

中国激光

光纤激光相干合成的研究历程与发展趋势： 基于文献引用的视角(特邀)

周朴*, 常洪祥, 粟荣涛, 王小林, 马阎星

国防科技大学前沿交叉学科学院, 湖南 长沙 410073

摘要 从文献引用的视角全面回顾总结了光纤激光相干合成二十余年的研究历程。按照学术发展初期、学术高速发展期、学术发展平缓期和技术发展关键期等 4 个阶段, 分别介绍了光纤激光相干合成的代表性成果, 分析并总结了学术水平和影响力较为突出的文献, 梳理了光纤激光相干合成从概念提出到实际应用的演进脉络, 研判了未来发展趋势。

关键词 激光光学; 相干合成; 光纤激光; 研究历程

中图分类号 TN248 **文献标志码** A

DOI: 10.3788/CJL231480

1 引言

由于热效应、光纤端面损伤、非线性效应、模式不稳定等限制因素, 在提升单束激光输出功率的同时保持良好的光束质量遇到了挑战。利用阵列光纤激光进行相干合成是可行的解决方案之一, 成为了激光领域的研究前沿和热点之一^[1-2]。自从光纤激光相干合成的第一篇论文^[3]发表以来, 经过 30 年的发展, 科研人员提出了多种物理原理和技术方案, 取得了一系列重要成果, 目前已实现千束规模光束的相干合成和数十千瓦的输出功率^[4-5], 超过了目前单束光纤激光的最高输出功率值。

实现相干合成的技术方案主要可以分为主动相位控制和被动相位控制两大类^[6], 目前代表性成果大都是基于主动相位控制实现的, 相比较而言, 研究内容广、队伍多、潜力大, 此前已有综述文章从单项关键技术角度对基于主动相位控制的光纤激光相干合成进行了全面介绍^[2, 6-8]。基于主动相位控制的相干合成系统的研发, 涉及光学工程、控制科学与工程、电子科学与技术、计算机科学与技术、大气科学、材料科学与工程等多个学科, 随着技术的进步和学科的交叉融合, 近年来多种高性能的光纤激光相干合成系统和装置不断涌现, 为激光应用带来了全新的方法和工具^[9]。本文从文献引用的新角度, 梳理了光纤激光相干合成的发展脉络, 研判了其发展趋势, 旨在加速光纤激光相干合成系统的研发并拓展其应用范围。

2 文献引用角度的简要分析

本部分以 2000 年 1 月至 2023 年 12 月初期间 Web of Science 核心合集数据库收录的相关文献作为依据, 分析了主动相位控制相干合成相关领域的发文量与引文量信息。在早期, 对于相干合成这一概念没有统一的命名标准, 研究人员的表述不尽相同, 如 coherent addition、coherently phased、coherent fiber array、coherently combined、coherent beam combining、coherent combining、coherent combination、phase locking array 等。此外, 在文献检索时, 还考虑到两个方面的因素: 一是 20 世纪 90 年代, 光纤激光相干合成以基于光纤耦合器的被动相位控制等形式为主^[8-10], 由于这一方案目前尚未取得突破性进展, 故未列入检索范围; 二是半导体激光相干合成实际上也是当时的研究热点。因此, 为了尽可能地囊括相关文献, 同时减少被动相位控制、半导体激光相干合成方面文献的“干扰”, 选取较为复杂的关键词组合 (<https://gitee.com/changhongxiang/Appendix/raw/master/%E6%A3%80%E7%B4%A2%E5%85%B3%E9%94%AE%E8%AF%8D.pdf>) 进行检索。尽管限定词对每年发文量的检索结果有一定的影响, 但通过多次检索发现, 无论限定词数量取多少, 在光纤激光主动相干合成领域中整体发文量与引文量的变化趋势不变。基于关键词组合, 在 Web of Science 核心合集数据库进行检索, 截至 2023 年 12 月初, 光纤激光主动相干合成的发文量和引文量如图 1 所示。

图 1 中柱状图为 2000 年到 2023 年期间光纤激光

收稿日期: 2023-12-06; 修回日期: 2023-12-27; 录用日期: 2023-12-29; 网络首发日期: 2024-01-05

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFB3606000)、湖南省创新群体项目(2019JJ10005)

通信作者: *zhoupu203@163.com

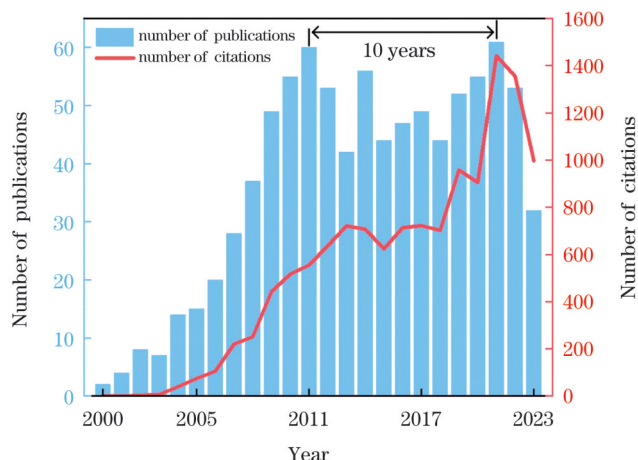


图 1 光纤激光主动相位控制相干合成的发文量和引文量
Fig. 1 Numbers of publications and citations in coherent beam combining of fiber lasers based on active phase control

主动相位控制相干合成的发文情况,曲线为这期间相关文献的引用情况。由图 1 可知:在 2005 年之前,发文量较少;2003 年到 2005 年期间发文量连续增加,2006 年之后发文量呈指数快速增长,直到 2011 年出现第一个峰值;2011 年之后,发文量出现下降趋势;2015 年到 2017 年期间发文量连续增加,2018 年之后又出现增长趋势,直到 2021 年,再次出现发文量峰值。与此同时,引文量整体呈逐渐增长趋势,并且其峰值首次出现的时间晚于发文量。在文献检索中,相关文献内容既包含了光纤激光相干合成科学与工程问题的研究,也包含了将光纤激光相干合成作为工具的应用研究。若以引文量作为光纤激光相干合成的应用研究情况的参考,发文情况可以理解为光纤激光相干合成自身的研究发展情况和应用研究情况的综合。引文量 2021 年出现的峰值与发文量的峰值出现了重叠,这意味着引文量的增加也是 2021 年相关学术论文发文量出现峰值的重要原因。

进一步统计了发文量检索结果中研究单位的国别情况,如图 2 所示。需要说明的是,由于国际合作,同一篇文章的研究单位国别会出现一对多的情况,总的比重之和要大于 100%。

因此,可以将 2000 年到 2023 年期间光纤激光相干合成的发展大致分为以下几个阶段(图 3):2005 年之前为学术发展初期,在这一阶段以被动相干合成研究为主,主动相干合成逐渐产生;2006 年至 2011 年为学术高速发展期,发文量呈指数增加并达到峰值;2012 年至 2016 年为学术发展平缓期,相关发文量的增长趋势;2017 年之后为技术发展关键期,引文量开始大幅上升。以上分段只是大概反映了光纤激光相干合成技术的发展与应用历程,实际发展过程并无严格的时间界限。作为多学科交叉的综合体,光纤激光相干合成

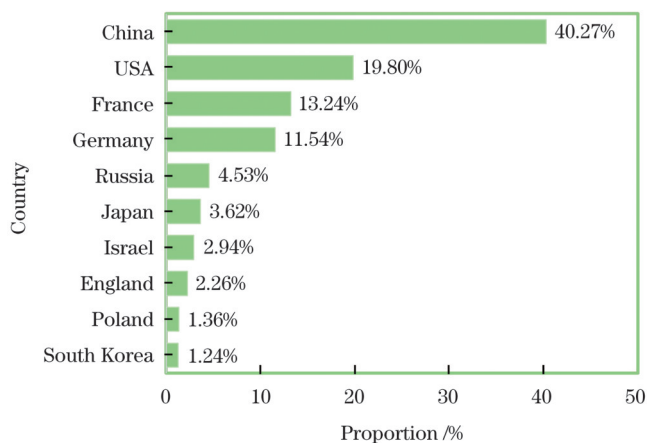


图 2 检索结果中研究单位的国别分布情况
Fig. 2 Country distributions of research units in search results

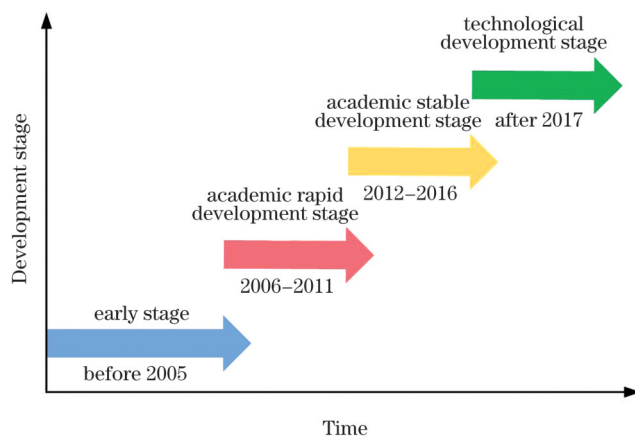


图 3 光纤激光主动相位控制相干合成的发展阶段
Fig. 3 Development stage in coherent beam combining of fiber lasers based on active phase control

本身也随着其他科学技术的发展在各个阶段都有新的面貌,如人工智能技术在近几年光纤激光相干合成研究中占据了相当一部分比重。

在检索到的文献中,被引次数较多的 50 篇文献的研究单位和国别情况如图 4 所示,引用情况的详细内容请见 <https://gitee.com/changhongxiang/Appendix/raw/master/%E9%99%84%E5%BD%95A.pdf> (截至 2023 年 12 月初)。需要说明的是,其中两篇被动相干合成的文献^[12-13]在研究初期对相干合成领域起到了重要推动作用,匹配到了相关关键词,在统计结果中也予以显示。在检索过程中,有几篇文章虽然匹配到了检索关键词,但在内容上与光纤激光相干合成主题有一定差距,因而没有纳入。由于采用的检索方式和检索范围不同,同一篇文章的被引次数可能会存在一定差异。这些被引频次(这里仅计入 Web of Science 核心合集数据库的数据)较高的文献,年均被引次数都显著高于期刊当年的影响因子值,表明这些文献普遍具有较高的学术价值或学术影响力。

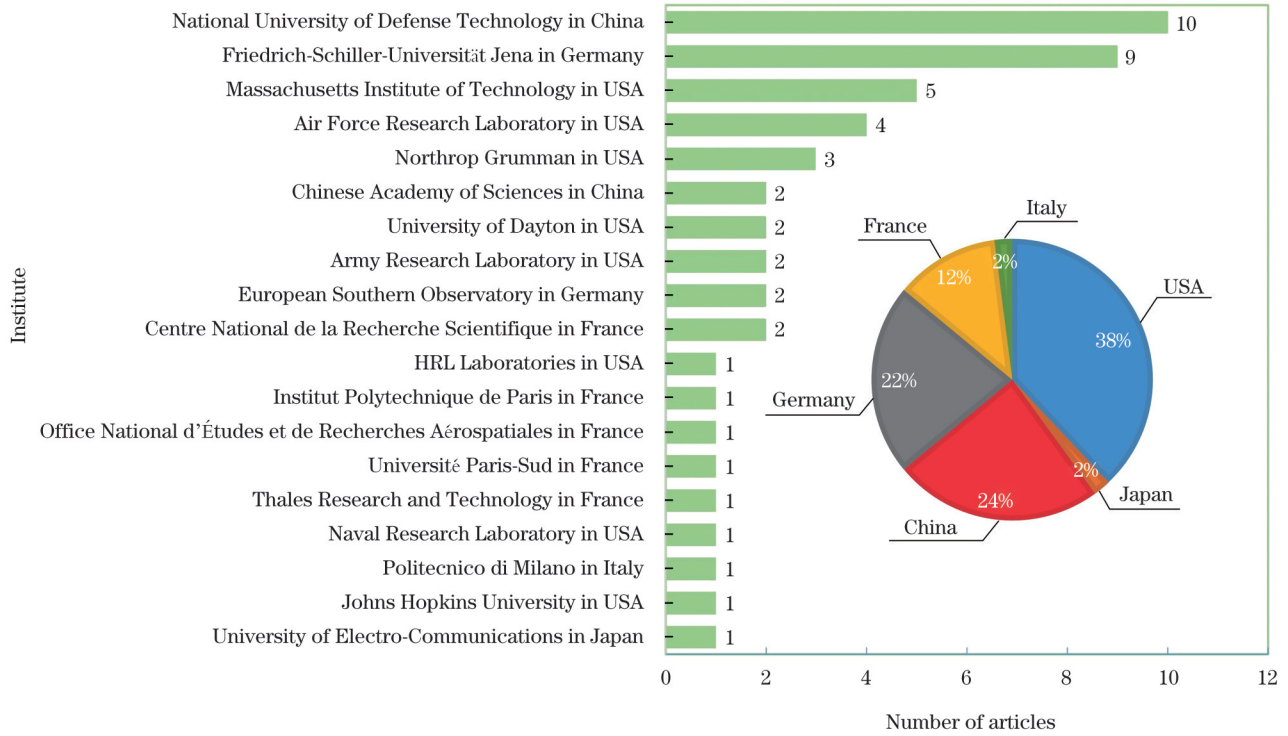


图 4 被引次数较多的 50 篇文献的研究单位和国别情况

Fig. 4 Research units and countries of top 50 literatures cited more frequently

3 发展历程

根据文献检索结果, 光纤激光相干合成相关论文的总量已经达到了近千篇(若计入 Web of Science 核心合集数据库未收录的期刊文献或者会议集等, 总量应超过该数值), 内容上涵盖理论分析、新方法、新指标以及应用研究等类型。本节根据图 2 划分的阶段, 按照时间线和研究内容进行聚类, 对涉及到的典型文献进行综述, 梳理光纤激光相干合成的研究历程与现状。

3.1 学术发展初期

在 20 世纪 90 年代到 21 世纪初期, 相关研究以被动相位控制相干合成为主, 即光纤器件发展驱动的腔

内被动相位控制^[3,10-13], 最早的文献可以追溯到 30 年前的 1993 年^[3]。受到当时相位控制器件发展水平的限制, 光纤激光被动相干合成结构往往不包含主动相位控制器件, 而是依靠能量耦合等物理机制实现各子光束之间的相位自行同步, 有的文献也将这种方法称为“自组织相干合成”。这方面具有代表性的研究成果都是在 21 世纪初取得的: 2002 年, 日本电气通信大学利用全光纤自组织方法实现了 2 束激光的被动相干合成, 合成效率达到 93.6%^[12]; 2003 年, 法国国家科学研究中心利用全光纤自组织方法实现了 4 束激光的被动相干合成, 系统结构如图 5 所示, 合成效率达到 95%^[13]。

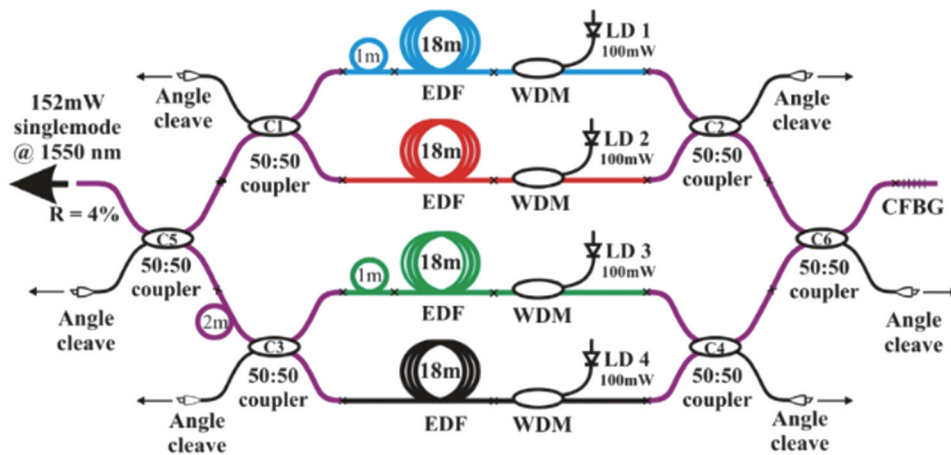


图 5 4 路全光纤自组织合成示意图^[13]

Fig. 5 Schematic of self-organization combination of four all-fiber lasers^[13]

近年来,被动相位控制相干合成的代表性成果不多:一是合成路数普遍较少,二是合成系统的输出功率不高。此外,还存在一些理论上的问题尚未完全解决,比如合成效率随合成路数的增加而快速降低,等等。尽管如此,该技术方案在早期还是对该领域的发展起到了重要的推动作用。以参考文献[12]和[13]为例,Web of Science 核心合集数据库的统计结果显示其引用次数分别为 222 次和 165 次(截至 2023 年 12 月初)。

3.2 学术高速发展期

相位同步是实现光纤激光相干合成的关键步骤之一,光纤耦合的主动移相器件和光学相干探测技术的发展^[14]是主动相位控制相干合成取得成功的关键。在学术高速发展期,铌酸锂电光调制器件等逐渐成熟,取代了声光调制器件,研究人员提出了多种相位控制方法,实现了主动相位控制的基本前提条件。在此基础上,随着单纤技术的发展,相干合成系统的输出功率逐步提高,其合成效率引起了广泛关注,研究人员提出了多种用于提高合成效率的结构。同时,研究人员还对光纤激光相干合成技术的扩展应用进行了探索。

2003 年前后,美国麻省理工学院、美国 Northrop Grumman 公司和英国 QinetiQ 公司等利用主动声光移相器件和外差探测方法分别实现了光纤激光主动相干合成^[15-17]。其中,麻省理工学院实现的 2 路 10 W 量级外差干涉相干合成系统的原理图如图 6 所示,两路激光分别经声光移频器移频并与参考光发生外差干涉,然后利用外差干涉信号提取相位信息并进行反馈控制,实现相位噪声的补偿。2004 年,美国 Northrop Grumman 公司报道了基于该结构的 7 路合成,合成功率率为 155 W^[18];2006 年又将合成功率提升到 470 W^[19]。这种外差探测和主动相位控制结构使通过相干合成获得高功率光纤激光输出成为可能,促进了光纤激光相干合成的发展。需要说明的是,2006 年是光纤激光相干合成代表性文献大量涌现的一年,除了获得 470 W 高功率输出这一标志性的成果外,在后期被广泛使用的抖动相位控制(LOCSET)法、首个大阵元(48 束)相干合成结果等等,也都是这一年提出或实现的,后文将详细介绍。这也是本文将 2006 年划入学术高速发展期的重要原因。

