

光学学报

高功率可见光至近红外波段超连续谱光源研究进展

江丽^{1,2,3}, 宋锐^{1,2,3*}, 侯静^{1,2,3**}, 陈胜平^{1,2,3}, 张斌^{1,2,3}, 杨林永^{1,2,3}, 宋家鑫^{1,2,3}, 杨未强^{1,2,3}, 韩凯^{1,2}

¹国防科技大学前沿交叉学科学院, 湖南长沙 410073;

²国防科技大学南湖之光实验室, 湖南长沙 410073;

³国防科技大学高能激光技术湖南省重点实验室, 湖南长沙 410073

摘要 高功率可见光至近红外波段的超连续谱光源在光电对抗、光学相干层析成像和高光谱激光雷达等方面具有广泛的应用前景。最近几年,涌现了一些用于产生高功率超连续谱光源的新方法,推动了高功率超连续谱光源的进一步发展。本文从主振荡功率放大结构、随机光纤激光器结构以及多路非相干合成这三种用于高功率超连续谱产生的主流方案出发,着重介绍了近年来有代表性的高功率可见光至近红外波段超连续谱光源的研究进展,并综合分析了这三种方案的优缺点以及未来的发展潜力。

关键词 非线性光学; 高功率光纤超连续谱; 渐变折射率多模光纤; 光子晶体光纤; 随机光纤激光器; 多路非相干合成

中图分类号 O437; TN248

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS230763

1 引言

超连续谱光谱,又被称为“终极白光”^[1],是一种新型光源,由于其兼具宽光谱特性和单色激光光源的高亮度、高空间相干等特点,在近二十多年里得到了极大的发展。超连续谱的产生通常是使用一个短脉冲激光去泵浦一段非线性介质,在多种非线性效应(例如孤子分裂、受激拉曼散射、四波混频、自相位调制和交叉相位调制等)和介质色散的综合影响下,使光谱得到极大展宽的现象^[2-5]。

用于超连续谱产生的非线性介质可以分为固体、气体和液体^[6-8],早期在这些非线性介质中实现宽带超连续谱的产生需要极高的峰值功率且产生的光束质量相对较差。光纤作为一种新型非线性介质,可以将光束束缚在一个较小的纤芯尺寸里从而获得较强的光与物质相互作用,随着光纤损耗的降低以及光纤拉制工艺的提升,尤其是光子晶体光纤(PCF)的诞生,使得光纤成为产生超连续谱的理想介质。目前,基于光纤超连续谱产生的研究热点主要集中在光谱的长波和短波拓展、光谱平坦度的改善、噪声的降低以及功率的提升这几个方面^[9-12],其中功率的提升是超连续谱光源发展的重要研究热点。

高功率超连续谱光源在对光谱和功率有较高要求

的光电对抗、光学相干层析和高光谱激光雷达等领域具有重要的应用前景^[13-16]。在光电对抗中^[13],需要一个宽带的高功率激光光源对敌方设备进行压制和干扰。例如,由美英多方联合研制的 AN/AAQ-24(V) 定向红外对抗系统具有激光干扰功能,干扰波长覆盖了整个近红外波段;在光学相干层析中^[15-16],通常需要一个宽带光源对材料样品进行扫描从而重构该材料的二维或者三维图像。分辨率、速度和灵敏度是光学相干层析中最重要的三个指标,高功率超连续谱光源较高的功率可以提高系统灵敏度,较宽的光谱可以提高轴向分辨率;在高光谱激光雷达中^[14],宽带光谱区域的主动高光谱探测对于目标的远程识别具有很大的吸引力。有报道称,扩散目标的主动高光谱探测具有几百米的测量范围,需要使用相当昂贵的仪器来产生和探测红外辐射^[17-18],其中光功率是决定激光雷达(光探测和测距)系统中测量范围极限的主要因素之一。高功率超连续谱光源由于其方向性好、波长覆盖范围宽和光谱强度高,在远程高光谱传感和激光雷达的性能提升方面具有巨大的应用前景。

本文课题组在文献^[19-21]中已经对超连续谱的技术方案以及中红外 3~5 μm 波段超连续谱光源的研究进展进行了综述,本文聚焦近几年在可见光至近红外波段比较有代表性的高功率超连续谱光源的研究成

收稿日期: 2023-03-31; 修回日期: 2023-05-10; 录用日期: 2023-05-15; 网络首发日期: 2023-05-25

基金项目: 湖南省自然科学基金(2022JJMSXM2506)

通信作者: *snotice@163.com; **houjing25@sina.com

果,重点介绍了国防科技大学近几年在该领域的研究进展。在该波段中用于高功率超连续谱产生的介质主要是石英光纤,对于近红外波段(800~2500 nm)而言,常规的石英光纤即可满足该波段超连续谱的产生;而对于可见光(400~800 nm)而言,需要对石英光纤进行一定的设计从而获得合适的短波拓展。目前用于产生高功率可见光至近红外波段超连续谱光源的主要方案有三种,本文对这三种方案的研究进展和优缺点以及未来的发展潜力进行了分析与总结。

2 高功率可见光至近红外波段超连续谱光源研究进展

2.1 基于主振荡功率放大结构产生高功率超连续谱方案的研究进展

主振荡功率放大(MOPA)结构是光纤激光器用来提升功率的一种典型结构,一般由一个种子激光器和多级光纤放大器组成^[22-23]。基于MOPA结构的高功率超连续谱激光光源通常先由多级光纤放大器对脉冲种子进行功率放大,然后再去泵浦一段非线性光纤产生超连续谱^[24-26]。PCF由于其高非线性和独特的色散调控能力,被广泛用于产生可见光至近红外波段的超连续谱光源中^[27]。然而,为了能够实现超连续谱短波部分有效的增强,PCF的纤芯尺寸通常被设计得非常小,这使得它本身难以承受较高的功率以及它与泵浦光纤激光器的尾纤之间存在着模场失配。因此,研究者们开始采用多芯PCF^[28]、级联PCF^[29]以及长拉锥PCF^[30]等方法在取得合适的短波拓展的同时增加其有效模场面积。

2018年,本文课题组齐雪等^[28]采用一个放大的1016 nm脉冲激光泵浦源和一段七芯PCF用于产生高功率可见光超连续谱,图1显示了其具体实验装置。频率倍增后的1016 nm脉冲种子源被注入到三级掺铒光纤放大器后功率提升到了114 W,随后通过一个模

场适配器(MFA)(耦合效率为84%,即从泵浦激光器耦合到七芯PCF的效率)将泵浦脉冲激光注入到一段七芯的PCF中实现高功率可见光超连续谱的产生。该光纤的零色散点为991 nm,相应的横截面显示在图2(a)中,由于多芯的结构增加了其模场直径(8.5 μm),使得其耦合效率相对较高从而可以承受更高的泵浦功率。最终在最大泵浦功率下获得了80 W的可见光增强超连续谱输出,光谱范围为350~2400 nm。该光纤仍具有进一步提升输出功率的潜力,但1016 nm脉冲泵浦源的功率不足限制了该超连续谱功率的进一步提升。2020年,中国工程物理研究院董克攻团队的张昊宇等^[29]基于MOPA结构对种子源进行功率提升并通过泵浦级联PCF(即泵浦激光先注入PCF1中,随后将输出的激光再注入PCF2中输出)实现了平均输出功率为104 W、光谱范围覆盖为370~2400 nm的可见光超连续谱输出。其中,泵浦激光耦合进PCF1的耦合效率为63.7%。级联的PCF1和PCF2的零色散点和纤芯直径分别为1040 nm、4.8 μm 和900 nm、3 μm ,其光纤横截面分别如图2(b)和2(c)所示。级联PCF和长拉锥PCF本质上都是通过增大泵浦注入端的有效模场面积来提高注入泵浦功率,而输出端通常具有较小的纤芯尺寸来实现有效短波拓展,相比而言,长拉锥光纤不存在两种PCF熔接带来的熔接损耗问题,更有利于功率的提升。2021年,该课题组^[30]为了进一步提升功率并保证短波的拓展,在保持泵浦系统不变的前提下,将级联PCF更换为一段长拉锥PCF,图2(d)~2(f)显示了其基本结构和光纤横截面,沿传输方向该拉锥PCF包含三个部分:输入端和输出端分别为长度2 m和5 m的均匀部分;中间是纤芯直径从4.2 μm 减小到3.3 μm 、长度为7 m、零色散点从1016 nm减小到975 nm的锥形部分。最终,在942 W的泵浦功率下获得了光谱范围为390~2400 nm、平均功率为314.7 W的超连续谱。

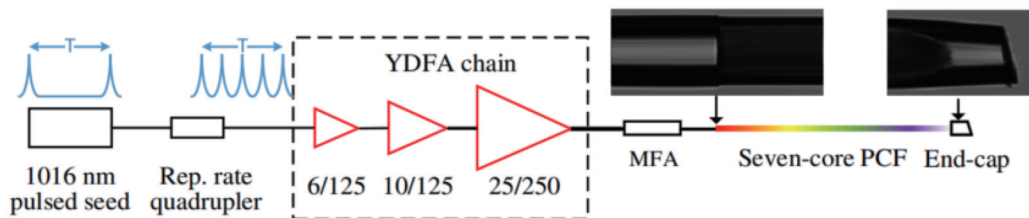


图1 基于MOPA结构的七芯PCF高功率可见光超连续谱产生实验装置图^[28]

Fig. 1 Experimental setup diagram of high power visible supercontinuum generation in a piece of seven-core PCF based on MOPA structure^[28]

由于PCF的模场直径比较小,基于PCF和MOPA结构的超连续谱方案在提升超连续谱功率方面总是有限的。相对而言,多模光纤具有更高的功率承受能力。相比于阶跃折射率多模光纤而言,渐变折射率多模光纤(GRINMMF)由于具有独特性能在近几年备受关注。首先,GRINMMF具有较低的克尔自

清洁的阈值,这是因为其周期性振荡引起的周期性折射率光栅将更多的能量从高阶模式转换为基阶模式^[31-33]。在超连续谱产生方面,其克尔效应和拉曼效应的共同作用能实现高斯光束输出^[34]。其次,对于在正常色散区传播的高峰值泵浦脉冲而言,非线性折射率光栅将在可见光和近红外区域产生一系列较强的准

