

中国激光

级联泵浦高功率掺镱光纤激光器:进展与展望

肖起榕^{1,2}, 田佳丁^{1,2}, 李丹^{1,2}, 齐天澄^{1,2}, 王泽晖^{1,2},
于伟龙^{1,2}, 吴与伦^{1,2}, 闫平^{1,2*}, 巩马理^{1,2}

¹清华大学精密仪器系光子测控技术教育部重点实验室, 北京 100084;

²清华大学精密仪器系精密测试技术及仪器国家重点实验室, 北京 100084

摘要 级联泵浦的高功率掺镱光纤激光器在近年快速发展, 已经成为获取具有优异光谱特性、高亮度、高功率激光光束的重要技术途径。以高功率 1018 nm 光纤激光器为代表的高亮度级联泵浦激光源的研究和应用, 给包括传统波长掺镱光纤激光、高功率随机光纤激光、拉曼光纤激光在内的众多高功率光纤激光领域带来突破性的性能提升。本文总结回顾了级联泵浦高功率掺镱光纤激光器的最新研究进展, 介绍了当前实现高性能输出的级联泵浦高功率光纤激光所应用的主要关键技术, 并展望了未来研究的方向和挑战。

关键词 激光器; 高功率光纤激光器; 级联泵浦; 1018 nm 光纤激光器; 随机光纤激光; 拉曼光纤激光

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.1501004

1 引言

掺镱光纤激光器在近二十年来发展迅速, 自 20 世纪末突破百瓦级功率输出以来, 目前单纤输出功率已经达到 2 万瓦级水平^[1-4]。得益于光纤波导特性和半导体激光(LD)泵浦源技术, 高功率掺镱光纤激光器具有转换效率高、输出亮度高、结构紧凑灵活、热管理简单、系统稳定可靠等优势。已成为许多高功率激光系统优选光源之一, 在工业、医疗、科研、军事等方面获得了越来越广泛的应用。

提升高功率掺镱光纤激光器输出性能的各种研究持续被业界重点关注, 其单纤输出功率提升、光谱特性控制和输出波长拓展是重要研究方向, 然而这些性能直接受光纤激光器泵浦构型的影响。为此, 直接影响光纤激光器的输出功率和关键性能的泵浦方案, 始终是光纤激光器的研究热点之一。目前常将泵浦方案分为直接泵浦和级联泵浦两类。级联泵浦指用激光泵浦激光, 且隐含了最终激光由多级光光转化过程接力达成的意思, 表现在系统结构上, 泵浦光源通常是被光泵浦的激光。相应地, 直接泵浦

则指整个系统仅有一次主要的光光转化过程(即所谓“直接”), 泵浦光源本身是由其他(非光)能量直接泵浦的。对于掺镱光纤激光器, 直接泵浦方案常用波长在 915 nm 或 976 nm 附近的半导体激光器作为泵浦光源; 而级联泵浦方案则常用波长在 1000 nm 以上的光纤激光器作为泵浦光源。近年来常见于文献的“同带泵浦”大多属于级联泵浦; “同带泵浦”不仅表达了“泵浦激光与输出激光的波长同处于增益介质相近的吸收发射带上”这一特点(尽管“带”的严格界限尚不明确), 还与级联泵浦的英文对应词有相似的发音, 故而有时会被交替使用。为了简化讨论和一般化, 本文仅使用“级联泵浦”。直接泵浦和级联泵浦都被用于实现高性能的掺镱光纤激光输出, 在功率和空间亮度提升、光谱性质控制、输出波长拓展等方面取得突破性进展。其中, 级联泵浦技术在近年的研究中取得了令人瞩目的研究成果, 国外已经推出了级联泵浦单纤输出功率 2 万瓦的商用产品^[2]; 我国近期成功验证了国产 2 万瓦级联泵浦单纤功率输出和支持万瓦输出的国产增益光纤^[3-4]。

收稿日期: 2021-03-22; 修回日期: 2021-04-10; 录用日期: 2021-04-15

基金项目: 国家自然科学基金(61875103, 61675114, 62075113)

通信作者: *pyan2021@163.com

受益于半导体激光器为代表的光源在 20 世纪末期的飞速发展,直接泵浦在很长时间内一直是高功率掺镱光纤激光泵浦配置的主要方案,且在光纤激光振荡器和放大器中均已实现高功率输出^[5-15]。随着掺镱光纤激光功率水平的不断提高,尤其是连续掺镱光纤激光的单纤输出功率朝着万瓦级迈进,直接泵浦逐渐难以满足功率安全提升的需求。受限于直接泵浦方案下半导体激光较低的空间亮度[通常为 $0.2 \text{ W}/(\mu\text{m}^2 \cdot \text{sr})$],若要使高功率泵浦光在包层直径数百微米、长度有限的增益光纤内得到充分吸收,可利用的泵浦波长非常有限(必须在增益介质较强的吸收峰附近,对掺镱光纤而言在 976 nm 附近),因而直接泵浦的泵浦波长与最终激光输出波长(通常 1050~1090 nm)之间往往存在较大的波长差。当激光输出功率提升到一定程度时,波长差带来的激光过程中的量子亏损产生严重热效应,即便是光纤这样易于散热管理的结构也难以承受。采取级联泵浦配置,以高空间亮度的光纤激光[高达 $10 \sim 1000 \text{ W}/(\mu\text{m}^2 \cdot \text{sr})$ 量级^[16-17]]作为泵浦源,可实现泵浦亮度倍增超过 3 个数量级,因此可以采用包层直径更小的掺镱光纤以提升泵浦光吸收系数,从而拓展泵浦波长的选择范围至镱离子吸收截面较低的近输出激光波长的位置,进一步控制量子亏损带来的热负载,实现更高功率输出。近年来,面向级联泵浦应用的高功率中间波长(1000^[16,18]~1030 nm^[17,19-21])掺镱光纤激光器得到快速发展。2009 年底,美国 IPG 公司首次向世人展示了由 147 束 1018 nm 光纤激光器泵浦的万瓦级光纤激光器方案^[22-23],验证了级联泵浦产生万瓦级高功率光纤激光的可行性。研究热潮极大地推动了级联泵浦的高功率光纤激光器(包括以 1018 nm 为代表的级联泵浦源光纤激光器)的飞速发展,至今仍在快速刷新着高功率光纤激光输出性能的记录。

本文结合了作者团队持续多年在高功率 1018 nm 光纤激光器级联泵浦源技术和级联泵浦结构的高功率掺镱光纤激光器方面的研究经验,总结了级联泵浦源及其掺镱光纤激光器技术的最新进展和发展趋势,重点介绍了级联泵浦在高功率光纤激光器功率和空间亮度提升、光谱特性控制、输出波长拓展等性能提升的应用。第二部分将介绍级联泵浦常用的高功率 1018 nm 光纤激光器在近十年来的技术进展,包括用于抑制放大自发辐射(ASE)的极具潜力的新光纤、器件与系统设计。第三部分至第五部分将介绍一些重要类型的光纤激光器在采用级

联泵浦方面的最新应用成效和趋势,其中第三部分主要关注级联泵浦应用于传统波长(小于 1100 nm)高功率掺镱光纤激光器及功率和亮度提升效果,第四部分主要关注级联泵浦的高功率随机光纤激光器(RLF),介绍通过该技术实现高功率、时域稳定、光谱展宽控制的激光输出最新研究。第五部分主要关注级联泵浦的高功率拉曼光纤激光器,将高功率高亮度光纤激光波长拓展至 $1.2 \mu\text{m}$ 。

2 级联泵浦用高功率 1018 nm 光纤激光器

2.1 高功率 1018 nm 光纤激光器的进展总览

高功率 1018 nm 光纤激光器的研究受到了业界的瞩目,在近十年中实现了性能的快速提升。由于日新月异的技术和应用场景变化,在实际发展过程中不同阶段的主要器件限制因素不同,高功率 1018 nm 光纤激光器的性能提升并非连续进行,表现为不同参数之间的取舍或者单一参数的飞跃。因为较强的 ASE 限制,高功率 1018 nm 光纤激光器的单纤功率往往比同期传统波长的高功率掺镱光纤激光器低一个数量级,因而其本身很少作为高功率应用的最终光束。相反,在级联泵浦应用需求的驱动下,高功率 1018 nm 光纤激光器的发展目标从早期主要强调输出功率提升,逐渐转向功率和亮度并重,甚至更加重视亮度的提升,其中亮度包含了对光束质量和功率的整体评价。这是因为,对于更有希望达到更高功率水平的其他波长光纤激光,泵浦注入光纤的能力逐渐成为瓶颈因素,而 1018 nm 光纤激光的亮度提升使得更多的泵浦光能够注入更细的增益光纤,甚至允许高功率纤芯泵浦;其综合效益超过单纯增加泵浦功率。相比之下,传统光纤激光中较为重视的其他性能指标,如中心波长窄线宽等,在当前的 1018 nm 光纤激光研究中尚较少关注,这是因为目前水平的级联泵浦应用本身对于高亮度 1018 nm 泵浦源的波长性质不甚敏感;但是,若考虑通过光谱合成的方式进一步提升泵浦亮度,则窄线宽的高功率 1018 nm 光纤激光在未来仍有广阔的应用需求。

一些重要的高功率 1018 nm 研究结果列在表 1 中。2010~2015 年,中国科学院上海光学精密机械研究所^[24]、国防科技大学^[25-29]、中国工程物理研究院^[30]、华中科技大学^[31]、中国科学院光电技术研究所^[32]等团队均有高功率 1018 nm 光纤激光器的公开报道,其国防科技大学^[27-28]与中国科学院光电

技术研究所^[32]的输出功率均达到 300 W 以上。国防科技大学团队报道了较多的光束质量数据以及光谱 ASE 强度数据。无论功率如何,早期的高功率 1018 nm 光纤激光器研究达到的实际亮度水平均在

80 W/($\mu\text{m}^2 \cdot \text{sr}$)以下,且 1018 nm 激光光谱强度与 ASE 强度差仅为 30 dB~40 dB。限制这些性能的主要因素是多方面的,包括增益光纤技术水平、泵浦用 LD 的亮度水平和泵浦合束技术水平等。

表 1 近年性能较高的高功率 1018 nm 光纤激光器结果

Table 1 Some high results from recent studies of high-power 1018 nm fiber lasers

| Year | Power / W | Brightness / [$\text{W} \cdot (\mu\text{m}^2 \cdot \text{sr})^{-1}$] | SAR / dB | Optical-optical efficiency / % | YDF: length / (μm ; m) | Coil diameter / m | OC rflc. / % | Other features |
|----------------------|-----------|--|----------|--------------------------------|------------------------------------|-------------------|--------------|------------------------------------|
| 2015 ^[33] | 200 | 155 | | 75 | 10/130; 2 | | 28.9 | |
| 2015 ^[34] | 403 | 171 | 30 | 66 | 25/250; 3.1 | 12 | 15.5 | Not all fiber |
| 2016 ^[35] | 220 | 155 | | 75 | 10/125; 2.5 | | 30 | 2-direction pumped |
| 2017 ^[36] | 805 | 240 | 35 | 65 | 30/250; 3 | | 14.9 | |
| 2017 ^[37] | 307 | 216 | 54 | 76 | 15/130; 1.1 | | 15 | |
| 2018 ^[38] | 1150 | 289 | | 80 | 30/250; 3.2 | 10 | 13.6 | 2-direction pumped |
| 2018 ^[39] | 472 | 333 | | 46 | 20/400; 2.8 | 12 | 10 | |
| 2019 ^[40] | P-616 | 491 | 55 | 75 | 10/125; 1.5× 32/260; 6 | ×48 | — | counter pumped × counter pumped |
| 2020 ^[16] | 1330 | 1121 | 60 | 78 | GTwave; 17 | | 15—20 | 2-direction pumped |

(Note: ‘P-’ means linearly-polarized; SAR means signal/ASE ratio; OC rflc. means reflectivity of the OC FBG)

从 2015 年起,来自德国^[33]、新加坡^[34,41]、以色列^[35]等发达国家的研究团队将亮度提升至 130~170 W/($\mu\text{m}^2 \cdot \text{sr}$),而单纤输出功率仍在 200~400 W 左右,与先前功率水平差异不大。国防科技大学团队报道了 7 束 1018 nm 光束合束输出 2240 W^[42]以及更高的 5 kW 合束^[43],但实际光束亮度未超过 80 W/($\mu\text{m}^2 \cdot \text{sr}$),高功率 1018 nm 光纤激光亮度提升的困难可见一斑。在 2017 年,本文作者团队报道了基于 30/250 μm 掺镱双包层光纤、用非锁波长 976 nm LD 泵浦的高功率 1018 nm 光纤激光^[36][图 1(a)],单纤输出功率达到 805 W;较大的纤芯直径导致光束质量 $M^2=1.8$,但 1018 nm 光束的亮度大幅提升至 240 W/($\mu\text{m}^2 \cdot \text{sr}$)。同年,中国科学院上海光学精密机械研究所团队实现了基于 15/130 μm 少模掺镱光纤的 307 W 功率^[37],在单模输出的基础上获得了 216 W/($\mu\text{m}^2 \cdot \text{sr}$)的亮度。2018 年,本文作者团队进一步采用锁波长 976 nm LD 和更具技术挑战性的双向泵浦配置的 1150 W 输出功率^[38][图 1(b)],通过侧面泵浦耦合技术实现了极低插入损耗的高功率双向泵浦注入,在将亮度进一步提升至 289 W/($\mu\text{m}^2 \cdot \text{sr}$)的同时,还获得了 82.9%的极高效率,成为当时功率、亮度、效率三方面性能指标均最优的高功率 1018 nm 光纤激光器。

即使如此,高功率 1018 nm 光纤激光器的性能提升仍有极大的空间,在这方面的突破性研究仍然不断涌现^[16,39-40,44-48]。2019 年,德国夫琅禾费应用

