW 单模全光纤振荡器实验装置图

Fig. 4 Experimental setup of 1.6 kW single-mode all-fiber laser oscillator

考虑到 915 nm 抽运方案受限于 SRS 而没有 TMI, 976 nm 抽运方案受限于 TMI 而没有 SRS, 2016 年, 国防科技大学 Yang 等^[43]采用 976 nm 和 915 nm LD 混合抽运方式实现 2 kW 激光输出。实验中, 增益光纤长度为 27 m, 通过调节驱动电流实现 976 nm 与 915 nm 抽运功率的不同比值。当 976 nm 抽运功率为 660 W, 915 nm 抽运功率为 2275 W 时, 振荡器获得最大输出功率 2 kW, 拉曼光功率比信号功率低 25 dB, 光束质量因子 $M^2 = 1.6$ 。虽然混合抽运方案能够获得 2 kW 激光输出, 但是随着功率增加, TMI 效应随之出现。

双向抽运方案能够在一定程度上抑制非线性效应, 同时还能使热分布更加均匀, 从而减小热管理压

力, 因此该结构在光纤振荡器功率拓展方面具有一定的潜力, 双向抽运实验结构如图 5 所示。2016 年, Yang 等^[31]采用 976 nm 双向抽运纤芯内包层直径为 20/400 μm 的掺镱光纤实现 2.5 kW 近单模输出 ($M^2 = 1.3$), 并通过实验验证双向抽运相比于前向抽运, 可以分散增益光纤中的热负载, 从而减弱 TMI 效应, 提升输出功率。从图 6(a) 所示 2.5 kW 振荡器的输出光谱可知, 拉曼斯托克斯光强度约为 -20 dB, 限制功率提升的主要因素为 SRS 效应。同年, Yang 等^[32]在 976 nm 双向抽运实验基础上优化抽运功率分布和增益光纤长度, 有效抑制了 SRS (约 29 dB), 如图 6(b) 所示, 实现 3.05 kW 近单模激光输出, 光束质量因子 $M^2 = 1.3$ 。

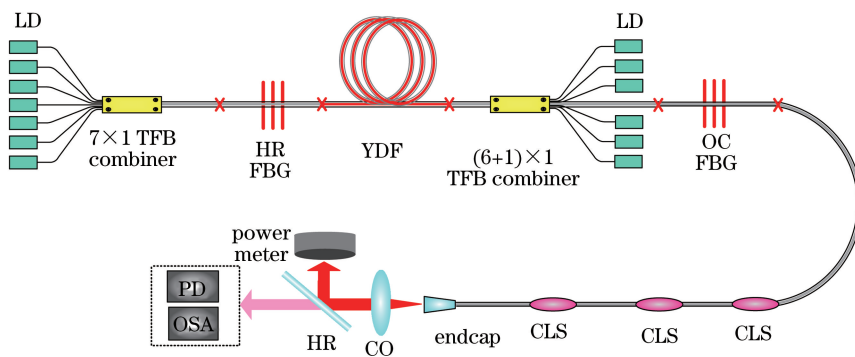


图 5 20/400 μm 双向抽运全光纤振荡器结构示意图

Fig. 5 Schematic of the 20/400 μm double side pumped all-fiber laser oscillator

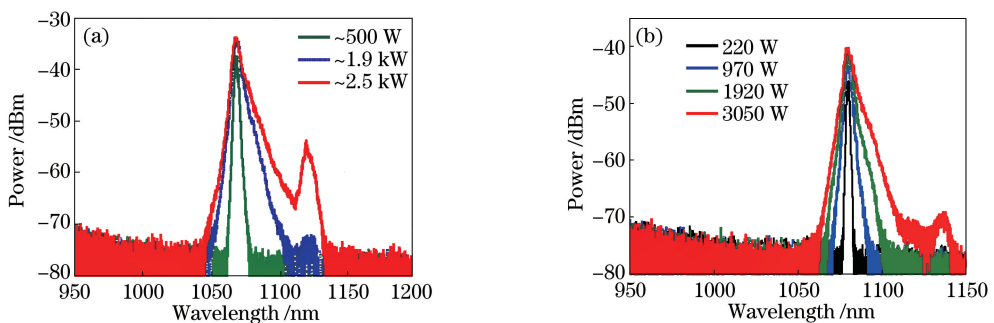


图 6 输出光谱。(a) 2.5 kW 全光纤振荡器; (b) 3 kW 全光纤振荡器

Fig. 6 Output spectra. (a) 2.5 kW all-fiber laser oscillator; (b) 3 kW all-fiber laser oscillator