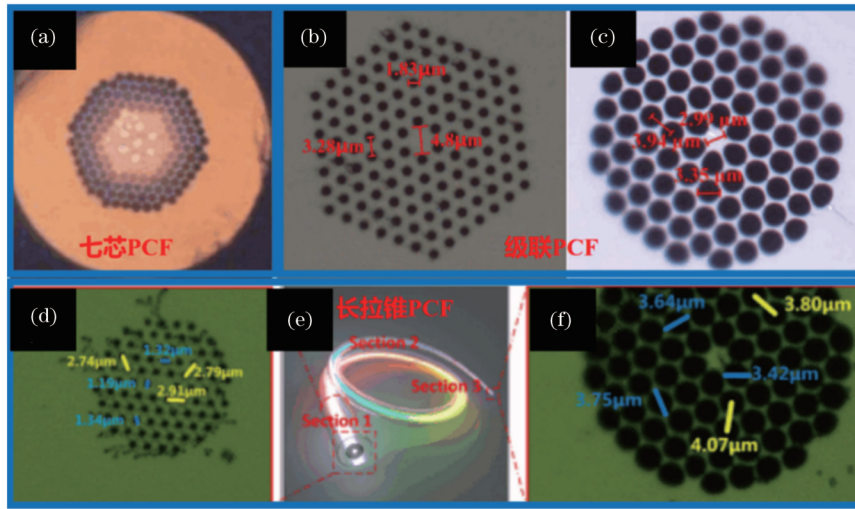


图 2 几种 PCF 的截面图。(a) 七芯 PCF^[28]; (b)~(c) 级联 PCF^[29]; (d)~(f) 长拉锥 PCF^[30]

Fig. 2 Cross section images of several PCFs. (a) Seven-core PCF^[28]; (b)~(c) cascaded PCFs^[29]; (d)~(f) long-tapered PCFs^[30]

相位匹配四波混频(又称几何参数不稳定性, GPI)边带^[35]。这些特性使得 GRINMMF 可以支持高亮度可见光超连续谱产生。

基于 GRINMMF 超连续谱的首次报道是通过级联拉曼效应实现的,美国威斯康星大学 Pourbeyram 等^[36]通过在一段 GRINMMF 中注入一个 532 nm 的脉冲获得了光谱覆盖 532~1750 nm 的超连续谱输出。随着 GRINMMF 中的 GPI 效应在 2016 被首次实验报道^[35], 研究者们发现,通过采用 1 μm 波段的高峰值脉冲光去泵浦 GRINMMF,可见光波段会产生一系列的分立峰。利用该效应,研究者们通过采用高峰值的泵浦激光器在该光纤中实现了可以覆盖到可见光波段的超连续谱输出^[34, 37]。上述报道的泵浦激光耦合进光纤的方式均为空间光耦合,直至 2022 年才首次实现全光纤化^[38]。在 GRINMMF 中,短波拓展的宽度与泵浦峰值功率成正相关^[37]。为了在该光纤中获得高功率宽带的可见光超连续谱输出,需要同时提高泵浦的平均功率和峰值功率,因此需要对泵浦系统进行优化设计。2023 年,中国科学院西安光学精密机械研究所张挺团队^[39]通过对系统进行设计,在基于一段四模的 GRINMMF 中获得了 30 W 的超连续谱输出,光谱覆盖 400~2400 nm。本文课题组从 2022 年开始研究基于该光纤的全光纤化可见光超连续谱功率提升^[40]。图 3(a)是基于 GRINMMF 的高功率全光纤可见光超连续谱产生的实验装置示意图。为了获得较高的峰值功率从而实现有效的短波拓展,主放大器采用了大纤芯尺寸的高掺杂增益光纤(30/250 μm, 掺杂系数为 20 dB/m@ 976 nm)。图 3(b)是输出光谱随功率的演化图,为了能更清楚地了解该光纤中影响超连续谱短波拓展的因素,横坐标的波长被转换成频率。图中的虚线是模拟的 GPI 效应对应的位置。可以看出,随着功率增加, GPI 边带越来越多,最终在最大泵浦功率

下,约有 8 个 GPI 边带产生。这些边带结合其他非线性效应如孤子相关的非线性效应和受激拉曼散射等,将可见光和近红外波段的光谱连接起来,从而形成一个平坦的超连续谱。可以看出 GPI 效应在光谱的短波方向拓展中起着非常重要的作用。最终,在泵浦峰值功率和平均功率分别为 162 kW 和 81 W 下,超连续谱的输出平均功率达 40.6 W,光谱范围为 450~2400 nm,如图 3(c)所示,其中插图是测量的不同波长下以及总的超连续谱的输出光斑,可以看出,由于该多模光纤具有光束自清洁效应,使得其所有波长处的光斑均呈现出近高斯的形状。为了进一步探索其功率提升的潜力,继续增加一级基于 30/600 μm 的光纤放大器并进行了参数的优化设置,系统结构如图 4(a)所示。在泵浦 GRINMMF 的峰值功率和平均功率分别为 72 kW 和 620 W 的情况下,最终获得了输出平均功率为 204 W、光谱范围为 580~2400 nm 的可见光超连续谱,输出光谱如图 4(b)所示。该实验证明了该类型的光纤具有高功率承载的能力,后续可以通过在泵浦激光器的主放大器中采用更大纤芯尺寸的增益光纤来进一步提升输出功率水平。

可见光波段超连续谱的产生通常需要特殊的光纤,而对于高功率近红外波段超连续谱产生而言,最有效的一种方法是采用光纤放大器直接输出超连续谱。该方法不存在泵浦光纤与非线性光纤熔接困难的问题。基于光纤放大器的单波长光纤激光器早已突破了 10 kW^[41],因此基于光纤放大器直接输出超连续谱的方案在功率提升方面极具潜力。该方案在 2007 被首次提出^[42],随后功率陆续被提升到了 70 W 和 200 W,对应的光谱范围分别为 1064~1700 nm 和 1064~2200 nm^[43-44]。在这些文献中,功率提升和光谱展宽均在增益光纤中实现,这给增益光纤带来了巨大的热负载,使得功率提升越来越困难。2023 年,本文课题

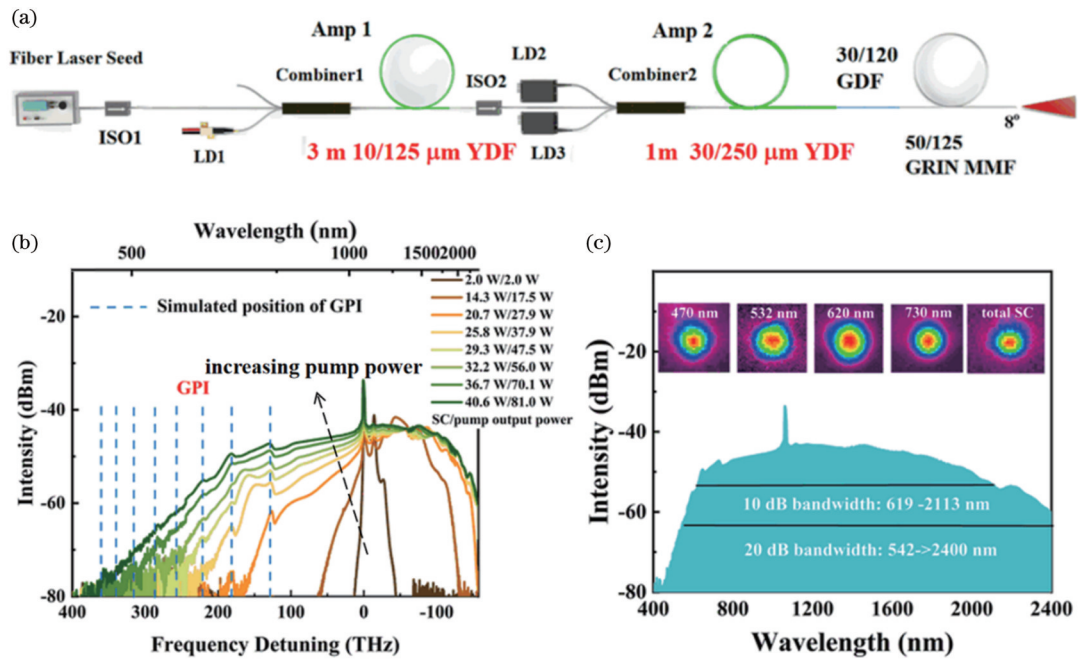


图 3 基于 GRINMMF 的 40 W 可见光超连续谱产生^[40]。(a) 实验装置图；(b) 光谱随泵浦功率的演化图（横坐标为频率）；(c) 最终输出的光谱，其中插图分别为 730、620、532、470 nm 波长和超连续谱总的近场光斑图
 Fig. 3 40 W visible supercontinuum generation based on GRINMMF^[40]. (a) Experimental setup; (b) spectral evolution with pump power using frequency as x -coordinate; (c) final output spectrum. Insets show near-field beam profiles of total and filtered supercontinuum at wavelengths of 730, 620, 532, and 470 nm, respectively