物理研究所团队报道了特殊设计的环形掺杂掺镱光纤,通过该光纤和以外腔反馈半导体激光器为种子的主振荡功率放大(MOPA)结构放大,并插入多级分立 ASE 滤波器件及隔离器件,获得了线偏振的 616 W 单模 1018 nm 光纤激光输出^[40][图 2(a)],亮度直接达到 491 W/($\mu\text{m}^2 \cdot \text{sr}$)的高水平。天津大学团队报道了用传统掺镱双包层光纤 MOPA 结构产生 100 W 的线偏振窄线宽输出^[49]。2020 年,美国 IPG 公司再次报道了大幅度的性能提升,实现了 1330 W 的单模输出^[16][图 2(b)],亮度达到了极高的 1100 W/($\mu\text{m}^2 \cdot \text{sr}$)以上。

2.2 高功率 1018 nm 光纤激光的主要限制因素

从上述研究的发展中,可见高功率 1018 nm 光纤激光器最主要的性能限制物理因素是 ASE 效应及其引起的寄生振荡。ASE 是增益离子的内禀性质。镱离子的能级结构决定了其最高的吸收和发射截面均位于 976 nm 附近,当波长向长波移动时,吸收截面不断减小,发射截面经历一个位于 1035 nm 附近(精确位置及光谱形状受光纤基质材料的具体掺杂元素的影响)的次高发射带,这决定了镱离子在此发射带天然地具有(比 1018 nm)更强的自发辐射能力。当该发射带的自发辐射刚好获得了足够的增益时,将会演化为寄生振荡的激光;没有光栅谐振反馈支持,这种增益是不稳定的,不同波长的自发辐射处于竞争振荡中,因而这种竞争的寄生振荡往往演化为高峰值功率的偶发脉冲,触发自发的光纤熔丝

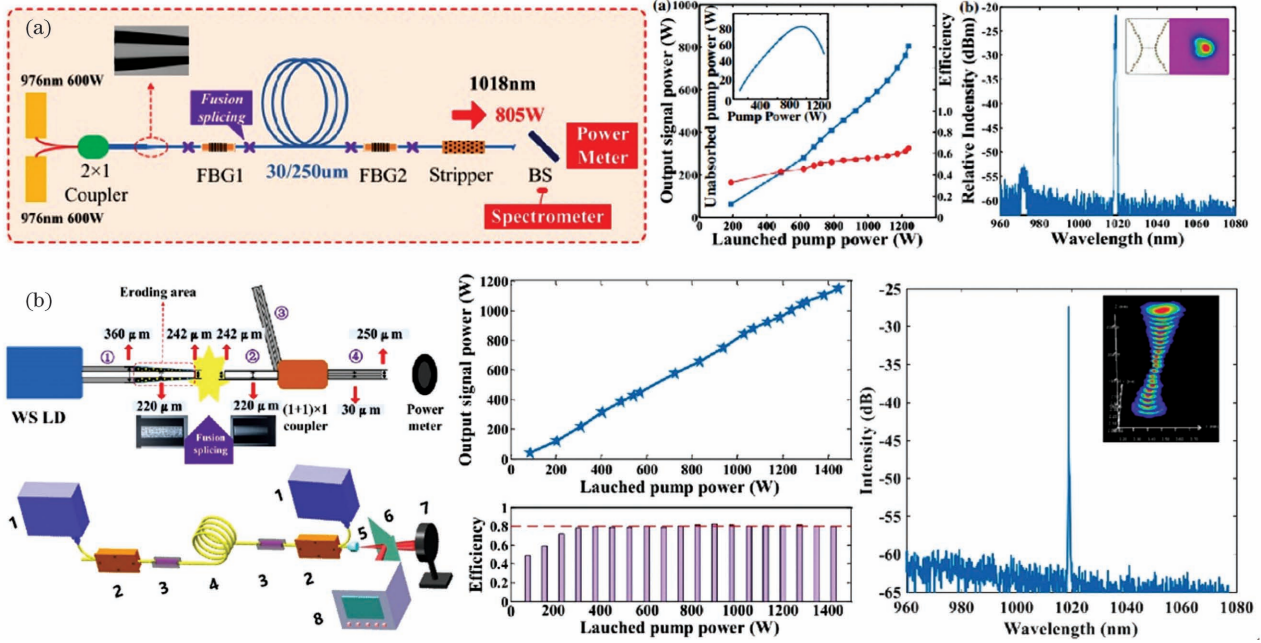


图 1 高功率 1018 nm 光纤激光器 (I)。(a)采用非锁波长 LD 泵浦 30/250 μm 光纤实现 805 W、240 $\text{W}/(\mu\text{m}^2 \cdot \text{sr})$ 输出^[36]；(b)双向泵浦 30/250 μm 光纤实现 1150 W、289 $\text{W}/(\mu\text{m}^2 \cdot \text{sr})$ 输出^[38]

Fig. 1 High-power 1018 nm fiber lasers (I). (a) Non-wavelength-stabilized LD pumped 805 W and 240 $\text{W}/(\mu\text{m}^2 \cdot \text{sr})$ 1018 nm fiber laser using 30/250 μm YDF^[36]; (b) bidirectionally pumped 1150 W and 289 $\text{W}/(\mu\text{m}^2 \cdot \text{sr})$ 1018 nm fiber laser using 30/250 μm YDF^[38]

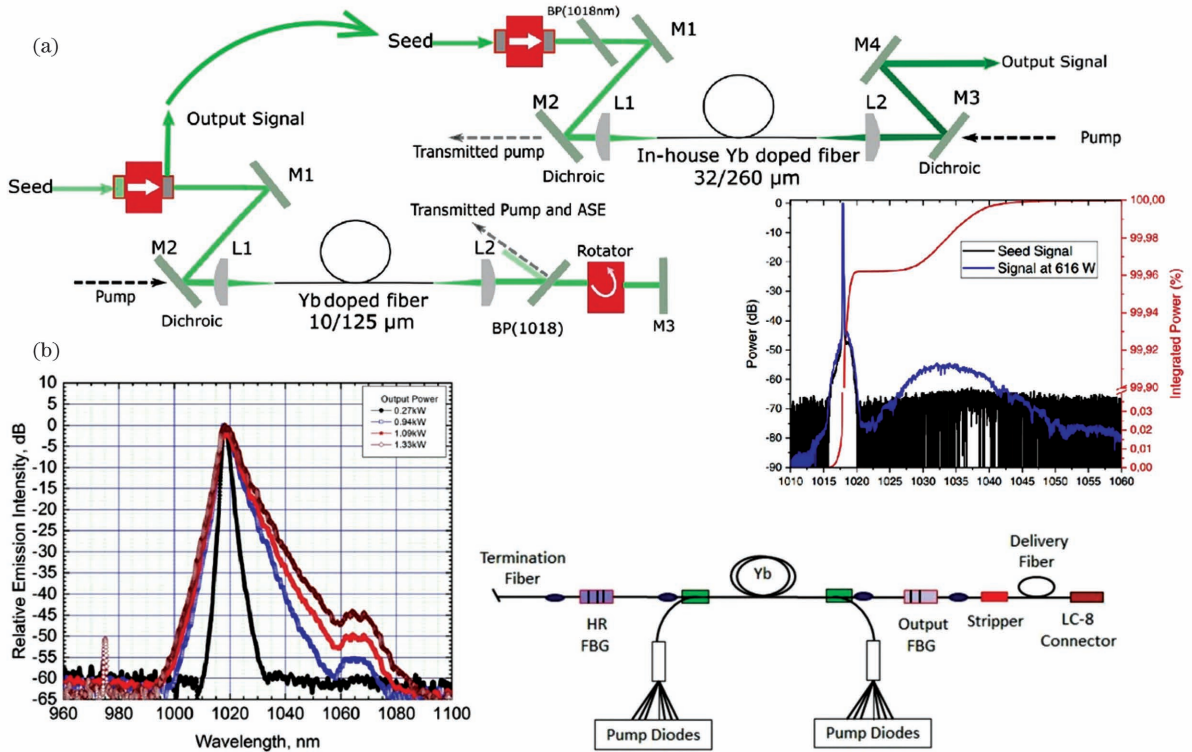


图 2 高功率 1018 nm 光纤激光器 (II)。(a)采用特制 32/260 μm 环形掺杂光纤多级放大半导体种子实现线偏振 616 W、491 $\text{W}/(\mu\text{m}^2 \cdot \text{sr})$ 输出^[40]；(b)实现 1330 W、大于 1100 $\text{W}/(\mu\text{m}^2 \cdot \text{sr})$ 输出^[16]

Fig. 2 High-power 1018 nm fiber lasers (II). (a) Linearly polarized 616 W and 491 $\text{W}/(\mu\text{m}^2 \cdot \text{sr})$ 1018 nm fiber laser using specially made 32/260 μm ring-up-doped YDF^[40]; (b) 1330 W and >1100 $\text{W}/(\mu\text{m}^2 \cdot \text{sr})$ 1018 nm fiber laser^[16]

损伤效应^[35,50-51],造成激光器毁伤。同时,1018 nm 位于该 ASE 发射带左侧,拥有比该发射带更高的吸收和更低的发射截面,因而在激光过程中,1018 nm 有成为 1035 nm 附近该次高发射带的泵浦光的潜在趋势,即发生重吸收。这使得 ASE 和寄生振荡在高功率 1018 nm 光纤激光器中更为显著。

早期研究抑制 ASE 与寄生振荡的手段不多,大部分研究只尽可能选择短的掺镱光纤来实现较低的 ASE,从而提高寄生振荡的功率阈值。但对于对亮度有着高需求的 1018 nm 光纤激光器,较短的掺镱光纤又与提升 976 nm 泵浦光吸收相矛盾,导致光光效率低,限制了激光器整体电光效率提升。例如对于许多采用 10/130 μm 单模或 15/130 μm 少模掺镱光纤的早期 1018 nm 系统,光纤长度往往在 2~7 m 不等,实际光光效率也往往在 70% 以下。只有采用了 20/130 μm 、25/250 μm 甚至 30/250 μm 大芯包比和高掺杂浓度的掺镱光纤,并且使用了相比一般光纤激光器而言具有更高反射率的输出耦合光栅(反射率甚至可达 30%^[33])之后,相似长度的掺镱光纤才能得到较好的效率。例如本文作者团队使用的 30/250 μm 掺镱光纤的吸收系数达到了 6.3 dB/m,配合 3.2 m 的长度以及反射率 13.6% 的输出耦合光栅,将效率提升至 82.9%。通过仿真计算选择合适的光纤长度和输出耦合光栅的反射率,有助于最大化发挥掺镱光纤的激光转化能力并避免强 ASE。然而,对于传统的大模场掺镱双包层光纤而言,提升芯包比往往意味着最终输出激光的光束质量下降。因此,为了获得亮度的提升,增大芯包比必须在增加实际输出功率上获得超过光束质量减损的效益。

2.3 进一步抑制 ASE 和寄生振荡的方法

为了获得更高的 1018 nm 输出亮度,必须进一步抑制 ASE 和寄生振荡的产生。近几年的研究已经在这方面探索出了几类重要的技术方案。

第一类方案是采用新的掺镱光纤设计,在保证泵浦吸收的同时抑制 1018 nm 的重吸收,从而抑制 ASE 与寄生振荡。一种设计思路是让高功率密度的 1018 nm 光束在产生之后尽量经过镱离子浓度较低的路径,从而减少重吸收。德国夫琅禾费应用物理研究所在 2019 年设计的环形掺杂光纤^[40]正是一种解决方案。通过设计非相关匹配的掺镱光纤横截面上镱离子浓度分布与横截面折射率分布[图 3(a)],使得高折射率纤芯部分仅有较低的镱离子浓度,但低折射率外环层却具有高镱离子浓度,这样虽然扩大了泵浦吸收填充因子,但不增大有效模

场面积,不损失光束质量。在此光纤中,1018 nm 信号不断在高镱离子浓度外环的内侧产生,并由折射率梯度诱导而迅速进入低镱离子浓度的纤芯传播;而纤芯的镱离子浓度低,反转粒子数高,1018 nm 重吸收不显著,因而不会显著泵浦 ASE 过程。实验中,在 32/260 μm 的大纤芯中产生了高功率的单模光束,获得了亮度的大幅度提升。掺杂浓度与折射率分布非相关匹配是许多新型高性能增益光纤的设计特点,例如中国工程物理研究院团队 2020 年报道的 50/400 μm 万瓦级级联泵浦国产光纤^[3-4]也采取了此类设计,但使用了相反的匹配方式[图 3(b)]:用环形折射率分布,使得高功率的信号光束产生后在镱离子浓度较低的纤芯周围传播,从而抑制了高功率密度信号光与高浓度镱离子的非线性效应作用,例如受激拉曼散射(SRS)等。

第二类方案则是降低寄生振荡所需的反馈,破坏其激光输出条件。通过分析高功率 1018 nm 光纤激光器内寄生振荡的反馈来源可以发现,为了抑制寄生振荡,必须降低光纤路径内所有可能的内反射,从而尽可能使系统内的自发辐射仅作单程输出,避免强 ASE 产生。2020 年,本文作者团队就上述情形进行了详细的理论分析^[48],发现若要将系统的 1018 nm 激光光谱强度对 ASE 光谱强度的信噪比(ASE 抑制比)保持在 50 dB 的安全水平以上,必须使得整体光纤系统对 ASE 波段的端面反馈控制在 10^{-4} 量级以下;对传统实验系统中的相应反馈通路[图 3(c)]进行量化分析,发现传统光纤激光结构即使采取了端面切斜角处理,仍难以良好满足上述端面反馈抑制需求。就此,本文作者团队提出了后向返回光抑制装置[图 3(c)],通过配合使用反向信号损耗极低的侧面泵浦合束器、由纯石英(无纤芯-内包层区分结构)光纤制成的包层光泄漏器以及端面斜角工艺,使得增益光纤纤芯中往后向传输的 ASE 光得以完全泄漏,等效端面反馈比传统结构低两个数量级,进而实现极低的 ASE 反馈,从而抑制寄生振荡。从实验效果看,获得了 500 W 输出下 ASE 抑制比 51.3 dB,且光光效率达到 85.6%,实现了传统双包层光纤中光光效率与 ASE 抑制效果二者综合效益最优的输出性能。

