

高功率连续波掺镱光纤激光器研究进展

党文佳 李哲 李玉婷 卢娜 张蕾 田晓 杨慧慧

Recent advances in high-power continuous-wave ytterbium-doped fiber lasers

DANG Wen-jia, LI Zhe, LI Yu-ting, LU Na, ZHANG Lei, TIAN Xiao, YANG Hui-hui

引用本文:

党文佳, 李哲, 李玉婷, 卢娜, 张蕾, 田晓, 杨慧慧. 高功率连续波掺镱光纤激光器研究进展[J]. *中国光学*, 2020, 13(4): 676-694. doi: 10.37188/CO.2019-0208

DANG Wen-jia, LI Zhe, LI Yu-ting, LU Na, ZHANG Lei, TIAN Xiao, YANG Hui-hui. Recent advances in high-power continuous-wave ytterbium-doped fiber lasers[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(4): 676-694. doi: 10.37188/CO.2019-0208

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2019-0208>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

结构紧凑的双波长连续波掺铒光纤激光器

Compact dual-wavelength continuous-wave Er-doped fiber laser

中国光学. 2019, 12(4): 810 <https://doi.org/10.3788/CO.20191204.0810>

国产化掺铊光纤激光振荡器性能研究

Investigation on the performance of a homemade thulium-doped fiber laser oscillator

中国光学. 2019, 12(5): 1109 <https://doi.org/10.3788/CO.20191205.1109>

12 W高功率高可靠性915 nm半导体激光器设计与制作

Design and fabrication of 12 W high power and high reliability 915 nm semiconductor lasers

中国光学. 2018, 11(4): 590 <https://doi.org/10.3788/CO.20181104.0590>

高功率激光装备小型化轻量化技术

Miniaturization and lightweight technology of high-power laser equipment

中国光学. 2017, 10(3): 321 <https://doi.org/10.3788/CO.20171003.0321>

远红外固体激光器研究进展

Research progress of far-infrared solid-state lasers

中国光学. 2018, 11(6): 889 <https://doi.org/10.3788/CO.20181106.0889>

固体激光器与光纤激光器对光子晶体光纤棒耦合的分析与对比

Analysis and comparison of solid-state lasers and fiber lasers on the coupling of rod-type photonic crystal fiber

中国光学. 2018, 11(6): 958 <https://doi.org/10.3788/CO.20181106.0958>

高功率连续波掺镱光纤激光器研究进展

党文佳^{1*}, 李哲², 李玉婷¹, 卢娜¹, 张蕾¹, 田晓¹, 杨慧慧¹

(1. 西安航空学院理学院, 陕西西安 710077;

2. 中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学与
光子技术国家重点实验室, 陕西西安 710119)

摘要:高功率连续波掺镱光纤激光器因具有电光效率高、光束质量好、热管理方便等优点,在工业加工、军事国防、科学研究等领域得到广泛应用,但是高功率条件下的非线性效应和热效应限制了其输出功率的进一步提升。基于此,本文重点分析了受激拉曼散射非线性效应和热致模式不稳定现象的形成机理和抑制方法,为高功率光纤激光系统的设计与集成提供了参考,并详细介绍了2015年以来为克服两种因素的影响所取得的最新研究成果,最后展望了高功率连续波掺镱光纤激光器的发展趋势。

关键词:高功率光纤激光器;主振荡功率放大器;受激拉曼散射;模式不稳定

中图分类号:O436

文献标志码:A

doi: 10.37188/CO.2019-0208

Recent advances in high-power continuous-wave ytterbium-doped fiber lasers

DANG Wen-jia^{1*}, LI Zhe², LI Yu-ting¹, LU Na¹, ZHANG Lei¹, TIAN Xiao¹, YANG Hui-hui¹

(1. School of Science, Xi'an Aeronautical University, Xi'an 710077, China;

2. State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision
Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

* Corresponding author, E-mail: wenjia_dang@126.com

Abstract: High power continuous-wave ytterbium-doped fiber lasers have unique advantages such as high electro-optical efficiency, excellent beam quality and good thermal management. For these reasons, these fiber lasers are widely used in industrial processing, national defense and military, and scientific research.

收稿日期:2019-10-24; 修订日期:2019-11-21

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目 (No.11804264); 陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目 (No.2019JQ-914); 陕西省创新能力支撑计划项目 (No.2019KRM093); 陕西省教育厅专项科研计划项目 (No.17JK0394, No.19JK0429)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No.11804264); Natural Science Basic Research Program of Shaanxi (No.2019JQ-914); Innovation Capability Support Program of Shaanxi (No.2019KRM093); Scientific Research Program Funded by Shaanxi Provincial Education Department (No.17JK0394; No.19JK0429)

However, their non-linear and thermal effects at high-power conditions limit the further improvement of their output power. In this paper, the formation mechanism and corresponding suppression methods of stimulated raman scattering and thermally induced mode instability are analyzed. We hope that these analyses can provide some reference for the design and integration of high-power fiber laser systems. The research results for overcoming these limited factors introduced since 2015 are then discussed in detail. This paper is concluded by predicting the development prospects of high-power continuous-wave ytterbium-doped fiber lasers.

Key words: high power fiber laser; master oscillator power amplifier; stimulated raman scattering; mode instability

1 引言

不同于其他类型的激光器, 光纤激光器以增益光纤作为增益介质, 并利用光纤将光波导技术和包层泵浦技术结合起来, 其实质上是一种将其他波长的激光转换为特定波长激光的换能器件, 因其具有电光效率高、光束质量好、结构紧凑以及易于热管理等特性, 逐渐成为工业加工、军事国防、科学研究等领域的主流光源。

自 1964 年 Snitzer 等人首次在光纤中实现光放大以来^[1], 光纤激光技术已逐渐成为光学领域的研究热点。由于半导体泵浦源、光纤材料等基础技术发展缓慢, 直到 1999 年光纤激光器输出功率才突破 100 W^[2], 2004 年, 英国南安普顿大学的 Jeong 首次将单模连续激光的输出功率提升至 1.36 kW^[3]。从此, 光纤激光器进入飞跃发展阶段, 德国耶拿大学、美国 JDSU 公司及英国 SPI 公司等也相继实现了千瓦以上的激光功率输出^[4-7]。美国 IPG 公司基于同带泵浦技术和分布式侧面耦合技术, 在 2009 年和 2012 年分别实现单光纤单模 9.6 kW 和 20 kW 的光纤激光输出^[8-9]。美国利弗莫尔实验室的 J.W.Dawson^[10] 以及德国耶拿大学的 Hans-Jürgen Otto 等人^[11] 在不同条件下做了模拟计算, 结果显示, 单光纤掺镱光纤激光器所能达到的极限输出功率分别为 36.6 kW 和 70 kW, 目前其输出功率远远没有达到这一数值。

近年来, 得益于大模场面积 (Large Mode Area, LMA) 增益光纤技术、高亮度半导体泵浦源^[12] 和高功率泵浦耦合技术的进步, 光纤激光器不断向着更大功率、更高光束质量的方向发展。在高

功率运行条件下, 光纤激光器出现的受激拉曼散射 (Stimulated Raman Scattering, SRS) 现象^[13]、模式不稳定 (Mode Instability, MI)^[14] 以及热损伤^[15] 等, 目前仍是限制其输出功率进一步提升的主要因素。这些限制因素归根结底是由光纤激光器中超高的激光功率密度和大量沉积的热负荷造成的。光纤中传输的激光功率密度高且光纤材料与激光相互作用距离长, 导致受激拉曼散射、受激布里渊散射等非线性相互作用显著增强; 大量沉积的热负荷引起光纤折射率变化及光纤热应力, 模式不稳定、热损伤等现象也随之出现。国内外相关研究单位针对这些当前制约功率定标放大的限制因素, 内部从增益光纤设计、光纤激光器结构等方面, 外部从减少量子亏损、泵浦调制等方面进行了大量的理论和实验研究, 为实现更高功率的光纤激光输出提供了必要的技术支撑。本文系统梳理了高功率连续波掺镱光纤激光器的研究现状, 分析了实现更高功率光纤激光输出的关键技术, 并且在此基础上展望了光纤激光器的发展趋势。

2 高功率光纤激光器中的非线性效应

高功率掺镱光纤激光器中, 硅基光纤本质上是非线性效应比较小的介质^[16]。但是光纤纤芯面积小, 光纤与激光相互作用距离长, 光纤材料对高功率密度激光的响应就变成了非线性的。SRS 是高功率光纤激光器中最主要的非线性效应, 当功率超过阈值后部分激光功率转移到另一频率下移的激光波长中, 从而降低了信号激光的功率和转换效率, 并且后向传输的斯托克斯光会损坏系统

中的光器件,严重影响光纤激光器的稳定性和可靠性^[17-18]。

对于连续波掺铒光纤激光器,光纤纤芯中的斯托克斯光随光纤位置的变化可描述为:

$$\frac{dI_s}{dz} = g_R(\Omega)I_p I_s - \alpha_s I_s, \quad (1)$$

式中, I_p 是入射激光光强, I_s 是斯托克斯光光强, $g_R(\Omega)$ 是拉曼增益系数, $\Omega = \omega_p - \omega_s$ 为入射激光和斯托克斯光的频率差, α_s 为斯托克斯光在光纤中的损耗系数^[19]。拉曼增益 $g_R(\Omega)$ 在 40 THz 的频率范围内连续分布,且在 13 THz 附近有一个较宽的峰,如图 1 所示^[20]。在掺铒增益光纤中增益系数 g_R 约为 1.06×10^{-13} m/W,此时的拉曼频移为 13.4 THz。

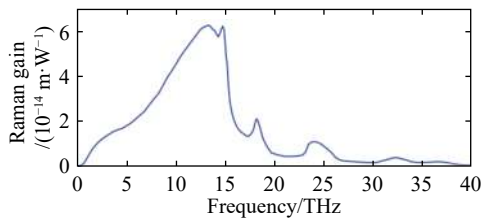


图 1 硅基光纤的拉曼增益谱^[20]

Fig. 1 Raman gain spectrum of silica fibers^[20]

光纤纤芯中的入射激光随光纤位置的变化可描述为:

$$\frac{dI_p}{dz} = -\frac{\omega_p}{\omega_s} g_R(\Omega)I_p I_s - \alpha_p I_p, \quad (2)$$

式中, ω_p 和 ω_s 分别为入射光和斯托克斯光的圆频率, α_p 为斯托克斯光在光纤中的损耗系数。

联立式 (1)、式 (2), 并假设拉曼增益谱为洛伦兹形的, 可以得出连续波受激拉曼散射效应的阈值功率为:

$$P_{th} = \frac{16A_{eff}}{g_R(\Omega)L_{eff}}, \quad (3)$$

式中, A_{eff} 为光纤有效模场面积, L_{eff} 为有效光纤长度。当达到拉曼散射阈值后, 入射激光功率迅速转移到斯托克斯光中。如果斯托克斯光的强度足够强, 又会激发第二级斯托克斯光, 甚至会产生 3 次或更高级次的斯托克斯光。根据 SRS 的形成机理及其阈值表达式, SRS 的抑制方法主要

有以下几种:

(1) 通过光纤结构设计增大光纤有效模场面积

增加光纤有效模场面积是抑制受激拉曼散射的有效途径^[21]。SRS 阈值与光纤有效模场面积成正比, 采用大模场面积光纤能够降低纤芯中入射激光的功率密度, 从而提升 SRS 阈值^[22]。目前获得大模场面积增益光纤的结构设计主要有: 直接增大纤芯直径^[23]、光子晶体光纤 (Photonic Crystal Fiber, PCF)^[24]、泄漏通道光纤 (Leakage Channel Fiber, LCF)^[25]、多沟道光纤 (Multi Trench Fiber, MTF)^[26] 等。

(2) 减小光纤长度以缩短相互作用距离

光纤激光器的 SRS 阈值与光纤有效长度成反比, SRS 是入射激光在传输过程中与光纤相互作用时产生并放大的, 较长的相互作用距离会显著增强 SRS 效应^[27], 一般可以通过提高增益光纤纤芯中稀土离子的掺杂浓度来达到减小光纤长度的目的。因此, 在保证增益光纤对泵浦光充分吸收的同时尽可能地缩短光纤长度, 可以使 SRS 光得不到有效放大, 从而提升了 SRS 阈值。

(3) 利用光谱控制技术抑制受激拉曼散射效应

光谱控制技术是在光谱层面对光纤激光的种子光谱和输出光谱进行控制的技术, 主要包括光谱线宽控制^[28-29]、光谱谱形控制^[30] 和拉曼光谱滤波^[31-32] 等。根据文献 [28-32] 中的理论仿真及实验研究, 光谱控制技术能够有效减少 SRS 斯托克斯光的产生, 并且大大降低斯托克斯光在放大过程中与信号激光的增益竞争, 对 SRS 阈值具有明显的提升作用。

(4) 通过种子源参数控制抑制受激拉曼散射效应

除以上几种抑制 SRS 的方法外, 国内外科研人员还从其他多个方面研究了影响 SRS 阈值的因素, 主要有种子激光注入功率控制^[29, 33]、种子激光时域特性控制^[34] 以及其他类型种子光源的选择 (如窄线宽超荧光光源^[35]) 等。在光纤激光器定标放大的研究中, 要综合考虑多种因素的影响, 选择合适的光纤激光种子源结构和参数以达到抑制 SRS 的目的。

3 高功率光纤激光器中的热效应

高功率光纤激光器中的热效应是限制激光功率进一步提高的另一个重要因素^[36]。在强泵浦条件下, 光纤中积累的热量主要是由激光跃迁产生的量子亏损引起的^[37], 光纤温度随着泵浦功率的增加而不断升高。此外, 光暗化效应^[38]、能级间的无辐射跃迁和材料本身的损耗^[39]进一步加剧

了光纤热负荷。光纤中大量沉积的热量能引起光纤熔融、光热损伤^[40]等物理层面的光纤结构破坏, 同时光纤折射率也会随着温度的升高发生改变, 从而导致热透镜效应^[41]和热致双折射效应^[15]的产生。另外, 基模和高阶模在纤芯中相互干涉会引起泵浦光被周期性吸收, 而量子亏损产热与泵浦光吸收有关, 从而在纤芯中形成长周期热致折射率光栅, 最终导致基模与高阶模之间相互耦合模式不稳定^[42], 如图2(彩图见期刊电子版)所示。

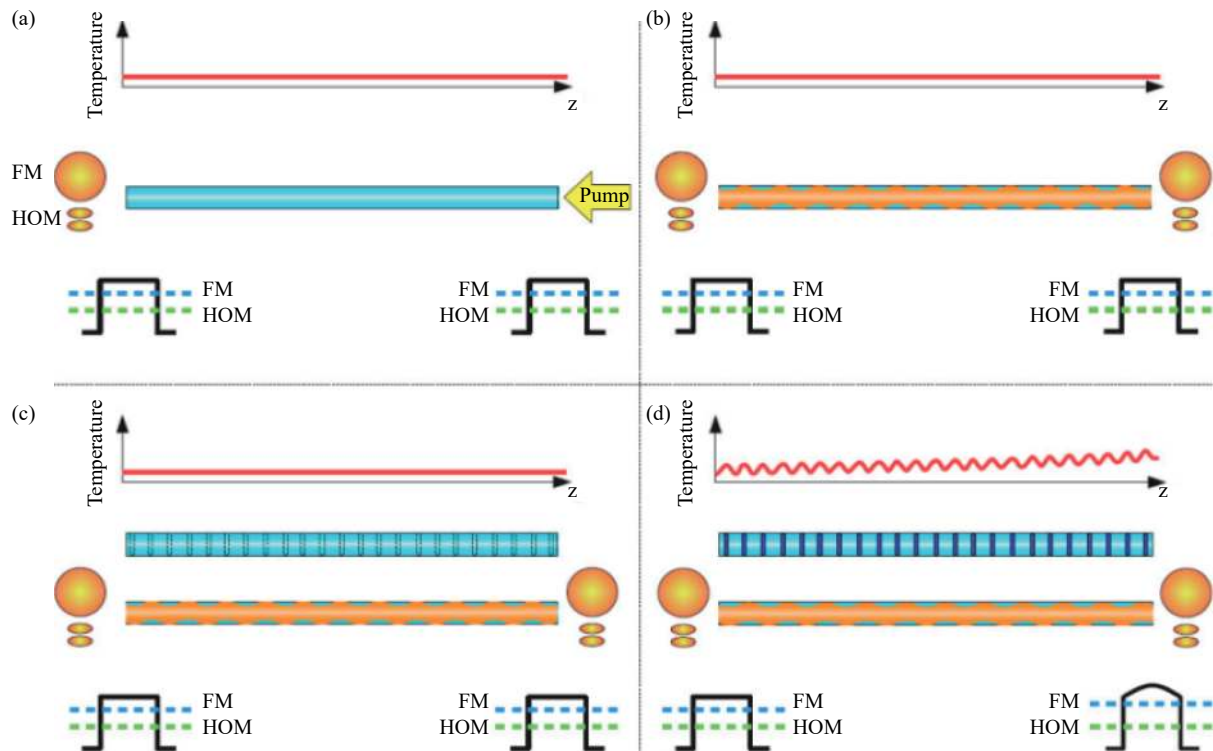


图2 热致折射率光栅的物理机制^[42]

Fig. 2 Physical mechanism of thermally induced grating^[42]

目前除了水冷、风冷等提高光纤热传导速率的强制冷却技术以外, 光纤激光器热管理技术及由热负荷引起的其他效应的抑制技术主要有以下几种:

(1) 采用级联泵浦技术减小量子亏损

量子亏损是光纤激光器中热负荷的主要来源, 采用级联泵浦技术可以大大减少热量的产生。以波长为 1080 nm 的掺镱光纤激光器为例, 采用 976 nm 的泵浦光对光纤激光器进行泵浦, 量子亏损约为 9.6%, 即有 9.6% 的泵浦光转化成了热量; 若采用波长为 1018 nm 的激光对光纤激光器进行泵浦, 由于泵浦波长与输出激光波长比较接近, 量子亏损仅为 5.7%, 大大减少了热量产生。

同时, 级联泵浦也能有效提高模式不稳定阈值^[43]、减缓光暗化速率^[44]。

(2) 采用分布式侧面泵浦技术使光纤轴向温度分布均匀

增益光纤中, 温度场不均匀分布会产生热应力和热致折射率调制, 严重时损坏光纤^[45], 因此在减少产热的同时控制光纤轴向温度分布也是光纤激光器热管理的重点问题。采用分布式侧面泵浦技术能使增益光纤中的泵浦光均匀分布, 同时保证增益光纤对泵浦光进行均衡吸收, 避免了温度梯度的产生及光纤折射率调制, 从而减少了模式不稳定现象的产生。

(3)通过光纤结构设计抑制热致模式不稳定现象

高功率光纤激光器广泛采用大纤芯直径的增益光纤作为增益介质,纤芯直径增大将导致光纤支持多个模式传输,有利于基模和高阶模互相耦合,所以仅支持基模传输的大模场光纤结构设计能够从根本上避免模式不稳定现象的出现。目前,主流的阶跃折射率增益光纤是通过降低数值孔径(Numerical Aperture, NA)来实现单模运转的^[46],其他能够抑制高阶模的大模场光纤结构还有大间距微结构光纤(Large Pitch Fiber, LPF)^[47]、手型螺旋芯光纤(Chirally Coupled Core Fiber, CCCF)^[48]、光子晶体光纤(Photonic Crystal Fiber, PCF)^[24]等。

4 高功率掺镱光纤激光器最新进展

近年来,工业加工、军事国防、科学研究等应用领域对高功率、高光束质量激光光源的需求不断增加,高功率连续波掺镱光纤激光器得到快速发展,但是其功率提升仍受热致模式不稳定现象

和受激拉曼散射非线性效应的制约。因此,本文从国内外对这两个主要制约因素的研究出发,介绍了 2015 年以来全光纤结构激光振荡器和主振荡功率放大(Master Oscillator Power Amplifier, MOPA)结构全光纤激光器的最新研究进展。

4.1 全光纤结构激光振荡器

2016 年,日本 Fujikura 公司进行了大纤芯直径的光纤结构设计,纤芯中基模与高阶模具有不同的增益系数,能够在抑制 SRS 的同时保证单模激光输出。基于该增益光纤和 915 nm 半导体泵浦源(Laser Diode, LD)搭建了全光纤结构激光振荡器,实现了功率为 2 kW、光束质量 $M^2=1.2$ 、斜率效率为 70% 的光纤激光输出^[49]。2017 年,该公司基于同样的振荡器结构并将后向泵浦功率比例提升至 57% 以进一步抑制 SRS,获得了 3 kW 单模光纤激光输出^[50]。2018 年,该公司采用模场面积为 $600 \mu\text{m}^2$ 的大芯径增益光纤以及如图 3(彩图见期刊电子版)所示的实验平台将输出功率提升至 5 kW,并将 SRS 斯托克斯光强度控制到比信号光强度低 45 dB^[51],如图 4(彩图见期刊电子版)所示。

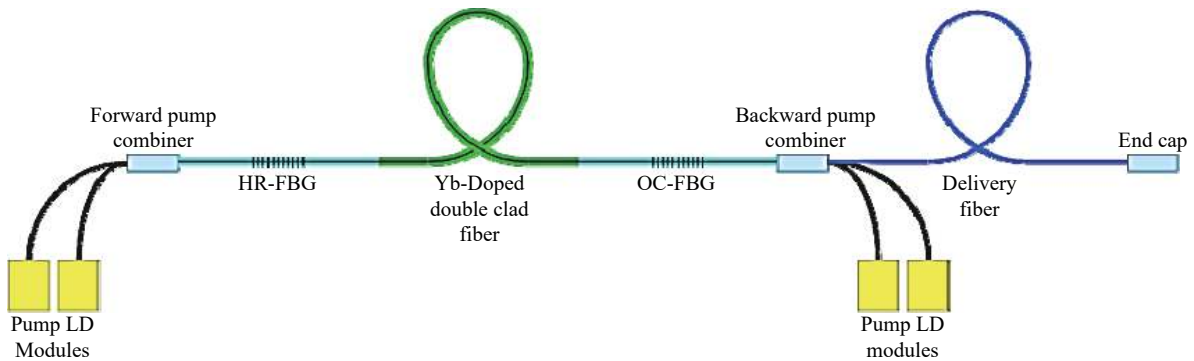


图 3 5 kW 全光纤单模光纤激光器的示意图^[51]

Fig. 3 Schematic diagram of 5 kW all-fiber single mode fiber laser^[51]

