

光学学报

LD 泵浦高平均功率、高光束质量掺镱光纤激光振荡器与放大器研究进展

杨保来^{1,2,3}, 王鹏^{1,2,3}, 奚小明^{1,2,3}, 马鹏飞^{1,2,3}, 王小林^{1,2,3}, 王泽锋^{1,2,3*}

¹国防科技大学前沿交叉学科学院, 湖南长沙 410073;

²国防科技大学南湖之光实验室, 湖南长沙 410073;

³高能激光技术湖南省重点实验室, 湖南长沙 410073

摘要 综述了近年来公开报道的 LD 泵浦光纤激光器的研究进展及典型结果, 分为光纤激光振荡器、光纤激光放大器和“振荡+放大一体化”激光器 3 个部分进行介绍。在光纤激光振荡器部分, 介绍了空间结构光纤振荡器和全光纤结构光纤振荡器的发展及典型结果; 在光纤放大器部分, 重点对大于 5 kW 功率的典型光纤放大器进行介绍; 最后, 对改进的“振荡+放大一体化”激光器的典型结果及技术优势进行介绍。

关键词 掺镱光纤; 高功率; 光纤激光振荡器; 光纤激光放大器

中图分类号 O436 **文献标志码** A

DOI: 10.3788/AOS230975

1 引言

光纤激光器是以稀土离子掺杂光纤为激光增益介质的一种激光器。与传统的气体 and 固体激光器相比, 高功率光纤激光器拥有高转换效率、高光束质量、高稳定性、热管理方便等技术优势, 同时还兼具可紧凑化集成、轻量化、可适应恶劣工作环境等优点, 在激光打标、切割焊接、增材制造等领域得到了广泛应用^[1-4]。高功率光纤激光光源的实现技术路径主要可以分为多路激光光束合成与单路光纤激光器直接实现高功率激光两种。光束合成的技术方案又分为非相干合束^[5-9]、相干合束^[10-15]及光谱合束^[16-22]等方法, 将多路激光合成为一路高功率激光, 不同的光束合成方法拥有各自的技术特点和面向的应用场景。单路光纤激光器直接实现高功率激光, 实现方案更加简单直接, 既可以在达到一定功率水平后直接进行应用, 也可以用作光束合成的光源模块。千瓦量级的高光束质量光纤激光器已经广泛应用于新能源产业中动力电池极耳焊接、手持焊等, 高光束质量的光纤光源可显著提升焊接质量和效率。对于光束合成应用, 单路光源的光束质量直接影响光束合成后的光束质量。

高功率单纤光纤激光器通常有单谐振腔的光纤激光振荡器与多级结构的光纤激光放大器两种实现方式。单谐振腔的光纤激光振荡器通过高功率半导

体泵浦源(LD)直接泵浦光纤谐振腔直接输出高功率激光; 光纤放大器则采用一级或者多级放大结构, 将低功率或者中等功率的种子激光放大, 从而实现高功率激光输出。相比于光纤放大器, 单谐振腔全光纤激光振荡器有以下技术优势: 1) 全光纤激光振荡器采用单级谐振腔, 结构更加简单、紧凑, 所需器件更少, 激光器的批量生产效率更高; 2) 全光纤激光振荡器对材料加工等应用中产生的回光并不敏感, 工作稳定性更好; 3) 光纤激光振荡器只有单级结构, 控制逻辑更加简单, 操作控制更加方便。光纤放大器对于光纤光栅承受功率的要求不高, 不会受到光纤光栅工艺水平的限制, 而且经过优化设计的光纤放大器可实现比振荡器更高的转换效率; 同时, 光纤放大器在横向模式不稳定(TMI)阈值提升方面也更有优势^[23-26]。此外, 光纤放大器在实现窄谱激光高功率放大方面也有较为广泛的应用^[27-33]。

本文对高平均功率、高光束质量光纤激光振荡器及放大器近年来的研究进展进行综述, 分别介绍高功率光纤振荡器及光纤放大器在发展过程中的代表性成果, 梳理各自的技术发展脉络, 对当前阶段遇到的“瓶颈性”技术难题进行介绍, 并对未来发展方向进行展望。此外, 对于近年来提出的结合振荡器和放大器优点的“振荡+放大一体化”激光器进行详细的梳理和介绍, 对其物理本质和技术优势进行介绍, 并展望其未来

收稿日期: 2023-05-15; 修回日期: 2023-07-07; 录用日期: 2023-07-17; 网络首发日期: 2023-08-02

基金项目: 国家自然科学基金(62005315)、脉冲功率激光技术国家重点实验室开放基金(SKL2022ZR02)

通信作者: *zefengwang_nudt@163.com

的发展趋势。

2 高功率、高光束质量掺镱光纤激光振荡器研究进展

得益于半导体泵浦源亮度的快速提升、光纤无源器件及双包层掺镱光纤制作工艺的发展,LD 泵浦高功率掺镱光纤振荡器的输出功率水平在过去十多年中得

到了快速提升。随着双包层光纤光栅制作工艺的发展,高功率单谐振腔光纤振荡器也从早期的以空间结构为主,逐渐发展过渡到全光纤结构成为主流的技术方案。本文重点梳理了过去十多年来高功率光纤振荡器的典型结果^[34-54],如表 1 所示。下面分别对空间结构光纤激光振荡器与全光纤结构激光振荡器进行介绍和综述。

表 1 近年来高功率光纤振荡器的典型结果
Table 1 Typical researches on high power fiber laser oscillators in recent years

Year	Organization	Power /kW	Beam quality	Fiber parameter	Configuration	Ref.
2004	University of Michigan	0.81	$M^2=1.27$	20/400 μm	Spatial	[34]
2004	University of Southampton	1.0	$M^2\approx 3.4$	43/400 μm	Spatial	[35]
2004	University of Southampton	1.36	$M^2\approx 1.4$	40/400 μm	Spatial	[36]
2009	Tampere University of Technology	0.6	$M^2\leq 1.08$	Tapered fiber	Spatial	[37]
2010	Tampere University of Technology	0.75	$M^2=1.7$	Tapered fiber	Spatial	[37]
2012	Alfalight Inc.	1.0	$M^2\approx 1.3$	20/400 μm	All-fiber	[38]
2012	JDSU	1.2	$M^2<1.2$	20/400 μm	All-fiber	[39]
2012	Rofin	2.0	$M^2\approx 1.3$	20/400 μm	All-fiber	[40]
2014	NUDT	1.5	$M^2<1.2$	20/400 μm	All-fiber	[41]
2014	Coherent Inc.	3	$M^2=1.15$		Spatial	[42]
2015	Tianjin University	1.6	$M^2<1.1$	20/400 μm	All-fiber	[43]
2016	Fujikura Inc.	2.0	$M^2\approx 1.2$	Mode area: 400 μm^2	All-fiber	[44]
2016	NUDT	2.5	$M^2\approx 1.3$	20/400 μm	All-fiber	[45]
2017	Fujikura Inc.	3.0	$M^2\approx 1.3$	Mode area: 400 μm^2	All-fiber	[46]
2018	NUDT	3.05	$M^2\approx 1.3$	20/400 μm	All-fiber	[47]
2018	NUDT	5.2	$M^2\approx 2.2$	25/400 μm	All-fiber	[48]
2018	Fujikura Inc.	5.0	$M^2\approx 1.3$	Mode area: 600 μm^2	All-fiber	[49]
2018	NUDT	5.07	$M^2\approx 1.6$	25/400 μm	All-fiber	[50]
2018	University of Jena	4.8	$M^2\approx 1.3$	20/400 μm	All-fiber	[51]
2019	Laserline Inc.	10-17.5	4-8 mm·mrad	Core diameter: 50-90 μm	Spatial	[52]
2020	Fujikura Inc.	8.0	0.5 mm·mrad	Mode area: 600 μm^2	All-fiber	[53]
2022	NUDT	7.9	$M^2\approx 2.5$	30/600 μm	All-fiber	[54]

2.1 空间结构光纤激光振荡器研究进展

空间结构光纤振荡器早在 2004 年就已经实现千瓦量级激光功率输出。2004 年,美国密歇根大学 Liu 等^[34]实现了 810 W 功率光纤激光振荡器。他们利用双色镜和透镜将 915 nm、936 nm 和 976 nm 3 个波长的泵浦光耦合到纤芯直径为 20 μm 、内包层直径为 400 μm 的双包层掺镱光纤,利用光纤两端切平角形成的端面菲涅耳反射结构构成谐振腔,从而形成激光振荡^[34],振荡器的结构示意图如图 1 所示。当两端注入高功率泵浦光时,谐振腔形成激光振荡,实现双向共计 0.81 kW 功率的近单模激光输出,斜率效率达到 70%。该研究结果证明了采用大模场掺镱光纤振荡器能够实现高功率激光输出。

2004 年,英国南安普顿大学 Jeong 等^[35]采用空间耦合的双向泵浦结构,利用纤芯直径为 43 μm 、内包层直径为 400 μm 的双包层掺镱光纤最早实现了 1.0 kW

以上功率的光纤激光振荡器,光束质量 $M^2\approx 3.4$ (图 2)。同年,该研究小组通过优化掺镱光纤的参数(纤芯直径减小至 40 μm ,纤芯数值孔径 NA 降低至 0.05),将激光振荡器的输出功率进一步提升至 1.36 kW,光束质量 $M^2\approx 1.4$ ^[36]。

2009 年,芬兰坦佩雷理工大学 Filippov 等^[37]报道了采用锥形掺镱光纤的空间耦合结构振荡器,其实验结构如图 3 所示,在锥形光纤的粗端耦合注入高功率泵浦光,在细端切平角形成端面反射结构,在粗端通过双色镜、透镜及反射镜形成高反射腔镜,从而构成谐振腔,最终获得输出功率为 0.6 kW、光束质量 $M^2\leq 1.08$ 的单模激光。2010 年, Filippov 等^[55]通过继续优化锥形光纤的结构参数,实现了 0.75 kW 功率、80% 斜率效率的锥形掺镱光纤振荡器。锥形掺镱光纤的优势在于:粗端具有较大的内包层直径,可用于高功率泵浦光耦合,且细端能够保证较好的输出光束质量。

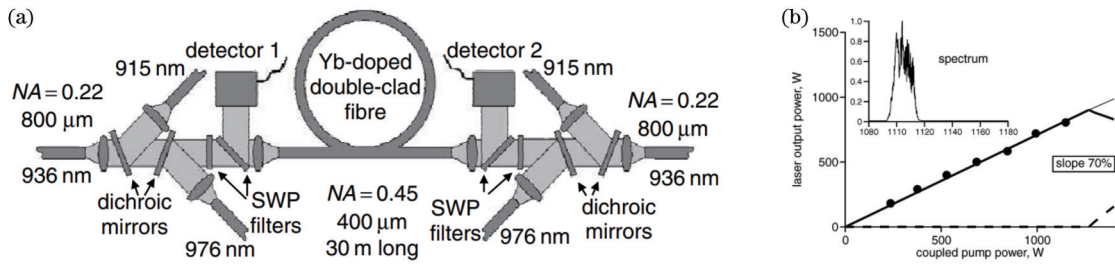


图 1 双向泵浦空间结构光纤激光振荡器^[34]。(a)结构示意图;(b)实验结果
Fig. 1 Bidirectional-pumped fiber laser oscillator^[34]. (a) Structure schematic; (b) experimental results

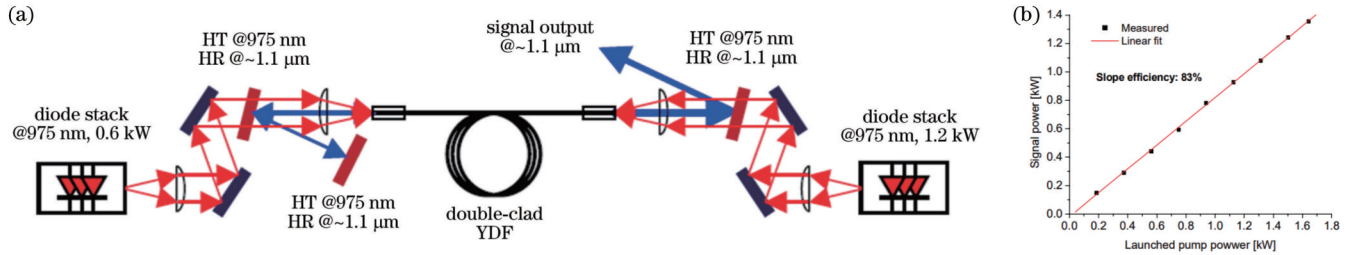


图 2 南安普顿大学研制的空间结构光纤激光振荡器^[35]。(a)结构示意图;(b)实验结果
Fig. 2 Fiber laser oscillator in spatial configuration developed by University of Southampton^[35]. (a) Structure schematic; (b) experimental results

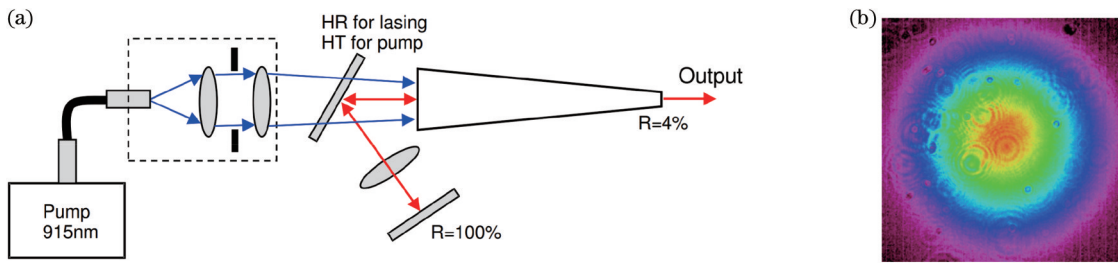


图 3 基于锥形掺镱光纤的空间结构光纤激光振荡器^[37]。(a)结构示意图;(b)输出光斑

Fig. 3 Tapered ytterbium-doped fiber laser oscillator in spatial configuration^[37]. (a) Structure schematic; (b) output laser beam profile

2014年,美国相干公司Khitrov等^[42]研制出低数值孔径(0.04~0.05)的掺镱光纤,并利用该光纤设计了图4所示的空间结构光纤振荡器。采用高反射镜空间耦合形成高反射腔镜,并在掺镱光纤另一侧切平角形成端面反射,从而构成谐振腔。在976 nm泵浦光条件

下,激光器实现了3 kW激光输出,激光器内的非线性效应得到了较好的控制,斜率效率达到了74%,输出激光的光束质量 $M^2=1.15$ 。在此之后,随着光纤光栅制作工艺的成熟,空间结构激光振荡器的报道逐渐减少。

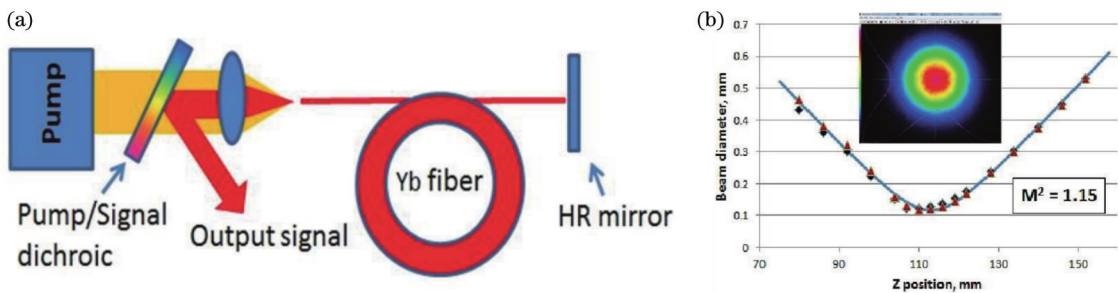


图 4 相干公司 3 kW 级空间结构光纤激光振荡器^[42]。(a)结构示意图;(b)实验结果

Fig. 4 3 kW fiber laser oscillator developed by Coherent Inc.^[42]. (a) Structure schematic; (b) experimental results