第三类方案则是使用更合适的系统构型。大多数高功率 1018 nm 光纤激光器方案的特点是只采取振荡器直接输出,极少有其他光纤激光器常用的 MOPA 结构,这主要仍然是受限于 MOPA 结构的长增益光纤带来的高功率密度 1018 nm 光的重吸

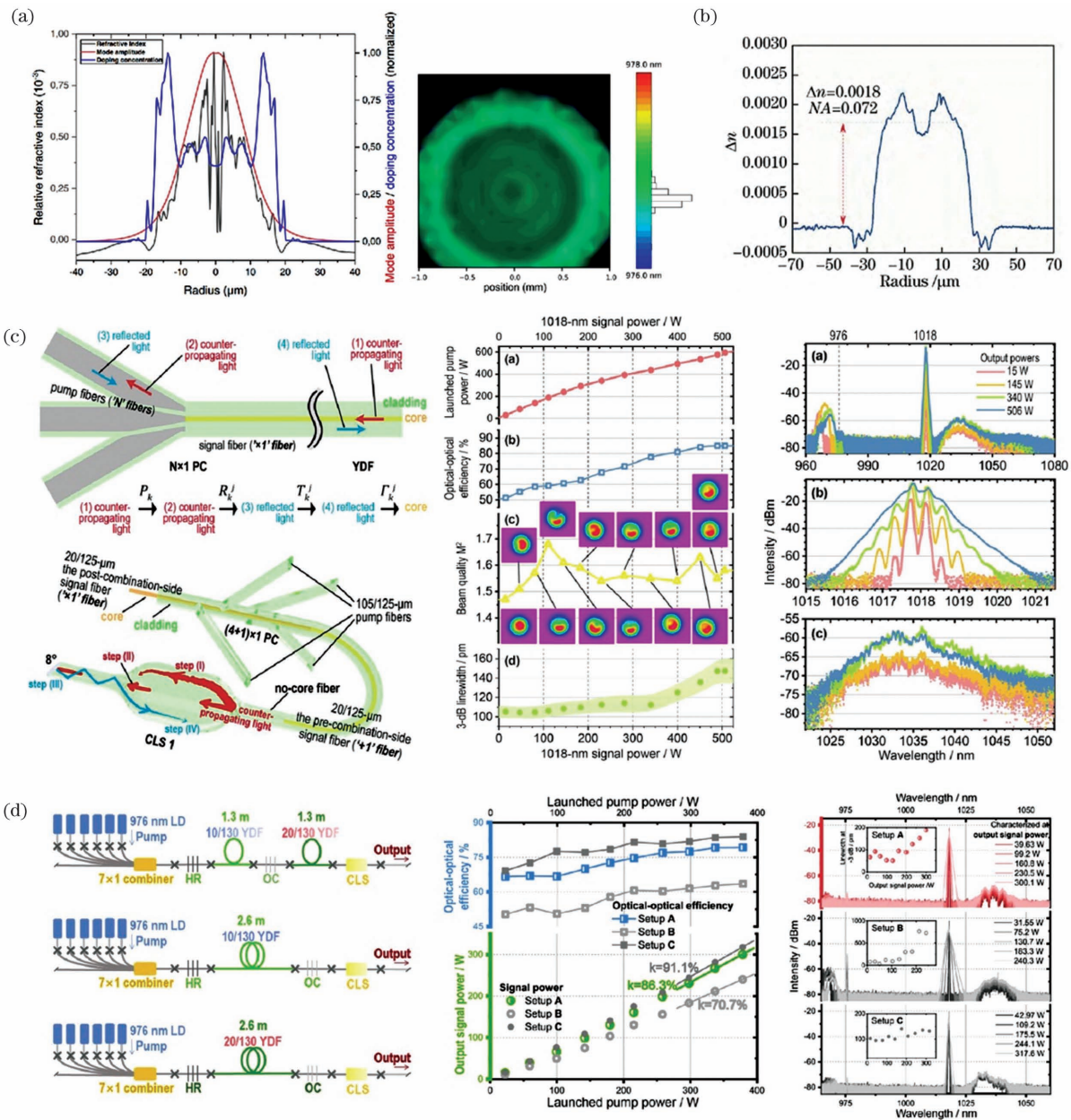


图 3 进一步抑制 ASE 和寄生振荡的方法。(a) 32/260 μm 环形掺杂光纤^[40]；(b) 实现万瓦级联泵浦光纤激光输出的 50/400 μm 光纤的横截面折射率分布^[3]；(c) ASE 的光纤内后向反馈机制、抑制后向光内反射的装置以及实施效果^[48]；(d) 混合结构与传统振荡器结构的对比^[46]

Fig. 3 Possible features for further suppressing ASE and parasitic oscillation. (a) 32/260 μm ring-up-doped YDF^[40]；(b) refractive-index profile of the 50/400 μm homemade YDF that offered 10 kW output^[3]；(c) device for suppressing the inner reflections that feedback to spurious lasing, and its effect^[48]；(d) comparison between the hybrid-structure and traditional oscillator structures^[46]

收问题。过往研究中,除了采取极窄线宽和高信噪比的固体或半导体 1018 nm 种子源进行放大(并且需要插入非光纤结构的 ASE 滤波器^[40])的方案外,使用全光纤 MOPA 结构对 1018 nm 进行放大的极少,且输出功率仅能达到 100 W 左右^[25, 49]。如能降低放大级的引入对重吸收和 ASE 的激发,就有可能通过放大级获取更高的功率。本文作者团队在

2019 年提出使用混合结构进行 1018 nm 放大的技术方案^[46] [图 3 (d)],通过专门设计缩短传统 1018 nm 光纤单模振荡器谐振腔内的单模掺镱光纤的长度,使谐振腔处于泵浦远未耗尽的状态,且谐振腔只产生少量光束质量极好的 1018 nm 光,而由大量的 976 nm 泵浦光主导反转粒子数产生,抑制谐振腔内的 1018 nm 重吸收;振荡器后直接续接大芯

包比、高吸收的多模掺镱光纤,实现残余泵浦快速吸收与放大,抑制长光纤带来的 1018 nm 光的重吸收。由于整体光纤短且避免了插入新的合束器,该系统光束质量极好。通过控制变量对比实验^[46],上述采用了两种不同增益光纤的混合结构比单独使用任何一种增益光纤的传统振荡器结构的输出性能都要优越,在使用整体光纤长度相等、泵浦功率相同的情况下,较传统单模振荡器可以实现输出功率提升 25%、光光效率提升约 10%且保持单模输出不劣化;较功率相同的多模振荡器,最终亮度提升 50%以上。

总体来看,高功率 1018 nm 光纤激光器仍处于技术和性能高速发展的阶段,最新的技术报道已经证明了从 300 W/($\mu\text{m}^2 \cdot \text{sr}$)到大于 1 kW/($\mu\text{m}^2 \cdot \text{sr}$)的亮度跨越的可行性。为了提升高功率 1018 nm 光纤激光器的整体性能水平,支撑众多级联泵浦应用的进一步发展,未来研究需要通过继续提出和验证新的增益光纤设计、新的寄生振荡反馈抑制措施乃至新的系统结构,攻克在抑制 1018 nm 激光过程中的 ASE 和寄生振荡、抑制高功率 1018 nm 光纤激光器等短波长光纤激光器中频发的光纤熔丝损伤等方面的难题。

3 级联泵浦高功率掺镱双包层光纤激光器

3.1 级联泵浦的高功率固定波长光纤激光器

高功率 1018 nm 光纤激光器的研究带动了一系列采用 1018 nm 级联泵浦的高性能高功率掺镱光纤激光器的发展,大幅提升了光纤激光器的功率和亮度水平。除了备受关注的极低的分布热负载优势之外,高功率 1018 nm 光纤激光器还带给级联泵浦系统两个主要的影响。一方面,由于镱离子对 1018 nm 激光的吸收系数较小,因而级联泵浦的掺镱光纤激光器的掺镱光纤通常都比较长,这降低了系统出现非线性效应(如 SRS 等)以及 ASE 致寄生振荡的阈值。但是另一方面,由于高功率 1018 nm 光纤激光器带来了明显的泵浦亮度提升,增益光纤可以采用许多在直接泵浦配置下难以实现的创新设计,如直径更小的包层结构、新的泵浦耦合方式等,这不仅可以补偿吸收系数的劣势,亦使得 1018 nm 级联泵浦的高功率光纤激光器更有可能获得突破性的性能提升。自 2009 年美国 IPG 演示用 1018 nm 级联泵浦的万瓦级光纤激光器以来^[23][图 4(a)],国

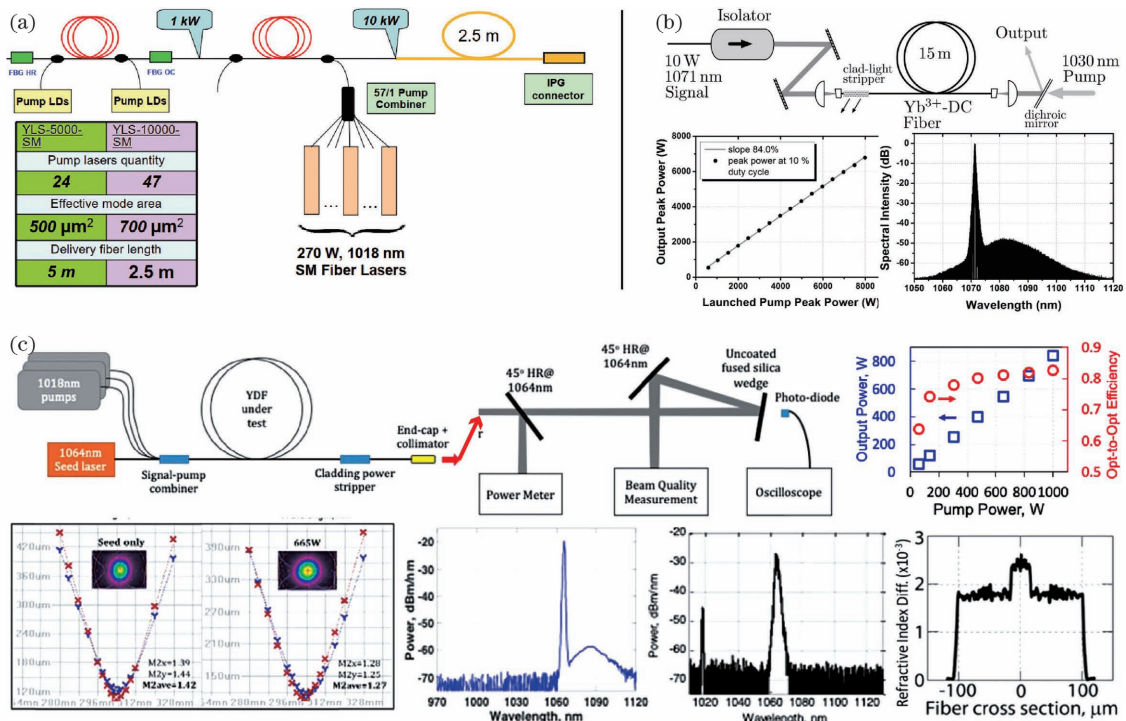


图 4 级联泵浦高功率掺镱双包层光纤激光器。(a)美国 IPG 公司的 1018 nm 光纤激光泵浦 10 kW 光纤激光器^[23]; (b)采用 1030 nm 碟片激光级联泵浦产生 6.8 kW 的 1071 nm 准连续输出激光^[53]; (c)采用 1018 nm 光纤激光级联泵浦产生 836 W 的激光^[54]

Fig. 4 Examples of tandem-pumped high-power ytterbium-doped fiber lasers. (a) IPG's 1018 nm tandem-pumped 10 kW fiber laser^[23]; (b) a quasi-continuous-wave 6.8 kW 1071 nm fiber laser tandem-pumped by 1030 nm thin-disk laser^[53]; (c) a 836 W fiber laser tandem-pumped by 1018 nm fiber laser^[54]

外多家单位相继报道了级联泵浦高功率光纤激光器研究。2011 年,德国耶拿大学团队报道了采用 1030 nm 碟片激光器级联泵浦的 1071 nm 光纤激光器^[52],最高功率可达 2.9 kW,斜率效率可达 73%,光束质量 $M^2 = 3 \sim 4$;2015 年,进一步报道了基于上述配置、准连续功率可达 6.8 kW 的系统^[53] [图 4(b)]。但是,采用技术难度更大的 1018 nm 光纤激光进行级联泵浦的公开报道较少。2020 年,新加坡 DSO 国家实验室团队报道了用 1 kW 的 1018 nm 光纤激光级联泵浦产生 836 W 功率、82.5% 光光效率、光束质量 M^2 因子 1.27 的结果^[54] [图 4(c)]。

2017 年,国防科技大学团队报道了以 1018 nm 级联泵浦和 30/250 μm 的掺镱双包层光纤产生 1080 nm 处 3510 W 功率输出^[55],斜率效率达到 87.5%,光束质量 M^2 达到 1.98。2018 年,本文作者团队报道了以总功率达 6 kW 的 1018 nm 级联泵浦源和 30/250 μm 的掺镱双包层光纤实现的 1080 nm 处 5448 W 功率输出^[56] [图 5(a)],级联泵