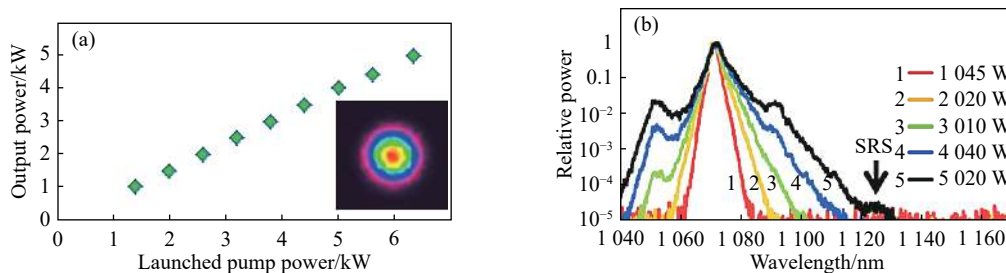


图 4 5 kW 全光纤激光器输出特性。(a)输出功率与光束质量;(b)输出光谱^[51]

Fig. 4 Output performance of 5 kW single mode all-fiber oscillator. (a) Output power and beam quality; (b) output spectrum of 5 kW fiber laser^[51]

2018 年, 德国耶拿大学采用 20 m 纤芯/包层直径为 20/400 μm 的增益光纤分别搭建了全光纤激光振荡器和 MOPA 结构光纤激光器, 来对比两者在单模输出条件下的定标放大能力^[52], 如图 5 所示。光纤振荡器基于 976 nm LD 和双向泵浦结

构获得波长为 1070 nm、功率为 5 kW 的光纤激光输出, 其中 SRS 功率占比为 6.5%, 如图 6(彩图见期刊电子版)所示。在 4.8 kW 时测得光束质量 $M^2=1.3$ 且没有监测到模式不稳定现象, 但是四波混频效应导致其激光线宽展宽至 20.6 nm@10 dB。

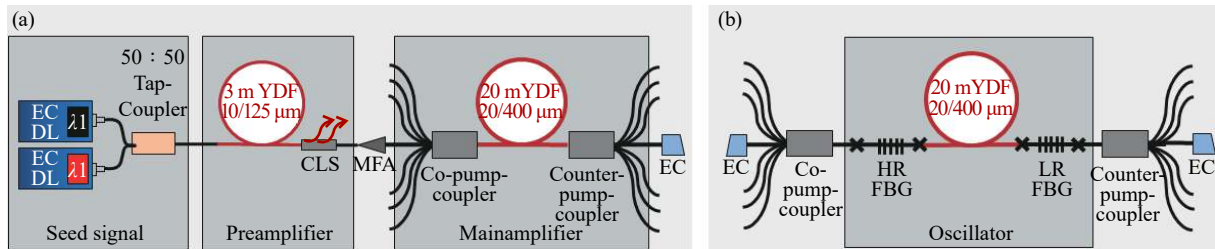


图 5 (a)MOPA 结构全光纤激光器结构示意图; (b)全光纤激光振荡器结构示意图^[52]

Fig. 5 (a) Schematical setup of the monolithic fiber amplifier; (b) schematical setup of the fiber oscillator^[52]

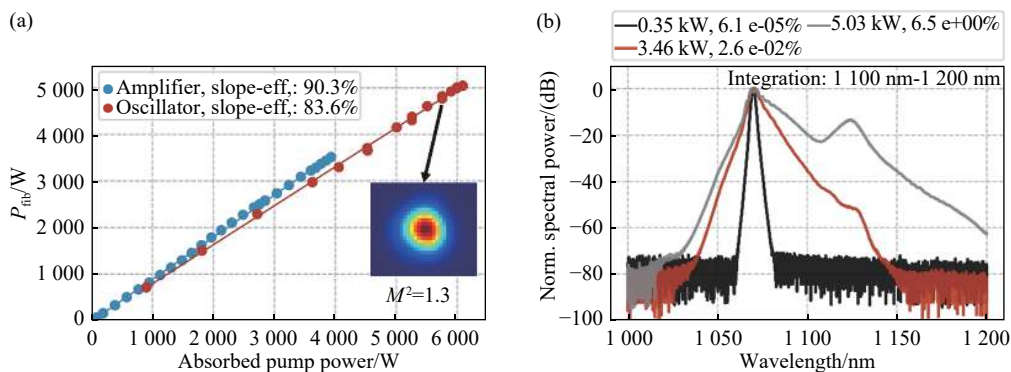


图 6 (a)全光纤激光振荡器效率; (b)全光纤激光振荡器光谱随功率变化^[52]

Fig. 6 (a) Efficiency of the fiber oscillator; (b) spectral evolution of the fiber oscillator with increasing power^[52]

2016 年, 国防科技大学的 YANG B L 等通过增大光纤有效模场面积、缩短光纤长度的方法来抑制 SRS 和 MI, 同时对比了 915 nm 与 976 nm 泵浦波长对全光纤激光振荡器输出特性的影响, 最终基于单端泵浦结构获得 2 kW 的光纤激光输出^[53]。2016 年, 他们采用双向泵浦结构将功率提升至 2.5 kW, 其中 SRS 斯托克斯光抑制比约为 20 dB 且无模式不稳定现象出现^[54]。2017 年, 他们研究了不同泵浦结构对模式不稳定阈值的影响, 通过优化正向与反向泵浦光比例获得了 3.05 kW 的输出功率^[55]。2018 年, 采用纤芯/包层直径为 25/400 μm 的增益光纤、自研光纤光栅、915 nm LD 以及优化的双向泵浦结构, 如图 7 所示, 将输出功率定标放大至 5.2 kW, 其中 SRS 抑制比为 22.3 dB, 并且没有观察到模式不稳定现象, 如图 8

所示。截至目前, 在已有报道中该实验结果是全光纤激光振荡器输出功率的最高记录^[56]。

2017 年, 国防科技大学的 YING H Y 等为缓解全光纤激光振荡器的增益光纤热效应和泵浦光滤除压力, 自主研发了多级级联分布式侧面抽运的光纤振荡器结构, 并基于该结构获得了 1969 W 的激光功率输出^[57]。其谐振腔内包含三段增益光纤, 前两段增益光纤采用双向泵浦方式, 第三段采用反向泵浦方式, 这样既分散了热积累又保证了泵浦光被充分吸收。2018 年, 他们采用 4 段均为双向泵浦的增益光纤搭建了全光纤激光振荡器, 如图 9 所示, 在泵浦功率为 5.83 kW 时得到 3.96 kW 的激光输出, SRS 抑制比高达 48 dB, 如图 10 所示^[58]。但是在实验过程中监测到了模式不稳定现象, 限制了其功率的进一步提升。

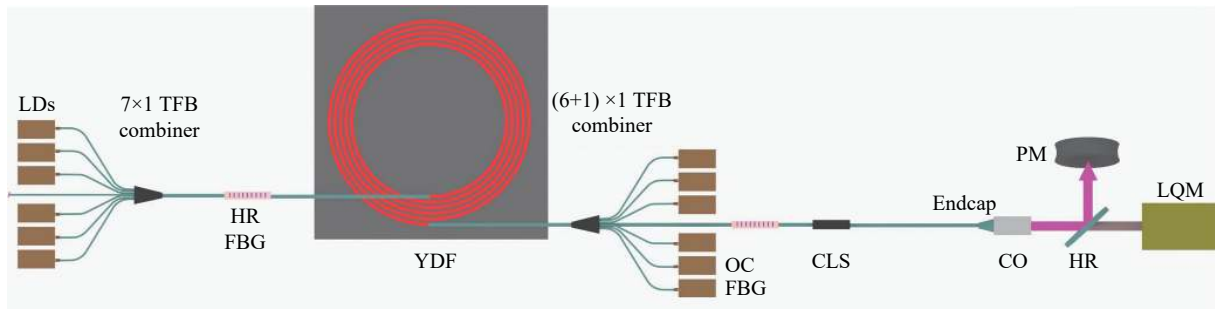


图 7 全光纤激光振荡器实验结构^[56]

Fig. 7 Experimental setup of the monolithic fiber laser oscillator^[56]

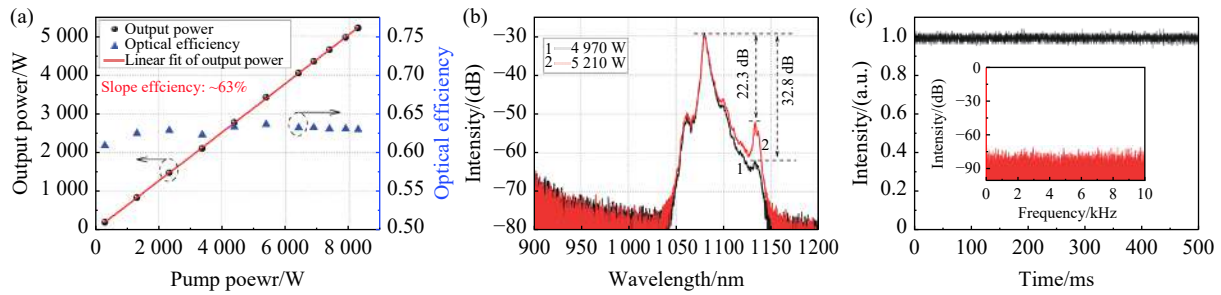


图 8 (a)输出功率及其斜率效率; (b)输出光谱; (c)5.2 kW 的时域信号及其傅立叶光谱^[56]

Fig. 8 (a) Output power and corresponding optical efficiency at different pump powers; (b) optical spectrum of the output laser; (c) time domain signal and its Fourier spectrum at an output power of 5.2 kW^[56]

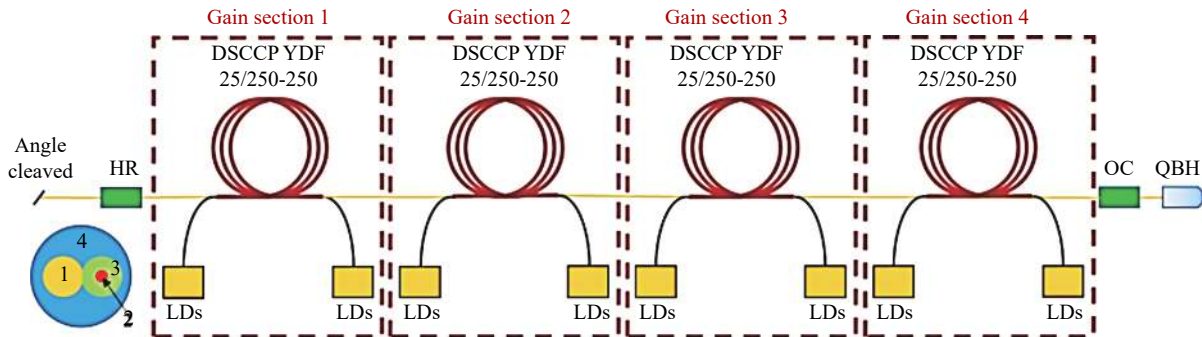


图 9 全光纤激光振荡器实验结构^[58]

Fig. 9 Experimental setup of the monolithic fiber laser oscillator^[58]

