

高功率光纤激光相干合成的现状、趋势与挑战

王小林, 周 朴*, 粟荣涛, 马鹏飞, 陶汝茂, 马阎星, 许晓军, 刘泽金

国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073

摘要 光纤激光相干合成是突破单路光纤激光功率极限和实现更高输出功率的有效技术方案, 是传统高功率激光系统走向激光相控阵高功率光纤激光系统的重要基础。介绍了高功率光纤激光相干合成的系统结构, 并指出了主要研究对象和关键技术; 介绍和分析了光纤激光相干合成的国内外相关研究现状和发展趋势; 分析了光纤激光相干合成面临的主要技术挑战。

关键词 激光光学; 光纤激光; 相干合成; 相位控制; 激光相控阵; 相干放大网络

中图分类号 O436.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0201001

Current Situation, Tendency and Challenge of Coherent Combining of High Power Fiber Lasers

Wang Xiaolin, Zhou Pu, Su Rongtao, Ma Pengfei, Tao Rumao,
Ma Yanxing, Xu Xiaojun, Liu Zejin

*College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology,
Changsha, Hunan 410073, China*

Abstract Coherent combining of fiber lasers is an effective approach to pass through the power limitation of single channel fiber laser and achieve high output power, and is also an important foundation for the traditional high power laser system developing towards laser phased array of high power fiber laser system. The system configuration of high power fiber laser coherent combining is introduced, and the main study object and the key technique are pointed out. The research status and development tendency of fiber laser coherent combining are presented. The main technique challenges for fiber laser coherent combining are analyzed.

Key words laser optics; fiber lasers; coherent combining; phase control; laser phased array; coherent amplification network

OCIS codes 140.3280; 140.3290; 140.3298; 140.3510

1 引 言

光纤激光器以稀土离子作为增益介质, 以波导结构作为光束传输通道, 电光效率高, 光束质量好, 结构紧凑, 热管理方便, 在工业、医疗、国防等领域得到了广泛应用^[1-3]。由于大模场双包层增益光纤的制作工艺和高亮度抽运源技术的发展, 自 1999 年掺镱光纤激光突破 100 W 以来, 光纤激光输出功率得到了迅速提升^[1-2]。2009 年, 美国 IPG 光子公司实现了功率为 10 kW 的单模光纤激光输出^[4]; 2013 年, 美国 IPG 光子公司又将输出功率提升到 20 kW^[1]。但受非线性效应、模式不稳定效应等物理因素和材料损伤特性的限制, 单路单模激光器的输出功率始终有限。理论上, 在不考虑模式不稳定效应的情况下, 半导体激光抽运的光纤激光器最大输出功率为 36 kW^[5], 级联抽运的光纤激光器的最大输出功率为 70.7 kW^[6]; 如果考虑模式稳定效

收稿日期: 2016-09-20; **收到修改稿日期:** 2016-10-24

基金项目: 国家自然科学基金(61505260)、科技部重点研发计划(2016YFB0402204)

作者简介: 王小林(1985—), 男, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事光纤激光器及相干合成等方面的研究。

E-mail: chinaphotonics@163.com

* 通信联系人。E-mail: zhoup203@163.com

应,单模激光输出功率的理论极限则更低^[7]。

全光纤功率合束是获得更高功率输出的一种有效方法。2013年,美国IPG光子公司利用 19×1 全光纤功率合束器实现了100 kW的多模激光输出^[8-9],但是该激光器产生的光束质量退化明显,光束参数积为 $16 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$,难以满足远距离传输等特殊领域的需求。光谱合成和相干合成有望在获得更高功率输出的同时保持良好的光束质量。2014年,Honea等^[10]采用光谱合成实现了30 kW的功率输出;2015年,中国科学院上海光学精密机械研究所(SIOM)^[11]和中国工程物理研究院(CAEP)^[12]利用光谱合成均实现了10 kW量级的功率输出。相干合成利用小口径光束进行空间拼接并通过锁相控制获得等效的大口径激光输出,具备光谱合成散热效应的优点,可保持光束质量,提高光束亮度,是高能激光系统走向相控阵的基础,成为高能激光系统的重要发展方向之一^[13-15]。利用相干合成方法,美国麻省理工学院在2014和2015年分别实现了34 kW和44 kW接近理想光束质量的激光输出^[16]。

2 光纤激光相干合成系统结构与关键技术

2.1 光纤激光相干合成系统结构

如图1所示,典型相干合成系统主要包括放大器模块、合束模块、性能评价函数获取模块和系统控制模块。放大器模块提供多链路相干合成光源:线偏振窄线宽种子激光经过预放(A0)后,被全光纤分束器(BS0)分为多路,各路光束经过相位调制器(PM)、延迟线(DL、FS)、偏振控制器(PC)后,进入光纤放大器(AMP)中;放大器将激光功率放大后,输出到合束模块。合束模块通过一定方式将多路光束在近场实现高占空比合成光束输出。合束模块的输出光束经过高反射镜(HR)后,大部分($>99\%$)激光被直接输出,小部分(小于1%)激光进入性能评价函数获取模块。性能评价函数模块中,光束经过透镜(L)会聚后,被分束镜(BS1、BS2)分为3束,其中两束进入探测器用于获取性能评价函数,一束入射到相机用于观察远场光束。性能评价函数有多种获取方式,图1为采用带小孔的探测器(PD)探测远场光束中心主瓣能量的方式获取性能评价函数。在相干合成系统中,性能评价函数代表了相干合成光束质量的性能,性能评价函数达到极值时,相干合成的光束质量为最优。将性能评价函数输入系统控制模块中,利用适当的控制方法,例如频率抖动法、随机并行梯度下降算法(SPGD),对相干合成中的各个参量(偏振态、相位、光程差、光轴、倾斜)进行优化控制,在性能评价函数极值寻优过程中实现最优的相干合成效果。

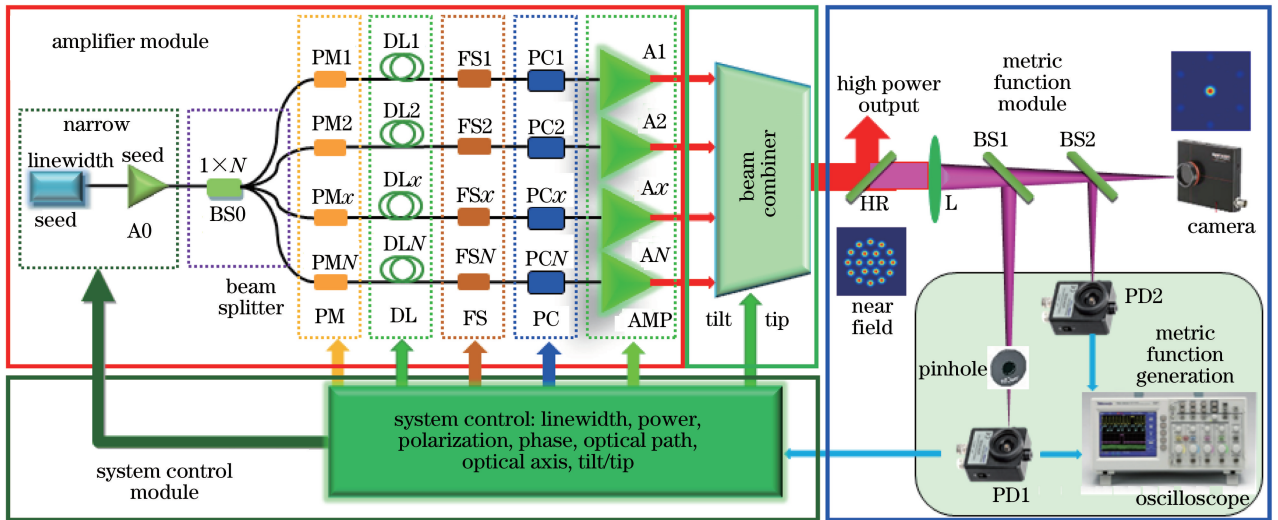


图1 光纤激光相干合成系统结构

Fig. 1 System configuration of fiber laser coherent combining

2.2 光纤激光相干合成关键技术

根据物理光学基本原理,要实现稳定的干涉,各路光束频率和偏振态需相同,且各路激光的相位差需恒定。为了获得相同频率、相同偏振方向的光源,需要利用主振荡功率放大(MOPA)的方式从单一种子激光

获得多路高功率的线偏振激光输出。为了获得光束质量高的相干合成输出,需要各路光束的占空比尽量高。为了获得稳定的干涉,需要对各路光束进行锁相控制。光纤激光相干合成的主要研究对象如表 1 所示。实际上,相干合成光强与单路激光的空间位置、激光功率、偏振态、线宽、光程差、倾斜波前、高阶波前畸变和相位噪声等因素都有关。在相干合成中,需要研究的关键技术包括线偏振窄线宽光纤放大器、高占空比孔径填充和多光束综合控制。

表 1 光纤激光相干合成的主要研究对象
Table 1 Main research objects of fiber laser coherent combining

Symbol	Parameter	Object	Research content
A_m, ω	Amplitude, frequency	Fiber amplifier	High power, narrow linewidth
(x_m, y_m)	Center position	Beam combining	High fill factor, axis stabilization
θ_m	Polarization angle	Polarization	PM amplifier, polarization compensation
$\varphi_m^{(t)} + \varphi_m^{(a)}$	Tilt/tip, wavefront	Wavefront	Mode control, tilt/tip control, beam cleanup
$\varphi_m^{(p)}(t)$	Phase	Phase noise	Phase locking, stabilize inference
r	Optical path	Optical path difference (OPD)	OPD is less than coherence length

3 研究现状

3.1 线偏振窄线宽光纤放大器

在光纤放大器中,可以使用两种方法实现线偏振光纤激光输出: 1) 基于全保偏光纤器件搭建线偏振光纤放大器,利用器件的偏振保持特性实现线偏振光的输出; 2) 基于偏振自适应补偿,在非保偏放大器中通过偏振控制实现高消光比的线偏振激光输出。

3.1.1 基于全保偏光纤器件的线偏振光纤放大器

利用全保偏光纤器件实现单频或窄线宽激光输出是实现相干合成的主要技术途径。表 2 为线偏振单频放大器的典型研究结果。尽管单频激光的相干长度较长,对相干合成的光程差控制要求较低,但受到受激布里渊散射(SBS)的限制,目前最高输出功率是基于空间结构实现的 811 W^[17]。能够有效用于相干合成的全光纤结构单频激光器的输出功率则停留在约 300 W^[18]。为了获得更高功率的线偏振激光输出,一般需要展宽种子激光的谱线来研究窄线宽光纤放大器功率提升的能力。

表 2 线偏振单频光纤放大器典型研究结果
Table 2 Typical research results of linear polarization single-frequency fiber amplifiers

Year	Institution	Configuration	Power /W	M^2	Polarization	
					extinction ratio	Reference
					(PER) /dB	
2005	University of Southampton, UK	Spatial	264	1.10	16	[19]
2006	Laser Zentrum Hannover, Germany	Spatial	148	<1.20	22	[20]
2007	University of Southampton, UK	Spatial	402	<1.10	<16	[21]
2009	Air Force Research Laboratory (AFRL), USA	Spatial	260	<1.30	18	[22]
2011	AFRL, USA	All-fiber	203	—	—	[23]
2011	University of Michigan, USA	Spatial	511	1.20	>15	[24]
2013	Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics (SIOM), China	All-fiber	170	1.02	>20	[25]
2013	National University of Defense Technology (NUDT), China	All-fiber	332	1.40	>21	[18]
2014	AFRL, USA	Spatial	811	<1.20	—	[17]

窄线宽放大器通过展宽种子激光的光谱抑制 SBS,但为了保证相干长度,又需要尽量压缩谱线宽度。表 3 为线偏振窄线宽放大器的典型实验结果。由表 2、3 可知,线偏振窄线宽放大器的输出功率与单频放大器相比有明显提升,但是目前输出功率也仅限于 2 kW 以内^[26],与常规宽谱激光器输出功率(20 kW 量级)

