



## 飞秒光纤激光相干合成技术最新进展

王井上 张瑶 王军利 魏志义 常国庆

### Recent progress of coherent combining technology in femtosecond fiber lasers

Wang Jing-Shang Zhang Yao Wang Jun-Li Wei Zhi-Yi Chang Guo-Qing

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 034206 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20201683

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201683>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

基于紧聚焦方式的阵列光束相干合成特性分析

Analysis of coherent combination characteristics of beam array via tight focusing

物理学报. 2020, 69(9): 094204 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200034>

基于平衡光学互相关方法的超短脉冲激光相干合成技术

Coherent synthesis of ultrashort pulses based on balanced optical cross-correlator

物理学报. 2018, 67(24): 244204 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181851>

快速扫描频率分辨光学开关装置测量超短激光脉冲

Measurement of ultrashort laser pulses with rapid-scanning frequency-resolved optical gating device

物理学报. 2019, 68(11): 110601 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190034>

基于光纤中超短脉冲非线性传输机理与特定光谱选择技术的多波长飞秒激光的产生

Generation of multi-wavelength femtosecond laser pulse based on nonlinear propagation of high peak power ultrashort laser pulse in single-mode fiber and spectral selectivity technology

物理学报. 2018, 67(18): 184205 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181026>

窄线宽脉冲光纤激光的自相位调制预补偿研究

Self-phase modulation pre-compensation of narrowlinewidth pulsed fiber lasers

物理学报. 2018, 67(16): 164201 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180486>

光纤激光器中包层功率剥离器散热性能的优化

Optimization of thermal performance of cladding power stripper in fiber laser

物理学报. 2020, 69(1): 014204 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191093>

## 特邀综述

## 飞秒光纤激光相干合成技术最新进展\*

王井上<sup>1)</sup> 张瑶<sup>1)2)</sup> 王军利<sup>2)</sup> 魏志义<sup>1)</sup> 常国庆<sup>1)†</sup>

1) (中国科学院物理研究所, 光物理重点实验室, 北京 100190)

2) (西安电子科技大学物理与光电工程学院, 西安 710071)

(2020年10月12日收到; 2020年11月24日收到修改稿)

飞秒光纤激光器具有平均功率高、散热性能佳、光束质量好和空间体积小等优势, 在基础研究、工业加工、生物医疗等方面得到越来越广泛的应用. 相干合成技术能够有效克服光纤中有害的非线性效应和热效应的影响, 进一步提高飞秒光纤激光器输出的脉冲能量和平均功率. 本文介绍高功率飞秒光纤激光器相干合成的基本技术路线, 重点阐述相干合成技术中关于填充孔径相干合成与平铺孔径相干合成的最新研究进展, 并详细介绍相干合成技术中不同类型主动相位锁定技术的基本原理. 相信在不远的将来, 飞秒光纤激光相干合成系统的单脉冲能量和平均功率将不断攀升, 从而开创许多崭新的研究领域.

**关键词:** 超短脉冲, 光纤激光, 相干合成, 高平均功率

**PACS:** 42.55.Wd

**DOI:** 10.7498/aps.70.20201683

## 1 引言

1960年5月16日, 梅曼成功建造第一台激光器, 至今已经整整60年. 随着激光技术的迅猛发展, 激光器的种类也逐渐增多, 常见的激光器包括全固态激光器、气体激光器、半导体激光器和光纤激光器等. 其中光纤激光器具有光束质量高、成本相对低廉、散热性能优异、电光转换效率高、结构简单和空间体积小等优点, 近年来受到科研界的广泛关注. 与此同时, 兼具高平均功率和高单脉冲能量的飞秒光纤激光更是成为超快激光研究领域的热点之一. 这种具有极端输出参数的超快光源有望满足基础科研和工业应用中的重大需求: 1) 具有较高光束质量的高能量超短脉冲可以清除太空垃圾<sup>[1]</sup>; 2) 平均功率大于 $10^5$  W的毫焦量级超短脉冲可用于加速粒子<sup>[2]</sup>; 3) 高平均功率超短脉冲可以用来产生适合光刻要求的高通量极紫外脉冲<sup>[3]</sup>.

当前的飞秒光纤激光系统一般采用级联功率放大来提升平均功率和单脉冲能量. 不同于连续激光, 飞秒脉冲在光纤中放大时会受到诸多限制:

1) 飞秒脉冲在光纤中累积过多的非线性相移会恶化放大后脉冲的压缩质量; 2) 为了防止在放大过程中损坏光纤, 脉冲的峰值功率要低于自聚焦阈值; 3) 对于特定参数的光纤放大器, 当输出平均功率超过某一阈值后, 输出光束将会在基模与高阶模之间无规律地转换, 出现横模不稳定性 (TMI) 现象<sup>[4-6]</sup>, 从而限制了最终输出的平均功率. 高功率、高能量光纤放大器通常采用大模场面积增益光纤, 并结合啁啾脉冲放大 (CPA) 技术<sup>[7]</sup>. 在这种光纤 CPA 系统中, 飞秒脉冲在放大之前往往被展宽到几百皮秒甚至几纳秒, 从而避免放大过程中的有害非线性效应, 最终通过色散补偿器件对脉冲压缩获得更高的峰值功率和更大的单脉冲能量<sup>[7]</sup>.

目前, 普遍认为 TMI 现象的根源在于大模场光纤中传播着一定比例的高阶模式. 当输出功率

\* 广东省重点领域研发计划 (批准号: 2018B090904003)、国家自然科学基金 (批准号: 11774234, 91850209) 和用于三维生物模型大深度和高精度成像的新型多光子显微镜研制项目 (批准号: YJKYYQ20190034) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: guoqing.chang@iphy.ac.cn



常国庆, 中国科学院物理研究所特聘研究员, 博士生导师. 在清华大学电子工程系先后获得学士和硕士学位. 2006 年在美国密歇根大学电子工程系获得博士学位. 2007 年在密歇根大学超快光科学中心从事博士后工作. 2008—2011 年在麻省理工学院电子工程系从事博士后工作, 后任研究员. 2012—2017 年, 获聘 Helmholtz 研究员, 在德国自由电子激光科学中心创建超快激光与相干成像实验室, 担任实验室主任 (永久职位). 2017 年加入中国科学院物理研究所. 现担任美国光学学会 *Optics Express* 编委、《光电产品与资讯》编委、中国激光杂志社青年编委、《光子学报》编委. 主要研究方向包括高功率高能量超快光纤激光技术、超快生物光子学、超快中红外激光技术等.

(热负载) 超过某一阈值后, 能量在基模与高阶模之间来回转移, 如图 1 所示<sup>[8]</sup>. 这种动态的横模不稳定现象严重恶化了光束质量. 虽然更小芯径的光纤由于支持更少的高阶模式而具有更高的 TMI 阈值, 但是小芯径光纤的模场面积较小, 脉冲在放大时更易积累较多的非线性相移. 可见, 大模场面积与低 TMI 阈值之间存在难以调和的矛盾: 更大的模场面积支持更高能量的超短脉冲输出, 但输出的平均功率严重受限; 较小的模场面积支持更高的 TMI 阈值 (平均功率), 但输出的脉冲能量受限. 这对矛盾曾一度使得大能量飞秒光纤激光器输出的平均功率被限制在 200 W 左右<sup>[9]</sup>. 随着光子晶体光纤设计和控制技术的进步, 高阶模离域和选择性掺杂等优化技术被相继提出<sup>[10]</sup>, 这些抑制高阶模式的手段一定程度上提高了飞秒光纤激光器的 TMI 阈值, 但是单根光纤所能获得的平均功率仍然不尽人意. 目前, 单根光纤获得的最高单脉冲能量为 2.2 mJ<sup>[11]</sup>, 获得的最大平均功率为 1 kW 左右<sup>[12]</sup>, 光纤激光器输出的平均功率与脉冲能量严重受限.