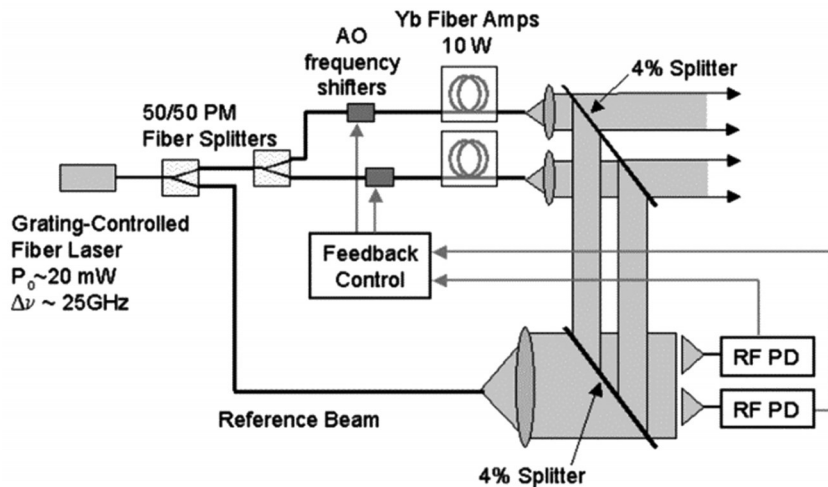


图 6 外差干涉法结构示意图^[16]

Fig. 6 Schematic of heterodyne interference method^[16]

2005 年,美国 Maryland 大学将自适应光学中的随机并行梯度下降(SPGD)算法引入光纤激光相干合成领域,实现了 7 路光纤激光的相干合成^[20-21];并在 2007 年研制了自适应光纤准直器,首次在光纤激光相干合成中引入光束指向控制^[22](图 7),进一步对自适应光纤准直阵列进行了分析^[23]。2009 年, Maryland 大学基于 SPGD 算法和研制的自适应光纤准直器对 7 路光纤激光的相位、倾斜和功率一致性进行了控制^[24];同年,国防科技大学利用 SPGD 算法进行了光束偏转的应用^[25]。与图 6 所示的外差干涉法相比,SPGD 算法是一种无模型的优化算法,将合成后的光强作为评价标准,不再需要探测器阵列即可实现多束激光相位探测。流程简单、方便使用、硬件要求较低等优点使得 SPGD 算法成为后续研究中被广泛使用的算法之一。

2006 年,美国空军实验室等提出了无需额外参考光束的 LOCSET 方法,该方法的结构示意图如图 8 所示^[26-29]。LOCSET 方法源于外差干涉法,与图 6 所示的外差干涉法不同的是:外差干涉法是在近场提取干涉信号,不同子光束之间的拍频信号频率相同,通过对比子光束与参考光可得到相位;而 LOCSET 方法将干涉提取位置移动到远场,此时子光束之间会互相干涉,通过对子光束施加不同的调制频率,再对干涉信号进行信号处理,可实现不同子光束相位信息的提取。2009 年,美国空军实验室利用 LOCSET 方法实现了 5 束激光的合成,合成功率率为 725 W^[30]。尽管 LOCSET 方法在相位控制复杂程度方面与外差干涉方法区别不大,但是在相位探测方面,仅使用一个探测器就能实现多束激光的相位探测,简化了光学系统结构。由于探

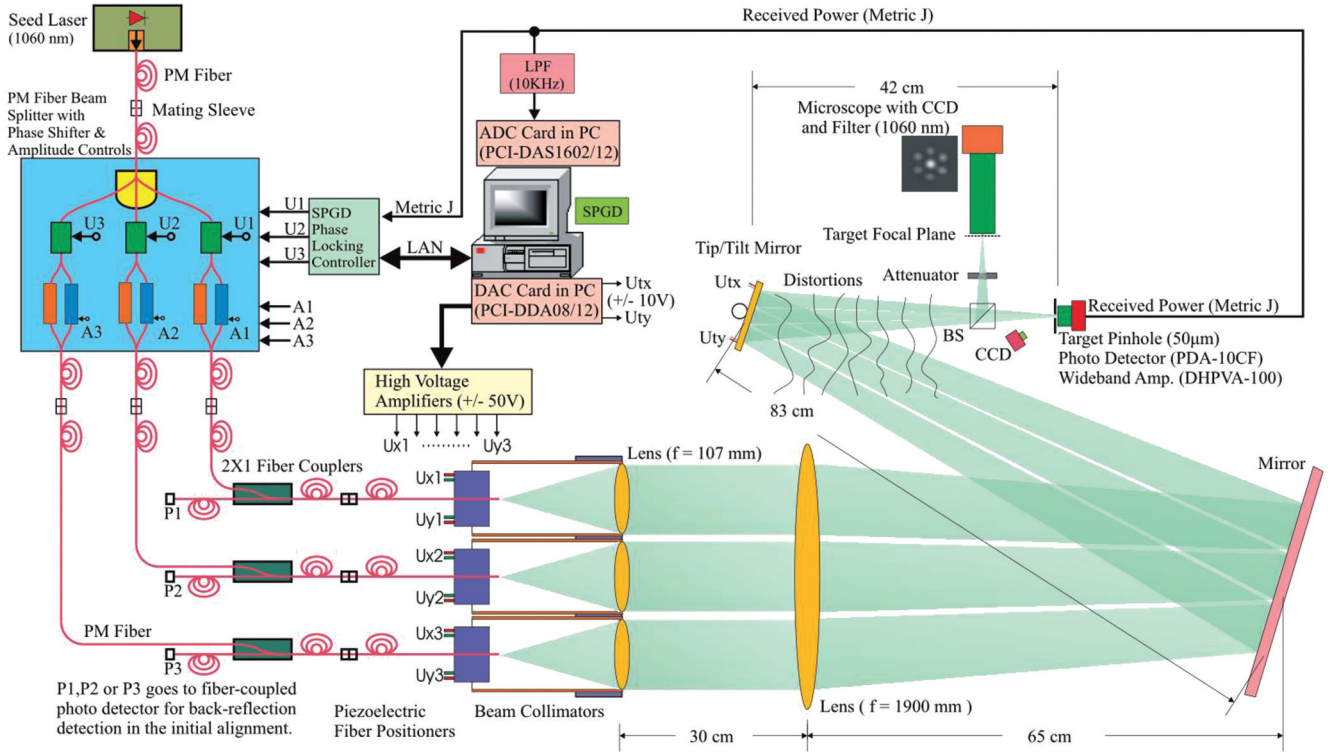


图 7 SPGD 方法的结构示意图^[22]
Fig. 7 Schematic of SPGD method^[22]

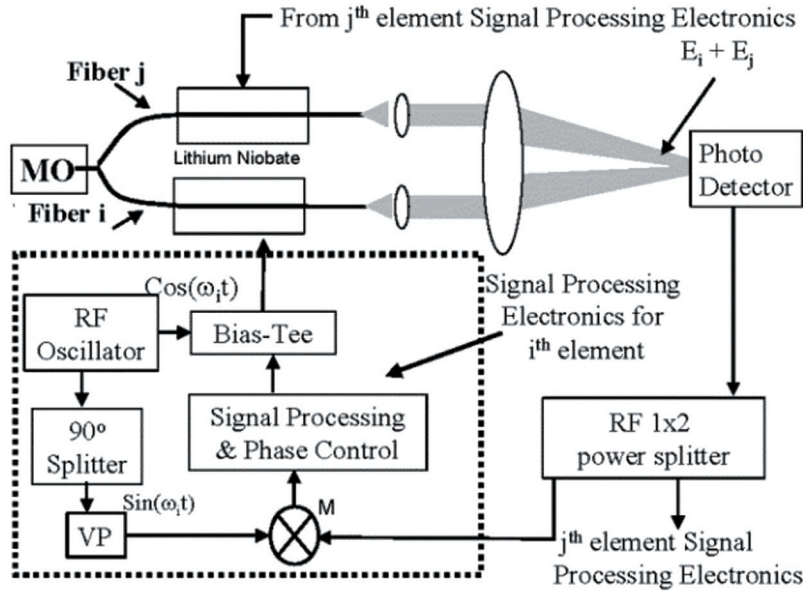


图 8 LOCSET 方法的结构示意图^[28]
Fig. 8 Schematic of LOCSET method^[28]

测结构简单、相位控制精度高等优点,特别是在共孔径相干合成这一特殊结构中,LOCSET方法成为广泛使用的相位控制方法之一。

随着面阵探测器件的成熟,利用空间光束干涉条纹测量方法实现相位探测成为可能。2006年,美国麻省理工学院利用图9所示的结构,实现了48束激光的相干合成^[31]。与外差干涉方法不同,干涉条纹测量方法利用空间干涉条纹的位置信息提取光学相位,而外

差干涉方法是利用时间干涉拍频信号的相位信息提取光学相位。干涉条纹测量方法与外差干涉方法在结构上相同,而面阵探测器简化了阵列探测结构以及后续相位提取流程,但也依赖于相关器件的发展水平,如面阵探测器的分辨率、靶面大小、刷新率以及图像采集处理相关计算设备的性能。随着高帧率高分辨率面阵探测器、高性能计算设备以及人工智能技术的发展,基于空间干涉/衍射的相干合成相位控制方法在近几年再

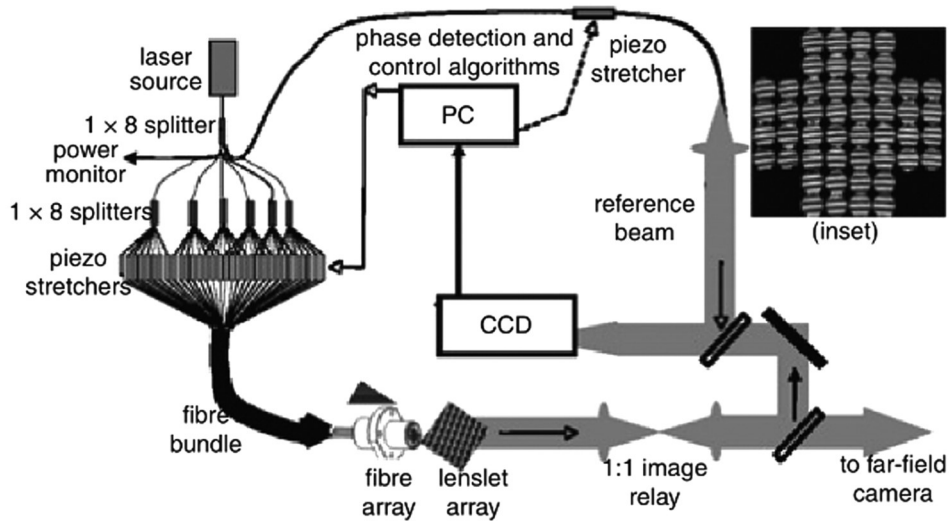


图 9 干涉条纹测量方法的结构示意图^[31]

Fig. 9 Schematic of measurement method based on interference fringes^[31]

次“焕发生机”。

以上研究结果都得到了广泛的引用与应用。表 1 是根据相关学术检索整理出的几种基本相位控制方法的引用情况(包含期刊、会议、报告、学位论文等引用,

截至 2023 年 12 月初)。可以看出,外差干涉、LOCSET、SPGD 和干涉条纹测量这几种在学术高速发展期提出的相位控制方法,从不同的角度解决了阵列光纤激光相干合成相位控制的基本问题。

表 1 几种基本相位控制方法相关文献的引用情况

Table 1 Several basic phase control methods and their citations

Year	Institute	Method	Reference	Number of citations
2004	Massachusetts Institute of Technology in USA	Heterodyne interference	[16]	418
2005	University of Maryland in USA	SPGD	[21]	112
2006	Air Force Research Laboratory in USA	LOCSET	[27]	273
2006	Massachusetts Institute of Technology in USA	Interference measurement	[31]	77
2009	National University of Defense Technology in China	SPGD	[25]	249

国内相关研究的起步相对较晚。2006 年,国防科技大学利用外差干涉法实现了 3 路 1 W 光纤激光的合成^[32-33];同年也提出了 SPGD 算法在光纤激光相干合成中的应用^[34],2009 年利用 SPGD 算法实现了 4 路 60 W 的合成功率^[35]。在此期间,中国科学院光电技术研究所、哈尔滨工业大学等单位利用外差干涉法实现了多路激光相干合成^[36-38]。

在 2006 年至 2011 年期间还有多种相位控制方法被提出,如表 2 所示。根据这些方法的物理原理,大致可以分为四种形式:近场时间干涉、近场空间干涉、远场时间干涉和远场空间干涉。其中,在远场空间干涉方法中,同一干涉光强图样对应的相位分布并不唯一,直到近几年人工智能技术的发展解决了相关技术难题,其才逐渐被采用。

表 2 2006 年至 2011 年期间其他相位控制方法的相关文献

Table 2 Literatures on other phase control methods from 2006 to 2011

Year	Institute	Method	Type	Reference
2010	Harbin Institute of Technology in China	Hill-climbing	Far-field interference in time domain	[39]
2010	Thales in France	Quadriwave lateral shearing interferometry	Near-field interference in spatial domain	[40]
2010	National University of Defense Technology in China	Single frequency dithering	Far-field interference in time domain	[41]
2011	National University of Defense Technology in China	Sine-cosine single-frequency dithering	Far-field interference in time domain	[42]

在这期间,研究人员也演示了不同的光纤激光相干合成结构,如表 3 所示。可以看出,由于光纤激光相

干合成研究的不断深入和合成功率的不提高,需要进一步解决合成效率、热处理等方面的问题。研究人

员提出了多种可以提高理论合成效率的结构,而理论合成效率极限与子光束之间的间距有关,提高理论合成效率的改进结构主要是合束装置。

图 10 所示为 2010 年美国 Lockheed Martin 公司基于自成像波导实现的 4 路光纤激光相干合成,通过微透镜阵列和成像波导将合成效率提高到 80%^[46]。

表 3 2006 年至 2011 年期间提出的光纤激光相干合成结构

Table 3 Proposed fiber laser coherent beam combining structures from 2006 to 2011

Year	Institute	Structure	Reference
2008	Northrop Grumman in USA	Diffractive optical element co-aperture	[43]
2010	Lockheed Martin in USA	Polarization beam splitter co-aperture	[44]
2010	Friedrich-Schiller-Universität Jena in Germany	Polarization beam splitter co-aperture	[45]
2010	Lockheed Martin in USA	Re-imaging waveguide	[46]
2010	University of Dayton / Army Research Laboratory in USA	Internal beam-tail interference	[47-48]
2011	Paris Sud University in France	Beam splitter co-aperture	[49]

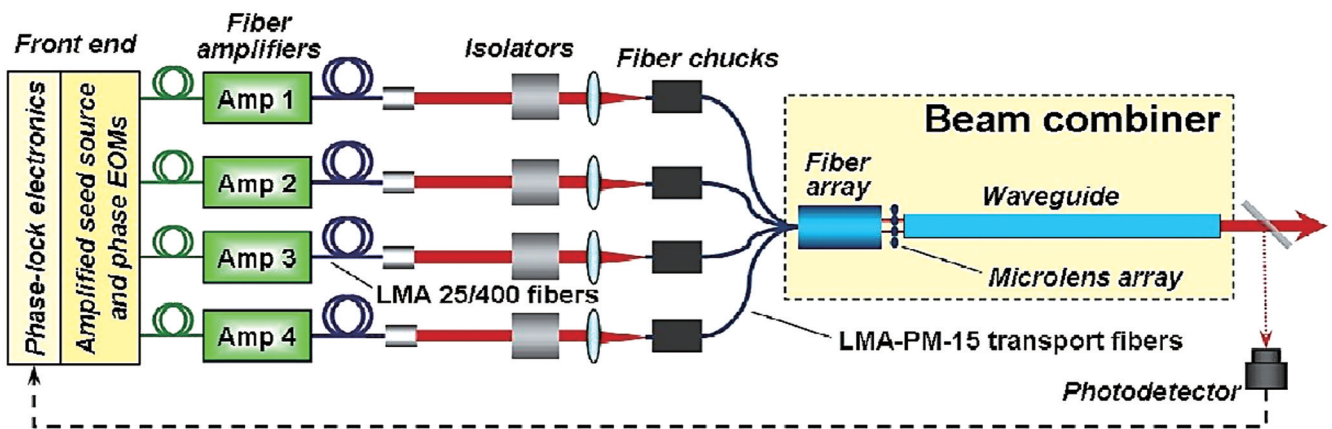


图 10 基于自成像波导的相干合成系统^[46]

Fig. 10 Coherent beam combining structure based on re-imaging waveguide^[46]

要实现接近 100% 的合成效率,各子光束需要在空间上完全重叠,以实现共孔径输出。共孔径输出可以通过衍射(DOE)器件、偏振分光器件(PBS)和强度分光器件(BS)实现。事实上,基于光路可逆原理,任何可以实现分光的器件都可以实现共孔径合成。

2008 年美国 Northrop Grumman 公司利用 DOE 和外差干涉法对 5 束激光进行相干合成,实现了 91% 的合成效率^[43](图 11)。值得注意的是,在该结构中相位探测是分孔径进行的,而最终合成是利用 DOE 器件实现的,显现了混合孔径合成的雏形。