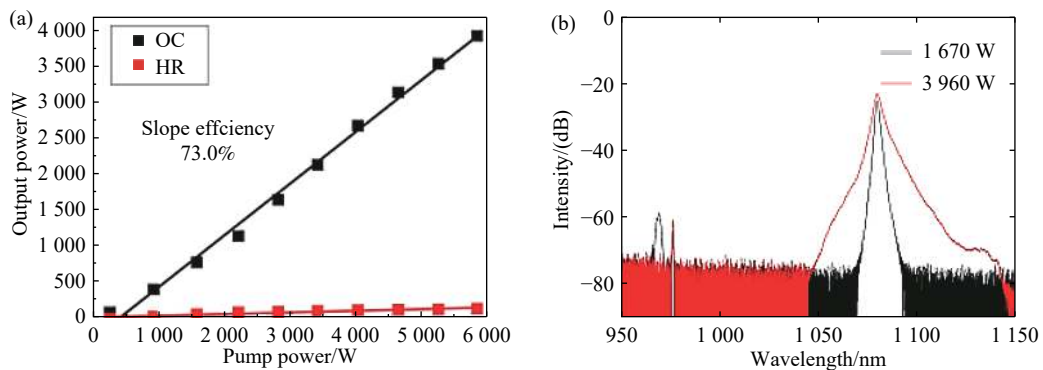


图 10 (a)全光纤激光振荡器的斜率效率; (b)不同功率时的输出光谱^[58]

Fig. 10 (a) Slope efficiency of the monolithic fiber laser oscillator; (b) optical spectra at different output powers^[58]

4.2 MOPA 结构全光纤激光器

相比于全光纤激光振荡器, MOPA 结构全光纤激光器更容易实现高功率输出, 但在光束质量、稳定性等方面与前者相比略有劣势。2012 年, 美国 IPG 公司采用 MOPA 结构已实现单光纤 20 kW 的激光输出^[9]。近几年, 中国科学院西安光学精密机械研究所、中国工程物理研究院、国防科技大学、清华大学、天津大学等国内单位逐渐加大研究投入, 在输出功率水平上也实现了从千瓦到万瓦的突破。

2016 年, 德国耶拿大学的 KUHN S 等为抑制

模式不稳定并获得单模激光输出, 设计了大模场增益光纤及与之相匹配的传能光纤, 如图 11(a) 所示, 增益光纤纤芯/包层直径为 22/450 μm 、纤芯数值孔径 $\text{NA} < 0.04$, 较小的数值孔径能够增加高阶模损耗并保证只有基模在光纤中传输。实验采用波长为 1067 nm 的光纤耦合输出的外腔半导体激光器作为种子光源, 并采用 976 nm LD 对光纤激光放大器进行泵浦。光纤激光放大器最终的输出功率为 4.3 kW, 光束质量为 $M_x^2=1.27$ 、 $M_y^2=1.21$, 如图 11(b)、11(c) 所示, 且在最高功率时没有观察到模式不稳定现象^[59]。

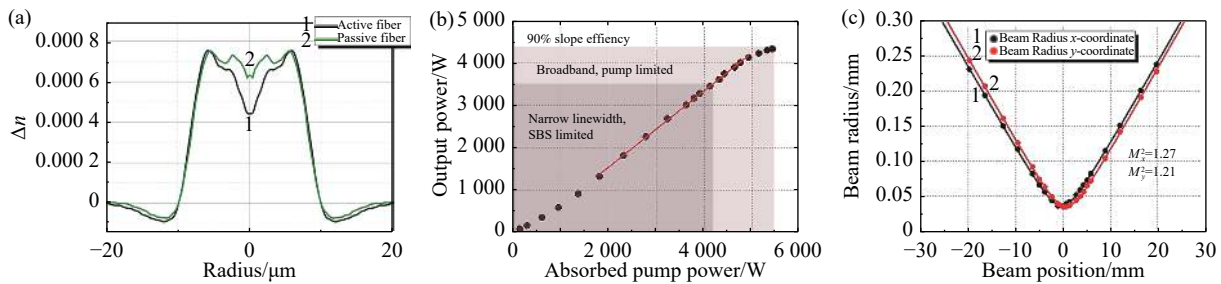


图 11 (a)增益光纤与传输光纤的折射率分布; (b)激光器功率及斜率效率; (c)光束质量^[59]

Fig. 11 (a) Refractive index profiles of a matched passive-active fiber couple; (b) slope efficiency of the laser power; (c) corresponding beam M^2 measurement^[59]

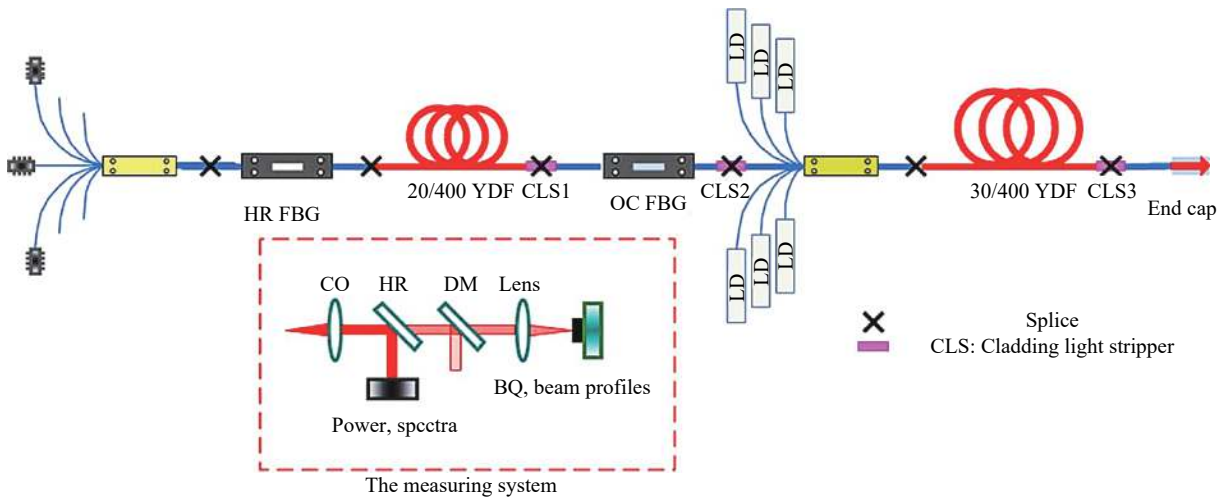


图 12 全光纤激光器和输出特性测试系统示意图^[60]

Fig. 12 Schematic diagram of the all-fiber-integrated fiber laser and the measuring system

2015 年, 国防科技大学的 YU HL 等采用 26 m 纤芯/包层直径为 30/400 μm 的大模场增益光纤来抑制 SRS, 并基于 MOPA 结构将 100 W 种子激光放大至 3.15 kW^[60], 如图 12 所示。光纤激光

系统选用 915 nm LD 作为泵浦源, 增益光纤对 915 nm 泵浦光的吸收比 976 nm 泵浦光更为平缓, 光纤轴向热分布也更均匀。同年, 他们采用 1018 nm 光纤激光器作为泵浦源对 1090 nm 光纤

激光器进行级联泵浦, 获得输出功率为 2 140 W、斜率效率为 86.9%、光束质量 $M^2=1.9$ 的光纤激光输出^[61]。2019 年, 他们又基于级联泵浦方式和拉曼光谱滤波技术, 在光纤激光振荡器和放大器之间加入两个啁啾-倾斜布拉格光纤光栅 (Chirped and Tilted Fiber Bragg Grating, CTFBG) 来滤除 SRS 斯托克斯光, 如图 13 所示, 并且对比了不使

用 CTFBG、使用一个 CTFBG 以及使用两个 CTFBG 对 SRS 的抑制效果。在使用两个 CTFBG 的条件下, 光纤激光器输出功率达到 4.2 kW, SRS 抑制比大于 15 dB, 如图 14 (彩图见期刊电子版) 所示^[62]。该实验验证了级联泵浦技术和拉曼光谱滤波技术在提升光纤激光输出功率、抑制 SRS 和控制光纤温度分布等方面的可行性。

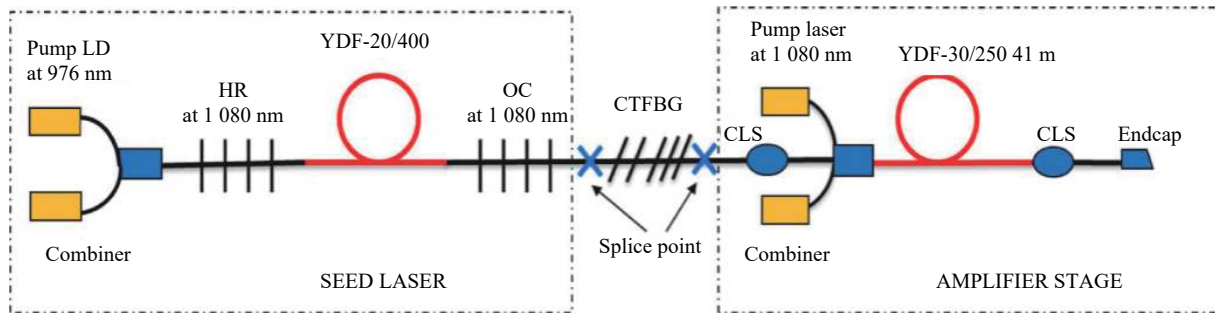


图 13 级联泵浦光纤激光器中抑制 SRS 的实验结构示意图^[62]

Fig. 13 Schematic of experimental configuration for the suppression of SRS in a tandem pumping fiber amplifier^[62]

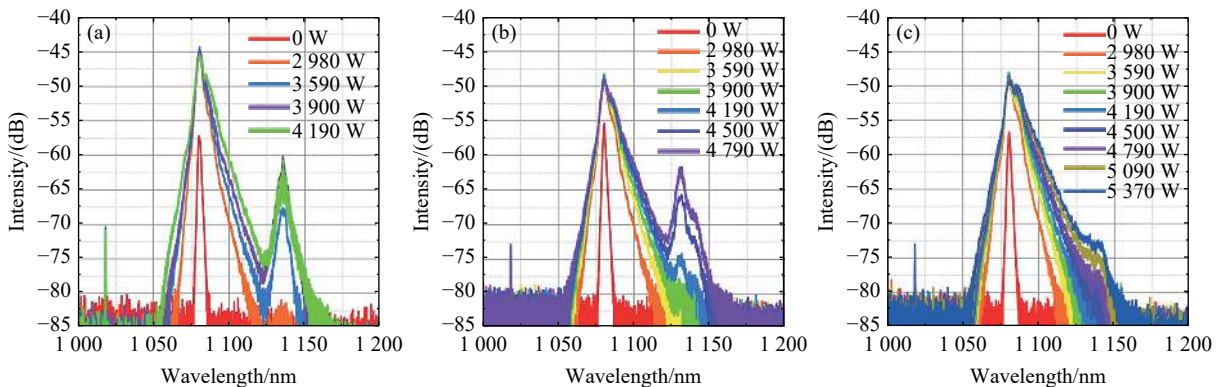


图 14 输出光谱随泵浦功率的变化。(a)不使用 CTFBG; (b)使用一个 CTFBG; (c)使用两个 CTFBG^[62]

Fig. 14 Changing spectra of output as the pump power increases (a) without and (b) with a CTFBG and (c) with two CTFBGs inserted^[62]

2016 年, 华中科技大学的 WANG J M 等人在研究高功率光纤激光放大特性时发现 SRS 阈值反比于种子激光注入功率。在优化了种子激光注入功率和放大器增益光纤长度后, 获得功率为 3 kW、斜率效率为 84.4%、光束质量为 $M^2=1.28$ 的光纤激光输出, 并且最高功率时在输出光谱中没有监测到 SRS, 如图 15 所示^[63]。