为进一步提高振荡器输出功率, 考虑到 20/400 μm 掺镱光纤的 SRS 限制, 国防科技大学采用模场直径更大的 25/400 μm 掺镱光纤作为振荡器增益光纤。2017 年, Yang 等^[36]基于国产大模场光纤光栅, 采用 915 nm 双向抽运 25/400 μm 大模场双包层掺镱光纤, 实现 4.05 kW 功率输出, 斜率效率为 60%, 拉曼斯托克斯光强度为 -25 dB, 光束质量因子 $M^2 =$

2.2, 实验装置如图 7 所示。随后, 该课题组在此实验基础上, 将增益光纤缩短至 31 m, 传能光纤缩短至 7 m, 在总抽运功率为 8.3 kW 时, 获得了 5.21 kW 的功率输出, 光光效率为 63%, 且 SRS 比信号光低 22 dB, 从时域和对应的频谱特性来看, 没有模式不稳定效应, 实验结果如图 8 所示^[37]。这也是目前全光纤激光振荡器公开报道的最高输出功率。

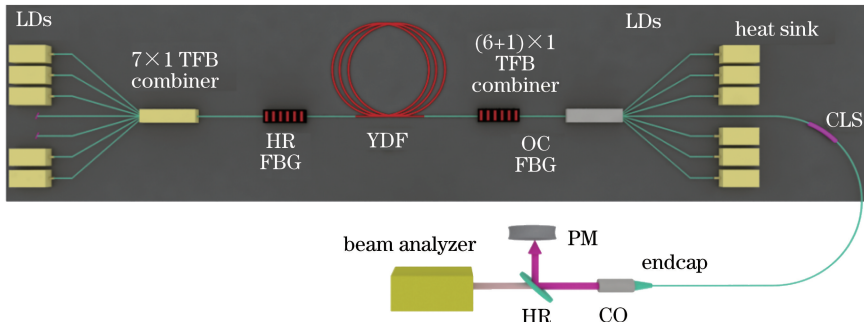
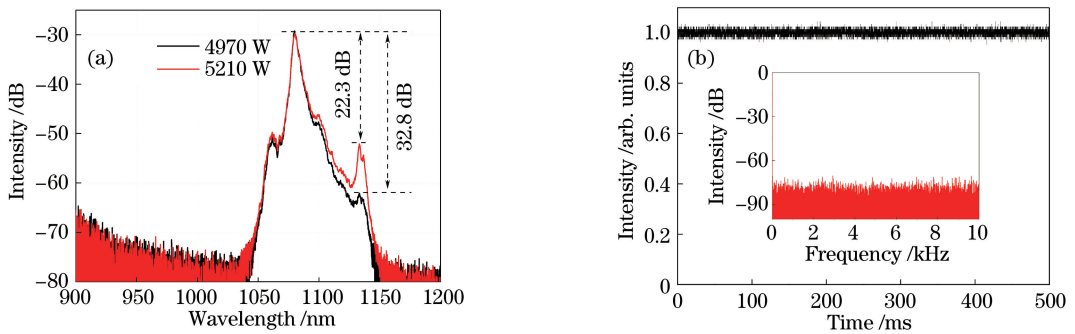
图 7 25/400 μm 双端抽运全光纤振荡器结构示意图Fig. 7 Schematic of the 25/400 μm double side pumped all-fiber laser oscillator

图 8 5.2 kW 全光纤振荡器。(a)输出光谱;(b)最大输出功率时的时域和频域谱

Fig. 8 5.2 kW all-fiber laser oscillator. (a) Output spectra; (b) time domain and frequency domain profiles at the maximum output power

与此同时,日本 Fujikura 公司在高功率全光纤振荡器的研究中取得丰硕成果。2016 年, Mashiko 等^[30]采用高亮度 915 nm LD 双向抽运有效模场面积 $400 \mu\text{m}^2$ 、 $NA = 0.07$ 的双包层掺镱光纤,实现 2 kW 近衍射极限输出。值得一提的是,实验中所使用的增益光纤和传能光纤长度分别为 30 m 和 20 m。为了能在 915 nm 抽运长光纤时抑制 SRS,他们采用特殊设计的大模场双包层掺镱光纤,仅在纤芯中心附近掺杂 Yb,使 LP_{01} 模增益大于 LP_{11} 模,获得单模输出。2017 年, Fujikura 公司在同样的结构基础上,通过提高后向抽运功率在总抽运功率中

的比例抑制 SRS,在总抽运功率为 4.23 kW 时获得 3 kW 单模光束输出,斜率效率为 70%^[35]。为了获得更高的功率输出,2018 年, Fujikura 公司采用模场直径更大的增益光纤,有效模场面积 $A_{\text{eff}} = 600 \mu\text{m}^2$,通过 976 nm 双向抽运实现 5 kW 单模全光纤振荡器,光束质量因子 $M^2 = 1.3$,转换效率达到 80%,SRS 比信号光低 45 dB,实验结构如图 9 所示^[28]。然而在输出光谱中出现四波混频(FWM)效应,但是其对功率提升和光束质量影响较小,实际应用中可以忽略。该激光器输出功率、光束质量和光谱等输出特性如图 10 所示。