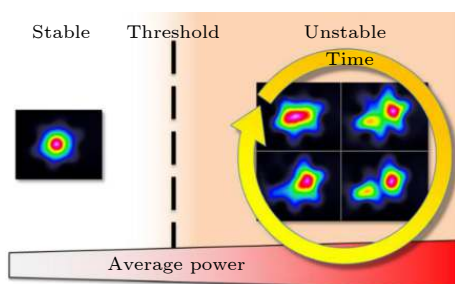


图 1 TMI 示意图<sup>[8]</sup>

Fig. 1. Schematic representation of TMI<sup>[8]</sup>.

为了得到更高脉冲能量和更高平均功率的超短脉冲, 研究人员将相干合成技术引入到了飞秒光纤激光领域. 最早的相干合成技术主要运用在连续光激光器中<sup>[13,14]</sup>, 随着 TMI 现象的出现和高功率飞秒光纤激光器需求的不断增大, 相干合成技术在高功率飞秒光纤激光器中的应用越来越广泛. 2006 年, Mourou 教授 (2018 年诺贝尔物理学奖得主) 等<sup>[15]</sup> 提出了相干放大网络 (CAN) 的最初概念: 将数以千计的飞秒光纤激光器进行相干合成, 作为下一代粒子加速器的驱动源. 相干合成技术总体上可以分为三类: 1) 时域相干合成, 2) 空域相干合成, 3) 频域相干合成. 频域相干合成技术的研究相对较早, 多采用色散器件等分光装置将多束中心频率不同的窄带连续光进行分束与合成<sup>[16]</sup>. 近年来, 频域相干合成技术成功实现了将不同中心频率的两束宽谱激光进行相干合成, 得到了周期甚至亚周期量级的飞秒脉冲<sup>[17]</sup>. 频域相干合成技术极少用于高功率飞秒光纤激光系统中, 因此本文不做过多介绍. 本文主要介绍基于时域和空域相干合成的飞秒光纤激光技术, 这里的合成不单单是空间或时间上的强度合成, 还需要满足各脉冲间的频率相同或频率差不变、相位差恒定, 这样合成转换的光束才能维持稳定的相干状态. 相干合成的显著优势在于提高脉冲能量和平均功率的同时保留了单根光纤的光束质量和光谱宽度.

2012 年, 在欧盟提出的国际相干放大网络 (ICAN) 项目的推动下, 飞秒光纤相干合成技术在平均功率和单脉冲能量方面取得了突破性进展<sup>[18]</sup>. 图 2 给出了近年来单根光纤与多根光纤相干合成技术在平均功率和单脉冲能量输出方面的提升情况<sup>[19]</sup>. 蓝色区域为单根光纤的典型输出范围, 红色区域为结合了分脉冲放大技术的多根光纤相干合成系统输出范围. 可以明显看出, 相干合成将飞秒光纤激光器输出的平均功率和单脉冲能量推向了顶峰. 德国耶拿大学的 Tünnermann 教授课题组是飞秒光纤激光相干合成方面的领军团队, 创造了飞秒光纤激光器最高单脉冲能量 23 mJ<sup>[20]</sup> 和最高平均功率 10.4 kW<sup>[21]</sup> 两项纪录.

相干合成技术按合成方式一般可分为两种: 一种是图 3 (a) 中的填充孔径相干合成, 另一种是图 3 (b) 中的平铺孔径相干合成. 在飞秒光纤激光领域中, 通常利用激光光束的偏振特性实现填充孔径相干合成, 合成后光束的空间场分布在近场和远



场处重合. 平铺孔径相干合成基于相位调控的衍射光学原理, 将多个激光光束进行远场合成, 合成后光束在远场相干叠加, 能量主要集中在光斑中心, 同时出现占有较少能量的次级旁瓣. 关于相干合成技术, 国内外已有多篇综述文献介绍该领域的发展 [22–27]. 本文将围绕飞秒光纤激光中的填充孔径相干合成与平铺孔径相干合成技术, 重点介绍最近四年内的研究进展.

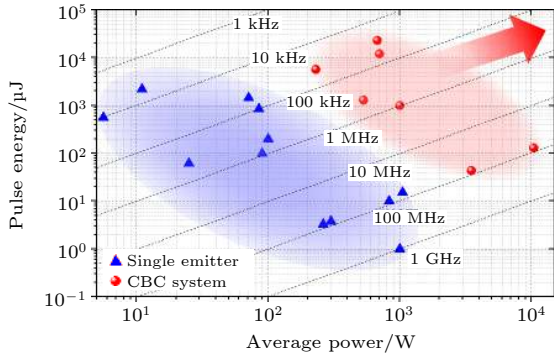


图 2 掺 Yb 光纤 CPA 系统的脉冲能量与平均功率的关系 (三角形, 单路; 圆圈, 结合了分脉冲放大 (DPA) 和空间相干合成 (CBC) 的 CPA 系统; 虚线表示脉冲重频)<sup>[19]</sup>

Fig. 2. Pulse energy as a function of average power for Yb-fiber CPA systems. Triangles, single emitters; circles, CPA systems incorporating divided pulse amplification (DPA) and coherent beam combining (CBC). Dashed lines mark the repetition rate<sup>[19]</sup>.

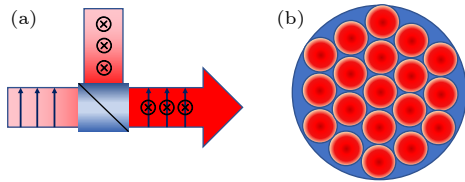


图 3 (a) 填充孔径相干合成; (b) 平铺孔径相干合成

Fig. 3. (a) Filled aperture coherent combination; (b) tiled aperture coherent combination.

## 2 填充孔径相干合成

飞秒光纤激光相干合成系统大多采用基于偏振分束镜 (PBS) 等偏振分光元件的填充孔径相干合成技术 [22]. 图 4 (a) 和图 4 (b) 展示了如何利用 PBS 进行填充孔径空间相干合成与分束, 合成可以看作是空间分束的逆过程 [26]. 在图 4 (a) 中, 入射光经 PBS 后被分为两束功率相等偏振态相互正交的光束; 在图 4 (b) 中, 功率相等偏振正交的两束光经过 PBS 后被合成为一束线偏振光.

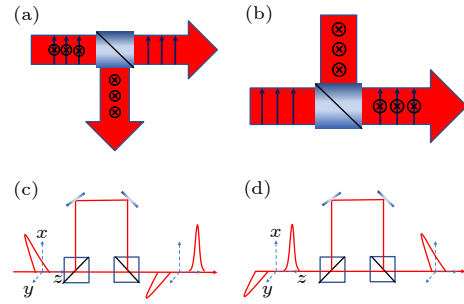


图 4 (a), (b) 空间上的分束与合成; (c), (d) 时间上的分束与合成

Fig. 4. (a), (b) Splitting and combining in space domain; (c), (d) splitting and combining in time domain.

填充孔径空间相干合成技术对飞秒光纤激光系统的平均功率提升十分明显, 但是对于单脉冲能量的提高则相对有限 [28]. 2007 年, 美国康奈尔大学 Wise 课题组 [29] 报告了一种时间相干合成方案——时间分脉冲放大技术 (DPA). 在飞秒光纤 DPA 系统中, 脉冲分解与合成过程也可以借助 PBS 来实现. 在分解脉冲时, PBS 将一个脉冲序列在空间上分成偏振正交的两个不同方向传播的脉冲序列, 这两束脉冲经过不同的时间延迟后在空间上又合为一束激光. 图 4(c) 所示为一个脉冲被分为两个脉冲的过程. 脉冲的时域合成如图 4(d) 所示: 相邻的两个正交偏振脉冲之间存在时间延迟, 经过 PBS 后被分成两路, 然后经过补偿时延将两个偏振正交的脉冲合成为一个脉冲, 此过程是图 4(c) 的逆过程.