2016 年, 中国科学院西安光学精密机械研究所的 HOU CH Q 等人基于螯合物气相沉积技术研制出纤芯/内包层直径为 30/600 μm 的大模

场增益光纤, 同时优化光纤材料组分将数值孔径控制在 0.057~0.062。在此基础上, 他们基于该大模场增益光纤和自研的高功率泵浦耦合器搭建了 MOPA 结构全光纤激光系统, 获得了功率为 3 592 W、斜率效率为 72.5% 的光纤激光输出^[64]。2017 年, 他们通过进一步调整光纤材料组分的比例以及优化光纤拉制技术, 研制出掺杂离子分布均匀、几何参数更加一致的低损耗大模场增益光纤。然后, 搭建了 MOPA 光纤激光系统对增益光纤性能进行了测试, 如图 16 所示, 实现了功率为

4.62 kW、斜率效率为 80.3%、波长为 1080 nm 的光纤激光输出, 在最高输出功率时增益光纤温度

控制在 40 °C 以下, 同时将 SRS 斯托克斯光占比控制在 0.45%, 如图 17(彩图见期刊电子版)所示^[65]。

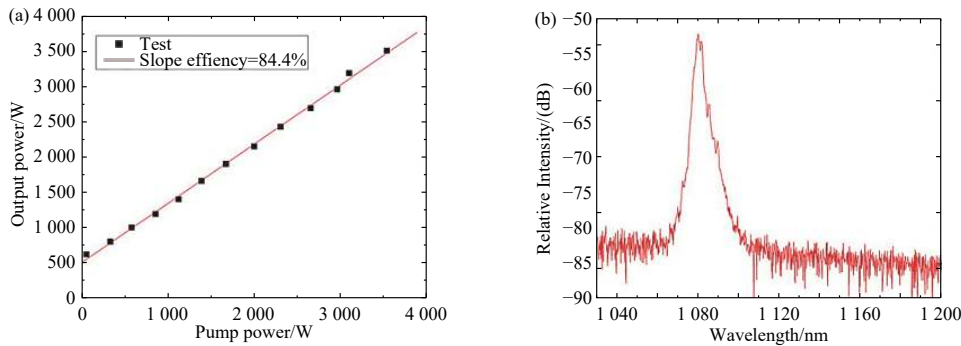


图 15 (a)在合适的种子功率注入条件下的全光纤放大器斜率效率; (b)全光纤放大器在最大输出功率时的输出光谱^[63]

Fig. 15 (a) Slope efficiency of the all-fiber amplifier with a suitable seed power injected; (b) spectra of the all-fiber amplifier signal beam at the maximum output power^[63]

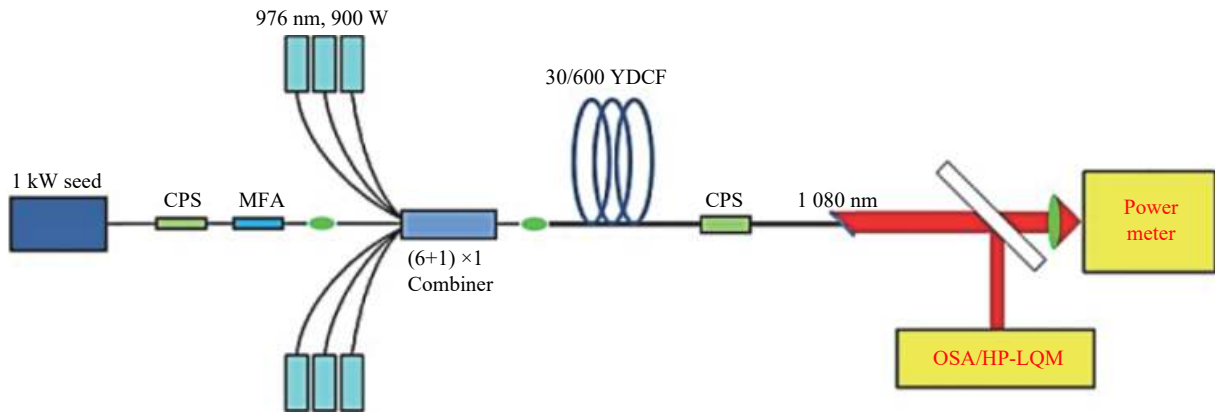


图 16 用于增益光纤性能测试的 MOPA 光纤激光系统^[65]

Fig. 16 MOPA configuration for fiber performance test^[65]

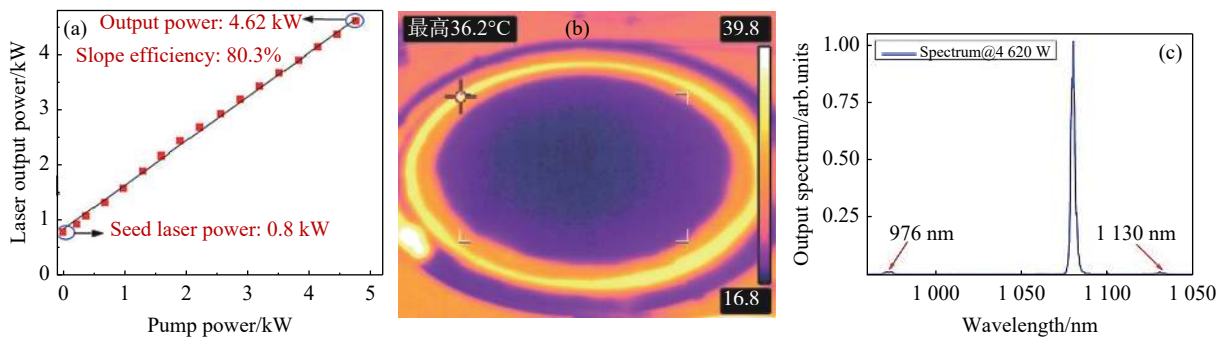


图 17 (a)Yb/Ce 共掺光纤放大器的输出功率随泵功率的变化; (b)增益光纤在 4.62 kW 时的热像图; (c)激光光谱^[65]

Fig. 17 (a) Output power of the Yb/Ce co-doped fiber power amplifier varying with the increase of pump power; (b) thermal image of the active fiber at 4.62 kW; (c) laser spectrum^[65]

2016 年, 中国工程物理研究院研制出一种包含一根增益光纤和多根泵浦光纤的泵浦增益一体化复合功能激光光纤(GTWave 光纤), 其原理是

利用倏逝波耦合效应实现泵浦光对增益光纤的侧面均匀泵浦, GTWave 光纤结构如图 18 所示。他们基于 GTWave 光纤搭建了双向泵浦的 MOPA

结构光纤激光系统, 最终获得功率为 5.07 kW、斜率效率为 71.5% 的激光输出, 其中 SRS 抑制比达到 15.6 dB^[66]。2018 年, 他们将泵浦光纤数量增加至 8 根拉制出 (8+1) 型 GTWave 光纤, 并基于此

光纤进行了高功率光纤激光系统集成, 如图 19 所示, 实现了最高功率为 11.23 kW 的激光输出, 并能够在 10.45 kW 功率水平下稳定工作, 但是在其输出光谱中监测到了 SRS 信号, 如图 20 所示^[67]。

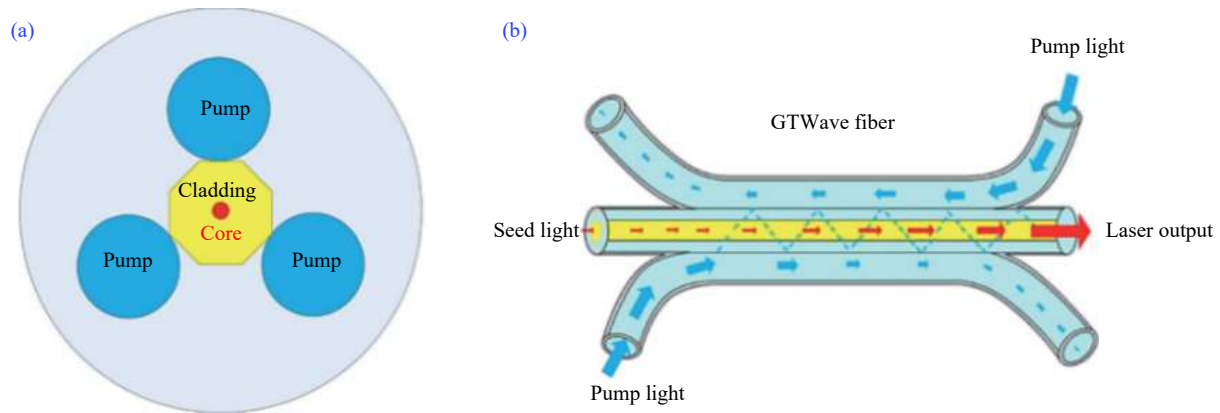


图 18 (3+1) 型 GT-Wave 光纤结构示意图。(a)横截面;(b)侧面视图^[66]

Fig. 18 Schematic diagram of (3+1) GT-Wave fiber. (a) Cross-section; (b) side-view^[66]

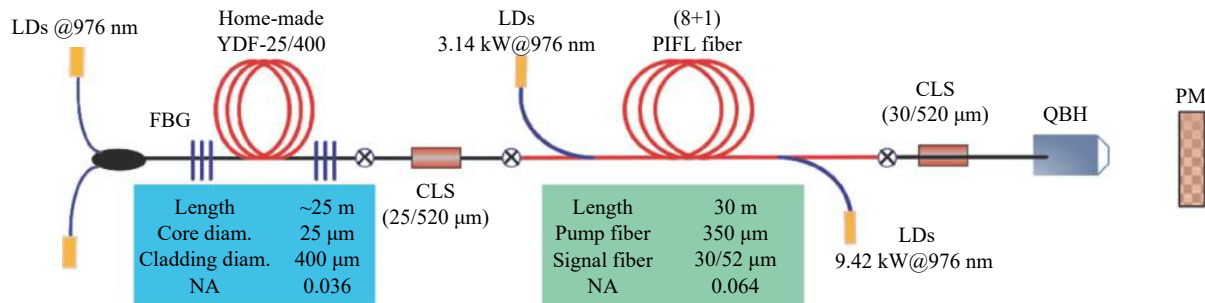


图 19 (8+1) 型 GT-wave 光纤激光放大器实验系统^[67]

Fig. 19 Experimental setup of (8+1) GT-Wave fiber amplifier system^[67]

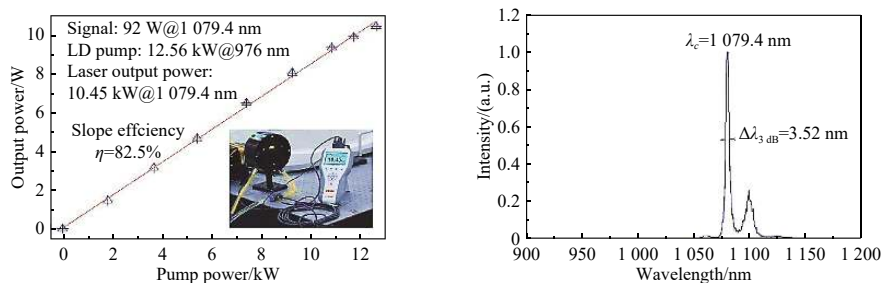


图 20 (8+1) 型 GT-wave 光纤激光放大器输出功率和输出光谱^[67]

Fig. 20 Laser output power and output spectrum of (8+1) GT-Wave fiber^[67]