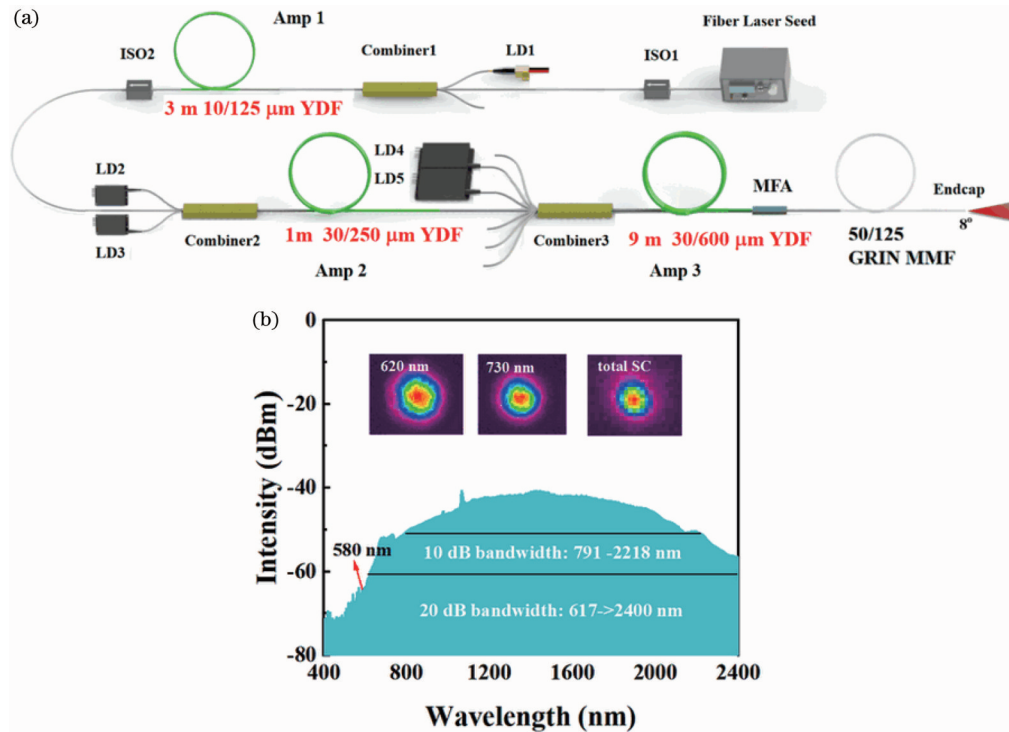


图 4 基于 GRINMMF 的 204 W 可见光超连续谱产生^[40]。(a) 实验装置图；(b) 最终输出的光谱，其中插图分别为 730 nm 和 620 nm 波长以及超连续谱总的近场光斑图
 Fig. 4 204 W visible supercontinuum generation based on GRINMMF^[40]. (a) Experimental setup; (b) final output spectrum. Insets show near-field beam profiles of total and filtered supercontinuum at wavelengths of 730 nm and 620 nm, respectively

组^[45]通过优化方案,将近红外超连续谱光源的输出功率进一步提升到了 714 W,光谱范围为 690~2350 nm,

这是基于该方案目前公开报道的最高的功率水平和最宽的光谱范围,实验方案如图 5(a)所示。在该方案

中,最后一级采用了大纤芯的增益光纤并将相应的被动光纤长度加长 20 m 用于分担部分由光谱展宽带来的热负载。图 5(b)和 5(c)分别显示了最后一级被动光纤不同长度下对输出超连续谱光谱和功率的影响,通过对比实验结果可知,在 20 m 的被动光纤长度下,输出光谱和输出功率基本处于相对较好的水平;此外,如果想要进一步提升输出功率就需要缩短被动光纤的

长度,而缩短被动光纤长度会使得光谱展宽不充分,为了使光谱充分展宽就需要进一步增加泵浦功率,从而导致增益光纤的热负载进一步增大。因此,进一步提升该方案的输出功率水平需要综合考虑这些影响因素,总体而言,该方案具有实现千瓦级超连续谱输出功率水平的潜力。

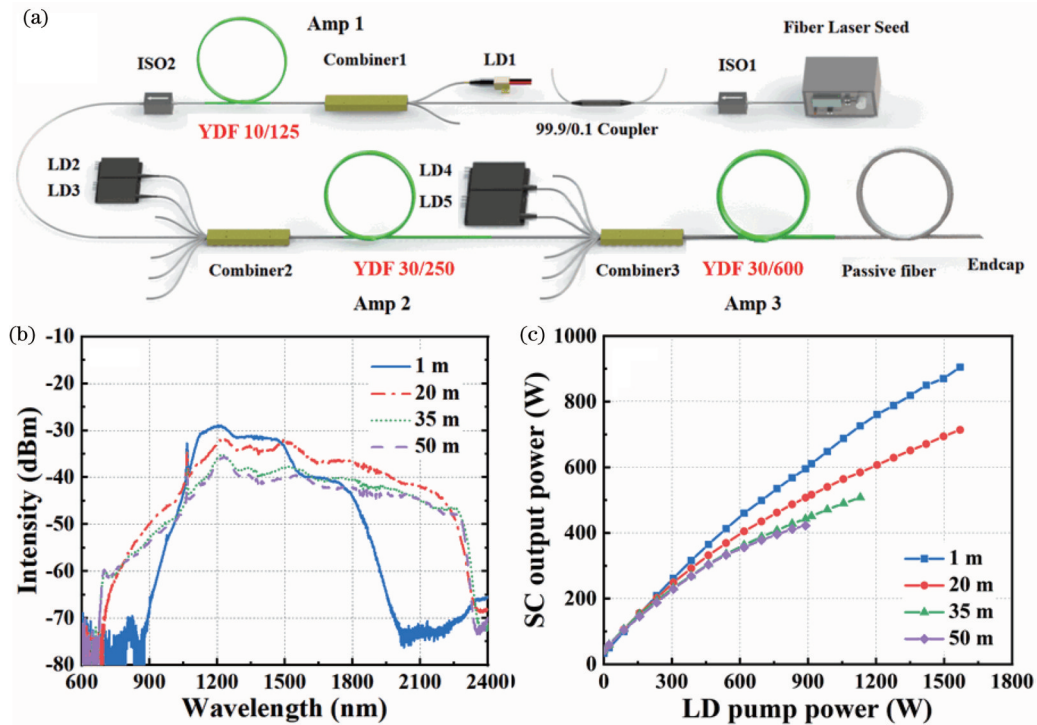


图 5 基于光纤放大器直接输出 714 W 近红外超连续谱^[45]。(a) 实验装置图;(b) 不同长度(1、20、35、50 m)下的最优超连续谱输出和(c) 超连续谱输出功率随泵浦功率的演化

Fig. 5 Direct output of 714 W near-infrared supercontinuum based on fiber amplifier^[45]. (a) Experimental setup; (b) optimal supercontinuum output and (c) supercontinuum output power versus pump power under different fiber lengths of 1, 20, 35, and 50 m

从上述几个比较有代表性的进展来看,对于 PCF 输出高功率可见光波段的超连续谱而言,优化设计 PCF 的结构参数仍是目前最有效的方法。然而,PCF 与泵浦激光器尾纤的模场失配带来的热负载,以及 PCF 较小的纤芯直径是该方案进一步功率提升的限制。对于 GRINMMF 而言,其特性非常适合高功率可见光波段超连续谱产生,由于该种光纤仍处于起步阶段,所以功率提升和短波拓展水平目前还没有达到 PCF 输出超连续谱方案的水平,但该方案极具潜力,将来通过设计 GRINMMF 的折射率曲线、结构和掺杂浓度以及对泵浦光源的优化,有望实现更短波长、更高功率的可见光波段超连续谱输出。对于高功率近红外波段超连续谱而言,光纤放大器直接输出超连续谱仍然是首选方案,后续的发展除了进一步优化其输出光谱特性外,还应该聚焦在主放大器的热管理以及光纤长度、泵浦功率、种子源参数等这些影响因素的综合考量上面。

2.2 基于随机光纤激光器结构直接产生高功率超连续谱方案的研究进展

不同于传统的光纤激光器通过光学谐振腔来控制输出激光的特性,随机光纤激光器输出的激光不依赖于谐振腔,它是通过无序增益介质中的多次散射而形成随机分布式反馈,当反馈增益大于损耗时,实现激光输出。这种无谐振腔的光纤随机激光器具有结构更加简单、噪声更低、稳定性更好等优点^[46]。2009年,随机光纤激光器被首次报道^[47],随后便得到了广泛的关注。其中随机光纤激光器结构直接输出超连续谱方案继承了随机光纤激光器的优点,近几年来得到了快速发展。

2018年,电子科技大学饶云江团队的马瑞等^[48]首次对基于随机光纤激光器结构输出超连续谱进行了报道,实验结构如图 6(a)所示。实验采用一个 1365 nm 的拉曼激光器泵浦一段 16 km 长的真波光纤(TW)。一个中心波长位于泵浦波长一阶拉曼处(1461 nm)的光纤光栅提供点反馈从而形成一个半开腔的随机光纤

激光器。图 6(b)显示了在不同泵浦功率下输出的光谱演化,最终在 4 W 左右泵浦功率下,获得了 20 dB 光谱带宽、约 250 nm 的超连续谱输出。随后,该团队在

该结构的基础上增加了一段色散补偿光纤来增加随机分布式反馈,验证了反向输出的超连续谱具有更好的时域稳定性^[49]。

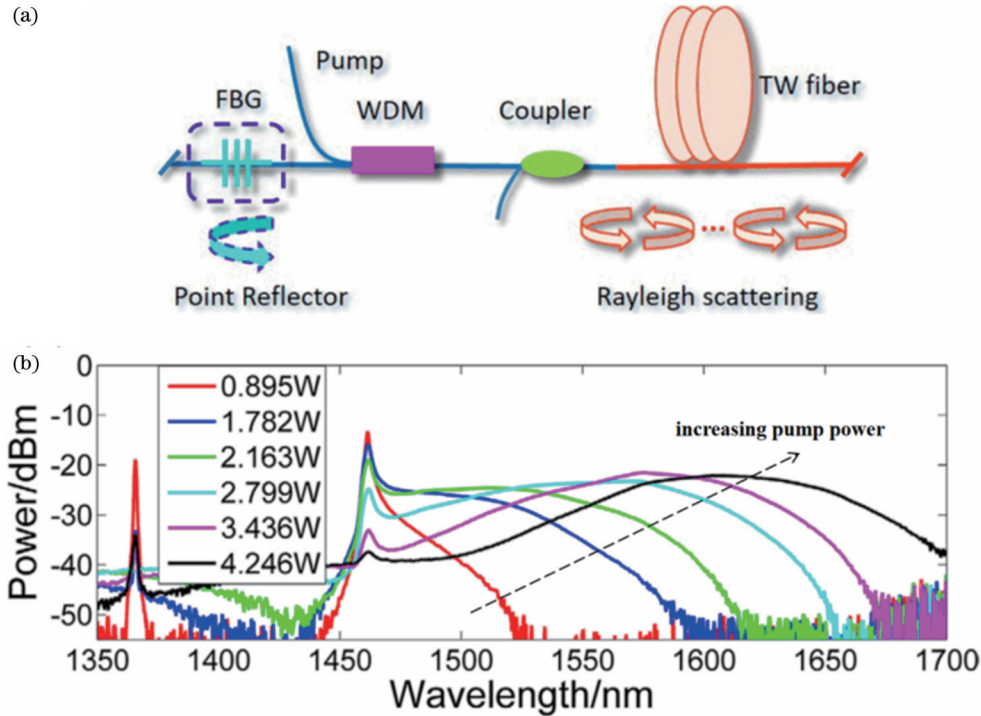


图 6 基于半开腔随机光纤激光器的超连续谱产生^[48]。(a) 结构示意图;(b) 输出光谱随泵浦功率的演化图

Fig. 6 Supercontinuum generation based on random fiber laser with half-open cavity^[48]. (a) Structure diagram; (b) output spectra evolution with pump power