相干合成技术中的功率放大级一般采用大模场面积光纤或者多芯光纤. 功率放大级中不同通道之间的相位差对最终合成效率的影响很大. 不同通道间的光纤长度差异、耦合损耗差异等都会产生相位差, 进而降低合成效率. 填充孔径相干合成的合成效率定义为时间合成效率与空间合成效率的乘积. 空间合成效率是指合成后的总功率与合成前各路功率和的比值, 时间合成效率是指合成后的脉冲能量与合成前各脉冲能量和的比值.

### 2.1 填充孔径空间相干合成

在填充孔径空间相干合成中, 一般将一个脉冲序列在空间上分成  $N$  路后分别放大, 再在空间上重新合成为一束, 合束过程中需要精确控制各路脉冲的相位以实现相干合成. 在 2010 年, Tünnemann 教授课题组 [30] 首次将填充孔径空间相干合成技术

用于飞秒光纤激光系统, 合成效率达到 97%. 随着工作不断推进, 该课题组次年对飞秒光纤激光填充孔径相干合成技术中需要考虑的因素做了部分总结<sup>[31]</sup>. 2016 年, 该课题组报道了 8 路光纤激光空间相干合成的工作<sup>[32]</sup>, 最终获得了平均功率为 1 kW、脉冲能量为 1 mJ、脉冲宽度为 260 fs 的激光输出, 合成效率高达 91%. 这一参数是当时飞秒光纤激光器所能达到的最高平均功率, 标志着 mJ 级飞秒光纤激光器迈入了千瓦量级.

2018 年, Tünnermann 教授课题组<sup>[33]</sup> 使用 16 根棒状光纤进行相干合成实验, 最终得到了平均功率为 1.83 kW 的飞秒激光输出, 脉冲能量也进一步提高到了 2.3 mJ. 由于 TMI 的影响, 单根棒状光纤所能获得的平均功率被限制在 200 W 左右. 为了进一步提高飞秒激光系统的平均功率, Tünnermann 教授课题组<sup>[28]</sup> 在同一年使用横模不稳定性阈值更高的阶跃型掺镱增益光纤 (Yb 20/400) 作为主放大级, 通过四路空间相干合成后得到了 3.5 kW 的飞秒脉冲, 这是当时飞秒光纤激光器最高的平均功率, 但是系统输出单脉冲能量则相对较低, 仅有 43  $\mu$ J.

2020 年, Tünnermann 教授课题组<sup>[21]</sup> 将掺镱增益光纤的放大通道数扩展到 12 路, 相干合成实验装置如图 5 所示. 为了保证后续 12 路放大的种

子光足够强, 最后一级预放大使用与主放大型号相同的光纤将平均功率提高到 150 W. 预放大后的脉冲经过分束器 (BS) 被平均分成 12 路注入主放大增益光纤之中, 主放大使用 11 m 长的掺镱阶跃型光纤 (Yb 20/400), 所有主放大增益光纤都放置在水浴模组中冷却降温. 空间合成单元每两个通道之间相干合成, 在最终合成路径的反馈控制单元中设置有 3 个监测反馈回路, 分别实现相位调整、群速度稳定和光束角度自调节的功能. 最终该实验获得了平均功率为 10.4 kW、脉冲宽度为 254 fs、重复频率为 80 MHz 的飞秒激光输出, 合成效率达到 96%. 这一工作将飞秒光纤激光器输出的平均功率首次推到了万瓦级别, 具有里程碑式的意义.

## 2.2 填充孔径时间及空间多维度相干合成

空间相干合成技术显著提升了飞秒光纤激光系统的平均功率, 分脉冲放大技术则对飞秒光纤激光系统的单脉冲能量提升功不可没. 随着对高功率高能量飞秒激光系统的不断追求, 融合空间相干合成与分脉冲放大等多种手段的多维度相干合成技术已是大势所趋.

2015 年, Tünnermann 教授课题组首次报道了将时间相干合成与空间相干合成结合的多维度相干合成实验<sup>[34]</sup>, 随后进一步改进实验装置,

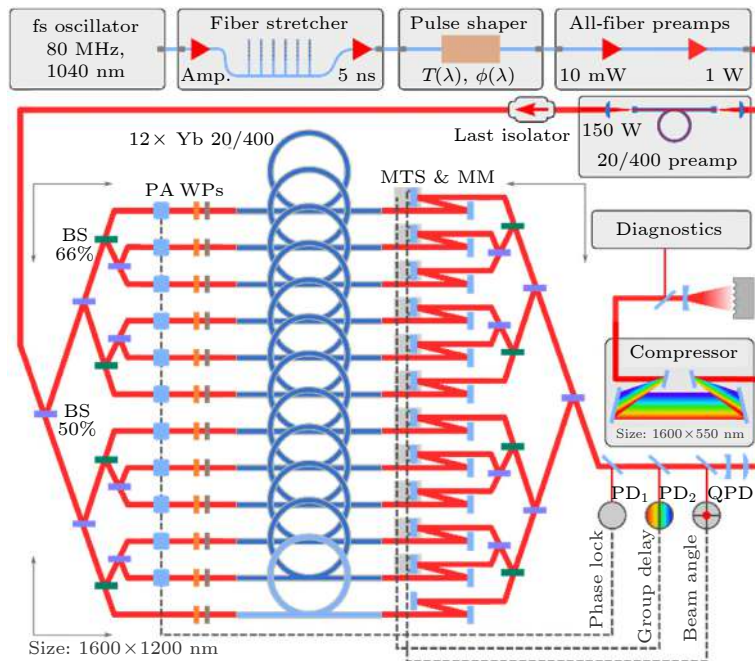


图 5 12 路相干合成的装置图<sup>[21]</sup>

Fig. 5. Setup of twelve channel coherent beam combination<sup>[21]</sup>.

在 2016 年报道了利用 8 路空间相干合成结合 4 个时间分脉冲放大的实验方案, 实验装置见图 6<sup>[35]</sup>. 振荡器输出的种子光先经过展宽器展宽到 1.3 ns, 再利用空间光调制器对种子脉冲整形以优化最终输出脉冲的压缩质量. 在预放大阶段, 两个声光调制器用来进行脉冲选择, 使其重复频率可以在 55.9 kHz—1.06 MHz 之间调节. 第四级预放大之后设置基于 PBS 的时间延迟线, 产生 8 和 4 ns 的时间延迟, 从而将 1 个入射脉冲在时间上分成 4 个子脉冲, 并注入第五级预放大. 此后, 利用偏振分束器件将这一束激光平均分为 8 束分别放大, 放大完成之后的 8 束激光进行空间相干合成为一束激光. 这一束激光再通过时间延迟线将之前分离的脉冲合成为一个脉冲. 整个系统在空间合成与时间合成完成后, 可以获得平均功率为 700 W, 脉冲能量为 12 mJ, 脉冲宽度为 262 fs 的超短脉冲, 合成效率为 78%.

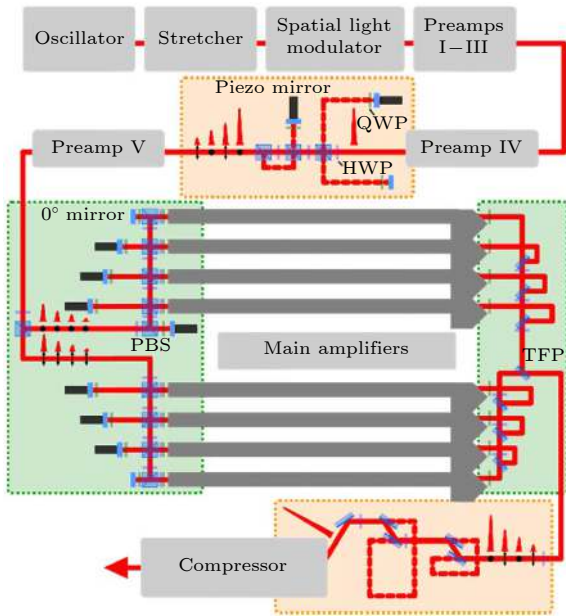


图 6 多维度相干合成实验装置图<sup>[35]</sup>

Fig. 6. Experimental setup of multi-dimension coherent combination<sup>[35]</sup>.

