

文章编号 2097-1842(2026)01-0029-10

超快光纤激光相干合成中的脉冲压缩技术

李 灿*, 任 博, 张嘉怡, 王 涛, 唐振强, 贺志文, 周 毅, 冷进勇, 周 朴*
(国防科技大学 前沿交叉学科学院, 湖南长沙 410073)

摘要:近年来,超快光纤激光相干合成技术得到快速发展,成为超快超强激光平均功率提升的重要技术手段。然而,受到单路光纤放大器中光谱增益窄化以及高阶色散失配等因素影响,高功率超快光纤激光相干合成系统的输出脉冲宽度与块状固体激光系统相比通常较宽,导致其峰值功率提升严重受限。本文从超快光纤激光相干合成中脉冲压缩的视角,分别针对基于光纤啁啾脉冲放大的脉冲整形技术、基于光纤非线性光谱展宽的合成技术、以及基于部分光谱干涉的相干光谱合成技术三个方面进行了系统的梳理分析,并对超短脉冲光纤激光相干合成的后续发展进行了展望。

关键词:超快超强激光; 光纤激光; 相干合成; 脉冲压缩

中图分类号: TN248 文献标志码: A doi: 10.37188/CO.2025-0100 CSTR: 32171.14.CO.2025-0100

Pulse compression techniques in ultrafast fiber laser coherent beam combination

LI Can*, REN Bo, ZHANG Jia-yi, WANG Tao, TANG Zhen-qiang, HE Zhi-wen,
ZHOU Yi, LENG Jin-yong, ZHOU Pu*

(College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of
Defense Technology, Changsha 410073, China)

* Corresponding author, E-mail: lc0616@163.com; zhoupu203@163.com

Abstract: In recent years, ultrafast fiber laser coherent beam combination (CBC) has developed rapidly, becoming an important technical means for enhancing the average power of ultrafast and ultra-intense lasers. However, due to factors such as spectral gain narrowing in single-channel fiber amplifiers and high-order dispersion mismatch, the output pulse width of high-power ultrafast fiber laser CBC systems is significantly wider compared to that of bulk solid-state laser systems, severely limiting its peak power enhancement. From the perspective of pulse compression in ultrafast fiber laser coherent combining, this review systematically analyzes the following three aspects: pulse shaping technique based on fiber chirped pulse amplification, combining technique based on fiber nonlinear spectral broadening, and coherent spectral combining technique based on partial spectral interference. Additionally, a brief conclusion and outlook on the future devel-

收稿日期: 2025-07-26; 修订日期: 2025-08-29

基金项目: 国家自然科学基金(No. 62475286, No. 62405374); 国防科技大学自主科研基金(No. ZZ005, No. JDZ-12, No. JDZ-27)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 62475286, No. 62405374); Innovation Research Foundation of National University of Defense Technology (No. ZZ005, No. JDZ-12, No. JDZ-27)

opment of ultra-short pulse fiber laser CBC is given at the end.

Key words: ultrafast and ultra-intense lasers; fiber laser; coherent beam combination; pulse compression

1 引言

超快超强激光具有超短脉冲宽度和超高峰值功率特性,为人类提供了前所未有的实验手段和极端物理条件,已广泛应用于激光粒子加速、激光核医学以及高能物理等领域^[1-2]。目前,研究人员基于单片大口径、块状固体增益介质已实现了峰值功率达 10 PW 级的超快激光,相应的脉冲宽度基本在 50 fs 以内。然而,受限于热光效应等因素的影响,现有超快超强激光装置的重复频率一般在 Hz 量级,导致其平均功率难以提升,无法满足先进制造和高次谐波产生等对激光通量要求较高的应用需求^[3-5]。在此背景下,美国超快激光领域的知名学者于 2019 年初在美国光学学会总部召开了“Brightest Light Initiative”研讨会,旨在明确高亮度激光科学和技术的未来机遇。在会上确立的四个技术研究方向包括:“将高强度激光器推向更高的平均功率”和“产生具有最高平均功率的飞秒系统”^[6]。

当前,得益于光纤激光的高转换效率、高光束质量、结构紧凑和可柔性操作等优势,超快光纤激光相干合成已成为实现超快激光平均功率大幅度提升的重要技术手段^[7-9]。研究人员根据超快光纤激光的技术特点,从原理上构想了利用相干合成实现高平均功率、高能量和高峰值功率的“三高”激光技术方案,其中就包括 2018 年诺贝尔物理学奖获得者 G. Mourou 教授提出的国际相干放大网络(ICAN)计划^[10-12]。在此背景下,关于超快光纤激光相干合成系统所涉及的基础科学、关键技术和集成创新等方面的研究迅速成为激光技术领域的前沿和热点。其中,以德国耶拿大学的进展和成果最具代表性,其通过对 12 路光纤放大器进行相干合成实现了 10.4 kW 的超快激光输出,该结果成为目前超快激光所实现的最高功率纪录^[13]。在此基础上,该团队进一步利用时空相干合成的技术方案实现了单脉冲能量为 32 mJ、重复频率为 20 kHz 的超快光源,超快光纤激光相干合成展现出应用于前沿科技创新领域的潜力^[14]。

值得注意的是,尽管超快光纤激光相干合成能够实现平均功率成量级的提升,然而作为合成单元的光纤啁啾脉冲放大器(chirped pulse amplifier, CPA)由于受到增益窄化效应的影响,使得其放大后的激光光谱变窄、去啁啾后的脉冲宽度一般为 300~600 fs,导致在高平均功率的情况下仍难以大幅度提升脉冲峰值功率^[15-16]。针对该问题,研究人员提出了超快激光的“后压缩”方案,即将合成后的脉冲激光注入到充满惰性气体的空芯光纤或者多通腔内,利用非线性自相位调制效应展宽激光光谱,之后再对其进行压缩,从而获得超短脉冲宽度、超高峰值功率的激光^[17-19]。然而,脉冲压缩过程一般涉及较长的光路长度,导致系统结构复杂,此外,输出激光功率波动和指向漂移也将增大。鉴于此,研究人员同样关注超快光纤激光相干合成中的脉冲压缩,通过对单路放大或者多路合成过程进行优化设计,以实现更短脉冲激光的合成输出。本文将对超快光纤激光相干合成中的脉冲压缩技术进行梳理,基于此做一个简要的总结与展望。