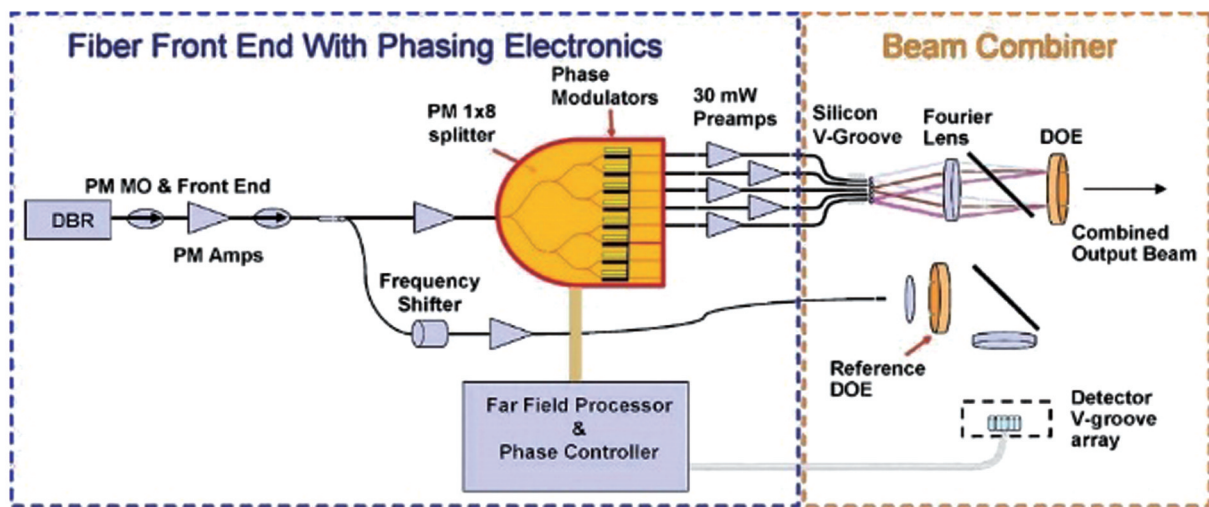


图 11 基于 DOE 的相干合成系统^[43]

Fig. 11 Coherent beam combining structure based on DOE^[43]

2011年,法国 Paris-Sud 大学利用 BS 和 LOCSET 方法实现了图 12 所示的两路超快激光相干合成,合成效率为 90%^[49]。当利用 BS 实现共孔径相干合成时,

合成效率对输入激光的功率和 BS 分光比之间的匹配有一定的要求^[50]。

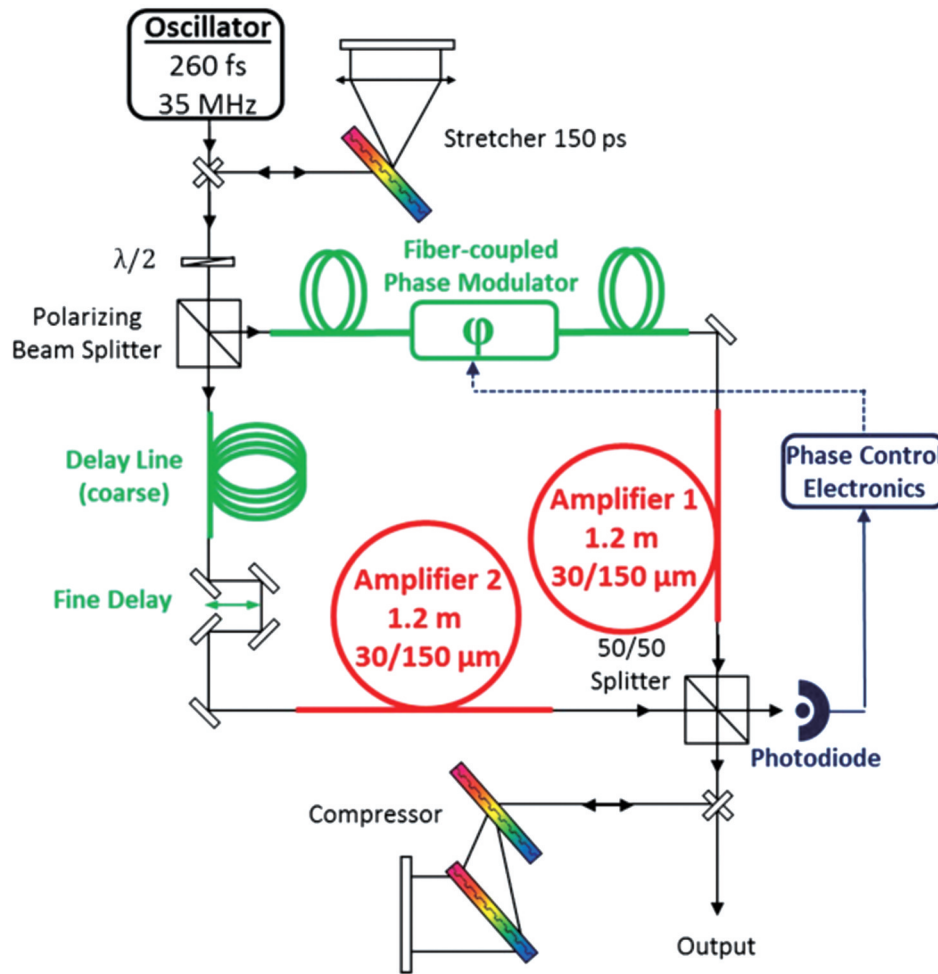


图 12 基于 BS 的相干合成^[49]

Fig. 12 Coherent beam combining structure based on BS^[49]

2010年,美国 Lockheed Martin 公司利用图 13 所示的 PBS 和 LOCSET 方法实现了 94% 的合成效率^[44]。2010年,德国耶拿大学利用 PBS 和 Hänsch-Couillaud (HC) 探测方法实现了合成效率为 97% 的超快激光相干合成^[45]。基于 PBS 进行相干偏振合成,利用了正交偏振态的相干叠加,光束之间的功率差异对合成效率没有影响。而 HC 探测方法由于探测复杂程度随着路数的增加而增加,逐渐被其他方法替代,本文不再进行详细说明。

2010年,美国 Dayton 大学与美国陆军实验室联合提出了一种用于内部相位探测的合束装置,如图 14 所示。在平铺孔径阵列激光发射之前就能实现相位的探测与控制,用于解决大孔径阵列和高功率情况下的分束探测问题^[47-48]。

光纤激光相干合成的应用研究主要集中在远距离传输上^[51-54]。早在 2005 年,美国 Maryland 大学就提出利用相干接收阵列提高自由空间光通信的接收效率^[52]。2009 年和 2010 年,欧洲南方天文台基于级联

BS 结构对光纤拉曼激光进行共孔径相干合成并作变频处理,分别获得了 25 W 和 50 W 的 532 nm 连续激光,可用于激光导星^[53]。2009 年,美国海军空战中心利用偏振片调节阵列激光的偏振态,实现了 6 束光纤激光柱矢量合成和光场调控^[55]。2011 年,法国航空实验室将基于 BS 的光纤激光共孔径相干合成应用到 1.5 μm 窄线宽激光器中,利用 LOCSET 方法实现了 97% 的合成效率,该方法可以进一步应用于激光测风雷达并拓宽探测范围^[54]。

在这一阶段,研究人员在光纤激光相干合成指标上取得了一批标志性成果。除了前文介绍的 2006 年涌现的成果外,2011 年也有大量实例。在高平均功率输出方面:国防科技大学利用单抖动法得到了 9 路 1.08 kW 的合成功率,合成功率首次超过了千瓦量级^[56];美国麻省理工学院利用 SPGD 算法实现了 8 路 4 kW 的输出功率^[57];美国空军实验室利用 LOCSET 方法实现了 16 路 1.4 kW 的输出功率^[58]。以上输出功

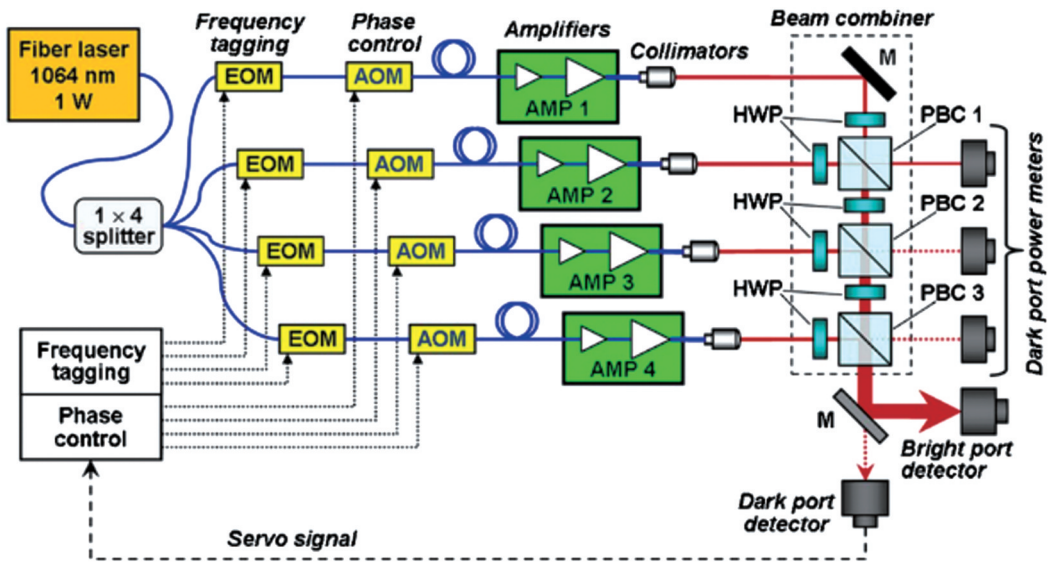


图 13 基于 PBS 的相干合成系统^[44]

Fig. 13 Coherent beam combining structure based on PBS^[44]

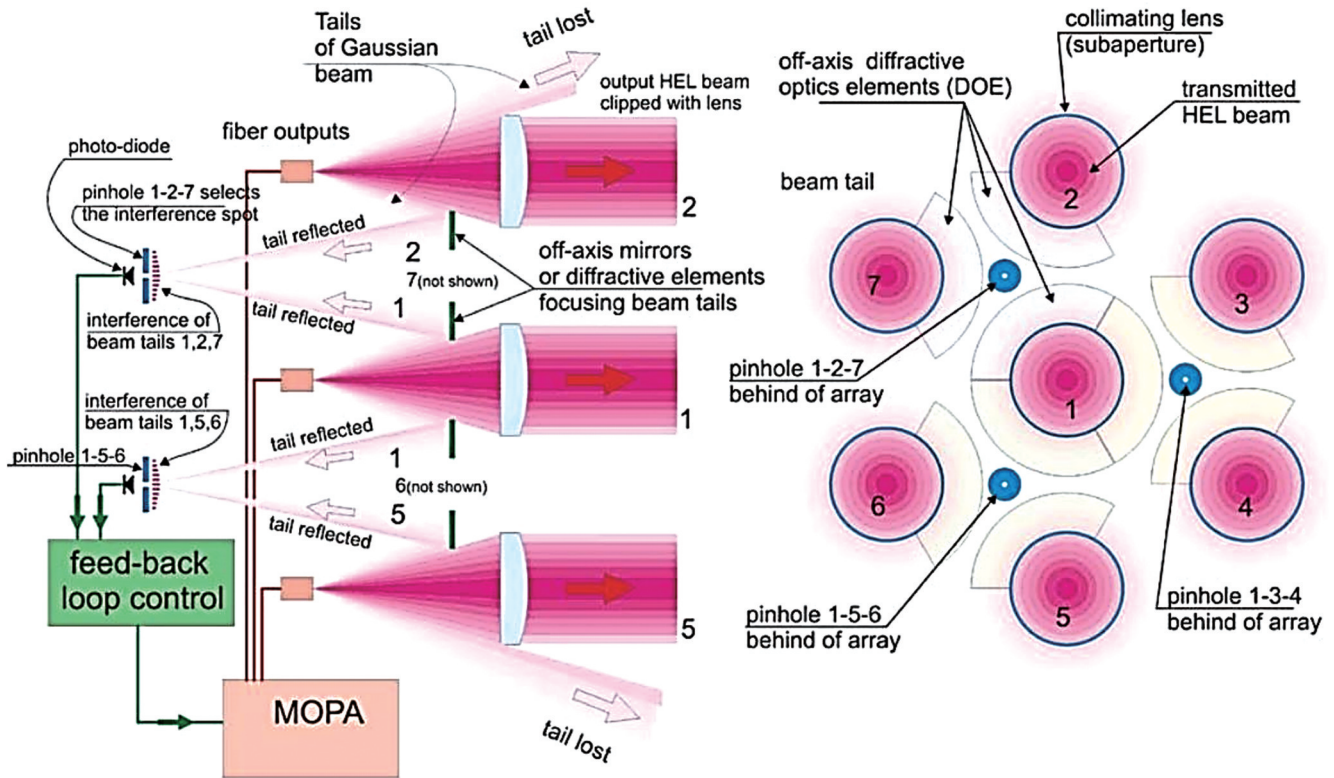


图 14 内部相位探测相干合成系统^[48]

Fig. 14 Coherent beam combining structure based on internal phase detection^[48]

率大幅提升的重要原因是窄线宽激光器的光谱展宽对非线性效应的抑制^[57-58]，在此后的高功率光纤激光相干合成中，研究人员普遍采用线宽展宽的窄线宽激光器^[59]。在大脉冲能量输出方面，德国耶拿大学通过两路飞秒激光合成实现了 3 mJ 单脉冲能量，脉宽为 470 fs^[60]。在大阵元合成方面，法国 Thales 公司利用四波剪切干涉方法，实现了 64 路光束合成^[61]。在远距离传输方面，美国 Dayton 大学在上述研究基础上，实现了 7 路 7 km 光纤激光目标在回路 (TIL) 相干合成^[62]。

从 2006 年到 2011 年期间，光纤激光相干合成实现了高速发展，很多成果直到今天都堪称经典。仔细分析上述成果，我们初步总结出快速发展的原因，主要包括关键器件的成熟、相位控制方法的提出以及合成结构的优化。

在关键器件方面，光纤耦合的声光、电光调制器及光纤拉伸器等相位执行器件的成熟是推动光纤激光主动相干合成技术产生和发展的重要因素；光电探测器件的成熟促进了其进一步发展，如基于面阵探测器件实现了 64 路阵列规模的相位控制；自适应光纤准直器

的研制为光束指向自动控制和远距离传输提供了支撑;光纤激光器输出功率的提高进一步促进了高功率光纤激光相干合成的发展。

在相位控制方法方面,研究人员基于相干探测原理或优化算法,提出了多种行之有效的阵列激光相位控制方法,解决了相干合成相位控制的基本问题,为后续发展奠定了基础。

在合成结构方面,这一阶段的研究成果大多采用平铺孔径相干合成结构。为了进一步提高合成效率,研究人员提出并验证了多种合成结构,它们在随后的光纤激光相干合成发展中起到了重要作用。

3.3 学术发展平缓期

在这一阶段,脉冲光纤激光相干合成取得了长足

的进步,主要包括:理论合成效率更高的共孔径相干合成得到了广泛关注;为进一步增加合成路数,研究人员提出了路数扩展方法;以提高合成效率为目的,研究人员对影响合成效率的多种参数的控制开展了研究。此外,基于光纤激光相干合成研究,研究人员对利用相干合成获得超高能量和功率更具信心,提出了多种大科学装置构想。

在脉冲激光相干合成领域,研究人员将研究重点放在提高飞秒激光能量、压缩脉冲宽度以及提高合成效率上^[63-65]。表 4 所示为在这期间脉冲激光相干合成取得的典型成果,研究人员利用多种共孔径结构实现了多路脉冲激光时空合成和光谱合成,以获得更高的脉冲能量和更短的脉冲。

表 4 2012 年至 2016 年期间脉冲光纤激光相干合成的部分研究成果

Table 4 Partial research results of pulsed fiber laser coherent beam combining achieved from 2012 to 2016

Year	Institute	Structure	Method	Pulse duration	Power	Energy	Efficiency	Reference
2012	University of Michigan in USA	PBS co-aperture	LOCSET	524 fs	58.6 mW		93.9%	[66]
2012	National University of Defense Technology in China	Tiled aperture	SPGD	~3.5 ns	800 W			[67]
2013	Friedrich-Schiller-Universität Jena in Germany	PBS co-aperture	HC	670 fs	530 W	1.3 mJ	93%	[68]
2013	University of Michigan in USA	Coherent spectral combining	LOCSET	403 fs	257 mW		76.3%	[69]
2013	Paris Sud University in France	Coherent spectral combining	LOCSET	130 fs	10 W		86%	[70]
2014	Friedrich-Schiller-Universität Jena in Germany	PBS co-aperture	HC	200 fs	230 W	5.7 mJ	88%	[71]
2014	National University of Defense Technology in China	PBS co-aperture	Single frequency dithering	~480 ps	88 W		90%	[72]
2016	Friedrich-Schiller-Universität Jena in Germany	PBS co-aperture	HC	260 fs	1 kW	1 mJ	91%	[73]
2016	Friedrich-Schiller-Universität Jena in Germany	PBS co-aperture	LOCSET	262 fs	700 W	12 mJ	78%	[64]

其中德国耶拿大学实现了 8 路飞秒光纤激光的时空合成,如图 15 所示,脉冲能量突破了 12 mJ,平均功率也达到了千瓦量级,为飞秒光纤激光的能量提升奠定了重要基础^[64]。

共孔径结构具有更高的理论合成效率,除了在脉冲光纤激光相干合成领域中得到了广泛应用,在连续光纤激光合成中也取得了突破性的功率提升结果。表 5 所示为在此期间利用共孔径结构实现的合成功率超过数千瓦的研究成果。

为了实现更多路数的光纤激光相干合成,研究人员还探索了合成路数提升方法。表 6 为该时期研究人员提出的相关方法,在形式上主要为原有方法的改进,在结构上体现为级联方式。随着面阵探测器的发展,干涉条纹测量方法的相位控制带宽达到了 kHz 量级,

有望实现超过 10^4 束激光的阵列规模。

随着合成路数和功率的不断提升,研究人员意识到仅通过相位控制不能满足高合成效率的要求^[85],故提出了光程、偏振、指向等多种参数的控制方法。而在此之前,这些参数往往是通过人工调节,在高功率和大数目情况下难以适用。