利用 PBS 进行分脉冲时, 当子脉冲个数过多时, 会大大增加系统的复杂性, 而且影响最终的时间合成效率, 因此子脉冲数量一般不超过 4. 近年来发展出的脉冲堆叠技术可以突破分脉冲数量的限制, 其基本思路在于利用相位调制器 (如电光调制器) 对高重频脉冲序列进行相位调制, 再借助其他手段产生不同偏振的子脉冲串<sup>[36–38]</sup>. 2020 年,

北京大学张志刚教授课题组<sup>[39]</sup>基于 1 GHz 的光纤振荡器, 利用该技术产生了 128 个偏振调制后的子脉冲, 并成功实现了 128 个脉冲的相干合成. 脉冲堆叠技术大大提高了时间分脉冲的数目, 成为提升脉冲能量的重要技术手段.

2019 年, Tünnermann 课题组<sup>[20]</sup>利用图 7 所示的多维度相干合成装置获得了 23 mJ 的单脉冲能量输出. 系统的预放大前端包括振荡器、展宽器、脉冲整形器和两级声光调制器 (AOM). 在第 2 个 AOM 之后, 他们将光束分为两路分别注入两个独立的电光调制器 (EOM) 中进行相位调制, 以满足在 PBS 之后产生不同相位的 8 个子脉冲. 电光调制器后产生的脉冲序列经过数级预放大后被空间上平均地分成 12 束, 分别注入 12 个光纤放大器中放大, 之后利用偏振器件将放大后的 12 束激光重新合成为一束, 空间合成后的光束仍包含时域上的 8 个分脉冲. 由于该实验满足脉冲合成的时间延迟线较长, 因此采用多通腔结构 (MPC) 补偿时间延迟. 装置图 (图 7) 中的下半部分利用 3 个由凹面镜组成的级联多通腔结构进行脉冲时间合成. 不同的腔长对应不同的时间延迟, 完成时间延迟补偿后即可将这 8 个脉冲合成为一个脉冲. 使用多通腔不仅缩小了空间结构也有利于维持时间合成后的光束质量. 最终合成得到了平均功率为 674 W、脉

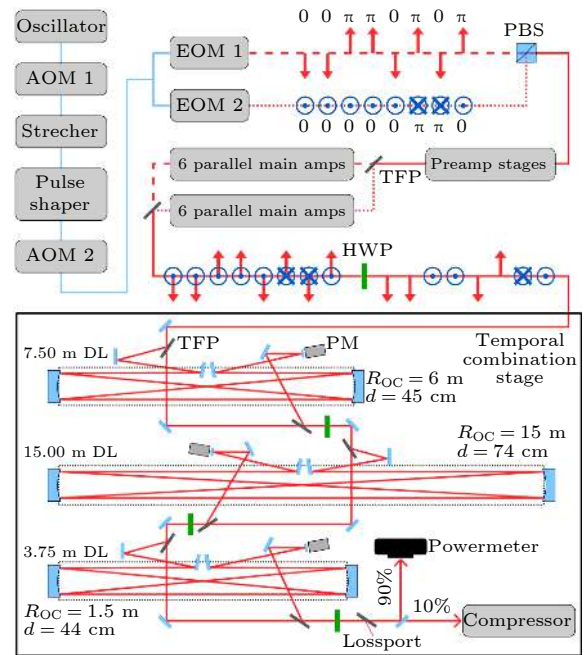


图 7 使用 EOM 的多维度相干合成实验装置图<sup>[20]</sup>

Fig. 7. Experimental setup of multi-dimension coherent combination using EOM<sup>[20]</sup>.



冲能量为 23 mJ 的输出脉冲, 合成效率为 80%. 为了避免空气电离, 实验中分出 10% 的平均功率进行了脉冲压缩, 压缩后脉冲宽度为 235 fs. 本实验主要侧重于提高脉冲能量, 因此选用了模场较大的棒状光纤, 但是对平均功率的提升比较有限. 相比于其他纯空间相干合成实验来说, 本实验中既存在时间相干合成又存在空间相干合成, 因而最终合成效率较低.

### 2.3 填充孔径空间相干合成新技术——基于多芯光纤的相干合成

相比于传统固态激光器, 光纤近似于一维的几何结构使得光纤激光器很容易实现高密度的摆放以减小空间体积. 尽管如此, 当空间相干合成路数较多时, 整个光纤激光系统的体积也会变得异常庞大. 考虑到空间体积这一因素, 飞秒光纤激光填充孔径相干合成系统的合成路数一般限制在 16 路以内<sup>[33]</sup>. 近年来, 多芯光纤的出现为光纤激光空间合成实现集成化提供了解决方案. 图 8 所示为七芯光子晶体光纤的横截面图, 包含 7 个呈花瓣状排列的相互独立纤芯<sup>[40]</sup>. 多芯光纤的纤芯之间需要保持一定的距离才能保证光束在各纤芯内独立传输, 否则会造成纤芯之间的模式耦合.

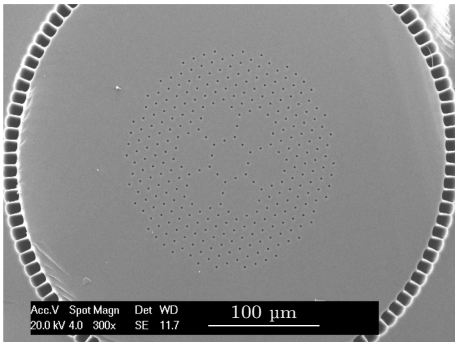


图 8 七芯光子晶体光纤横截面的扫描电子显微镜图像<sup>[40]</sup>  
Fig. 8. Scanning electron microscope images of a seven-core photonic crystal fiber cross section<sup>[40]</sup>.

2018 年, Tünnermann 教授课题组<sup>[41]</sup>利用 16 芯的多芯光纤作为功率主放大级验证了多芯光纤空间相干合成的可能性. 实验装置如图 9 所示, 在信号输入端的分光装置中, 他们通过两个方向不同的分段反射镜分光器 (SMS) 将一束光平均分成 16 束, 分别耦合到多芯光纤的 16 个芯径中进行放大. 在多芯光纤放大级后, 通过逆序使用与分光装

置中参数相同的两个 SMS 即可实现对 16 束激光的空间合成. 用于分束及合束过程的分段反射镜是多芯光纤相干合成技术中的关键器件, 每一块分段反射镜的反射率沿某一方向依次递减 (如 75%, 66%, 50% 和 0%). 以分光过程为例, 第一块分段反射镜配合一块高反镜可以实现光束一分为四的目的, 其后, 第二块分段反射镜与第一块分段反射镜分段方向正交, 配合另一块高反镜可以将第一次分光后的每一束光再一分为四, 最终得到 16 个子光束. 通过上述装置, 他们最终得到了平均功率为 70 W、脉冲宽度为 40 ps 的脉冲, 合成效率为 80%. 该实验为原理验证性实验, 虽然获得的平均功率比较有限, 但是实验上证明了单根多芯光纤用于高功率空间相干合成的可行性. 相比于传统多根光纤的空间相干合成方案, 多芯光纤用于空间相干合成大大减少了激光系统所占的空间体积. 相信随着多芯光纤设计技术和光纤拉制工艺的提升, 单个芯径输出的平均功率将会大幅提升, 因此利用多芯光纤进行相干合成具有巨大的应用潜力.