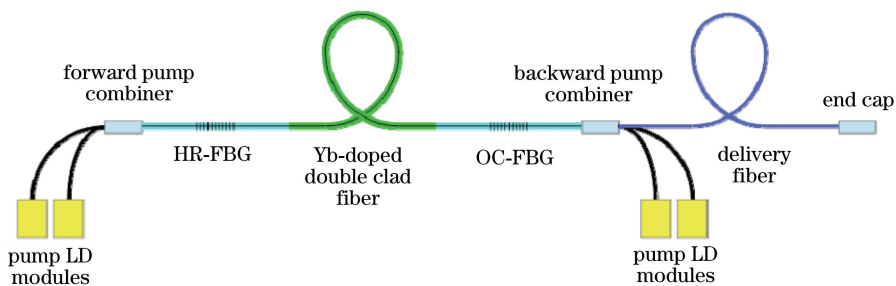


图 9 5 kW 全光纤激光振荡器结构图

Fig. 9 Schematic of 5 kW all-fiber laser oscillator

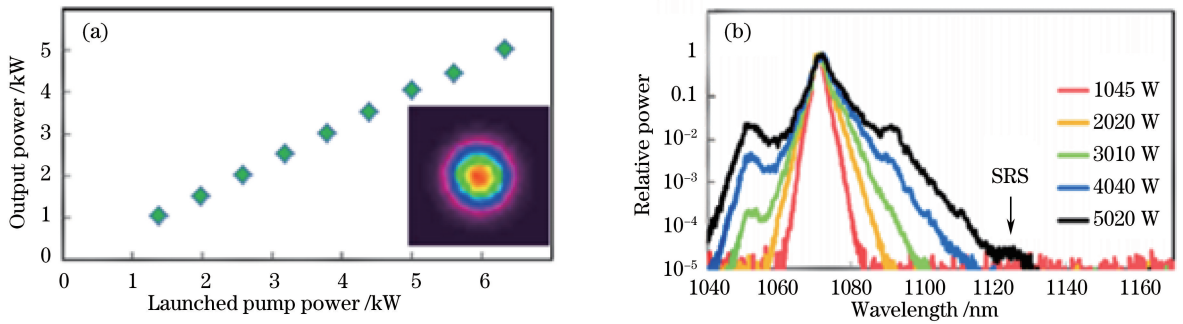


图 10 5 kW 全光纤激光振荡器输出特性。(a)输出功率与抽运功率的关系;(b)输出光谱

Fig. 10 Output performance of 5 kW all-fiber laser oscillator. (a) Output power versus launched pump power; (b) output spectra

从上述全光纤振荡器发展历程来看,近几年全光纤激光振荡器发展迅猛,各主要实验室都实现千瓦以上激光输出。但由于所使用的增益光纤和抽运结构不尽相同,因而不同单位的全光纤振荡器输出光束质量不同。随着全光纤振荡器输出功率的提高,限制其功率提升的主要因素仍然是非线性效应和模式不稳定效应。如何在保证单模激光输出的同时提高功率指标是当前全光纤激光振荡器研究的重点。

3 进一步提升全光纤振荡器功率的技术途径

高端应用领域的发展对高光束质量全光纤振荡器的输出功率提出了新要求。从全光纤振荡器发展历程可知,与传统双包层掺镱光纤相比,特殊结构设计的大模场增益光纤在抑制非线性效应和模式不稳定方面更有优势;而在不具备特殊光纤生产能力的情况下,对激光器的系统结构、抽运方式、热管理等进行全局优化,也是提升光纤振荡器功率的有效手段。因此,高功率光纤振荡器技术进一步提升的关键在于特殊大模场增益光纤的设计和激光器全局结构的优化。

3.1 通过特殊设计增益光纤提高激光功率

特殊设计的增益光纤需要具备稳定的单模输出能力,还要能够与目前光纤标准熔接器件和工业化

生产装置相匹配。下面介绍几种可能用于高功率光纤振荡器中的增益光纤,这些光纤有望成为未来高功率振荡器的核心器件。

3.1.1 利用超大模场增益光纤抑制 SRS 实现高功率输出

传统 20/400 μm 双包层掺镱光纤限制输出功率提升的主要因素是非线性效应和模式不稳定效应,其中非线性效应的影响与有效模场面积成反比。因此,采用大模场增益光纤是应对非线性效应最有效的策略。2017 年,国防科技大学实现 4 kW 全光纤激光振荡器采用的即为大模场 25/400 μm 双包层掺镱光纤。2018 年,该课题组采用同样大模场增益光纤实现 5.2 kW 激光输出。目前光束质量最好的日本 Fujikura 公司实现的 5 kW 全光纤激光振荡器,所采用的增益光纤有效模场面积为 600 μm^2 ,粗略估算可得该光纤的纤芯直径约为 34 μm 。可见,使用大模场增益光纤抑制 SRS 是获得高功率光纤激光振荡器的有效方式之一。