对于空间结构光纤激光振荡器还有值得一提的研究结果是,2019年 Laserline 公司 Ackermann 等^[52]采用

空间结构实现的超大模场多模光纤振荡器,激光器结构如图5所示。泵浦光通过空间结构耦合注入超大模

场多模掺镱光纤,通过空间结构反射镜形成腔镜。当采用图 5(a)所示的单端泵浦时,可以实现 10 kW 激光输出,光束参量积(BPP)为 4~8 mm·mrad;当采用图 5(b)所示的双端泵浦时,可以实现最高 17.5 kW 激光

输出,光束参量积为 8 mm·mrad。这样的光束参量积能够满足许多工业应用的要求,该结果也是空间结构光纤振荡器所实现的最高功率水平。

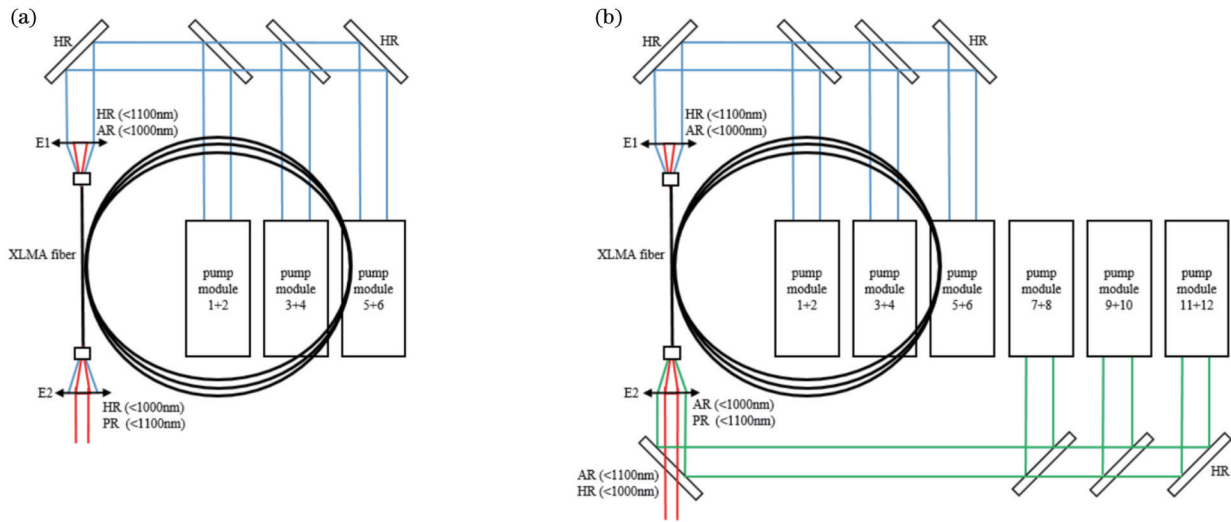


图 5 Laserline 公司 10 kW 级空间结构超大模场多模光纤激光振荡器结构示意图^[52]。(a)单端泵浦;(b)双端泵浦

Fig. 5 Schematic of 10 kW extreme large mode area fiber laser oscillator in spatial configuration developed by Laserline Inc.^[52].

(a) Single-end pump; (b) dual-end pump

虽然空间结构光纤振荡器也能够实现较高的功率水平,但是在工作稳定性、调试便利性及紧凑化集成方面与全光纤激光器结构有明显的差距。因此,随着大模场光纤光栅制作工艺的成熟及光纤光栅制作成本逐渐降低,空间结构光纤振荡器的报道和应用逐渐减少,而全光纤结构光纤振荡器成为应用领域的主流技术方案,高功率、高光束质量全光纤振荡器的研究结果逐渐增多。

2.2 全光纤结构光纤激光振荡器研究进展

光纤光栅在单模光纤中较早得到了应用^[56],但可用于高功率谐振腔腔镜的大模场光纤光栅在 2010 年前后才逐渐成熟,大模场光纤光栅的理论设计、光栅制作、封装测试等技术的突破和发展^[57-59],使得全光纤结构的单谐振腔振荡器迅速成为研究热点。本文按照时间顺序,并结合全光纤振荡器的技术发展,把 2010 年至今的全光纤振荡器的研究进展分为 3 个阶段进行介绍,即 2010—2015 年、2016—2018 年以及 2019 年至今。

第一个阶段(2010—2015 年),国内外多家研究单位和公司公开报道了 1~2 kW 功率的全光纤结构激光振荡器的研究结果或产品。受限于此时的泵浦功率水平、光纤光栅承受功率水平、泵浦/信号合束器的制作水平等,全光纤振荡器的功率在 2 kW 以内。尽管各家研究单位和公司所采用的泵浦 LD 的波长和功率水平各不相同,但是就谐振腔的光学设计而言,均采用纤芯/内包层直径为 20/400 μm 的双包层掺镱光纤作为增益光纤,均选用纤芯/内包层直径为 20/400 μm 的光

纤光栅对作为腔镜构成全光纤结构谐振腔。2010 年,Corelase 公司发布了 1 kW 功率的全光纤激光振荡器^[60]。2012 年,Alfalight 公司 Xiao 等^[38]报道了采用单端前向泵浦实现 1 kW 功率全光纤振荡器的研究结果。同年,JDSU 公司 Yu 等^[39]也报道了基于 19:1 泵浦合束方式的 1.2 kW 功率全光纤振荡器的研究进展。同年,Rofin 公司 Stefan 等^[40]也报道了双向泵浦结构的 2 kW 功率近单模全光纤振荡器的研究进展(图 6)。国内国防科技大学(NUDT)、天津大学也开展了全光纤振荡器的研究并对典型结果及进展进行了报道。2014 年,国防科技大学 Yu 等^[41, 61]先后报道了 1 kW 和 1.5 kW 功率的近单模全光纤振荡器,均采用 915 nm LD 前向泵浦结构。2015 年,天津大学史伟等^[43]也报道了输出功率为 1.6 kW 的全光纤振荡器,采用 976 nm LD 前向泵浦结构。在此功率范围内,谐振腔内对非线性效应和模式不稳定效应的限制并不显著。其他研究单位只需合理设计谐振腔的结构参数及合理设计泵浦源方案^[62-66],就可以实现该功率水平的振荡器。

第二个阶段(2016—2018 年),全光纤激光振荡器的输出功率水平得到了快速提升,迅速从 2 kW 水平提升至 5 kW 水平。在此阶段,功率提升的实现始终需要对谐振腔内的非线性效应与模式不稳定效应进行有效抑制,各单位采取了各具特色的技术方案,形成了各自的发展路径。2016—2018 年,藤仓公司、国防科技大学和耶拿大学分别采用 3 种不同模场面积的掺镱光纤,均实现了 5 kW 级全光纤激光振荡器^[48-49, 67],它们是现阶段光纤振荡器研究中最具代表性的进展。

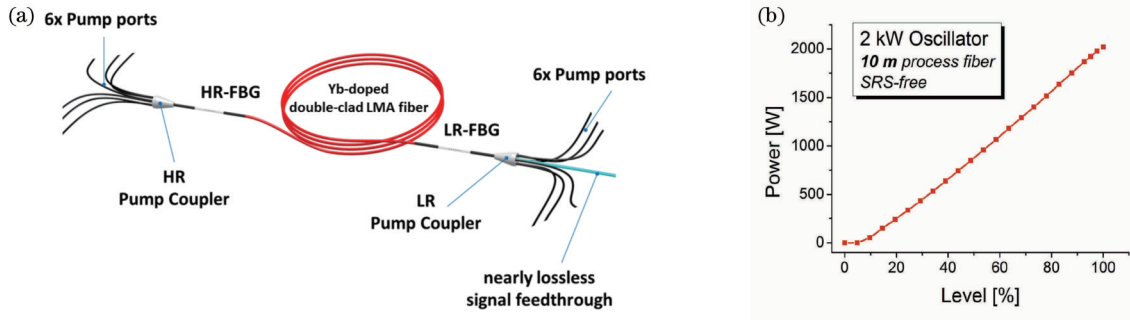


图 6 Rofin 公司 2 kW 全光纤激光振荡器^[40]。(a)结构示意图;(b)输出功率曲线

Fig. 6 2 kW all-fiber laser oscillator developed by Rofin^[40]. (a) Structure schematic; (b) output power curve

2016 年,藤仓公司 Mashiko 等^[44]报道了可配备 20 m 传输光纤的 2 kW 全光纤振荡器,采用双向 915 nm LD 泵浦结构,掺镱光纤采用特殊设计时可达 400 μm^2 的模场面积,能够较好地抑制光纤内的非线性效应。当功率为 2 kW 时,激光光束质量 $M^2 \approx 1.2$,即使配备 20 m 长的传输光纤,也能够实现 50 dB 以上的信号光/拉曼斯托克斯光抑制比。随后在 2017 年,藤仓公司 Ikoma 等^[46]报道了基于该类型掺镱光纤的 3 kW 功率全光纤振荡器,输出激光光束质量 $M^2 \approx 1.3$,在配备 20 m 传输光纤时也可以实现大于

35 dB 的信号光/拉曼斯托克斯光抑制比。2018 年,藤仓公司 Ikoma 等^[49]设计了模场面积为 600 μm^2 的新型掺镱光纤,基于该光纤采用双向泵浦结构实现了 5 kW 功率、 $M^2 \approx 1.3$ 的单谐振腔激光器。该激光器仍然能够配备 20 m 长度的传输光纤,其结构方案及结果如图 7 所示。藤仓公司公开的掺镱光纤的参数信息较少,该光纤除具备较大的模场面积外,还能够使基模在谐振腔内获得最大的增益^[49],这也是其能够实现近单模光束质量 5 kW 光纤激光振荡器的关键技术之一。

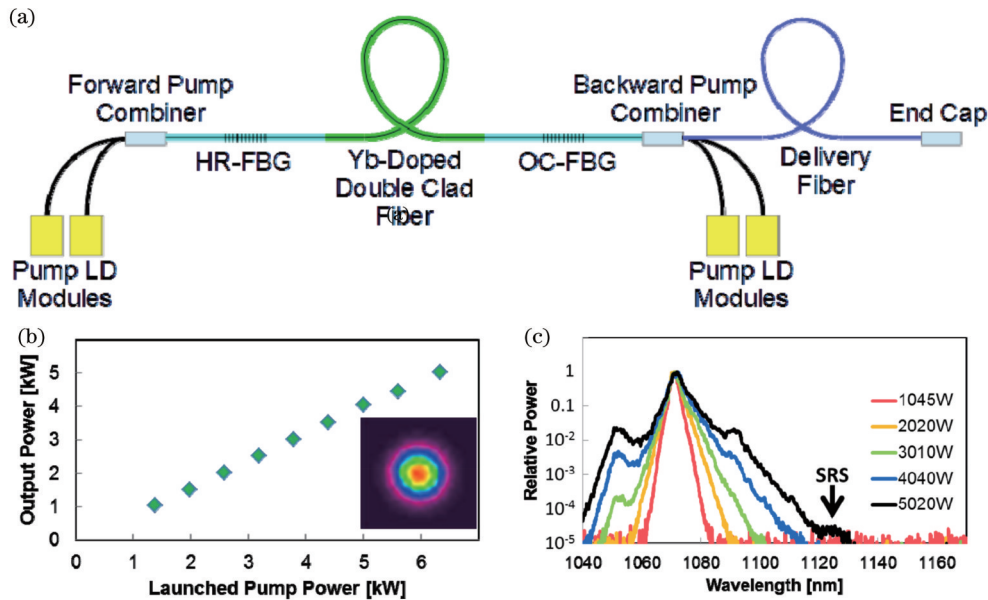


图 7 藤仓公司 5 kW 全光纤激光振荡器^[49]。(a)结构示意图;(b)输出功率;(c)光谱

Fig. 7 5 kW all-fiber laser oscillator in Fujikura Inc.^[49]. (a) Structure schematic; (b) output power; (c) spectra

2016 年,国防科技大学 Yang 等^[45, 47, 68-69]基于 20/400 μm 掺镱光纤的全光纤振荡器开展了系统的优化设计研究,分别实现了 2 kW、2.5 kW 和 3 kW 量级的光纤激光振荡器。由于激光器内的受激拉曼散射(SRS)效应,振荡器的功率提升进一步受到限制。2018 年,国防科技大学 Yang 等^[48, 50, 70]采用更大模场面积的 25/400 μm 掺镱光纤开展振荡器研究,分别实现了 4 kW 及 5 kW(图 8)量级的全光纤激光振荡器,通过

采用双向 915 nm 泵浦方式并结合光纤弯曲盘绕方式,较好地抑制了谐振腔内的模式不稳定效应和 SRS 效应,并能够获得较好的光束质量($M^2 \approx 1.6$)。

2018 年,德国耶拿大学 Möller 等^[51, 67]报道了基于 20/400 μm 掺镱光纤的 5 kW 级全光纤激光振荡器[图 9(a)]。采用 976 nm 双端泵浦结构,掺镱光纤采用柱状盘绕方式以充分利用光纤弯曲损耗来抑制模式不稳定效应。通过合理控制谐振腔内的光纤长度及光纤合

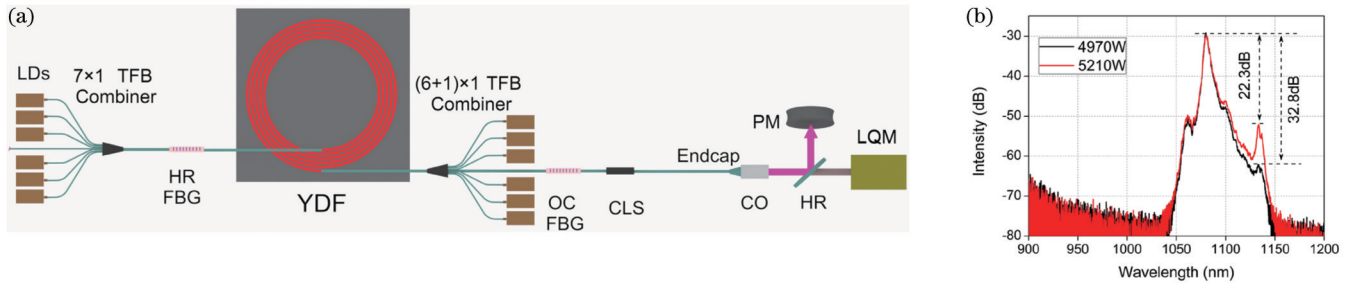


图 8 国防科技大学 5 kW 全光纤激光振荡器^[48]。(a)结构示意图;(b)输出光谱
Fig. 8 5 kW all-fiber laser oscillator in NUDT^[48]. (a) Structure schematic; (b) output spectra

束器等无源器件的传输光纤长度,也实现了 5 kW 级近单模激光输出,光谱如图 9(b)所示,此时已经出现显著的光谱展宽现象,SRS效应也已经较强。

第三个阶段(2019年至今),光纤激光振荡器仍在继续发展,对 5 kW 以上的研究成果的报道相对减少,仅有藤仓公司和国防科技大学两家单位公开报道了 8 kW 级全光纤振荡器。2020年,藤仓公司 Wang 等^[53]报道了 8 kW 功率、近单模光束质量的光纤振荡器,该