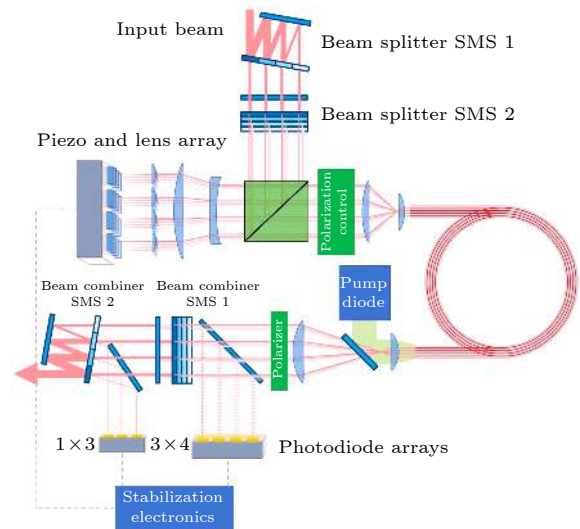


图 9 多芯光纤相干合成的实验装置图<sup>[41]</sup>  
Fig. 9. Setup of coherent combination in multi-core fiber<sup>[41]</sup>.

对于上述工作中使用的 SMS, 每一束光都需要一个特定反射率的区域, 如果参与合成的光束数量增加, SMS 的实验复杂度以及制造成本都会相应增加. Tünnermann 教授课题组<sup>[42]</sup>对 SMS 进行了简化, 实验装置如图 10 所示. 简化后镜片的反射率区域数量减少到 1—3 个, 导致多束光共用 1 个反射率区, 经过数值方法优化可以实现系统合成效率的最大化.

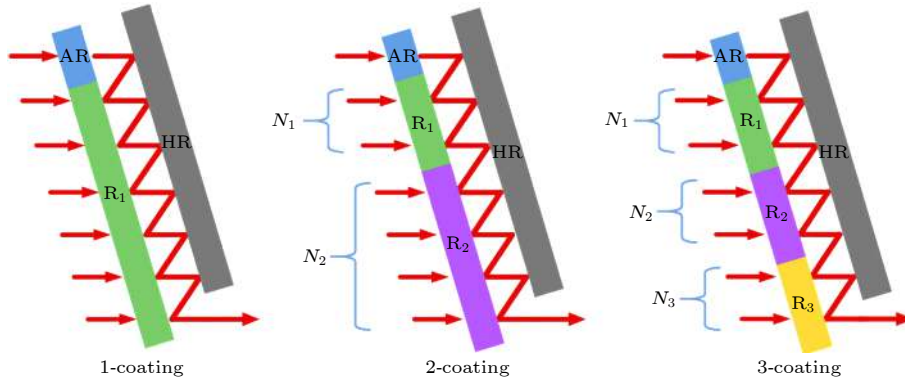


图 10 三种简化的 SMS 设计变体 ( $R_1, R_2, R_3$  表示多个输入光束之间共享的不同反射率镀膜区域;  $N_1, N_2, N_3$  表示每个镀膜区域共享的光束数目)<sup>[42]</sup>

Fig. 10. Three simplified SMS design variants.  $R_1, R_2, R_3$  indicate reflectivity of coating sections shared between multiple input beams.  $N_1, N_2, N_3$  indicate the number of beams shared in each coating section<sup>[42]</sup>.

### 3 平铺孔径相干合成

与填充孔径相干合成技术形成鲜明对比的是,平铺孔径相干合成不需要偏振光学器件等即可实现放大器输出光束的直接合成,有利于减少合成装置的复杂度,并提升合成光纤通道数目的上限.在平铺孔径相干合成技术中,通过独立调控每一束激光的相位可以将多束光纤输出的激光经过准直后在远场实现稳定的干涉叠加.合成后光束的空间场分布在近场具有各自独立的光束孔径,在远场才会形成稳定的合成光束.在平铺孔径相干合成技术中,提高拼接光束所占空比能够获得更高能量集中度的合成光斑.相比于空间透镜组,微透镜阵列拥有更小的体积,有利于提高放大后准直光束的所占

比,因此平铺孔径相干合成系统通常采用微透镜阵列实现光束准直.

在 XCAN 计划的推动下,巴黎综合理工大学与泰利斯公司开始联合研究用于更多数目光纤的平铺孔径相干合成技术.图 11 是以上两个合作单位在 2018 年利用七根光子晶体光纤进行平铺孔径相干合成的实验装置<sup>[43]</sup>.装置图中振荡器产生的种子光脉冲先后经过脉冲选择器、展宽器、脉冲整形器以及多级预放大,可分别实现降低重频、展宽脉冲、脉冲整形及功率预放大等功能.预放大后的脉冲在空间上被分成 8 束,其中一束激光作为实时相位测量的平面波参考光,其余 7 束经过 7 个独立的光纤放大器放大,放大后的光束经过微透镜阵列准直进入远场的平铺孔径相干合成.参考光与合成光束叠加后由高速相机测量干涉图样,据此推算出

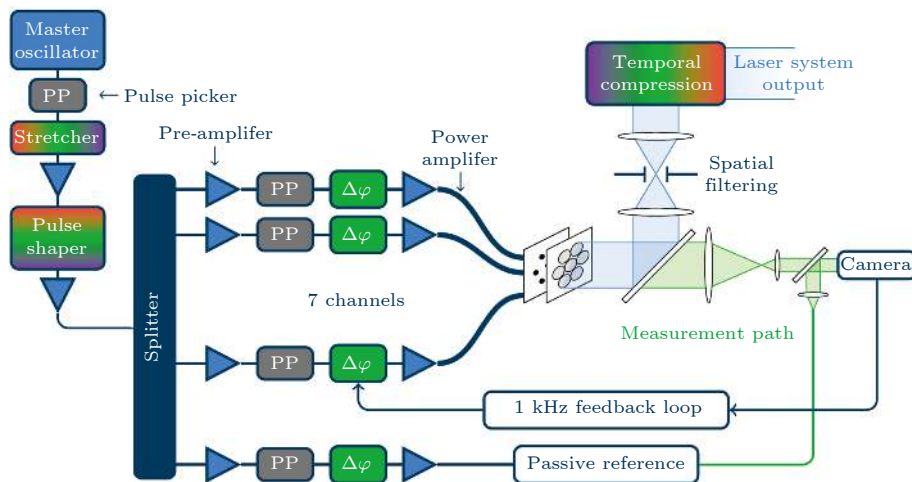


图 11 CBC 实验装置图<sup>[43]</sup>

Fig. 11. Setup of CBC<sup>[43]</sup>.



每个通道与参考光的相对相位, 然后利用带宽为 1 kHz 的反馈回路稳定每一路激光束的相位. 上述装置最终输出平均功率为 71 W、重频为 55 MHz、脉宽为 216 fs 的脉冲, 合成效率为 45%. 虽然实验中参与合成的增益光纤数量和合成后的平均功率都相对较低, 但是验证了在平铺孔径相干合成中可利用单个高速相机来评判合成效率, 为进一步增加合成光纤通道数目打下基础. 合成效率较低的原因主要源于平铺孔径相干合成技术本身, 即使是利用高斯光束进行平铺孔径合成, 其效率仅有 68%<sup>[44]</sup>.