分布式侧面耦合包层抽运(DSCCP)光纤是基于大模场思路设计的光纤,也称为 GT-Wave 光纤^[44]。其结构如图 11 所示,图 11(a)为 DSCCP 光纤的截面图,包含信号纤(1)和抽运纤(2)。抽运光从 DSCCP 光纤侧面的抽运纤注入后在传播过程中以倏逝波形式耦合到信号纤中。

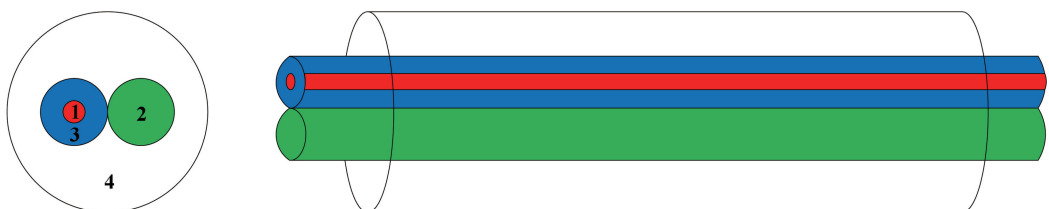


图 11 侧面耦合包层抽运光纤结构图

Fig. 11 Structure of side-coupled cladding pump fiber

抽运光从侧面耦合进信号纤,使得 DSCCP 光纤的有效模场面积扩大,光纤热分布比传统双包层光纤均匀,有效缓解全光纤振荡器中的热管理压力。2016 年,国防科技大学陈金宝等^[45]采用三段长度分别为 10,10,5 m 的 25/250 μm -250 μm DSCCP 光纤级联而成的增益光纤,通过前两级双向抽运、末级反向抽运的全光纤振荡器结构,在最大抽运功率 2.98 kW 时,获得 1.969 kW 功率输出,光束质量因

子 $M^2=2.56$ 。2018 年,该课题组在此实验基础上,通过优化增益光纤长度,采用三级级联六端双向抽运的方式,实现了多级级联分布式侧面抽运光纤激光振荡器的 3 kW 量级功率输出,光束质量因子 M^2 约为 2.1,且 SRS 抑制超过 52 dB,实验结构示意图及实验结果如图 12 所示^[46]。该实验验证了 DSCCP 光纤抑制 SRS 效应的优势及其在功率拓展方面的能力。

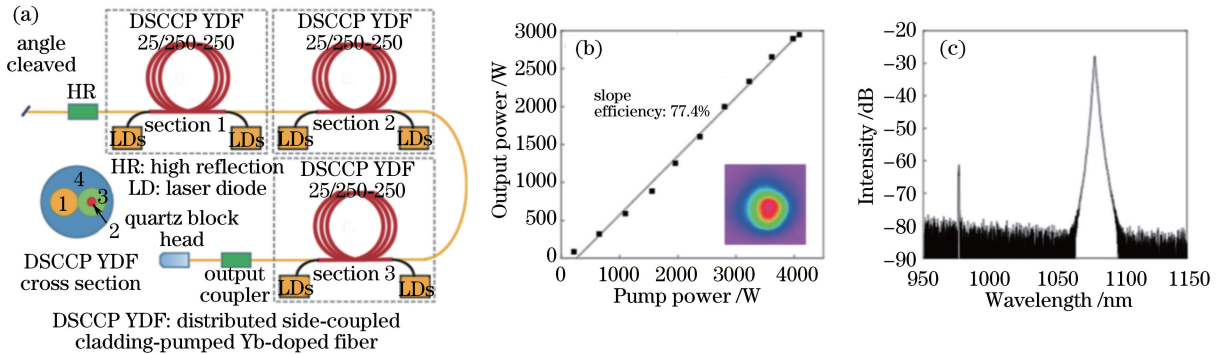


图 12 级联分布式侧面抽运光纤激光振荡器实验结构及实验结果。(a)实验结构示意图;(b)输出功率与抽运功率的关系;(c)输出光谱

Fig. 12 Experimental setup and results of the cascaded side-pumped fiber laser oscillator.