振荡器的结构及输出激光光谱如图 10 所示。激光器采用特殊设计的 600 μm^2 模场面积的掺镱光纤,通过优化光纤光栅的反射率(低反光栅的反射率为 6%)并适当缩减传输光纤的长度(约 3 m),最终实现 8 kW 近单模光纤激光输出,光束参量为 0.5 $\text{mm}\cdot\text{mrad}$,最大功率时 1120 nm 的拉曼斯托克斯光抑制比低于 1070 nm 的信号光 22 dB。2020年之后,藤仓公司没有公开报道更高功率水平的振荡器成果。

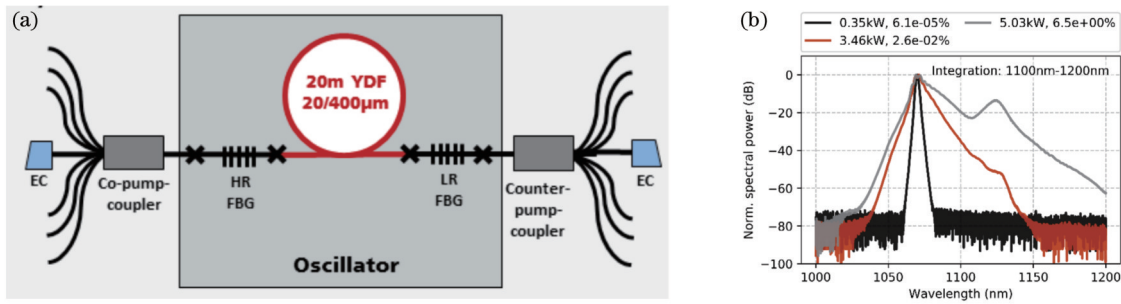


图 9 耶拿大学 5 kW 级全光纤激光振荡器^[67]。(a)结构示意图;(b)输出光谱
Fig. 9 5 kW-level all-fiber laser oscillator in University of Jena^[67]. (a) Structure schematic; (b) output spectra

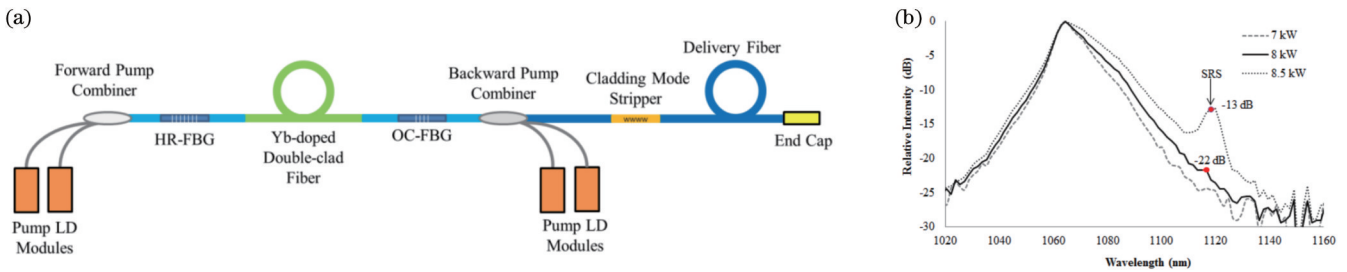


图 10 藤仓公司 8 kW 全光纤激光振荡器^[53]。(a)结构示意图;(b)输出光谱
Fig. 10 8 kW all-fiber laser oscillator in Fujikura Inc.^[53]. (a) Structure schematic; (b) output spectra

2019年之后,国防科技大学也在持续推进光纤激光振荡器的功率提升。为了抑制激光器中的非线性效应,国防科技大学杨保来等^[71]和奚小明等^[72]利用纤芯直径为 30 μm 的大模场掺镱光纤,先后实现了 6 kW、7 kW 功率的全光纤振荡器。值得一提的是,采用更大模场面积的掺镱光纤虽然有效抑制了非线性效应,但也导致输出激光的光束质量出现明显退化。国防科技大学在采用飞秒激光刻写高功率谐振腔应用的光纤光栅方面也取得进展^[73]。2022年,国防科技大学李昊

等^[54]采用飞秒激光刻写的大模场光纤光栅作为谐振腔镜,通过优化谐振腔的结构并抑制非线性效应及模式不稳定效应,实现了 8 kW 级的全光纤振荡器,最大功率时光束质量 $M^2 \approx 2.5$,实验结构及输出光谱、典型光斑如图 11 所示。

2.3 小结

随着光纤光栅制作工艺的成熟以及全光纤结构的优化,全光纤激光振荡器成为主要的技术方案。随着全光纤振荡器的输出功率提升至 8 kW 级,其输出功率

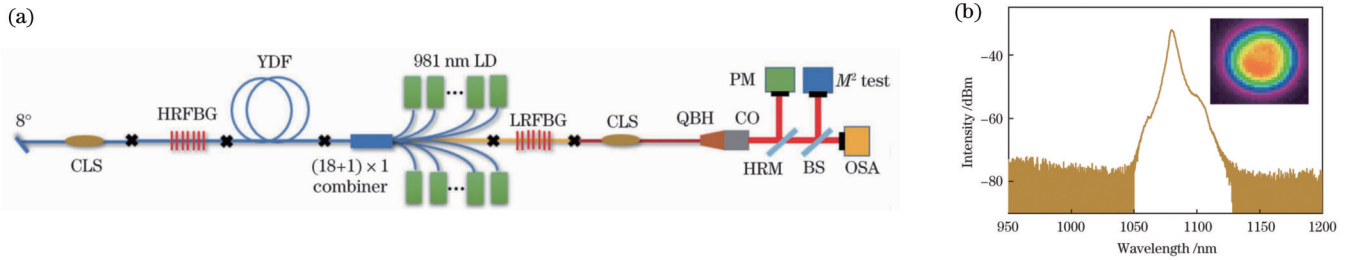


图 11 国防科技大学 8 kW 全光纤激光振荡器^[54]。(a)结构示意图;(b)输出光谱、光斑

Fig. 11 8 kW monolithic fiber laser oscillator in NUDT^[54]. (a) Structure schematic; (b) output spectrum and beam profile

的进一步提升主要面临着非线性效应(主要为 SRS 效应)、模式不稳定效应及超大模场面积光纤光栅刻写技术等方面的限制,各方面均需有所突破才能支撑高光束质量全光纤振荡器功率水平的进一步提升。

对于谐振腔内的 SRS 效应的研究,国内外均已经建立起 SRS 的数值仿真模型^[66, 74-79],能够较好地模拟高功率振荡器的 SRS 强度演化。对于作为腔镜的光纤光栅的参数对激光器 SRS 阈值的影响,也有理论和实验研究支撑^[65-66, 79-80]。为了抑制光纤内的 SRS 效应,必须要求掺镱光纤具有更大的模场面积,同时要求选用的掺杂光纤具备较高的模式不稳定阈值,以支撑实现高功率、高光束质量的光纤振荡器。新型的超大模场掺镱光纤设计制作^[81-82]是下一阶段的光纤振荡器发展的关键技术之一,包括且不局限于锥形光纤^[83-84]、部分掺杂光纤^[85]、低 NA 掺杂光纤^[86-87]以及具备光纤内高阶模式损耗功能的各种新型结构。同时,随着光纤模场面积的增大,要求在更大模场面积的传输光纤上刻写作为腔镜的光纤光栅,提升光纤光栅的承受功率水平并且实现光栅反射谱线精细控制。值得注意的是,近年来飞秒激光刻写的光纤光栅已经在高功率光纤激光振荡器中有较多的应用^[54, 73, 88-89],飞秒激光刻写技术具备在较大芯径光纤上刻写光栅的能力,并且将支撑下一阶段全光纤激光振荡器的发展。

3 高功率、高光束质量光纤激光放大器研究进展

光纤激光放大器不受光纤光栅器件功率水平的限制,随着掺镱光纤制作工艺的进步及 LD 功率和亮度的提升,高功率光纤放大器发展更为迅速,国内外研究单位报道了较多的研究进展及结果^[27-33, 87, 90-129]。考虑到各研究单位有各自的发展历程、技术优势及典型成果,受限于文章篇幅,本文将主要对功率 ≥ 5 kW,且有明确的光束质量数据的光纤放大器的典型成果进行介绍和综述,并对高功率、高光束质量光纤放大器的发展进行展望。近年来,5 kW 及以上光纤放大器的典型成果如表 2 所示。

3.1 大于 5 kW 功率的少模光纤放大器研究进展

2016 年,中国工程物理研究院(CAEP)Zhan 等^[97]报道了基于 GTwave 光纤的 5 kW 级光纤放大器,采用 976 nm LD 双向泵浦特制的(3+1)型 GTwave 掺镱光纤,信号纤的纤芯/内包层直径为 30/250 μm ,泵浦纤的直径为 250 μm ,光纤放大器及 GTwave 光纤的实验结构示意图如图 12 所示。该放大器最高实现了 5.07 kW 激光输出,光光转换效率为 74.5%,在 4.1 kW 时输出激光光束质量 M^2 为 2.3,进一步的功率提升受到非线性效应的限制。

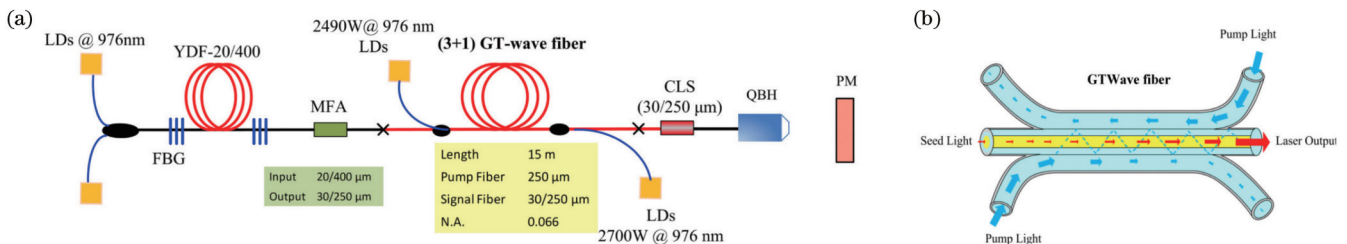


图 12 中国工程物理研究院 5 kW 全光纤放大器结构及 GT-wave 光纤示意图^[97]。(a)放大器结构;(b)GT-wave 光纤

Fig. 12 Schematic of 5 kW all-fiber laser amplifier and GT-wave fiber in CAEP^[97]. (a) Amplifier structure; (b) GT-wave fiber

2017 年,天津大学 Fang 等^[99]报道了基于常规商用 30/600 μm 双包层掺镱光纤的 5 kW 级光纤放大器,光纤放大器的结构示意图如图 13 所示,采用 976 nm 高功率 LD 前向泵浦,在放大级中掺镱光纤设计使用弯曲盘绕方式以抑制高阶模式,从而获得较好的光束质量。当放大级注入 5.35 kW 泵浦光时,输出激光功率

为 5.01 kW,斜率效率达到 86.5%,输出光束质量 $M^2 \approx 1.75$,并且没有观察到模式不稳定效应。

2018 年,清华大学 Xiao 等^[106]报道了基于商用 25/400 μm 掺镱光纤的 6 kW 光纤放大器,光纤放大器的结构示意图如图 14 所示。该放大器采用波长为 975 nm 的非锁模 LD 双向泵浦,放大级采用自制的侧

表 2 近年来 5 kW 及以上功率光纤放大器的典型结果
Table 2 Typical researches on fiber laser amplifiers over 5 kW in recent years

Year	Organization	Power /kW	Beam quality	Fiber parameter	Configuration	Ref.
2016	CAEP	5.07	$M^2 \approx 2.3$ @4.1 kW	(3+1) GTwave Fiber	All-fiber	[97]
2017	Tianjin University	5.01	$M^2 \approx 1.75$	30/600 μm DC-YDF	All-fiber	[99]
2018	Tsinghua University	6.02	$\beta \approx 2.21$	25/400 μm DC-YDF	All-fiber	[99]
2019	CAEP	11.23		(8+1) PIFL	All-fiber	[103]
2019	CAEP	10.6		30/900 μm DC-YDF	All-fiber	[105]
2019	SIOM	10.14		30/600 μm DC-YDF	All-fiber	[112]
2020	CAEP	5.1	$M^2 \approx 1.3$	Mode area: $\sim 700 \mu\text{m}^2$ DC-YDF	All-fiber	[110]
2021	CAEP	5.07	$M^2 \approx 1.3$	Mode area: $\sim 700 \mu\text{m}^2$ DC-YDF	All-fiber	[111]
2021	NUDT	6.02	$M^2 \approx 1.3$	25/400 μm DC-YDF	All-fiber	[107]
2021	NUDT	6.02	$M^2 \approx 1.9$	Tapered-YDF	All-fiber	[126]
2021	NUDT	4.92	$M^2 \approx 1.2$	20/400 μm DC-YDF	All-fiber	[117]
2022	NUDT	6.12	$M^2 \approx 1.4$	20/400 μm DC-YDF	All-fiber	[114]
2022	NUDT	5.0	$M^2 \approx 1.35$	20/400 μm DC-YDF	All-fiber	[127]
2022	NUDT	13	$M^2 \approx 2.85$	30/600 μm DC-YDF	All-fiber	[128]
2023	OFS Lab.	5.0	Single mode	MFD: $\sim 20 \mu\text{m}$ DC-YDF	All-fiber	[129]

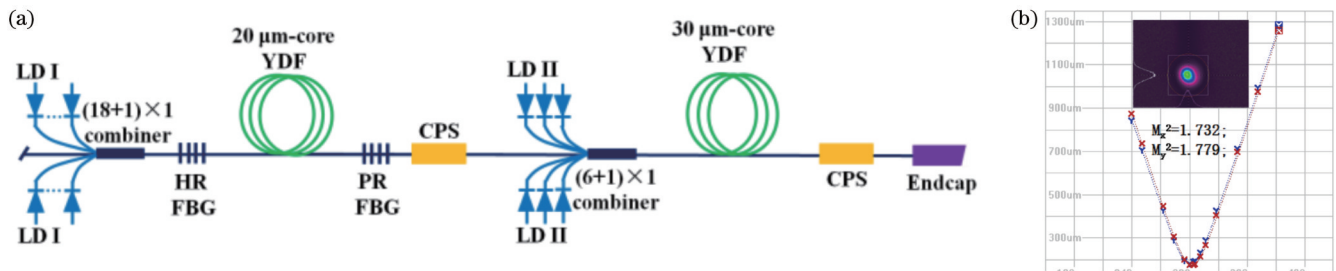


图 13 天津大学 5 kW 全光纤放大器^[99]。(a)结构示意图;(b)光束质量结果
Fig. 13 5 kW all-fiber laser amplifier in Tianjin University^[99]. (a) Structure schematic; (b) laser beam quality

面泵浦合束器。相比于前向泵浦结构,双向泵浦结构能够抑制激光器内的非线性效应。当注入 7.87 kW 泵浦光时,输出激光功率为 6.02 kW,光光转换效率为 76.5%,输出激光光束质量 β 约为 2.21,不同功率下输出激光的光斑形态如图 14(b)所示。该放大器虽然采用了纤芯直径为 25 μm 的掺镱光纤,但输出激光的光束质量仍出现显著退化。

2018 年,中国工程物理研究院林傲祥等^[103-104]采用(8+1)型复合功能光纤实现了大于 10 kW 功率激光输出。同年,中国工程物理研究院林宏兔等^[105]报

道了基于 30/900 μm 掺镱光纤的 10.6 kW 功率光纤放大器。2019 年,中国科学院上海光学精密机械研究所(SIOM)陈晓龙等^[112]也报道了基于自研 30/600 μm 掺镱光纤的 10 kW 光纤放大器。遗憾的是,以上研究结果均未对输出激光的光束质量进行公开报道。