2 基于光纤 CPA 的脉冲整形技术

由于光纤 CPA 在极大程度上缓解了功率提升过程中的非线性效应,研究人员已基于该方案实现了单路千瓦级超快激光平均功率输出,因而被用作多路合成系统中合成单元的主流方案^[20-22]。一般认为,高功率光纤 CPA 系统经时域展宽后的脉冲光谱受到增益饱和效应的影响,脉冲前沿光谱成分的放大幅度大于脉冲后沿,导致放大后的脉冲光谱窄化与脉宽变宽。此外,在饱和效应不强的光纤放大器中,脉冲光谱在增益光纤的辐射峰位置获得更多增益,从而引起放大后的光谱发生窄化效应^[23]。另一方面,光纤放大器中的非线性相移累积和高阶色散失配还会造成脉冲相位畸变,导致去啁啾后的脉冲激光质量劣化^[24-26]。针对上述问题,研究人员分别提出了两种解决方案:对脉冲光谱进行预整形以缓解增益窄化效应^[27];以及对种子源脉冲展宽所使用的啁啾光纤光栅实

施温控, 从而对高阶色散进行预补偿^[28]。2023 年, 美国 IMRA 公司将以上两种方法结合起来构建掺镱光纤 CPA 系统, 实现了 1 微米波段单脉冲能量 10 μJ 、脉宽 92 fs 的超快激光输出^[29]。如图 1 (彩图见期刊电子版) 所示, 其中, oscillator 为振荡器, preamp 为预放大器, chirped FBG stretcher 为啁啾光纤布拉格光栅展宽器, down-counter 为降频器, Lyot filter 为 Lyot 滤波器, power amp 为主放

大器, compressor 为压缩器, hollow core fiber 为空心芯光纤, pressure chamber 为压力室。精确温控的 CFBG 展宽器用于高达四阶的色散补偿, 而 Lyot 滤波器则用于衰减增益峰值处的光谱成分。在该工作中, 研究人员进一步将去啁啾后的脉冲注入到充氩气的空心芯光纤中进行进一步非线性光谱展宽, 获得了少周期的脉冲激光输出。

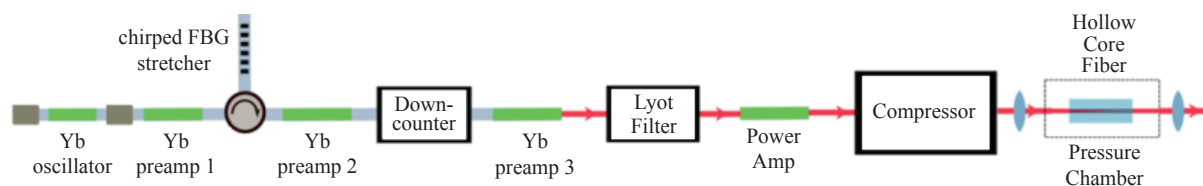


图 1 基于光谱预整形与高阶色散预补偿的掺镱光纤 CPA 系统^[29]

Fig. 1 The Yb-doped fiber CPA system based on spectral pre-shaping and high-order dispersion pre-compensation^[29]

对于高功率超快光纤激光相干合成系统, 研究人员也同样关注到了其中的脉冲压缩问题。早在 2013 年, 耶拿大学在四路填充孔径相干合成系统中引入了脉冲光谱相位补偿技术, 即多光子脉内干涉相位扫描(MIIPS)^[30]。该技术的基本结构如图 2 所示, 其中, fs-laser 为飞秒激光器, shaper 为整形器, SHG 为二次谐波产生, spectrometer 为光谱仪。脉冲激光经过整形器(一般为空间光调制器)后在非线性晶体上产生二次谐波, 并采用光谱仪对谐波信号进行测量。基于该结构, 首先通过整形器对脉冲进行相位调制扫描, 并根据谐波信号的强度变化得出相应的光谱相位信息, 经多次迭代后得到最优的相位调制参数, 从而实现对脉冲激光相位畸变的补偿与脉宽压缩^[31]。可以看出, 该方法属于一种“后压缩”方法, 若直接将其引入到高功率超快光纤激光系统中则面临器件损伤阈值低、系统插入损耗高的问题。因此, 结合超快光纤激光相干合成系统的结构特点, 耶拿大学将多路 CPA 放大与合成近似为线性系统置于整形器和二次谐波产生中间, 并分别基于四路和八路合成实现了 200 fs、230 W^[32] 和 262 fs、700 W^[33] 的超快激光输出。

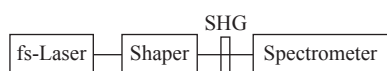


图 2 多光子脉内干涉相位扫描结构示意图^[31]

Fig. 2 Schematic diagram of the MIIPS^[31]