(a) Diagram of experimental setup; (b) output power versus pump power; (c) output spectrum

尽管采用大模场增益光纤是一种限制非线性效应的有效方法,但随着纤芯直径增大,保持光纤单模输出及高光束质量会越来越困难。通过抑制光纤中高阶模增益、增加高阶模损耗等方式,有望进一步提高超大模场光纤激光振荡器的单模输出功率。

3.1.2 利用具有模式选择功能的增益光纤抑制 TMI 实现高功率输出

特殊增益光纤设计使光纤纤芯中基模增益大于高阶模增益,抑制高阶模式在光纤中的传播,保证光纤的单模特性,是获得高光束质量、高功率输出的另一种可行方式。这种具有模式选择功能的光纤可以有效抑制 TMI 效应获得单模激光光束。目前已经报道具备严格单模特性的模式选择功能光纤有 3C (Chirally-Coupled-Core) 光纤^[47]、泄漏通道光纤^[48]、大间距光纤^[49]、沟槽光纤^[50]以及全固态光子带隙光纤^[51]等。

3C 光纤是由密歇根大学研究人员提出,目前已由 nLIGHT 公司进行生产的螺旋芯光纤,其特点是在主信号纤周围缠绕一个或多个旁纤,其结构如图 13(a)所示^[52]。这种螺旋旁芯设计可以将主纤中的高阶模(HOM)共振耦合到旁纤,由于螺旋芯具有非常高的弯曲损耗,因而高阶模传输损耗大,抑制了

TMI 效应。耶拿大学研究人员提出的大间距光纤(LPF)结构如图 13(b)所示^[53],其依赖于开放的波导结构,对 HOM 有很强的非定域作用,使得离域 HOM 增益大大减小,抑制了光纤中高阶模的激发,从而极大地提高了光纤中模式不稳定阈值。

2018 年, nLIGHT 公司报道了利用 21.9/400 μm 、 $NA=0.059$ 双包层 3C 光纤抑制高阶模,获得 2.6 kW 窄线宽激光输出,实验结构如图 14 所示^[54]。他们在相同实验装置中对弯曲直径为 10 cm 的 20/400/0.064 双包层掺镱光纤和弯曲直径为 30 cm 的 21.9/400/0.059 双包层 3C 光纤进行比较,发现传统 20/400 μm 光纤在输出功率为 2.2 kW 时出现 TMI 效应,而 3C 光纤在输出功率为 2.6 kW 时也未观察到 TMI 现象。实验表明,相比于传统 20/400 μm 双包层光纤,弯曲直径更大的 3C 光纤具有更好的 HOM 抑制能力和更高的 TMI 阈值。而且通过优化 3C 光纤结构设计,可以进一步提高 TMI 阈值,实现高功率输出。这表明模式选择功能光纤具备提高功率的能力,通过优化光纤结构设计抑制 TMI 效应,新型模式选择功能光纤有望在全光纤振荡器中实现更高功率的单模激光输出。

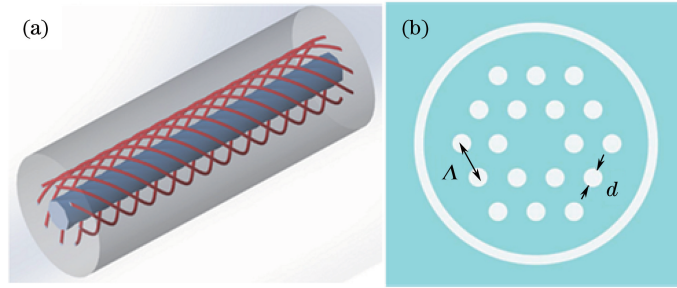


图 13 (a)八根耦合芯设计的 3C 光纤示意图;(b)大间距光纤端面结构图

Fig. 13 (a) Structure of 3C fiber with 8 side cores; (b) cross section of a LPF

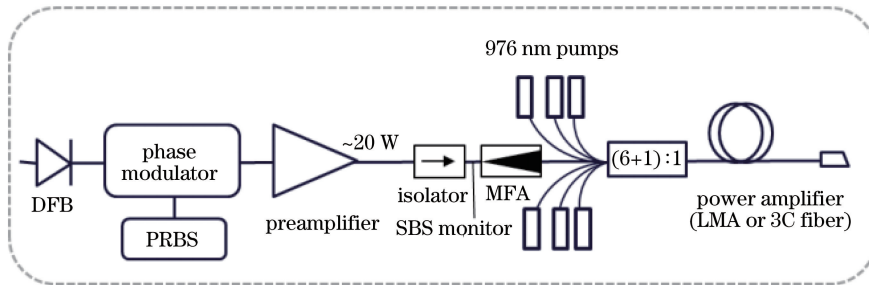


图 14 利用 3C 光纤构成的 2.6 kW 窄带激光放大器结构示意图

Fig. 14 Schematic of 2.6 kW narrowband laser amplifier with 3C fiber

3.2 通过振荡器全局优化设计提高激光功率

在不具备特殊光纤设计和生产,尤其不具备产业化生产能力的情况下,除了选择特殊设计的光纤外,还可以通过振荡器全局优化来提高输出功率,保证光束质量。具体而言,主要包括中心波长优化、抽运波长选择^[55]、抽运方式优化^[56]、光栅反射特性优化^[57]、高效热管理设计^[58]、综合运用光纤振荡器中的非线性效应^[59]和模式不稳定效应^[17]抑制方法,通过全局优化设计,解决影响振荡器功率提升的关键技术问题,实现高功率高质量光束光纤激光输出。