国防科技大学在高功率、高光束质量光纤激光器研究方面也取得较多研究成果。2021 年,国防科技大学 Zeng 等^[130-131]采用纵向结构渐变的纺锤形掺镱光纤实现了 5 kW 级光纤放大器,并在 2022 年进一步将输

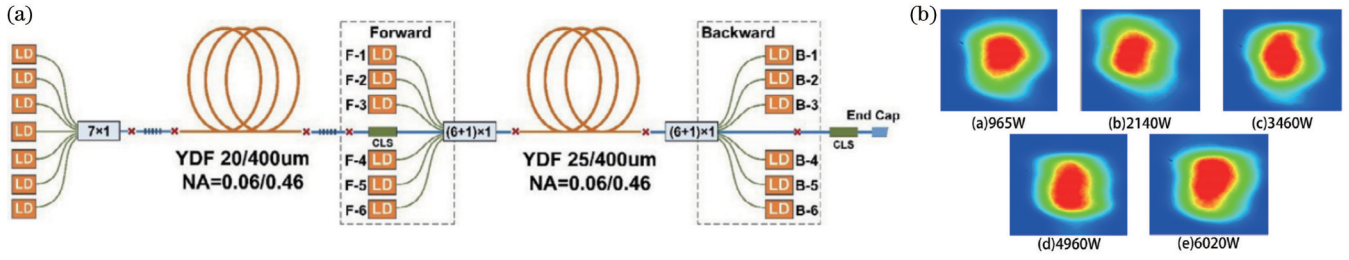


图 14 清华大学 6 kW 全光纤放大器^[106]。(a)结构示意图;(b)光束质量

Fig. 14 6 kW all-fiber laser amplifier in Tsinghua University^[106]. (a) Structure schematic; (b) laser beam quality

出激光功率提升至 6.0 kW^[126], 光纤放大器的实验结构及输出激光光束质量如图 15 所示。纺锤形掺镱光纤的优势是面积沿纵向渐变的模场能够较好地抑制非

线性效应。在放大级注入约 7.68 kW 泵浦光时, 放大器输出激光功率为 6.02 kW, 斜率效率约为 78%, 输出激光光束质量 $M^2 \approx 1.9$ 。

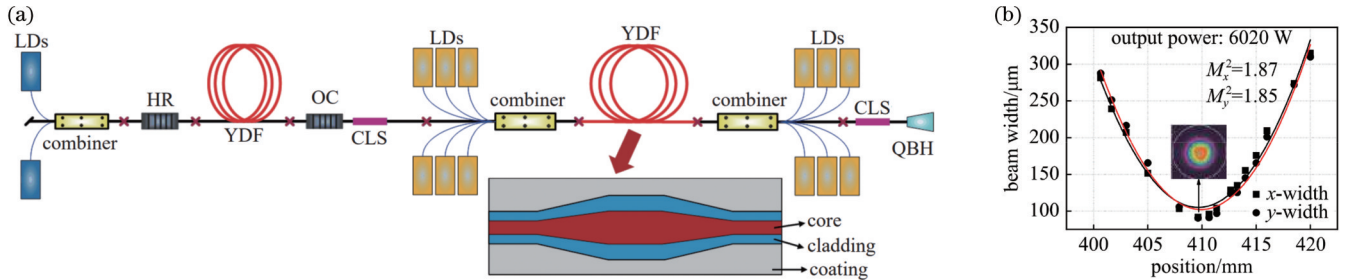


图 15 国防科技大学 6 kW 全光纤放大器^[126]。(a)结构示意图;(b)光束质量

Fig. 15 6 kW all-fiber laser amplifier in NUDT^[126]. (a) Structure schematic; (b) laser beam quality

2022 年, 国防科技大学王鹏等^[128, 132]基于 30/600 μm 掺镱光纤分别实现了 10 kW 和 13 kW 光纤放大器, 其中 13 kW 光纤放大器的结构示意图及光束质量如图 16 所示。放大器采用单端后向泵浦结构来抑制非线性效应, 采用 $(18+1) \times 1$ 型泵浦/信号合束器

耦合高功率泵浦光, 并输出高光束质量信号激光。当输出激光功率为 13 kW 时, 光束质量 $M^2 \approx 2.85$ 。值得一提的是, 国防科技大学奚小明等^[133]也报道了基于 50/800 μm 掺镱光纤放大器实现 20 kW 激光的结果, 输出激光为明显的多模激光 ($M^2 \approx 7 @ 15 \text{ kW}$)。

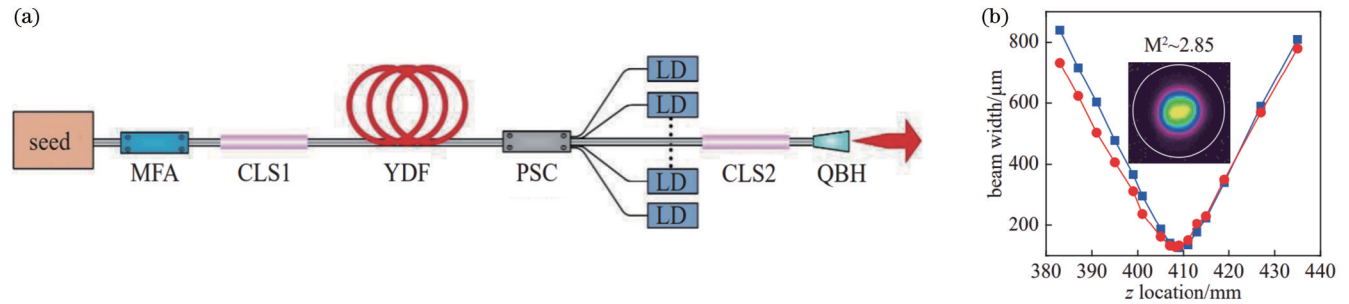


图 16 国防科技大学 13 kW 全光纤放大器^[126]。(a)结构示意图;(b)光束质量

Fig. 16 13 kW all-fiber laser amplifier in NUDT^[126]. (a) Structure schematic; (b) laser beam quality

2016—2022 年, 国内少模光纤放大器的输出功率水平从 5 kW 左右提升至 13 kW, 以上介绍的研究成果均采用纤芯直径为 25~30 μm 的大模场掺镱光纤来抑制激光器内的非线性效应。从光纤放大器大多采用前向泵浦结构, 到后来随着高光束质量后向泵浦合束器件的成熟, 光纤放大器大多采用双向泵浦结构或后向泵浦结构, 激光器的非线性效应阈值进一步提升。然而, 以上研究结果就光束质量结果而言, 由于缺少高效的高阶模式抑制方法, 输出激光包含一定的高阶模式

成分, 从而出现光束质量退化现象。

3.2 大于 5 kW 功率近单模光纤放大器研究进展

应用领域始终存在对高功率近单模光纤激光器的需求, 研究人员也探索了各种方法来抑制大模场掺镱光纤中的高阶模式^[84, 86-87, 98, 119-120, 123, 125, 134-136], 在实现光纤放大器功率提升的同时仍然保持近单模光束质量。国内目前大于 5 kW 功率近单模光纤放大器研究进展方面, 最具代表性的是中国工程物理研究院及国防科技大学的研究成果。国外虽有大于 5 kW 功率的光纤

激光产品报道,但相关公司不公开产品技术方案,而公开报道的学术研究论文相对较少。

2020 年,中国工程物理研究院罗韵等^[110]报道了 5.1 kW 光电控一体式激光器(图 17),采用主振荡功率放大(MOPA)结构,种子激光器采用 20/400 μm 振荡器,放大级采用模场面积约为 700 μm^2 的掺镱光纤,同时使用倾斜光纤光栅对振荡器输出的信号光进行光谱滤波,有效提升了放大器种子光的光谱纯度。通过优化前后向泵浦比例,有效减弱 SRS 效应并提升 TMI 阈值,输出激光最高功率为 5.1 kW,光束质量 M^2 约为

1.3,拉曼抑制比约为 17 dB。

2021 年,中国工程物理研究院 Huang 等^[33, 111]报道了 5 kW 窄线宽光纤放大器(图 18),采用 MOPA 结构,种子激光为级联相位调制激光,放大级采用模场面积约为 320 μm^2 的掺镱光纤,采用 915 nm LD 泵浦,通过优化放大级结构抑制放大级的 SRS 效应,并采用紧密的柱状弯曲盘绕掺镱光纤来提升放大级的 TMI 阈值。输出激光的最高功率为 5.07 kW,斜率效率为 72%,光谱中心波长为 1063.68 nm,光谱 3 dB 带宽为 0.37 nm,光束质量 M^2 约为 1.3。

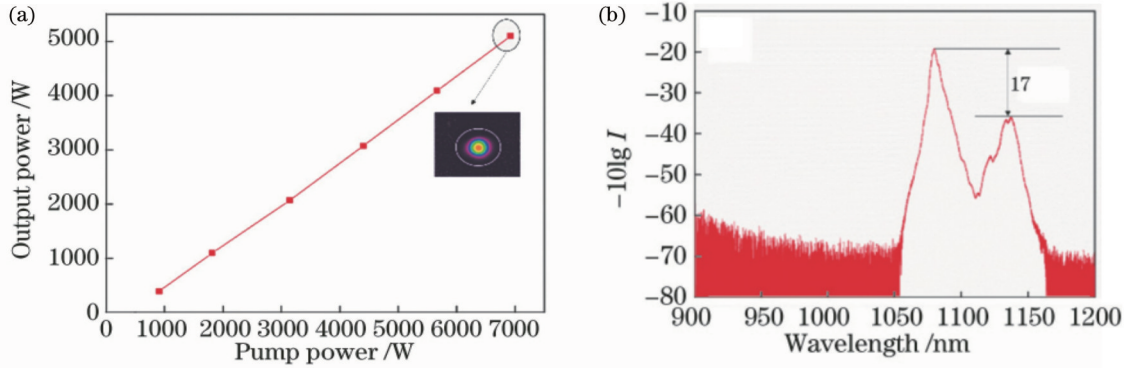


图 17 中国工程物理研究院 5 kW 全光纤放大器功率及光谱^[110]。(a)输出功率;(b)输出光谱

Fig. 17 Output power and spectra of 5 kW all-fiber laser amplifier in CAEP^[110]. (a) Output power; (b) output spectra

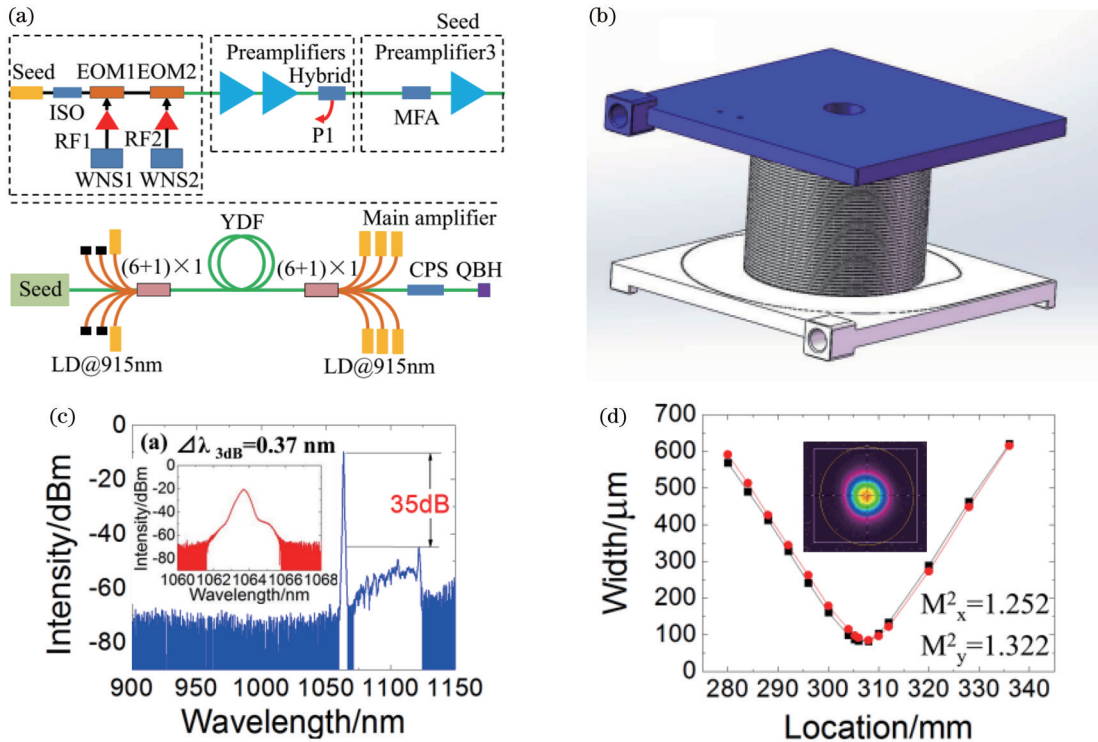


图 18 中国工程物理研究院 5 kW 窄线宽全光纤放大器^[33]。(a)结构示意图;(b)掺镱光纤盘绕结构;(c)输出光谱;(d)光束质量

Fig. 18 5 kW narrow linewidth all-fiber laser amplifier in CAEP^[33]. (a) Structure schematic; (b) mechanical structure of YDF winding; (c) output laser spectra; (d) beam quality

2021 年,国防科技大学 Yang 等^[107]报道了 6 kW 近单模光纤放大器,采用 MOPA 结构,激光器结构如图 19

所示。种子源为 150 W 功率的 20/400 μm 宽谱激光振荡器,放大级采用 25/400 μm 掺镱光纤,并使用定制的

981 nm LD 双向泵浦结合掺镱光纤的弯曲盘绕来抑制激光器内的模式不稳定效应。通过优化前向、后向泵浦

比例,实现最高 6.01 kW 激光输出,光谱中拉曼抑制比约为 20 dB,输出激光的光束质量 M^2 约为 1.3。

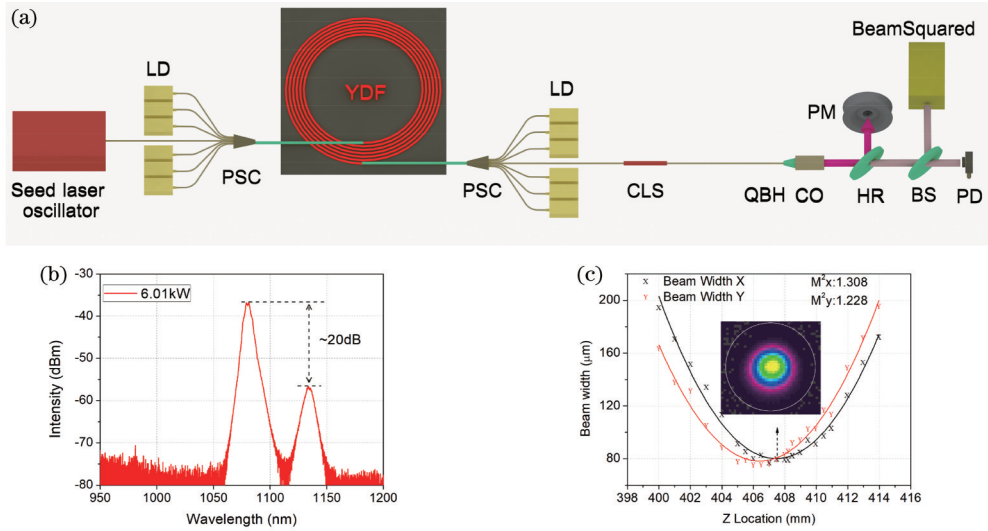


图 19 国防科技大学 6 kW 全光纤放大器^[107]。(a)结构示意图;(b)输出光谱;(c)光束质量

Fig. 19 6 kW all-fiber laser amplifier in NUDT^[107]. (a) Structure schematic; (b) output spectrum; (c) laser beam quality