2017 年, 清华大学的 YAN P 等人采用双向泵浦方式来抑制 SRS 和热效应。由于光纤放大器泵浦源的输出波长不稳定, 他们研究了随着泵浦功率升高时不同长度的增益光纤对泵浦光的吸

收情况。光纤放大器采用 25 m 纤芯/包层直径为 25/400 μm 的增益光纤以及非波长锁定的 975 nm LD, 获得了功率为 3.12 kW、斜率效率为 81.4%、波长为 1080 nm 以及光束质量 $M^2=1.58$ 的光纤激

光输出, 特别地, 光纤激光器连续运行了 2 个小时, 功率波动小于 0.6%^[68]。2018 年, 他们将种子激光波长更换为 1070 nm 来降低量子亏损和减少热量产生, 并基于自研的泵浦耦合器进一步增加了泵浦光注入功率, 光纤激光器结构如图 21

所示, 在总泵浦功率为 7.64 kW 时获得 6.02 kW 的光纤激光输出, 并且在输出光谱中没有监测到 1123 nm 的 SRS 光谱, 输出功率及输出光谱如图 22(彩图见期刊电子版)所示^[69]。

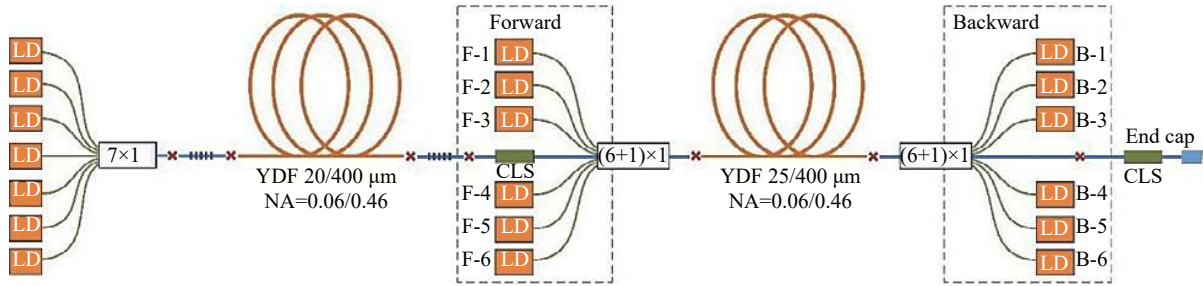


图 21 6 kW 双向泵浦的 MOPA 结构全光纤激光器结构示意图^[69]

Fig. 21 Schematic of all-fiber 6 kW bidirectional pumping MOPA laser^[69]

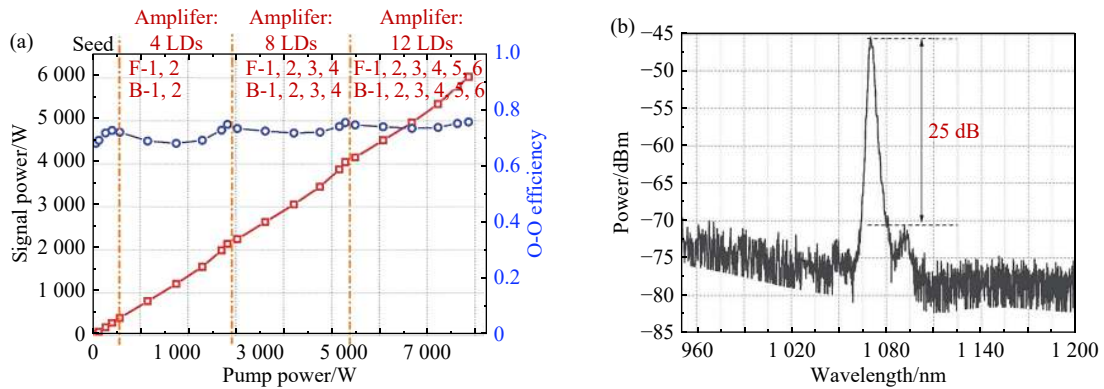


图 22 (a) 系统输出功率随泵浦功率的变化; (b) 光纤放大器的输出光谱^[69]

Fig. 22 (a) Output power of the system versus the total pumping power; (b) spectrum of output laser from the fiber laser amplifier^[69]

2017 年, 天津大学的 FANG Q 等人分别采用纤芯直径为 30 μm 和 50 μm 的掺镱增益光纤作为光纤放大器的增益介质对比了两者的定标放大能力^[70], 由其组成的光纤激光器结构如图 23 所示。他们分别获得 5.01 kW 和 8.05 kW 的输出功率, 如图 24(a)、24(c) 所示。增大纤芯直径能够降低纤芯内激光功率密度、提升非线性效应阈值, 所以前者在 5 kW 时观察到了四波混频 (Four Wave Mixing, FWM) 和微弱的 SRS 光谱, 而后者在 8 kW 时却无 SRS、FWM 等非线性效应出现, 如图 24(b)、24(d) 所示。但是增大纤芯直径会支持多个模式传输并影响光束质量, 造成前者在最

高功率时的光束质量仅为 $M^2 < 1.8$, 而后者在最高功率时的光束质量劣化为 $M^2=4$ 。

2019 年, 中国科学院上海光学精密机械研究所的陈晓龙等基于 Al-P-Si 三元光纤材料组分减小了镱离子的团簇效应, 拉制出光暗化抑制和高发光效率的增益光纤, 并采用自研光纤器件搭建了全光纤激光实验平台, 如图 25 所示, 在总泵浦功率为 11359 W 时获得 10.14 kW 的光纤激光输出, 光纤放大器的斜率效率高达 89.2%, 并在激光器运行期间没有监测到 SRS 及模式不稳定现象, 如图 26(彩图见期刊电子版)所示^[71]。

最后, 将 2015 年以来全光纤激光振荡器和

MOPA 结构全光纤激光器的研究成果在表 1 中进行详细汇总。可以看出经过科研人员多年的努

力,国内掺镱光纤激光器的输出功率已达到万瓦水平并向着更高功率水平迈进。

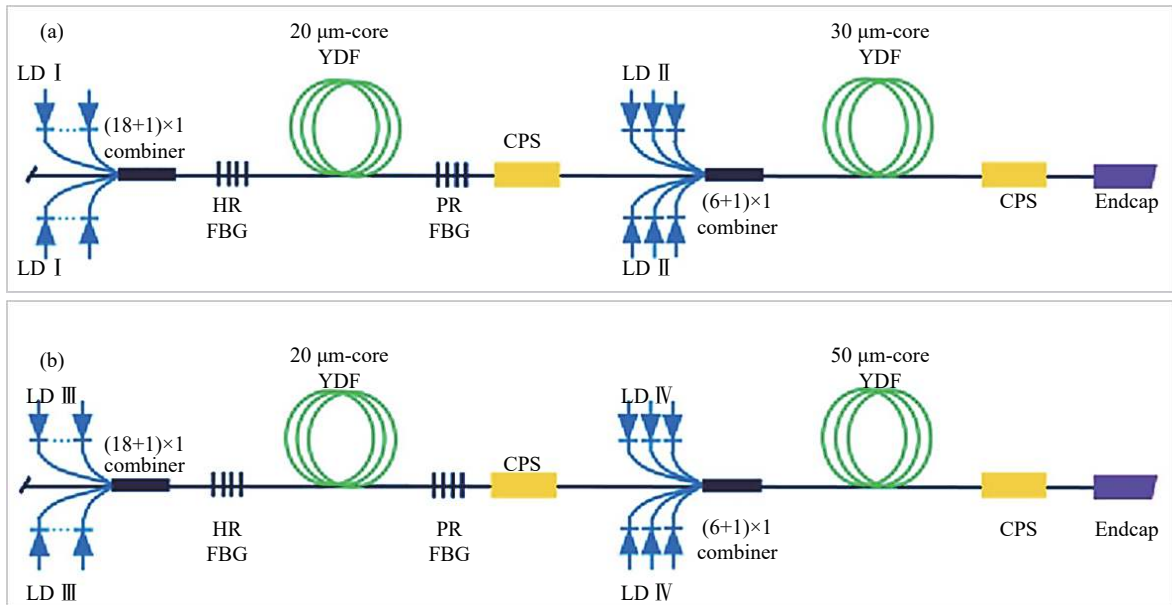


图 23 (a)5 kW 和(b)8 kW 连续波全光纤激光器结构示意图^[70]

Fig. 23 Schematic configurations of the 5 kW (a) and 8 kW (b) CW monolithic fiber laser^[70]

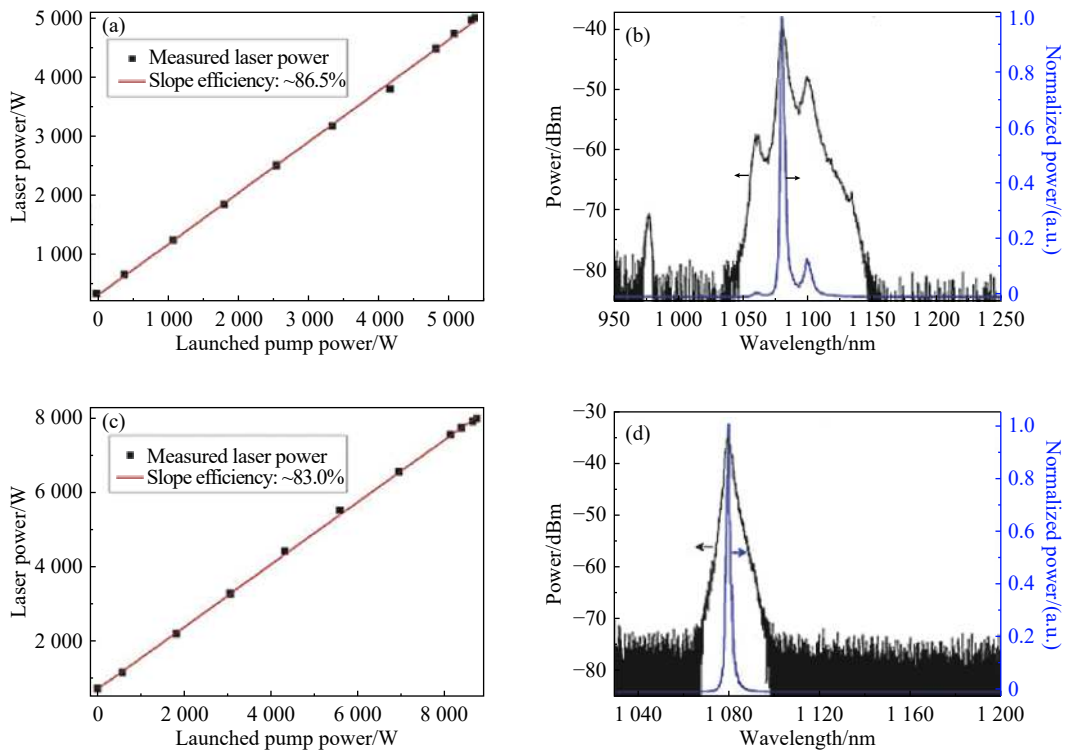


图 24 (a)5 kW 光纤激光器输出功率; (b)5 kW 光纤激光器输出光谱; (c)8 kW 光纤激光器输出功率; (d)8 kW 光纤激光器输出光谱^[70]

Fig. 24 (a) Output power of the 5 kW fiber laser; (b) output spectrum of the 5 kW fiber laser; (c) output power of the 8 kW fiber laser; (d) output spectrum of the 8 kW fiber laser^[70]