早在 2012 年,美国 Northrop Grumman 公司就光程、指向、偏振与相位的同步控制开展了理论和实验研究,并将 SPGD 方法和 LOCSET 方法进行了统一^[86-88]。这些研究工作在共孔径相干合成多参数的控制中起到了重要作用,尤其是在近些年飞秒光纤激光相干合成中得到了直接应用^[89]。与此同时,其他国内外研究单位也分别开展了相应工作。2012 年,国防科技大学利用光电探测器和相机实现了 2 路激光的相位和倾斜控

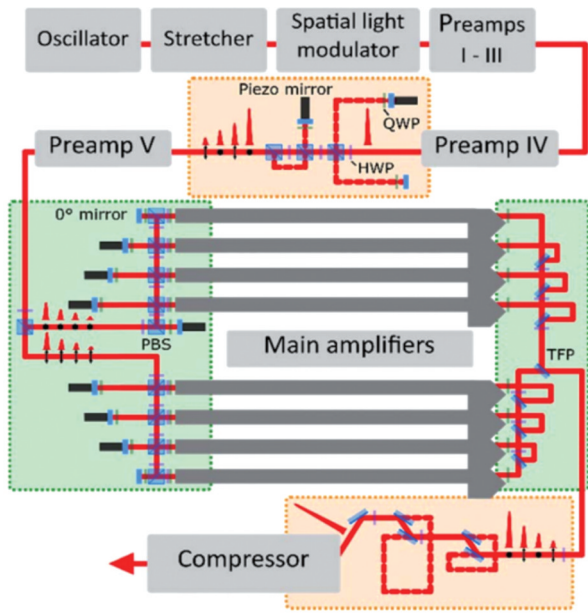


图 15 12 mJ 飞秒脉冲的相干合成示意图^[64]

Fig. 15 Schematic of coherent beam combining of 12 mJ femtosecond pulse^[64]

制^[90]。2013年,中国科学院光电技术研究所利用不同的评价函数和SPGD算法实现了7路光纤激光的相位和指向控制^[91]。2013年,日本大阪大学利用光电探测器对以及位置敏感型光电探测器(PSD)分别进行了相位和指向控制^[92]。

随着光纤激光相干合成研究的不断深入,相关技术取得重大进展,研究人员对获得高能量、高功率光纤激光有了更大的信心,提出了一些大科学装置构想。早在2006年,美国国防高级研究计划局(DARPA)就启动了APPLE项目,用于研发高功率光纤激光定向能系统;2010年又启动了“圣剑(Excalibur)”项目,期望实现100 kW输出功率,并于2014年进行了7 km远距离传输演示;而在2012年,美国Nufern公司就已经为“圣剑”项目提供了46路千瓦级光纤放大器^[62, 93-95]。

2013年,法国巴黎综合理工学院、耶拿大学等单位联合提出国际相干放大网络项目,如图16所示,旨在实现数千束光纤激光的相干合成以获取能量为10 J、重复频率>10 kHz的飞秒脉冲激光,并将其用于下一代粒子加速器^[96]。

表 5 2012年至2016年期间共孔径相干合成的功率提升情况

Table 5 Power scaling of co-aperture coherent beam combining from 2012 to 2016

Year	Institute	Structure	Method	Power	Efficiency	Reference
2012	Northrop Grumman in USA	DOE co-aperture	LOCSET	885 W	68%	[74]
2012	Massachusetts Institute of Technology in USA	DOE co-aperture	Hill-climbing	2.5 kW	79%	[75]
2014	Northrop Grumman in USA	DOE co-aperture	LOCSET	3 kW	80%	[76]
2016	National University of Defense Technology in China	PBS co-aperture		2 kW	94.5%	[77]
2016	Air Force Research Laboratory in USA	DOE co-aperture	LOCSET	6 kW	82%	[78]

表 6 2012年至2016年期间提出的路数提升方法

Table 6 Channel scaling methods proposed from 2012 to 2016

Year	Institute	Method	Number of achieved combining beams	Number of expected combining beams	Reference
2014	Thales in France	kHz interference measurement	16	10 ⁴	[79]
2014	Office National d'Études et de Recherches Aérospatiales in France	Orthogonal coding	3	10 ³	[80]
2015	Korea Advanced Institute of Science and Technology in Korea	Cascaded multi-dithering	16	10 ⁴	[81]
2015	Université de Limoges in France	Phase-intensity mapping	16		[82]
2016	China Academy of Engineering Physics in China	Multilevel phase dithering	30		[83]
2016	National University of Defense Technology in China	Cascaded SPGD	16		[84]

2013年,美国加州大学提出了定向能小行星防御计划(DE-STAR),如图17所示,利用光纤激光器组成的相控阵获得高能激光输出,利用该输出蒸发小行星表面,产生反推力,改变其轨道^[97]。

2015年,美国物理学家霍金提出了Breakthrough Starshot项目^[98],图18所示为该项目的概念图,项目旨在利用激光相干合成获取100 GW高能激光,驱动纳米飞行器飞往半人马座^[99-100]。

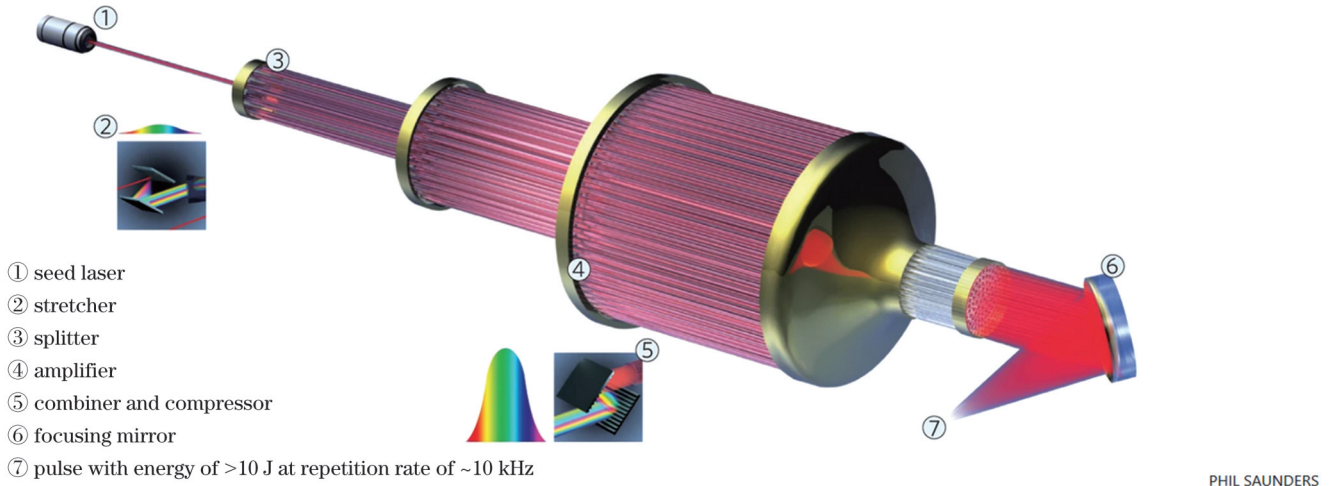


图 16 国际相干放大网络示意图^[96]

Fig. 16 Schematic of international coherent amplification network^[96]

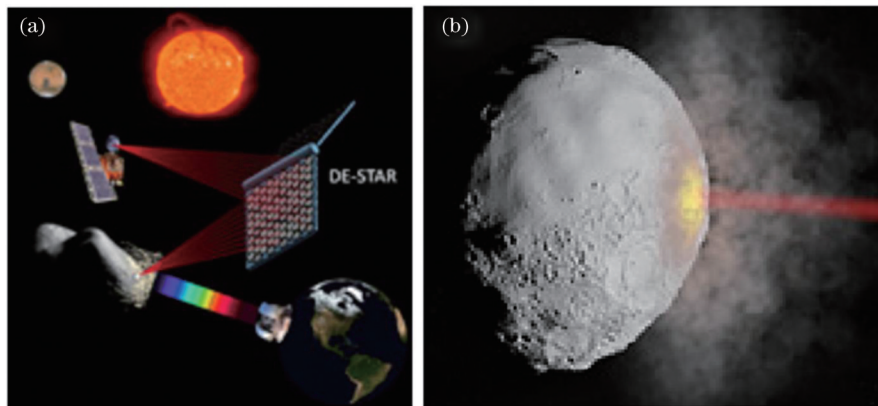


图 17 DE-STAR 概念图^[97]。(a)在轨 DE-STAR 执行多项任务的概念图；(b)蒸发小行星表面示意图

Fig. 17 Concept diagrams of DE-STAR^[97]. (a) Concept diagram of orbiting DE-STAR engaged in multiple tasks; (b) evaporation of asteroid surface

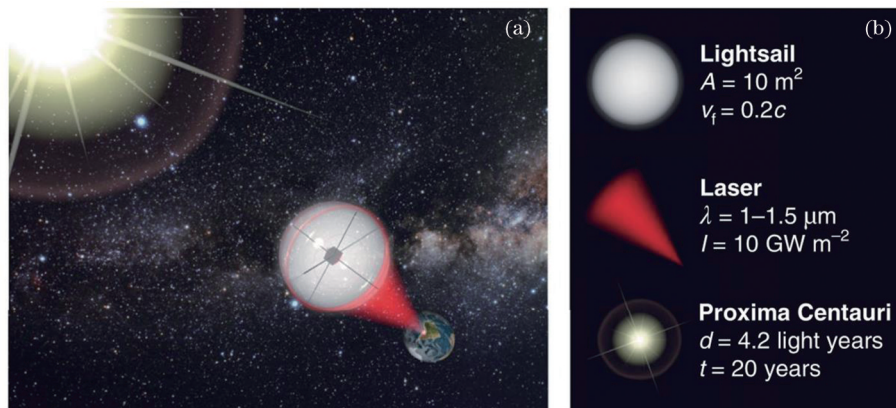


图 18 Breakthrough Starshot 概念图^[100]。(a)激光相控阵推动纳米飞船向半人马座比邻星移动；(b)图例和参数

Fig. 18 Concept diagrams of Breakthrough Starshot^[100]. (a) Phased array of lasers will propel nanocraft towards Proxima Centauri; (b) legends and parameters

2016 年, *Nature Material* 杂志刊登了“Extreme Light”一文,报道了极端光设施(ELI)项目,旨在实现超强激光,推动基础科学发展,认为相干合成技术是实现下一代高功率峰值功率和高平均功率激光系统的手段之一^[101]。

根据以上研究结果,可以总结出,在这期间光纤激

光相干合成学术逐步走向成熟,它的标志是科研人员普遍设立更高的技术指标并提出大型科研项目。在指标上,通过相干合成获得的激光功率和能量不断提高,期望的合成路数也呈量级增长。尽管一些大型科研项目在短时间内不能实现,但对相干合成技术的发展起到

牵引促进作用。如国际相干放大网络提出后,根据学术检索结果可知,该研究成果被引用 409 次(包含期刊、会议、报告、学位论文等引用,截至 2023 年 12 月),研究人员为实现数千路激光的相干合成提出了多种方法。

3.4 技术发展关键期

在这一时期,光纤激光相干合成技术日趋成熟,具体表现在:合成路数和合成功率等指标全面取得实际突破,平铺孔径相干合成结构在光场调控中得到了广泛应用,人工智能等新兴学科发展并被引入相干合成领域,相干合成结构和方法继续得到改进,商用产品不断出现,等等。

在合成指标方面,研究人员基于以往的研究不断刷新指标,实现了数百束和十多千瓦的激光合成,在超快光纤激光相干合成中获得了数十 mJ 的脉冲能量。在合成路数方面,2020 年,法国巴黎综合理工学院利用干涉条纹测量方法和 SPGD 算法实现了 61 路飞秒光纤激光合成^[102]。2020 年,国防科技大学利用 SPGD 方法首次实现了超过 100 束光纤激光的相干合成^[103],随后在 2022 年和 2023 年利用干涉条纹测量方法分别

进行了 400 束规模和千束规模的光束合成验证^[5,104]。2021 年,美国劳伦斯-伯克利实验室利用衍射器件通过模式表征进行了 81 束光束合成验证^[105]。2021 年,法国 Limoges 大学利用准强化学习实现了 100 束光束合成^[106]。在合成功率方面,2017 年,国防科技大学利用相干偏振合成结构实现了 5 kW 高效合成^[107]。2018 年,德国耶拿大学利用 BS 共孔径结构和 LOCSET 方法分别进行了相位、光程、指向控制,实现了平均输出功率为 3.5 kW 的超短脉冲合成^[108],并于 2020 年将功率提升到 10.4 kW^[89]。2020 年,以色列 CIVAN 公司利用分孔径结构实现了 16 kW 输出功率和动态光束整形^[109]。2020 年,国防科技大学利用分孔径结构实现了 7.1 kW 合成功率^[110],2021 年又将合成功率提升到 20 kW^[4]。在脉冲能量方面,2019 年,德国耶拿大学利用脉冲分割放大和时空相干合成方式,实现了 23 mJ 的单脉冲能量,脉冲宽度为 235 fs^[111];2023 年又将合成路数从 12 路提高到 16 路,将单脉冲能量提高到 32 mJ,合成结构如图 19 所示^[112]。除此之外,2021 年,耶拿大学将飞秒脉冲 PBS 共孔径相干合成从 8 路扩展

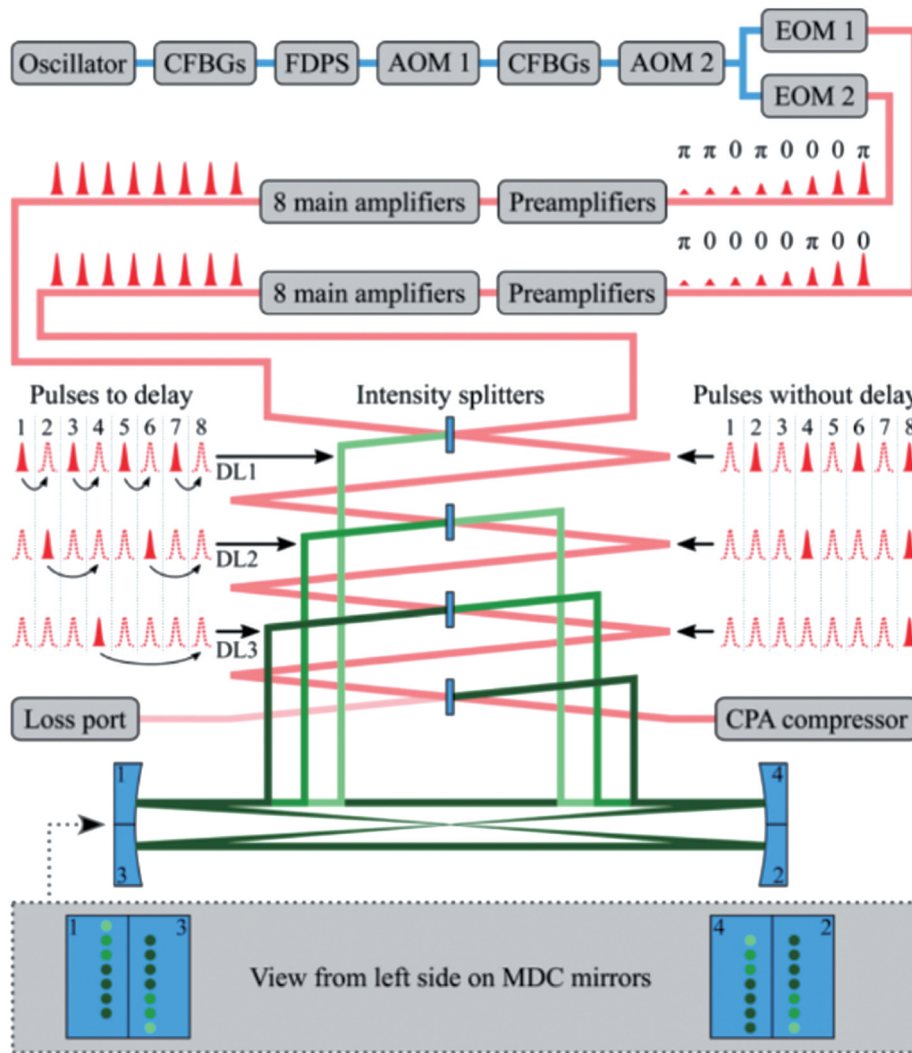


图 19 32 mJ 飞秒脉冲相干合成系统^[112]

Fig. 19 Coherent beam combining system of 32 mJ femtosecond pulse^[112]

到 16 路, 获得单脉冲能量为 10 mJ、脉宽为 120 fs 的脉冲激光^[113]。2023 年, 美国劳伦斯-伯克利实验室利用相干光谱合成结构, 实现了 3 路部分光谱重叠的皮秒脉冲的相干合成, 并将合成后的宽谱激光脉宽压缩到 42 fs^[114]。在远距离传输方面, 2021 年, 法国 Paris-Saclay 大学利用 LOCSET 方法实现 7 路瓦量级光纤激光阵列在 1 km 大气环境中的传输与合成^[115]。同年, 瑞典国防研究局也利用 SPGD 算法实现了 4 路激光 870 m 的远距离传输^[116]。2022 年, 中国科学院光电技术研究所实现了 57 孔径的光纤激光 2 km 目标在回路合成^[117]。

在光场调控方面, 得益于平铺阵列结构的优势与结构光场研究的发展, 研究人员利用相干合成技术实现了阵列激光整体波前相位的控制, 进而实现了光场调控。2019 年, 国防科技大学利用 6 束激光产生轨道角动量(OAM)光束^[118]。2020 年, 以色列 CIVAN 公司实现了 32 束激光合成和光斑动态成形^[109]。2021 年, 法国巴黎综合理工学院利用 61 束激光阵列演示了远场光强操控, 获得了 OAM 光束, 同时也提出了相干合成结构的数字激光器概念^[119]。2021 年, 西安电子科技大学利用光电探测器阵列和 SPGD 算法, 通过激活不同位置的光电探测器, 实现了 64 束激光阵列的光束偏转^[120]。利用平铺阵列结构对远场光强分布的调控作用, 俄罗斯科学院提出了混合孔径相干合成的概念, 用于提高平铺阵列的合成效率^[121]。2021 年, 德国通快公司利用混合孔径结构, 实现了合成效率 > 90% 的光束偏转^[122-123]。2023 年, 法国巴黎综合理工学院通过对远场光斑进行调控, 将能量集中在数个旁瓣中, 提高了平铺阵列的合成效率^[124]。