随后研究者们采用了各种方法对泵浦激光器进行功率提升。2018年,印度纳米科学研究所 Arun 等^[50]采用 1117 nm 的掺镱光纤激光器并将泵浦功率提高到了 100 W,将光纤光栅的点反馈更换成平角的端面宽带反馈(反射率约 4%),将被动光纤更换成 2 km SMF28e,实验结构如图 7(a)所示。最终在 80 W 的泵浦功率下,获得了光谱范围为 880~1900 nm、输出功率为 30 W 的超连续谱,实验结果如图 7(b)所示。在此基础上,该课题组^[51]在 2020 年又提出了一种双波长功率组合的结构来进行功率提升,实验结构如图 8(a)所示。文中采用了两个独立掺镱光纤激光器(一个波长在 1117 nm,输出功率为 70 W;一个波长在 1064~1088 nm 之间可调,输出功率为 70 W),并且 SMF28e 光纤的长度被缩短到 1 km,在这种泵浦机制下,最终获得了输出功率为 70 W、光谱覆盖 850~1900 nm 的超连续谱输出,实验结果如图 8(b)所示。2022 年,中国科学院上海光学精密机械研究所冯衍团队的程鑫等^[52]通过采用掺镱光纤放大器对种子激光进行功率放大,进一步将泵浦源的功率提升到了 300 W,最终在泵浦 600 m SMF28e 中获得了输出平均功率为 130 W、光谱范围为 852~2055 nm 的超连续谱输出,实验结构及输出结果分别如图 9(a)和 9(b)所示,其中输出的光谱显

示的是两种不同种子源下输出的超连续谱。

上述半开腔结构的随机光纤激光器输出超连续谱的功率提升均受限于波分复用器(WDM)的高功率承受能力。因此,2022 年,清华大学肖起榕团队^[53]摒弃了 WDM 的使用,并提出了一种多波长泵浦的全开腔随机光纤激光器结构,实验结构如图 10(a)所示。他们将放大后的拉曼光纤振荡器和掺镱光纤振荡器同时注入到 415 m 的 46/400 μm 掺镱双包层光纤(GDF)中,在一个全开腔的随机光纤激光器中获得输出功率为 3 kW、光谱范围为 925~1862 nm 的超连续谱输出,实验结果如图 10(b)所示。该实验表明,基于随机激光器结构输出超连续谱方案具有极大的功率提升潜力。

从 2019 年开始,本文课题组对基于随机光纤激光器结构输出超连续谱方案也进行了一系列的研究,旨在一个更简单、更高效的结构中实现宽带高功率超连续谱输出。2019 年,本文课题组陈兰剑等^[54]提出了一种新颖的随机光纤激光器结构,如图 11(a)所示。实验中利用宽谱光纤反射镜提供左侧的反馈,1 km GDF 提供随机分布式反馈,位于掺镱光纤(YDF)增益带宽内的光在这两种反馈形成的反馈回路中被逐渐放大,从而降低了超连续谱产生的阈值。最终,在仅 976 nm

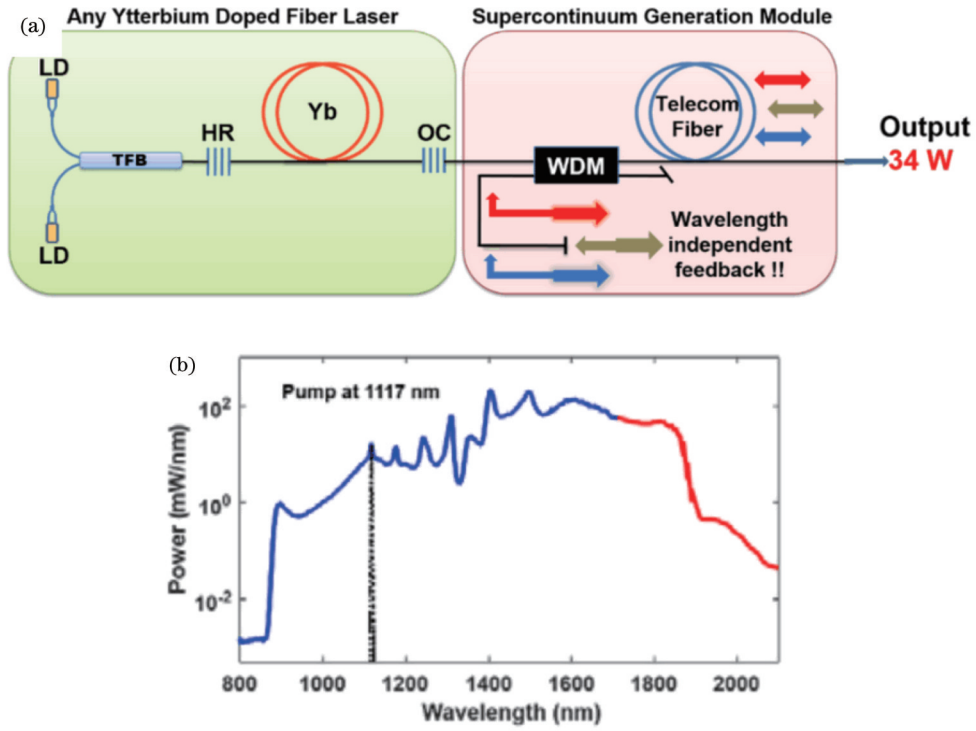


图 7 基于半开腔随机光纤激光器的 34 W 超连续谱产生^[50]。(a) 结构示意图;(b) 输出光谱

Fig. 7 34 W supercontinuum generation based on random fiber laser with half-open cavity^[50]. (a) Structure diagram; (b) output spectrum

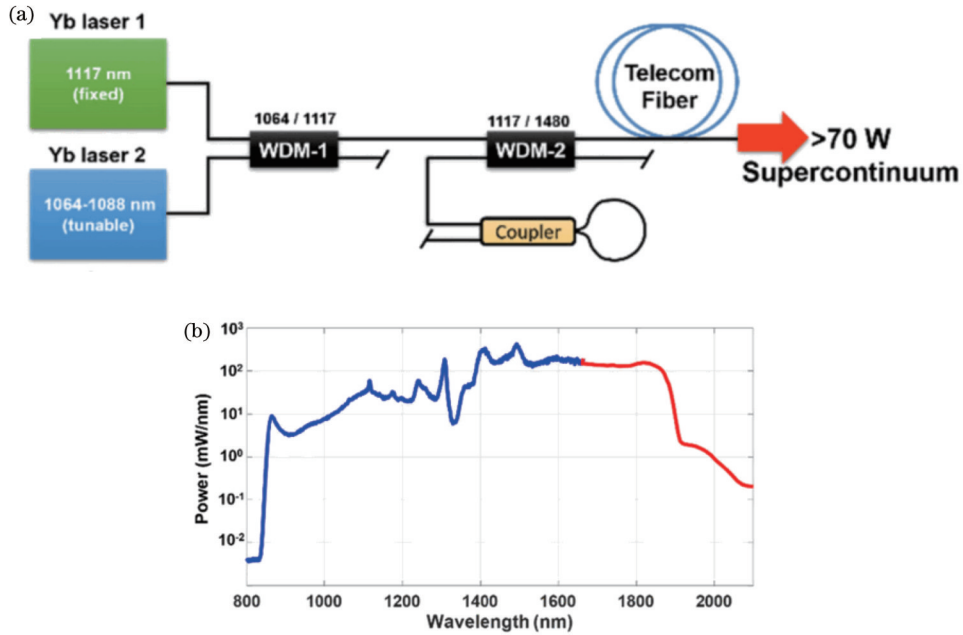


图 8 基于双泵浦波长在随机光纤激光器中产生 70 W 超连续谱^[51]。(a) 结构示意图;(b) 输出光谱

Fig. 8 70 W supercontinuum generation in random fiber laser with two pump wavelengths^[51]. (a) Structure diagram; (b) output spectrum

激光二极管泵浦的条件下,在 1 km 的 GDF 中实现了光谱覆盖 600~1700 nm、输出功率为 3.4 W 的超连续谱输出,这是首次基于随机光纤激光器实现了可见光至近红外波段超连续谱输出,光谱随功率演化如图 11(b)所示。此外,本文课题组^[55]还分析了 YDF 的位置和放大自发辐射泵浦源中的寄生激光对输出光谱特

性的影响,实验结果表明,将 YDF 置于随机光纤激光器的腔内,并采用含有寄生激光的放大自发辐射源作为泵浦,有利于激发高阶斯托克斯光从而促进超连续谱的产生。

为了进一步改善其光谱宽度和平坦度,2020 年,本文课题组何九如等^[56]将 GDF 更换为一段 PCF,得益

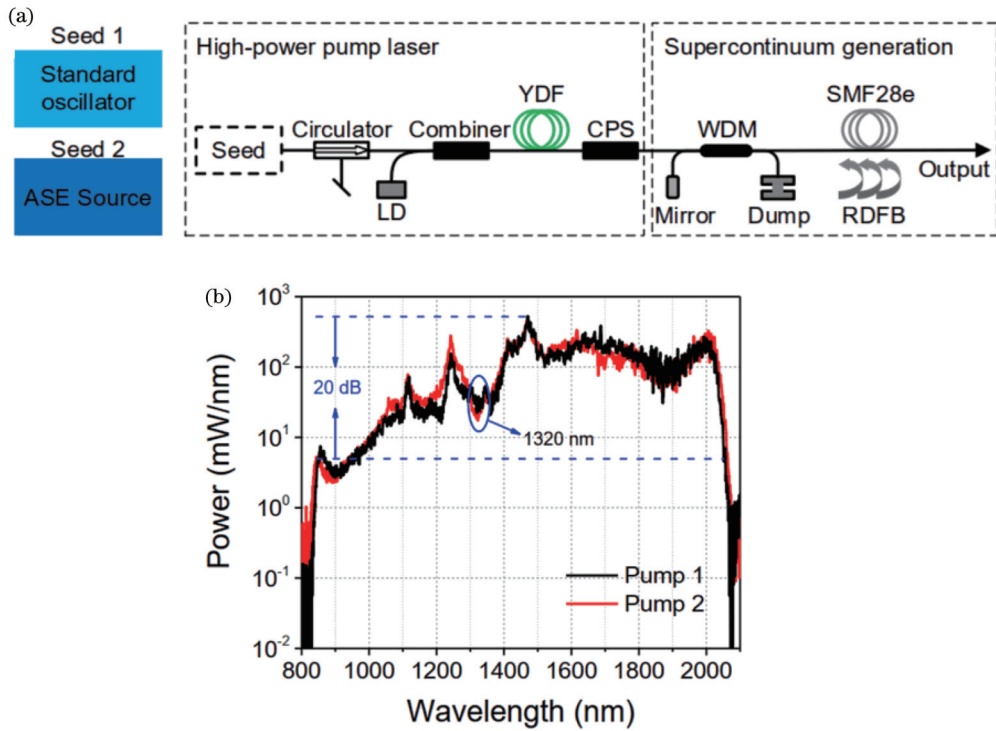


图 9 基于光纤放大器在半开腔随机光纤激光器中产生 130 W 超连续谱^[52]。(a) 结构示意图;(b) 输出光谱

Fig. 9 130 W supercontinuum generation in random fiber laser with half-open cavity based on fiber amplifier^[52]. (a) Structure diagram; (b) output spectrum