2020 年, 巴黎综合理工大学稳步推进, 继续利用平铺孔径合成了 61 路激光束<sup>[45]</sup>. 如图 12 所示, 为了减少 61 根光纤的排列误差并提高合成效率, 实验中使用手工堆叠方式将 61 个高精度的陶瓷套管严格排列成正六边形. 图 13 是实验装置图<sup>[45]</sup>. 振荡器输出的脉冲被展宽到 2.5 ns 后再经过脉冲整形器优化脉冲形状, 然后通过光纤分束器将光束一分为八, 分束后的每一个子光束再被一分为八, 最终产生 64 个子光束. 其中 61 个子光束先经过相位控制系统再经过光纤放大器, 最终由微透镜阵列准直后在远场实现相干合成. 实验采用同向泵浦以减少耦合部分的复杂程度, 高精度相位控制由压电陶瓷动态调节来实现, 调节范围是波长的 18.4 倍. 该实验获得了平均功率为 1.5 kW、单脉冲能量为 500  $\mu$ J、脉冲宽度为 257 fs 的输出脉冲, 合成效率约为 50%. 该工作证明了平铺孔径相干合成在大数目光纤相干合成方面的可行性, 表明利用该技术的高功率飞秒光纤激光器有潜力用于加速粒子.

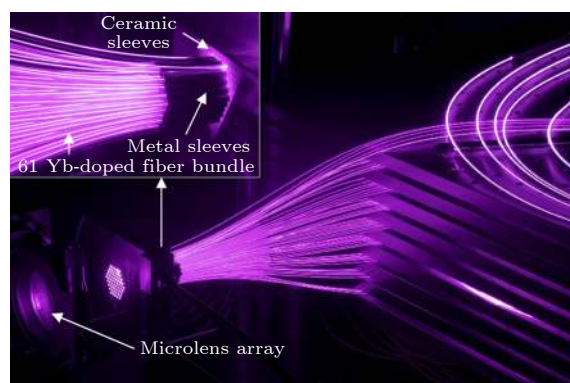


图 12 采用 61 根光纤合束的端面实物图<sup>[45]</sup>  
Fig. 12. Image of the end face of 61 fibers<sup>[45]</sup>.

#### 4 相干合成中的主动反馈控制技术

在飞秒光纤激光相干合成系统中, 各种因素造成的环境扰动 (如大气湍流、机械振动和激光系统中的热漂移等) 会明显影响光束的相位, 并降低合成效率. 在时间相干合成过程中, 可利用双折射晶体<sup>[29]</sup>、Sagnac 结构<sup>[46]</sup>等方法实现脉冲的被动分解与合成, 但使用时间延迟线的 DPA 系统<sup>[47]</sup>和与空间合成结合的 DPA 系统<sup>[34]</sup>大多采用主动相位反馈控制技术. 该技术通过检测光束间的相位差从而提取出误差信号, 然后将其反馈给相位控制单元. 相位控制单元一般为压电驱动的反射镜、声光调制器或电光调制器, 具体选择取决于相位扰动的幅度和频率范围等; 实验室环境下, 相位误差噪声一般在千赫兹范围内<sup>[48]</sup>. 主要的主动反馈控制技术包括 Hänsch-Couillaud (HC) 锁相技术<sup>[49]</sup>、单探测器

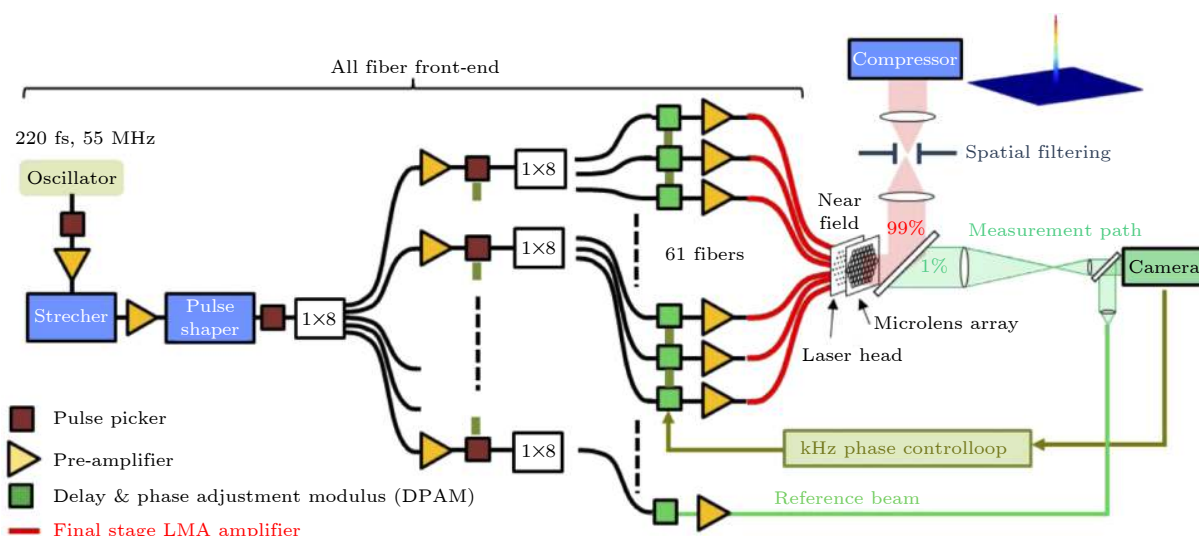


图 13 61 根光纤相干合成实验装置图<sup>[45]</sup>  
Fig. 13. Setup of 61 fibers coherent combination<sup>[45]</sup>.

电子频率标签技术 (LOCSET)<sup>[50]</sup>、随机并行梯度下降算法 (SPGD) 锁定技术<sup>[51]</sup> 和近年来新兴的强化学习技术<sup>[52]</sup> 等。

HC 锁相技术最早用于稳定激光的频率<sup>[49]</sup>, 后来在填充孔径相干合成实验中用来探测合成后脉冲的相位. HC 锁相装置基本原理见图 14: 合成后的光束通过光轴方向为  $45^\circ$  的  $1/4$  波片后经过 PBS 分为两束, 输入平衡探测器的两个端口 (PD A 和 PD B), 产生差分信号<sup>[53]</sup>. 差分信号进入相位控制单元后输出电压信号, 从而改变压电器件的位移以控制时间延迟进而锁定相位. HC 锁相技术从原理上决定了只适用于线偏振光的合成, 并且每两束激光的合成都需要一个 HC 装置, 即一个  $N$  路合成的激光系统, 最终需要  $N-1$  个 HC 装置. 因此, 随着合成路数增加, 基于 HC 锁相技术的合成系统复杂度显著上升. 2010 年, Tünnermann 教授课题组<sup>[30]</sup> 利用 HC 装置实现了两路飞秒光纤激光的相干合成, 合成效率高达 97%. 随着装置和技术上的不断改进, 2016 年该课题组实现了 8 路脉冲的相干合成<sup>[32]</sup>, 2018 年又在会议上报道了 16 路脉冲的相干合成<sup>[33]</sup>.

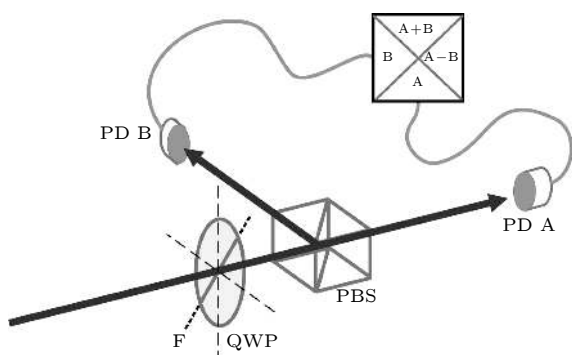


图 14 HC 装置示意图<sup>[53]</sup>  
Fig. 14. Setup of HC device<sup>[53]</sup>.