可以看出, 基于 MIIPS 的脉冲压缩方法并未涉及光谱增益窄化效应的抑制, 其对高功率相干合成系统的脉冲压缩在一定意义上存在“下限”。2017 年, 耶拿大学在前期工作的基础上, 进一步在八路填充孔径相干合成系统中引入了种子源光谱预整形, 具体结构如图 3 (彩图见期刊电子版) 所示, 其中, oscillator 为振荡器, stretcher 为展宽器, pulse shaper 为脉冲整形器, preamp 为预放大器, main amplifier 8 channel CBC 为主放大器 8 路相干合成, compressor 为压缩器, feedback stage 为反馈系统, nonlinear compression 为非线性压缩, HHG stage 为高次谐波产生系统^[34]。其中, 直接利用脉冲整形器对种子源在 1030 nm 波长处进行光谱带阻滤波, 从而有效抑制掺镱光纤辐射峰位置的增益, 对应的放大后脉冲光谱宽度相比未整形增加了 60% (如图 4 (彩图见期刊电子版) 所示)。同时, 图 3 中的脉冲整形器还兼具光谱相位补偿功能, 采用 MIIPS 方法进行多次迭代控制, 将去啁啾后的合成脉冲宽度从 ~1 ps 压缩到了 300 fs。该工作证实了基于 MIIPS 的脉冲压缩方法适用于存在一定非线性相移的光纤 CPA 高功率运转以及多路相干合成系统。基于此, 耶拿大学在后续关于超快光纤激光相干合成的工作中, 均引入了基于脉冲整形器的光谱预整形和相位补偿处理, 获得了以平均功率 1 kW、单脉冲能量 10 mJ、脉冲宽度 120 fs 为代表的超快激光合成输出^[13, 14, 35-37]。

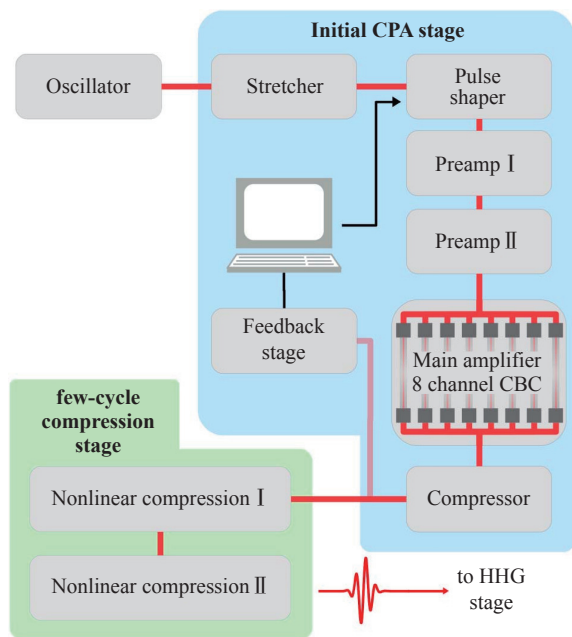


图 3 基于光谱预整形与相位补偿的高功率超快光纤激光相干合成系统^[34]

Fig. 3 High-power ultrafast fiber laser coherent combining system based on spectral pre-shaping and phase compensation^[34]

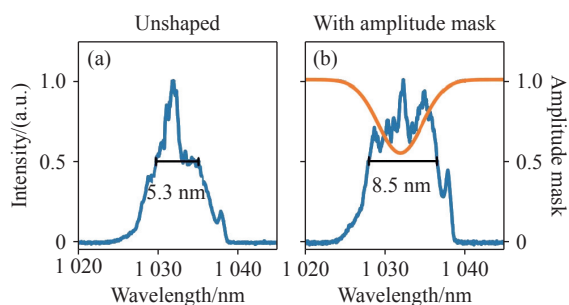


图 4 种子源光谱预整形(a)前、(b)后的合成输出光谱,图(b)中的橙色曲线为整形器的光谱透射函数^[34]

Fig. 4 Combined output spectrum (a) before and (b) after pre-shaping the seed spectrum. The transmission function of the shaper is shown in orange^[34]

除耶拿大学以外,法国巴黎综合理工学院也在超快光纤激光相干合成系统中引入了脉冲整形器用于色散补偿,以压缩多路平铺孔径合成系统的输出脉冲宽度,但并未明确具体的补偿方法^[38]。2020年,该单位对61路光纤CPA进行平铺孔径合成,实现了平均功率为1 kW、脉冲宽度为257 fs的超快激光合成输出^[39]。在国内,中国科学院物理研究所联合国防科技大学报道了四路填充孔径相干合成系统,通过对展宽光栅进行温控调控高阶色散,实现了平均功率为534 W、单脉冲能量为1.07 mJ、脉冲宽度为247 fs的超快激

光合成输出^[40]。此外,华中科技大学采用相似的方法,基于两路填充孔径相干合成系统获得了平均功率为403 W、单脉冲能量为1.07 mJ、脉冲宽度为260 fs的超快激光输出^[41]。

可以看出,对基于光纤CPA的合成系统来说,受限于CFBG有限的反射带宽,其脉冲光谱宽度一般在15 nm以内,对应的变换极限脉宽一般在100 fs以上。因此,基于该系统进行增益窄化抑制与高阶色散补偿,目前难以获得更短脉冲宽度的高功率激光合成输出。针对该问题,需要重点解决的是如何实现宽谱种子源的时域脉冲大幅度展宽问题。采用无源光纤长距离传输的方式理论上可以实现大的群延时色散与脉冲展宽,但该过程将引入严重的传输损耗与非线性相移累积。进一步增加CFBG的反射带宽将成为主要的技术方案,相应的技术挑战包括光栅反射率与反射带宽之间的平衡、高阶色散的控制以及制作工艺的改进等^[42-43]。此外,对于时域大幅度展宽的宽谱种子源放大,相应的增益窄化抑制与高阶色散补偿也将更具挑战,对放大器的整体优化设计与脉冲整形器件均提出了更高要求。