相比^[1],仍有较大差距。

2008年,美国 Nufern 公司实现了大于 1 kW 的线偏振窄线宽光纤激光输出^[27]。使用(6+1)×1 保偏光纤合束器实现抽运光和信号光的耦合,将纤芯/包层直径分别为 25 μm/400 μm 的大模场掺镱光纤作为增益介质,实现了放大器的全光纤化和全保偏化。抽运功率为 1.15 kW 时,激光输出功率为 1.01 kW,激光线宽为 8 GHz,光束质量 $M^2 < 1.25$ 。

表 3 线偏振窄线宽光纤放大器的典型实验结果

Table 3 Typical experimental results of linear polarization narrow-linewidth fiber amplifiers

Year	Institution	Configuration	Power /kW	M^2	Linewidth /GHz	PER /dB	Reference
2008	Nufern, USA	All-fiber	1.01	<1.25	8	—	[27]
2010	Northrop Grumman, USA	All-fiber	1.43	—	25	—	[28]
2013	Nufern, USA	All-fiber	1.50	—	—	—	[29]
2014	Lockheed Martin, USA	All-fiber	1.14	1.08	12	16	[30]
2015	Tianjin University, China	All-fiber	0.52	<1.10	30	18	[31]
2015	IPG Photonics, USA	All-fiber	1.03	1.18	20	20	[32]
2016	NUDT, China	All-fiber	1.89	<1.30	45	15.5	[26]

2015年,本课题组采用三级主振荡功率放大结构,将纤芯/包层直径分别为 21 μm/400 μm 的保偏掺镱光纤作为主放大级增益介质,当最高抽运功率为 1.9 kW 时,获得了 1.26 kW 的线偏振窄线宽激光输出,光束质量 $M^2 < 1.2$ ^[33]。由于模式不稳定效应的产生,当激光功率大于 1.26 kW 时,偏振度从大于 94% 降低到 89%,输出激光功率也存在一定的起伏。

2016年,本课题组报道了输出功率为 1.89 kW 的线偏振窄线宽光纤放大器^[26]。放大器的线偏振单频种子激光经过预放后,通过三级级联相位调制将光谱展宽。窄线宽种子激光经过三级放大后输出,其中主放采用纤芯/包层直径分别为 20 μm/400 μm 的保偏掺镱光纤作为增益介质。在总抽运功率为 2.55 kW 时,总输出功率为 1.89 kW,光束质量 $M^2 < 1.30$,激光线宽为 45 GHz,消光比为 15.5 dB。

3.1.2 基于偏振补偿的线偏振光纤放大器

光纤中线偏振光的 SBS 增益是非线偏振光 SBS 增益的 1.5 倍^[34],线偏振激光的受激拉曼散射增益则是非线偏振激光的 2 倍^[35]。实验发现,非保偏光纤放大器的模式不稳定阈值明显高于保偏光纤放大器的模式不稳定阈值^[36]。因此,采用偏振控制方法,在非保偏放大器中实现高消光比的线偏振激光也成为可相干合成窄线宽放大器的重要研究方向之一。

2010年,美国诺斯罗普·格鲁曼公司将通信中的偏振控制技术^[37-40]引入到大功率非保偏光纤放大器系统中,开展了光纤激光的自适应偏振控制实验,并将偏振控制后的线偏振激光用于相干合成^[28]。系统结构如图 2 所示,功率为 100 mW 的 1064 nm 种子激光光(MO)经过调制频率为 25 GHz 的相位调制后被分为 3 路,其中第 3 路激光经相位调制器、光纤延迟线(VDL)、偏振控制器(PC)后由非保偏光纤放大器放大到 1.43 kW。放大输出激光经偏振分束器分为两束,一束光经衰减后输出;另一束光为偏振控制系统提供反馈

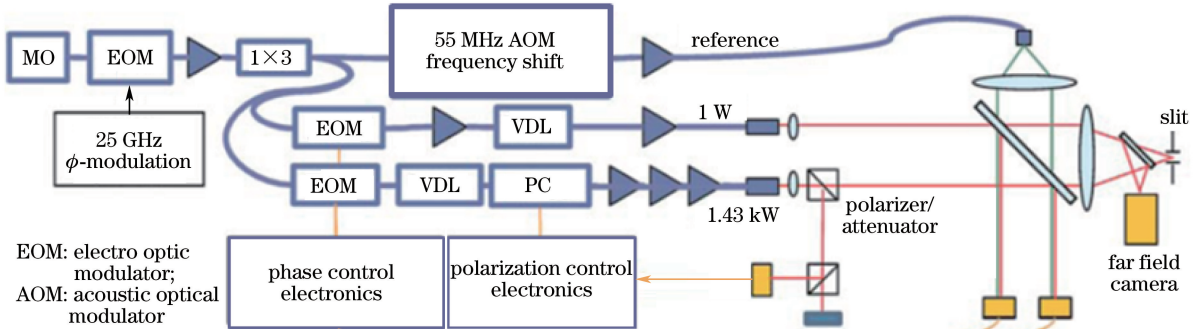


图 2 基于偏振控制光纤放大器的相干合成实验装置

Fig. 2 Experimental setup of coherent combining based on polarization control fiber amplifier

信号,利用偏振控制器实现对激光偏振方向的控制。两束光束利用外差法进行相位控制。在有偏振控制的情况下,合成光斑条纹对比度大于 90%,表明偏振控制方法能够在非保偏放大器中获得良好的线偏振特性。

2011年,本课题组利用偏振控制在非保偏放大器中实现了线偏振激光输出,将放大器消光比从 2.28 dB 提高到 11.5 dB^[41]。2012年,诺斯罗普·格鲁曼公司利用偏振控制技术进行了5路非保偏光纤放大器的偏振控制,并基于偏振控制的线偏振光进行相干合成^[42]。偏振控制后单路激光的消光比可大于 20 dB,线宽为 15 GHz。将偏振控制得到的 5 路线偏振激光利用衍射光学元件(DOE)进行相干合成,在没有偏振控制时,相干合成效率在 50%左右;有偏振控制时,相干合成效率接近 100%。2013年,诺斯罗普·格鲁曼公司又分别对相干合成过程中用到的3路放大器进行偏振控制^[43]。偏振控制后 3 路放大器的输出功率分别为 1.1, 1.3, 0.6 kW,消光比分别为 12, 18, 15 dB。对上述 3 路激光进行相干合成,获得了功率为 2.4 kW、质量因子为 1.2 的激光输出。2016年,美国空军研究实验室(AFRL)使用 5 台基于偏振控制的窄线宽放大器(单路输出功率约为 1.2 kW),实现了 5 kW 级相干合成输出^[44]。2016年,中国工程物理研究院王岩山等^[45]利用类似的偏振控制方法,获得了输出功率为 1 kW、消光比为 14.5 dB 的线偏振窄线宽激光输出。

上述实验结果都是基于线偏振种子激光偏振控制实现的。2015年,本课题组提出了基于非保偏种子的偏振控制方法^[46-47],该方案对种子激光的偏振特性没有要求。通过优化控制算法,将两级级联的全非保偏放大器输出激光的消光比提高到 16.7 dB。

在上述基于低功率输入端的偏振控制中,放大链路中的激光可能存在特定的偏振方向,这将导致非线性效应和模式不稳定阈值的降低。为了避免该问题,2015年,本课题组提出了在输出端进行偏振控制以获得线偏振激光的方案,该方案基于偏振锁相的非线偏振光-线偏振光产生技术^[48]。如图 3 所示,基于偏振锁相的原理,首先将放大器输出激光分为偏振方向正交的 p 偏振和 s 偏振两束光,然后利用相干偏振合成的方法,通过锁定正交光束的相位来获得高消光比的激光输出。利用该方案可对 300 Hz 以下的相位噪声进行有效补偿,并且可将随机变化的激光消光比稳定在约 12 dB^[48]。

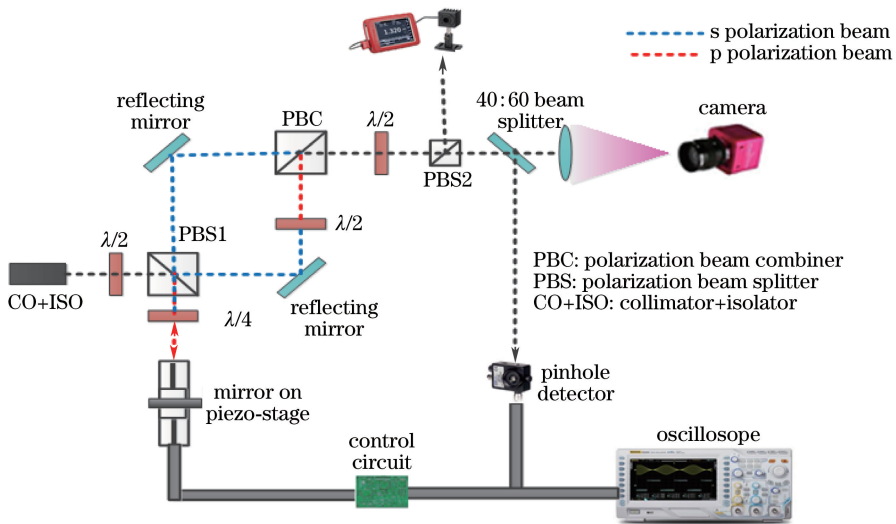


图 3 输出端偏振控制实现线偏振激光的实验装置

Fig. 3 Experimental setup of linear polarization laser with polarization control in output end

基于放大器前端的偏振控制无需空间光学元件,实现简单,但由于偏振态在各级放大器链路中随时间变化,可能会导致放大器的非线性和模式不稳定阈值降低。基于输出端偏振控制的方案需要利用较多的空间光学元件,对光路光轴、倾斜、相位控制都有较高的要求,难度较大,但能够避免放大器链路偏振态变化导致输出功率受限的问题。表 4 为非线偏振窄线宽放大器的典型实验结果。理论上,如果放大器输出的两个正交偏振态存在一定的相位关系,可以在非线偏振窄线宽放大器的基础上,利用与图 3 相似的偏振控制方案直接获得高功率线偏振激光输出。

3.2 孔径填充

在相干合成中,孔径填充是获得较高能量集中度的关键。根据孔径填充的实现方式,相干合成分为分孔

径相干合成和共孔径相干合成两类。在分孔径相干合成系统中,各路光束经过合束装置后,输出光束仍然包括多个独立孔径,各个孔径之间通过相位锁定,实现等效大口径输出,并在远场获得稳定的干涉效果。在共孔径相干合成系统中,各路光束经过合束装置后在近场和远场都为一束光。

表 4 非线性偏振窄线宽光纤放大器的典型实验结果

Table 4 Typical experimental results of non-linear-polarization narrow-linewidth fiber amplifiers

Year	Institution	Configuration	Power /kW	M^2	Linewidth	Reference
2014	AFRL, USA	All-fiber	1.17	1.2	3 GHz	[49]
2015	IPG Photonics, USA	All-fiber	>1.50	1.1	<15 GHz	[50]
2015	Shandong HFB Photonics, China	All-fiber	2.05	<1.4	75 GHz	[51]
2015	University Jena, Germany	All-fiber	2.30	<1.3	45 GHz	[52]
2015	MIT Lincoln Laboratory, USA	Spatial	2.55	<1.15	<12 GHz	[53]
2016	SIOM, China	All-fiber	2.50	<1.2	<50 GHz	[54]
2016	CAEP, China	All-fiber	2.90	1.6 at 1.6 kW	0.31 nm	[55]
2016	University Jena, Germany	Spatial	3.00	1.3	0.17 nm	[56]