浦放大级光光效率达到 91% 以上,光束质量 M^2 为 2.2,SRS 抑制比率在 35 dB 以上,1080 nm 处 3 dB 线宽 4.6 nm。同年,采用 25/250 μm 的国产掺镱双包层光纤实现了同波长 3079 W 功率输出^[57] [图 5(b)],斜率效率达到 85.9%,光束质量 M^2 达到 2.14,而 3 dB 线宽降至 1.46 nm。2020 年,本文作者团队进一步报道了使用 30/250 μm 的国产掺镱双包层光纤实现的 1070 nm 处 5220 W 功率输出^[58] [图 5(d)],光光效率达到了 89.9%,光束质量 β 因子为 2.4,中心波长 3 dB 线宽达到 1.1 nm,充分验证了国产光纤的潜力。2019 年,国防科技大学团队报道了使用啁啾倾斜光栅抑制 SRS 效应的 1018 nm 级联泵浦高功率光纤激光器^[59] [图 5(c)],在 1070 nm 中心波长功率达到 4.2 kW 时,光束质量 M^2 可达 1.8,通过插入啁啾倾斜光栅可以获得额外的大于 15 dB 的 SRS 抑制,使得最终输出中心波长与 SRS 的信噪比提升至 30 dB。2020 年,中国工程物理研究院团队制备的 50/400 μm 国产掺镱双包层光纤在 1018 nm 级联泵浦下实现了 1080 nm

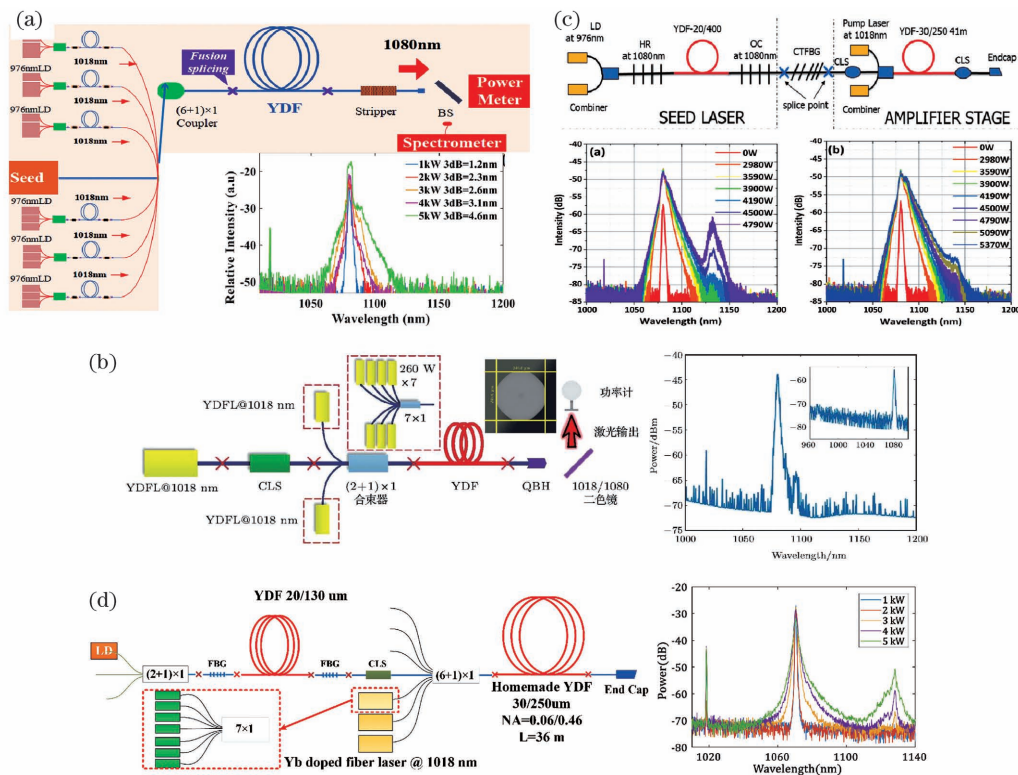


图 5 1018 nm 光纤激光级联泵浦的高功率掺镱双包层光纤激光器 (I)。(a)采用 30/250 μm 掺镱双包层光纤实现 5448 W 的 1080 nm 输出^[56]; (b)采用国产 25/250 μm 掺镱双包层光纤实现 3079 W 的 1080 nm 输出^[57]。(c)采用啁啾倾斜光栅实现 4.2 kW 的 1070 nm 输出^[59]; (d)采用国产 30/250 μm 掺镱双包层光纤实现 5220 W 的 1070 nm 输出^[58]

Fig. 5 High-power ytterbium-doped fiber lasers tandem-pumped by 1018 nm fiber lasers (I). (a) A 5448 W 1080 nm fiber laser using 30/250 μm YDF^[56]; (b) a 3079 W 1080 nm fiber laser using homemade 25/250 μm YDF^[57]; (c) a 4.2 kW 1070 nm fiber laser using chirped tilt fiber Bragg gratings^[59]; (d) a 5220 W 1070 nm fiber laser using homemade 30/250 μm YDF^[58]

处的 9.82 kW 功率输出^[3-4]。同年,本文作者团队采用中国科学院上海光学精密机械研究所团队制备的国产 50/350/400 μm 掺镱三包层光纤在 1018 nm 级联泵浦下实现了 1080 nm 处的 9.01 kW 功率输出[图 6(a)],斜率效率达 80.5%;采用中国电子科技集团公司第四十六研究所团队制备的国产掺镱双包层光纤,实现了 13.9 kW 激光输出,斜率效

率 87.0%;采用中国工程物理研究院化工材料研究所高功率光纤激光所地联合创新中心团队制备的国产掺镱双包层光纤,相继实现了 10 kW 和 20 kW 激光输出[图 6(b)],斜率效率大于 83%。这些快速增长的功率和亮度结果都显示了级联泵浦对于提升高功率光纤激光器输出性能的优势作用。

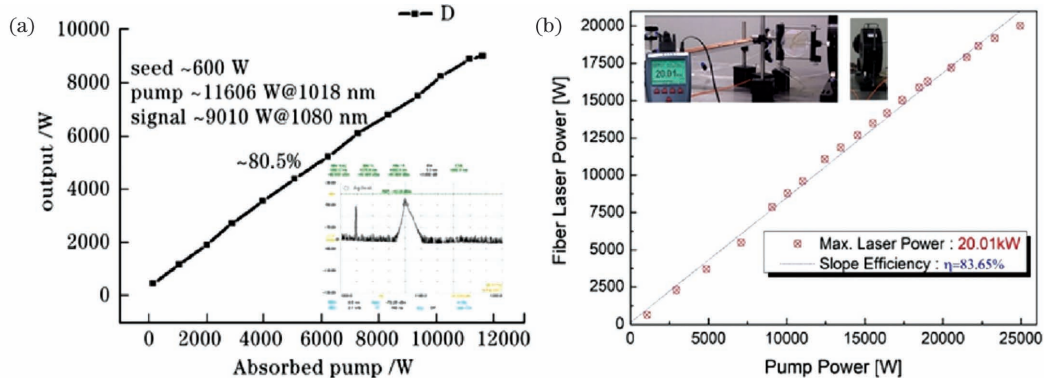


图 6 1018 nm 光纤激光级联泵浦的高功率掺镱双包层光纤激光器(II)。(a)国产 50/350/400 μm 掺镱三包层光纤实现 9.01 kW 的 1080 nm 输出;(b)国产掺镱双包层光纤实现级 20 kW 输出

Fig. 2 High-power ytterbium-doped fiber lasers tandem-pumped by 1018 nm fiber lasers (II). (a) Results of a 9.01 kW 1080 nm fiber laser using homemade 50/350/400 μm triple-cladding YDF; (b) results of a 20 kW tandem-pumped fiber laser using homemade YDF

上述结果表明,采用 1018 nm 级联泵浦能够大幅度提升掺镱光纤激光的输出功率。同时,由于镱离子对 1018 nm 的吸收系数较小,所需的掺镱光纤长度一般都临近或超过 SRS 阈值,限制了功率提升。为了抑制 SRS,一方面可以采取针对拉曼波段的滤波措施,如使用啁啾倾斜光栅等,另一方面还应从优化增益光纤设计创新入手,优化掺杂元素组分和工艺、折射率分布、模场尺寸等,甚至改变模场沿光纤轴向分布^[60]等,提升吸收系数和光束质量,提高光纤激光系统性能。此外,还可以采取抗损伤特性更优异的三包层光纤等设计,提升光纤激光系统可靠与稳定性。

3.2 可调谐光纤激光器的级联泵浦高功率放大

虽然对于 1070 nm、1080 nm 等典型波长,已有较多研究探索了级联泵浦的应用效果,获得了较高的输出功率,但是对于更多传统的高功率掺镱光纤激光输出波长而言,采用 1018 nm 级联泵浦的实际效果仍然有待充足的实验验证。同时,在级联泵浦下的传统波段掺镱光纤激光,是否存在对提升其他性能而言最佳的输出波长,对于指导更宽波段的光谱合成、更宽波段的拉曼激光产生等后端应用具有重要意义。想要获得上述问题的答案,就需要在控制变量的条件下对级联泵浦不同波长输出的效果进

行比较研究。为了探索这些问题的答案,一种控制变量的思路就是对可调谐光纤激光进行高功率级联泵浦放大,并检验放大后光束的性质。

可调谐高功率光纤激光的直接泵浦放大已有一些研究。2017 年,国防科技大学团队报道了直接泵浦 1065~1090 nm 范围可调谐的线偏振 1 kW 功率输出^[61],显示出直接泵浦在比 1065 nm 短的波段面临的强 ASE 限制问题,当波长调谐至 1060 nm 时该系统的安全功率仅为 100 W。2020 年,本文作者团队报道了基于 1018 nm 级联泵浦的窄线宽可调谐光纤激光^[62](图 7),并详细记录了相同的系统结构和级联泵浦条件下,不同输出波长的功率、光谱带宽、光谱成分、光束质量等激光性质演化趋势。在系统层面,设计了基于环形腔和法布里-珀罗(F-P)可调谐滤波器、在 1060~1090 nm 宽带范围内以 0.5 W、50 pm 窄线宽可调的种子源,通过三级放大(其中从 60 W 至 1 kW 为 1018 nm 级联泵浦)成功达到了 1 kW 并实现波长 1060~1090 nm 安全调谐。结果显示,当激光输出波长在 1072~1076 nm 之间时,1 kW 输出激光的线宽波动较小,而激光输出波长在稍靠两侧时,输出激光的线宽均明显波动,并在激光输出波长靠近 1090 nm 时又回落至稳定。结合更详细的光谱性质来看,光谱受到 ASE 以及由

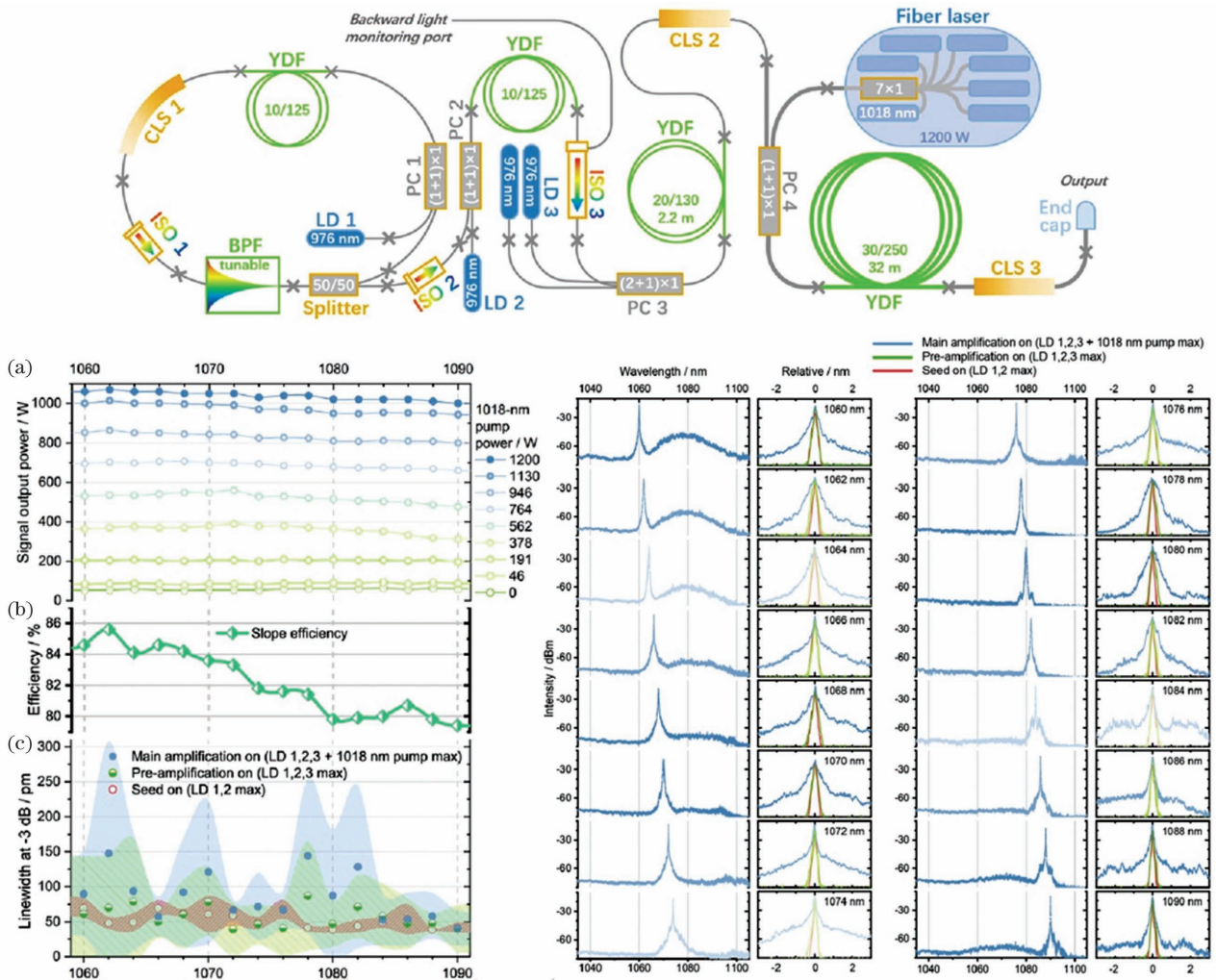


图 7 级联泵浦 1060~1090 nm 可调谐 1 kW 窄线宽光纤激光器^[62]