3 基于光纤非线性光谱展宽合成技术

针对当前基于光纤CPA的合成系统难以实现亚100 fs脉冲输出的现状,为获得更短脉冲宽度的超快光纤激光合成输出,可以借助光纤中的非线性光谱展宽效应来实现更宽光谱宽度的合成。具体来说,研究人员针对光纤CPA系统输出脉宽较宽的问题,提出了光纤非线性放大技术^[44-45]。该技术利用光纤放大过程中的非线性自相位调制效应诱导具有线性啁啾特性的光谱展宽,从而实现去啁啾后脉宽小于100 fs的超快激光放大输出^[46-48]。2012年,法国巴黎萨克雷大学报道了基于光纤非线性自相似放大的超快激光相干合成系统,其合成方案为基于时域分脉冲放大与萨格纳克干涉仪的时空相干合成,获得了单脉冲能量为3.1 μ J、脉宽为50 fs的脉冲激光输出(如图5(彩图见期刊电子版)所示)^[49]。其中,合成输出脉冲光谱覆盖了近80 nm的范围,远大于光纤CPA系统的光谱宽度。此外,耶拿大学针对大能量超快激光“后压缩”过程中的自聚焦以及

光学损伤等问题, 提出将待压缩脉冲分成多路进行非线性光谱展宽后合成的技术方案, 具体如图 6 所示^[50]。其中, Splitting 为分束, Broad. N 为 N 路光谱展宽, combination 为合束, compressor 为压缩器。采用该方案, 耶拿大学构建基于萨格纳克干涉仪的两路合成系统, 获得了单脉冲能量为 1.1 μJ 的脉冲输出, 相应的脉冲宽度由 340 fs 压缩到了 28 fs。

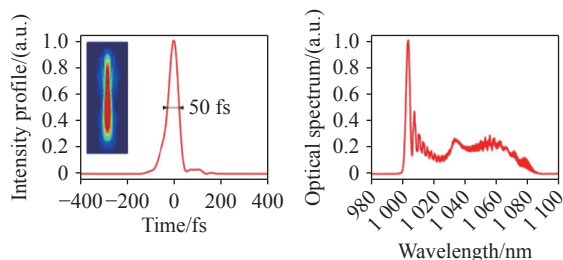


图 5 基于超快激光非线性光纤放大的时空相干合成系统输出脉冲特性: 左图为脉冲时域波形, 其中插图为 FROG 轨迹; 右图为相应的脉冲光谱^[49]

Fig. 5 Output pulse characteristics of spatio-temporal coherent combining system based on ultrafast laser nonlinear fiber amplification. Left: temporal pulse profile of the 3.1 μJ pulse retrieved from FROG measurement, along with the FROG trace (inset). Right: corresponding spectrum^[49]

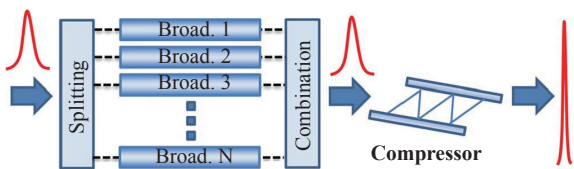


图 6 基于多路光谱非线性展宽的超快光纤激光相干合成示意图^[50]

Fig. 6 Schematic diagram of coherent combination of ultrafast fiber lasers based on multi-channel spectral nonlinear broadening (Broad. 1-N) with a common compressor^[50]

由于光纤中极小的模场面积和较长的传输距离, 导致光纤非线性放大器的能量远小于光纤 CPA 系统, 目前公开报道的最高单脉冲能量仅为 10 μJ 量级^[51, 52], 后续鲜有报道基于光纤非线性光谱展宽的相干合成相关工作。另一方面, 研究人员在近年来开始关注基于块状固体增益介质的超快激光相干合成, 研究结果表明对少周期超快激光进行合成可实现 90% 以上的合成效率^[53-55]。目前, 欧盟极端光设施(ELI)和俄罗斯用于极端光学研究的艾瓦中心(XCELS)已计划采用多路激光相

干合成技术实现少周期超快激光的功率和能量提升, 其中 XCELS 计划对 12 路超强激光进行相干合成以获得 600 PW 的峰值功率^[56, 57]。针对光纤放大器中脉冲能量低的问题, 研究人员提出脉冲时域堆叠的技术方案, 即将多个脉冲经特殊设计的无源腔在时域上进行相干合成, 通过降低重复频率来换取脉冲能量的提升^[58-60]。2024 年, 美国密西根大学采用 Gires Tournois 干涉仪技术对光纤 CPA 系统输出的 81 个脉冲进行时域堆叠, 实现了基于单根光纤产生单脉冲能量 4.2 mJ、脉宽 313 fs 的激光脉冲输出^[61]。因此, 对多路高重复频率的非线性光纤放大器/脉冲压缩器进行相干合成, 并结合时域脉冲堆叠技术, 有望获得脉宽小于 100 fs 的大能量超快激光输出。值得注意的是, 由于时域脉冲堆叠系统的复杂度随着脉冲堆叠个数的增加显著提升, 因此仍需尽可能地提升非线性光纤放大器的运转功率/能量。比如, 近年来发展的增益管理非线性放大机制^[62-64]以及基于脉冲展宽的非线性放大技术^[52, 65]等, 与更大模场的增益光纤相结合, 有望助力基于非线性光纤放大的时空相干合成系统输出功率/能量大幅度提升。

4 基于部分光谱干涉的相干光谱合成技术

除利用光纤非线性光谱展宽外, 研究人员还提出了实现宽谱脉冲激光输出的相干光谱合成技术。该技术的基本原理为: 参与合成的激光光谱存在部分重叠, 基于该重叠部分的干涉效应实现两路以上激光脉冲的合成, 从而在实现脉冲功率和能量提升的同时, 获得更宽的激光光谱以及更窄的可压缩脉宽。2013 年, 密西根大学报道了对 3 路光纤 CPA 系统进行相干光谱合成的结果, 其中将脉冲光谱宽度从单路 3 nm 扩展到合成后 8 nm, 而脉宽则相应的被压缩了 3 倍以上(具体如图 7(彩图见期刊电子版)所示)^[66]。