3.2.1 分孔径相干合成

分孔径相干合成的主要方法有透射式光束拼接和反射式光束拼接两种,提高拼接光束的占空比是分孔径相干合成的关键。

1) 透射式光束拼接

透射式光束拼接无需反射镜,直接将输出光通过透镜、准直器等按照一定空间排布输出,主要包括准直器直接拼接、微透镜阵列拼接等^[57-59]。

准直器直接拼接方法如图 4 所示。将多个准直器按照一定的空间位置排布,为了获得高占空比,需要在提高光斑有效口径的同时减小相邻准直器间的距离。随着自适应光纤准直器(AFOC)的发展,在实现光束准直的同时,还能实现倾斜控制^[57,60]。2011 年,美国 Dayton 大学和陆军实验室合作,利用 AFOC 光束拼接方案,实现了 7 路 100 mW 量级的目标在回路相干合成,传输距离为 7 km^[61]。2012 年,本课题组利用这种光束拼接方案,实现了两路总功率为 350 W 的相干合成^[62]。2013 年美国 Dayton 大学、Optonicus 公司和美国陆军实验室又报道了 7,19,21 路大口径高占空比光束拼接系统^[63]。图 4 所示的 3 种光束拼接结构中,光斑直径为 33 mm,相邻光束之间的距离为 37 mm,占空比大于 89%。

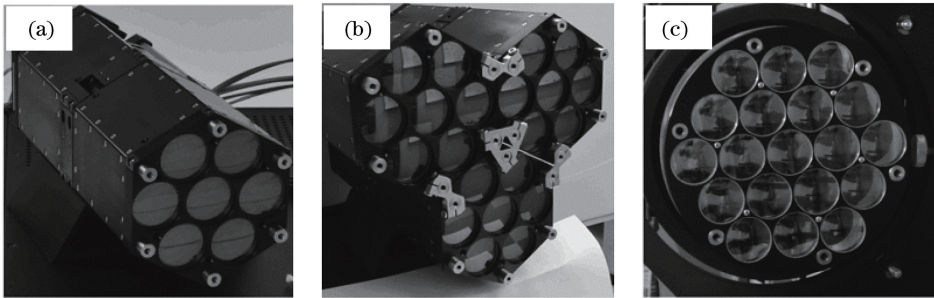


图 4 不同单元高占空比光束合成装置。(a) 7 单元;(b) 21 单元;(c) 19 单元

Fig. 4 High duty ratio beam combining devices with different elements. (a) 7 elements; (b) 21 elements; (c) 19 elements

为了提高占空比,国外多家研究机构采用微透镜阵列的光束拼接方法,典型结构如图 5 所示。首先将光纤输出端或光纤端帽固定在硅基 V 形槽内,保持各路光纤严格平行,且输出端在同一平面内,再将微透镜阵列放置于光纤输出端,保证光纤输出端面严格位于微透镜阵列的焦点上^[58,64]。2011 年,美国麻省理工学院利用该方案,实现了 8 路光纤激光相干合成,总输出功率为 4 kW,在最高输出功率时,合成光束占空比约为 0.6^[58]。

2) 反射式光束拼接

反射式光束拼接利用反射镜将光束多次反射后进行拼束,以提高光束占空比,主要有分立反射镜拼接、圆台棱锥拼接、台阶状光束拼接等拼束方式^[65-67]。

采用分立元件进行光束拼接的方法可以避免激光输出孔径中不透光部分对占空比的影响,能够获得较

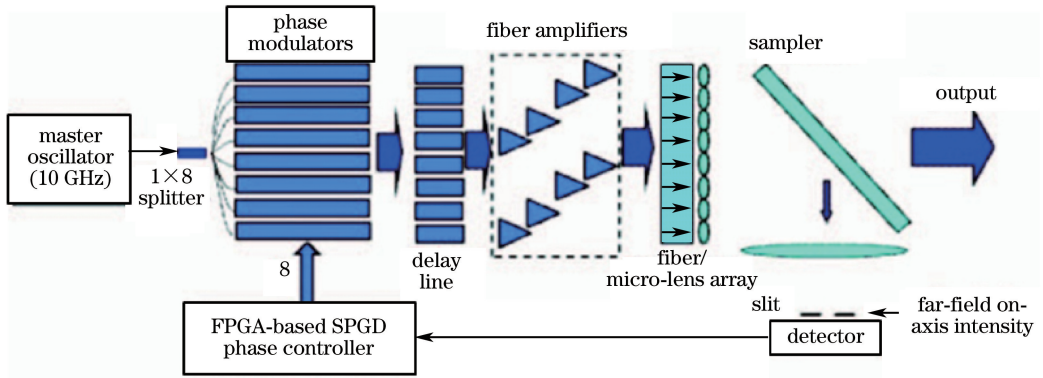


图 5 基于微透镜阵列的光束拼接原理

Fig. 5 Beam splicing principle based on micro-lens array

高的占空比,而且各路光束的单独调节较为容易^[68]。中国科学院上海光学精密机械研究所利用该方案,实现了 4 路光束的相干合成,总输出功率为 1062 W^[69]。

基于圆台棱锥的光束拼接原理如图 6 所示,将圆台侧面(与底面成 45°)制作成 6 个对称平面,让 6 路光束从 6 个侧平面以 45°入射,第 7 路光束从圆台中间透射。利用该方案已实现占空比为 0.6 的光束拼接^[66]。

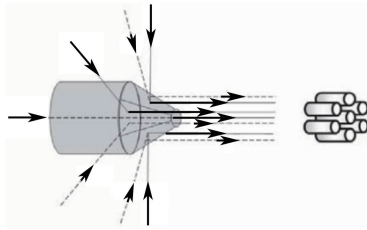


图 6 基于圆台棱锥的光束拼接原理

Fig. 6 Beam splicing principle based on platform pyramid

台阶状光束拼接方案如图 7(a)所示。参与合成的光束从合成器两侧入射,经合束器侧边的 45°高反射镜反射后,从合束器前端输出。图 7(b)为 19 路光束合成时光束拼接的上视图,图 7(c)为拼接后的光斑分布^[67]。利用该光束拼接方案,本课题组于 2011 年实现了 9 路输出总功率为 1.8 kW 的相干合成,光束拼接的占空比为 0.4^[70]。

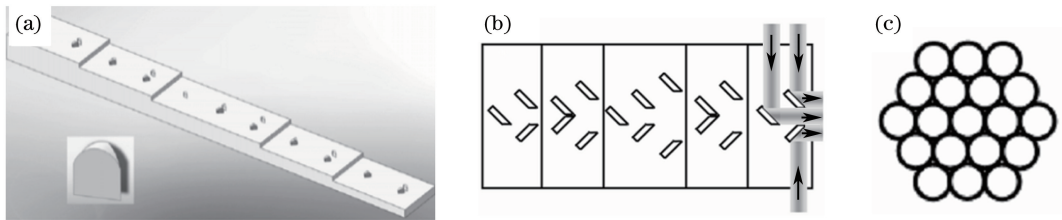


图 7 台阶状合束器。(a) 合束器三维图; (b) 光束拼接原理; (c) 拼接光斑图

Fig. 7 Step-like beam combiner. (a) Three-dimensional plot of beam combiner; (b) beam splicing principle; (c) splicing spot figure

3.2.2 共孔径相干合成

典型的共孔径相干合成包括基于衍射光学元件(DOE)的相干合成、相干偏振合成和基于光波导的相干合成等。

1) 基于 DOE 的相干合成

基于 DOE 的相干合成原理如图 8 所示^[71]。利用光路可逆原理,将 DOE 反向使用:阵列光束在保持特定相位情况下,沿着 DOE 衍射级的相反方向入射后,DOE 将其合为一束共孔径光输出。这一方案在 20 世纪 80 年代就得到了深入研究,被用于半导体激光器、固体激光器和气体激光器的相干合成^[72-75]。2012 年,美国诺斯罗普·格鲁曼公司采用这一方案实现了 5 路 500 W 光纤激光的相干合成^[71],总输出功率为

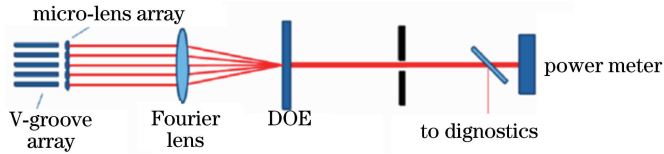


图 8 基于 DOE 的相干合成原理示意图

Fig. 8 Diagram of coherent combining based on DOE

1.93 kW, 合成效率为 79%。2016 年, 美国空军研究实验室又将这一方案的相干合成光束的输出功率提升到 4.9 kW, 效率为 82%^[44]。

2) 相干偏振光束合成

相干偏振光束合成的原理如图 9 所示。两束偏振方向垂直、相位差为 0 的光束进入偏振合束器后, 被合成一束线偏振光; 利用半波片对该光束进行偏振方向调节后, 可以进行下一级的偏振合成^[76-77]。如此, 在理论上可以将合成级数无限扩展下去, 实现大阵元光纤激光的相干合成。2010 年, 美国洛克希德·马丁公司利用这一方案, 实现了 4 路光纤激光的相干合成, 输出总功率为 25 W^[77]。2013 年, 德国耶拿大学利用该方案实现了 4 路百瓦级飞秒脉冲激光的相干偏振合成, 整个系统的平均输出功率为 530 W, 合成效率为 93%^[78]。2015 年, 本课题组利用这一方案实现了 2.16 kW 的相干合成^[79]。目前, 欧洲的国际相干放大网络 (ICAN) 和 XCAN 计划也选择此方案作为大能量、高峰值功率脉冲激光的实现方法 (见第 4.3 节)。

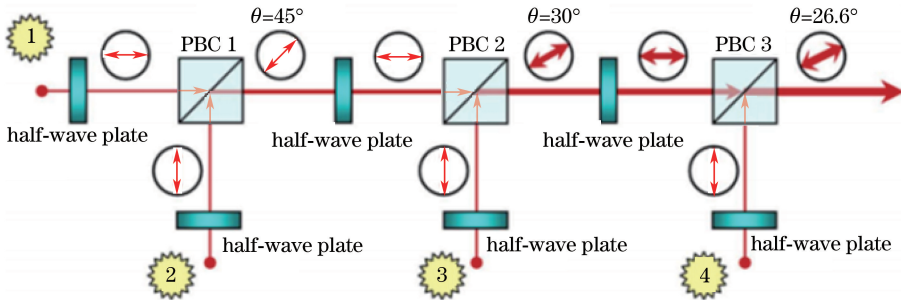


图 9 相干偏振光束合成原理图

Fig. 9 Diagram of coherent polarization beam combining

3) 基于光波导的光束合成

基于光波导的光束合成原理如图 10 所示, 采用横截面尺寸为几百微米级的矩形波导进行光束合成^[80]。激光器输出光束按照图 10 所示的方式排列在波导的输入平面上, 阵列光束在波导中传输时会进行多次成像, 当阵列光束的相位和波导的尺寸满足特定值时, 将会在波导输出端获得单一近衍射极限的光斑, 从而实现光束阵列的有效合成。美国洛克希德·马丁公司于 2007 年提出该方法, 并于 2010 年实现了 4 路光纤激光的相干合成, 总功率大于 100 W, 合成效率为 80%^[81]。

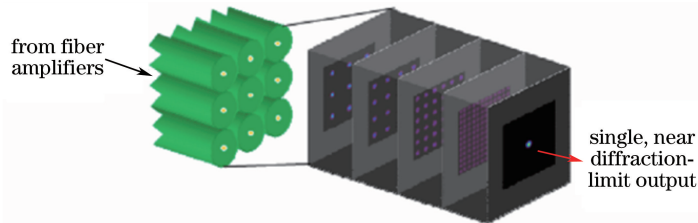


图 10 基于光波导的光束合成原理

Fig. 10 Principle of beam combining based on optical guide

3.3 多光束综合控制

相位误差对相干合成的影响是最直接和最重要的, 早期相干合成中的控制主要集中在相位锁定。随着研究的深入, 研究人员发现各路光束的光轴、倾斜、偏振、光程差都会影响相干合成的效果。由于相位控制已有较多介绍, 这里重点介绍关注较少的光程差、倾斜和偏振控制。需要说明的是, 相位控制中的大多数控制