振荡器全局优化设计取决于各个影响因素之间的制约关系。以国防科技大学课题组为例,2014年初采用 915 nm LD 前向抽运 45 m 长 20/400 μm 双包层掺镱光纤实现 1 kW 全光纤激光振荡器输出,但输出功率受限于 SRS 效应。同年,他们通过全局变量优化,将增益光纤长度缩短至 41 m,有效抑制了 SRS,将输出功率提升至 1.5 kW。2015 年,该课题组在已完成实验基础上进一步优化增益光纤长度,获得 2 kW 近单模激光输出,并在 2016 年初搭建 2 kW 全光纤振荡器样机。在原有 20/400 μm 增益光纤基础上,为了获得更大功率输出,该课题组又进行抽运方式和抽运波长的全局优化。2016 年,他们利用 976 nm LD 双向抽运 20/400 μm 掺镱光纤,实现了 2.5 kW 功率输出,光束质量因子 $M^2=1.3$;

同年底,继续优化增益光纤长度和抽运功率分布获得 3 kW 全光纤振荡器。另外,日本 Fujikura 公司也利用全局优化设计获得高功率全光纤振荡器输出。2016 年,该公司实现的 2 kW 全光纤振荡器即为采用 915 nm 双向抽运模场面积 400 μm^2 、 $NA=0.07$ 双包层掺镱光纤的方案。2017 年,他们在此基础上通过优化抽运功率分布,提高后向抽运功率在总抽运功率中的比例,将输出功率提升到 3 kW。由此可见,振荡器全局优化设计在功率提升方面具有一定潜力,通过不同抽运功率分布和增益光纤长度优化等可以获得高功率全光纤激光振荡器。但是目前综合考虑各个影响因素之间关系的全光纤激光振荡器全局优化模型尚未见相关报道,这将是我们的下一步研究的重点。

4 结束语

高功率掺镱光纤激光振荡器是获得单路高功率激光输出的主要方式之一,包括空间耦合结构和全光纤结构。空间结构振荡器紧凑性差,稳定性欠佳,调节精度高,随着全光纤器件的成熟和处理工艺的发展逐渐被全光纤振荡器取代。全光纤振荡器具有结构简单、稳定性好、可扩展性强等优点,目前基于振荡器结构的全光纤激光器已经实现 5 kW 量级衍射极限输出。采用 LD 抽运方式相对级联抽运具

有结构紧凑、成本低廉、转换效率高等优势,因此LD抽运的振荡器结构将成为高功率光纤激光器的的重要组成部分。为了克服全光纤振荡器中的非线性效应和模式不稳定效应,研究人员提出了特殊设计增益光纤和振荡器全局优化设计来提高掺镱光纤激光振荡器的输出功率和光束质量。

综上所述,高功率掺镱光纤激光振荡器未来发展趋势及需要解决的问题如下。

1) 采用特殊设计增益光纤提高激光输出功率。运用具有高阶模式抑制功能的超大模场增益光纤同时抑制振荡器的SRS效应和模式不稳定效应,以提高激光器的输出功率。但是,与此同时特殊设计增益光纤带来的其他光纤器件和工业生产设备匹配问题可能成为难点。

2) 通过振荡器全局优化设计改善激光输出特性。在不具备特殊光纤设计和生产能力的情况下,振荡器全局优化通过优化增益光纤长度、抽运功率分布、光栅反射特性等实现高功率高光束质量的激光输出。但通过全局优化提升振荡器功率具有局限性,而且目前缺乏综合考虑全部影响因素的振荡器优化模型。

可以预见,随着特殊设计增益光纤的技术突破和振荡器全局优化模型的深入研究,传统双包层掺镱光纤面临的非线性效应和模式不稳定问题可以在一定程度上得以解决,有望在未来两三年内将全光纤激光振荡器推向万瓦量级以上的功率输出。