于 PCF 卓越的非线性光谱拓展能力和有效的随机分布式反馈,最终获得了光谱覆盖 400~2300 nm 的宽带平坦可见光至近红外波段超连续谱输出,这是首次报道的基于 PCF 随机光纤激光器输出超连续谱,光谱随功率的演化如图 12 所示。2021 年,本文课题组^[57]将图 11(a)的随机光纤激光器结构更换为保偏的随机光纤激光器结构来改善输出的超连续谱。图 13 所示为非保偏结构和保偏结构随机光纤激光器输出超连续谱的对比图,光谱范围分别为 700~1700 nm 和 600~1900 nm。两种结构输出的光谱差异在于保偏结构使得泵浦功率大部分集中在一个轴上,在相同的泵浦功率下,具有线偏振的 GDF 非线性相互作用会得到有效增强,从而输出超连续谱具有更好的光谱带宽和平坦度。这是基于保偏随机光纤激光器结构输出超连续谱的首次公开报道。为了进一步提升输出功率,本文课题组^[58]对实验方案进行了优化设计,采用大纤芯 25/400 μm 的 YDF 和 GDF 替换小芯径 YDF 和 GDF,实验结构和实验结果分别如图 14(a)和 14(b)所示,其中合束器输入信号端切平角提供宽带反馈。可以看出,基于如此简单的结构,超连续谱输出功率已经提升到 289 W,表明该方案在超连续谱功率提升方面充满了巨大潜力。

从上述比较有代表性的文献报道中可以看出,虽然该方案从首次报道到现在只有四五年时间,但在输出超连续谱功率提升方面得到了快速发展并实现了巨大突破。基于 WDM 器件的半开腔随机光纤激光器输

出超连续谱的功率提升受限于该器件的高功率承受能力。通过摒弃 WDM,在一个放大的多波长全开腔随机光纤激光器中(两个振荡器种子+一级放大器)实现了高达 3 kW 的超连续谱激光输出,但该结构相对于随机光纤激光器方案中的其他结构而言稍显复杂。基于平角的半开腔反馈结构简单,功率提升效果显著,但光谱性能有待进一步优化。

2.3 基于多路非相干合成产生高功率超连续谱方案的研究进展

由于受热负载、非线性效应等因素的限制,单根光纤输出的激光功率存在上限。为了获得更高功率的光纤激光输出,对中等功率的光纤激光光束进行合成是一个有效的解决方案。不同于单波长的功率合束,超连续谱的功率合束要求超宽带的光能够高效率地通过,因此该方案实现高功率全光纤超连续谱的关键在于宽谱功率合束器件。商业化的单波长合束器功率早已达到了 20 kW^[59],因此该方案相对于单路超连续谱的功率提升具有输出更高功率的潜力。

2015 年,本文课题组周航等^[60]使用 3×1 宽带光纤功率合束器实现了输出功率为 202.2 W 的近红外超连续谱输出,光谱范围为 1060~1900 nm,合束效率高达 96%。输入光纤纤芯和包层尺寸为 30/125 μm ,数值孔径为 0.08,输出光纤纤芯和包层尺寸为 100/260 μm ,数值孔径为 0.2,光纤合束器结构如图 15(a)所示。合束器的锥区长度对耦合效率影响较大,当光纤进行拉锥时,光纤的纤芯直径会越来越小,从而导致

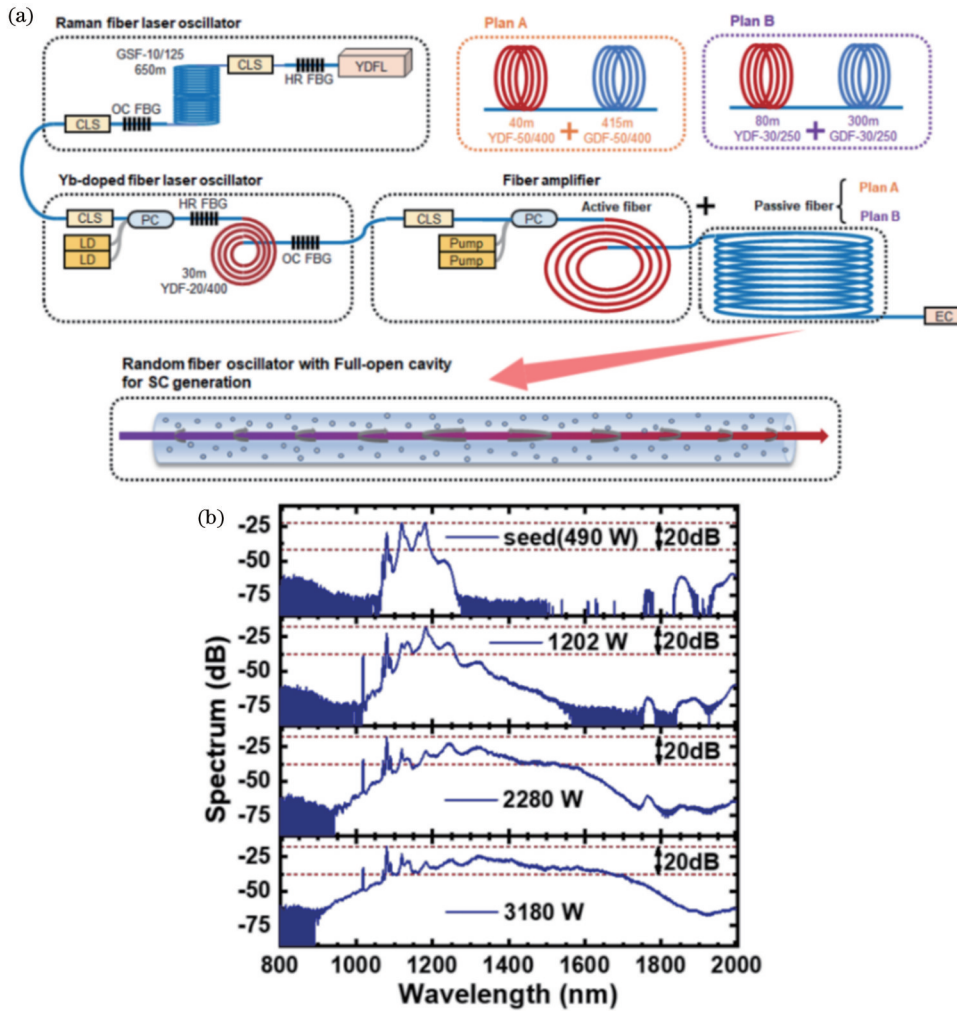


图 10 全开腔随机光纤激光器中 3 kW 超连续谱产生^[53]。(a) 结构示意图；(b) 输出光谱随着输出功率的演化

Fig. 10 3 kW supercontinuum generation in random fiber laser with full-open cavity^[53]. (a) Structure diagram; (b) output spectral evolution with output power

光从锥区泄漏出去降低传输效率。图 15(b)所示为模拟的传输效率与拉锥长度之间的关系,其中纵坐标表示的是拉锥后/拉锥前的功率比,当光锥区长度控制在 1~4 mm 时,传输效率变化不大,当光锥区长度超过 4 mm 时,三个波长的功率比均开始下降,且长波处下降得更快。因此,通过模拟可以得出比较合适的锥区长度约为 4 mm。随后,本文课题组^[61]又设计了一个 7×1 的宽带光纤功率合束器,将合束后近红外超连续谱光源的输出功率进一步提升至 802 W,光谱覆盖 1060~1700 nm,合束效率约 95%。该结果表明,采用非相干合束的方法可以获得高功率超连续谱光源。该方案相对于单个放大器中产生高功率超连续谱具有如下优势:第一,将几路较小模场面积光纤的输出光通过功率合束器耦合到一根模场面积较大的光纤中,在同等输出功率水平的前提下,合束前每一路放大器的输出功率可以控制在热管理能够承受的水平,这样就总的热管理压力化解到若干个小的热管理系统中,方便管理;第二,合束器的输出光纤是非掺杂的无源光

纤,不会产生由于非线性效应和增益放大而带来的多余热量,因此该部分光纤的热管理压力也不大,并且可以传输更高功率的激光,极大地提高了系统输出总的功率水平。

2022 年,北京工业大学孙畅团队^[62]通过设计一个 7×1 的超连续谱光纤合束器实现了 143.4 W 高功率白光超连续谱输出,光谱范围为 450~1700 nm,合束效率高达 97.4%。基于绝热锥变和亮度守恒准则,对于单根输入拉锥光纤而言,只有当拉锥长度大于模拟的临界锥区长度时,其传输的损耗才相对较低。从图 16 中可以看出:第一,在固定的拉锥比 r_1/r_0 [输出 (r_1) 和输入 (r_0) 纤芯直径比] 下,只要长波的光能低损耗输出,所有波长的光均能低损耗输出,因此拉锥长度越长越好,但过长的拉锥长度不利于器件的稳定性,因此只需略微超过即可;第二,对于固定的拉锥长度而言,也是主要考虑长波处低损耗输出,因此需要更高的拉锥比即可保证整个宽带波长低损耗输出,然而拉锥后的光纤越粗会使得后续熔接到输出光纤的损耗越