2021年,国防科技大学 Ma 等^[117]报道了 5 kW 级窄谱光纤放大器,采用级联相位调制种子,主放大级采用 976 nm LD 泵浦 20/400 μm 掺镱光纤,通过设计弯曲盘绕来抑制模式不稳定效应,光纤放大器输出激光的最高功率为 4.92 kW,光谱 3 dB 带宽为 0.59 nm,光束

质量 M^2 约为 1.2。2022年,国防科技大学 Wang 等^[114]采用类似的实验结构将窄谱光纤激光器的输出功率提升至 6.12 kW,输出激光光谱 3 dB 带宽为 0.86 nm,光束质量 M^2 约为 1.4,实验结构示意图及输出激光光谱、光束质量如图 20 所示。

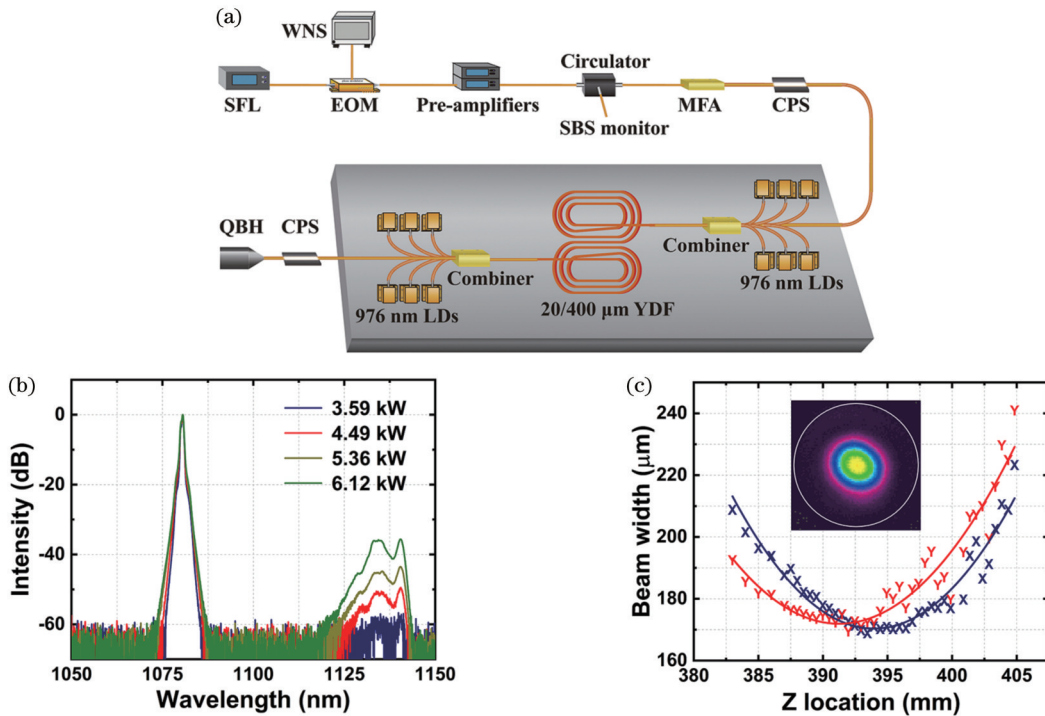


图 20 国防科技大学 6 kW 窄谱全光纤放大器^[114]。(a)结构示意图;(b)输出光谱;(c)光束质量

Fig. 20 6 kW narrow linewidth all-fiber laser amplifier in NUDT^[114]. (a) Structure schematic; (b) output spectra; (c) beam quality

2022年,国防科技大学田鑫等^[127]报道了基于简单 MOPA 结构的 5 kW 近单模窄谱光纤放大器

(图 21)。种子源为窄谱光纤光栅构成的单模光纤振荡器^[137-138],主放大级采用稳波长的 976 nm LD 泵浦

20/400 μm 掺镱光纤,通过设计弯曲盘绕抑制模式不稳定效应,光纤放大器输出激光的最高功率为 5 kW,光谱 3 dB 带宽为 0.48 nm,光谱 20 dB 带宽为

2.1 nm,光束质量 M^2 约为 1.35^[127]。2023 年,国防科技大学又将简单 MOPA 结构的窄谱光纤放大器输出功率提升至 6 kW。

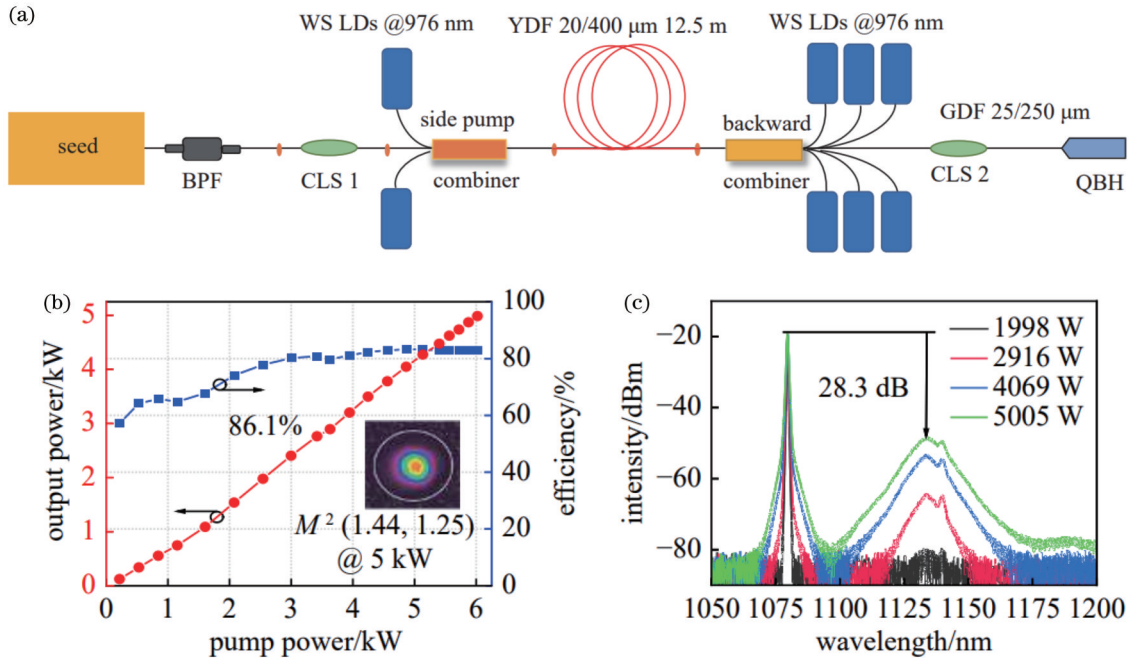


图 21 国防科技大学基于简单 MOPA 结构的 5 kW 窄谱全光纤放大器^[127]。(a)结构示意图;(b)输出功率及光束质量;(c)输出光谱
Fig. 21 5 kW narrow linewidth all-fiber laser amplifier in NU DT^[127]. (a) Structure schematic; (b) output power and laser beam quality; (c) output spectra

为实现近单模高功率激光,必须对激光器中的高阶模式进行有效抑制。国外对 5 kW 以上功率光纤放大器的公开报道较少,较为典型的研究结果为德国耶拿大学和美国 OFS 实验室采用自制掺镱光纤分别实现的 4.3 kW 和 5.0 kW 功率的光纤放大器。

2017 年,德国耶拿大学 Beier 等^[98]报道了 4.3 kW 功率单模光纤放大器,该激光器的结构方案如图 22 所示。放大器采用空间结构,信号光和泵浦光分别通过透镜耦合进入掺镱光纤纤芯和内包层。掺镱光纤为耶拿大学自制,采用了低 NA 设计,纤芯直径为 23 μm ,内包层直径为 460 μm ,掺镱光纤弯曲直径为 1.1 m。当种子激光为宽谱激光时,单独后向泵浦放大可实现最高 4.3 kW 激光输出,光谱 3 dB 带宽为 7 nm, x 和 y 方向的光束质量 M^2 分别为 1.27 和 1.21,宽谱激光放大过程中并未发现模式不稳定效应,并且其光束质量保持得较好。

2023 年,美国 OFS 实验室 Nicholson 等^[129]报道了 5 kW 单模光纤放大器(图 23)。该光纤放大器采用了相比传统的阶跃折射率光纤具有更大高阶模式损耗的新型掺镱光纤,将 976 nm LD 用作前向泵浦,当注入最高 5.93 kW 泵浦光时,最高实现了 5 kW 功率的激光输出,光光转换效率达到 84.3%,放大过程未出现模式不稳定效应。当进一步截短掺镱光纤长度至 7.5 m,放大器仍然能够实现大于 80% 的转换效率,此时的拉

曼光抑制比大于 50 dB。遗憾的是,对于该掺镱光纤的技术细节报道较少,该光纤实现更大高阶模式损耗的方法并未公开。

3.3 小结

相比于全光纤振荡器,国内高功率、高光束质量光纤放大器的发展更为迅速。虽然光纤放大器不会受到光纤光栅功率水平的限制,但是高功率光纤放大器同样受到光纤内非线性效应及模式不稳定效应的限制。以上介绍的高功率近单模光纤激光放大器采用不同的泵浦源和泵浦方式、不同纤芯直径和模场面积的掺镱光纤,为实现近单模光束质量,采取多种方法来抑制激光器内高阶模式并提升放大器的模式不稳定性阈值。同时,值得注意的是,以上研究结果中无论是宽谱还是窄谱激光放大,在输出光谱中均出现了较为显著的 SRS 效应,进一步的功率提升均需要对光纤放大器中的非线性效应进行有效抑制。

与光纤振荡器类似,高功率、高光束质量光纤放大器发展的关键也在于掺镱光纤。采用新型结构掺镱光纤,在增大光纤模场面积的同时,增加高阶模式抑制方法,是高功率、高光束质量光纤放大器发展中最有潜力的技术方案,也是未来一段时间内的研究热点。相信随着时间推移,会有越来越多的新型结构光纤可实现高功率近单模光纤激光输出。

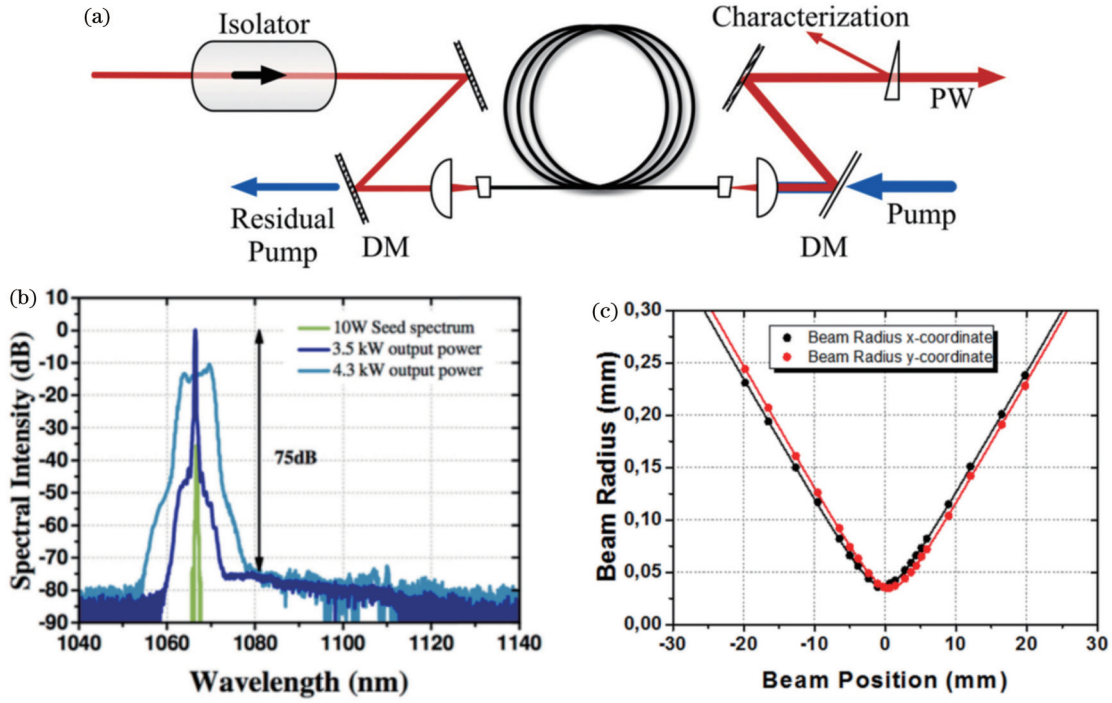


图 22 耶拿大学 4.3 kW 宽谱光纤放大器^[98]。(a)结构示意图;(b)输出光谱;(c)光束质量

Fig. 22 4.3 kW broadband fiber laser in University of Jena^[98]. (a) Structure schematic; (b) output spectra; (c) laser beam quality

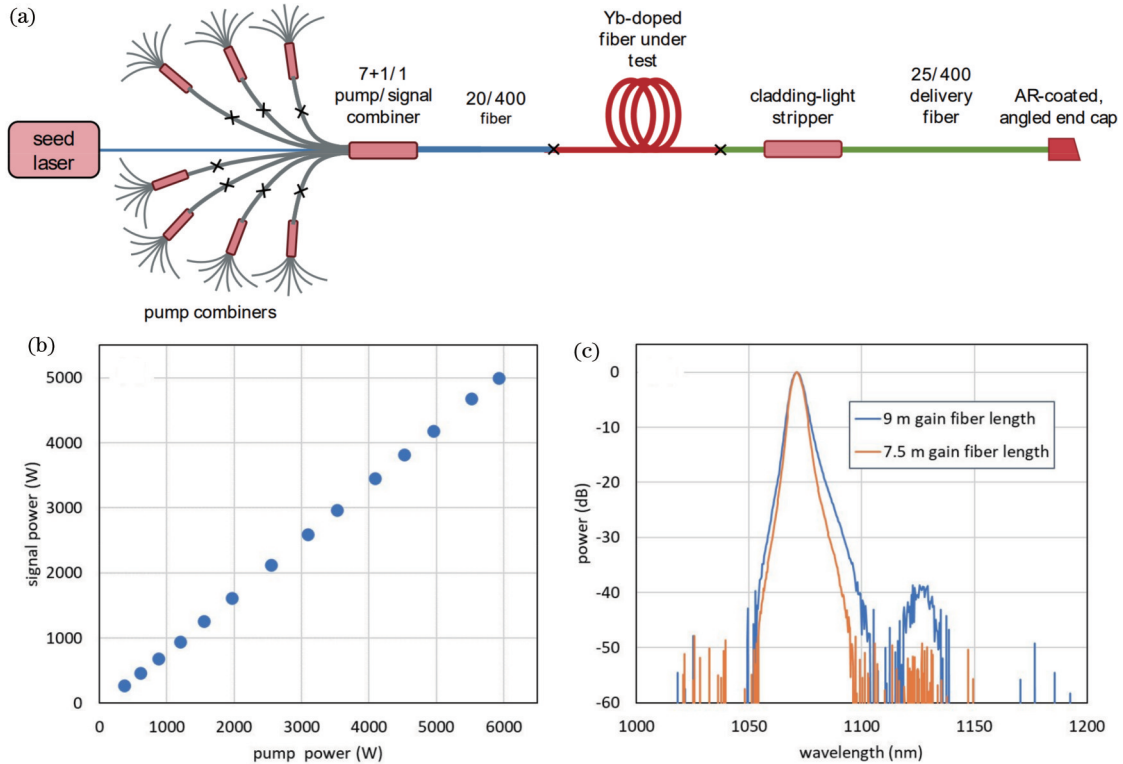


图 23 美国 OFS 实验室 5 kW 单模光纤放大器^[129]。(a)结构示意图;(b)输出功率;(c)输出光谱

Fig. 23 5 kW single-mode fiber laser amplifier in OFS Lab.^[129]. (a) Structure schematic; (b) output power; (c) output spectra