在同一年, 巴黎萨克雷大学报道了基于萨格纳克干涉仪的 2 路相干光谱合成, 获得光谱宽度为 19 nm、脉宽为 130 fs 的脉冲激光输出^[67]。2019 年, 天津大学将相干光谱合成技术应用到了超快激光的“后压缩”上, 通过将同源脉冲分别注入到两段高非线性光纤中产生色散波和自

相位调制展宽脉冲,之后利用两路脉冲光谱的部分重叠进行相干合成,最终将脉冲宽度从 70 fs 压缩到了 8 fs^[68]。2023 年,美国劳伦斯伯克利国家实验室报道了 3 路光纤放大器的相干光谱合成,获得了光谱覆盖范围 80 nm、脉宽 42 fs 的脉冲输出^[69]。

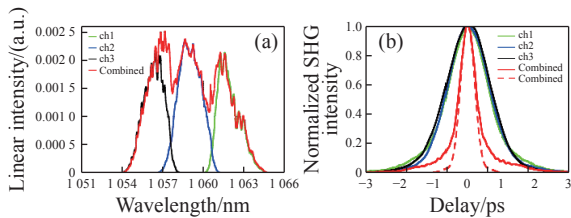


图 7 基于 3 路光纤 CPA 相干光谱合成的输出脉冲特性。(a)单路及合成后光谱;(b)单路及合成后脉冲自相关曲线^[66]

Fig. 7 Output pulse characteristics based on 3-channel fiber CPA coherent spectroscopy combining. (a) Measured spectra of the individual-channel and combined signals; (b) normalized autocorrelation traces for the individual-channel and combined signals^[66]

可以看出,目前关于超快光纤激光相干光谱合成的报道均为低功率下的验证性工作。尽管如此,该技术方案在原理上可与光纤 CPA 系统结合,通过将多路中心波长不同的高功率放大器进行合成获得更高功率的超短脉冲激光。2021 年,劳伦斯伯克利国家实验室启动了相关科研项目,计划基于超快光纤激光时空与光谱多维相干合成实现高功率/能量的超短脉冲激光,旨在为激光等离子体加速提供驱动光源^[70]。图 8 所示为相应的结构示意图,其中,oscillator 为振荡器, spectral splitter 为光谱分束器, stretchers and pre-amplifiers 为展宽器和预放大器, power amplifiers 为功率放大器, spatial combiners 为空间合束器, spectral combiners 为光谱合束器, temporal stackers 为时域堆叠器, pulse compressor 为脉冲压缩器。首先构建光谱覆盖范围分别为 1015–1052, 1052–1077 和 1077–1095 nm 的三路光纤 CPA 相干合成系统,之后将其进行相干光谱合成获得单束高功率超短脉冲激光,进一步进行时域脉冲堆叠实现单脉冲能量 200 mJ、脉宽为 40 fs 的激光脉冲输出。2023 年,劳伦斯伯克利国家实验室在其官网的科学简报中,以“激光相干光谱合成可释

放激光等离子体加速器的潜力”为题进行了专门报道^[71]。

在后续开展高功率超快光纤激光相干光谱合成的研究中,同样将面临诸多技术挑战。其中,需首先解决超快光纤激光放大器的光谱定制化输出问题,从而实现对多路激光的光谱参数如中心波长和带宽等进行统筹调控。此外,由于相干光谱合成的工作原理是基于部分干涉光谱实现锁相控制,因此对单路脉冲激光的相干性提出了更高的要求,需解决高相干性超快光纤激光的功率提升问题,在获得高功率脉冲的同时保持优异的相干性。在此基础上,开展基于部分干涉光谱的高效合成研究,解决低干涉信号对比度下的同步控制问题,最终实现更高功率、更短脉宽的超快激光合成输出。

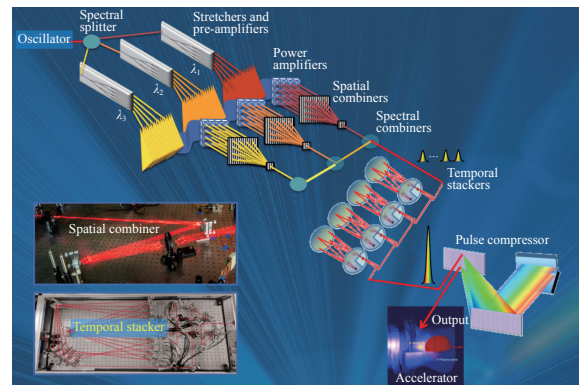


图 8 超快光纤激光时空与光谱多维相干合成结构示意图^[70]
Fig. 8 Schematic diagram of the ultrafast fiber lasers of spatio-temporal and spectral multi-dimensional coherent combining^[70]

5 总结与展望

对于超快激光来说,其平均功率、单脉冲能量和峰值功率提升分别面临不同的技术挑战,通常认为高“平均功率、脉冲能量和峰值功率”的“三高”激光特性难以同时实现。随着近年来超快光纤激光相干合成技术的快速发展,实现“三高”激光的技术路线基本清晰,即:多路空间合成提升平均功率、多脉冲时域堆叠提升单脉冲能量以及多路光谱合成提升峰值功率。其中,超快光纤激光相干合成系统的平均功率和脉冲能量均获得了显著提升,而在峰值功率提升(即脉冲压缩)方面尚存在较大空间,目前尚未突破 TW 级。针

对该问题, 研究人员从光纤放大器脉冲整形、合成单元非线性光谱展宽以及相干光谱合成等方面开展了卓有成效的研究, 并在不同程度上对超快光纤激光相干合成系统的输出脉冲宽度进行了压缩。可以预见, 未来通过进一步对相关技术进行整合, 比如将种子源脉冲整形技术、光纤非线性光谱展宽技术以及多路光谱相干合成技术相结