在学科交叉方面, 随着人工智能技术的发展, 2019 年至今已有十几篇与光纤激光相干合成相关的研究工作^[106, 125-141]。2019 年, 国防科技大学较早将人工智能技术引入相干合成领域^[131]; 日本电气通信大学、美国劳伦斯-伯克利实验室、中国科学院上海光学精密机械研究所、中国科学院光电技术研究所等也开展了相应的研究工作^[106, 125-141]。为了解决远场干涉图样对应的近场相位分布不唯一的问题, 研究人员提出了利用衍射器件、散射器件和非焦平面等进行测量的方法^[106, 131, 142]。人工智能技术的引入填补了相干合成相位控制方法中远场空间干涉方法的空白。

除了与人工智能技术进行学科交叉外, 研究人员在非线性和频率变换方面, 利用相干合成技术取得了许多代表性研究成果: 法国航空实验室利用相干合成技术, 在周期性极化铌酸锂(PPLN)晶体和偏硼酸钡(BBO)晶体倍频后, 实现了 2 路二次谐波的相干合成, 分别获得了 775 nm 和 532 nm 的合成激光^[143]; 立陶宛物理科学与技术中心利用 4 路光纤激光和 LiB₃O₅ 晶体实现了 29 W、532 nm 绿光输出^[144]; 日本大阪大学利用

8 路光纤激光泵浦和合束技术产生了 600 W 绿光和 300 W 紫外光^[145]; 法国航空实验室利用 1 μm 标准相位调制器件对 PPLN 晶体进行了三波混频处理, 产生的 3.4 μm 中红外激光被用于相位控制, 实现了相干合成^[146-147]; 北京应用物理与计算数学研究所提出利用相干合成技术实现中红外光学参量振荡器(OPO)的理论^[148], 等等。2023 年, 以色列 CIVAN 公司联合 Fraunhofer-IWS、西门子等单位实现了 7 路光纤激光倍频后的合成, 获得了 500 W 的单模 532 nm 绿光^[149]。

在半导体激光相关方面, 2019 年, 法国 Paris-Saclay 大学利用 3 路锥形半导体放大器和 PPLN 晶体实现了 2 W、488 nm 激光输出^[150]; 2023 年, 又利用两路锥形放大器合成获得了波长为 828 nm、单脉冲能量为 10.3 μJ 的激光, 用于提高激光雷达的遥感探测分辨率^[151]。

在自由空间光通信方面, 2019 年, 法国 Cailabs 公司提出了利用多平面光转换(MPLC)实现光束合成的方法, 该方法可用于通信速率为 Tbit/s 量级的通信链路^[152]。2023 年, 法国 Paris-Saclay 大学利用相干合成结构和 LOCSET 方法实现了实验室环境下速率为 10.66 Gbit/s 的自由空间光通信^[153]。2023 年, 法国 Thales 利用 BS 共孔径结构合成的 80 W 激光进行了速率为 25 Gbit/s 的自由空间光通信, 误码率增加不到 1 dB^[154]。2023 年, 中国科学院光电技术研究所利用 SPGD 算法实现了空间光通信链路中的湍流校正^[155-156]。

在太赫兹生成方面, 2021 年, 德国耶拿大学将 16 路飞秒脉冲合成进一步应用到太赫兹生成上^[113], 获得了当时激光产生太赫兹的最高平均功率 640 mW, 频率覆盖整个太赫兹范围(0.1~30.0 THz)^[157], 其结构图如图 20 所示。

在合成结构和方法改进方面, 研究人员更多地追求合成效率的提升和紧凑的结构。在结构形式上, 为了获得更高的合成效率和紧凑的系统结构, 研究人员继续利用多芯光纤和自成像波导进行相干合成研究, 提出了混合孔径合成等概念^[122-123, 158-160]。除了结构更为紧凑外, 多芯光纤在提高模式不稳定阈值方面也具有独特优势, 10×10 多芯光纤有望突破 26 kW 输出功率^[160-161]。2018 年, 德国耶拿大学实现了图 21 所示的 4×4 路多芯光纤相干合成, 平均功率为 70 W^[162]; 2022 年通过改进多芯光纤结构和工艺, 将平均功率提升到 500 W^[163]; 2023 年通过进一步改进工艺, 提高泵浦激光的耦合数值孔径和纤芯数目, 制备了 7×7 多纤芯光纤, 平均功率超过 1 kW, 激光重复频率为 10 MHz^[164]。2022 年, 德国耶拿大学对多芯光纤及其相干合成进行了系统综述, 并作出了多芯光纤代表未来高功率光纤激光技术水平的判断^[165]。基于多芯光纤的相干合成结构有望实现光纤激光器功率的突破, 使得光纤激光相干合成系统更加紧凑与模块化, 进而成为高功率光

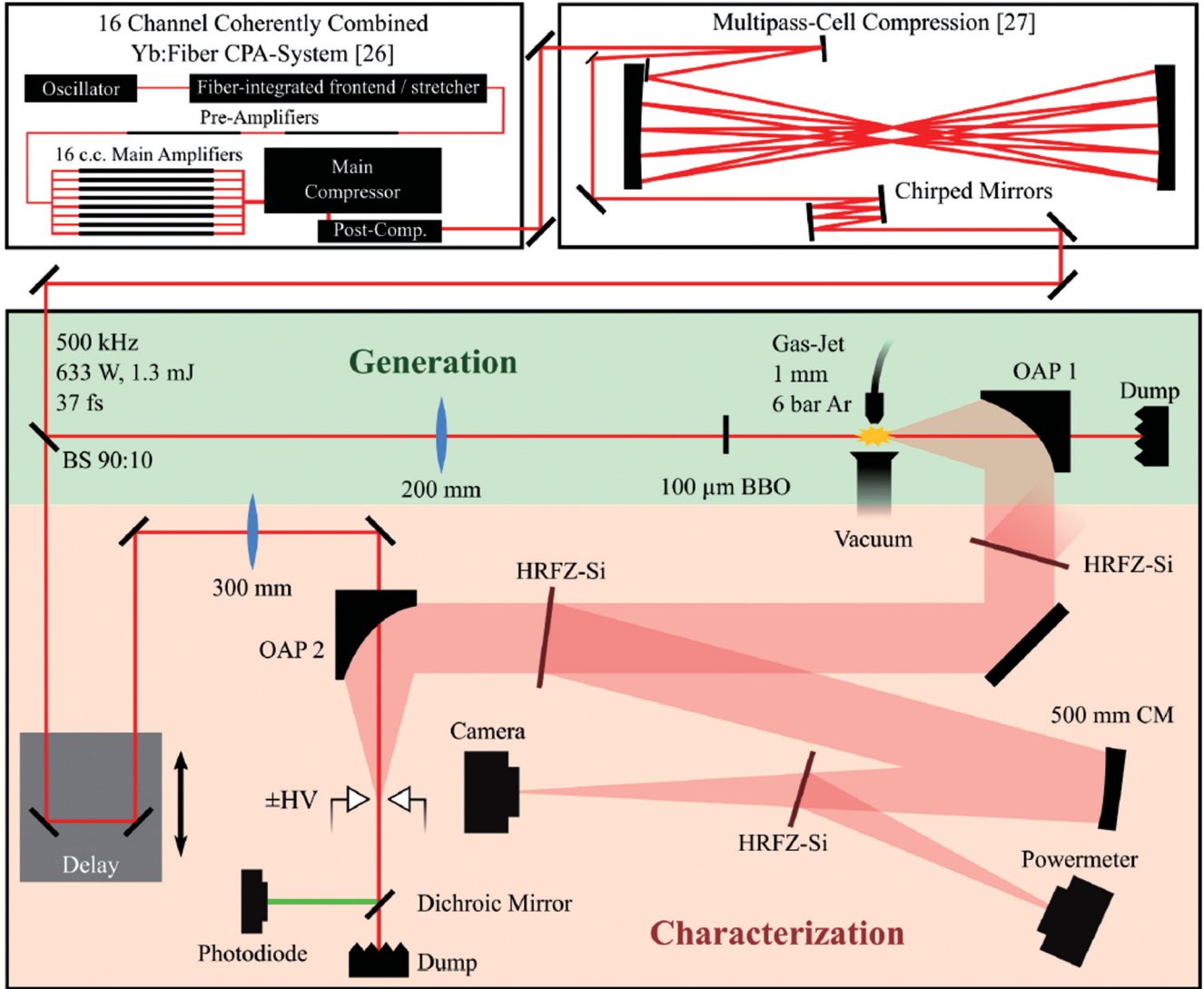


图 20 飞秒激光产生太赫兹结构图^[157]

Fig. 20 Schematic of THz generation from femtosecond laser^[157]

纤激光器的新架构。2023年,法国 Thales 公司利用多平面光转换实现了 12 束光纤激光的相干合成,产生了不同阶次的厄米高斯模,同时利用高阶模的转换实现了共孔径相干合成光束的偏转^[166]。在合成方法方面,研究人员提出了多种相位、偏振、倾斜控制方法,进一步解决了更多路数光纤激光合成中的效率和带宽控制问题^[167-176]。

在产品研发方面,产品的研发与学术研究之间一般存在 5~10 年的间隔^[177]。光纤激光相干合成技术的发文量在 2011 年出现峰值,引文量在 2021 年出现峰值。2021 年前后会出现相应的产品,而事实也正是如此。早在 2010 年,英国 QinetiQ 公司已经开始研制激光合束装置和相位调制器件^[178],并于 2021 年研发了具备湍流校正能力的“DragonFire”光纤激光系统,如图 22 所示^[179]。

2020 年,以色列 CIVAN 公司基于光纤激光相干合成技术,推出了图 23 所示的输出功率为 16 kW 的 OPA 6[现为动态光束激光器(DBL)系列]激光器产

品^[109, 181]。该产品利用平铺孔径光学相控阵的优势,能够实现远场合成激光的动态扫描^[182]。

2023 年,CIVAN 公司和 Fraunhofer-IWS、西门子等单位合作,通过 7 路激光倍频后再合成,实现了图 24 所示的 500 W 单模连续 532 nm 绿光激光器,其适用于铜等高反材料以及半导体领域的焊接^[149]。

在脉冲光纤激光领域,德国 Fraunhofer-IOF 研究所和耶拿大学孵化了 Active Fiber Systems(AFS)公司,并推出了可实现不同波段、不同功率和能量范围的商用飞秒光纤激光器^[183]。

根据这一时期的研究成果,可以总结出光纤激光相干合成技术成熟的标志:指标取得实际突破、学科交叉不断深入及相关产品逐渐出现。在合成指标上,上一阶段设立的目标逐步实现,工程技术得到进一步发展。在学科交叉上,不仅体现在与其他学科之间的交叉,如空间激光通信技术、多芯光纤制备技术等,也体现在自身的研究内容的交叉融合,如混合孔径方法、飞秒激光时空合成、干涉条纹测量和 SPGD

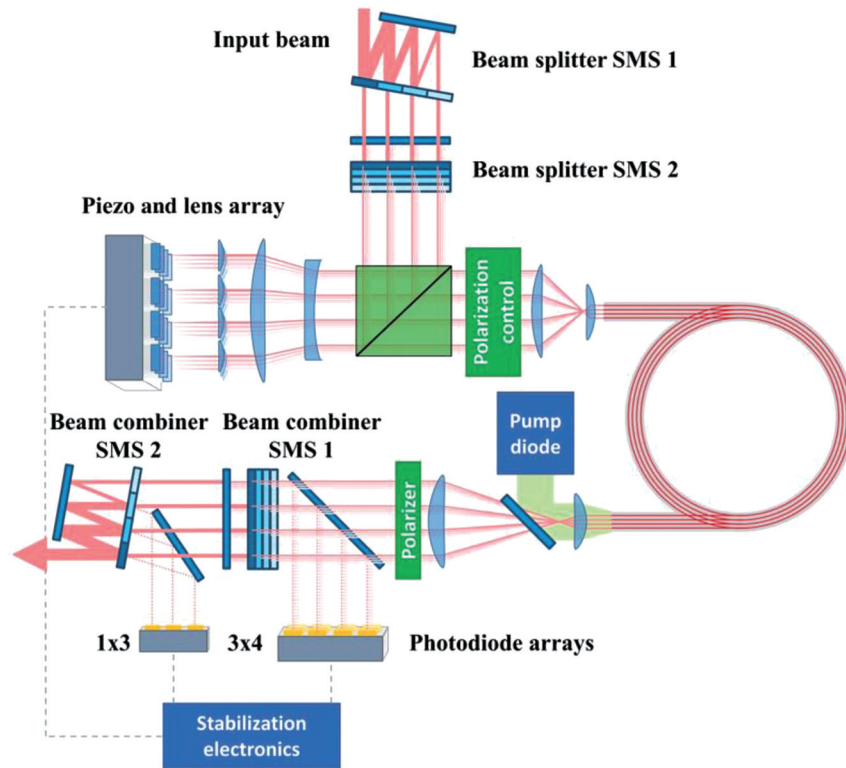


图 21 16 路多芯光纤激光相干合成示意图^[162]

Fig. 21 Schematic of coherent beam combining of 16-channel multicore fiber laser^[162]

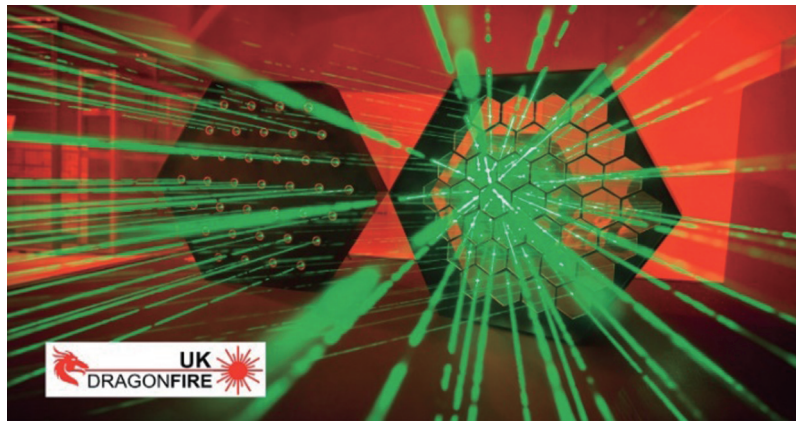


图 22 QinetiQ 公司的激光阵列图^[180]

Fig. 22 Picture of laser array made by QinetiQ^[180]

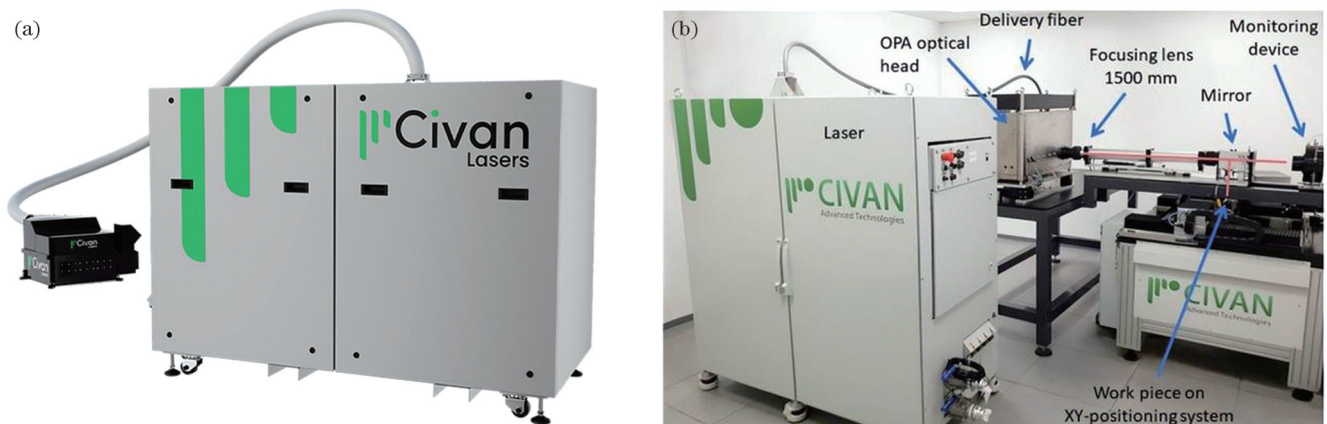


图 23 CIVAN 公司的 DBL 实物图及其应用场景^[181]。(a) 实物图；(b) 应用场景

Fig. 23 Picture and application scenario of DBL made by CIVAN^[181]. (a) Picture; (b) application scenario

(a) Green Laser Coherent Beam Combining Diagram

(b)

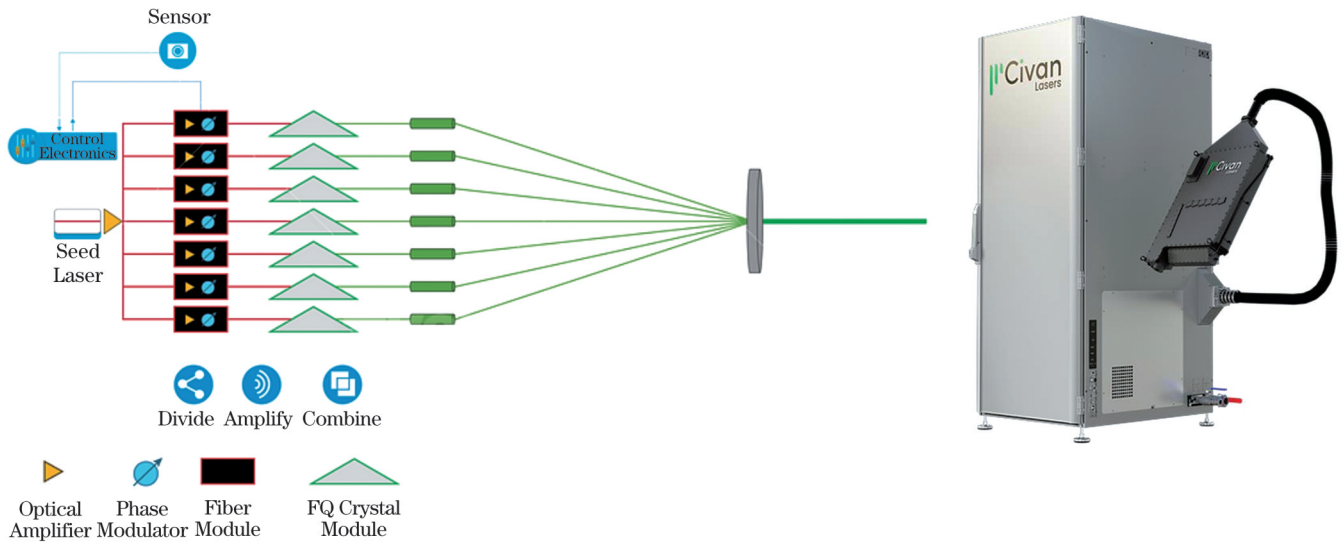


图 24 500 W 单模连续 532 nm 绿光激光器^[149]。(a)原理图；(b)实物图

Fig. 24 500 W single mode green laser with 532 nm wavelength^[149]. (a) Schematic; (b) picture