与 HC 锁相装置相比, LOCSET 锁相技术<sup>[50]</sup> 在结构上更加简单, 只需要在输出端设置一个探测器就能探测到所有通道的误差信号. 该方法基于不同调制频率的抖动和相干解调技术获得控制信号, 分为自参考调节和自同步调节两种. 自参考调节固定一个参考通道不变, 通过在其余  $N-1$  路中加入固定频率的低频振荡的方法获得反馈信号; 自同步调节则调制所有通道. 2016 年, Tünnermann 教授课题组利用 LOCSET 与 HC 技术相结合的方法将飞秒光纤激光器的单脉冲能量提高到 12 mJ<sup>[35]</sup>,

2018 年使用 LOCSET 技术将飞秒光纤激光器的平均功率提升到了 3.5 kW<sup>[28]</sup>, 2020 年又报道了使用 LOCSET 技术将平均功率提升到 10.4 kW<sup>[21]</sup>. 总之, 这种技术与 HC 技术相比, 具有更好的拓展性与更简单的实验装置, 同时具备良好的兼容性, 可以和 HC 等技术同时应用于一个系统.

另外一种应用较多的 SPGD 算法是在所有光束阵列中引入较小的随机相位抖动对系统进行扰动, 并根据扰动对最终合成功率的影响生成误差信号<sup>[51]</sup>. SPGD 算法多用于平铺孔径与多芯光纤的相干合成中. 2015 年, Ramirez 等<sup>[54]</sup> 报道了利用 SPGD 算法实现 7 核多芯光纤的相干合成. 2020 年, Fsaifes 等<sup>[45]</sup> 使用 SPGD 方法实现了 61 根光纤的平铺孔径相干合成, 合成效率达到 50%.

近年来, 人工智能技术迅猛发展, 与许多学科交叉融合. 在飞秒光纤激光器的相干合成中也出现了人工智能的身影, 比如将强化学习用于辅助实现锁相. 作为机器学习的一个分支, 强化学习主要关注智能体在环境中做出的反应, 最大程度地提高累计奖励的过程, 通常可用马尔可夫决策过程来描述. 2019 年, Tünnermann 和 Shirakawa<sup>[52]</sup> 将深度强化学习应用于填充孔径合成系统, 通过基于深度强化学习算法处理反馈误差信号. 系统最终会收敛到一个相位相对稳定的状态, 而且该技术具有良好的合成通道数扩展性.

## 5 总结与展望

飞秒光纤激光的一系列优势使其在许多领域发挥着越来越重要的作用. 时间相干合成技术能显著提高超短脉冲的单脉冲能量, 空间相干合成技术既能提高单脉冲能量又能提高平均功率, 多维度相干合成技术则可以结合空间与时间相干合成的优势. 在空间相干合成技术中, 随着分脉冲个数和空间合成路数的增加, 飞秒光纤激光系统的结构越来越复杂、空间体积越来越庞大. 针对这一问题, 基于多芯光纤的相干合成技术应运而生. 随着光纤设计和制作工艺的不断进步, 多芯光纤将在飞秒光纤激光相干合成领域发挥重要作用, 并且时域分脉冲放大技术与多芯光纤技术相结合具有巨大潜力. Tünnermann 教授课题组长期致力于发展飞秒光纤激光填充孔径相干合成技术, 已经将飞秒光纤激光的输出参数推到了毫焦级瓦瓦的水平, 为飞秒光

表 1 不同合成方法的最佳参数与特点

Table 1. The best parameters and characteristics of different combining methods.

技术名称	子类	截至目前最佳参数	特点
填充孔径	空间合成	$P = 10.4 \text{ kW}; E = 0.13 \text{ mJ}; \eta = 96\%$ <sup>[21]</sup>	有效提高系统的平均功率
	时间合成	—	有效提高脉冲能量
	多维度相干合成	$P = 674 \text{ W}; E = 23 \text{ mJ}; \eta = 71\%$ <sup>[20]</sup>	同时提高脉冲能量与平均功率
	多芯合成	$P = 205 \text{ W}; E = 20.5 \text{ }\mu\text{J}; \eta = 80\%$ <sup>[41]</sup>	减少空间体积, 简化实验装置
平铺孔径		$P = 1.5 \text{ kW}; E = 750 \text{ }\mu\text{J}; \eta = 48\%$ <sup>[45]</sup>	合成效率低, 但合成通道数潜力巨大

纤激光在强场物理方向的应用打下了坚实基础. 与填充孔径相干合成技术相比, 平铺孔径相干合成技术在系统放大结构和锁相检测装置方面可以大大简化. 目前, 基于平铺孔径相干合成技术的飞秒光纤激光器虽然还没有获得输出参数上的重大突破, 但是这种技术所支持的相干合成光纤路数理论上可高达上万路. 强大的系统扩展能力使得这种光纤激光系统有望产生焦耳量级的超短脉冲, 从而用于加速粒子. 表 1 汇总了几种合成方式的最佳参数与特点, 其中  $P$  为平均功率,  $W$  为脉冲能量,  $\eta$  为合成效率.

相位锁定技术是飞秒光纤激光相干合成的关键. 现阶段, 传统锁相技术不断发展, 新的锁相技术也在不断涌现. 锁相技术的发展趋势在于减少装置结构的复杂性以及提高相位锁定的精度. 随着计算机运算能力以及人工智能技术的不断进步, 在不远的未来, 飞秒光纤激光相干合成系统中锁相装置的复杂度将越来越低, 从而可以支撑更多路数的相干合成, 让飞秒光纤激光系统在单脉冲能量和平均功率这两个重要参数上获得进一步的突破.

## 参考文献

- [1] Esmiller B, Jacquellard C, Eckel H A, Wnuk E 2014 *Appl. Opt.* **53** 145
- [2] Leemans W, Chou W, Uesaka M 2011 *ICFA Beam Dyn. Newsl.* **56** 10
- [3] Abhari R S, Rollinger B, Giovannini A Z, Morris O, Henderson I, Ellwi S S 2012 *J. Micro/Nanolithogr. MEMS MOEMS* **11** 021114
- [4] Jauregui C, Limpert J, Tünnemann A 2013 *Nat. Photonics* **7** 861
- [5] Eidam T, Hanf S, Seise E, Andersen T V, Gabler T, Wirth C, Schreiber T, Limpert J, Tünnemann A 2010 *Opt. Lett.* **35** 94
- [6] Eidam T, Wirth C, Jauregui C, Stutzki F, Jansen F, Otto H J, Schmidt O, Schreiber T, Limpert J, Tünnemann A 2011 *Opt. Express* **19** 13218
- [7] Galvanauskas A, Fermann M, Harter D 1994 *Opt. Lett.* **19** 1201
- [8] Jauregui C, Stihler C, Limpert J 2020 *Adv. Opt. Photonics* **12** 429
- [9] Zervas M N 2019 *Opt. Express* **27** 19019
- [10] Stutzki F, Jansen F, Otto H J, Jauregui C, Limpert J, Tünnemann A 2014 *Optica* **1** 233
- [11] Eidam T, Rothhardt J, Stutzki F, Jansen F, Hädrich S, Carstens H, Jauregui C, Limpert J, Tünnemann A 2011 *Opt. Express* **19** 255
- [12] Wan P, Yang L M, Liu J 2013 *Opt. Express* **21** 29854
- [13] Cheng Y, Liu Y, Xu L X 2007 *Infrared and Laser Engineering* **36** 163 (in Chinese) [程勇, 刘洋, 许立新 2007 *红外与激光工程* **36** 163]
- [14] Wang X L, Zhou P, Li R T, Ma P F, Tao R M, Ma Y X, Xu X J, Liu Z J 2017 *Chin. J. Laser* **44** 0201001 (in Chinese) [王小林, 周朴, 栗荣涛, 马鹏飞, 陶汝茂, 马阎星, 许晓军, 刘泽金 2017 *中国激光* **44** 0201001]
- [15] Mourou G A, Hulin D, Galvanauskas A 2006 *AIP Conf. Proc. Varenna, Italy, September 19–24, 2005* pp152–163
- [16] Veldkamp W B, Leger J R, Swanson G J 1986 *Opt. Lett.* **11** 303
- [17] Hassan M T, Luu T T, Moulet A, Raskazovskaya O, Zhokhov P, Garg M, Karpowicz N, Zheltikov A, Pervak V, Krausz F 2016 *Nature* **530** 66
- [18] Mourou G, Brocklesby B, Tajima T, Limpert J 2013 *Nat. Photonics* **7** 258
- [19] Chang G, Wei Z 2020 *Science* **23** 101101
- [20] Stark H, Buldt J, Müller M, Klenke A, Tünnemann A, Limpert J 2019 *Opt. Lett.* **44** 5529
- [21] Müller M, Aleshire C, Klenke A, Haddad E, Légaré F, Tünnemann A, Limpert J 2020 *Opt. Lett.* **45** 3083
- [22] Hanna M, Guichard F, Zaouter Y, Papadopoulos D N, Druon F, Georges P 2016 *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys* **49** 062004
- [23] Klenke A, Müller M, Stark H, Kienel M, Jauregui C, Tünnemann A, Limpert J 2018 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **24** 1
- [24] Yang K W, Hao Q, Zeng H P 2018 *Infrared and Laser Engineering* **47** 103004 (in Chinese) [杨康文, 郝强, 曾和平 2018 *红外与激光工程* **47** 103004]
- [25] Wang Y F, Li L, Zhao L M 2018 *Infrared and Laser Engineering* **47** 803010 (in Chinese) [王郁飞, 李雷, 赵鹭明 2018 *红外与激光工程* **47** 803010]
- [26] Su R T, Zhou P, Zhang P F, Wang X L, Ma Y X, Ma P F 2018 *Infrared and Laser Engineering* **47** 0103001 (in Chinese) [粟荣涛, 周朴, 张鹏飞, 王小林, 马阎星, 马鹏飞 2018 *红外与激光工程* **47** 0103001]
- [27] Liu Z, Jin X, Su R, Ma P, Zhou P 2019 *Science China Information Sciences* **62** 41301
- [28] Müller M, Klenke A, Steinkopff A, Stark H, Tünnemann A, Limpert J 2018 *Opt. Lett.* **43** 6037
- [29] Zhou S, Wise F W, Ouzounov D G 2007 *Opt. Lett.* **32** 871
- [30] Seise E, Klenke A, Limpert J, Tünnemann A 2010 *Opt. Express* **18** 27827