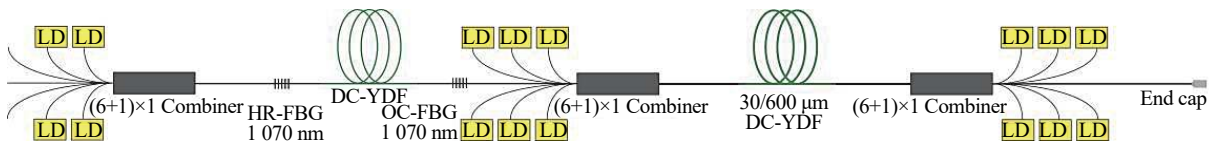


图 25 激光实验装置示意图^[71]

Fig. 25 Experimental setup of the laser system^[71]

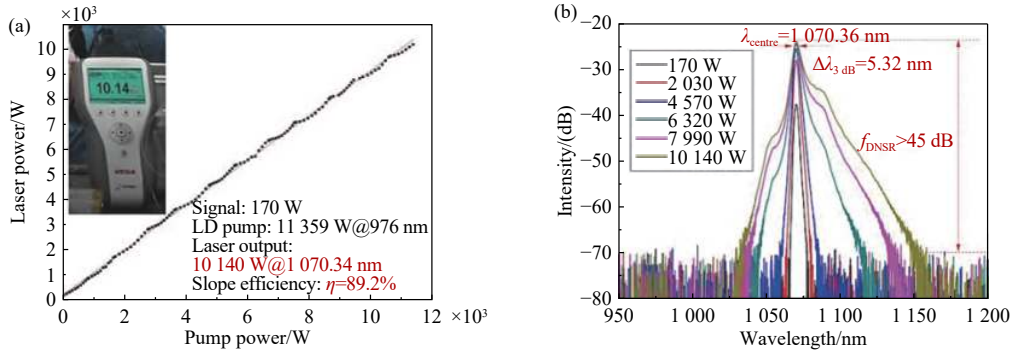


图 26 (a)激光功率和斜率效率曲线; (b)不同功率光谱测试结果^[71]

Fig. 26 (a) Experimentally measured laser power and slope efficiency; (b) test results of spectra of different output laser powers^[71]

表 1 高功率连续波掺镱光纤激光器研究进展

Tab. 1 Recent advances in high power continuous-wave ytterbium-doped fiber lasers

Type of fiber laser	Year	Institution	Power	Active fiber parameter	Pumping method
Monolithic fiber laser oscillator	2016	Fujikura, Japan	2 kW	$A_{\text{eff}}=400\mu\text{m}^2$, $NA=0.07$	915 nm bi-pump
	2016	NUDT, China	2 kW	$D_{\text{core}}=21\mu\text{m}$, $NA=0.066$	915 nm and 976 nm co-pump
	2016	NUDT, China	2.5 kW	$D_{\text{core}}=20\mu\text{m}$, $NA=0.065$	976 nm bi-pump
	2017	NUDT, China	1.969 kW	$D_{\text{core}}=25\mu\text{m}$, $NA=0.09$	976 nm bi-pump
	2017	NUDT, China	3.05 kW	$D_{\text{core}}=20\mu\text{m}$, $NA=0.065$	976 nm bi-pump
	2017	Fujikura, Japan	3 kW	$A_{\text{eff}}=400\mu\text{m}^2$, $NA=0.07$	915 nm bi-pump
	2018	NUDT, China	3.96 kW	$D_{\text{core}}=25\mu\text{m}$, $NA=0.065$	915 nm bi-pump
	2018	Fujikura, Japan	5 kW	$A_{\text{eff}}=600\mu\text{m}^2$	976 nm bi-pump
	2018	Jena, Germany	5 kW	$D_{\text{core}}=20\mu\text{m}$, $NA=0.06$	976 nm bi-pump
	2018	NUDT, China	5.2 kW	$D_{\text{core}}=25\mu\text{m}$, $NA=0.065$	915 nm bi-pump
MOPA monolithic fiber laser	2015	NUDT, China	2.14 kW	$D_{\text{core}}=30\mu\text{m}$, $NA=0.06$	1 018 nm co-pump
	2015	NUDT, China	3.15 kW	$D_{\text{core}}=30\mu\text{m}$	915 nm co-pump
	2016	HUST, China	3 kW	$D_{\text{core}}=25\mu\text{m}$, $NA=0.06$	976 nm bi-pump
	2016	XIOPM, China	3.5 kW	$D_{\text{core}}=30\mu\text{m}$, $NA < 0.062$	976 nm co-pump
	2016	Jena, Germany	4.3 kW	$D_{\text{core}}=22\mu\text{m}$, $NA < 0.04$	976 nm counter-pump
	2016	CAEP, China	5.07 kW	$D_{\text{core}}=30\mu\text{m}$, $NA=0.066$	976 nm bi-pump
	2017	XIOPM, China	4.62 kW	$D_{\text{core}}=30\mu\text{m}$, $NA=0.06$	976 nm co-pump
	2017	Tsinghua, China	3.12 kW	$D_{\text{core}}=25\mu\text{m}$, $NA=0.06$	976 nm bi-pump
	2017	TJU, Chia	8.05 kW	$D_{\text{core}}=50\mu\text{m}$, $NA=0.06$	976 nm co-pump
	2018	Tsinghua, China	6.02 kW	$D_{\text{core}}=25\mu\text{m}$, $NA=0.06$	976 nm bi-pump
	2018	CAEP, China	11.23 kW	$D_{\text{core}}=30\mu\text{m}$, $NA=0.064$	976 nm bi-pump
2019	NUDT, China	4.2 kW	$D_{\text{core}}=30\mu\text{m}$	976 nm co-pump	
2019	SIOM, China	10.14 kW	$D_{\text{core}}=30\mu\text{m}$, $NA=0.06$	976 nm bi-pump	

5 总结和展望

受激拉曼散射效应和模式不稳定现象是当前连续波掺镱光纤激光器功率提升的主要限制因素。通过本文的研究进展综述可知:通过选用大模场增益光纤、选用时域稳定的种子源、拉曼光谱滤波、减小增益光纤长度以及优化泵浦参数及采用反向泵浦等途径能够有效提高非线性效应的阈值;通过降低量子亏损、减小光子暗化以及优化光纤温度分布等来实现光纤激光器高效的热管理,具体措施如级联泵浦、侧面均匀泵浦和优化光纤材料组分等。另外,在进行非线性抑制、热管理的过程中增大纤芯直径会使光纤支持更多高阶模式,优化光纤及系统结构会影响激光器的波导结构,两者均可能使光束质量劣化,因此在定标放大时特别需要对光纤激光器进行模式控制及光束质量优化处理。

随着光纤激光放大技术研究的不断深入,研究人员发现光纤激光器在高功率条件下各种现象

表现出了复杂的相关性,如光暗化效应降低模式不稳定阈值^[72]、受激拉曼散射与模式不稳定现象相互影响^[73]等。因此,未来在进行光纤激光系统设计及集成时,要综合考虑光纤材料、光纤波导结构、激光系统结构参数、非线性效应以及热管理等因素,保证其在高功率条件下运行时的稳定性和可靠性。

目前,在提升单个光纤激光器输出功率的同时,国内外多家单位已开展相干合成、直接功率合成、光谱合成等多种类型的激光合束技术研究,例如洛克希德·马丁公司通过光谱组束技术将 96 路光纤激光合成为一束 30 kW 的激光输出^[74],美国 IPG 公司采用激光合束器将 90 路 1.2 kW 的光纤激光合成到 101.3 kW^[75],中国科学院上海光学精密机械研究所基于光谱组束技术获得 11.27 kW 的光纤激光合成功率^[76]。所以,在保证光束质量的前提下,通过合束技术将多路激光进行合成也成为未来获得数百千瓦甚至更高激光功率的可行途径。

参考文献:

- [1] KOESTER C J, SNITZER E. Amplification in a fiber laser[J]. *Applied Optics*, 1964, 3(10): 1182-1186.
- [2] DOMINIC V, MACCORMACK S, WAARTS R, *et al.*. 110 W fibre laser[J]. *Electronics Letters*, 1999, 35(14): 1158-1160.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] WIRTH C, SCHMIDT O, KLINER A, *et al.*. High-power tandem pumped fiber amplifier with an output power of 2.9 kW[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(16): 3061-3063.
- [6] INJEYAN H, GOODNO G D. *High-Power Laser Handbook*[M]. New York: McGraw-Hill Professional, 2011.
- [7] 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.
- [8] 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, Optical Society of America*, 2009: CThA3.
- [9] SHINER B. The impact of fiber laser technology on the world wide material processing market[C]. *CLEO: Applications and Technology, Optical Society of America*, 2013: AF2J. 1.
- [10] DAWSON J W, MESSERLY M J, BEACH R J, *et al.*. Analysis of the scalability of diffraction-limited fiber lasers and amplifiers to high average power[J]. *Optics Express*, 2008, 16(17): 13240-13266.
- [11] OTTO H J, JAUREGUI C, LIMPET J, *et al.*. Average power limit of fiber-laser systems with nearly diffraction-limited beam quality[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9728: 97280E.
- [12] 王立军, 彭航宇, 张俊. 大功率半导体激光合束进展[J]. *中国光学*, 2015, 8(4): 517-534.

- WANG L J, PENG H Y, ZHANG J. Advance on high power diode laser coupling[J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(4): 517-534. (in Chinese)
- [13] HU M, KE W W, YANG Y F, *et al.*. Low threshold Raman effect in high power narrowband fiber amplifier[J]. *Chinese Optics Letters*, 2016, 14(1): 011901.
- [14] 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.
- [15] BROWN D C, HOFFMAN H J. Thermal, stress, and thermo-optic effects in high average power double-clad silica fiber lasers[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2001, 37(2): 207-217.
- [16] 住村和彦, 西浦匡则. 图解光纤激光器入门[M]. 宋鑫, 译. 北京: 机械工业出版社, 2013: 74-84.
KAZUHIKO SUMIMURA. *Graphical Introduction to Fiber Lasers*[M]. SONG X, trans. Beijing: China Machine Press, 2013: 74-84. (in Chinese)
- [17] JAUREGUI C, LIMPET J, TUNNERMANN A. High-power fibre lasers[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(11): 861-867.
- [18] TER-MIKIRTYCHEV V V. *Fundamentals of Fiber Lasers and Fiber Amplifiers*[M]. Cham: Springer, 2014.
- [19] 阿戈沃 G. 非线性光纤光学[M]. 贾东方, 葛春风, 王肇颖, 等, 译. 5版. 北京: 电子工业出版社, 2014: 204-206.
AGRAWAL G. *Nonlinear Fiber Optics*[M]. JIA D F, GE CH F, WANG ZH Y, *et al.*, trans. 5th ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2014: 204-206. (in Chinese)
- [20] AGRAWAL G P. Nonlinear fiber optics: its history and recent progress[Invited][J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2011, 28(12): A1-A10.
- [21] 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.
- [22] 陈吉欣, 隋展, 陈福深, 等. 高功率双包层光纤激光器的受激拉曼散射[J]. *中国激光*, 2006, 33(3): 298-302.
CHEN J X, SUI ZH, CHEN F SH, *et al.*. Stimulated Raman scattering in high power double clad fiber laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2006, 33(3): 298-302. (in Chinese)
- [23] JAIN D, JUNG Y M, BARUA P, *et al.*. Demonstration of ultra-low NA rare-earth doped step index fiber for applications in high power fiber lasers[J]. *Optics Express*, 2015, 23(6): 7407-7415.
- [24] LIMPET J, LIEM A, REICH M, *et al.*. Low-nonlinearity single-transverse-mode ytterbium-doped photonic crystal fiber amplifier[J]. *Optics Express*, 2004, 12(7): 1313-1319.
- [25] GU G C, KONG F T, HAWKINS T W, *et al.*. Impact of fiber outer boundaries on leaky mode losses in leakage channel fibers[J]. *Optics Express*, 2013, 21(20): 24039-24048.
- [26] JAIN D, JUNG Y, KIM J, *et al.*. Robust single-mode all-solid multi-trench fiber with large effective mode area[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(17): 5200-5203.
- [27] 胡姝玲, 张春焘, 高春清, 等. 包层抽运掺镱光纤激光器中受激拉曼散射和受激布里渊散射效应[J]. *中国激光*, 2008, 35(1): 6-10.
HU SH L, ZHANG CH X, GAO CH Q, *et al.*. Stimulated Raman scattering and stimulated Brillouin scattering effects in ytterbium doped double clad fiber laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, 35(1): 6-10. (in Chinese)
- [28] 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.
- [29] LIU W, MA P F, LV H B, *et al.*. General analysis of SRS-limited high-power fiber lasers and design strategy[J]. *Optics Express*, 2016, 24(23): 26715-26721.
- [30] XU H Y, JIANG M, SHI CH, *et al.*. Spectral shaping for suppressing stimulated-Raman-scattering in a fiber laser[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(12): 3538-3542.
- [31] JANSEN F, NODOP D, JAUREGUI C, *et al.*. Modeling the inhibition of stimulated Raman scattering in passive and active fibers by lumped spectral filters in high power fiber laser systems[J]. *Optics Express*, 2009, 17(18): 16255-16265.
- [32] NODOP D, JAUREGUI C, JANSEN F, *et al.*. Suppression of stimulated Raman scattering employing long period gratings in double-clad fiber amplifiers[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(17): 2982-2984.