合, 有望获得高质量的“三高”光纤激光。同时需注意到, 在技术整合的过程中也将面临新的技术挑战, 而新型光纤材料与器件的开发、以及人工智能对系统优化设计与参量调控的深度赋能将有望促进超快光纤激光技术的快速发展, 实质性推动其在先进制造、高次谐波产生以及生物医疗等前沿领域的应用进程。

参考文献:

- [1] 刘军, 曾志男, 梁晓燕, 等. 超快超强激光及其科学应用发展趋势研究[J]. *中国工程科学*, 2020, 22(3): 42-48.
LIU J, ZENG ZH N, LIANG X Y, *et al.*. Development trend of ultrafast and ultraintense lasers and their scientific application[J]. *Strategic Study of CAE*, 2020, 22(3): 42-48. (in Chinese).
- [2] MOUROU G. Nobel Lecture: extreme light physics and application[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2019, 91: 030501.
- [3] DANSON C N, HAEFNER C, BROMAGE J, *et al.*. Petawatt and exawatt class lasers worldwide[J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2019, 7: e54.
- [4] LI Y T, CHEN L M, CHEN M, *et al.*. High-intensity lasers and research activities in China[J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2025, 13: e12.
- [5] LI ZH Y, LENG Y X, LI R X. Further development of the short-pulse petawatt laser: trends, technologies, and bottlenecks[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2023, 17(3): 2300062.
- [6] MOSER M. Checking in with the brightest light initiative[EB/OL]. [2019-09-17]. https://www.optica-opn.org/home/newsroom/2019/september/checking_in_with_the_brightest_light_initiative.
- [7] KLENKE A, MÜLLER M, STARK H, *et al.*. Coherent beam combination of ultrafast fiber lasers[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2018, 24(5): 0902709.
- [8] 王井上, 张瑶, 王军利, 等. 飞秒光纤激光相干合成技术最新进展[J]. *物理学报*, 2021, 70(3): 034206.
WANG J SH, ZHANG Y, WANG J L, *et al.*. Recent progress of coherent combining technology in femtosecond fiber lasers[J]. *Acta Physica Sinica*, 2021, 70(3): 034206. (in Chinese).
- [9] 李灿, 张嘉怡, 任博, 等. 超快超强激光与光纤激光相干合成技术的融合发展(特邀)[J]. *中国激光*, 2024, 51(19): 1901006.
LI C, ZHANG J Y, REN B, *et al.*. Integrated development of ultrafast ultra - intense laser technology with fiber laser coherent beam combination technology (invited)[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2024, 51(19): 1901006. (in Chinese).
- [10] TAJIMA T, BROCKLESBY W, MOUROU G. ICAN: the next laser powerhouse[J]. *Optics and Photonics News*, 2013, 24(5): 36-43.
- [11] EIDAM T, KIENEL M, KLENKE A, *et al.*. Divided-pulse amplification for terawatt-class fiber lasers[J]. *The European Physical Journal Special Topics*, 2015, 224(13): 2567-2571.
- [12] BREITKOPF S, EIDAM T, KLENKE A, *et al.*. A concept for multiterawatt fibre lasers based on coherent pulse stacking in passive cavities[J]. *Light: Science & Applications*, 2014, 3(10): e211.
- [13] MÜLLER M, ALESHIRE C, KLENKE A, *et al.*. 10.4 kW coherently combined ultrafast fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(11): 3083-3086.
- [14] STARK H, BENNER M, BULDT J, *et al.*. Pulses of 32 mJ and 158 fs at 20-kHz repetition rate from a spatiotemporally combined fiber laser system[J]. *Optics Letters*, 2023, 48(11): 3007-3010.
- [15] YU H L, WANG X L, ZHANG H W, *et al.*. Linearly-polarized fiber-integrated nonlinear CPA system for high-average-power femtosecond pulses generation at 1.06 μm [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(18): 4271-4277.
- [16] BROCKLESBY W S. Progress in high average power ultrafast lasers[J]. *The European Physical Journal Special Topics*, 2015, 224(13): 2529-2543.
- [17] HÄDRICH S, KIENEL M, MÜLLER M, *et al.*. Energetic sub-2-cycle laser with 216 W average power[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(18): 4332-4335.
- [18] NAGY T, HÄDRICH S, SIMON P, *et al.*. Generation of three-cycle multi-millijoule laser pulses at 318 W average