算法在动态光程差、倾斜、偏振控制中都是适用的。

3.3.1 相位控制

为了获得稳定的干涉,需将参与合成的各路光束的相位差控制在 $2n\pi$ 。一般而言,相位控制方案可以分为被动相位控制和主动相位控制。

1) 被动相位控制

被动相位控制通过一定的能量耦合机制或者非线性相互作用实现各路激光相位起伏的自动补偿,被动相位控制方法主要有三类:1)外腔法,通过对激光器阵列输出光场进行横向模式选择来实现光束的相位锁定,包括自傅里叶变换腔、傅里叶自成像腔、单模光纤滤波环形腔等^[82-85];2)自组织法,通过参与合成各个激光器光场的相互耦合实现相位锁定,包括多芯光纤倏逝波耦合、干涉仪结构激光器阵列和相互注入式激光器阵列^[86-90];3)相位共轭法,利用非线性效应产生的相位共轭效应补偿相位畸变,从而获得相位一致的激光输出^[91-92]。研究人员采用上述方法实现了多达 25 路的相干合成^[93],但是就合成功率而言,只有单模光纤滤波环形腔法实现了大于 1 kW 的功率输出^[69]。

2) 主动相位控制

被动锁相实现简单,但系统输出功率普遍较低,且在物理机制上存在合成效率随着激光数目增多而下降的问题^[94-95]。因此,当前高功率相干合成中主要使用的是主动相位控制方法。依照主动相位控制机理,主动相位控制方法主要有外差法、频率抖动法、优化算法和其他相位控制方法。

(1) 外差法

外差法利用种子激光移频得到的参考光与各路放大光进行外差检测,获取各光束的相位噪声特性,根据测量的相位对各路光束施加相应的补偿,以实现相位同步^[28,96]。美国诺斯罗普·格鲁曼公司采用外差法于 2003 年实现了 4 路光纤放大器的相干合成,输出总功率为 8 W,该公司于 2006 年将 4 路激光的总功率提升到了 470 W^[65,97]。2010 年,英国 QinetQ 公司实现了 4 路光纤放大器相干合成,输出功率为 600 W^[68]。同年,诺斯罗普·格鲁曼公司采用外差法实现了单路 1.4 kW 光纤放大器的相位控制^[28]。2011 年,诺斯罗普·格鲁曼公司又实现了单路 608 W、单频掺铒光纤放大器的相位控制^[98]。本课题组于 2006 年采用外差法实现了 3 路瓦级光纤放大器的相干合成^[99]。2010 年,哈尔滨工业大学范馨燕等^[66,100]采用外差法实现了 7 路瓦级光纤激光的相干合成。由于外差法需要多个探测器,系统较为复杂,2012 年以后国际上主要研究单位已经较少使用该方法进行相位控制。

(2) 频率抖动法

频率抖动法利用不同频率的高频振荡信号对相位调制器进行小幅度相位调制,这个调制信号作为相位噪声的载波,在性能评价函数分析模块中利用带通滤波器和锁相检测方法对相位噪声进行解调,获得各路激光的相位噪声并用于相位噪声的补偿。频率抖动法最初称为多抖动法,美国哈佛大学机器人实验室于 2004 年采用该技术实现了 7 路 1 W 光纤放大器的相干合成,将闭环时的峰值光强提高到了开环时的 5~6 倍^[101]。2004 年,美国空军研究实验室对多抖动法进行了改进,提高了调制频率和控制带宽^[102]。2006 年,美国空军研究实验室又实现了 9 路光束的相干合成,其锁相精度优于 $\lambda/20$,输出总功率为百瓦级^[103]。2009 年,法国空间实验室利用该方法实现了短程大气湍流的补偿^[104]。2011 年,美国空军研究实验室利用该方法实现了 16 路光纤激光的相干合成,输出总功率为 1.4 kW^[105]。2011 年,本课题组利用改进的单频抖动法实现了 9 路总功率为 1.08 kW 的光纤放大器的相干合成^[106]。2012 年美国诺斯罗普·格鲁曼公司与美国空军研究实验室合作,采用抖动法实现了 15 路光纤放大器的相干合成,输出功率为 600 W^[107]。2014 年,美国诺斯罗普·格鲁曼公司利用多抖动法实现了 3 路光纤放大器相干合成,输出功率为 2.4 kW^[43]。2015 年,本课题组利用单频抖动法实现了 4 路激光共孔径输出的相干偏振合成,输出功率为 2.16 kW^[79]。2016 年,美国空军研究实验室利用多抖动法,实现了效率为 82%、总输出功率为 4.9 kW 的共孔径相干合成^[44]。

(3) 优化算法

基于优化算法的相位控制方法将各路光束的相位作为控制参量,并利用算法对控制参量进行优化,在系统性能评价函数达到极值的过程中实现各路激光的锁相,包括爬山法、模拟退火算法、SPGD 算法等^[108]。SPGD 算法在当前相干合成中的应用最为广泛,美国马里兰大学、麻省理工学院、诺斯罗普·格鲁曼公司、中

中国科学院光电技术研究所、国防科技大学等均开展了利用 SPGD 算法进行光纤激光相干合成的研究。2005 年,马里兰大学实现了 7 路毫瓦级光纤激光相干合成^[109]。2006 年,麻省理工学院实现了 48 路毫瓦级光纤激光相干合成^[59]。2010 年,本课题组实现了 9 路激光相干合成,输出功率为 1.14 kW,随后又将功率提升至 1.8 kW^[70,110]。2011 年,美国麻省理工学院实现了 8 路总功率为 4 kW 相干合成输出^[58]。2012 年,美国诺斯罗普·格鲁曼公司与麻省理工学院合作实现了 5 路总功率为 1.9 kW 的相干合成输出^[71]。2011 年,美国麻省理工学院实现了 218 路半导体激光相干合成的锁相控制^[111]。2011 年和 2014 年,美国陆军实验室还开展了长距离“目标在回路”光纤激光相干合成实验,利用改进的 SPGD 算法实现了 7 km 外靶目标上的激光相位锁定^[61,112]。

(4) 其他方法

除了以上应用较多的几种相位控制方法外,平衡光学互相关法、峰值比例算法、条纹提取法四波剪切干涉仪法也被用于相干合成的相位控制^[64,113-117],单纯形法、遗传算法、函数近似法等曾用于自适应光学中的波前校正方法原则上都能用于光纤激光的相位控制^[118-120]。平衡光学互相关法主要用于脉冲激光相干合成的锁相控制。2016 年,田昊晨等^[113]利用该方法实现了两台独立的飞秒激光器脉冲序列与载波包络相位同步,将两台激光器的剩余相对时间抖动控制在 380 as,两台激光器的剩余相位噪声为 495 mrad。

3.3.2 光程差控制

随着光纤放大器输出功率和线宽的提,参与相干合成的各路光束的有效相干长度减小。以 IPG 光子公司的 1 kW 线偏振放大器的 20 GHz 线宽为例,其相干长度为 1.5 cm^[32]。对于吉赫兹线宽的高功率激光相干合成,要想获得良好的相干合成效果,需要将各路光束之间的相位差控制在毫米量级^[28]。此外,当参与相干合成的激光是脉冲激光时,各光束之间的光程差还会引起脉冲错位、群延时等效,严重影响相干合成效果。这种情况下需要更为精确的光程差控制使得各路脉冲在时间上严格同步。目前,能够实现光程差控制的主要有匹配被动光纤长度法、空间光路调节法、光学延迟线法、光纤拉升/相位延迟法等。

1) 匹配被动光纤长度法

利用匹配被动光纤长度控制光程差主要包括光程差的测量和补偿两个步骤。首先利用一束短脉冲激光测量各路合成光束之间的光程差,然后根据测量结果增加或缩短各路光束的传能光纤长度。该方法的典型实验结构如图 11 所示。在实验室条件下,利用该方法将各路光程差控制在厘米量级是可行的。因此,对于一些光程差调节范围大,精度要求不太高(1~2 cm)的应用场合,可以利用被动光纤长度匹配的方法进行光程差调节。

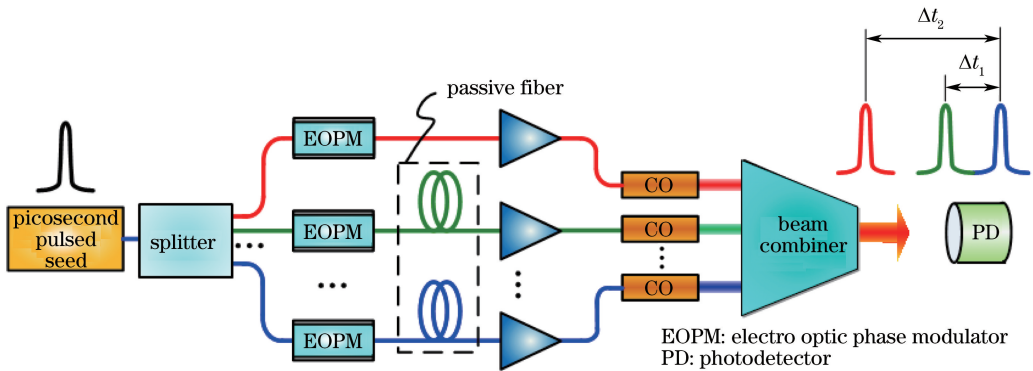


图 11 利用匹配被动光纤长度法控制光程差

Fig. 11 Optical path difference control by matching passive fiber length method

2) 空间光路调节法

空间光路调节是通过调整准直器的相对位置或控制反射镜之间的距离来实现对光程差的控制。该方法中的光程差控制精度主要由支撑光学镜面的光学调整架决定,调整架精度越高,光程差控制精度越高。以 NewPort 公司的 5 维调整架 MAX605 为例,其调节范围为 25 mm,调节精度为 10 μm ^[3]。利用该调整架进行光程差控制时,相应的控制范围大于 2 cm,控制精度为 10 μm ,正好弥补了匹配被动光纤方式光程差控制精度的不足。为了实现阵列光束的光程差调节,本课题组设计了具有光程差调节能力的多光束合束器,如图 12 所示^[121]。以 7 路光束为例,将 45°高反射镜片和光程差调节装置安装到台阶状底座上,通过在底座滑槽

上移动贴有两块 45°高反射镜的光程差调节装置来改变光程差;参与合束的各光束从合束器的一侧入射,经过光程差调节装置的两次反射后,再经 45°高反射镜反射,最终获得阵列光束输出。

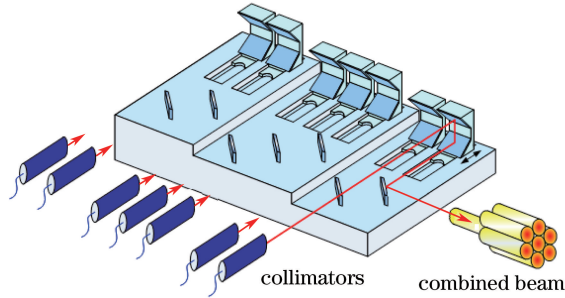


图 12 具有光程差调节能力的多光束合束器

Fig. 12 Multi-beam combiner with optical path difference adjustment function

将匹配被动光纤长度法和空间光路调节法相结合,2012年,本课题组对窄线宽纳秒脉冲放大器相干合成中的光程差进行了控制^[122]。在进行光程差调节之前,各路脉冲激光之间存在严重的时域误差($\Delta t > 100$ ns),阵列光束远场光斑的条纹对比度仅为 22%;在进行光程差调节之后,三路脉冲激光实现了时域上的重合,阵列光束远场光斑的条纹对比度提高到 86%。