- [33] BOCK V, SCHULTZE T, LIEM A, *et al.*. The influence of different seed sources on Stimulated Raman Scattering in fiber amplifiers[C]. *European Conference on Lasers and Electro-Optics and European Quantum Electronics Conference. Optical Society of America*, 2017: CJ_4_3.
- [34] WANG W L, LENG J Y, GAO Y, *et al.*. Influence of temporal characteristics on the power scalability of the fiber amplifier[J]. *Laser Physics*, 2015, 25(3): 035101.
- [35] LIU W, MA P F, LV H B, *et al.*. Investigation of stimulated Raman scattering effect in high-power fiber amplifiers seeded by narrow-band filtered superfluorescent source[J]. *Optics Express*, 2016, 24(8): 8708-8717.
- [36] ZERVAS M N. High power ytterbium-doped fiber lasers—fundamentals and applications[J]. *International Journal of Modern Physics B*, 2014, 28(12): 1442009.
- [37] BEIER F, HEINZIG M, WALBAUM T, *et al.*. Determination of thermal load from core temperature measurements in single mode ytterbium-doped fiber amplifiers[C]. *Advanced Solid State Lasers, Optical Society of America*, 2015: Ath2A. 23.
- [38] 花景田, 陈宝玖, 孙佳石, 等. 稀土掺杂材料的上转换发光[J]. *中国光学与应用光学*, 2010, 3(4): 301-309.
HUA J T, CHEN B J, SUN J SH, *et al.*. Introduction to up-conversion luminescence of rare earth doped materials[J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2010, 3(4): 301-309. (in Chinese)
- [39] ŠUŠNJAR P, AGREŽ V, PETKOVŠEK R. Photodarkening as a heat source in ytterbium doped fiber amplifiers[J]. *Optics Express*, 2018, 26(5): 6420-6426.
- [40] ZHANG H W, ZHOU P, WANG X L, *et al.*. Fiber fuse effect in high-power double-clad fiber laser[C]. *2013 Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim, IEEE*, 2013: 1-2.
- [41] DONG L. Thermal lensing in optical fibers[J]. *Optics Express*, 2016, 24(17): 19841-19852.
- [42] JAUREGUI C, EIDAM T, OTTO H J, *et al.*. Physical origin of mode instabilities in high-power fiber laser systems[J]. *Optics Express*, 2012, 20(12): 12912-12925.
- [43] TAO R M, MA P F, WANG X L, *et al.*. Study of wavelength dependence of mode instability based on a semi-analytical model[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2015, 51(8): 1600106.
- [44] CODEMARD C A, SAHU J K, NILSSON J. Tandem cladding-pumping for control of excess gain in ytterbium-doped fiber amplifiers[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2010, 46(12): 1860-1869.
- [45] SHI W, FANG Q, ZHU X SH, *et al.*. Fiber lasers and their applications[Invited][J]. *Applied Optics*, 2014, 53(28): 6554-6568.
- [46] 张雪霞, 葛廷武, 丁星, 等. 分布式抽运连续光纤激光器研究[J]. *发光学报*, 2016, 37(9): 1071-1075.
ZHANG X X, GE T W, DING X, *et al.*. Study of continuous fiber laser with distributed pump structure[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2016, 37(9): 1071-1075. (in Chinese)
- [47] LIMPET 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.
- [48] MA X Q, ZHU CH, 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.
- [49] 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.
- [50] 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.
- [51] 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.
- [52] 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, Optical Society of America*, 2018: AM2A. 3.
- [53] 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.
- [54] YANG B L, ZHANG H W, SHI CH, *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.
- [55] YANG B L, ZHANG H W, SHI CH, *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.
- [56] YANG B L, SHI CH, ZHANG H W, *et al.*. Monolithic fiber laser oscillator with record high power[J]. *Laser Physics Letters*, 2018, 15(7): 075106.
- [57] YING H Y, YU Y, CAO J Q, *et al.*. 2 kW pump-light-stripper-free distributed side-coupled cladding-pumped fiber oscillator[J]. *Laser Physics Letters*, 2017, 14(6): 065102.
- [58] CHEN H, CAO J Q, HUANG ZH H, *et al.*. 4-kilowatt all-fiber distributed side-pumped oscillators[C]. *Advanced Solid State Lasers, Optical Society of America*, 2018: AM6A. 18.
- [59] KUHN S, HEIN S, HUPEL C, *et al.*. Towards monolithic single-mode Yb-doped fiber amplifiers with > 4 kW average power[C]. *Advanced Solid State Lasers, Optical Society of America*, 2016: ATu4A. 2.
- [60] YU H L, ZHANG H W, LV 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.
- [61] XIAO H, LENG J Y, ZHANG H W, *et al.*. High-power 1018 nm ytterbium-doped fiber laser and its application in tandem pump[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(27): 8166-8169.
- [62] WANG M, WANG Z F, LIU L, *et al.*. Effective suppression of stimulated Raman scattering in half 10 kW tandem pumping fiber lasers using chirped and tilted fiber Bragg gratings[J]. *Photonics Research*, 2019, 7(2): 167-171.
- [63] 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.
- [64] HOU CH Q, ZHU Y G, ZHENG J K, *et al.*. Ytterbium-doped double-cladding fiber with 3.5 kW output power, fabricated by chelate gas phase deposition technique[J]. *Optical Materials Express*, 2016, 6(4): 979-985.
- [65] ZHENG J K, ZHAO W, ZHAO B Y, *et al.*. 4.62 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.
- [66] ZHAN H, 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.
- [67] 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.
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. (in Chinese)
- [68] YAN P, HUANG Y SH, 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.
- [69] XIAO Q R, LI D, HUANG Y SH, *et al.*. Directly diode and bi-directional pumping 6 kW continuous-wave all-fibre laser[J]. *Laser Physics*, 2018, 28(12): 125107.
- [70] 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.
- [71] 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.
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. (in Chinese)
- [72] OTTO H J, MODSCHING N, JAUREGUI C, *et al.*. Impact of photodarkening on the mode instability threshold[J]. *Optics Express*, 2015, 23(12): 15265-15277.
- [73] 王小林, 陶汝茂, 杨保来, 等. 掺镱全光纤激光振荡器横向模式不稳定与受激拉曼散射的关系[J]. *中国激光*, 2018, 45(8): 0801008.
WANG X L, TAO R M, YANG B L, *et al.*. Relationship between transverse mode instability and stimulated Raman scattering in ytterbium doped all-fiber laser oscillator[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(8): 0801008. (in Chinese)
- [74] HONEA E, AFZAL R S, SAVAGE-LEUCHS M, *et al.*. Advances in fiber laser spectral beam combining for power scaling[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9730: 97300Y.

- [75] SHCHERBAKOV E A, FOMIN V V, ABRAMOV A A, *et al.*. Industrial grade 100 kW power CW fiber laser[C]. *Advanced Solid State Lasers, Optical Society of America*, 2013: ATh4A. 2.
- [76] 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. (in Chinese)

作者简介:



党文佳(1983—), 女, 博士, 讲师, 陕西西安人, 2015 年于西安电子科技大学获得工学博士学位, 主要从事光外差探测、光纤激光器及光电子技术方面的研究。E-mail: wenjia_dang@126.com

《发光学报》

—EI 核心期刊(物理学类; 无线电电子学、电信技术类)

《发光学报》是中国物理学会发光分会与中国科学院长春光学精密机械与物理研究所共同主办的中国物理学会发光分会的学术会刊。该刊是以发光学、凝聚态物质中的激发过程为专业方向的综合性学术刊物。

《发光学报》于 1980 年创刊, 曾于 1992 年, 1996 年, 2000 年和 2004 年连续四次被《中文核心期刊要目总览》评为“物理学类核心期刊”, 并于 2000 年同时被评为“无线电电子学、电信技术类核心期刊”。2000 年获中国科学院优秀期刊二等奖。现已被《中国学术期刊(光盘版)》、《中国期刊网》和“万方数据资源系统”等列为源期刊。英国《科学文摘》(SA)自 1999 年; 美国《化学文摘》(CA)和俄罗斯《文摘杂志》(AJ)自 2000 年; 美国《剑桥科学文摘社网站》自 2002 年; 日本《科技文献速报》(CBST, JICST)自 2003 年已定期收录检索该刊论文; 2008 年被荷兰“Elsevier Bibliographic Databases”确定为源期刊; 2010 年被美国“EI”确定为源期刊。2001 年在国家科技部组织的“中国期刊方阵”的评定中, 《发光学报》被评为“双效期刊”。2002 年获中国科学院 2001~2002 年度科学出版基金“择重”资助。2004 年被选入《中国知识资源总库·中国科技精品库》。本刊内容丰富、信息量大, 主要反映本学科专业领域的科研和技术成就, 及时报道国内外的学术动态, 开展学术讨论和交流, 为提高我国该学科的学术水平服务。

《发光学报》自 2011 年改为月刊, A4 开本, 144 页, 国内外公开发行。国内定价: 40 元, 全年 480 元, 全国各地邮局均可订阅。《发光学报》欢迎广大作者、读者广为利用, 踊跃投稿。

地 址: 长春市东南湖大路 3888 号

《发光学报》编辑部

邮 编: 130033

电 话: (0431)86176862, 84613407

E-mail: fgxbt@126.com

国内统一刊号: CN 22-1116/O4

国际标准刊号: ISSN 1000-7032

国内邮发代号: 12-312

国外发行代号: 4863BM

http://www.fgxb.org