算法相辅相成等^[102, 112, 122]。在相关产品研发上,经过以色列 CIVAN 公司和德国 AFS 公司的集成和封装,光纤激光相干合成系统能够真正作为一台独立的激光器运行,逐渐模块化。同时,相关产品的出现也标志着光纤激光相干合成技术开始融入社会经济生活。

3.5 小结

回顾光纤激光相干合成的产生和发展历程,功率提升是其发展的主线,合成功率不断被刷新。主要突破性的指标及其被引用情况如表 7 所示,引用情况以相关学术检索结果为依据(包含期刊、会议、报告、学位论文等引用,截至 2023 年 12 月初)。

表 7 光纤激光相干合成功率指标的突破及其被引用情况

Table 7 Breakthroughs and citations of fiber laser coherent beam combining power index

Year	Institute	Method	Power	Reference	Number of citations	Number of citations per year
2006	Northrop Grumman in USA	Heterodyne interference	470 W	[19]	287	16.9
2009	Air Force Research Laboratory in USA	LOCSET	725 W	[30]	96	6.9
2011	University of Defense Technology in USA	Single dithering	1.08 kW	[56]	216	18
2011	Massachusetts Institute of Technology in USA	SPGD	4 kW	[57]	400	33.3
2016	Air Force Research Laboratory in USA	LOCSET	4.9 kW	[78]	50	7.1
2020	Friedrich-Schiller-Universität Jena in Germany	LOCSET	10.4 kW	[89]	242	80.7
2020	CIVAN in Israel		16 kW	[109]	77	25.7

在功率提升过程中,以年均引用次数作为评价标准,德国耶拿大学在 2020 年实现的平均功率为 10.4 kW 的飞秒脉冲相干合成是最具代表性的成果,其在控制维度、合成效率、平均功率、峰值功率、系统体积等方面充分展现了光纤激光相干合成的优势,论文年平均引用量也超过 80 次(2023 年以整年计算),这在光学工程以及相关学科中是比较少见的。此外,文献[109]作为一篇会议论文,也得到了广泛的关注。

4 发展趋势

近年来,随着研究的不断深入,光纤激光相干合成的发展趋势也逐渐明晰,具体表现为:阵列规模不断增大、合成功率不断提高、可控维度逐渐增多、学科交叉不断深入、模块化趋势逐渐显现。

在阵列规模上,光纤激光相干合成经历了由数路到数十上百路、再到千束规模的发展。在目前多个大

科学装置的牵引下,数千上万束规模的光纤激光相干合成是进一步的发展趋势。同时,随着阵列规模的进一步提升,阵列光场调控能力不断提高。当阵列规模足够大时,可以实现任意远场光场的分布^[119]。

在合成功率上,合成路数和单路激光功率对其均有影响。一方面,合成功率随着合成路数的增加而提高;另一方面,提高单路激光输出功率也是进一步提高合成功率的重要方式。随着单纤光纤激光器的发展,可用于相干合成的光纤激光器的输出功率不断提高,促进了光纤激光相干合成功率提升。目前,单路保偏窄线宽激光器的输出功率已经达到 3~6 kW 量级,线宽也被压窄到 2.5 GHz 以内^[184-187]。实现更高合成功率也是光纤激光相干合成进一步的发展趋势。2021 年,德国耶拿大学对 BS 共孔径结构的合成功率进行了预测,结果显示能够得到平均功率为 100 kW 的飞秒脉冲^[188]。在目前已经实现的 10.4 kW 的技术基础上,实现该目标是非常有希望的^[89]。根据光纤激光相干合成的发展历程可知,多数指标性的成果都是基于分孔径阵列实现的。虽然在效率上不如共孔径结构,但分孔径阵列在功率承受能力和结构复杂度方面具有优势。利用分孔径结构已经实现了 20 kW 合成功率^[4],实现百千瓦甚至更高功率逐渐成为现实。

在可控维度上,研究人员为了提高光纤激光相干合成系统的稳定性和效率,对指向、光程、偏振、相位等参数的控制进行了研究,提出了多种参数控制方法并成功应用于高功率的光纤激光相干合成系统^[188]。随着光场调控技术的发展,可通过调节子光束偏振态实现矢量光束合成,这为激光阵列赋予了新的调控维度^[55, 189-190]。通过直接旋转光纤尾端或设计专门的小孔径半波片阵列,能够实现子孔径的偏振态单独调控^[124]。具有偏振态调控能力及二维或三维光纤尾端位置调节能力的自动准直合束装置是进一步实现光纤激光阵列多维调控的重要器件。

在学科交叉上,一方面,随着相关学科的建设,相干合成技术得到了发展,如近年来人工智能技术的引入,促进了相干合成远场空间干涉相位探测技术的完善。随着光纤激光相干合成的系统化、模块化、规模化发展以及可控维度的提高,为实现相干合成系统的最优运转和最佳决策,系统工程学科将起到促进与推动作用。另一方面,相干合成作为一种提高激光输出亮度的有效手段,可以被利用到多种场景中,如提高单频激光、可见光、中红外或超连续谱激光器的输出功率^[191-195]等。在远距离传输方面的应用,目前多以合作目标或自由空间光通信为主^[115, 117, 196-200],在非合作目标中的应用还有待进一步开发。

在模块化趋势上,随着相干合成功率提升和规模的扩大,复杂程度逐渐提高,而且相干合成系统的用途也不尽相同,如用于脉冲能量提升^[112]、工业加工^[109]、

远距离传输^[117]等,需要个性化设计。相比于传统的专用系统设计,模块化能够降低实现门槛,进一步获得更高的合成功率^[201]。近年来,英国 PowerPhotonic 公司推出用于相干合成的集成准直器模块,提供了阵列准直和校正及光束整形和优化一体化的解决方案^[202]。2021 和 2023 年,耶拿大学实现了太赫兹生成以及 32 mJ 飞秒脉冲合成,已经使用了 16 路和 8 路激光合成系统作为子模块^[112, 157]。此外,基于多芯光纤的相干合成系统,有望进一步促进相干合成系统的模块化发展,使其成为独立运行激光器的新型架构。

在众多发展趋势与研究方向中,功率提升依旧是光纤激光相干合成进一步发展的主线。高功率光纤相干合成技术在激光亮度提升方面具有显著优势,为未来基础科学研究、工业智造等领域需要的先进光源提供有力工具。在国外同行向更高功率发展的同时,国内光纤激光相干合成技术研究应继续积极探索超高功率、超高能量条件下产生的新现象、新问题。在解释新现象、解决新问题的过程中,丰富并发展光纤激光相干合成的科学理论和工程技术,带动相关产业技术的升级。

5 结束语

光纤激光主动相干合成的发展历程有着显著的阶段特征,以约 5 年为一阶段不断涌现出优秀的研究成果。尽管国内相关工作的起步较晚,但国内研究单位在发展进程中起到了重要的推动作用,如首次实现超过千瓦的输出功率、首次实现百束/千束/万束规模激光的相干合成,等等;此外,在相干合成激光单元模块如单频激光、窄线宽激光等方面,也获得了公开报道的最高技术指标。随着光纤激光相干合成理论不断成熟和技术水平的逐渐提高,在基础科学研究和工业加工等领域中显现出了独特的应用价值,逐渐融入经济社会发展。目前,在国外已经出现将商用相干合成产品作为基础科学研究和工业加工光源,开发国产光纤激光相干合成相关的科学装置和产品,对推动基础科学研究和助力激光智能制造具有重要意义。当前,光纤激光相干合成理论和技术的发展趋于成熟,可以预见,以应用为驱动力、以学科交叉为表现形式的“相干合成+”模式,在加速促进应用和带动相关学科发展的同时,也会使得光纤激光相干合成自身取得新的科学认知和技术进步。

致谢 感谢冷进勇、马鹏飞、吴坚、李俊、李灿、蒋敏、任帅等老师和侯天悦、常琦、龙金虎、王涛、任博、高志强等同学的交流探讨。

参 考 文 献

- [1] Brignon A. Coherent laser beam combining[M]. Hoboken: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2013.
- [2] 周朴, 粟荣涛, 马阎星, 等. 激光相干合成的研究进展: 2011—

- 2020[J]. 中国激光, 2021, 48(4): 0401003.
- Zhou P, Su R T, Ma Y X, et al. Review of coherent laser beam combining research progress in the past decade[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(4): 0401003.
- [3] Morel J, Woodtli A, Dändliker R. Coherent coupling of an array of Nd³⁺-doped single-mode fiber lasers by use of an intracavity phase grating[J]. Optics Letters, 1993, 18(18): 1520-1522.
- [4] 吴坚, 马阎星, 马鹏飞, 等. 光纤激光相干合成 20 kW 级高功率输出[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(9): 20210621.
- Wu J, Ma Y X, Ma P F, et al. Fiber laser coherent synthesis 20 kW high power output[J]. Infrared and Laser Engineering, 2021, 50(9): 20210621.
- [5] 常琦, 高志强, 邓宇, 等. 强噪声下光纤激光相干合成突破千路[J]. 中国激光, 2023, 50(6): 0616001.
- Chang Q, Gao Z Q, Deng Y, et al. Coherent beam combining of fiber laser breaks through thousands of channels under strong noise[J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(6): 0616001.
- [6] 周朴, 栗荣涛, 马阎星, 等. 主动相位控制光纤激光相干合成技术研究[J]. 光学学报, 2023, 43(17): 1700001.
- Zhou P, Su R T, Ma Y X, et al. Coherent beam combining of fiber lasers by actively phase control[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(17): 1700001.
- [7] 周朴, 何兵. “光纤激光光束合成”专栏序言[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(1): I0003.
- Zhou P, He B. Preface to the column “fiber laser beam synthesis”[J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(1): I0003.
- [8] 李新阳, 周朴. “激光合束技术”专辑出版前言[J]. 强激光与粒子束, 2023, 35(4): 041000.
- Li X Y, Zhou P. Special issue on laser beam combining technology[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2023, 35(4): 041000.
- [9] 周朴. 从“激光合成”到“合成激光”: 光束合成技术实现对激光的赋能[EB/OL]. (2023-2-10)[2023-10-23]. https://mp.weixin.qq.com/s/cm_JhDWpLRFC6n5liiwucQ.
- Zhou P. From “laser combining” to “combining laser”: beam combination technology empowers lasers [EB/OL]. (2023-02-10)[2023-10-23]. https://mp.weixin.qq.com/s/cm_JhDWpLRFC6n5liiwucQ.
- [10] Lyndin N M, Sychugov V A, Tikhomirov A E, et al. Laser system composed of several active elements connected by single-mode couplers[J]. Quantum Electronics, 1994, 24(12): 1058-1061.
- [11] Kozlov V A, Hernández-Cordero J, Morse T F. All-fiber coherent beam combining of fiber lasers[J]. Optics Letters, 1999, 24(24): 1814-1816.
- [12] Shirakawa A, Saitou T, Sekiguchi T, et al. Coherent addition of fiber lasers by use of a fiber coupler[J]. Optics Express, 2002, 10(21): 1167-1172.
- [13] Sabourdy D, Kermene V, Desfarges-Berthelemot A, et al. Efficient coherent combining of widely tunable fiber lasers[J]. Optics Express, 2003, 11(2): 87-97.
- [14] McManamon P F, Thompson W. Phased array of phased arrays (PAPA) laser systems architecture[J]. Fiber and Integrated Optics, 2003, 22(2): 79-88.
- [15] Anderegg J, Brosnan S J, Weber M E, et al. 8-W coherently phased 4-element fiber array[J]. Proceedings of SPIE, 2003, 4974: 1-6.
- [16] August S J, Fan T Y, Sanchez A. Coherent beam combining and phase noise measurements of ytterbium fiber amplifiers[J]. Optics Letters, 2004, 29(5): 474-476.
- [17] Jones D C, Scott A M, Clark S, et al. Beam steering of a fiber-bundle laser output using phased array techniques[J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5335: 125-131.
- [18] Wickham M, Anderegg J, Brosnan S, et al. Coherently coupled high power fiber arrays[C]//2006 Digest of the LEOS Summer Topical Meetings, February 1-4, 2004, Quebec City, QC, Canada. New York: IEEE Press, 2006: 23-24.
- [19] Anderegg J, Brosnan S, Cheung E, et al. Coherently coupled high power fiber arrays[J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6102: 61020U.
- [20] Vorontsov M A, Carhart G W, Ricklin J C. Adaptive phase-distortion correction based on parallel gradient-descent optimization[J]. Optics Letters, 1997, 22(12): 907-909.
- [21] Liu L, Vorontsov M A. Phase-locking of tiled fiber array using SPGD feedback controller[J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5895: 58950P.
- [22] Liu L, Vorontsov M A, Polnau E, et al. Adaptive phase-locked fiber array with wavefront phase tip-tilt compensation using piezoelectric fiber positioners[J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6708: 67080K.
- [23] Vorontsov M A, Lachinova S L. Laser beam projection with adaptive array of fiber collimators. I. Basic considerations for analysis[J]. Journal of the Optical Society of America A: Optics, Image Science, and Vision, 2008, 25(8): 1949-1959.
- [24] Vorontsov M A, Weyrauch T, Beresnev L A, et al. Adaptive array of phase-locked fiber collimators: analysis and experimental demonstration[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2009, 15(2): 269-280.
- [25] Zhou P, Liu Z J, Wang X L, et al. Coherent beam combining of fiber amplifiers using stochastic parallel gradient descent algorithm and its application[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2009, 15(2): 248-256.
- [26] Shay T M, Benham V, Spring J, et al. Self-referenced locking of optical coherence by single-detector electronic-frequency tagging[J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6102: 61020V.
- [27] Shay T M, Benham V, Baker J T, et al. First experimental demonstration of self-synchronous phase locking of an optical array[J]. Optics Express, 2006, 14(25): 12015-12021.
- [28] Shay T M, Benham V, Baker J T, et al. Self-synchronous and self-referenced coherent beam combination for large optical arrays[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2007, 13(3): 480-486.
- [29] Shay T M. Theory of electronically phased coherent beam combination without a reference beam[J]. Optics Express, 2006, 14(25): 12188-12195.
- [30] Shay T M, Baker J T, Sanchez A D, et al. High-power phase locking of a fiber amplifier array[J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7195: 71951M.
- [31] Yu C X, Kansky J E, Shaw S E J, et al. Coherent beam combining of large number of PM fibres in 2-D fibre array[J]. Electronics Letters, 2006, 42(18): 1024-1025.
- [32] 肖瑞, 侯静, 姜宗福, 等. 三路光纤放大器相干合成技术的实验研究[J]. 物理学报, 2006, 55(12): 6464-6469.
- Xiao R, Hou J, Jiang Z F, et al. Experimental research of coherent combining of three fiber amplifiers[J]. Acta Physica Sinica, 2006, 55(12): 6464-6469.
- [33] Xiao R, Hou J, Liu M, et al. Coherent combining technology of master oscillator power amplifier fiber arrays[J]. Optics Express, 2008, 16(3): 2015-2022.
- [34] 周朴. 光纤激光相干合成技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2009.
- Zhou P. Study on coherent beam combination technology of fiber lasers[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2009.
- [35] Zhou P, Liu Z J, Wang X L, et al. Coherent beam combination of two-dimensional high power fiber amplifier array using stochastic parallel gradient descent algorithm[J]. Applied Physics Letters, 2009, 94(23): 231106.
- [36] Zheng Y, Wang X H, Shen F, et al. Generation of dark hollow beam via coherent combination based on adaptive optics[J]. Optics Express, 2010, 18(26): 26946-26958.
- [37] Zheng Y, Wang X H, Deng L, et al. Arbitrary phasing technique for two-dimensional coherent laser array based on an active segmented mirror[J]. Applied Optics, 2011, 50(15): 2239-2245.
- [38] 郑轶, 王晓华, 沈锋, 等. 基于能动分块反射镜的七路激光阵列倾斜校正与相干合成实验研究[J]. 中国激光, 2011, 38(8): 0802009.