3) 光纤延迟线法

宽谱和脉冲激光相干合成时,尤其是超短脉冲相干合成时,激光的 3 dB 线宽为 22 nm,甚至更宽,对应的相干长度小于 $5 \mu\text{m}$ ^[123],这种情况需要利用光纤延迟线来实现更高精度的光程差控制。光纤延迟线输入输出界面采用全光纤结构,无需空间光路调节,调节精度较高。以 NewPort 公司的 MDL 系列延迟线为例,其调节范围大于 1 cm,延迟分辨率为 $0.3 \mu\text{m}$,最差测试条件下的控制精度小于 $3 \mu\text{m}$ ^[124]。

利用延迟线进行光程差控制是目前相干合成中使用较多的方法。2013年,在 4 路脉宽小于 30 fs 的脉冲激光相干合成中,德国耶拿大学利用延迟线对光谱宽度为 22 nm、相干长度小于 $5 \mu\text{m}$ 的 4 路光束进行精确光程差控制,实现了平均功率为 135 W、峰值功率为 11 GW 的脉冲激光相干合成输出^[123]。

4) 光纤拉伸/相位延迟法

前述的 3 种光程差控制方案能将光程差控制在约 $1 \mu\text{m}$,但是本质上都是静态光程差控制,不能对动态光程差进行实时补偿。如果待合成光束的光谱更宽,则光程差动态变化需要更高精度的群延时控制,这时可以选择光纤拉伸/相位延迟法^[125]。光纤拉伸法是通过拉伸或压缩光纤的长度来改变光程差,相位延迟法是通过控制施加在相位调制器的相位大小来改变光程差。利用光纤拉伸/相位延迟法进行光程差控制,控制精度高,且响应速度快。以美国 OPTIPHASE 公司的压电驱动系列光纤伸缩器为例,其 PM 1-Layer 保偏光纤拉伸器的电压响应精度为 $0.035 \mu\text{m}/\text{V}$,光程差控制精度可小于 $0.035 \mu\text{m}$,控制范围在 $-17.5 \sim 17.5 \mu\text{m}$ 范围内^[126]。以 Photline 公司的 150 MHz 相位调制器 NIR-MPX-LN-0.1 为例,对于 $1 \mu\text{m}$ 的激光,其光程差控制范围为 $-10 \sim 10 \mu\text{m}$,控制精度可以小于 $0.01 \mu\text{m}$ ^[127]。

2011年,美国诺斯罗普·格鲁曼公司利用光纤伸缩器,对 10.5 nm 的宽谱光源相干合成中的群延时进行了精确控制^[125]。2016年,本课题组将动态光程差控制和锁相控制结合,实现了飞秒脉冲的相干合成^[128-129]。图 13 为有无光程差控制时的相干合成效率,结果表明,在光程差小于 $90 \mu\text{m}$ 时,动态光程差控制能够极大提升相干合成的效率^[128-129]。

3.3.3 倾斜控制

各路光束在目标处有效重叠是相干合成的基本前提,这就需要对各路光束进行倾斜控制。直接利用镜架的多维调节功能即可实现静态倾斜控制,但在实际的相干合成系统中,由于机械抖动的存在,需要对倾斜波前进行实时控制。目前,能够用于倾斜波前控制的器件主要有液晶空间光调制器、高速倾斜镜和 AFOC 等^[60,130-131]。液晶空间光调制器由于承受功率有限,在高功率相干合成中使用不多。传统的光束控制系统一般利用倾斜镜对光束进行角度扫描控制。在光纤激光相干合成系统中,为了与全光纤系统匹配,一般使用 AFOC 进行动态倾斜控制。

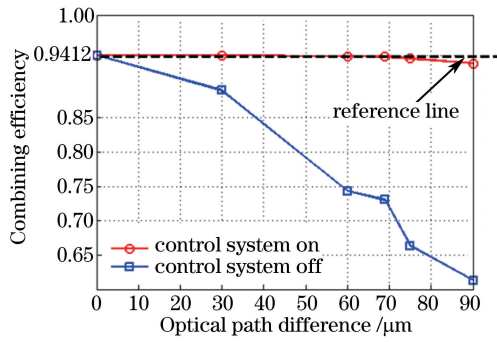


图 13 有无动态光程差控制的相干合成效率

Fig. 13 Efficiency of coherent combining with and without dynamic optical path difference control

2012 年,本课题组利用快速倾斜镜,实现了活塞和倾斜同时控制的 2 路相干合成^[132]。2012 年 7 月,美国诺斯罗普·格鲁曼公司基于 SPGD 算法,将光纤输出头固定在挠性移动台上,通过对挠性移动台的 X-Y 位移控制,实现了相干偏振合成中的光轴对准,实验结果如图 14 所示^[133]。当没有倾斜控制时,各路光束的光轴不重合,在目标处有多个光斑。当进行倾斜控制时,各路光束的光轴重合,合成光束质量得到极大提高。

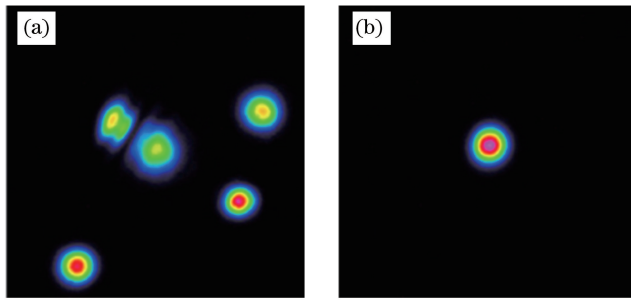


图 14 实验得到的合成光斑。(a) 无倾斜控制; (b) 有倾斜控制

Fig. 14 Combined light spots obtained in experiments. (a) Without tilt/tip control; (b) with tilt/tip control

AFOC 是集光束准直和倾斜控制于一体的器件^[57,60,134-135],在常规准直器光纤发射端的 X、Y 方向安装 4 个微型压电陶瓷片,通过压电陶瓷(PZT)的电致伸缩效应,改变光纤输出端面在发射透镜焦平面的位置,实现输出光束的二维倾斜控制。相对于高速倾斜镜,AFOC 结构紧凑,可精确控制,惯性小,谐振频率高。美国陆军实验室开发了低功率 AFOC,并实现了 6 路毫瓦量级低功率光纤激光的相干合成^[57]。2009 年,马里兰大学进行了 7 路 AFOC 的相干合成^[135]。结果表明,只进行锁相控制时,性能评价函数在 0.4 左右;如果同时进行倾斜和相位锁定,性能评价函数可提高到 0.6 以上,合成光束质量明显提高。该自适应准直器在多个实验中用于倾斜控制,如 2011 年报道的 7 km 目标在回路相干合成中的倾斜控制和 2014 年报道的 7 km 大气自适应补偿实验中的倾斜控制^[61,112]。

中国科学院光电技术研究所研发了类似的高功率 AFOC,该准直器的倾斜控制范围在 ± 0.3 mrad 以内,在输出功率为 175 W 的情况下,没有明显的功率损耗,壳体表面温升小于 5°C ^[60]。2011 年,中国科学院光电技术研究所利用自行研发的 AFOC 实现了活塞和倾斜同时控制 3 路光束的相干合成^[60]。2012 年,本课题组利用中国科学院光电技术研究所生产的 AFOC 实现了 6 路激光的同时倾斜和锁相控制^[136]。本课题组利用该准直器进行了总输出功率为 350 W 的相干合成,实现了有效倾斜控制^[62]。2013 年,中国科学院光电技术研究所耿超等^[137]利用 7 路自适应光学准直器,实现了 7 路光束相干合成的倾斜控制,实验结果如图 15 所示。结果表明,在没有倾斜控制时,通过空间光路调节的各路光束并不能在目标处有效地重合[图 15(a)];通过倾斜控制,则能够有效地将各路光束控制到目标中心[图 15(b)]。

上述两种直接驱动光纤输出端的 AFOC 推力较小,只能驱动重量较轻的光纤端头,而目前高功率光纤激光的输出都需要采用大尺寸的光纤端帽。2014 年本课题组提出了基于块状 PZT 和柔性铰链结构的新型 AFOC,结构如图 16(a)所示^[138-139]。柔性铰链将光纤端帽支架连接到基座上,在基座与端帽支架间装有两个块状 PZT,分别负责 X、Y 两个方向上的光束偏转。与薄片状 PZT 相比,块状 PZT 的推力至少提高两个

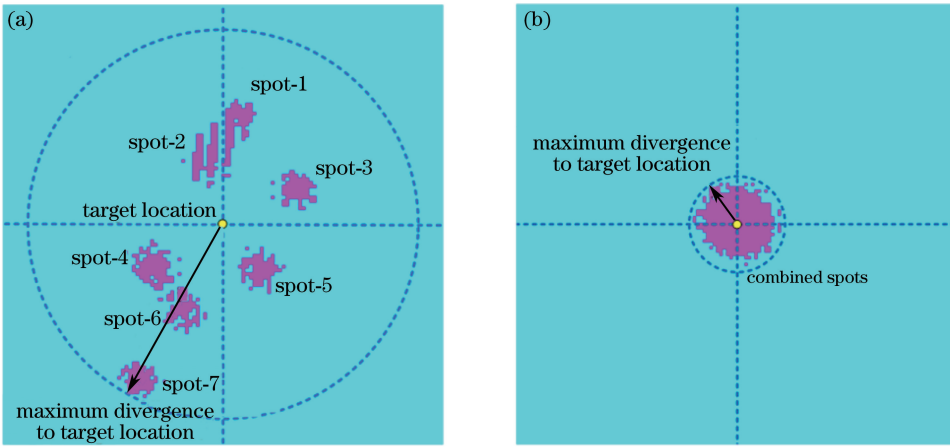


图 15 基于 AFOC 的 7 路光束相干合成的实验结果。(a)倾斜控制前;(b)倾斜控制后
Fig. 15 Experimental results of 7-element beam coherent combining based on AFOC.

(a) Before tilt/tip control; (b) after tilt/tip control

量级,可轻松推动质量较大的端帽运动。2016 年,将该准直器应用于高功率光纤放大器中,实现了 300 W 的功率输出^[140],对两路激光相干合成进行倾斜控制,实验结果如图 16(b)所示。结果表明,只有同时进行倾斜和锁相控制时,性能评价函数才能接近极大值,从而获得较好的相干合成效果。

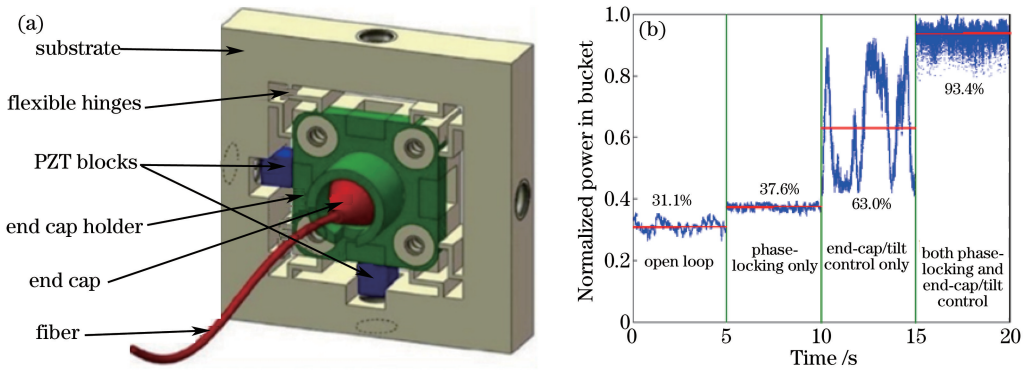


图 16 (a)基于柔性铰链的 AFOC 示意图;(b)倾斜控制相干合成实验结果

Fig. 16 (a) Diagram of AFOC based on flexible hinges; (b) experimental results of coherent combining with tilt control