4 “振荡+放大一体化”光纤激光器研究进展

2018 年之后,相关研究文献中出现了“振荡+放

大一体化”光纤激光器^[122,129,139-148],相较于传统的振荡器和放大器,其结构上的主要变化是将“振荡部分”和“放大部分”直接连接,中间不使用包层光滤除器和隔离器等,使得两部分直接共用未被吸收的泵浦光,从而提升

对泵浦光的吸收效率。从物理本质上来看,“振荡+放大一体化”光纤激光器就是谐振腔部分作为种子的光纤放大器,相比于传统光纤放大器的结构,“振荡+放大一体化”光纤激光器能够兼具传统振荡器和放大器的优势。下面就该类型激光器的典型结果进行介绍。

2018年,中国工程物理研究院舒强等^[139-140]首先提出“振荡+放大一体化”光纤激光器的概念,初步模拟

计算了该方案的可行性,指出该结构不仅具备传统单谐振腔光纤激光器的抗反射能力,对光栅等光学器件的性能要求较低,还具有较高的光光转换效率。舒强等^[140]还在实验上搭建了 2 kW 功率的“振荡+放大一体化”光纤激光器,并且开展了抗高反实验验证,结果表明反射光对该结构光纤激光系统没有形成明显的扰动,具有良好的防反射能力(图 24)。

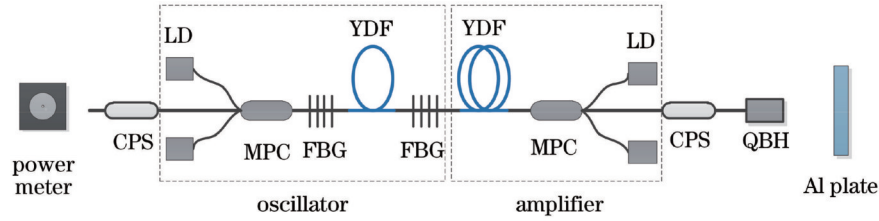


图 24 “振荡+放大一体化”光纤激光器结构示意图^[140]

Fig. 24 Schematic of oscillating-amplifying integrated fiber laser^[140]

伊朗 Hejaz 等^[141]几乎同时报道了从振荡器演化而来的该新型激光器结构,并且验证了相比于振荡器,该结构在提升模式不稳定效应方面的优势。通过实验上的对比,发现相比于传统的振荡器,采用该种改进结构可以显著提升 TMI 阈值,并同时提升激光器的效率。

Hejaz 等^[141]分别提出并验证了单向泵浦和双向泵浦的“振荡+放大一体化”光纤激光器结构,并开展了高功率实验验证,如图 25 所示。当采用双向泵浦方案时,该结构有效提升了模式不稳定性阈值,实现了约 1.6 kW 的近单模激光输出。

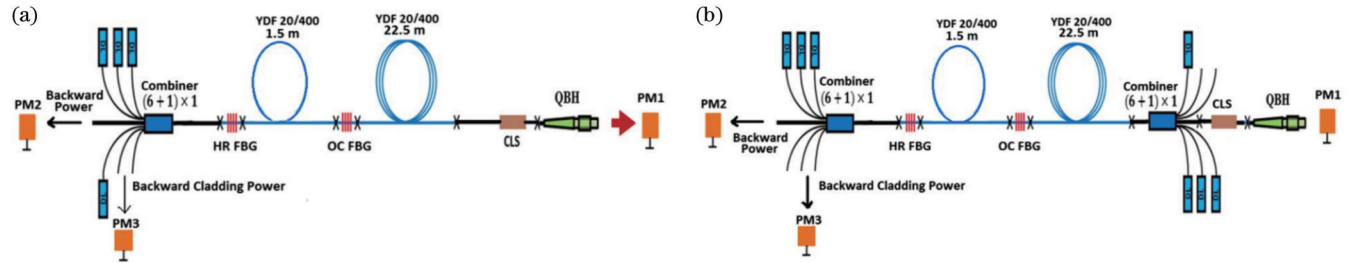


图 25 单向泵浦和双向泵浦的“振荡+放大一体化”光纤激光器结构示意图^[141]。(a)单向泵浦;(b)双向泵浦

Fig. 25 Schematics of oscillating-amplifying integrated fiber laser in co-pumped and bi-pumped configurations^[141]. (a) Co-pump; (b) bi-pump

2021年,国防科技大学 Zeng 等^[144-145]先后实现了 3.5 kW 和 5 kW 级“振荡+放大一体化”光纤激光器。其中 5 kW 功率的“振荡+放大一体化”光纤激光器结构如图 26 所示,采用双向 981 nm LD 泵浦实现了 5 kW 级激光输出,具有约 81% 的光光转换效率,在激光器出现模式不稳定效应之前,输出激光的光束质量 $M^2 \approx 1.6$,而在出现模式不稳定效应后,光束质量迅速退化。此外,他们还首次验证了“振荡+放大一体化”光纤激光器在时序控制逻辑上的优势,通过分别在激光器正常工作状态下关闭“种子部分”的泵浦 LD 和在不开启“种子部分”的泵浦 LD 状态下直接单独开启“放大级部分”泵浦 LD,验证了该激光器能够避免光纤放大器中因种子关停造成放大级烧毁的问题,极大地增强了激光器在应用中的鲁棒性。2023年,Zeng 等^[147-148]又通过优化激光器参数及使用新型锥形结构光纤,将“振荡+放大一体化”光纤激光器的功率水平

提升至 6 kW。

国内清华大学、南京科技大学等单位也将“振荡+放大一体化”光纤激光器结构应用于窄谱激光的放大研究中^[122, 149],清华大学还将该结构应用于实现高效率 1018 nm 光纤激光器^[142]。“振荡+放大一体化”光纤激光器结构作为一种基于传统光纤放大器的改进结构,具有较好的结构适用性。

值得一提的是,在工业领域应用的光纤激光器已经出现采用“振荡+放大一体化”结构设计的产品。2022年,武汉光电国家研究中心与锐科激光合作,共同研制出采用“振荡+放大一体化”光纤激光器结构(图 27)的高效率、高稳定性单纤 22 kW 级工业激光器^[150]。“振荡”部分采用 20/600 μm 掺镱光纤,“放大”部分将一段 50/800 μm 掺镱光纤和一段 65/1000 μm 掺镱光纤连接使用,可实现约 84% 的综合光光转换效率,输出激光光束质量 $M^2 \approx 10$,可满足工业领域的应用要求。

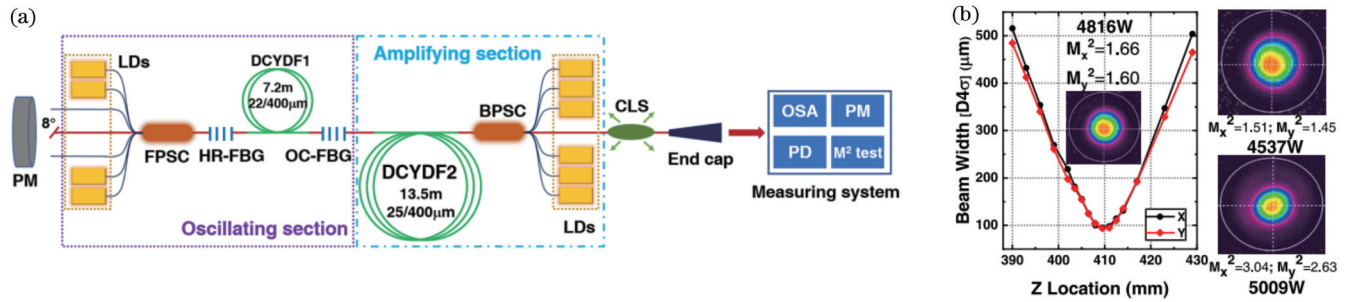


图 26 国防科技大学 5 kW 级“振荡+放大一体化”光纤激光器^[145]。(a)结构示意图;(b)光束质量

Fig. 26 5 kW-level oscillating-amplifying integrated fiber laser in NUDT^[145]. (a) Structure schematic; (b) laser beam quality

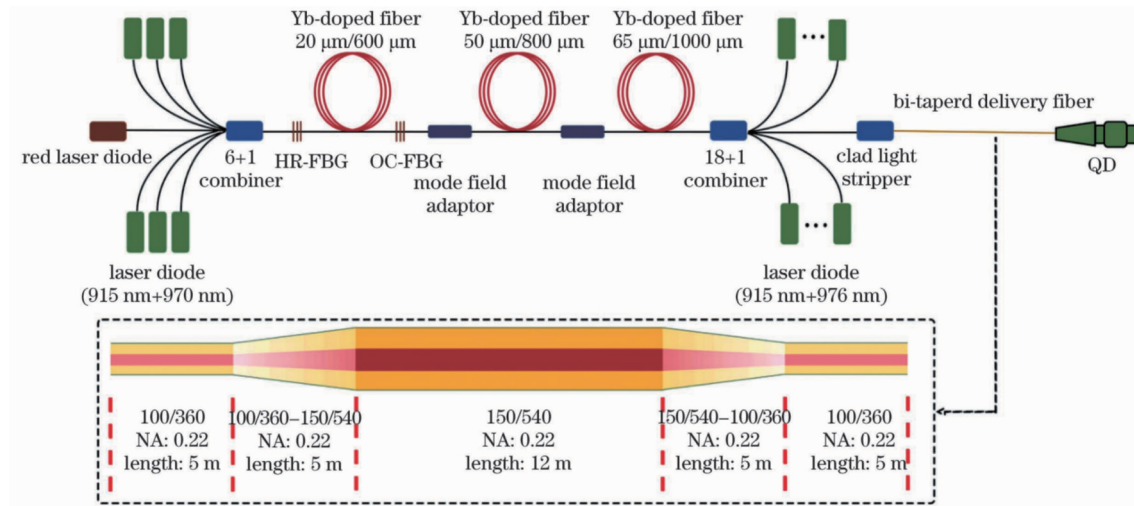


图 27 22 kW“振荡+放大一体化”光纤激光器结构示意图^[150]

Fig. 27 Schematic of 22 kW-level oscillating-amplifying integrated fiber laser^[150]

相比于传统光纤放大器,“振荡+放大一体化”光纤激光器的结构调整,在物理本质上使得“振荡”部分和“放大”部分可以分别共用前向和后向注入的泵浦光,使得激光器具有传统光纤振荡器抗回反光能力强、时序控制逻辑可靠的优势。相比于光纤振荡器结构,“振荡+放大一体化”光纤激光器结构具有模式不稳定阈值更高、光光转换效率更高的优势。可以预见,在不久的将来会有越来越多“振荡+放大一体化”光纤激光器结构的报道和应用。此外,“振荡+放大一体化”光纤激光器结构在功率提升过程中,仍然会受到激光器内模式不稳定效应与非线性效应的限制^[145, 148],这与光纤放大器结构并无明显区别。

5 结束语

对 LD 泵浦高平均功率、高光束质量光纤激光振荡器和放大器进行综述,分别介绍了光纤激光振荡器、光纤激光放大器及结构改进的“振荡+放大一体化”光纤激光器的研究进展和典型研究结果。在光纤振荡器方面,综述了空间结构光纤振荡器和全光纤结构光纤振荡器的研究进展;在光纤放大器方面,重点介绍了近年公开报道的大于 5 kW 功率水平的少模光纤放大器

和近单模光纤放大器的研究结果;针对改进的“振荡+放大一体化”光纤激光器,介绍了其主要技术特点及典型研究结果。无论是光纤振荡器、放大器,还是“振荡+放大一体化”光纤激光器,输出激光的功率水平和光束质量均受到激光器内的非线性效应及模式不稳定效应的限制,因此激光器的设计尤其是新型掺杂光纤的设计是具有潜力的发展方向。

参 考 文 献

- [1] Richardson D J, Nilsson J, Clarkson W A. High power fiber lasers: current status and future perspectives[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2010, 27(11): B63-B92.
- [2] Jauregui C, Limpert J, Tünnermann A. High-power fibre lasers [J]. Nature Photonics, 2013, 7(11): 861-867.
- [3] Zervas M N, Codemard C A. High power fiber lasers: a review [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2014, 20(5): 219-241.
- [4] Shi W, Fang Q, Zhu X S, et al. Fiber lasers and their applications[J]. Applied Optics, 2014, 53(28): 6554-6568.
- [5] Schreiber T, Wirth C, Schmidt O, et al. Incoherent beam combining of continuous-wave and pulsed Yb-doped fiber amplifiers[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2009, 15(2): 354-360.
- [6] Lei C M, Gu Y R, Chen Z L, et al. Incoherent beam combining of fiber lasers by an all-fiber 7×1 signal combiner at a power level of 14 kW[J]. Optics Express, 2018, 26(8): 10421-10427.