Fig. 7 Tandem-pumped 1 kW narrow-linewidth tunable fiber laser spanning from 1060 nm to 1090 nm^[62]

高亮度泵浦下的窄线宽信号光带来的潜在 SRS^[63]与四波混频等非线性效应的影响。从输出光束质量来看,未加入级联泵浦时,种子光从系统中输出时的光束质量在 1070~1080 nm 之间最差(M^2 因子可达 2.12),而在 1060 nm 和 1090 nm 处较好(M^2 因子可达 1.21);当加入 1018 nm 级联泵浦后,输出光的光束质量最差的波长移至比 1060 nm 短的一侧,光束质量随波长增加而提升,从 1060 nm ($M^2 \sim 2.46$)至 1090 nm ($M^2 \sim 1.82$),光束空间亮度提升近一倍。

这些结果表明,在 1018 nm 级联泵浦与同等参数条件下,不同输出波长的光束性质有许多不同,输出功率受量子亏损及其他因素影响,长波激光效率下降明显;光谱性质受 ASE 以及窄线宽下的非线性效应共同影响,存在线宽不稳定的波长区间,且长波激光光谱旁瓣波动明显;光束质量上,同系统配置下长波光束质量提升明显,亮度显著高于短波长输出。

因此,对于采用 1018 nm 级联泵浦的高功率掺镱光纤激光器,应根据后端应用选择更具综合效益的输出波长;并且,上述结果显示 1018 nm 级联泵浦激光器由于增益光纤的长度问题而面临更强的 SRS 效应。在一些应用中,这种 SRS 效应是需要抑制的,但对于另一些应用,例如基于拉曼增益的随机光纤激光振荡器以及特定输出波长的混合增益拉曼光纤激光器,这将是 1018 nm 级联泵浦的独特优势。

4 级联泵浦高功率随机光纤激光器

在高功率下获得光谱性质的控制,抑制功率提升过程中的光谱亮度劣化,是高功率光纤激光器的重要研究目标之一。近年来的研究发现,级联泵浦的高功率随机光纤激光器在获得光谱性质优异的高功率激光方面有较大的优势。高功率随机光纤激光器是随机激光器的一种,不具有物理上位置确定的

谐振腔,而是依靠增益介质(光纤)内的随机散射来提供谐振反馈,输出光具有时域稳定性和光谱不展宽(少展宽)等独特优势。同时,相比其他类型的随机激光器,高功率随机光纤激光利用光纤波导的一维方向性,将随机反馈的方向限定在很窄的空间角度内,从而极大降低激光输出阈值,提升了输出功率和效率,并获得了极好的光束质量。自英国阿斯顿大学团队 2010 年提出基于拉曼增益和瑞利散射分布反馈的随机光纤激光器以来^[64],最新研究发现,高功率随机光纤激光器易于实现许多特殊应用,包括无散斑成像^[65-66]、输出超连续谱^[67]、输出涡旋光

束^[68-69]、时域鬼成像^[70]等,具有重要的科学研究价值和潜在社会经济价值。需要注意的是,高功率随机光纤激光器已经发展出许多分类;其中,基于瑞利散射反馈和拉曼增益的随机光纤激光器已经成为近年来的高功率随机光纤激光器重点研究领域之一,相应的近年性能较高的结果如表 2 所示。同时,在最新的随机光纤激光器中,有相当一部分属于级联泵浦,即由固定腔产生的激光泵浦,在随机反馈下输出另一波长的激光。例如 2019 年,国防科技大学团队报道了采用 1090 nm 光纤激光泵浦,输出功率 919 W 的 1150 nm 随机光纤激光振荡器^[71]。

表 2 近年性能较高的高功率随机光纤激光器结果

Table 2 Results of high-power random fiber lasers with higher performance in recent years

| Year | Power / kW | Efficiency / % | Wavelength / nm | Bandwidth (3 dB) / nm | M^2 | Pump | Gain | MOPA stages |
|----------------------|------------|----------------|-----------------|-----------------------|-------|------------|------|-------------|
| 2017 ^[72] | 1.01 | 71.7 | 1080 | 0.212 | 1.15 | LD@976 nm | YDF | 2 |
| 2017 ^[70] | 1.105 | 78.5 | 1064 | 0.40 | 1.4 | LD@976 nm | YDF | 1 |
| 2018 ^[71] | 2.4 | 79.1 | 1064 | 0.23 | 1.28 | LD@976 nm | YDF | 2 |
| 2019 ^[69] | 919 | 78.9 | 1050 | 7 | — | FL@1090 nm | GDF | 0 |
| 2019 ^[73] | 3.03 | 81.0 | 1080 | 3 | 1.68 | FL@1018 nm | YDF | 3 |
| 2019 ^[74] | 4.02 | 88.5 | 1064 | 0.99 | 2.52 | FL@1018 nm | YDF | 1 |
| 2021 ^[75] | 5.1 | 89.0 | 1070 | 1.3 | 2.62 | FL@1018 nm | YDF | 3 |

(Note: for systems of MOPA stages > 0, gain column shows the fibers of their main amplification stages)

采用 MOPA 结构将随机光纤激光放大是进一步提高随机光纤激光输出功率的有效途径。2017 年,中国工程物理研究院团队报道了 MOPA 结构一级放大的 1.1 kW 随机光纤激光,工作波长为 1067.5 nm^[72];并于 2018 年报道了 MOPA 结构两级放大的 2.4 kW 窄线宽随机光纤激光输出^[73]。国防科技大学团队也于 2017 年报道了 MOPA 结构两级放大的窄线宽、线偏振 1.01 kW 随机光纤激光,工作波长为 1080 nm^[74]。级联泵浦在 MOPA 结构随机光纤放大器中也获得了充分的应用,种子源和放大器均大量采用级联泵浦。性能较为突出的结果有国防科技大学团队 2019 年报道的 3.03 kW 随机光纤激光器^[75][图 8(a)],由于随机光纤激光器种子源功率过低,采用了三级放大的结构,最终将输出功率提升至 3.03 kW,输出激光中心波长为 1080 nm,3 dB 带宽为 2.88 nm。同年,本文作者团队报道了级联泵浦 4 kW 级的随机光纤激光器^[76][图 8(b)],系统采用 1018 nm 光纤激光器泵浦的随机光纤激光振荡器作为种子源,通过热扩芯技术实现了泵浦光至随机光纤种子光源的纤芯泵浦,经两级放大后获得了最高功率 4020 W 的随机激光输出,光光效率达 88.5%。输出激光中心波长为 1064 nm,在泵

浦功率提高的过程中,3 dB 带宽始终维持在 1 nm 以内。为了证明随机光纤激光器的 MOPA 结构能够在功率放大的过程中有效抑制光谱展宽,本文作者团队进行了对比实验,当固定腔掺镱光纤振荡器作为主振荡器时,维持放大级结构不变,相同泵浦功率下,输出激光带宽呈现明显的展宽趋势,当达到最高泵浦功率时,3 dB 带宽已超过 3 nm。上述研究显示了级联泵浦的随机光纤激光器能够有效控制光谱宽度。

在上述研究中,级联泵浦随机光纤激光器功率达到 4 kW 时,在放大级中产生了 SRS 效应,导致光谱中存在拉曼频移分量。在放大级中 SRS 效应的抑制是级联泵浦随机光纤激光器功率提升亟待解决的问题。2021 年,本文作者团队报道了使用带通滤波器过滤种子光源谱域外自发辐射噪声的 MOPA 结构级联泵浦 5 kW 级随机光纤激光器^[77](图 9),最高输出功率达 5.1 kW,光光效率为 89.0%。激光器工作中心波长 1070 nm,在最高功率输出下拉曼抑制比可达 27 dB。在 3500 W 输出下,由于带通滤波器的存在,对比实验表明,拉曼抑制比提高了 16 dB,实验结果表明,谱域外噪声滤波的方案有效抑制了级联泵浦的随机光纤激光器中的 SRS 效应。

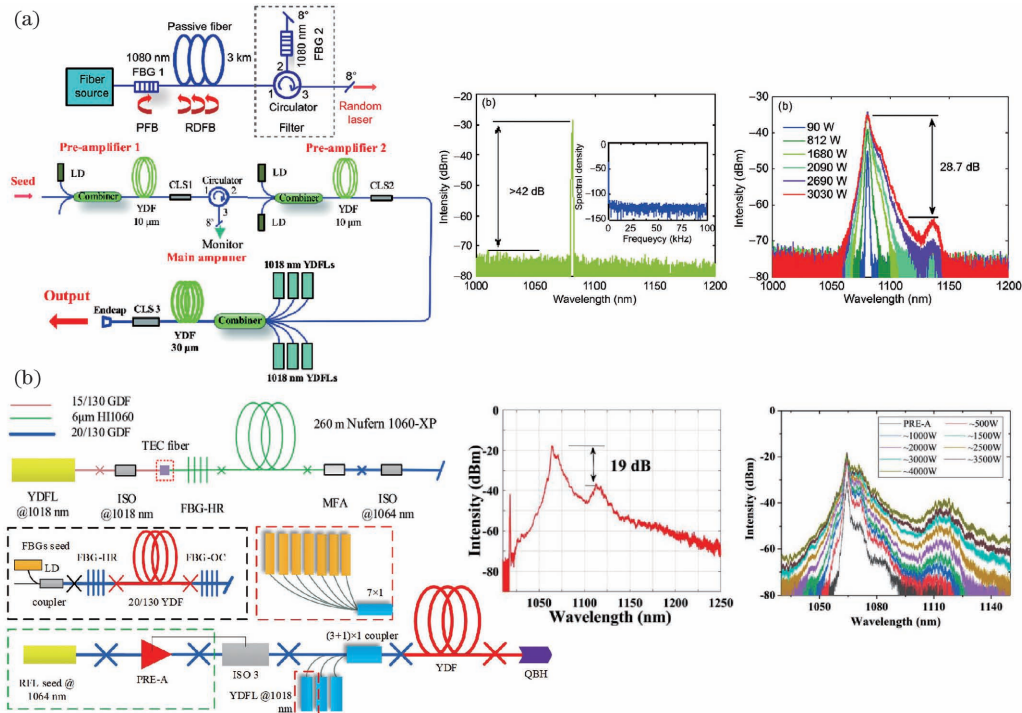


图 8 级联泵浦高功率随机光纤激光器。(a) 3 kW 系统的随机光纤种子与三级放大实验系统结构图, 以及相应光谱演化^[75]; (b) 4 kW 系统的随机光纤种子与两级放大实验系统结构图, 以及相应光谱演化^[76]

Fig. 8 Tandem-pumped high-power random fiber lasers. (a) 3 kW system random fiber seed and three-stage amplification experimental system structure diagram, and corresponding spectral evolution^[75]; (b) 4 kW system random fiber seed and two-stage amplification experimental system structure diagram, and corresponding spectral evolution^[76]

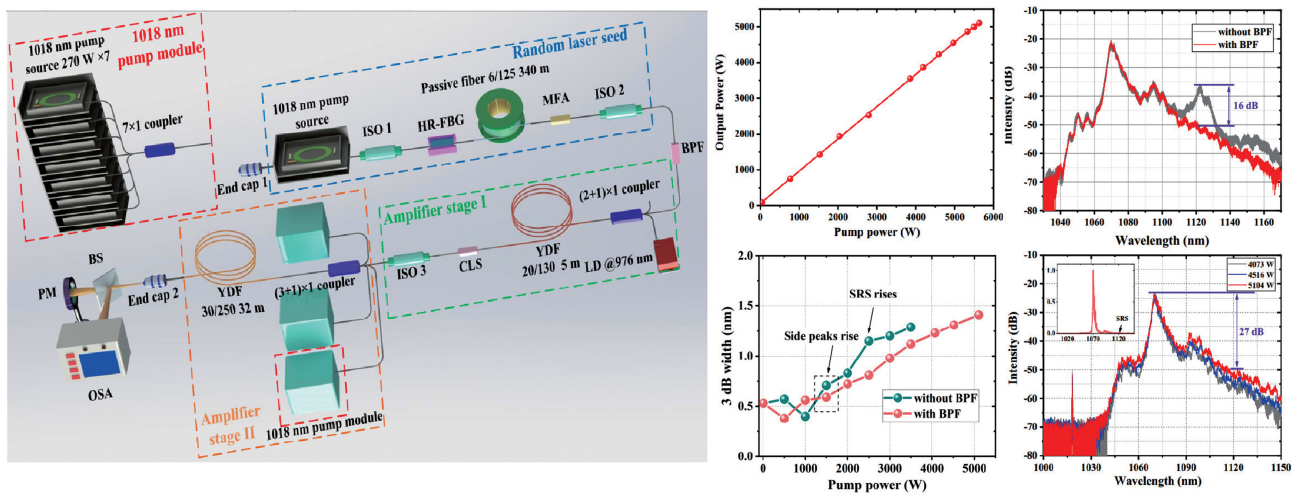


图 9 采用带通滤波器抑制 SRS 的级联泵浦 5 kW 随机光纤激光器系统结构、功率、线宽和光谱演化^[77]

Fig. 9 System structure, power, linewidth, and spectral evolution of a cascade pumped 5 kW random fiber laser using bandpass filters to suppress SRS^[77]

总体而言,级联泵浦的随机光纤激光器既具备了传统的级联泵浦激光器增益分布均匀、热功率密度峰值低的优点,同时能够有效控制高功率输出下的激光光谱宽度。通过谱域外噪声滤波抑制 SRS 效应,高功率随机光纤激光器具备更高功率、更高光谱亮度激光输出的潜力。

5 级联泵浦高功率拉曼光纤激光器

掺镱光纤激光器受到镱离子增益谱的限制,发射激光的波长范围有限,高功率激光输出波长通常在 1100 nm 以下。为满足掺镱光纤激光器在远距离遥感、光谱合成等领域的高品质应用^[78-79],拓宽高