3.3.4 偏振控制

偏振控制主要有两方面的作用:1) 通过对放大器的偏振态控制,获得高消光比的光束输出;2) 调节线偏振光束的偏振方向,使得各路光束在合成处的偏振角度满足所要求。对于分孔径相干合成和基于 DOE 的光束合成,要求各路光束的偏振方向相同;对于偏振相干合成,要求参与合成光束的偏振态两两正交。在实际相干合成系统中,放大器的偏振控制和偏振角度的控制一般是分离进行的。对于放大器的偏振控制在第 3.1.2 节已经介绍,这里不再赘述。一般采用半波片对输出偏振角度进行调节。目前公开报道的相干合成中,主要通过手动调节半波片来实现偏振角度调节^[77,141],但是随着相干合成阵列数量的增加,手动调节已不能满足要求,与相干合成中的倾斜、相位进行一体化自动控制是必然趋势。一种可行的方法是在 AFOC 中集成电动调节的半波片,在一个器件上同时实现倾斜控制和偏振方向调节。

3.4 典型相干合成的实验结果

表 5 为相干合成的典型实验结果。尽管在 2009 年美国诺斯罗普·格鲁曼公司便实现了 105 kW 的激光输出,但是实验中的板条激光束质量不好,导致合成光束质量较差^[142]。光纤激光具有较好的光束质量,但是单路功率较低,因此提高输出功率需要增加合成路数。目前,分孔径相干合成的最高功率为 2015 年麻省理工学院采用 42 路光纤激光实现的功率为 44 kW 的激光输出^[146];合成 2011 年麻省理工学院采用半导体激光器实现的合成路数为 218 路^[111,143]。共孔径相干合成的最高输出功率为 2016 年美国空军研究实验室实现的 4.9 kW^[44]。

表 5 连续激光相干合成典型实验结果

Table 5 Typical experimental results of continuous laser coherent combining

Year	Institution	Source	Phase control method	Combination type	Power /chains	Reference
2009	Northrop Grumman	Fiber+slab	Heterodyne	Filled aperture	105 kW/7	[142]
2011	NUDT, China	PM fiber amplifier	SPGD	Filled aperture	1.8 kW/9	[70]
2011	MIT, USA	Laser diode	SPGD	Filled aperture	38.5 W/218	[111] [143]
2011	MIT, USA	PM fiber amplifier	SPGD	Filled aperture	4 kW/8	[58]
2013	MIT, USA	PM fiber amplifier	—	Filled aperture	21 kW/19	[144]
2014	MIT, USA	Fiber amplifier	—	Filled aperture	34 kW/—	[16]
2015	MIT, USA	Fiber amplifier	—	Filled aperture	44 kW/42	[16]
2015	NUDT, China	PM fiber amplifier	Dither	Common aperture	2.16 kW/4	[79]
2016	AFRL, USA	PM fiber amplifier	Dither	Common aperture	4.9 kW/5	[44]

4 发展趋势

4.1 兼顾长距离传输和大气自适应补偿的相干合成

传统相干合成中光束传输距离一般较短,光束延迟对控制系统的控制带宽影响不大,但是在长距离光束传输中,光束本身的时间延迟是一个需要考虑的因素。此外,传统相干合成中对大气效应考虑较少,然而在实际应用中,大气效应是一个无法回避的因素。因此,兼顾长距离传输和大气自适应补偿相干合成是相干合成的研究重点之一和发展趋势。

2011年,戴顿大学智能光学实验室开展了7路光束传输7 km的大气补偿实验,提出了一种称为延迟SPGD的算法(D-SPGD),可以有效解决光束传输延迟导致的控制带宽下降问题^[61]。利用传统SPGD算法锁相后,性能评价函数值提高了3.7倍,利用D-SPGD算法锁相后,性能评价函数值提高了5.6倍。

2014年,戴顿大学智能光学实验室报道了21路光束传输7 km的相干合成和大气补偿实验^[112]。21路阵列激光经过7 km斜程大气传输后到达目标处,利用小孔获取性能评价函数,利用相机测量合成光斑形态。实验中利用AFOC的倾斜控制功能实现各路光束的重合,利用锁相控制同时实现相位锁定和大气湍流补偿。利用D-SPGD算法进行锁相控制时,由于单个光束发射口径小于大气湍流的相干长度,锁相控制可以有效补偿大气湍流。实验结果表明,锁相后的桶中功率为锁相前的16.3倍,达到真空中理想情况的88.1%。图17为不同大气湍流强度下相干合成锁相控制前后的平均光强。可以看出湍流增强时,中心光强能量集中度出现一定程度降低;但即使大气湍流的相干长度为3.6 cm时,相干合成的实验结果都比非相干

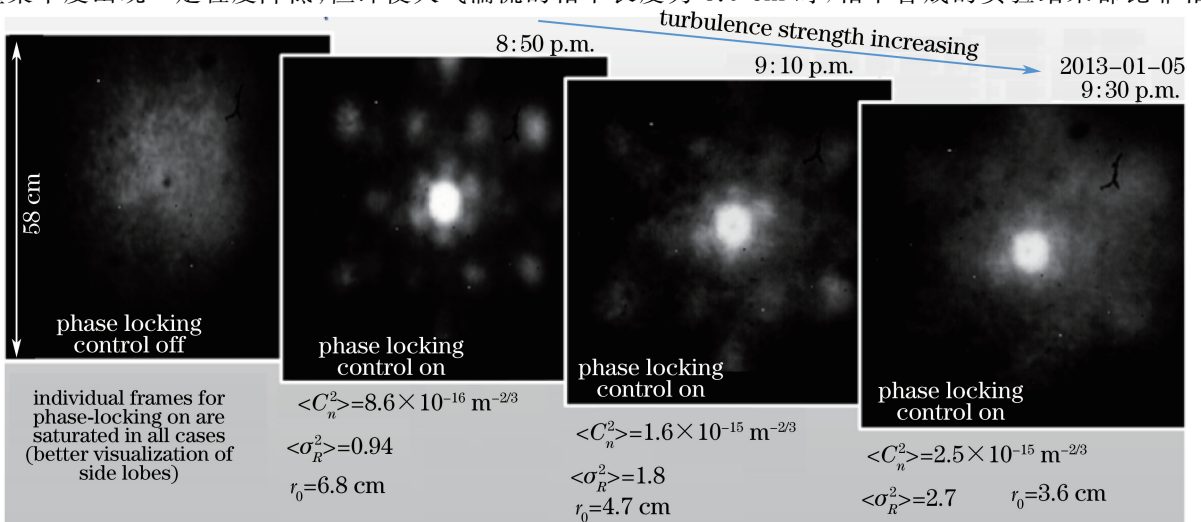


图 17 不同大气湍流强度下相干合成的光斑形态

Fig. 17 Light spot patterns of coherent combining under different atmospheric turbulence intensities

合成好得多。

4.2 从分孔径相干合成到激光相控阵

传统高能激光系统一般采用单台高功率激光器作为激光光源,其热管理复杂,光束质量较差,机动性欠佳。此外,传统的高能激光系统一般采用机械式光束偏转控制技术,其发射望远镜系统重量正比于 $D^{2.7}$ (D 为发射望远镜直径),发射系统的功耗随 D^5 的增加而增加,难以实现快速有效的光束扫描。为了解决这些问题,基于相干合成的新结构高能激光相控阵系统——自适应光子相位锁定单元(APPLE)被提出^[14,145]。APPLE 的系统结构如图 18 所示,其核心思想是采用多个中等功率激光阵列并通过分孔径相干合成来提高激光输出功率,采用全电光束扫描技术来提高光束控制的速度和精度,利用模块化的结构设计来提高系统的稳定性和可维护性^[14]。该系统具有可定标放大属性和大角度高精度光束扫描能力,是下一代高能激光系统的有效选择方案。

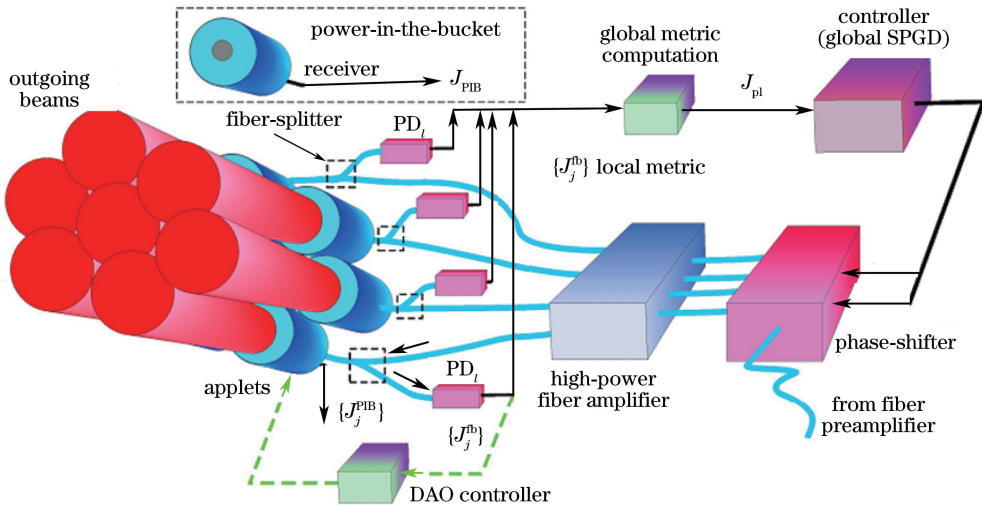


图 18 APPLE 系统结构示意图

Fig. 18 Structural diagram of APPLE system

除了传统相干合成的单路线偏振窄线宽放大器、合成孔径填充、多光束倾斜/锁相/光程差等控制以外,激光相控阵最大的技术挑战在于如何实现全电控制的高速度、大角度、高精度的光束扫描。2011 年,APPLE 计划由亚瑟神剑(Excalibur)计划替代。后者的目标是研发高功率电可控光学相控阵,每个阵元由输出功率大于 3 kW 的光纤放大器和具备自适应光学补偿能力、大范围光束扫描能力的光束发射准直器阵列构成^[144]。2013 年,Excalibur 计划被 FLASH 计划替代,FLASH 旨在开发输出功率为 100 kW 量级、超轻质量、接近理想光束质量的高效率光学相控阵^[144]。目前,在相关项目支持下,麻省理工学院已经实现了 42 kW 的分孔径光纤激光相干合成^[16]。

国内相关单位也对光纤激光相控阵的光束偏转控制进行了初步研究。目前的公开报道主要停留在高精度、小角度的全电光束控制方面,大功率情况下的全电控制大角度光束控制技术尚未见报道。采用第 3.3 节描述的 AFOC 可以解决高精度、小角度(~ 1 mrad)的光束扫描问题^[138-139]。采用液晶光学相控阵器件也能实现高精度的小角度控制。2014 年,电子科技大学结合相干合成理论与液晶相控阵光束控制技术,提出了一种基于液晶相控阵阵列的激光相干合成方法,获得了一维方向上一定角度范围内具有任意波束指向的合成激光^[146]。通过基于 1×3 和 2×2 液晶相控阵阵列的相干合成实验,得到了波束指向分别为 0° 、 0.17° 、 0.34° 的相干合成激光输出。2015 年,电子科技大学利用液晶相控阵器件对相干合成的光束发射角度进行了控制,实现了小角度(0.3°)情况下的相控相干合成激光输出^[147]。

光纤激光相控阵的实现将为太空碎片清理、小行星防御等提供一种新的技术手段^[148-149]。2013 年,美国和加拿大的研究人员提出了利用光纤激光相控阵对可能威胁地球的小行星进行防御的概念,称为 DE-STAR^[149]。如图 19 所示,DE-STAR 利用太阳能电池供电,将相位同步的光纤放大器阵列作为激光光源,通过激光对行星表面进行气化,使其改变行星轨道,避免了与地球的碰撞^[149-150]。研究人员认为该系统尽管是