- [7] Jäger M, Plötner M, Eschrich T, et al. High-brightness incoherent combination of fiber lasers in 7×1 fiber couplers at average powers >5 kW[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(20): 4297-4302.
- [8] Fu M, Li Z X, Wang Z F, et al. Research on a 4×1 fiber signal combiner with high beam quality at a power level of 12 kW[J]. *Optics Express*, 2021, 29(17): 26658-26668.
- [9] 陈子伦, 付敏, 宁禹, 等. 新型光纤合束器实现 20 kW 高质量激光输出[J]. *中国激光*, 2022, 49(20): 197.
Chen Z L, Fu M, Ning Y, et al. A new type of optical fiber combiner realizes 20 kW high quality laser output[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(20): 2016002.
- [10] 马鹏飞, 周朴, 马阎星, 等. 激光相干偏振光束合成技术的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(7): 070005.
Ma P F, Zhou P, Ma Y X, et al. Development of the polarization beam combining technique of lasers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(7): 070005.
- [11] Liu Z J, Ma P F, Su R T, et al. High-power coherent beam polarization combination of fiber lasers: progress and prospect[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2016, 34(3): A7-A14.
- [12] 马阎星, 司磊, 周朴, 等. 高功率光纤激光相干合成关键技术[J]. *国防科技大学学报*, 2012, 34(1): 38-42.
Ma Y X, Si L, Zhou P, et al. The key technologies in coherent beam combination of high power fiber laser[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2012, 34(1): 38-42.
- [13] Zhou P, Liu Z J, Wang X L, et al. Coherent beam combining of fiber amplifiers using stochastic parallel gradient descent algorithm and its application[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2009, 15(2): 248-256.
- [14] Augst S J, Ranka J K, Fan T Y, et al. Beam combining of ytterbium fiber amplifiers[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2007, 24(8): 1707-1715.
- [15] 周朴. 光纤激光相干合成技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2009.
Zhou P. Research on fiber laser coherent synthesis technology [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2009.
- [16] Wirth C, Schmidt O, Tsybin I, et al. High average power spectral beam combining of four fiber amplifiers to 8.2 kW[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(16): 3118-3120.
- [17] 马毅, 颜宏, 田飞, 等. 光纤激光共孔径光谱合成实现 5 kW 高效优质输出[J]. *强激光与粒子束*, 2015, 27(4): 040101.
Ma Y, Yan H, Tian F, et al. Common aperture spectral beam combination of fiber lasers with 5 kW power high-efficiency and high-quality output[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27(4): 040101.
- [18] 马毅, 颜宏, 彭万敬, 等. 基于多路窄线宽光纤激光的 9.6 kW 共孔径光谱合成光源[J]. *中国激光*, 2016, 43(9): 0901009.
Ma Y, Yan H, Peng W J, et al. 9.6 kW common aperture spectral beam combination system based on multi-channel narrow-linewidth fiber lasers[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(9): 0901009.
- [19] 郑也, 杨依枫, 赵翔, 等. 高功率光纤激光光谱合成技术的研究进展[J]. *中国激光*, 2017, 44(2): 0201002.
Zheng Y, Yang Y F, Zhao X, et al. Research progress on spectral beam combining technology of high-power fiber lasers [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(2): 0201002.
- [20] Chen F, Ma J, Wei C, et al. 10 kW-level spectral beam combination of two high power broad-linewidth fiber lasers by means of edge filters[J]. *Optics Express*, 2017, 25(26): 32783-32791.
- [21] 马毅, 颜宏, 孙股宏, 等. 基于双光栅的光纤激光光谱合成关键技术研究进展 [J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(1): 0103002.
Ma Y, Yan H, Sun Y H, et al. Recent progress of key technologies for spectral beam combining of fiber laser with dual-gratings configuration[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(1): 0103002.
- [22] 程雪, 王建立, 刘昌华. 高能光纤激光器光束合成技术[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(1): 0103011.
Cheng X, Wang J L, Liu C H. Beam combining of high energy fibre lasers[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(1): 0103011.
- [23] Jauregui C, Otto H J, Limpert J, et al. Mode instabilities in high-power bidirectional fiber amplifiers and lasers[C]// *Advanced Solid State Lasers*, October 4-9, 2015, Berlin, Germany. Washington, D.C.: Optica Publishing Group, 2015: ATh2A.24.
- [24] Scarnera V, Ghiringhelli F, Malinowski A, et al. Modal instabilities in high power fiber laser oscillators[J]. *Optics Express*, 2019, 27(4): 4386-4403.
- [25] Hejaz K, Shayganmanesh M, Azizi S, et al. Transverse mode instability of fiber oscillators in comparison with fiber amplifiers [J]. *Laser Physics Letters*, 2018, 15(5): 055102.
- [26] Jauregui C, Stühler C, Limpert J. Transverse mode instability [J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2020, 12(2): 429-484.
- [27] Xu Y, Sheng Q A, Wang P, et al. 2.4 kW 1045 nm narrow-spectral-width monolithic single-mode CW fiber laser by using an FBG-based MOPA configuration[J]. *Applied Optics*, 2021, 60(13): 3740-3746.
- [28] 来文昌, 马鹏飞, 肖虎, 等. 高功率窄线宽光纤激光技术[J]. *强激光与粒子束*, 2020, 32(12): 121001.
Lai W C, Ma P F, Xiao H, et al. High-power narrow-linewidth fiber laser technology[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2020, 32(12): 121001.
- [29] 楚秋慧, 郭超, 颜冬林, 等. 高功率窄线宽光纤激光器的研究进展[J]. *强激光与粒子束*, 2020, 32(12): 121004.
- [30] Chu Q H, Guo C, Yan D L, et al. Recent progress of high power narrow linewidth fiber laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2020, 32(12): 121004.
- [31] Beier F, Hupel C, Nold J, et al. Narrow linewidth, single mode 3 kW average power from a directly diode pumped ytterbium-doped low NA fiber amplifier[J]. *Optics Express*, 2016, 24(6): 6011-6020.
- [32] Yu C X, Shatrovov O, Fan T Y, et al. Diode-pumped narrow linewidth multi-kilowatt metalized Yb fiber amplifier[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(22): 5202-5205.
- [33] Lin H, Tao R, Li C, et al. 3.7 kW monolithic narrow linewidth single mode fiber laser through simultaneously suppressing nonlinear effects and mode instability[J]. *Optics Express*, 2019, 27(7): 9716-9724.
- [34] Huang Z M, Shu Q, Tao R M, et al. >5 kW record high power narrow linewidth laser from traditional step-index monolithic fiber amplifier[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2021, 33(21): 1181-1184.
- [35] Liu C H, Ehlers B, Doerfel F, et al. 810 W continuous-wave and single-transverse-mode fiber laser using 20 μm core Yb-doped double-clad fibre[J]. *Electronics Letters*, 2004, 40(23): 1471-1472.
- [36] Jeong Y, Sahu J K, Baek S, et al. Ytterbium-doped double-clad large-core fiber lasers with kW-level continuous-wave output power[C]// *Conference on Lasers and Electro-Optics*, May 16-21, 2004, San Francisco, CA, USA. New York: IEEE Press, 2004.
- [37] 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.
- [38] Filippov V, Chamorovskii Y, Kerttula J, et al. 600 W power scalable single transverse mode tapered double-clad fiber laser [J]. *Optics Express*, 2009, 17(3): 1203-1214.
- [39] 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.
- [39] Yu H B, Kliner D A V, Liao K H, et al. 1.2-kW single-mode

- fiber laser based on 100-W high-brightness pump diodes[J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8237: 82370G.
- [40] Stefan R, Frank B, Frank-Peter G, et al. High-power disk and fiber lasers: a performance comparison[J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8235: 82350V.
- [41] Yu H L, Wang X L, Tao R M, 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.
- [42] 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.
- [43] 史伟, 房强, 许阳, 等. 1.63 kW 单纤单泵单模连续全光纤激光器[J]. 光电子·激光, 2015, 26(4): 662-666.
- 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.
- [44] 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.
- [45] 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.
- [46] 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.
- [47] 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.
- [48] 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.
- [49] Ikoma S, Uchiyama K, Takubo Y, et al. 5-kW single stage all-fiber Yb-doped single-mode fiber laser for materials processing [J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10512: 105120C.
- [50] Ye Y, Xi X M, Shi C, et al. Experimental study of 5-kW high-stability monolithic fiber laser oscillator with or without external feedback[J]. IEEE Photonics Journal, 2019, 11(4): 1503508.
- [51] 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.
- [52] 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.
- [53] 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: 1126021.
- [54] 李昊, 叶新宇, 王蒙, 等. 飞秒激光刻写光纤布拉格光栅实现 8 kW 光纤振荡器[J]. 中国激光, 2022, 49(23): 2316001.
- Li H, Ye X Y, Wang M, et al. Realization of 8 kW fiber oscillator by femtosecond laser writing fiber Bragg grating[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(23): 2316001.
- [55] Filippov V, Kerttula J, Chamorovskii Y, et al. Highly efficient 750 W tapered double-clad ytterbium fiber laser[J]. Optics Express, 2010, 18(12): 12499-12512.
- [56] Hill K O, Meltz G. Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview[J]. Journal of Lightwave Technology, 1997, 15(8): 1263-1276.
- [57] Thomas J, Voigtlander C, Nolte S, et al. Fiber Bragg gratings in active large mode area fiber written with femtosecond pulses [C]//CLEO/Europe - EQEC 2009 - European Conference on Lasers and Electro-Optics and the European Quantum Electronics Conference, June 14-19, 2009, Munich, Germany. New York: IEEE Press, 2009.
- [58] Mohammed W, Gu X J. Fiber Bragg grating in large-mode-area fiber for high power fiber laser applications[J]. Applied Optics, 2010, 49(28): 5297-5301.
- [59] Iho A, Tervonen A, Yla-Jarkko K, et al. Characterization of modal coupling of Bragg gratings in large-mode-area fibers[J]. Journal of Lightwave Technology, 2011, 29(13): 2031-2038.
- [60] Highlight FL compact high-power single-and multimode fiber lasers[EB/OL]. [2023-03-06]. https://www.coherent.com/assets/pdf/COHR_HighLightFL_Compact_DS_0121.pdf.
- [61] 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.
- 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.
- [62] Peng K, Zhan H A, Ni L, et al. Single-mode large-mode-area laser fiber with ultralow numerical aperture and high beam quality [J]. Applied Optics, 2016, 55(35): 10133-10137.
- [63] 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): 0401001.
- 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): 0401001.
- [64] 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.
- [65] Liem A, Freier E, Matzdorf C, et al. Experimental analysis of the influence of the spectral width of out-coupling fiber Bragg gratings to the amount of stimulated Raman scattering in a cw kW fiber oscillator[C]//Advanced Solid-State Lasers Congress, October 27-November 1, 2013, Paris, France. Washington, D. C.: Optica Publishing Group, 2013: JTh2A.32.
- [66] Schreiber T, Liem A, Freier E, et al. Analysis of stimulated Raman scattering in cw kW fiber oscillators[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 8961: 89611T.
- [67] 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]//Laser Congress 2018 (ASSL), November 4-8, 2018, Boston, Massachusetts. Washington, D. C.: Optica Publishing Group, 2018: AM2A.3.
- [68] 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.
- [69] 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.
- Zhang H W, Wang X L, Yang B L, et al. All-fiber laser oscillator with output power exceeding 3 kW[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(4): 0415001.
- [70] 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.
- [71] 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.
- Yang B L, Wang X L, Ye Y, et al. The output power of all-fiber laser oscillator exceeds 6 kW[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(1): 0116001.
- [72] 奚小明, 王鹏, 杨保来, 等. 全光纤激光振荡器输出功率突破 7 kW[J]. 中国激光, 2021, 48(1): 0116001.
- Xi X M, Wang P, Yang B L, et al. The output power of all-fiber laser oscillator exceeds 7 kW[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(1): 0116001.
- [73] Li H Y, Tian X, Li H, et al. Fiber oscillator of 5 kW using fiber Bragg gratings inscribed by a visible femtosecond laser[J].

- Chinese Optics Letters, 2023, 21(2): 021404.
- [74] Wang Y. Stimulated Raman scattering in high-power double-clad fiber lasers and power amplifiers[J]. Optical Engineering, 2005, 44(11): 114202.
- [75] Wang Y, Xu C Q, Po H. Analysis of Raman and thermal effects in kilowatt fiber lasers[J]. Optics Communications, 2004, 242(4/5/6): 487-502.
- [76] Brochu G, Villeneuve A, Faucher M, et al. SRS modeling in high power CW fiber lasers for component optimization[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10085: 100850N.
- [77] Liu W, Ma P F, Lü H B, et al. General analysis of SRS-limited high-power fiber lasers and design strategy[J]. Optics Express, 2016, 24(23): 26715-26721.
- [78] 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.
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.
- [79] Bock V, Liem A, Schreiber T, et al. Explanation of stimulated Raman scattering in high power fiber systems[J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10512: 105121F.
- [80] Ye Y, Yang B L, Wang X L, et al. Experimental study of SRS threshold dependence on the bandwidths of fiber Bragg gratings in co-pumped and counter-pumped fiber laser oscillator[J]. Journal of Optics, 2019, 21(2): 025801.
- [81] Stutzki F, Jansen F, Otto H J, et al. Designing advanced very-large-mode-area fibers for power scaling of fiber-laser systems [J]. Optica, 2014, 1(4): 233-242.
- [82] Jauregui C, Limpert J, Tünnermann A. Ultra-large mode area fibers for high power lasers[C]//Optical Fiber Communication Conference, March 11-15, 2018, San Diego, California. Washington, D.C.: Optica Publishing Group, 2018: M2J.1.
- [83] Yang B L, Zhang H W, Shi C, et al. High power monolithic tapered ytterbium-doped fiber laser oscillator[J]. Optics Express, 2019, 27(5): 7585-7592.
- [84] Zeng L F, Xi X M, Ye Y, et al. Near-single-mode 3 kW monolithic fiber oscillator based on a longitudinally spindle-shaped Yb-doped fiber[J]. Optics Letters, 2020, 45(20): 5792-5795.
- [85] 张志伦, 张芳芳, 林贤峰, 等. 国产部分掺杂光纤实现 3 kW 全光纤激光振荡输出[J]. 物理学报, 2020, 69(23): 234205.
Zhang Z L, Zhang F F, Lin X F, et al. Home-made confined-doped fiber with 3-kW all-fiber laser oscillating output[J]. Acta Physica Sinica, 2020, 69(23): 234205.
- [86] Beier F, Möller F, Sattler B, et al. Experimental investigations on the TMI thresholds of low-NA Yb-doped single-mode fibers [J]. Optics Letters, 2018, 43(6): 1291-1294.
- [87] Zhang Z L, Lin X F, Zhang X, et al. Low-numerical aperture confined-doped long-tapered Yb-doped silica fiber for a single-mode high-power fiber amplifier[J]. Optics Express, 2022, 30(18): 32333-32346.
- [88] 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.
- [89] Li H, Yang B L, Wang M, et al. Femtosecond laser fabrication of large-core fiber Bragg gratings for high-power fiber oscillators [J]. APL Photonics, 2023, 8(4): 046101.
- [90] Fomin V, Mashkin A, Abramov M, et al. 3 kW Yb fibre lasers with a single-mode output[C]//International Symposium on High-Power Fiber Lasers and their Applications, 2006.
- [91] 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.
- [92] Fang Q A, Shi W, Qin Y G, et al. 2.5 kW monolithic continuous wave (CW) near diffraction-limited fiber laser at 1080 nm[J]. Laser Physics Letters, 2014, 11(10): 105102.
- [93] Rosales-Garcia Andrea, Tobioka Hideaki, Abedin Kazi, et al. 2.1 kW single mode continuous wave monolithic fiber laser [J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9344: 93441G.
- [94] Yu H L, Zhang H W, Lü H B, et al. 3.15 kW direct diode-pumped near diffraction-limited all-fiber-integrated fiber laser[J]. Applied Optics, 2015, 54(14): 4556-4560.
- [95] Xiao Q, Yan P, Li D, et al. Bidirectional pumped high power Raman fiber laser[J]. Optics Express, 2016, 24(6): 6758-6768.
- [96] 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.
- [97] Zhan H A, Liu Q Y, Wang Y Y, et al. 5 kW GTWave fiber amplifier directly pumped by commercial 976 nm laser diodes[J]. Optics Express, 2016, 24(24): 27087-27095.
- [98] 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.
- [99] 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): 1506107.
- [100] Shi C, Su R T, Zhang H W, et al. Experimental study of output characteristics of bi-directional pumping high power fiber amplifier in different pumping schemes[J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(3): 1502910.
- [101] Yan P, Huang Y S, Sun J Y, et al. 3.1 kW monolithic MOPA configuration fibre laser bidirectionally pumped by non-wavelength-stabilized laser diodes[J]. Laser Physics Letters, 2017, 14(8): 080001.
- [102] Wang J M, Yan D P, Xiong S S, et al. Mode instability in high power all-fiber amplifier with large-mode-area gain fiber[J]. Optics Communications, 2017, 396: 123-126.
- [103] 林傲祥, 湛欢, 王瑜英, 等. 国产泵浦增益一体化复合功能激光光纤实现 8.74 kW 激光输出[J]. 强激光与粒子束, 2018, 30(1): 010101.
Lin A X, Zhan H, Wang Y Y, et al. 8.74 kW laser output realized by domestic pump gain integrated composite function laser fiber[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2018, 30(1): 010101.
- [104] Zhan H A, Peng K, Liu S A, et al. Pump-gain integrated functional laser fiber towards 10 kW-level high-power applications[J]. Laser Physics Letters, 2018, 15(9): 095107.
- [105] 林宏奂, 唐选, 李成钰, 等. 全国产单纤激光系统获得 10.6 kW 激光输出[J]. 中国激光, 2018, 45(3): 0315001.
Lin H H, Tang X, Li C Y, et al. The national single-fiber laser system has obtained 10.6 kW laser output[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(3): 0315001.
- [106] 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.
- [107] Yang B L, Wang P, Zhang H W, et al. 6 kW single mode monolithic fiber laser enabled by effective mitigation of the transverse mode instability[J]. Optics Express, 2021, 29(17): 26366-26374.
- [108] Wang Y Y, Gao C, Tang X, et al. 30/900 Yb-doped aluminophosphosilicate fiber presenting 6.85-kW laser output pumped with commercial 976-nm laser diodes[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(16): 3396-3402.
- [109] Li T L, Zha C W, Sun Y H, et al. 3.5 kW bidirectionally pumped narrow-linewidth fiber amplifier seeded by white-noise-source phase-modulated laser[J]. Laser Physics, 2018, 28(10): 105101.
- [110] 罗韵, 赵鹏飞, 游云峰, 等. 5.1 kW 光电控一体式单模光纤激光器[J]. 中国激光, 2020, 47(8): 0816001.
Luo Y, Zhao P F, You Y F, et al. 5.1 kW optically and electronically controlled integrated single mode fiber laser[J].

- Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(8): 0816001.
- [111] 黄智蒙, 舒强, 楚秋慧, 等. 5 kW 窄线宽全纤化单模光纤放大器[J]. 中国激光, 2021, 48(6): 0616001.
Huang Z M, Shu Q, Chu Q H, et al. 5 kW narrow linewidth all-fiber single-mode fiber amplifier[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(6): 0616001.
- [112] 陈晓龙, 楼风光, 何宇, 等. 单纤高效率全国产化全光纤激光器实现 10 kW 激光输出[J]. 光学学报, 2019, 39(3): 0336001.
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.
- [113] Zheng J K, Zhao W, Zhao B Y, et al. Investigation of stimulated Raman scattering in high-power co-pumping fiber amplifiers[J]. Laser Physics, 2018, 28(10): 105105.
- [114] Wang G J, Song J X, Chen Y S, et al. Six kilowatt record all-fiberized and narrow-linewidth fiber amplifier with near-diffraction-limited beam quality[J]. High Power Laser Science and Engineering, 2022, 10(4): e22.
- [115] Tao R M, Ma P F, Wang X L, et al. 1.4 kW all-fiber narrow-linewidth polarization-maintained fiber amplifier[J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9255: 92550B.
- [116] Ma P F, Tao R M, Su R T, et al. 1.89 kW all-fiberized and polarization-maintained amplifiers with narrow linewidth and near-diffraction-limited beam quality[J]. Optics Express, 2016, 24(4): 4187-4195.
- [117] Ma P F, Xiao H, Liu W, et al. All-fiberized and narrow-linewidth 5 kW power-level fiber amplifier based on a bidirectional pumping configuration[J]. High Power Laser Science and Engineering, 2021, 9(3): e45.
- [118] 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.
- [119] 安毅, 杨欢, 肖虎, 等. 国产双锥形光纤实现 4 kW 单模激光输出[J]. 中国激光, 2021, 48(1): 0115002.
An Y, Yang H, Xiao H, et al. 4-kW single-mode laser output using homemade double-tapered fiber[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(1): 0115002.
- [120] Ye Y, Lin X F, Yang B L, et al. Tapered Yb-doped fiber enabled a 4 kW near-single-mode monolithic fiber amplifier[J]. Optics Letters, 2022, 47(9): 2162-2165.
- [121] Lin X F, Ye Y, Zhang Z L, et al. 2.7 kW co-pumped fiber amplifier based on constant-cladding tapered-core fiber[J]. Optical Fiber Technology, 2022, 68: 102773.
- [122] Zheng Y H, Han Z G, Li Y L, et al. 3.1 kW 1050 nm narrow linewidth pumping-sharing oscillator-amplifier with an optical signal-to-noise ratio of 45.5 dB[J]. Optics Express, 2022, 30(8): 12670-12683.
- [123] Ma X Q, Zhu C, Hu I N, et al. Single-mode chirally-coupled-core fibers with larger than 50 μm diameter cores[J]. Optics Express, 2014, 22(8): 9206-9219.
- [124] Kanskar M, Zhang J, Kaponen J, et al. Narrowband transverse-modal-instability (TMI)-free Yb-doped fiber amplifiers for directed energy applications[J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10512: 105120F.
- [125] Liu Y H, Zhang F F, Zhao N, et al. Single transverse mode laser in a center-Sunken and cladding-trenched Yb-doped fiber[J]. Optics Express, 2018, 26(3): 3421-3426.
- [126] 杨保来, 杨欢, 叶云, 等. 国产纺锤形渐变掺镱光纤实现 6 kW 宽谱激光输出[J]. 强激光与粒子束, 2022, 34(8): 081001.
Yang B L, Yang H, Ye Y, et al. Realization of 6 kW wide spectrum laser output by domestic spindle-shaped graded Yb-doped fiber[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2022, 34(8): 081001.
- [127] 田鑫, 饶斌裕, 王蒙, 等. 简单 MOPA 结构窄线宽激光突破 5 kW 近单模输出[J]. 强激光与粒子束, 2022, 34(12): 121002.
Tian X, Rao B Y, Wang M, et al. Narrow linewidth laser with simple MOPA structure breaks through 5 kW near single mode output[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2022, 34(12): 121002.
- [128] 王鹏, 奚小明, 张汉伟, 等. LD 泵浦光纤激光放大器实现 13 kW 高光束质量输出[J]. 强激光与粒子束, 2022, 34(12): 121001.
Wang P, Xi X M, Zhang H W, et al. Laser-diode-pumped fiber laser amplifier for 13 kW high-beam-quality output[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2022, 34(12): 121001.
- [129] Nicholson J W, Pincha J, Kansal I, et al. 5 kW single-mode output power from Yb-doped fibers with increased higher-order mode loss[J]. Proceedings of SPIE, 2023: 12400: 1240002.
- [130] Zeng L F, Pan Z Y, Xi X M, et al. 5 kW monolithic fiber amplifier employing homemade spindle-shaped ytterbium-doped fiber[J]. Optics Letters, 2021, 46(6): 1393-1396.
- [131] 奚小明, 杨欢, 曾令筏, 等. 国产纺锤形增益光纤主振荡功率放大器实现 5 kW 输出[J]. 强激光与粒子束, 2021, 33(2): 021001.
Xi X M, Yang H, Zeng L F, et al. 5 kW all-fiber amplifier based on homemade spindle-shaped Yb-doped fiber[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2021, 33(2): 021001.
- [132] 杨保来, 杨欢, 王鹏, 等. 基于自研光纤的 LD 泵浦光纤激光器实现 10 kW 输出[J]. 中国激光, 2022, 49(20): 2016001.
Yang B L, Yang H, Wang P, et al. LD pumped fiber laser based on self-developed fiber realizes 10 kW output[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(20): 2016001.
- [133] 奚小明, 杨保来, 张汉伟, 等. LD 直接泵浦全光纤激光器输出功率突破 20 kW[J]. 强激光与粒子束, 2023, 35(2): 021001.
Xi X M, Yang B L, Zhang H W, et al. The output power of LD directly pumped all-fiber laser exceeded 20 kW[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2023, 35(2): 021001.
- [134] 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.
- [135] Jain D, Alam S, Jung Y, et al. Highly efficient Yb-free Er-La-Al doped ultra-low NA large mode area single-trench fiber laser[J]. Optics Express, 2015, 23(22): 28282-28287.
- [136] Su R T, Tao R M, Wang X L, et al. 2.43 kW narrow linewidth linearly polarized all-fiber amplifier based on mode instability suppression[J]. Laser Physics Letters, 2017, 14(8): 085102.
- [137] Tian X, Rao B Y, Wang M, et al. 4 kW narrow-linewidth fiber laser based on a simple one-stage MOPA structure[J]. Laser Physics Letters, 2022, 19(11): 115101.
- [138] Tian X, Rao B Y, Xi X M, et al. Selection principle of seed power in high-power narrow linewidth fiber amplifier seeded by a FBGs-based fiber oscillator[J]. Optics Express, 2023, 31(8): 12016-12025.
- [139] 舒强. 抗反射高效优质高功率光纤激光技术研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2018.
Shu Q. Research on anti-reflection, high efficiency, high quality and high power fiber laser technology[D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2018.
- [140] 舒强, 李成钰, 林宏奂, 等. 2 kW 抗反射振荡-放大一体化光纤激光器[J]. 中国激光, 2018, 45(8): 0801004.
Shu Q, Li C Y, Lin H H, et al. 2 kW class antireflection fiber laser with oscillator-amplifier integration[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(8): 0801004.
- [141] Hejaz K, Shayganmanesh M, Roohforouz A, et al. Transverse mode instability threshold enhancement in Yb-doped fiber lasers by cavity modification[J]. Applied Optics, 2018, 57(21): 5992-5997.
- [142] Tian J D, Xiao Q R, Li D, et al. Hybrid-structure 1018-nm monolithic single-mode fiber laser producing high power and high efficiency[J]. OSA Continuum, 2019, 2(4): 1138.
- [143] Yan D L, Guo C, Zhao P F, et al. A simple O-shaped cylinder fiber laser without inter-cladding-power-strippers[J]. Proceedings of SPIE, 2021, 11890: 118900H.

- [144] Zeng L F, Wang X L, Yang B L, et al. A 3.5-kW near-single-mode oscillating-amplifying integrated fiber laser[J]. High Power Laser Science and Engineering, 2021, 9(3): e41.
- [145] Zeng L F, Xi X M, Zhang H W, et al. Demonstration of the reliability of a 5-kW-level oscillating-amplifying integrated fiber laser[J]. Optics Letters, 2021, 46(22): 5778-5781.
- [146] Yan D L, Liao R Y, Guo C, et al. A 3.7-kW oscillating-amplifying integrated fiber laser featuring a compact oval-shaped cylinder package[J]. Micromachines, 2023, 14(2): 264.
- [147] Zeng L F, Shi C, Zhong H R, et al. Theoretical and experimental research on output characteristics of oscillating-amplifying integrated fiber laser[J]. Proceedings of SPIE, 2023, 12614: 126140T.
- [148] Zeng L F, Yang H, Xi X M, et al. Optimization and demonstration of 6 kW oscillating-amplifying integrated fiber laser employing spindle-shaped fiber to suppress SRS and TMI[J]. Optics & Laser Technology, 2023, 159: 108903.
- [149] Huang Y S, Yan P, Wang Z H, et al. 2.19 kW narrow linewidth FBG-based MOPA configuration fiber laser[J]. Optics Express, 2019, 27(3): 3136-3145.
- [150] 施建宏, 杜天怡, 马盖明, 等. 国产化工业光纤激光器实现单纤 22.07 kW 功率稳定输出[J]. 中国激光, 2022, 49(24): 2416003.
- Shi J H, Du T Y, Ma G M, et al. All-domestic industrial fiber laser realizes stable output of 22.07 kW single fiber power[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(24): 2416003.

Review of High Average Power and High Beam Quality LD-Pumped Ytterbium-Doped Fiber Laser Oscillators and Amplifiers

Yang Baolai^{1,2,3}, Wang Peng^{1,2,3}, Xi Xiaoming^{1,2,3}, Ma Pengfei^{1,2,3}, Wang Xiaolin^{1,2,3}, Wang Zefeng^{1,2,3*}

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

²Nanku Laser Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha 410073, Hunan, China;

³Hunan Provincial Key Laboratory of High Energy Laser Technology, Changsha 410073, Hunan, China

Abstract

Significance High power fiber lasers with high beam quality have been widely adopted as laser sources in many applications, such as laser cutting, laser welding, manufacturing, and military defense. The advantages of high conversion efficiency, good beam quality, compact structure, and reliable stability, are favored by the consumers. There has been a remarkable increase in the output power of fiber lasers, and the business consumption of high power fiber lasers in the market shows a remarkable increase in recent years. High power and high beam quality are essential aspects of many manufacturing and defense applications.

There are two strategies to achieve high power laser beams, which are multi-laser beam combinations and power scaling of single fiber laser. The single fiber laser with high power can be directly employed as a laser source in the manufacture or serve as an element in multi-laser beam combinations. However, the power scaling of high brightness monolithic fiber laser oscillators is limited by the manufacturing techniques of fiber laser components, stimulated Raman scattering (SRS) effect, and transverse mode instability (TMI) effect. In order to achieve a monolithic fiber laser with high power and high beam quality, the SRS and TMI effects in the fiber lasers have to be effectively mitigated based on the current power handling ability of the laser components. In this paper, three strategies to achieve high power fiber lasers are respectively reviewed and discussed, which correspond to the fiber laser oscillators, the fiber laser amplifiers, and the oscillating-amplifying integrated fiber lasers.

Progress First, the progress of kW-level fiber laser oscillators is reviewed. The published reports on high power fiber laser oscillators are reviewed in respective spatial configurations and all-fiber configurations. In the spatial configurations, reflection mirrors serve as cavity mirrors, and the coupling of pump and signal lasers are achieved by the lens. In the all-fiber configuration, the fiber Bragg gratings serve as cavity mirrors, and the pump/signal fiber combiners are packaged in all-fiber format. The all-fiber configurations have the advantages of compact structure and reliable stability. The research on high power fiber laser oscillators in recent years is outlined, and descriptions of the typical results are respectively reviewed. With the optimization of the pump scheme, fiber Bragg grating (FBG) parameters, and gain fiber parameters, the all-fiber laser oscillators are scaled to over 8 kW, and further power scaling is mainly limited by the fiber nonlinear effect and TMI effect. The development of femtosecond laser inscription of FBGs also enables the high quality FBGs for the high power fiber laser oscillators.

Second, the progress of high power fiber laser amplifiers is reviewed. Without the limitation components of FBGs,

the fiber laser amplifiers can be scaled to kW-level with enough pump power and appropriate large mode area ytterbium-doped fiber. There have been many reports on kW-level fiber laser amplifiers in the last decade around the world. However, open reports on high power fiber laser amplifiers over 5 kW-level are still in a small quantity. We focus on reviewing the typical results of over 5 kW with good beam quality, which are outlined and described in detail. Output laser power of 13 kW with beam quality M^2 of 2.9 is reported in the few-mode region. While in the nearly single mode region, an output laser power of 6 kW with M^2 of about 1.3 is reported. Further power scaling is also mainly limited by the fiber nonlinear effect and TMI effect. Similarly, ytterbium-doped fibers with large mode areas and specially designed mode discrimination techniques are promising in further power scaling of the high power fiber laser amplifiers.

Third, a new conception of the combination of advantages of fiber laser oscillators and amplifiers is proposed, which is called oscillating-amplifying integrated fiber laser. Physically, it is a master oscillation power amplification (MOPA) structure with no cladding light stripper (CLS) or isolator between the seed and power amplifier. Technically, it enjoys the advantages of high anti-reflection ability and simple control logic, similar to typical fiber laser oscillators. Many researchers have investigated the new structure, and the results are diverse, especially in the application of narrow linewidth laser amplification. Reports show that the new structure also has encountered the limitations of SRS and TMI in the power scaling, which have to be mitigated in future studies.

Conclusions and Prospects In this work, three strategies for achieving high power fiber lasers are reviewed. The recent progress and typical results are outlined and described. In the section on fiber laser oscillators, the results are described in respective spatial and all-fiber configurations. In the section on fiber laser amplifiers, results with over 5 kW are outlined and discussed. In the section on oscillating-amplifying integrated fiber laser, recent results are described. No matter which strategy is chosen, the high power scaling encounters the limitations of fiber nonlinear effect and TMI effect. The most promising techniques to settle the limitations lie in the new design and manufacture of large-mode area ytterbium-doped fibers.

Key words ytterbium-doped fiber; high power; fiber laser oscillator; fiber laser amplifier