功率光纤激光器工作波长范围的需求迫切。高功率拉曼光纤激光器正是在拓展高功率光纤激光输出波长范围上具有独特优势的一类激光器,它依靠增益介质(光纤)中的 SRS 效应,将高功率密度的泵浦光转化为波长增加了一个 SRS 频移的信号光。最新研究表明,通过 SRS 增益甚至级联 SRS 增益,已实现将高功率掺镱光纤激光的输出波长范围拓展至 $1.2\ \mu\text{m}$ 。近年研究进一步发现,级联泵浦对于提升高功率拉曼光纤激光器的性能有很大的优势。事实上,作用介质(光纤)长度越长,SRS 发生阈值越低。级联泵浦为充分吸收泵浦光所需的较长增益光纤长度恰好为拉曼增益提供了良好的条件,同时级联泵浦的优势也能够为高功率拉曼光纤激光器所继承。因此,级联泵浦是产生高功率拉曼光纤激光的优选方案。

拉曼增益需要高光谱功率密度和高空间亮度的激发光来实现。在包层泵浦条件下,如果仅依靠光纤中的 SRS 过程,实现高转化效率的拉曼激光输出需要较大的芯包比^[80],使用传统光纤较难实现。普通的掺镱光纤不能满足包层泵浦需求,需要重新设计光纤的尺寸大小、折射率分布等以提高芯包比。2009 年,英国南安普敦大学团队利用特制的 $9/21.6\ \mu\text{m}$ 无源光纤进行包层泵浦实验,转换效率约为 40% ^[81]。2020 年,国防科技大学团队报道了基于特制的 $31/55.55/360\ \mu\text{m}$ 三包层光纤包层泵浦拉曼放大器,该光纤内包层面积与纤芯面积之比低至 3.2。其泵浦源为 $1080\ \text{nm}$ 光纤激光器,在 $2365\ \text{W}$ 的泵浦功率下,最终输出激光功率为 $1925.8\ \text{W}$,其中纤芯中 $1130\ \text{nm}$ 拉曼激光功率为 $762.6\ \text{W}$,转换效率为 31.5% ^[82]。

除了使用新型结构的光纤以外,混合增益的高功率拉曼光纤激光器^[83]也可以提高拉曼光纤激光器系统整体的光转化效率。混合增益是指在同一段

光纤中,既进行着 SRS 增益过程,还进行着稀土离子转换激光等其他增益过程。可以理解为:注入系统的初始泵浦光经过稀土离子转换产生拉曼增益的激发光,该激发光因达到了一定空间功率密度而激发拉曼增益,从而在系统最终输出上表现为拉曼波长的输出。比如,拉曼光纤激光器可以使用掺镱光纤作为(一部分或者全部)拉曼增益光纤,则混合增益就是拉曼增益和镱离子带来的增益。调整拉曼增益与镱离子增益的比例(调整拉曼增益光纤中掺镱光纤和无源光纤的比例),就可以获得对拉曼波长及其他输出特性的调节。这种混合增益结构已经成为近年来高功率拉曼光纤激光器的常见结构,其中一些较优结果如表 3 所示。2014 年,中国科学院上海光学精密机械研究所团队报道了中心波长 $1120\ \text{nm}$ 的 $1.28\ \text{kW}$ 的直接泵浦拉曼激光器,转化效率为 70% ^[84]。2015 年,国防科技大学 Zhang 等^[85-86]先后报道了输出功率 $732\ \text{W}$ 以及 $1.5\ \text{kW}$ 的 $976\ \text{nm}$ LD 直接泵浦高功率拉曼激光。2016 年,本文作者团队报道了准四千瓦混合增益拉曼光纤激光器^[87](图 10)。该激光器采用双向 LD 直接泵浦的结构以保证增益和热负载的均匀分布,主振荡器为中心波长 $1070\ \text{nm}$ 的单波长掺镱光纤激光振荡器,利用主振荡器的自发拉曼噪声作为放大级拉曼波段激光的种子光源,最终达到了输出功率 $3.89\ \text{kW}$ 、光光效率 70.9% 、中心波长 $1122.8\ \text{nm}$ 、 $3\ \text{dB}$ 带宽 $10.6\ \text{nm}$,为当时 $1.12\ \mu\text{m}$ 波段最高的输出功率报道。

采用高功率 $1018\ \text{nm}$ 光纤激光器级联泵浦的拉曼光纤激光器具备输出功率进一步提升的巨大潜力。2019 年,本文作者团队报道了 $1018\ \text{nm}$ 光纤激光与 $976\ \text{nm}$ LD 混合泵浦的 MOPA 结构高功率混合增益拉曼光纤激光器^[88][图 11(a)]。该 MOPA

表 3 近年性能较高的高功率拉曼光纤激光器结果

Table 3 Results of high-power Raman fiber lasers with higher performance in recent years

| Year | Power / kW | Efferency / % | Wavelength / nm | M^2 | Pump | Gain | Seed quantity | MOPA stages |
|----------------------|------------|---------------|-----------------|-------|----------------------|-------------------------|---------------|-------------|
| 2014 ^[82] | 1.28 | 70 | 1120 | 1.6 | LD@976 nm | YDF | Dual | 1 |
| 2015 ^[83] | 0.73 | — | 1120 | — | LD@976 nm | YDF | Dual | 1 |
| 2015 ^[84] | 1.52 | 75.6 | 1120 | — | LD@976 nm | YDF | Dual | 1 |
| 2016 ^[85] | 3.89 | 70.9 | 1123 | 1.49 | LD@976 nm | YDF | Single | 1 |
| 2019 ^[86] | 3.7 | 55.1 | 1124 | 2.18 | FL@1018 nm+LD@976 nm | YDF+GDF | Single | 1 |
| 2020 ^[90] | 3.083 | 78.7 | 1130 | 5.72 | FL@1080 nm | Metal coated GRIN fiber | Single | 1 |
| 2020 ^[80] | 0.763 | 31.5 | 1130 | 2.24 | FL@1080 nm | Triple-clad GDF | Single | 1 |
| 2021 | 5.008 | 74.5 | 1120 | 2.92 | FL@1018 nm | YDF+GDF | Dual | 1 |

(Note: for systems of MOPA stages > 0, gain column shows the fibers of their main amplification stages)

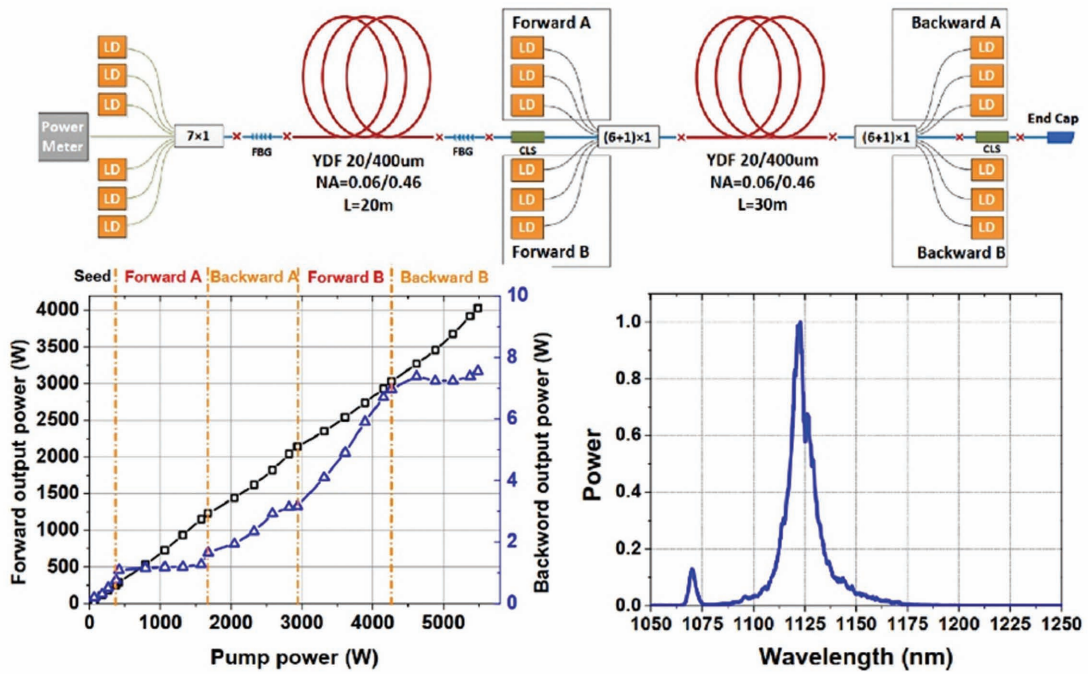


图 10 双向 LD 泵浦 MOPA 结构 3.89 kW 混合增益拉曼光纤激光器示意图、功率及光谱^[87]

Fig. 10 Schematic diagram, power, and spectrum of a 3.89 kW hybrid gain Raman fiber laser with a bidirectional LD pumped MOPA structure^[87]

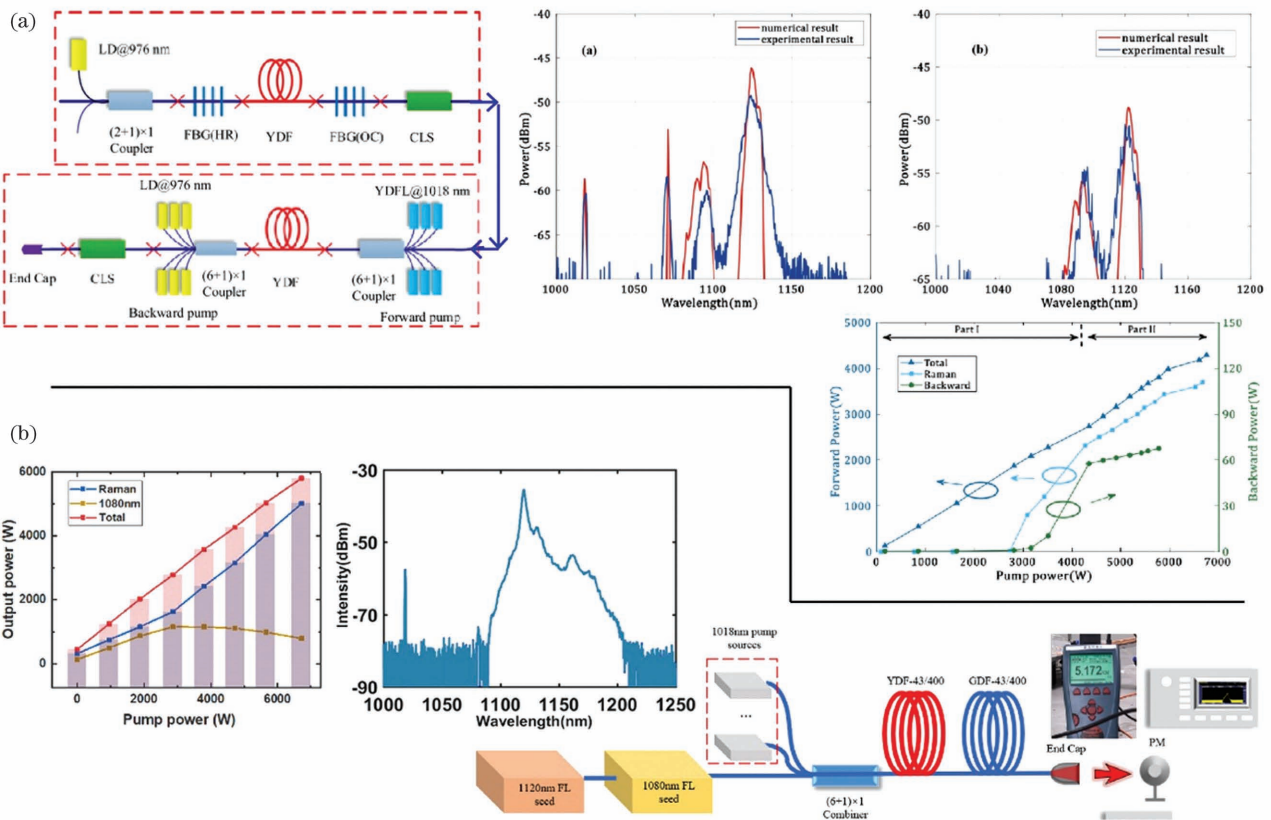


图 11 级联泵浦高功率拉曼光纤激光器。(a) 1018 nm 和 LD 混合双向泵浦 3.7 kW 混合增益拉曼光纤激光器示意图、功率和光谱^[88]；(b) 1018 nm 级联泵浦 5 kW 混合增益拉曼光纤激光器结构、功率和光谱

Fig. 11 Tandem-pumped high-power Raman fiber lasers. (a) Schematic diagram, power, and spectrum of 1018 nm and LD hybrid bidirectional pumping 3.7 kW hybrid gain Raman fiber laser^[88]；(b) structure, power, and spectrum of 1018 nm cascade pumped 5 kW hybrid gain Raman fiber laser

结构系统采用单波长种子源作为主振荡器,主放大级充分结合了级联泵浦增益平坦和直接泵浦高吸收系数的特点,在正向 1018 nm 光纤激光器级联泵浦的结构上增加了部分后向泵浦的 976 nm LD,针对增益光纤末端区间的拉曼激光进行放大。在前向泵浦功率 4200 W,后向泵浦功率 2510 W 时,输出总功率 4290 W,拉曼波段激光功率 3700 W;输出拉曼激光中心波长 1121.9 nm,3 dB 带宽为 5.2 nm。本文作者团队基于多谱段稳态速率方程对最终输出光谱进行了数值仿真,仿真结果和最终输出的前向与后向光谱基本一致[图 11(a)]。基于数值仿真,本文作者团队通过在放大级有源光纤后续接无源光纤并调整光纤长度来增强级联拉曼增益,实现了 1500 W 的 1187 nm 拉曼光纤激光输出,为该波段现有输出功率最高纪录。