- Zheng Y, Wang X H, Shen F, et al. Tip-tilt correction and coherent combination of seven-channel laser array based on active segmented mirrors[J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(8): 0802009.
- [39] Fan X Y, Liu J J, Liu J S, et al. Experimental investigation of a seven-element hexagonal fiber coherent array[J]. Chinese Optics Letters, 2010, 8(1): 48-51.
- [40] Bellanger C, Toulon B, Primot J, et al. Collective phase measurement of an array of fiber lasers by quadriwave lateral shearing interferometry for coherent beam combining[J]. Optics Letters, 2010, 35(23): 3931-3933.
- [41] Ma Y X, Zhou P, Wang X L, et al. Coherent beam combination with single frequency dithering technique[J]. Optics Letters, 2010, 35(9): 1308-1310.
- [42] Ma Y X, Zhou P, Wang X L, et al. Active phase locking of fiber amplifiers using sine-cosine single-frequency dithering technique[J]. Applied Optics, 2011, 50(19): 3330-3336.
- [43] Cheung E C, Ho J G, Goodno G D, et al. Diffractive-optics-based beam combination of a phase-locked fiber laser array[J]. Optics Letters, 2008, 33(4): 354-356.
- [44] Uberna R, Bratcher A, Tiemann B G. Power scaling of a fiber master oscillator power amplifier system using a coherent polarization beam combination[J]. Applied Optics, 2010, 49(35): 6762-6725.
- [45] Seise E, Klenke A, Limpert J, et al. Coherent addition of fiber-amplified ultrashort laser pulses[J]. Optics Express, 2010, 18(26): 27827-27835.
- [46] Uberna R, Bratcher A, Alley T G, et al. Coherent combination of high power fiber amplifiers in a two-dimensional re-imaging waveguide[J]. Optics Express, 2010, 18(13): 13547-13553.
- [47] Vorontsov M A, Lachinova S L, Beresnev L A, et al. Obscuration-free pupil-plane phase locking of a coherent array of fiber collimators[J]. Journal of the Optical Society of America A: Optics, Image Science, and Vision, 2010, 27(11): A106-A121.
- [48] Beresnev L A, Vorontsov M A, Weyrauch T, et al. Experimental study of phase locking of fiber collimators using internal beam-tail interference[J]. Proceedings of SPIE, 2011, 7914: 79142Z.
- [49] Daniault L, Hanna M, Lombard L, et al. Coherent beam combining of two femtosecond fiber chirped-pulse amplifiers[J]. Optics Letters, 2011, 36(5): 621-623.
- [50] Yan Y F, Tao R M, Li H K, et al. Study of high power CBC fiber laser systems with non-equal splitting ratio beam-splitters[J]. Results in Optics, 2023, 10: 100368.
- [51] Jolivet V, Bourdon P, Bennai B, et al. Beam shaping of single-mode and multimode fiber amplifier arrays for propagation through atmospheric turbulence[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2009, 15(2): 257-268.
- [52] Dikmelik Y, Davidson F M. Fiber-coupling efficiency for free-space optical communication through atmospheric turbulence[J]. Applied Optics, 2005, 44(23): 4946-4952.
- [53] 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.
- [54] Lombard L, Azarian A, Cadoret K, et al. Coherent beam combination of narrow-linewidth 1.5 μm fiber amplifiers in a long-pulse regime[J]. Optics Letters, 2011, 36(4): 523-525.
- [55] Kurti R S, Halterman K, Shori R K, et al. Discrete cylindrical vector beam generation from an array of optical fibers[J]. Optics Express, 2009, 17(16): 13982-13988.
- [56] Ma Y X, Wang X L, Leng J Y, et al. Coherent beam combination of 1.08 kW fiber amplifier array using single frequency dithering technique[J]. Optics Letters, 2011, 36(6): 951-953.
- [57] Yu C X, Augst S J, Redmond S M, et al. Coherent combining of a 4 kW, eight-element fiber amplifier array[J]. Optics Letters, 2011, 36(14): 2686-2688.
- [58] Goodno G D, McNaught S J, Rothenberg J E, et al. Active phase and polarization locking of a 1.4 kW fiber amplifier[J]. Optics Letters, 2010, 35(10): 1542-1544.
- [59] Anderson B, Flores A, Holten R, et al. Comparison of phase modulation schemes for coherently combined fiber amplifiers[J]. Optics Express, 2015, 23(21): 27046-27060.
- [60] Klenke A, Seise E, Demmler S, et al. Coherently-combined two channel femtosecond fiber CPA system producing 3 mJ pulse energy[J]. Optics Express, 2011, 19(24): 24280-24285.
- [61] Bourderionnet J, Bellanger C, Primot J, et al. Collective coherent phase combining of 64 fibers[J]. Optics Express, 2011, 19(18): 17053-17058.
- [62] Weyrauch T, Vorontsov M A, Carhart G W, et al. Experimental demonstration of coherent beam combining over a 7 km propagation path[J]. Optics Letters, 2011, 36(22): 4455-4457.
- [63] Manzoni C, Mücke O D, Cirmi G, et al. Coherent pulse synthesis: towards sub-cycle optical waveforms[J]. Laser & Photonics Reviews, 2015, 9(2): 129-171.
- [64] 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.
- [65] Klenke A, Seise E, Limpert J, et al. Basic considerations on coherent combining of ultrashort laser pulses[J]. Optics Express, 2011, 19(25): 25379-25387.
- [66] Siiman L A, Chang W Z, Zhou T, et al. Coherent femtosecond pulse combining of multiple parallel chirped pulse fiber amplifiers [J]. Optics Express, 2012, 20(16): 18097-18116.
- [67] Su R T, Zhou P, Wang X L, et al. Active coherent beam combining of a five-element, 800 W nanosecond fiber amplifier array[J]. Optics Letters, 2012, 37(19): 3978-3980.
- [68] 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.
- [69] Chang W Z, Zhou T, Siiman 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.
- [70] 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.
- [71] 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.
- [72] Ma P F, Tao R M, Wang X L, et al. Coherent polarization beam combination of four mode-locked fiber MOPAs in picosecond regime[J]. Optics Express, 2014, 22(4): 4123-4130.
- [73] Müller M, Kienel M, Klenke A, et al. 1 kW 1 mJ eight-channel ultrafast fiber laser[J]. Optics Letters, 2016, 41(15): 3439-3442.
- [74] Thielen P A, Ho J G, Burchman D A, et al. Two-dimensional diffractive coherent combining of 15 fiber amplifiers into a 600 W beam[J]. Optics Letters, 2012, 37(18): 3741-3743.
- [75] Redmond S M, Ripin D J, Yu C X, et al. Diffractive coherent combining of a 2.5 kW fiber laser array into a 1.9 kW Gaussian beam[J]. Optics Letters, 2012, 37(14): 2832-2834.
- [76] McNaught S J, Thielen P A, Adams L N, et al. Scalable coherent combining of kilowatt fiber amplifiers into a 2.4-kW beam[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2014, 20(5): 0901008.
- [77] 马鹏飞, 王小林, 粟荣涛, 等. 2 kW 级光纤激光相干偏振合成 [J]. 强激光与粒子束, 2016, 28(4): 040102.
- Ma P F, Wang X L, Su R T, et al. Coherent polarization beam combining of fiber lasers to 2 kW power-level[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2016, 28(4): 040102.
- [78] Flores A, Dajani I, Holten R H, et al. Multi-kilowatt diffractive coherent combining of pseudorandom-modulated fiber amplifiers[J]. Optical Engineering, 2016, 55(9): 096101.
- [79] Antier M, Bourderionnet J, Larat C, et al. kHz closed loop interferometric technique for coherent fiber beam combining[J].

- IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2014, 20(5): 0901506.
- [80] Azarian A, Bourdon P, Lombard L, et al. Orthogonal coding methods for increasing the number of multiplexed channels in coherent beam combining[J]. Applied Optics, 2014, 53(8): 1493-1502.
- [81] Ahn H K, Kong H J. Cascaded multi-dithering theory for coherent beam combining of multiplexed beam elements[J]. Optics Express, 2015, 23(9): 12407-12413.
- [82] Kabeya D, Kermene V, Fabert M, et al. Active coherent combining of laser beam arrays by means of phase-intensity mapping in an optimization loop[J]. Optics Express, 2015, 23(24): 31059-31068.
- [83] Huang Z M, Tang X, Luo Y Q, et al. Active phase locking of thirty fiber channels using multilevel phase dithering method[J]. The Review of Scientific Instruments, 2016, 87(3): 033109.
- [84] Su R T, Zhang Z X, Zhou P, et al. Coherent beam combining of a fiber lasers array based on cascaded phase control[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(22): 2585-2588.
- [85] Goodno G D, Shih C C, Rothenberg J E. Perturbative analysis of coherent combining efficiency with mismatched lasers[J]. Optics Express, 2010, 18(24): 25403-25414.
- [86] Goodno G D, McNaught S J, Weber M E, et al. Multichannel polarization stabilization for coherently combined fiber laser arrays [J]. Optics Letters, 2012, 37(20): 4272-4274.
- [87] Goodno G D, Weiss S B. Automated co-alignment of coherent fiber laser arrays via active phase-locking[J]. Optics Express, 2012, 20(14): 14945-14953.
- [88] Weiss S B, Weber M E, Goodno G D. Group delay locking of coherently combined broadband lasers[J]. Optics Letters, 2012, 37(4): 455-457.
- [89] Müller M, Aleshire C, Klenke A, et al. 10.4 kW coherently combined ultrafast fiber laser[J]. Optics Letters, 2020, 45(11): 3083-3086.
- [90] Wang X, Wang X L, Zhou P, et al. 350-W coherent beam combining of fiber amplifiers with tilt-tip and phase-locking control [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(19): 1781-1784.
- [91] Geng C, Luo W, Tan Y, et al. Experimental demonstration of using divergence cost-function in SPGD algorithm for coherent beam combining with tip/tilt control[J]. Optics Express, 2013, 21(21): 25045-25055.
- [92] Chosrowjan H, Furuse H, Fujita M, et al. Interferometric phase shift compensation technique for high-power, tiled-aperture coherent beam combination[J]. Optics Letters, 2013, 38(8): 1277-1279.
- [93] Darpa. Excalibur prototype extends reach of high-energy lasers [EB/OL]. (2014-03-06) [2023-10-23]. <https://www.defense-aerospace.com/darpas-excalibur-extends-reach-of-high-energy-lasers/>.
- [94] 王辉华, 林龙信, 叶辛, 等. 国外新型电驱动高能激光技术现状与发展趋势[J]. 红外与激光工程, 2023, 52(1): 20220283.
Wang H H, Lin L X, Ye X, et al. Status and development trend of overseas new type electric drive high-energy laser technology[J]. Infrared and Laser Engineering, 2023, 52(1): 20220283.
- [95] Nufern. Nufern to build 46 fiber amps for US military[EB/OL]. (2012-04-16)[2023-10-23]. <https://optics.org/news/3/4/17>.
- [96] Mourou G, Brocklesby B, Tajima T, et al. The future is fibre accelerators[J]. Nature Photonics, 2013, 7: 258-261.
- [97] Lubin P, Hughes G B, Bible J J, et al. Directed energy planetary defense[J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8876: 887602.
- [98] 霍金启动史上搜寻外星生命最大规模行动, 将历时十年[N/OL]. 中国日报网, 2015-07-21(1)[2023-10-23]. http://www.chinadaily.com.cn/interface/toutiao/1138561/2015-7-21/cd_21365216.html.
Hawking launches the largest search for extraterrestrial life in history, which will take ten years[N/OL]. China Daily, 2015-07-21(1)[2023-10-23]. http://www.chinadaily.com.cn/interface/toutiao/1138561/2015-7-21/cd_21365216.html.
- [99] Timmer J. Breakthrough starshot announces plans to send ship to alpha centauri[EB/OL] (2016-04-13) [2023-10-23]. <https://arstechnica.com/science/2016/04/breakthrough-starshot-announces-plans-to-send-ship-to-alpha-centauri/>.
- [100] Atwater H A, Davoyan A R, Ilic O, et al. Materials challenges for the Starshot lightsail[J]. Nature Materials, 2018, 17: 861-867.
- [101] Materials N. Extreme light[J]. Nature Materials, 2016, 15(1): 1.
- [102] Fsaifes I, Daniault L, Bellanger S, et al. Coherent beam combining of 61 femtosecond fiber amplifiers[J]. Optics Express, 2020, 28(14): 20152-20161.
- [103] Chang H X, Chang Q, Xi J C, et al. First experimental demonstration of coherent beam combining of more than 100 beams [J]. Photonics Research, 2020, 8(12): 1943-1948.
- [104] Chang Q, Hou T Y, Long J H, et al. Experimental phase stabilization of a 397-channel laser beam array via image processing in dynamic noise environment[J]. Journal of Lightwave Technology, 2022, 40(19): 6542-6547.
- [105] Du Q, Wang D, Zhou T, et al. 81-beam coherent combination using a programmable array generator[J]. Optics Express, 2021, 29(4): 5407-5418.
- [106] Shpakovych M, Maulion G, Kermene V, et al. Experimental phase control of a 100 laser beam array with quasi-reinforcement learning of a neural network in an error reduction loop[J]. Optics Express, 2021, 29(8): 12307-12318.
- [107] 刘泽金, 周朴, 马鹏飞, 等. 4路高功率窄线宽、线偏振光纤放大器相干偏振合成实现 5 kW 级高亮度激光输出[J]. 中国激光, 2017, 44(4): 0415004.
Liu Z J, Zhou P, Ma P F, et al. 4-channel polarize coherent combination of high-power narrow-linewidth linear polarization fiber amplifiers with 5 kW high intensity laser output[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(4): 0415004.
- [108] Müller M, Klenke A, Steinkopf A, et al. 3.5 kW coherently combined ultrafast fiber laser[J]. Optics Letters, 2018, 43(24): 6037-6040.
- [109] Shekel E, Vidne Y, Urbach B. 16 kW single mode CW laser with dynamic beam for material processing[J]. Proceedings of SPIE, 2020, 11260: 1126021.
- [110] Ma P F, Chang H X, Ma Y X, et al. 7.1 kW coherent beam combining system based on a seven-channel fiber amplifier array[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 140: 107016.
- [111] 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.
- [112] 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.
- [113] 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.
- [114] Chen S Y, Zhou T, Du Q, et al. Broadband spectral combining of three pulse-shaped fiber amplifiers with 42 fs compressed pulse duration[J]. Optics Express, 2023, 31(8): 12717-12724.
- [115] Rouzé B, Lombard L, Jacqmin H, et al. Coherent beam combination of seven 1.5 μm fiber amplifiers through up to 1 km atmospheric turbulence: near- and far-field experimental analysis[J]. Applied Optics, 2021, 60(27): 8524-8533.
- [116] Björck M, Henriksson M, Sjöqvist L. Outdoor target-in-the-loop coherent beam combination using a stochastic parallel gradient descent algorithm[J]. Proceedings of SPIE, 2021, 11867: 118670E.
- [117] 李枫, 邹凡, 姜佳丽, 等. 57 孔径光纤激光相控阵自适应光学系统实现经 2 km 大气传输的目标在回路相干合成[J]. 中国激光, 2022, 49(6): 0616002.
Li F, Zou F, Jiang J L, et al. Target-in-loop coherent beam combining of a 57-aperture fiber laser array over 2 km in atmosphere based on an adaptive optical system[J]. Chinese Journal