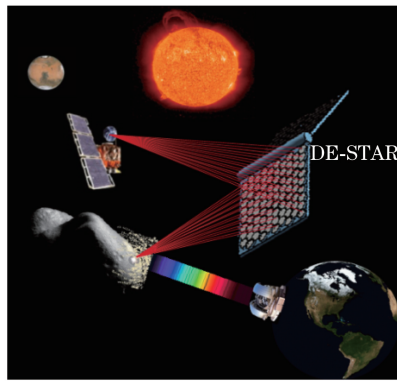


图 19 基于激光相控阵的 DE-STAR 系统构想图

Fig. 19 Scheme of DE-STAR system based on laser phased array

一个长远规划,但也是一个低成本、切实可行的方案。相关研究人员对 DE-STAR 中激光与物质相互作用机理、相控阵光束控制、近地轨道主动照明开展了一系列的研究^[148,151-153]。原则上,该方案也能用于太空碎片清理,通过将太空垃圾表面进行气化,使其改变运行轨道,最终坠入大气层中烧毁^[148]。

4.3 面向前沿应用的脉冲相干放大网络(CAN)

高功率脉冲激光在极高密度物理领域,尤其是激光驱动惯性约束聚变和激光等离子体加速器领域有着广泛的应用前景。但是,长期以来脉冲激光峰值功率不能满足这些应用的需求。随着连续激光相干合成相关技术的成熟,脉冲激光相干合成作为提升脉冲能量、峰值功率的有效方法,为激光在极高密度物理领域的应用提供了技术支撑。1979年,Tajima等^[154]提出了激光尾波场加速的概念。由于击穿电压的限制,传统直线加速器的加速梯度极限为100 MV/m左右,而激光等离子体加速器具有极高的加速梯度。2014年,美国劳伦斯伯克利国家实验室的激光等离子体加速器在9 cm长的等离子体管内将电子能量提升到4.2 GeV,其加速梯度是传统直线加速器的1000倍以上^[155]。

2006年,Mourou等^[156]提出光纤相干放大网络的概念,设想利用数以千计的光纤激光相干放大阵列作为下一代激光等离子体加速器的激光驱动器。如图20所示,其核心技术为啁啾脉冲放大器(CPA)技术和相干偏振合成技术^[157]。2009年,美国劳伦斯伯克利国家实验室的Leeman等^[158]指出一台TeV级能量激光等离子体加速器的激光驱动器需要100个满足以下性能指标的激光驱动模块:波段为1 μm,平均功率为480 kW,重复频率为15 kHz,脉冲能量为32 J,脉宽小于100 fs以及近衍射极限的光束质量。目前,没有任何高能高功率激光系统可以达到如此高的性能要求。围绕这个应用需求,欧盟于2012年初启动了国际CAN(ICAN)项目,计划采用 $10^3 \sim 10^4$ 路脉冲光纤放大器进行相干偏振合成,获得平均功率为50 kW、峰值功率为 $10^{18} \sim 10^{23}$ W/cm²、脉冲宽度约为100 fs的脉冲激光,为高效、紧凑的激光粒子加速器提供高平均功率、大能量、高功率的超快激光源^[157]。2013年,已经有包括美国、法国、德国、俄罗斯、日本在内的7个国家、13个科研单位参与该项目。

2014年7月,ICAN工作会议启动了XCAN计划,将ICAN第一步的技术指标修改为平均功率大于10 kW,峰值功率为10 TW^[159]。确认XCAN的第一步工作目标是攻克ICAN的关键技术,设计激光的系统结构。根据XCAN的设想,不同路数的相干偏振合成获得的脉冲激光不仅能够用于激光粒子加速领域得到应用,而且在纳米尺度材料度量、核废料处理、化学反应、空间碎片清理等领域都能得到应用^[160]。2014年,德国耶拿大学研究人员初步设计了实现ICAN技术指标的方案,计划通过多路光束偏振相干合成,结合单路光束的分割脉冲放大和啁啾脉冲放大技术,实现重复频率大于10 kHz、平均功率为17.5 kW、峰值功率为3 TW的飞秒脉冲光纤激光输出^[161-162]。

表6为与ICAN相关的超短脉冲偏振相干合成的典型实验结果。可以看出在ICAN项目的驱动下,法国、德国等在相干合成方面已经取得了较大的进展,通过8路激光相干合成,实现了平均功率为700 W/脉冲能为12 mJ/峰值功率为35 GW/脉宽为262 fs的超短脉冲激光输出。本课题组也于2015年实现了输出功率为313 W的飞秒脉冲激光相干合成^[128]。

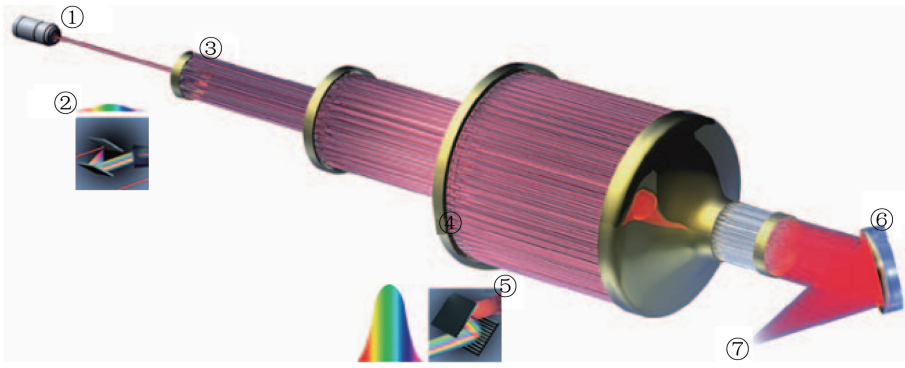


图 20 光纤相关 CAN 概念图

Fig. 20 Scheme of fiber coherent CAN

表 6 与 ICAN 相关的超短脉冲相干合成的典型实验结果

Table 6 Typical experimental results of coherent combining with ultra-short pulse laser related to ICAN

Year	Institution	Chains	Average power /W	Peak power /GW	Pulse energy /mJ	Pulse width /fs	Frequency / kHz	M^2	Reference
2011	University Jena	2	88	—	0.5	700	175	—	[163]
2012	Amplitude Systems	2	60	2	0.65	300	92	1.25	[164]
2013	University Jena	4	135	11	0.54	<30	250	—	[123]
2014	University Jena	4	210	—	2.1	340	100	—	[165]
2015	NUDT	2	313	—	—	827	8×10^4	<1.5	[128]
2015	University Jena	2	55	3.1	1.1	200	50	1.25	[166]
2016	University Jena	8	700	35	12	262	55.9	<1.2	[167]
2016	University Jena	8	870	—	3.3	275	265	<1.1	[168]

ICAN 中另外一个重要的技术是大阵元的多参量控制技术,目前难度最大的是相位控制技术。2011 年,法国航空航天实验室 Jérôme 等^[64]实现了 64 路大阵元连续激光的相干合成,锁相控制精度小于 $\lambda/10$,合成后主瓣功率为总功率的 34%,达到理想值的 77.3%。2013 年,本课题组利用 SPGD 算法,实现了 32 路光束的相位锁定,锁相后性能评价函数数值提高了 26 倍^[169];2016 年,本课题组采用级联相位控制的方法,对两个 8 路激光阵列进行分级相位控制,实现了 16 路激光的相位锁定,锁相残差小于 $\lambda/24$ ^[170]。

5 技术挑战

表 7 为现有光束合成的主要方法对参与合成光束相关参量的要求。相干合成对除了中心波长以外的其他全部参量都要求进行精确控制。因此,在控制对象数量及其工程实现方面,相干合成是所有合成中对各路光束要求最高、系统最复杂、难度最高的光束合成方式,这使光纤激光相干合成面临诸多挑战。

表 7 几种光束合成方法对控制参量的要求

Table 7 Requirements of control parameters for several different beam combining methods

Control parameter	Coherent combining	Spectral combining	Geometry combining	Temporal combining	Fiber combining
Center wavelength	×	√	×	×	×
Spectrum linewidth	√	√	×	×	×
Beam quality	√	√	×	√	×
Tilt/tip	√	√	√	√	×
Polarization	√	×	×	×	×
Optical path	√	×	×	×	×
Dispersion	√	×	×	×	×
Phase noise	√	×	×	×	×

5.1 线偏振窄线宽光纤放大器的综合性能提升

目前,非保偏宽谱光纤激光器的输出功率已经达到 20 kW,但是由于非线性效应和模式不稳定效应的限制,线偏振窄线宽放大器的输出功率尚未突破 2 kW。美国国防部先进计划研究局(DARPA)原计划在 2009 年实现输出功率大于 4 kW 的可相干合成放大器,尽管 2009 年 Nufern 公司也实现了 1.01 kW 的线偏振窄线宽激光输出^[27],但是截至 2014 年底,麻省理工学院能够用于相干合成的放大器输出功率仅为 1.5 kW^[171]。正因为线偏振窄线宽放大器输出功率迟迟达不到预期,2015 年 DARPA 将其 Excalibur 计划中原定于 2016 年实现 100 kW 相干合成系统的技术指标降低为 30 kW^[171]。因此,综合抑制模式不稳定和非线性效应,提高线偏振窄线宽放大器的输出功率、提升光束质量、提高偏振度、压缩激光线宽是光纤激光相干合成面临的首要挑战。

5.2 占空比提高与合成效率提升

在分孔径相干合成中,由于参与合成的各路光束一般为高斯光束,在目前的占空比情况下,尽管合成光束的峰值功率得到了极大的提高,但是合成光束中心主瓣的功率占合成光束总功率比例较低。麻省理工学院的 4 kW 相干合成的占空比较高,但其主瓣功率比例仅为 58%。本课题组的 9 路 1.8 kW 相干合成的主瓣功率比例实际上不到 30%。因此,如何提高分孔径相干合成光束的占空比,在提高峰值功率的同时提高主瓣功率比例,是重要的技术挑战。

在共孔径相干合成中,无论是相干偏振合成还是 DOE 的光束合成,效率都较低。波导结构目前输出功率不到 1 kW,效率仅为 80%^[81];基于 DOE 的相干合成尽管获得了 4.9 kW 的功率输出,但是其效率仅为 82%^[44]。本课题组的 2.16 kW 相干偏振合成的效率也只有 94.5%^[79]。随着合成路数的增加,相干偏振合成效率还会下降^[172]。因此,提高共孔径相干合成的效率是一个较大的挑战。

5.3 大阵元相干合成的多参量控制与解耦

相干合成中的偏振、光程差、光轴、倾斜、相位等参量的响应频率存在一定重叠,实际控制时各个参量之间存在较强的相互耦合。相干合成阵元数量的提升不仅对各个控制参量的控制带宽提出了较高的要求,而且各个参数之间的解耦难度将随路数的增加而提高。目前,高功率、大噪声情况下的相干合成路数为 42 路^[16];公开报道的文献中,绝大多数相干合成没有对各个参量进行同时控制。如何在大阵元相干合成中实现各个控制参量的解耦控制,以及如何提升相干合成多参量控制的控制带宽和系统稳定性,尤其是提升远距离传输情况下相干合成的控制带宽,成为重要的技术挑战。

6 结束语

光纤激光相干合成是获得更高功率输出的有效技术方案之一,也是光纤激光相控阵的基础,国际上多个单位对相干合成的各项关键技术开展了研究。分孔径相干合成是激光相控阵的基础,在小行星防御、太空碎片清理方面有较好应用前景;共孔径合成是走向脉冲相干放大器网络的必由之路,在激光粒子加速器等前沿和基础领域有着广阔的应用前景。尽管相干合成各个关键技术有了较好的发展,也实现了 44 kW 的激光输出,但是目前的输出功率难以满足诸多实际应用的需求。相干合成要走向实用化,还面临着诸如单链路综合性能提升、占空比与效率提升、大阵元综合控制、大阵元系统集成等的基础理论、关键技术、工程实现等各方面的挑战。为了满足未来应用的需求,还需要对各项关键技术进行深入研究,重点突破各项技术挑战,为光纤激光相干合成在基础前沿等领域的应用提供基础。