- power[J]. *Optica*, 2019, 6(11): 1423-1424.
- [19] GREBING C, MÜLLER M, BULDT J, *et al.*. Kilowatt-average-power compression of millijoule pulses in a gas-filled multi-pass cell[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(22): 6250-6253.
- [20] WANG T, LI C, REN B, *et al.*. High-power femtosecond laser generation from an all-fiber linearly polarized chirped pulse amplifier[J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2023, 11: e25.
- [21] GAIDA C, GEBHARDT M, HEUERMAN T, *et al.*. Ultrafast thulium fiber laser system emitting more than 1 kW of average power[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(23): 5853-5856.
- [22] XIU H, FAN Y H, LIN W, *et al.*. 1200-W all polarization-maintaining fiber GHz-femtosecond-pulse laser with good beam quality[J]. *Optics Express*, 2023, 31(25): 41940-41951.
- [23] 闫东钰, 刘博文, 宋寰宇, 等. 高功率光纤飞秒激光放大器的研究现状与发展趋势[J]. *中国激光*, 2019, 46(5): 0508012.
- YAN D Y, LIU B W, SONG H Y, *et al.*. Research status and development trend of high power femtosecond fiber laser amplifiers[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(5): 0508012. (in Chinese).
- [24] WAN P, YANG L M, LIU J. All fiber-based Yb-doped high energy, high power femtosecond fiber lasers[J]. *Optics Express*, 2013, 21(24): 29854-29859.
- [25] PEDERSEN M E V, JOHANSEN M M, OLESEN A S, *et al.*. 175 W average power from a single-core rod fiber-based chirped-pulse-amplification system[J]. *Optics Letters*, 2022, 47(19): 5172-5175.
- [26] REN B, LI C, WANG T, *et al.*. Thulium-doped all-PM fiber chirped pulse amplifier delivering 314 W average power[J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2023, 11: e73.
- [27] MALEKMOHAMADI S, PERGAMENT M, KULCSAR G, *et al.*. 44-fs, 1-MHz, 70- μ J Yb-doped fiber laser system for high harmonic generation[J]. *Optics Express*, 2024, 32(22): 39460-39468.
- [28] ČERNE L, ŠUŠNJAR P, PETKOVŠEK R. Compensation of optical nonlinearities in a femtosecond laser system in a broad operation regime[J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 135: 106706.
- [29] LAMPEN J, TANI F, LI P, *et al.*. Compact Yb fiber few-cycle pulse source based on precision pulse compression and shaping with an adaptive fiber Bragg grating[J]. *Optics Express*, 2023, 31(5): 8393-8399.
- [30] KLENKE A, BREITKOPF S, KIENEL M, *et al.*. 530 W, 1.3 mJ, four-channel coherently combined femtosecond fiber chirped-pulse amplification system[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(13): 2283-2285.
- [31] LOZOVVOY V, PASTIRK I, DANTUS M. Multiphoton intrapulse interference. IV. Ultrashort laser pulse spectral phase characterization and compensation[J]. *Optics Letters*, 2004, 29(7): 775-777.
- [32] KLENKE A, HÄDRICH S, EIDAM T, *et al.*. 22 GW peak-power fiber chirped-pulse-amplification system[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(24): 6875-6878.
- [33] KIENEL M, MÜLLER M, KLENKE A, *et al.*. 12 mJ kW-class ultrafast fiber laser system using multidimensional coherent pulse addition[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(14): 3343-3346.
- [34] BECKER N C, HÄDRICH S, EIDAM T, *et al.*. Adaptive pre-amplification pulse shaping in a high-power, coherently combined fiber laser system[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(19): 3916-3919.
- [35] MÜLLER M, KLENKE A, STEINKOPFF A, *et al.*. 3.5 kW coherently combined ultrafast fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(24): 6037-6040.
- [36] STARK H, BULDT J, MÜLLER M, *et al.*. 23 mJ high-power fiber CPA system using electro-optically controlled divided-pulse amplification[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(22): 5529-5532.
- [37] STARK H, BULDT J, MÜLLER M, *et al.*. 1 kW, 10 mJ, 120 fs coherently combined fiber CPA laser system[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(5): 969-972.
- [38] HEILMANN A, LE DORTZ J, DANIAULT L, *et al.*. Coherent beam combining of seven fiber chirped-pulse amplifiers using an interferometric phase measurement[J]. *Optics Express*, 2018, 26(24): 31542-31553.
- [39] FSAIFES I, DANIAULT L, BELLANGER S, *et al.*. Coherent beam combining of 61 femtosecond fiber amplifiers[J]. *Optics Express*, 2020, 28(14): 20152-20161.
- [40] 史卓, 常洪祥, 王栋梁, 等. 基于掺镱棒状光纤的高功率大能量四路相干合成飞秒激光系统[J]. *物理学报*, 2025, 74(1): 014205.
- SHI ZH, CHANG H X, WANG D L, *et al.*. High-power high-energy four-channel fiber coherent beam combined system[J]. *Acta Physica Sinica*, 2025, 74(1): 014205. (in Chinese).