- of Lasers, 2022, 49(6): 0616002.
- [118] Zhi D, Hou T Y, Ma P F, et al. Comprehensive investigation on producing high-power orbital angular momentum beams by coherent combining technology[J]. High Power Laser Science and Engineering, 2019, 7: e33.
- [119] Veinhard M, Bellanger S, Daniault L, et al. Orbital angular momentum beams generation from 61 channels coherent beam combining femtosecond digital laser[J]. Optics Letters, 2021, 46(1): 25-28.
- [120] Wang X B, Liu C B, Cao Y, et al. High-precision two-dimensional beam steering with a 64-element optical fiber phased array[J]. Applied Optics, 2021, 60(31): 10002-10008.
- [121] Andrianov A, Kalinin N, Anashkina E, et al. Highly efficient coherent beam combining of tiled aperture arrays using out-of-phase pattern[J]. Optics Letters, 2020, 45(17): 4774-4777.
- [122] Prossotowicz M, Flamm D, Heimes A, et al. Dynamic focus shaping with mixed-aperture coherent beam combining[J]. Optics Letters, 2021, 46(7): 1660-1663.
- [123] Prossotowicz M, Heimes A, Flamm D, et al. Coherent beam combining with micro-lens arrays[J]. Optics Letters, 2020, 45(24): 6728-6731.
- [124] Fsaifes I, Ranély-Vergé-Dépré C A, Veinhard M, et al. Far field energy distribution control using a coherent beam combining femtosecond digital laser[J]. Optics Express, 2023, 31(5): 8217-8225.
- [125] Tünnermann H, Shirakawa A. AI controlled tiled aperture coherent beam combining[C]//2019 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC), June 23-27, 2019, Munich, Germany. New York: IEEE Press, 2019.
- [126] Mills B, Grant-Jacob J A, Praeger M, et al. Single step phase optimisation for coherent beam combination using deep learning[J]. Scientific Reports, 2022, 12: 5188.
- [127] Tünnermann H, Shirakawa A. Deep reinforcement learning for coherent beam combining applications[J]. Optics Express, 2019, 27(17): 24223-24230.
- [128] Shpakovych M, Maulion G, Boju A, et al. On-demand phase control of a 7-fiber amplifiers array with neural network and quasi-reinforcement learning[J]. Photonics, 2022, 9(4): 243.
- [129] Jia H L, Zuo J, Bao Q L, et al. Discussion on piston-type phase ambiguity in a coherent beam combining system[J]. Photonics, 2022, 9(1): 49.
- [130] Jia H L, Zuo J, Bao Q L, et al. A phase-error prediction method for coherent beam combining via convolutional neural network[J]. Optik, 2021, 246: 167827.
- [131] Hou T Y, An Y, Chang Q, et al. Deep-learning-based phase control method for tiled aperture coherent beam combining systems [J]. High Power Laser Science and Engineering, 2019, 7: e59.
- [132] Mirigaldi A, Carbone M, Perrone G. Non-uniform adaptive angular spectrum method and its application to neural network assisted coherent beam combining[J]. Optics Express, 2021, 29(9): 13269-13287.
- [133] Hou T Y, An Y, Chang Q, et al. Deep-learning-based coherent fiber laser array system for power scaling and spatial light structuring[J]. Proceedings of SPIE, 2022, 11981: 119810F.
- [134] Wang D, Du Q, Zhou T, et al. Stabilization of the 81-channel coherent beam combination using machine learning[J]. Optics Express, 2021, 29(4): 5694-5709.
- [135] Li X Z, Peng C, Liang X Y. Far-field phasing method based on deep learning for tiled-aperture coherent beam combination[J]. Optics Communications, 2023, 527: 128928.
- [136] Liu R Q, Peng C, Liang X Y, et al. Coherent beam combination far-field measuring method based on amplitude modulation and deep learning[J]. Chinese Optics Letters, 2020, 18(4): 041402.
- [137] Zhang X, Li P X, Zhu Y C, et al. Coherent beam combination based on Q-learning algorithm[J]. Optics Communications, 2021, 490: 126930.
- [138] Wang D, Du Q, Zhou T, et al. Machine learning pattern recognition algorithm with applications to coherent laser combination[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2022, 58(6): 6100309.
- [139] Wang D, Leng Y X. Simultaneous wavefront sensing of multiple beams using neural networks[J]. Applied Physics B, 2021, 128(1): 8.
- [140] Du Q, Wang D, Zhou T, et al. Experimental beam combining stabilization using machine learning trained while phases drift[J]. Optics Express, 2022, 30(8): 12639-12653.
- [141] 高志强, 常琦, 刘昊宇, 等. 机器学习在光纤激光阵列相位调控中的研究进展与发展趋势[J]. 中国激光, 2023, 50(11): 1101010.
- Gao Z Q, Chang Q, Liu H Y, et al. Research progress and development trend of machine learning in phase control of fiber laser arrays[J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(11): 1101010.
- [142] Du Q, Zhou T, Doolittle L R, et al. Deterministic stabilization of eight-way 2D diffractive beam combining using pattern recognition [J]. Optics Letters, 2019, 44(18): 4554-4557.
- [143] Odier A, Durécu A, Melkonian J M, et al. Coherent combining of second-harmonic generators by active phase control of the fundamental waves[J]. Optics Letters, 2017, 42(16): 3201-3204.
- [144] Želudevičius J, Regelskis K, Račiukaitis G. Experimental demonstration of pulse multiplexing and beam combining of four fiber lasers by noncollinear frequency conversion in an LBO crystal [J]. Optics Letters, 2017, 42(2): 175-178.
- [145] Tsubakimoto K, Yoshida H, Miyanaga N. 600 W green and 300 W UV light generated from an eight-beam, sub-nanosecond fiber laser system[J]. Optics Letters, 2017, 42(17): 3255-3258.
- [146] Odier A, Chtouki R, Bourdon P, et al. Coherent combining of mid-infrared difference frequency generators[J]. Optics Letters, 2019, 44(3): 566-569.
- [147] Odier A, Durécu A, Melkonian J M, et al. Coherent combining of fiber-laser-pumped 3.4 μm frequency converters[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10083: 1008319.
- [148] Feng L W, Wang X J, Ke W W. Coherent beam combining of optical parametric oscillators[J]. Journal of the Optical Society of America B: Optical Physics, 2017, 34(5): 991-997.
- [149] Civan Lasers. Civan lasers unveils 500 W single mode continuous wave 532 nm laser[EB/OL]. (2023-09-08)[2023-10-23]. <https://www.civanlasers.com/post/civan-lasers-unveils-500w-single-mode-continuous-wave-532nm-laser>.
- [150] Albrodt P, Jamal M T, Hansen A K, et al. Coherent combining of high brightness tapered amplifiers for efficient non-linear conversion [J]. Optics Express, 2019, 27(2): 928-937.
- [151] Liu Q, Janicot S, Georges P, et al. Coherent combination of micropulse tapered amplifiers at 828 nm for direct-detection LIDAR applications[J]. Optics Letters, 2023, 48(2): 489-492.
- [152] Billaud A, Gomez F, Allieux D, et al. Optimal coherent beam combining based on multi-plane light conversion for high throughput optical feeder links[C]//2019 IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS), October 14-16, 2019, Portland, OR, USA. New York: IEEE Press, 2019.
- [153] Rouzé B, Pichon P, Gay M, et al. Experimental study of the impact of carrying a telecom signal on LOCSET-based coherent beam combining[J]. Optics Express, 2023, 31(16): 26552-26564.
- [154] Billault V, Leveque S, Maho A, et al. Optical coherent combining of high-power optical amplifiers for free-space optical communications[J]. Optics Letters, 2023, 48(14): 3649-3652.
- [155] Zou F, Pan Z T, Liu J Y, et al. Turbulence compensation for receiving and coherent combining via phased fiber laser array[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2023, 35(13): 733-736.
- [156] Zou F, Pan Z T, Liu J Y, et al. Bidirectional coherent beam combining and turbulence mitigating by phased fiber laser array in a 2 km atmospheric link[J]. Optics & Laser Technology, 2023, 163: 109311.
- [157] Buldt J, Stark H, Müller M, et al. Gas-plasma-based generation

- of broadband terahertz radiation with 640 mW average power[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(20): 5256-5259.
- [158] Yan Y F, Liu Y, Zhang H Y, et al. Principle and numerical demonstration of high power all-fiber coherent beam combination based on self-imaging effect in a square core fiber[J]. *Photonics Research*, 2022, 10(2): 444-455.
- [159] Vysotsky D V, Napartovich A P. Coherent beam combining in optically coupled laser arrays[J]. *Quantum Electronics*, 2019, 49(11): 989-1007.
- [160] Steinkopff A, Jauregui C, Aleshire C, et al. Optimizing the design of coherently combined multicore fiber amplifiers[J]. *Proceedings of SPIE*, 2021, 11665: 116651Q.
- [161] Otto H J, Klenke A, Jauregui C, et al. Scaling the mode instability threshold with multicore fibers[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(9): 2680-2683.
- [162] Klenke A, Müller M, Stark H, et al. Coherently combined 16-channel multicore fiber laser system[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(7): 1519-1522.
- [163] Klenke A, Steinkopff A, Aleshire C, et al. 500 W rod-type 4×4 multicore ultrafast fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2022, 47(2): 345-348.
- [164] Klenke A, Bahri M, Steinkopff A, et al. 49-core rod-type ytterbium-doped multicore fiber for high power operation[J]. *Proceedings of SPIE*, 2023, 12400: 124000Y.
- [165] Klenke A, Jauregui C, Steinkopff A, et al. High-power multicore fiber laser systems[J]. *Progress in Quantum Electronics*, 2022, 84: 100412.
- [166] Demur R, Leviandier L, Turpin E, et al. Active coherent beam combining and beam steering using a spatial mode multiplexer[J]. *Optics Express*, 2023, 31(20): 32105-32113.
- [167] Yang Y, Geng C, Li F, et al. Fiber-based coherent polarization beam combining with cascaded phase-locking and polarization-transforming controls[J]. *Journal of Optics*, 2018, 20(5): 055703.
- [168] Rouzé B, Fsaïfes I, Bellanger S, et al. Phase noise measurements and diagnoses of a large array of fiber lasers by PISTIL[J]. *Applied Optics*, 2022, 61(27): 7846-7851.
- [169] 彭英楠, 胡奇琪, 段佳著, 等. 基于光斑二阶矩的阵列光束倾斜相差自适应控制方法[J]. *强激光与粒子束*, 2023, 35(4): 041010.
Peng Y N, Hu Q Q, Duan J Z, et al. Self-adaptive tilt control method based on second order moment of beam for laser array[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2023, 35(4): 041010.
- [170] Haraguchi E, Akiyama T, Ando T, et al. Simultaneous detection of beam pointing and optical phase errors for multiple beams using a quadrant photo detector for high-efficiency coherent beam combining systems[J]. *Applied Physics Express*, 2019, 12(10): 102012.
- [171] Jiang M, Su R T, Zhang Z X, et al. Coherent beam combining of fiber lasers using a CDMA-based single-frequency dithering technique[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(15): 4255-4260.
- [172] Liu R Q, Peng C, Wu W S, et al. Coherent beam combination of multiple beams based on near-field angle modulation[J]. *Optics Express*, 2018, 26(2): 2045-2053.
- [173] Klenke A, Müller M, Stark H, et al. Sequential phase locking scheme for a filled aperture intensity coherent combination of beam arrays[J]. *Optics Express*, 2018, 26(9): 12072-12080.
- [174] Freier C, Legge S, Roberts L, et al. Scalable all-fiber coherent beam combination using digital control[J]. *Applied Optics*, 2022, 61(15): 4543-4548.
- [175] Deprez M, Bellanger C, Lombard L, et al. Piston and tilt interferometry for segmented wavefront sensing [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(6): 1078-1081.
- [176] Deprez M, Wattellier B, Bellanger C, et al. Phase measurement of a segmented wave front using PISTon and TILT interferometry (PISTIL)[J]. *Optics Express*, 2018, 26(5): 5212-5224.
- [177] 苑立波. 光纤白光干涉技术的回顾与展望[J]. *光学学报*, 2011, 31(9): 0900137.
Yuan L B. Overview and forecast of fiber optic white-light interferometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(9): 0900137.
- [178] Jones D C, Turner A J, Scott A M, et al. A multi-channel phase locked fibre bundle laser[J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7580: 75801V.
- [179] QinetiQ. Directed energy effector systems-explanation of coherent beam combination[EB/OL]. (2021-03-30) [2023-10-23]. <https://www.qinetiq.com/-/media/b061a38fc98c4fb89a4f674f2258a0a1.ashx>.
- [180] QinetiQ. Transforming future weapons technology for UK MOD [EB/OL]. (2021-04-07)[2023-10-23]. <https://www.qinetiq.com/-/media/2bbcf00bc45419d97df1d8b6f7c53eb.ashx>.
- [181] Civan Lasers. White paper: dynamic beam laser explained[EB/OL]. (2022-04-13)[2023-10-23]. <https://www.civanlasers.com/>.
- [182] E·谢克尔, B·乌尔巴赫, Y·韦德尼, 等. 具有噪声校正的光学相控阵列动态波束成形: CN111433985A[P]. 2020-07-17.
Shekel E, Urbach B, Vidne Y, et al. Optical phased array dynamic beam shaping with noise: CN111433985A[P]. 2020-07-17.
- [183] AFS[EB/OL]. [2023-06-09]. <https://www.afs-jena.de/>.
- [184] Wang G J, Song J X, Chen Y S, et al. Six kilowatt record all-fiberized and narrow-linewidth fiber amplifier with near-diffraction-limited beam quality[J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2022, 10: e22.
- [185] 马鹏飞, 宋家鑫, 王广建, 等. 高功率窄线宽光纤激光突破 6 kW 级近单模输出[J]. *中国激光*, 2022, 49(9): 0916002.
Ma P F, Song J X, Wang G J, et al. High-power narrow linewidth fiber laser breaks through 6 kW near single-mode output[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(9): 0916002.
- [186] 任帅, 马鹏飞, 陈益沙, 等. 国产保偏光纤实现 5 kW 级窄线宽激光输出[J]. *红外与激光工程*, 2023, 52(2): 20220900.
Ren S, Ma P F, Chen Y S, et al. 5 kW-level narrow linewidth fiber laser output realized by homemade polarization-maintained fiber[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2023, 52(2): 20220900.
- [187] 王岩山, 彭万敬, 王珏, 等. <10 GHz 窄线宽线偏振衍射极限光纤激光实现 4 kW 输出[J]. *强激光与粒子束*, 2023, 35(8): 089901.
Wang Y S, Peng W J, Wang J, et al. Output of 4 kW <10 GHz narrow linewidth linear polarization near diffraction limit fiber laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2023, 35(8): 089901.
- [188] Müller M, Aleshire C, Buldt J, et al. Scaling potential of beam-splitter-based coherent beam combination[J]. *Optics Express*, 2021, 29(17): 27900-27911.
- [189] Zhang Y Q, Hou T Y, Chang H X, et al. Tight focusing properties and focal field tailoring of cylindrical vector beams generated from a linearly polarized coherent beam array[J]. *Optics Express*, 2021, 29(4): 5259-5269.
- [190] Ju P, Fan W H, Gao W, et al. Phase control scheme of the coherent beam combining system for generating perfect vectorial vortex beams assisted by a Dammann vortex grating[J]. *Optics Express*, 2023, 31(14): 22372-22384.
- [191] Wellmann F, Bode N N, Wessels P, et al. Low noise 400 W coherently combined single frequency laser beam for next generation gravitational wave detectors[J]. *Optics Express*, 2021, 29(7): 10140-10149.
- [192] 马天, 李富全, 林宏兔. 基于光纤激光倍频的高功率绿光源研究进展[J]. *强激光与粒子束*, 2023, 35(7): 071005.
Ma T, Li F Q, Lin H H. Recent progress of high power green laser based on frequency doubling technology for fiber laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2023, 35(7): 071005.
- [193] Zhou P, Wang X, Ma Y, et al. Review on recent progress on mid-infrared fiber lasers[J]. *Laser Physics*, 2012, 22(11): 1744-1751.
- [194] Zhou P, Ma Y X, Wang X L, et al. Coherent beam combination of three two-tone fiber amplifiers using stochastic parallel gradient descent algorithm[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(19): 2939-2941.
- [195] Cox J A, Putnam W P, Sell A, et al. Pulse synthesis in the single-cycle regime from independent mode-locked lasers using attosecond-precision feedback[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(17):

- 3579-3581.
- [196] Weyrauch T, Vorontsov M, Mangano J, et al. Deep turbulence effects mitigation with coherent combining of 21 laser beams over 7 km[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(4): 840-843.
- [197] Sprangle P, Hafizi B, Ting A, et al. High-power lasers for directed-energy applications[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(31): F201-F209.
- [198] Vorontsov M A, Weyrauch T. High-power lasers for directed-energy applications: comment[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(35): 9950-9953.
- [199] Sprangle P, Hafizi B, Ting A, et al. High-power lasers for directed-energy applications: reply[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(16): 4825-4826.
- [200] Bruesselbach H, Wang S Q, Minden M, et al. Power-scalable phase-compensating fiber-array transceiver for laser communications through the atmosphere[J]. *Journal of the Optical Society of America B: Optical Physics*, 2005, 22(2): 347-353.
- [201] 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.
- [202] Dubinovsky M, Wreford C, Trela-McDonald N, et al. Innovative freeform design methodology used for high efficiency coherent beam combination design study[J]. *Proceedings of SPIE*, 2023, PC12515: PC125150G.

Research History and Prospects of Coherent Beam Combining of Fiber Lasers: From Perspective of Citations (Invited)

Zhou Pu*, Chang Hongxiang, Su Rongtao, Wang Xiaolin, Ma Yanxing

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

Abstract

Significance Coherent beam combining (CBC) is an effective method to improve the output power of fiber lasers while maintaining good beam quality. As interdisciplinary research continues to deepen, the CBC technology of fiber lasers is constantly revitalized, and its application scenarios are becoming increasingly diverse. Reviewing the evolution of fiber laser CBC development and outlining prospective directions for their future development are crucial. This article discusses the development trajectory of the active phase control CBC of fiber lasers, and systematically outlines its development stages from the perspective of literature metrics. The characteristics of each development stage are summarized, and the outlook for future development trends is provided.

Progress Based on an analysis of the literature indexed in the Web of Science Core Collection, the development process for the active phase control CBC of fiber lasers can be divided into four stages: the early stage of academic development, the period of rapid academic development, the stage of stable academic development, and the key stage of technological development.

In the early stage of academic development before 2005, research focused on passive CBC and played an important role in promoting the research on the CBC of fiber lasers. During the period of rapid academic development from 2006 to 2011, researchers proposed various phase-control methods, which solved the basic prerequisite of achieving active phase control. Subsequently, with an increase in the output power, researchers pursued greater combining efficiency and proposed various structures to achieve this goal. At the same time, researchers also explored expanded applications of CBC technology of fiber lasers. During the stage of stable academic development from 2012 to 2016, significant progress was made in the CBC of pulsed fiber lasers. A co-aperture CBC system with higher theoretical efficiency received widespread attention. Researchers proposed many methods to further increase the numbers of combined channels. To improve the combining efficiency, researchers conducted studies on controlling multiple parameters that affect the combining efficiency. In addition, based on the research on the CBC of fiber lasers, researchers gained greater confidence in using CBC technology to obtain ultra-high energy and power, and have proposed various concepts for large scientific installations. In the key stage of technological development after 2017, with the development of CBC technology of fiber lasers, practical breakthroughs have been achieved in various areas such as the numbers of combined channels and combined power. CBC structures with tiled apertures have been widely used in optical-field manipulation. The evolution of nascent disciplines such as artificial intelligence intersects with the development of CBC. The structures and methods continue to improve, and various related products are gradually emerging.

Conclusions and Prospects With the development of CBC technology of fiber lasers, the overall trend is characterized by an increasing array scale, improved combined power, improved control parameters, the deepening of interdisciplinary research, and modularization. In terms of the array scale, CBC with thousands or even tens of thousands of beams is a further development trend, driven by various large scientific installations. Regarding combined power, using tiled aperture structures to achieve output power values ranging from hundreds of kilowatts to megawatts has become a practical reality. In terms of controllable parameters, automatic alignment devices with the polarization state adjustment capability and two- or three-dimensional fiber end position adjustment capability are important devices for achieving multidimensional control of fiber laser arrays. In the field of interdisciplinary research, CBC technology has been enriched and developed along with advancements in related technologies. CBC has been shown to be an

effective approach to improve laser brightness, which can be utilized in various scenarios. Regarding modularization, modular development can meet different application scenarios and requirements, enabling the rapid construction of fiber laser CBC systems and promoting their application development.

The development process for the active phase control CBC of fiber lasers exhibits significant stage characteristics, with many excellent research achievements emerging at the interval of approximately 5 years. Domestic research institutions have played important roles in promoting its development, such as achieving kilowatt output power and arrays of thousands of beams for the first time. In terms of CBC modules such as single-frequency lasers and narrow linewidth lasers, the highest publicly reported technical indicators have also been achieved. With the continuous maturation of academic development and gradual improvement of technology in the field of the CBC of fiber lasers, unique application value has been demonstrated in areas such as basic scientific research and industrial processing, gradually integrating this technology into social productivity and daily life. Currently, in other countries, scientific devices and products related to the commercial use of CBC are being developed as light sources for basic scientific research and industrial processing. These developments are of great significance in promoting basic scientific research and supporting laser intelligent manufacturing. In the stage where the academic and technological development of the CBC of fiber lasers tends to mature, challenges and opportunities coexist. It is foreseeable that the "CBC+" model, driven by applications and uses in interdisciplinary research, will promote the development of relevant disciplines in the future. This will also lead to a new scientific understanding and technological progress in fiber laser CBC itself.

Key words laser optics; coherent beam combining; fiber lasers; research process