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] Nilsson J, Payne D N. High-power fiber lasers [J]. Science, 2011, 332(6032): 921-922.
- [3] Zervas M N, Codemard C A. Highpower fiber lasers: a review [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2014, 20(5): 219-241.
- [4] Zervas M N. High power ytterbium-doped fiber lasers: fundamentals and applications [J]. International Journal of Modern Physics B, 2014, 28(12): 1442009.
- [5] Dominic V, MacCormack S, Waarts R, *et al.* 110 W fibre laser [J]. Electronics Letters, 1999, 35(14): 1158-1160.
- [6] Gapontsev V, Gapontsev D, Platonov N, *et al.* 2 kW CW ytterbium fiber laser with record diffraction-limited brightness [C] // Conference on Lasers and Electro-Optics Europe, 2005: 508.
- [7] Product information [EB/OL]. [2018-03-02]. http://www.nufern.com/tech_center/#.
- [8] Yu H, Kliner D A V, Liao K, *et al.* 1.2-kW single-mode fiber laser based on 100-W high-brightness pump diodes [J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8237: 82370G.
- [9] O-LASE-easy integration to laser system [EB/OL]. [2018-03-02]. <http://www.corelase.fi/products/o-lase/>.
- [10] RedPOWER © OEM [EB/OL]. [2018-03-02]. <https://www.spilasers.com/industrial-fiber-lasers/redpower/redpower-oem/?>.
- [11] O'Connor M, Gapontsev V, Fomin V, *et al.* Power scaling of SM fiber lasers toward 10 kW [C] // Conference on Lasers and Electro-Optics/International Quantum Electronics Conference, OSA, 2009: CThA3.
- [12] Shiner B. The impact of fiber laser technology on the world wide material processing market [C] // Conference on Lasers and Electro-Optics Europe, 2013: AF2J.1.
- [13] Dai S J, He B, Zhou J, *et al.* 1.5 kW near single-mode all-fiber laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(7): 0702001.
代守军, 何兵, 周军, 等. 1.5 kW 近单模全光纤激光器 [J]. 中国激光, 2013, 40(7): 0702001.
- [14] Yu H L, Zhang H W, Lv H, *et al.* 315 kW direct diode-pumped near diffraction-limited all-fiber-integrated fiber laser [J]. Applied Optics, 2015, 54(14): 4556-4560.
- [15] 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): 1105001.
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): 1105001.
- [16] Smith A V, Smith J J. Mode instability in high power fiber amplifiers [J]. Optics Express, 2011, 19(11): 10180-10192.
- [17] Hansen K R, Alkeskjold T T, Broeng J, *et al.* Theoretical analysis of mode instability in high-power fiber amplifiers [J]. Optics Express, 2013, 21(2): 1944-1971.
- [18] Haarlammert N, de Vries O, Liem A, *et al.* Build up and decay of mode instability in a high power fiber amplifier [J]. Optics Express, 2012, 20(12): 13274-

- 13283.
- [19] Tao R M, Wang X L, Xiao H, *et al.* Theoretical study of the threshold power of mode instability in high-power fiber amplifiers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(1): 0114002.
陶汝茂, 王小林, 肖虎, 等. 高功率光纤放大器中模式不稳定阈值功率的理论研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(1): 0114002.
- [20] 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.
- [21] History of MAX Photonics[EB/OL]. [2018-03-05]. <http://www.maxphotonics.com/qylc.htm>.
- [22] Jeong Y, Sahu J K, Payne D N, *et al.* Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1 kW continuous-wave output power[C] // Conference on Lasers and Electro-Optics Europe, 2004: PDP13.
- [23] Jeong Y, Sahu J K, Payne D N, *et al.* Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1.36 kW continuous-wave output power [J]. *Optics Express*, 2004, 12(25): 6088-6092.
- [24] Jeong Y C, Boyland A J, Sahu J K, *et al.* Multi-kilowatt single-mode ytterbium-doped large-core fiber laser[J]. *Journal of the Optical Society of Korea*, 2009, 13(4): 416-422.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] Yu H L, Wang X L, Tao R M, *et al.* 15 kW, near-diffraction-limited, high-efficiency, single-end-pumped all-fiber-integrated laser oscillator [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(34): 8055-8059.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] Mashiko Y, Nguyen H K, Kashiwagi M, *et al.* 2 kW single-mode fiber laser with 20-m long delivery fiber and high SRS suppression [J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9728: 972805.
- [31] Yang B L, Zhang H W, 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.
- [32] 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.
- [33] 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, 43(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, 43(4): 0401003.
- [34] Zhang X, Zhang F, Zheng W, *et al.* 2-kW single-mode fiber laser employing bidirectional-pump scheme [J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10619: 106190G.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] Liao L, Liu P, Xing Y B, *et al.* A kW continuous-wave ytterbium-doped all-fiber laser oscillator with domestic fiber components and gain fiber[J]. *Chinese Physics Letters*, 2015, 32(6): 064201.
- [39] Wang X L, Tao R M, Zhang H W, *et al.* 1 kilowatt single-end pumped all-fiber laser oscillator with good beam quality and high stability[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(11): 1105001.
王小林, 陶汝茂, 张汉伟, 等. 1 kW 单端抽运、高光束质量、高稳定性全光纤激光振荡器[J]. *中国激光*, 2014, 41(11): 1105001.
- [40] Zhang H W, Wang X L, Yang B L, *et al.* All-fiber laser oscillator realized 2.5 kW power and single