- [41] PENG SH X, WANG ZH H, HU F L, *et al.*. 260 fs, 403 W coherently combined fiber laser with precise high-order dispersion management[J]. *Frontiers of Optoelectronics*, 2024, 17(1): 3.
- [42] 王鸣晓, 李平雪, 许杨涛, 等. 啁啾光纤布拉格光栅展宽器的设计与制作[J]. *光学学报*, 2022, 42(7): 0706002.
WANG M X, LI P X, XU Y T, *et al.*. Design and fabrication of chirped fiber Bragg grating stretchers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(7): 0706002. (in Chinese).
- [43] FRANKINAS S, MICHAIOVAS A, RUSTEIKA N, *et al.*. Efficient ultrafast fiber laser using chirped fiber Bragg grating and chirped volume Bragg grating stretcher/compressor configuration[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9730: 973017.
- [44] KUZNETSOVA L, WISE F W. Scaling of femtosecond Yb-doped fiber amplifiers to tens of microjoule pulse energy via nonlinear chirped pulse amplification[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(18): 2671-2673.
- [45] WISE F W, CHONG A, RENNINGER W H. High-energy femtosecond fiber lasers based on pulse propagation at normal dispersion[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2008, 2(1-2): 58-73.
- [46] LIU Y, LI W X, LUO D P, *et al.*. Generation of 33 fs 93.5 W average power pulses from a third-order dispersion managed self-similar fiber amplifier[J]. *Optics Express*, 2016, 24(10): 10939-10945.
- [47] ZHANG Y, WANG J SH, TENG H, *et al.*. Double-pass pre-chirp managed amplification with high gain and high average power[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(13): 3115-3118.
- [48] 李灿, 任博, 郭琨, 等. 基于增益管理非线性的超快光纤激光放大研究进展 (特邀)[J]. *红外与激光工程*, 2025, 54(1): 20240438.
LI C, REN B, GUO K, *et al.*. Research progress of ultrafast fiber laser amplifier based on gain managed nonlinearity (invited)[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2025, 54(1): 20240438. (in Chinese).
- [49] DANIAULT L, HANNA M, PAPADOPOULOS D N, *et al.*. High peak-power stretcher-free femtosecond fiber amplifier using passive spatio-temporal coherent combining[J]. *Optics Express*, 2012, 20(19): 21627-21634.
- [50] KLENKE A, HÄDRICH S, KIENEL M, *et al.*. Coherent combination of spectrally broadened femtosecond pulses for nonlinear compression[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(12): 3520-3522.
- [51] GUO K, LI C, JIN K, *et al.*. Monolithic gain-managed nonlinear fiber amplifier delivering 2.7- μ J ultrashort pulse with broad spectrum seeding[J]. *Optics & Laser Technology*, 2025, 192: 113610.
- [52] ZHANG P L, ZHAO H, XIA T, *et al.*. Generation of an 86-fs and a 10.2-uJ pulse from an all-fiber integrated GMN system with spectral shaping[J]. *Optics Letters*, 2025, 50(10): 3293-3296.
- [53] PENG CH, LIANG X Y, LIU R Q, *et al.*. Two-beam coherent combining based on Ti: sapphire chirped-pulse amplification at the repetition of 1 Hz[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(17): 4379-4382.
- [54] JANSONAS G, ERDMAN E C, NOVÁK J, *et al.*. Coherent combining of broadband pulses after free space optical parametric amplification[J]. *Optics Express*, 2024, 32(22): 39623-39631.
- [55] ZHANG G L, LIANG X, XIE X L, *et al.*. Theoretical analysis of the phase characteristics in few-cycle laser coherent beam combining[J]. *Optics Express*, 2024, 32(25): 45299-45314.
- [56] LUREAU F, MATRAS G, CHALUS O, *et al.*. High-energy hybrid femtosecond laser system demonstrating 2×10 PW capability[J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2020, 8: e43.
- [57] KHAZANOV E, SHAYKIN A, KOSTYUKOV I, *et al.*. eXawatt center for extreme light studies[J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2023, 11: e78.
- [58] ZHOU T, RUPPE J, ZHU CH, *et al.*. Coherent pulse stacking amplification using low-finesse Gires-Tournois interferometers[J]. *Optics Express*, 2015, 23(6): 7442-7462.
- [59] BREITKOPF S, WUNDERLICH S, EIDAM T, *et al.*. Extraction of enhanced, ultrashort laser pulses from a passive 10-MHz stack-and-dump cavity[J]. *Applied Physics B*, 2016, 122(12): 297.
- [60] 张志刚. 相干脉冲堆积——超越啁啾脉冲放大的新技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(12): 120001.
ZHANG ZH G. Coherent pulse stacking—an innovation beyond the chirped pulse amplification[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(12): 120001. (in Chinese).
- [61] RAINVILLE A, WHITTLESEY M, PASQUALE C, *et al.*. Near-complete extraction of maximum stored energy from large-core fibers using coherent pulse stacking amplification of femtosecond pulses[J]. *Optica*, 2024, 11(11): 1540-1548.
- [62] SIDORENKO P, FU W, WISE F. Nonlinear ultrafast fiber amplifiers beyond the gain-narrowing limit[J]. *Optica*, 2019,

- 6(10): 1328-1333.
- [63] SIDORENKO P, WISE F. Generation of 1 μJ and 40 fs pulses from a large mode area gain-managed nonlinear amplifier[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(14): 4084-4087.
- [64] REN B, LI C, WANG T, *et al.*. Generation of ultrafast laser with 11 MW peak power from a gain-managed nonlinear tapered fiber amplifier[J]. *Optics & Laser Technology*, 2023, 160: 109081.
- [65] MA J D, LIU H H, CHEN Y J, *et al.*. Generation of 35 fs, 20 μJ , GHz pulse burst by hybrid fiber amplification technique[J]. *Optics Express*, 2023, 31(21): 34224-34231.
- [66] CHANG W Z, ZHOU T, SHIMAN L A, *et al.*. Femtosecond pulse spectral synthesis in coherently-spectrally combined multi-channel fiber chirped pulse amplifiers[J]. *Optics Express*, 2013, 21(3): 3897-3910.
- [67] GUICHARD F, HANNA M, LOMBARD L, *et al.*. Two-channel pulse synthesis to overcome gain narrowing in femtosecond fiber amplifiers[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(24): 5430-5433.
- [68] GE A CH, LIU B W, CHEN W, *et al.*. Generation of few-cycle laser pulses by coherent synthesis based on a femtosecond Yb-doped fiber laser amplification system[J]. *Chinese Optics Letters*, 2019, 17(4): 041403.
- [69] CHEN S Y, ZHOU T, DU Q, *et al.*. Broadband spectral combining of three pulse-shaped fiber amplifiers with 42fs compressed pulse duration[J]. *Optics Express*, 2023, 31(8): 12717-12724.
- [70] SCHULZ W. Fiber lasers poised to advance berkeley lab's development of practical laser-plasma accelerators[EB/OL]. (2021-12-06)[2021-12-06]. <https://newscenter.lbl.gov/2021/12/06/fiber-lasers-poised-to-advance-berkeley-labs-development-of-practical-laser-plasma-accelerators/>.
- [71] WILLIAMS C A. Spectrally combining lasers could unleash the potential of laser-plasma accelerators[EB/OL]. (2023-06-27)[2023-06-27]. <https://atap.lbl.gov/news/spectrally-combining-lasers-could-unleash-the-potential-of-laser-plasma-accelerators/>.

作者简介:



李 灿(1987—),男,湖南益阳人,副研究员,2015年于华南理工大学获得工学博士学位,2015—2019年在香港大学从事博士后研究工作,主要从事超快光纤激光器、单频光纤激光器及相干合成的研究。E-mail: lc0616@163.com



周 朴(1984—),男,安徽安庆人,研究员,2009年于国防科技大学获得工学博士学位,现主要从事科研管理工作和光学工程及相关学科的科研、人才培养、教学和战略研究工作。E-mail: zhoupu203@163.com