事实上,为了获得充足的级联拉曼增益而延长掺镱光纤长度,这恰好能够适应 1018 nm 级联泵浦在掺镱光纤中吸收系数较小的特点。因此,仅采用 1018 nm 光纤激光级联泵浦结合长增益光纤成为了产生高功率拉曼光纤激光的优选方案。2020 年,国防科技大学报道了 1018 nm 级联泵浦的 MOPA 结构混合增益拉曼光纤激光器,中心波长 1150 nm,输出功率达 1338 W^[89]。同年,本文作者团队基于多波长主振荡器的 MOPA 结构,实现了 5 kW 级别的级联泵浦混合增益拉曼光纤激光输出[图 11(b)],输出总功率最高 5982 W,其中拉曼波段功率占比 5172 W,此时泵浦功率 6720 W,光光效率 76.9%。

可以看到,级联泵浦的混合增益拉曼光纤激光器充分利用了级联泵浦结构的长增益光纤特点,利用掺镱光纤将注入的高功率包层泵浦光增益转换至拉曼信号光的同时实现了热负载的均匀分布,是高功率拉曼光纤激光输出的有效方案,具备功率提升的潜力。

6 结论与展望

创新的理念和技术正在不断推动高功率光纤激光技术的迅猛发展,促进着功率和亮度的不断提升、光谱性质的不断优化以及高功率激光输出波长的不断拓展。在实现这些目标的道路上,众多有关高功率 1018 nm 光纤激光器以及各类级联泵浦的高功率光纤激光器的过往研究所创造的贡献,既为许多快速进步的前沿应用提供了亟需的技术解决方案,也为高功率光纤激光技术的未来方向提供了深刻的启示。

在提升功率和空间亮度方面,采用以 1018 nm 为代表的高功率短波长光纤激光源进行级联泵浦已经表现出优异的成效。大量最新研究展示出级联泵浦可以允许更多从增益光纤、光纤器件到系统层面的新技术的应用,充分利用高泵浦亮度带来的灵活设计空间,实现输出光性质的特异性提升。然而,高功率 1018 nm 光纤激光器也展现出了短波长掺镱光纤激光面临的共同主要问题,即 ASE 和难以抑制的寄生振荡。要保障高亮度 1018 nm 光纤激光的实现,同样需要从光纤、器件和系统层面上引入新的设计,降低 1018 nm 激光的重吸收,降低 ASE 波段的光纤内反馈,改进光纤激光器的系统构型以合理分配沿光纤的激光过程效益。不断提升的高功率 1018 nm 光纤激光器性能,是所有后续级联泵浦应用效益提升的重要基础。

在控制光谱性质方面,采用 MOPA 结构的高功率光纤激光器除了以级联泵浦提升放大级内泵浦亮度外,还必须关注种子光源的光谱性质。级联泵浦的高功率随机光纤激光器已经被发现是控制光谱展宽和光束功率时域不稳定性的有效技术方案,能够获得比传统固定腔激光器时域更稳定的高功率输出。同时,通过有针对性地抑制 SRS 效应、谱域外滤波、泵浦结构优化等方法,还可以在提高高功率随机光纤激光的光谱亮度方面产生显著的效益。通过使用高功率随机光纤激光器作为种子源进行级联泵浦放大,能够较好地抑制放大过程的光谱展宽,实现稳定的高功率光纤激光输出。以 1018 nm 级联泵浦的高功率随机光纤激光器已经实现数千瓦功率下的优异输出性质,并将产生更高功率的高品质激光光束。

在拓展高功率光纤激光的输出波长范围方面,拉曼光纤激光器提供了更广阔的选择空间。级联泵浦的高功率拉曼光纤激光器可以将千瓦乃至万瓦级的高功率光纤激光输出从传统波长拓展至 1.2 μm 甚至更长波段,为高功率光谱合成系统的输出功率跨越提升奠定了基础。通过 1018 nm 双向级联泵浦,能够进一步匀化拉曼增益光纤的热负载分布,保障输出效率并提升输出功率空间;而通过增益混合结构中有源光纤和无源光纤的参数精细配合,可以用更低的系统复杂度产生更高效益的激光输出。长期看来,级联泵浦还有望通过在钕镱共掺光纤激光器等其他类型的激光器中应用,将百瓦级以上的高功率光纤激光输出拓展到大于 1.5 μm 波段,将为通信、智能物联网等领域提供优质激光,甚至进一步

级联泵浦掺铥、掺钕光纤激光等,实现更高功率的中红外波段输出,助力医疗等领域迈上更高水平,并孕育新的技术革新。

随着光纤激光技术的发展,级联泵浦表现出与直接泵浦并驾齐驱的发展势头;在更高功率的光纤激光产生上,级联泵浦的优势将更多地展现。针对采用级联泵浦的各类光纤激光器以及级联泵浦用的光纤激光源的研究将在未来持续发展,推动高功率光纤激光技术不断创新,造福社会。

参 考 文 献

- [1] Jauregui C, Limpert J, Tünnermann A. High-power fibre lasers[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(11): 861-867.
- [2] Xin J J, Fang C, Huang C J, et al. Analysis of the fracture mechanism at cryogenic temperatures of thick 316LN laser welded joints [J]. *Fusion Engineering and Design*, 2019, 148: 111277.
- [3] Gao C, Dai J Y, Li F Y, et al. Homemade 10-kW ytterbium-doped aluminophosphosilicate fiber for tandem pumping [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(3): 0315001.
高聪, 代江云, 李峰云, 等. 自研万瓦级同带泵浦掺铥石英玻璃光纤 [J]. *中国激光*, 2020, 47(3): 0315001.
- [4] Dai J Y, Li F Y, Liu N, et al. 10 kw-level Yb-doped aluminophosphosilicate fiber [C] // *Conference on Lasers and Electro-Optics/Pacific Rim 2020*, August 3-5, 2020, Sydney, Australia. Washington, D. C.: OSA, 2020: C9A_1.
- [5] Fang Q, Li J H, Shi W, et al. 5 kW near-diffraction-limited and 8 kW high-brightness monolithic continuous wave fiber lasers directly pumped by laser diodes[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(5): 1-7.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Wang X J, Xiao Q R, Yan P, et al. 3000 W direct-pumping all-fiber laser based on domestically produced fiber [J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(16): 164204.
- [9] Chen X L, Lou F G, He Y, et al. Home-made 10 kW fiber laser with high efficiency [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(3): 0336001.
陈晓龙, 楼风光, 何宇, 等. 高效率全国产化 10 kW 光纤激光器 [J]. *光学学报*, 2019, 39(3): 0336001.
- [10] Lin H H, Tang X, Li C Y, et al. A homemade fiber laser system with 10.6 kW output power[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(3): 0315001.
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.
- [11] Lin A X, Zhan H, Peng K, et al. 10 kW-level pump-gain integrated functional laser fiber[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2018, 30(6): 060101.
林傲祥, 湛欢, 彭昆, 等. 国产复合功能光纤实现万瓦激光输出 [J]. *强激光与粒子束*, 2018, 30(6): 060101.
- [12] 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.
奚小明, 杨欢, 曾令筏, 等. 国产纺锤形增益光纤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.
- [13] 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.
- [14] Wang Y, Kitahara R, Kiyoyama W, et al. 8 kW single-stage all-fiber Yb-doped fiber laser with a BPP of 0.50 mm-mrad [J]. *Proceedings of SPIE*, 2020, 11260: 1126022.
- [15] Klein S, Giesberts M, Baer P, et al. Fiber Bragg gratings in active multimode XLMA fibers for high-power kW-class fiber lasers [J]. *Proceedings of SPIE*, 2020, 11260: 1126025.
- [16] Platonov N, Shkurikhin O, Fomin V, et al. High efficient kW level single-mode ytterbium fiber lasers in all-fiber format with diffraction-limited beam at wavelengths in 1000-1030 nm spectral range [J]. *Proceedings of SPIE*, 2020, 11260: 1126003.
- [17] Chu Q, Shu Q, Liu Y, et al. 3 kW high OSNR 1030 nm single-mode monolithic fiber amplifier with a 180 pm linewidth [J]. *Optics Letters*, 2020, 45(23): 6502-6505.
- [18] Akarid A, Ourir A, Maurel A, et al. Extraordinary transmission through subwavelength dielectric gratings in the microwave range[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(13): 3752-3755.
- [19] Xu Y, Fang Q, Cui X, et al. 1 kW monolithic narrow linewidth linear-polarized fiber laser at 1030 nm [J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10512: 105122S.

- [20] Chu Q H, Shu Q, Lin H H, et al. All-fiber narrow linewidth fiber laser achieved 3 kW near diffraction limited output at 1030 nm[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2020, 32(1): 011005.
楚秋慧, 舒强, 林宏奂, 等. 窄线宽光纤激光器在 1030 nm 波段实现 3 kW 近衍射极限输出[J]. *强激光与粒子束*, 2020, 32(1): 011005.
- [21] Platonov N, Yagodkin R, De La Cruz J, et al. 1.5 kW linear polarized on PM fiber and 2 kW on non-PM fiber narrow linewidth CW diffraction-limited fiber amplifier [J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10085: 10085M.
- [22] 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.
- [23] Gapontsev V, Fomin V, Yusim A. Recent progress in scaling of high power fiber lasers at IPG photonics [C]//*Solid State Diode Laser Technology Review*, June 29, 2009, Newton, MA, USA. [S. l. : s. n.], 2009.
- [24] Wang J H, Chen G, Zhang L, et al. High-efficiency fiber laser at 1018 nm using Yb-doped phosphosilicate fiber[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(29): 7130-7133.
- [25] Xiao H, Zhou P, Wang X L, et al. Experimental investigation on 1018-nm high-power ytterbium-doped fiber amplifier[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(13): 1088-1090.
- [26] Xiao H, Zhou P, Wang X L, et al. High power 1018 nm monolithic Yb³⁺-doped fiber laser and amplifier[J]. *Laser Physics Letters*, 2012, 9(10): 748-753.
- [27] Xiao H, Zhou P, Wang X L, et al. High power 1018 nm ytterbium doped fiber laser with an output power of 309 W[J]. *Laser Physics Letters*, 2013, 10(6): 065102.
- [28] 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.
- [29] Jiang M, Zhou P, Xiao H, et al. A high-power narrow-linewidth 1018 nm fiber laser based on a single-mode-few-mode-single-mode structure [J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2015, 3: e25.
- [30] Wang Y S, Sun Y H, Ma Y, et al. Experimental study on high brightness 1018 nm ytterbium doped fiber laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(1): 0102007.
王岩山, 孙殷宏, 马毅, 等. 高亮度 1018 nm 光纤激光实验研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(1): 0102007.
- [31] Wang Y B, Chen G, Xie L, et al. Experimental research of high performance fiber and fiber laser at 1018 nm [J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(6): 064210.
王一礴, 陈瑰, 谢璐, 等. 高性能 1018 nm 光纤及激光器实验研究[J]. *物理学报*, 2013, 62(6): 064210.
- [32] Zhang R, Xue Y, Zhang H, et al. High power continuous wave ytterbium-doped fiber oscillator at 1018 nm [J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9266: 92661E.
- [33] Ottenhues C, Theeg T, Hausmann K, et al. Single-mode monolithic fiber laser with 200 W output power at a wavelength of 1018 nm [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(21): 4851-4854.
- [34] Seah C P, Ng T Y, Chua S L. 400 W ytterbium-doped fiber oscillator at 1018 nm[C]//*Advanced Solid State Lasers 2015*, October 4-9, 2015, Berlin, Germany. Washington, D. C.: OSA, 2015: ATu2A.33.
- [35] Glick Y, Sintov Y, Zuitlin R, et al. Single-mode 230 W output power 1018 nm fiber laser and ASE competition suppression [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2016, 33(7): 1392-1398.
- [36] Yan P, Wang X J, Li D, et al. High-power 1018 nm ytterbium-doped fiber laser with output of 805 W[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(7): 1193-1196.
- [37] Chen X L, Wang J H, Zhao X, et al. 307 W high-power 1018 nm monolithic tandem pump fiber source with effective thermal management [J]. *Chinese Optics Letters*, 2017, 15(7): 071407.
- [38] Yan P, Wang X J, Wang Z H, et al. A 1150 W 1018 nm fiber laser bidirectional pumped by wavelength-stabilized laser diodes[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2018, 24(3): 1-6.
- [39] Lafouti M, Latifi H, Fathi H, et al. Experimental investigation of a high-power 1018 nm fiber laser using a 20/400 μm ytterbium-doped fiber [J]. *Applied Optics*, 2019, 58(4): 729-733.
- [40] Palma-Vega G, Walbaum T, Heinzig M, et al. Ring-up-doped fiber for the generation of more than 600 W single-mode narrow-band output at 1018 nm [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(10): 2502-2505.
- [41] Lim W Y W, Seah C P, Chua S L. Thermally insensitive 700 W Yb-doped fiber oscillator at 1018 nm[C]//*2017 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC)*, June 25-29, 2017, Munich. New York: IEEE Press, 2017.
- [42] Li R X, Xiao H, Leng J Y, et al. 2240 W high-brightness 1018 nm fiber laser for tandem pump