- mode output [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(11): 1115002.
- 张汉伟, 王小林, 杨保来, 等. 全光纤振荡器实现 2.5 kW 单模输出 [J]. 中国激光, 2016, 43(11): 1115002.
- [41] Zhang H W, Yang B L, Wang X L, *et al.* 2.7 kW all-fiber laser oscillator based on domestic 25/400 μm gratings [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(12): 1215001.
- 张汉伟, 杨保来, 王小林, 等. 基于国产 25/400 μm 光栅的 2.7 kW 全光纤激光振荡器 [J]. 中国激光, 2017, 44(12): 1215001.
- [42] Zhang H W, Wang X L, Yang B L, *et al.* All-fiber laser oscillator with output power break through 3 kW [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(4): 0415001.
- 张汉伟, 王小林, 杨保来, 等. 输出功率突破 3 kW 的全光纤激光振荡器 [J]. 中国激光, 2017, 44(4): 0415001.
- [43] 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.
- [44] Yla-Jarkko K H, Codemard C, Singleton J, *et al.* Low-noise intelligent cladding-pumped L-band EDFA [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2003, 15(7): 909-911.
- [45] Chen J B, Cao J Q, Pan Z Y, *et al.* Multi-stage cascaded distributed side pumped fiber optic oscillator based on domestic optical fiber for power output of 2 kW [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(4): 0415002.
- 陈金宝, 曹润秋, 潘志勇, 等. 基于国产光纤的多级级联分布式侧面抽运光纤振荡器实现 2 kW 的功率输出 [J]. 中国激光, 2017, 44(4): 0415002.
- [46] Chen J B, Cao J Q, Huang Z H, *et al.* Multi-stage cascade distributed side-pumped fiber optic oscillator based on domestic optical fiber for power output of 3 kW level with strong Raman suppression [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(3): 0315002.
- 陈金宝, 曹润秋, 黄值河, 等. 基于国产光纤的多级级联分布式侧面抽运光纤振荡器实现强拉曼抑制的 3 kW 量级功率输出 [J]. 中国激光, 2018, 45(3): 0315002.
- [47] Ma X, Liu C H, Chang G Q, *et al.* Angular-momentum coupled optical waves in chirally-coupled-core fibers [J]. Optics Express, 2011, 19(27): 26515-26528.
- [48] Dong L, Peng X, Li J. Leakage channel optical fibers with large effective area [J]. Journal of the Optical Society of America B, 2007, 24(8): 1689-1697.
- [49] Stutzki F, Jansen F, Eidam T, *et al.* High average power large-pitch fiber amplifier with robust single-mode operation [J]. Optics Letters, 2011, 36(5): 689-691.
- [50] Jain D, Jung Y, Nunez-Velazquez M, *et al.* Extending single mode performance of all-solid large-mode-area single trench fiber [J]. Optics Express, 2014, 22(25): 31078-31091.
- [51] 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.
- [52] Ma X, Zhu C, Hu I, *et al.* Single-mode chirally-coupled-core fibers with larger than 50 μm diameter cores [J]. Optics Express, 2014, 22(8): 9206-9219.
- [53] Limpert J, Stutzki F, Jansen F, *et al.* Yb-doped large-pitch fibres: effective single-mode operation based on higher-order mode delocalisation [J]. Light: Science & Applications, 2012, 1(4): e8.
- [54] Kanskar M, Zhang J, Koponen J, *et al.* Narrowband transverse-modal-instability (TMI)-free Yb-doped fiber amplifiers for directed energy applications [J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10512: 105120F.
- [55] Tao R M, Ma P F, Wang X L, *et al.* Mitigating of modal instabilities in linearly-polarized fiber amplifiers by shifting pump wavelength [J]. Journal of Optics, 2015, 17(4): 045504.
- [56] Tao R M, Ma P F, Wang X L, *et al.* Theoretical study of pump power distribution on modal instabilities in high power fiber amplifiers [J]. Laser Physics Letters, 2017, 14(2): 025002.
- [57] Chai Q, Liu Y, Zhang J, *et al.* Asymmetric transmission and reflection spectra of FBG in single-multi-single mode fiber structure [J]. Optics Express, 2015, 23(9): 11665-11673.
- [58] Jauregui C, Eidam T, Limpert J, *et al.* Impact of modal interference on the beam quality of high-power fiber amplifiers [J]. Optics Express, 2011, 19(4): 3258-3271.
- [59] Zhu J, Zhou P, Ma Y, *et al.* Power scaling analysis of tandem-pumped Yb-doped fiber lasers and amplifiers [J]. Optics Express, 2011, 19(19): 18645-18654.