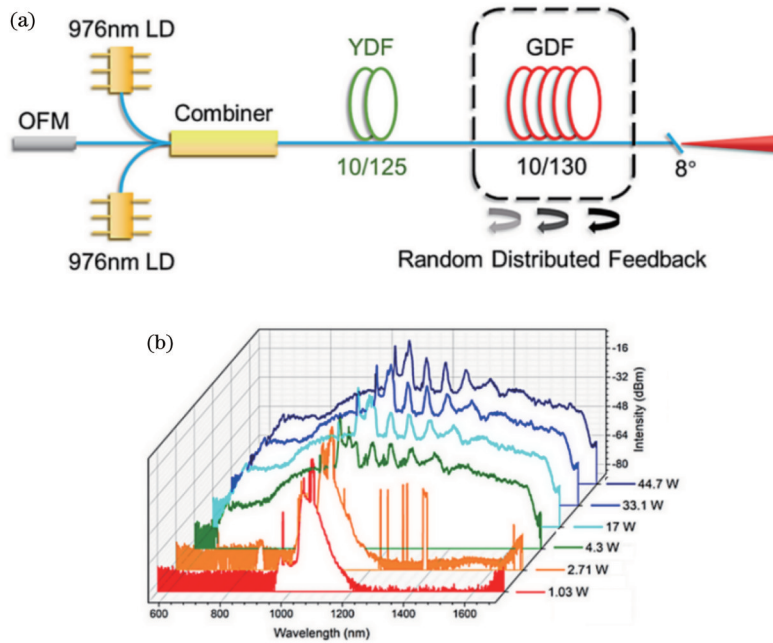


图 11 半开腔随机光纤激光器中的超连续谱产生^[54]。(a) 结构示意图; (b) 输出光谱随着泵浦功率的演化图

Fig. 11 Supercontinuum generation in random fiber laser with half-open cavity^[54]. (a) Structure diagram; (b) output spectral evolution with pump power

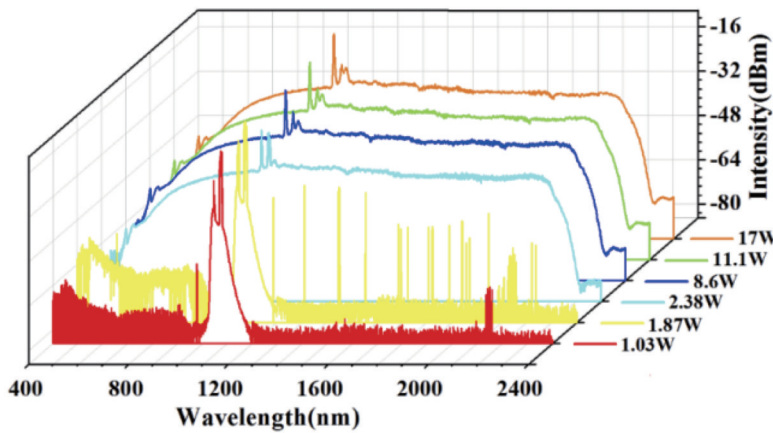


图 12 基于 PCF 的半开腔随机光纤激光器输出超连续谱随泵浦功率的演化^[56]

Fig. 12 Output supercontinuum generated in random fiber laser with half-open cavity based on PCF versus pump power^[56]

大。因此,合束器的锥区设计需要综合考虑这些因素。

由上述几个比较有代表性的文献报道来看,相对于近红外超连续谱功率合束而言,可见光超连续谱功率合束在合束器制作方面会有优势,因此该方案更有利于可见光超连续谱的功率提升。目前报道的可见光超连续谱合束功率较低的原因可能有两点:1)单路可见光超连续谱输出功率较低,当单路采用 PCF 获得可见光超连续谱时,PCF 在后续熔接到合束器上也存在着一定的困难;2)目前报道的单路可见光超连续谱光谱覆盖范围是从可见光到近红外波段,长波处较高的耦合损耗将会降低宽带合束器的合束效率。今后可以通过优化单路超连续谱的可见光功率占比来进一步

提高可见光超连续谱的功率合束效率。

3 总结与展望

高功率可见光至近红外波段超连续谱光源在近几年的时间里得到了快速的发展,基于 MOPA 结构的可见光超连续谱输出功率已经突破 300 W,基于随机光纤激光器结构直接输出近红外超连续谱的功率已经突破 3 kW,新型光纤和新方案的涌现为高功率超连续谱的发展注入了新的活力。

对于高功率可见光超连续谱而言,非线性光纤结构的优化设计仍然是其主旋律。目前,PCF 仍然是高功率可见光超连续谱产生的主要非线性介质。尽管 PCF 的模场直径和结构一直在优化,相对而言,其模

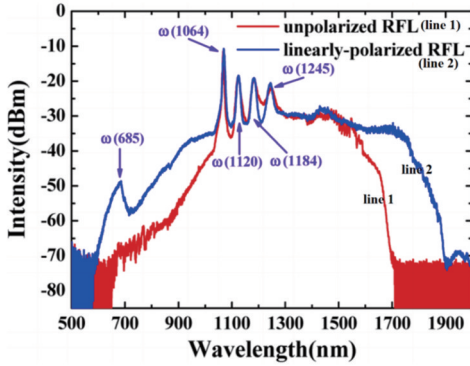


图 13 基于保偏与非保偏半开腔随机光纤激光器输出超连续谱的对比图^[57]

Fig. 13 Comparison of supercontinuum generation in random fiber laser with half-open cavity with and without polarization maintaining^[57]

场直径仍然较小,严重制约着其输出超连续谱功率的进一步提升。随着 GRINMMF 的进一步发展,相信这种具有较大纤芯尺寸、光束自清洁效应和独特的短波拓展机制的光纤能推动高功率可见光超连续谱的进一步发展。目前该光纤仍处于起步发展阶段,其产生的可见光超连续谱暂时比不上基于 PCF 输出超连续谱方案的效果。未来可以通过对该光纤的折射率曲线、掺杂浓度以及结构进行优化设计以及改进泵浦光源来进一步提升其输出超连续谱的功率和光谱性能。此外,目前报道的高功率可见光超连续谱大多数是基于

MOPA 结构实现的,而多路非相干合成方案在可见光超连续谱功率提升方面也极具潜力,未来可以通过优化设计宽带功率合束器,进一步提升输出可见光超连续谱的功率水平。

对于高功率近红外超连续谱而言,基于 MOPA 结构输出近红外超连续谱功率方案尽管结构较为复杂,但在保证泵浦平均功率的前提下能提供较高的泵浦峰值功率,产生超连续谱的光谱性能较好;而基于随机光纤激光器结构直接输出超连续谱的方案,其结构简单,产生的超连续谱输出功率较高,在单路的超连续谱光源功率提升中最具潜力。由于该方案目前还处于起步阶段,有些内在的物理机理尚未完全清晰,相信未来该方案能够在理论和实验上实现更大的发展和突破;对于多路非相干合成方案而言,该方案有着突破超连续谱输出功率极限的潜力,但由于市场需求较小以及国内外投入的科研力量偏少,导致该方案目前发展相对较为缓慢,但未来当单路光纤输出超连续谱的功率接近极限时,该方案是进一步打破输出功率天花板的重要手段。

本文就上述三种技术方案挑选了国内外一些有代表性的研究成果进行了介绍,并重点介绍了近几年国防科技大学在高功率超连续谱方面的研究进展。随着光纤拉制工艺水平的提升以及半导体激光器输出功率的提升,以及超连续谱光源在光电对抗、光学相干层析成像和高光谱激光雷达等领域的推广应用,相信未来高功率超连续谱光源的输出功率水平会持续提升,与

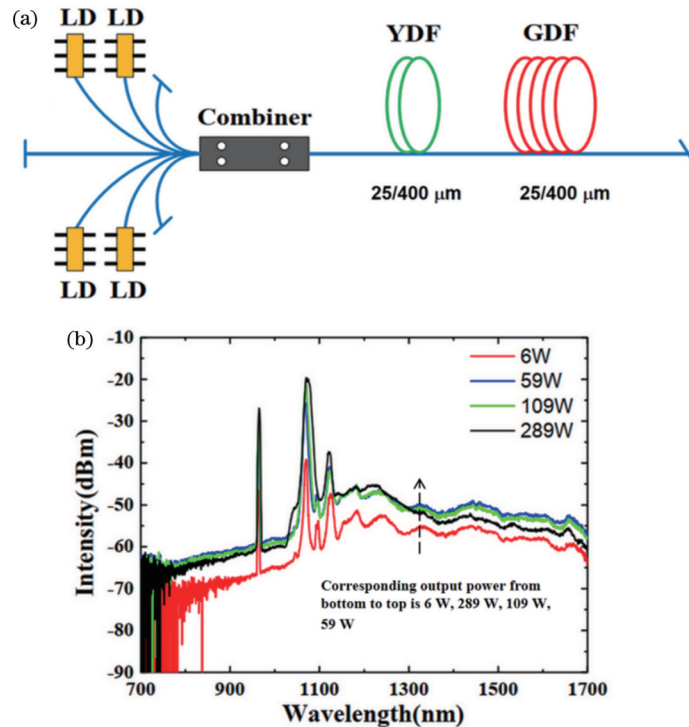


图 14 基于光纤端反馈的半开腔随机光纤激光器的 289 W 超连续谱产生^[58]。(a) 结构示意图; (b) 输出光谱随着输出功率的光谱演化

Fig. 14 289 W supercontinuum generation in random fiber laser with half-open cavity based on fiber end feedback^[58]. (a) Structure diagram; (b) output spectral evolution with output power