- application [J]. *Laser Physics Letters*, 2017, 14 (12): 125102.
- [43] Gu Y R, Leng J Y, Xiao H, et al. 5 kw all-fiber 1018 nm laser combining [J]. *High Power Laser and Particle Beams* 2017, 29(12): 120101.
- [44] Kong F T, Gu G C, Hawkins T W, et al. Efficient 240 W single-mode 1018 nm laser from an ytterbium-doped 50/400 μm all-solid photonic bandgap fiber [J]. *Optics Express* 2018, 26(3): 3138-3144.
- [45] Lafouti M, Latifi H, Sarabi H, et al. 407 W specially-designed fiber laser at 1018 nm using a gain fiber with a low core/cladding ratio of 20/400 μm [J]. *Laser Physics*, 2018, 28(11): 115102.
- [46] 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): 1138-1147.
- [47] Kalyoncu S K, Yeniay A. High brightness 1018 nm monolithic fiber laser with power scaling to >500 W [J]. *Applied Optics*, 2020, 59(16): 4763-4767.
- [48] Tian J D, Xiao Q R, Li D, et al. Suppressing the amplified spontaneous emission in the high-power 1018-nm monolithic fiber laser by decreasing the feedback from the inner reflections [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2020, 37(8): 2514-2522.
- [49] Xie Z X, Fang Q, Xu Y, et al. Hundred-Watts-level monolithic narrow linewidth linearly-polarized fiber laser at 1018 nm [J]. *Optical Engineering*, 2019, 58 (10): 106106.
- [50] Xiao Q R, Tian J D, Yan P, et al. Exploring the initiation of fiber fuse [J]. *Scientific Reports*, 2019, 9 (1): 1-10.
- [51] Matniyaz T, Kong F T, Kalichevsky-Dong M T, et al. 302 W single-mode power from an Er/Yb fiber MOPA: publisher's note [J]. *Optics Letters*, 2020, 45(10): 2910-2913.
- [52] 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.
- [53] Beier F, Strecker M, Nold J, et al. 6.8 kW peak Power quasi-continuous wave tandem-pumped ytterbium amplifier at 1071 nm [J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9344: 93441H.
- [54] Lim K J, Kai-Wen S S, Yong'En Y J, et al. High absorption large-mode area step-index fiber for tandem-pumped high-brightness high-power lasers [J]. *Photonics Research*, 2020, 8(10): 1599-1604.
- [55] Zhou P, Xiao H, Leng J Y, et al. High-power fiber lasers based on tandem pumping [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2017, 34(3): A29-A36.
- [56] Wang X J, Yan P, Wang Z H, et al. The 5.4 kW output power of the ytterbium-doped tandem pumping [C] // *Conference on Lasers and Electro-Optics 2018*, May 13-18, 2018, San Jose, California. Washington, D.C.: OSA, 2018: AM2M.5.
- [57] Wang Z H, Xiao Q R, Wang X J, et al. 3000 W tandem pumped all-fiber laser based on domestic fiber [J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67(2): 024205. 王泽晖, 肖起榕, 王雪娇, 等. 国产光纤实现同带抽运 3000 W 激光输出 [J]. *物理学报*, 2018, 67(2): 024205.
- [58] Wang Z H, Yan P, Xiao Q R, et al. Experimental research on high power tandem pumped fiber laser with homemade gain fiber [J]. *Proceedings of SPIE*, 2020, 11455: 114556V.
- [59] 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.
- [60] 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.
- [61] Liu Y, Su R, Ma P, et al. >1 kW all-fiberized narrow-linewidth polarization-maintained fiber amplifiers with wavelength spanning from 1065 to 1090 nm [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(14): 4213-4218.
- [62] Tian J D, Xiao Q R, Li D, et al. Tandem-pumped high-power narrow-linewidth fiber laser tunable from 1060-1090 nm [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(6): 1461-1467.
- [63] Wang Y S, Peng W J, Ke W W, et al. Influence of seed instability on the stimulated Raman scattering of high power narrow linewidth fiber amplifier [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2020, 52(4): 1-12.
- [64] Turitsyn S K, Babin S A, El-Taher A E, et al. Random distributed feedback fibre laser [J]. *Nature Photonics*, 2010, 4(4): 231-235.
- [65] Ma R, Rao Y J, Zhang W L, et al. Multimode random fiber laser for speckle-free imaging [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2019, 25(1): 1-6.
- [66] Yang T H, Chen C W, Jau H C, et al. Liquid-crystal random fiber laser for speckle-free imaging [J]. *Applied Physics Letters*, 2019, 114(19): 191105.

- [67] Chen L J, Song R, Lei C M, et al. Random fiber laser directly generates visible to near-infrared supercontinuum[J]. *Optics Express*, 2019, 27(21): 29781-29788.
- [68] Ma X Y, Ye J, Zhang Y, et al. Vortex random fiber laser with controllable orbital angular momentum mode[J]. *Photonics Research*, 2021, 9(2): 266-271.
- [69] Wang J H, Chen R S, Yao J N, et al. Random distributed feedback fiber laser generating cylindrical vector beams[J]. *Physical Review Applied*, 2019, 11(4): 044051.
- [70] Wu H, Han B, Wang Z N, et al. Temporal ghost imaging with random fiber lasers [J]. *Optics Express*, 2020, 28(7): 9957-9964.
- [71] Zhang H W, Huang L, Song J X, et al. Quasi-kilowatt random fiber laser [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(11): 2613-2615.
- [72] Li Y, Li T L, Peng W J, et al. Narrow spectrum kilowatt-level MOPA seeded by Yb-doped random fiber laser[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(21): 1844-1847.
- [73] Li T L, Li Y, Ke W W, et al. Power scaling of narrow-linewidth fiber amplifier seeded by Yb-doped random fiber laser [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2018, 24(5): 1-8.
- [74] Xu J M, Huang L, Jiang M, et al. Near-diffraction-limited linearly polarized narrow-linewidth random fiber laser with record kilowatt output[J]. *Photonics Research*, 2017, 5(4): 350-354.
- [75] Xu J M, Ye J, Zhou P, et al. Tandem pumping architecture enabled high power random fiber laser with near-diffraction-limited beam quality[J]. *Science China Technological Sciences*, 2019, 62(1): 80-86.
- [76] Wang Z H, Yan P, Huang Y S, et al. An efficient 4-kW level random fiber laser based on a tandem-pumping scheme [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2019, 31(11): 817-820.
- [77] Wang Z H, Yu W L, Tian J D, et al. 5.1 kW tandem-pumped fiber amplifier seeded by random fiber laser with high suppression of stimulated Raman scattering[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2021, 57(2): 1-9.
- [78] Feng Y, Zhang L, Jiang H. Power scaling of Raman fiber lasers [J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9344: 93440U.
- [79] Taylor L R, Feng Y, Calia D B. 50 W CW visible laser source at 589 nm obtained via frequency doubling of three coherently combined narrow-band Raman fibre amplifiers[J]. *Optics Express*, 2010, 18(8): 8540-8555.
- [80] Ji J H, Codemard C A, Sahu J K, et al. Design, performance, and limitations of fibers for cladding-pumped Raman lasers[J]. *Optical Fiber Technology*, 2010, 16(6): 428-441.
- [81] Ji J H, Codemard C A, Ibsen M, et al. Analysis of the conversion to the first stokes in cladding-pumped fiber Raman amplifiers[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2009, 15(1): 129-139.
- [82] Chen Y Z, Yao T F, Xiao H, et al. High-power cladding pumped Raman fiber amplifier with a record beam quality[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(8): 2367-2370.
- [83] Zhang L, Jiang H W, Cui S Z, et al. Integrated ytterbium-Raman fiber amplifier[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(7): 1933-1936.
- [84] Zhang L, Liu C, Jiang H, et al. Kilowatt ytterbium-Raman fiber laser [J]. *Optics Express*, 2014, 22(15): 18483-18489.
- [85] Zhang H W, Xiao H, Zhou P, et al. High power Yb-Raman combined nonlinear fiber amplifier [J]. *Optics Express*, 2014, 22(9): 10248-10255.
- [86] Zhang H W, Tao R M, Zhou P, et al. 1.5-kW Yb-Raman combined nonlinear fiber amplifier at 1120 nm [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(6): 628-630.
- [87] Xiao Q, Yan P, Li D, et al. Bidirectional pumped high power Raman fiber laser [J]. *Optics Express*, 2016, 24(6): 6758-6768.
- [88] Wang Z H, Xiao Q R, Huang Y S, et al. Dual-wavelength bidirectional pumped high-power Raman fiber laser [J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2019, 7: e5.
- [89] Zhang H W, Xiao H, Wang X L, et al. Mode dynamics in high-power Yb-Raman fiber amplifier [J]. *Optics Letters*, 2020, 45(13): 3394-3397.
- [90] Chen Y Z, Yao T F, Xiao H, et al. 3 kW passive-gain-enabled metalized Raman fiber amplifier with brightness enhancement [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(6): 1785-1790.

Tandem-Pumped High-Power Ytterbium-Doped Fiber Lasers: Progress and Opportunities

Xiao Qirong^{1,2}, Tian Jiading^{1,2}, Li Dan^{1,2}, Qi Tiancheng^{1,2}, Wang Zehui^{1,2},
Yu Weilong^{1,2}, Wu Yulun^{1,2}, Yan Ping^{1,2*}, Gong Mali^{1,2}

¹ Ministry of Education Key Laboratory of Photonics Control Technology, Department of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

² State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Department of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract

Significance Ytterbium-doped fiber lasers have gained rapid development in the past two decades. Since the breakthrough of hundred-watt-level power at the end of the last century, nowadays the output power of the fiber lasers can exceed ten-kilowatt level. Thanks to the waveguide nature of optical fibers and the laser diode pumping techniques, high-power ytterbium-doped fiber laser owns several advantageous features, including high conversion efficiency, high beam brightness, compact and flexible architecture, easy thermal management, and stable operation. High-power ytterbium-doped fiber lasers have become preferred laser sources for many applications in various fields, such as industrial manufacturing, biomedical treatment, scientific researches, and defense.

Technologies for improving the output characteristics of high-power ytterbium-doped fiber lasers, especially for scaling output power, realizing more control of the output spectrum and expanding the range of output wavelengths, have received considerable interests from the fields. The characteristics are influenced by pumping schemes of the lasers, of which there are two major kinds as direct pumping and tandem-pumped. Direct pumping generally means that fiber lasers are pumped by laser diodes, which usually emit at around 915 nm and 976 nm for ytterbium-doped fibers (YDFs). In contrast, tandem-pumped means that fiber lasers are pumped by other fiber lasers, of which the wavelength generally ranges from 1000 nm to 1030 nm. Both pumping schemes have demonstrated high capability for realizing high-performance ytterbium-doped fiber lasers, and have realized outstanding advances in increasing power and brightness, controlling output spectrum, and expanding the available range of output wavelength. Particularly, tandem-pumped scheme has achieved increasing performance from recent studies. A few 20 kW fiber lasers have been proposed in the last several years.

Owing to the rapid development of light sources such as laser diodes, direct pumping has been the majority of the adopted pumping schemes. However, for higher power levels, namely 10 kW level, direct pumping may be a bottleneck to ensuring safe operation. Direct pumping offers usually low pump brightness [typically $<0.2 \text{ W}/(\mu\text{m}^2 \cdot \text{sr})$]. For gaining a higher absorption, the available pump wavelength will be very limited, as it needs to be at around the absorption peak of the gain media (for YDFs, $\sim 976 \text{ nm}$). This causes a large quantum defect in the pump-to-laser conversion process and thus severe heat management problem; for higher-power fiber lasers, the problem can be too hard to controll. In contrast, in tandem-pumped scheme where pump brightness can be enhanced by 3 orders to even $>1000 \text{ W}/(\mu\text{m}^2 \cdot \text{sr})$, it is possible to use double cladding YDFs of much smaller cladding diameters while having a good pump-gain overlap. In this way, it is possible to use longer pump wavelengths while having good pump absorption, and the heat problem can be mitigated. In recent years, an increasing number of high-power fiber lasers at from 1000 nm to 1030 nm has been proposed and demonstrated. There is an important landmark, as in 2009 when the IPG company for the first time announced their 10 kW fiber laser that was pumped by combined 47 fiber lasers at 1018 nm. The news has pushed the studies of fiber lasers for tandem-pumped (including 1018 nm fiber lasers) to the fast lane.

Progress This paper reviews the latest research progress about tandem-pumped high-power ytterbium-doped fiber lasers. We discuss the key technologies in realizing the tandem-pumped high-power fiber lasers with leading performances, and look forward to possible directions and challenges in future studies. In the second chapter, we review recent development of high-power 1018 nm fiber lasers. The features and performance of the lasers are introduced (Table 1, Fig. 1—3); the main problem, amplified spontaneous emission (ASE), that hinders further power scaling and several promising methods to mitigate it are discussed. In the third chapter, the recent

development of tandem-pumped high-power ytterbium-doped fiber lasers working at traditional wavelengths, which have scaled the output powers, are introduced (Fig. 4—7). The fourth chapter discusses recent results of tandem-pumped high-power random fiber lasers, which can offer more stable spectral characteristics (Table 2, Fig. 8—9). The fifth chapter discusses tandem-pumped high-power Raman fiber lasers, which expands the range of output wavelength of ytterbium-doped fiber lasers to around $1.2\ \mu\text{m}$ (Table 3, Fig. 10—11).

Conclusions and Prospects The advances in high-power fiber lasers continues to be driven by novel concepts and innovative techniques. Studies on high-power 1018 nm fiber lasers and the various tandem-pumped high-power fiber lasers have contributed a lot of useful solutions for the future development of many fields. In scaling output power, the application of the high-power 1018 nm fiber lasers in tandem-pumped high-power fiber lasers has been making excellent results. However, development of the high-power 1018 nm fiber lasers, as well as the others for tandem-pumped, is the key for further increasing the final performance. In controlling output spectral characteristics, tandem-pumped high-power random fiber lasers have shown promising effects in stable time-domain characteristics and can be used as seed in main oscillator power amplifier (MOPA) configuration for controlling the broadening of laser bandwidth. In expanding the range of output wavelength, tandem-pumped high-power Raman fiber lasers have exhibited outstanding performance in realizing high-power output at up to $1.2\ \mu\text{m}$. Meanwhile, it is further possible to combine the merits of erbium-ytterbium-co-doped fibers to reach the output of $>1.5\ \mu\text{m}$. The future of tandem-pumped high-power lasers and the fiber lasers for tandem-pumped is bright and awaiting further studies.

Key words lasers; high-power fiber laser; tandem-pumped; 1018 nm fiber laser; random fiber laser; Raman fiber laser; control of spectral characteristics; expanding range of output wavelength

OCIS codes 140.3510; 140.3615; 140.5560; 140.3550