- [31] Klenke A, Seise E, Limpert J, Tünnermann A 2011 *Opt. Express* **19** 25379
- [32] Müller M, Kienel M, Klenke A, Gottschall T, ShestaeV E, Plötner M, Limpert J, Tünnermann A 2016 *Opt. Lett.* **41** 3439
- [33] Mtieller M, Klenke A, Stark H, Buldt J, Gottschall T, Tünnermann A, Limpert J 2018 *Fiber Lasers XV: Technology and Systems* San Francisco, California, United States, February, 26, 2018 p1051208
- [34] Kienel M, Müller M, Klenke A, Eidam T, Limpert J, Tünnermann A 2015 *Opt. Lett.* **40** 522
- [35] Kienel M, Müller M, Klenke A, Limpert J, Tünnermann A 2016 *Opt. Lett.* **41** 3343
- [36] Zhou T, Ruppe J, Zhu C, Hu I N, Nees J, Galvanauskas A 2015 *Opt. Express* **23** 7442
- [37] Breittkopf S, Wunderlich S, Eidam T, ShestaeV E, Holzberger S, Gottschall T, Carstens H, Tünnermann A, Pupeza I, Limpert J 2016 *Appl. Phys. B* **122** 297
- [38] Astrauskas I, Kaksis E, Flöry T, Andriukaitis G, Pugžlys A, Baltuška A, Ruppe J, Chen S, Galvanauskas A, Balčiūnas T 2017 *Opt. Lett.* **42** 2201
- [39] Yang B, Liu G, Abulikemu A, Wang Y, Wang A, Zhang Z 2020 *CLEO: Applications and Technology* Washington DC, United States, May 10–15, 2020 pJW2F.28
- [40] Fang X H, Hu M L, Liu B W, Chai L, Wang C Y, Zheltikov A M 2010 *Opt. Lett.* **35** 2326
- [41] Klenke A, Müller M, Stark H, Stutzki F, Hupel C, Schreiber T, Tünnermann A, Limpert J 2018 *Opt. Lett.* **43** 1519
- [42] Aleshire C, Steinkopff A, Jauregui C, Klenke A, Tünnermann A, Limpert J 2020 *Opt. Express* **28** 21035
- [43] Heilmann A, Le Dortz J, Daniault L, Fsaifes I, Bellanger S, Bourderionnet J, Larat C, Lallier E, Antier M, Durand E 2018 *Opt. Express* **26** 31542
- [44] Brignon A 2013 *Coherent Laser Beam Combining* (New Jersey: John Wiley & Sons) pp130–132
- [45] Fsaifes I, Daniault L, Bellanger S, Veinhard M, Bourderionnet J, Larat C, Lallier E, Durand E, Brignon A, Chanteloup J C 2020 *Opt. Express* **28** 20152
- [46] Guichard F, Zaouter Y, Hanna M, Mai K L, Morin F, Hönninger C, Mottay E, Georges P 2015 *Opt. Lett.* **40** 89
- [47] Kienel M, Klenke A, Eidam T, Hädrich S, Limpert J, Tünnermann A 2014 *Opt. Lett.* **39** 1049
- [48] Augst S J, Fan T, Sanchez A 2004 *Opt. Lett.* **29** 474
- [49] Hansch T, Couillaud B 1980 *Opt. Commun.* **35** 441
- [50] Shay T M 2006 *Opt. Express* **14** 12188
- [51] Vorontsov M A, Carhart G W, Ricklin J C 1997 *Opt. Lett.* **22** 907
- [52] Tünnermann H, Shirakawa A 2019 *Opt. Express* **27** 24223
- [53] Groß P, Boller K J, Klein M E 2005 *Phys. Rev. A* **71** 043824
- [54] Ramirez L P, Hanna M, Bouwmans G, El Hamzaoui H, Bouazaoui M, Labat D, Delplace K, Pouysegur J, Guichard F, Rigaud P 2015 *Opt. Express* **23** 5406

INVITED REVIEW

# Recent progress of coherent combining technology in femtosecond fiber lasers\*

Wang Jing-Shang<sup>1)</sup> Zhang Yao<sup>1)2)</sup> Wang Jun-Li<sup>2)</sup>  
Wei Zhi-Yi<sup>1)</sup> Chang Guo-Qing<sup>1)†</sup>

1) (*Key Laboratory of Optical Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

2) (*School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China*)

( Received 12 October 2020; revised manuscript received 24 November 2020 )

## Abstract

Widely employed in fundamental research, industrial processing, and biomedicine, femtosecond fiber lasers exhibit many attractive features such as high average power, good heat dissipation, excellent beam quality, and compact footprint. Coherent combining technology can effectively suppress the detrimental nonlinear and thermal effects in the fiber amplifiers, and therefore further increase the output pulse energy and average power of femtosecond fiber lasers. In this article, we mainly discuss different coherent combining techniques in high-power ultrafast Yb-fiber laser systems and the relevant phase-locking methods. We believe that the advent of new coherent combining techniques will further improve the average power and pulse energy of femtosecond fiber laser systems, thereby opening up some new research areas.

**Keywords:** ultrashort pulse, fiber laser, coherent combination, high average power

**PACS:** 42.55.Wd

**DOI:** [10.7498/aps.70.20201683](https://doi.org/10.7498/aps.70.20201683)

---

\* Project supported by the Key-Area R&D Program of Guangdong Province, China (Grant No. 2018B090904003), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11774234, 91850209), and the Program of Development of a New Multiphoton Microscope for Large Depth and High Precision Imaging of Three-dimensional Biological Models, China (Grant No. YJKYYQ20190034).

† Corresponding author. E-mail: [guoqing.chang@iphy.ac.cn](mailto:guoqing.chang@iphy.ac.cn)