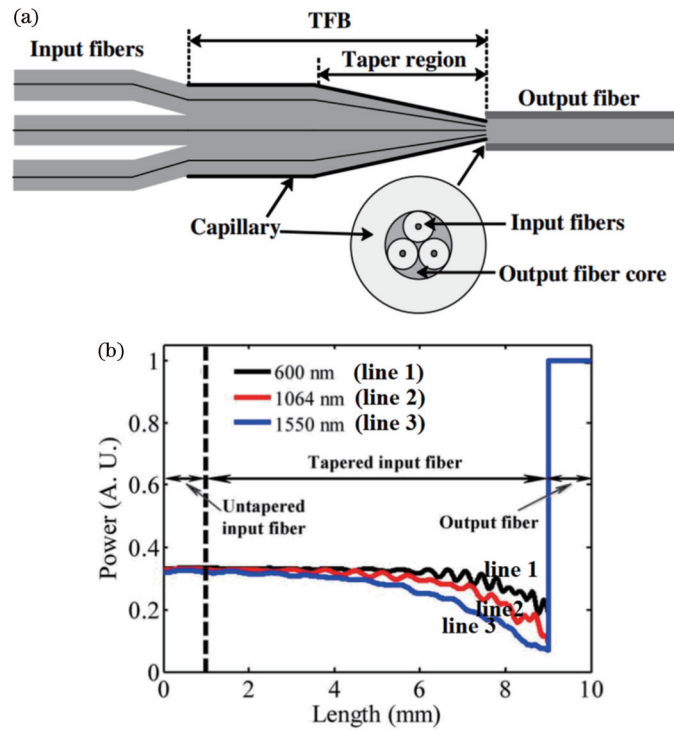


图 15 近红外超连续谱的功率合束^[60]。(a) 合束器示意图；(b) 模拟的不同波长处的传输效率与拉锥长度之间的关系
Fig. 15 Power combination of near-infrared supercontinuum^[60]. (a) Schematic of combiner; (b) simulated relationship between transmission efficiency and length of taper at different wavelengths

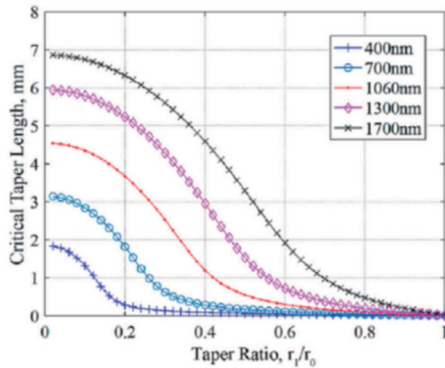


图 16 不同波长处的临界拉锥长度和拉锥比之间的关系^[62]
Fig. 16 Relationships between critical taper length and taper ratio at different wavelengths^[62]

单波长高功率光纤激光器的差距会越来越小。

参 考 文 献

[1] Alfano R R. The supercontinuum laser source: the ultimate white light[M]. 4th ed. New York: Springer, 2016: 434.
 [2] Dudley J M, Taylor J R. Supercontinuum generation in optical fibers[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2010.
 [3] Xie X H, Deng Y P, Johnson S L. Compact and robust supercontinuum generation and post-compression using multiple thin plates[J]. High Power Laser Science and Engineering, 2021, 9(4): e66.
 [4] 王莹莹, 张楠, 张培晴, 等. 全正色散双包层拉锥 Ge-As-Se-Te 光纤中的宽带相干超连续谱产生[J]. 中国激光, 2022, 49(1): 0101010.
 Wang Y Y, Zhang N, Zhang P Q, et al. Broadband and

coherent supercontinuum generation in all-normal-dispersion double-clad Ge-As-Se-Te fiber taper[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(1): 0101010.
 [5] 张静, 蔡玉汝, 黄勤清, 等. 基于平坦相干超连续谱的近红外光梳光谱技术[J]. 中国激光, 2021, 48(7): 0711003.
 Zhang J, Cai Y R, Huang Q Q, et al. Near-infrared comb spectroscopy technology based on flat coherent supercontinuum [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(7): 0711003.
 [6] Gosnell T R, Taylor A J, Greene D P. Supercontinuum generation at 248 nm using high-pressure gases[J]. Optics Letters, 1990, 15(2): 130-132.
 [7] Jimbo T, Caplan V L, Li Q X, et al. Enhancement of ultrafast supercontinuum generation in water by the addition of Zn²⁺ and K⁺ cations[J]. Optics Letters, 1987, 12(7): 477-479.
 [8] Alfano R R, Shapiro S L. Emission in the region 4000 to 7000 Å via four-photon coupling in glass[J]. Physical Review Letters, 1970, 24(11): 584-587.
 [9] Yang L Y, Yang Y K, Zhang B, et al. Record power and efficient mid-infrared supercontinuum generation in Germania fiber with high stability[J]. High Power Laser Science and Engineering, 2022, 10(6): e36.
 [10] Sierro B, Hänzi P, Spangenberg D, et al. Reducing the noise of fiber supercontinuum sources to its limits by exploiting cascaded soliton and wave breaking nonlinear dynamics[J]. Optica, 2022, 9(4): 352-359.
 [11] Woyessa G, Kwarkye K, Dasa M K, et al. Power stable 1.5-10.5 μm cascaded mid-infrared supercontinuum laser without thulium amplifier[J]. Optics Letters, 2021, 46(5): 1129-1132.
 [12] Genier E, Grelet S, Engesholm R D, et al. Ultra-flat, low-noise, and linearly polarized fiber supercontinuum source covering 670 - 1390 nm[J]. Optics Letters, 2021, 46(8): 1820-1823.
 [13] 研制用作都市内作战的微型航空器[J]. 航天电子对抗, 1997, 13(4): 65.
 Development of micro and small aircraft for urban operations[J].

- Aerospace Electronic Warfare, 1997, 13(4): 65.
- [14] Manninen A, Kääriäinen T, Parviainen T, et al. Long distance active hyperspectral sensing using high-power near-infrared supercontinuum light source[J]. Optics Express, 2014, 22(6): 7172-7177.
- [15] Yamanaka M, Kawagoe H, Nishizawa N. High-power supercontinuum generation using high-repetition-rate ultrashort-pulse fiber laser for ultrahigh-resolution optical coherence tomography in 1600 nm spectral band[J]. Applied Physics Express, 2016, 9(2): 022701.
- [16] Barrick J, Doblas A, Gardner M R, et al. High-speed and high-sensitivity parallel spectral-domain optical coherence tomography using a supercontinuum light source[J]. Optics Letters, 2016, 41(24): 5620-5623.
- [17] Hakala T, Suomalainen J, Kaasalainen S, et al. Full waveform hyperspectral LiDAR for terrestrial laser scanning[J]. Optics Express, 2012, 20(7): 7119-7127.
- [18] Lamb R A. A review of ultra-short pulse lasers for military remote sensing and rangefinding[J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7483: 748308.
- [19] 杨林永, 张斌, 侯静. 高功率 3~5 微米波段超连续谱光纤激光研究进展[J]. 中国激光, 2022, 49(1): 0101001.
Yang L Y, Zhang B, Hou J. Progress on high-power supercontinuum laser sources at 3-5 μm [J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(1): 0101001.
- [20] 杨未强, 宋锐, 韩凯, 等. 超连续谱激光光源研究进展[J]. 国防科技大学学报, 2020, 42(1): 1-9.
Yang W Q, Song R, Han K, et al. Research progress of supercontinuum laser source[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2020, 42(1): 1-9.
- [21] 侯静, 陈胜平, 陈子伦, 等. 高功率超连续谱光源研究进展与关键技术分析[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(8): 080010.
Hou J, Chen S P, Chen Z L, et al. Recent developments and key technology analysis of high power supercontinuum source[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(8): 080010.
- [22] Bian Y X, Jiao K R, Wu X C, et al. Utilizing phase-shifted long-period fiber grating to suppress spectral broadening of a high-power fiber MOPA laser system[J]. High Power Laser Science and Engineering, 2021, 9(3): e39.
- [23] Ma P F, Xiao H, Meng D R, et al. High power all-fiberized and narrow-bandwidth MOPA system by tandem pumping strategy for thermally induced mode instability suppression[J]. High Power Laser Science and Engineering, 2018, 6(4): e57.
- [24] Hui Z Q, Zhang X L, Xu W S, et al. 500-nm broadband light generation in highly nonlinear dispersion shifted fiber by soliton laser[J]. Optics & Laser Technology, 2023, 157: 108712.
- [25] Chai T, Li X H, Guo P L. Investigation of mid-infrared parabolic pulse evolution in a mode-locked Er-doped fiber laser based on the nonlinear polarization rotation technique[J]. Journal of Optics, 2019, 21(2): 025501.
- [26] Li X H, Huang X W, Hu X C, et al. Recent progress on mid-infrared pulsed fiber lasers and the applications[J]. Optics & Laser Technology, 2023, 158: 108898.
- [27] Dudley J M, Taylor J R. Ten years of nonlinear optics in photonic crystal fibre[J]. Nature Photonics, 2009, 3(2): 85-90.
- [28] Qi X, Chen S P, Li Z H, et al. High-power visible-enhanced all-fiber supercontinuum generation in a seven-core photonic crystal fiber pumped at 1016 nm[J]. Optics Letters, 2018, 43(5): 1019-1022.
- [29] Zhang H Y, Li Y, Yan D L, et al. All-fiber high power supercontinuum generation by cascaded photonic crystal fibers ranging from 370 nm to 2400 nm[J]. IEEE Photonics Journal, 2020, 12(2): 7101608.
- [30] Zhang H Y, Li F Y, Liao R Y, et al. Supercontinuum generation of 314.7 W ranging from 390 to 2400 nm by tapered photonic crystal fiber[J]. Optics Letters, 2021, 46(6): 1429-1432.
- [31] Liu Z W, Wright L G, Christodoulides D N, et al. Kerr self-cleaning of femtosecond-pulsed beams in graded-index multimode fiber[J]. Optics Letters, 2016, 41(16): 3675-3678.
- [32] Mondal P, Varshney S K. Experimental observation of Kerr beam self-cleaning in graded-index multimode fiber from higher-order mode to fundamental mode[J]. Optical Fiber Technology, 2021, 65: 102587.
- [33] Krupa K, Tonello A, Shalaby B M, et al. Spatial beam self-cleaning in multimode fibres[J]. Nature Photonics, 2017, 11(4): 237-241.
- [34] Krupa K, Louot C, Couderc V, et al. Spatiotemporal characterization of supercontinuum extending from the visible to the mid-infrared in a multimode graded-index optical fiber[J]. Optics Letters, 2016, 41(24): 5785-5788.
- [35] Krupa K, Tonello A, Barthélémy A, et al. Observation of geometric parametric instability induced by the periodic spatial self-imaging of multimode waves[J]. Physical Review Letters, 2016, 116(18): 183901.
- [36] Pourbeyram H, Agrawal G P, Mafi A. Stimulated Raman scattering cascade spanning the wavelength range of 523 to 1750 nm using a graded-index multimode optical fiber[J]. Applied Physics Letters, 2013, 102(20): 201107.
- [37] Lopez-Galmiche G, Sanjabi Eznaveh Z, Eftekhari M A, et al. Visible supercontinuum generation in a graded index multimode fiber pumped at 1064 nm[J]. Optics Letters, 2016, 41(11): 2553.
- [38] Zhang T, Zhang W, Hu X H, et al. All fiber structured supercontinuum source based on graded-index multimode fiber[J]. Laser Physics Letters, 2022, 19(3): 035101.
- [39] Zhang T, Hu X H, Pan R, et al. 30 W all-fiber supercontinuum generation via graded-index multimode fiber pumped by picosecond laser pulse[J]. Optics & Laser Technology, 2023, 159: 108943.
- [40] Jiang L, Song R, Hou J. Hundred-watt level all-fiber visible supercontinuum generation from a graded-index multimode fiber[J]. Chinese Optics Letters, 2023, 21(5): 051403.
- [41] 陈晓龙, 楼风光, 何宇, 等. 高效率国产化 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.
- [42] Pioger P H, Couderc V, Leproux P, et al. High spectral power density supercontinuum generation in a nonlinear fiber amplifier[J]. Optics Express, 2007, 15(18): 11358-11363.
- [43] Song R, Hou J, Chen S P, et al. High power supercontinuum generation in a nonlinear ytterbium-doped fiber amplifier[J]. Optics Letters, 2012, 37(9): 1529-1531.
- [44] Song R, Hou J, Liu T, et al. A hundreds of watt all-fiber near-infrared supercontinuum[J]. Laser Physics Letters, 2013, 10(6): 065402.
- [45] Jiang L, Song R, He J R, et al. 714 W all-fiber supercontinuum generation from an ytterbium-doped fiber amplifier[J]. Optics & Laser Technology, 2023, 161: 109168.
- [46] 饶云江, 王子南, 张伟利. 光纤随机激光原理及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
Rao Y J, Wang Z N, Zhang W L. Principle and application of fiber random laser[M]. Beijing: Science Press, 2018.
- [47] Lizárraga N, Puente N P, Chaikina E I, et al. Single-mode Er-doped fiber random laser with distributed Bragg grating feedback[J]. Optics Express, 2009, 17(2): 395-404.
- [48] Ma R, Zhang W L, Wang S S, et al. Simultaneous generation of random lasing and supercontinuum in a completely-opened fiber structure[J]. Laser Physics Letters, 2018, 15(8): 085111.
- [49] Ma R, Rao Y J, Zhang W L, et al. Backward supercontinuum generation excited by random lasing[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2018, 24(3): 0901105.
- [50] Arun S, Choudhury V, Balaswamy V, et al. High power, high efficiency, continuous-wave supercontinuum generation using standard telecom fibers[J]. Optics Express, 2018, 26(7): 7979-

- 7984.
- [51] Arun S, Choudhury V, Balaswamy V, et al. Octave-spanning, continuous-wave supercontinuum generation with record power using standard telecom fibers pumped with power-combined fiber lasers[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(5): 1172-1175.
- [52] Cheng X, Dong J Y, Zeng X, et al. 130 W continuous-wave supercontinuum generation within a random Raman fiber laser [J]. *Optical Fiber Technology*, 2022, 68: 102825.
- [53] Qi T C, Yang Y S, Li D, et al. Kilowatt-level supercontinuum generation in random Raman fiber laser oscillator with full-open cavity[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2022, 40(21): 7159-7166.
- [54] 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.
- [55] Chen L, Song R, Lei C, et al. Influences of position of ytterbium-doped fiber and ASE pump on spectral properties of random fiber laser[J]. *Optics Express*, 2019, 27(7): 9647-9654.
- [56] He J R, Song R, Tao Y, et al. Supercontinuum generation directly from a random fiber laser based on photonic crystal fiber [J]. *Optics Express*, 2020, 28(19): 27308-27315.
- [57] He J R, Song R, Jiang L, et al. Supercontinuum generated in an all-polarization-maintaining random fiber laser structure[J]. *Optics Express*, 2021, 29(18): 28843-28851.
- [58] 何九如. 随机光纤激光产生超连续谱的研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2022: 55-57.
He J R. Study on supercontinuum generated by random fiber laser[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2022: 55-57.
- [59] Gapontsev V, Fomin F A, Abramov M. Diffraction limited ultra-high power fibre lasers[C]//Adv Solid-State Photon Topical Meeting, January 31-February 3, 2010, San Diego, California, United States. Washington, D. C.: Optica Publishing Group, 2010, AWA1.
- [60] Zhou H, Jin A, Chen Z, et al. Combined supercontinuum source with >200 W power using a 3×1 broadband fiber power combiner[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(16): 3810-3813.
- [61] 张彬. 近红外超连续谱光源非相干合束研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2015: 34-41.
Zhang B. The study on the incoherent combination of near-infrared supercontinuum source[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2015: 34-41.
- [62] Sun C, Ge T W, Cao K, et al. 143.4 W high power combined white supercontinuum source using a (7×1) supercontinuum fiber combiner[J]. *Frontiers in Physics*, 2022, 10: 1043435.

Research Progress of High-Power Visible to Near-Infrared Supercontinuum Source

Jiang Li^{1,2,3}, Song Rui^{1,2,3*}, Hou Jing^{1,2,3**}, Chen Shengping^{1,2,3}, Zhang Bin^{1,2,3}, Yang Linyong^{1,2,3},
Song Jiaxin^{1,2,3}, Yang Weiqiang^{1,2,3}, Han Kai^{1,2}

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

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

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

Abstract

Significance Supercontinuum (SC) has experienced a boom in recent decades because of its rich spectral compositions and laser characteristics. At present, the studies of SC mainly focus on power scaling, spectrum extension, and spectrum flatness improvement, among which power scaling enables abundant potential applications, such as photoelectric countermeasures, optical coherence tomography, and hyperspectral lidars.

In the photoelectric countermeasure system, a high-power broadband source is employed to suppress and disturb enemy equipment. For example, the AN/AAQ-24(V) directional infrared countermeasure system jointly developed by the United States and Britain has the function of laser jamming, and the corresponding jamming range covers the entire near-infrared waveband. In the equipment of optical coherence tomography, the material sample is scanned by a broadband source, thus achieving the reconstruction of its two-dimensional or three-dimensional image. Scanning resolution, speed, and sensitivity are three key performance parameters in this equipment, in which the scanning sensitivity can be improved by a high-power source, and the axial resolution can be enhanced by a broadband source. With these factors considered, a high-power SC source is an appropriate choice. In the hyperspectral lidar system, the active hyperspectral detection covering broadband wavelength is attractive in long-range target identification. It has been reported that the active hyperspectral detection of diffusion target has a measurement range of several hundred meters and requires the utilization of quite expensive instruments to produce and detect infrared laser radiation. The laser power is one of the main factors to determine the measurement range limit in this system. The high-power SC source has great application prospects in remote hyperspectral sensing and lidar performance enhancement due to its unique characteristics, such as good direction, broadband wavelength range, and high spectral intensity.

Progress We review three major schemes generating high-power visible to near-infrared SC on the main oscillating power amplification (MOPA) structure, random fiber laser structure, and multichannel incoherent combination. Specifically, in the MOPA structure scheme, there are two SC generation schemes according to the generated waveband. One is adopting a MOPA structure combined with a photonic crystal fiber (PCF) or a graded-index multimode fiber (GRINMMF) to achieve a visible SC output. Some typical PCFs for high-power SC generation are also introduced (Fig. 2). The other is that the near-infrared SC generates directly from a fiber amplifier. For the SC generation scheme in a random fiber laser, several typically experimental structures are reviewed in detail. In the multichannel incoherent combination scheme, the broadband power combinations of visible SC and near-infrared SC are listed respectively. The advantages and disadvantages of these schemes and their future development potential are comprehensively analyzed.

Conclusions and Prospects The visible SC output power reaches 300 W based on the MOPA structure scheme, the near-infrared SC output power has reached 3 kW based on the scheme of random fiber laser, and the emergence of new fibers and schemes brings new energy for the development of high-power SC sources.

In terms of high-power visible SC, PCF is the main nonlinear medium and the corresponding studies focus on its structure design. However, the mode field diameter of PCF is small, which means it has less potential for further SC output power scaling. With the further development of the GRINMMF, this fiber with a large core size, beam self-cleaning effect, and unique mechanism of short-wave expansion can promote the further development of high-power visible SC. At present, the generated SC spectral properties of GRINMMF are poor compared with those of PCF. Believing in the future that the SC output power and spectral performance based on GRINMMF can be further improved by optimizing the refractive index curve, doping concentration, and fiber structure. In addition, most of the reported high-power visible SC is achieved by the MOPA structure scheme, and the scheme of multichannel incoherent combination can also scale the visible SC output power effectively, which can be further improved by optimizing the design of the broadband power combiner in the future.

For high-power near-infrared SC, the MOPA structure scheme is complex, but it can provide high pump peak power under the premise of ensuring the average pump power, and the generated spectral performance of SC is excellent. For the scheme of the random fiber laser, the generated SC structure is simple with high obtained SC output power, which also needs to achieve more development theoretically and experimentally in the future. The scheme of multichannel incoherent combination has the potential to break the limit of SC output power in the single fiber, but the current development is relatively slow due to the small market demand at home and abroad. However, when the output SC power of the single fiber is close to the limit in the future, the scheme will show its advantages.

We select some representative studies of high-power visible to near-infrared SC at home and abroad in terms of the above three schemes and focus on demonstrating the research progress of the National University of Defense Technology in recent years. With the improvement in the fiber drawing technology and semiconductor laser output power, and the gradual application of SC sources in photoelectric countermeasures, optical coherence tomography, and hyperspectral lidars, high-power SC sources can be further developed.

Key words nonlinear optics; high-power fiber supercontinuum; graded-index multimode fiber; photonic crystal fiber; random fiber laser; multichannel incoherent combination