参 考 文 献

- [1] Zervas M N, Codemard C A. High power fiber lasers: A review[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2014, 20(5): 1-23.
- [2] Richardson D J, Nilsson J, Clarkson W A. High power fiber lasers: Current status and future perspectives[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2010, 27(11): B63-B92.
- [3] Stark M. Over 50 percent wall-plug efficiency fiber laser[J]. Laser Technik Journal, 2016, 2: 14-16.
- [4] IPG Photonics Corporation. IPG photonics successfully tests world's first 10 kilowatt single-Mode production laser [EB/OL]. (2009-6-16)[2017-01-20]. http://www.ipgphotonics.com/Collateral/Documents/English-US/PR_Final_

- 10kW_SM_laser.pdf.
- [5] Dawson J W, Messerly M J, Beach R J, *et al.* Analysis of the scalability of diffraction-limited fiber lasers and amplifiers to high average power[J]. *Optics Express*, 2008, 16(17): 13240-13266.
- [6] Zhu J J, Zhou P, Ma Y X, *et al.* Power scaling analysis of tandem-pumped Yb-doped fiber lasers and amplifiers[J]. *Optics Express*, 2011, 19(19): 18645-18654.
- [7] Otto H J, Jauregui C, Limpert J, *et al.* Average power limit of ytterbium-doped fiber-laser systems with nearly diffraction-limited beam quality[J]. *SPIE*, 2015, 9728: 97280E.
- [8] IPG Photonics Corporation. IPG set to ship 100 kW laser[EB/OL]. (2012-11-1)[2017-01-20]. <http://optics.org/news/3/10/44>.
- [9] Shcherbakov E A, Fomin V V, Abramov A A, *et al.* Industrial grade 100 kW power CW fiber laser[C]. *Advanced Solid-State Lasers Congress Technical Digest*, 2013: ATh4A.2.
- [10] Honea E, Afzal R S, Savage-Leuchs M, *et al.* Advances in fiber laser spectral beam combining for power scaling[C]. *SPIE*, 2016, 9730: 97300Y.
- [11] Zheng Y, Yang Y F, Wang J H, *et al.* 10.8 kW spectral beam combination of eight all-fiber superfluorescent sources and their dispersion compensation[J]. *Optics Express*, 2016, 24(11): 12063-12071.
- [12] Ma Yi, Yan Hong, Peng Wanjin, *et al.* 9.6 kW common aperture spectral beam combination system based on multi-channel narrow linewidth fiber lasers[J]. *Chinese J Lasers*, 2016, 43(9): 0901009.
马毅, 颜宏, 彭万敬, 等. 基于多路窄线宽光纤激光的9.6 kW共孔径光谱合成光源[J]. *中国激光*, 2016, 43(9): 0901009.
- [13] Zhou Pu, Xu Xiaojun, Liu Zejin, *et al.* New technology and new configuration for high energy[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, 45(1): 37-42.
周朴, 许晓军, 刘泽金, 等. 高能激光系统的新技术与新结构[J]. *激光与光电子学进展*, 2008, 45(1): 37-42.
- [14] Vorontsov M. Adaptive photonics phase-locked elements (APPLE): System architecture and wavefront control concept[C]. *SPIE*, 2005, 5895: 589501.
- [15] Coffey V. High-energy lasers: New advances in defense applications[J]. *Optics and Photonics News*, 2014, 25(10): 28-35.
- [16] Mostly Missile Defense. Chronology of MDA's plans for laser boost-phase defense[EB/OL]. (2016-8-26)[2017-01-20]. <https://mostlymissiledefense.com/2016/08/26/chronology-of-mdas-plans-for-laser-boost-phase-defense-august-26-2016/>.
- [17] Robin C, Dajani I, Pulford B. Modal instability-suppressing, single-frequency photonic crystal fiber amplifier with 811 W output power[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(3): 666-669.
- [18] Ma P F, Zhou P, Ma Y X, *et al.* Single-frequency 332 W, linearly polarized Yb-doped all-fiber amplifier with near diffraction-limited beam quality[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(20): 4854-4857.
- [19] Jeon Y, Nilsson J, Sahu J K, *et al.* Single-frequency, single-mode, plane-polarized ytterbium-doped fiber master oscillator power amplifier source with 264 W of output power[J]. *Optics Letters*, 2005, 30(5): 459-461.
- [20] Hildebrandt M, Frede M, Kwee P, *et al.* Single-frequency master-oscillator photonic crystal fiber amplifier with 148 W output power[J]. *Optics Express*, 2006, 14(23): 11071-11076.
- [21] Jeong Y, Nilsson J, Sahu J K, *et al.* Power scaling of single-frequency ytterbium-doped fiber master-oscillator power-amplifier sources up to 500 W[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2007, 13(3): 546-551.
- [22] Dajani I, Vergien C, Robin C, *et al.* Experimental and theoretical investigations of photonic crystal fiber amplifier with 260 W output[J]. *Optics Express*, 2009, 17(26): 24317-24333.
- [23] Zeringue C, Vergien C, Dajani I. Pump-limited, 203 W, single-frequency monolithic fiber amplifier based on laser gain competition[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(5): 618-620.
- [24] Zhu C, Hu I N, Ma X Q, *et al.* Single-frequency and single-transverse mode Yb-doped CCC fiber MOPA with robust polarization SBS-free 511 W output[C]. *Advances in Optics Materials, Advanced Solid-State Photonics, Istanbul*, 2011: AMC5.
- [25] Zhang L, Cui S Z, Liu C, *et al.* 170 W, single-frequency, single-mode, linearly-polarized, Yb-doped all-fiber amplifier[J]. *Optics Express*, 2013, 21(5): 5456-5462.
- [26] Ma P F, Tao R M, Su R T, *et al.* 1.89 kW all-fiberized and polarization-maintained amplifiers with narrow linewidth and near-diffraction-limited beam quality[J]. *Optics Express*, 2016, 24(4): 4187-4195.
- [27] John E, David B, Joshua G, *et al.* Kilowatt-level PM amplifiers for beam combining[C]. *Frontiers in Optics*, 2008:

- FTuJ2.
- [28] 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.
- [29] Guintrand C L. Stimulated Brillouin scattering threshold variations due to bend-induced birefringence in a non-polarization-maintaining fiber amplifier[C]. *Conference on Lasers and Electro-Optics*, 2014: JW2A.23.
- [30] Brar K, Savage-Leuchs M, Henrie J, *et al.* Threshold power and fiber degradation induced modal instabilities in high power fiber amplifiers based on large mode area fibers[C]. *SPIE*, 2014, 8961: 89611R.
- [31] Shi W, Fang Q, Fan J L, *et al.* High power monolithic linearly polarized narrow linewidth single mode fiber laser at 1064 nm[C]. *Conference on Laser and Electro-Optics Pacific Rim*, 2015: 26P_16.
- [32] Avdokin A, Gaponstev V, Kadwani P, *et al.* High average power quasi-CW single-mode green and UV fiber lasers [C]. *SPIE*, 2015, 9347: 934704.
- [33] Tao R M, Ma P F, Wang X L, *et al.* 1.3 kW monolithic linearly polarized single-mode master oscillator power amplifier and strategies for mitigating mode instabilities[J]. *Photonics Research*, 2015, 3(3): 86-93.
- [34] van Deventer M O, Boot A J. Polarization properties of stimulated Brillouin scattering in single-mode fibers [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1994, 12(4): 585-590.
- [35] Stolen R. Polarization effects in fiber Raman and Brillouin lasers[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1979, 15(10): 1157-1160.
- [36] Wang X L, Zhang H W, Su R T, *et al.* Experimental comparison of mode instability (MI) in high power fiber oscillator and fiber amplifier[C]. *Laser Optics*, Saint Petersburg, 2016: WeS1A-22.
- [37] Martinelli M, Martelli P, Pietralunga S M. Polarization stabilization in optical communications systems[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, 24(11): 4172-4183.
- [38] Chen J, Wu G, Li Y, *et al.* Active polarization stabilization in optical fibers suitable for quantum key distribution[J]. *Optics Express*, 2007, 15(26): 17928-17936.
- [39] Koch B, Hidayat A, Zhang H, *et al.* Optical endless polarization stabilization at 9 krad/s with FPGA-based controller [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2008, 20(12): 961-963.
- [40] Koch B, Mirvoda V, Grießer H, *et al.* Endless optical polarization control at 56 krad/s, over 50 Gigaradian, and demultiplex of 112-Gb/s PDM-RZ-DQPSK signals at 3.5 krad/s[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2010, 16(5): 1158-1163.
- [41] Xiong Yupeng, Su Rongtao, Li Xiao, *et al.* Coherent beam combining based on adaptive polarization and active phase control technique[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(1): 5-6.
熊玉朋, 粟荣涛, 李 霄, 等. 基于偏振自适应和主动相位控制的相干合成的实验研究[J]. *强激光与粒子束*, 2013, 25(1): 5-6.
- [42] Goodno G D, Mcnaught S J, Weber M E, *et al.* Multichannel polarization stabilization for coherently combined fiber laser arrays[J]. *Optics Letter*, 2012, 37(20): 4272-4274.
- [43] 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): 174-181.
- [44] Flores A, Ehrenreich T, Holten R, *et al.* Multi-kW coherent combining of fiber lasers seeded with pseudo random phase modulated light[C]. *SPIE*, 2016, 9728: 97281Y.
- [45] Wang Yanshan, Yan Hong, Peng Wanjing, *et al.* Linear polarized narrow linewidth fiber amplifier based on active polarization control[J]. *Chinese J Lasers*, 2016, 43(5): 0519001.
王岩山, 颜 宏, 彭万敬, 等. 基于主动偏振控制的 1 kW 窄线宽线偏振光纤激光器[J]. *中国激光*. 2016, 43(5): 0519001.
- [46] Dong Suhui, Wang Xiaolin, Su Rongtao, *et al.* Adaptive polarization conversion system of the non-polarization maintaining to polarization maintaining laser based on SPGD algorithm[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27(5): 051011.
董苏惠, 王小林, 粟荣涛, 等. 基于 SPGD 算法的非保偏一保偏光自适应偏振转换[J]. *强激光与粒子束*, 2015, 27(5): 051011.
- [47] Dong Suhui, Wang Xiaolin, Su Rongtao, *et al.* Research on adaptive polarization conversion of non-polarization maintaining fiber amplifier[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(9): 0902009.
董苏惠, 王小林, 粟荣涛, 等. 非保偏光纤放大器自适应偏振转换技术研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(9): 0902009.
- [48] Dong Suhui, Wang Xiaolin, Su Rongtao, *et al.* Research on adaptively polarization conversion based on the principle of

- polarization coherence synthesis[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(2): 0202006.
- 董苏惠, 王小林, 粟荣涛, 等. 基于偏振锁相的非线偏-线偏光转换技术研究[J]. 中国激光, 2016, 43(2): 0202006.
- [49] Flores A, Robin C, Lanari A, *et al.* Pseudo-random binary sequence phase modulation for narrow linewidth, kilowatt, monolithic fiber amplifiers[J]. Optics Express, 2014, 22(15): 17735-17744.
- [50] Yagodkin R, Platonov N, Yusim A, *et al.* > 1.5 kW narrow linewidth CW diffraction-limited fiber amplifier with 40 nm bandwidth[C]. SPIE, 2016, 9728: 972807.
- [51] Xu Y, Fang Q, Qin Y, *et al.* 2 kW narrow spectral width monolithic continuous wave in a near-diffraction-limited fiber laser[J]. Applied Optics, 2015, 54(32): 9419-9421.
- [52] Nold J, Strecker M, Liem A, *et al.* Narrow linewidth single mode fiber amplifier with 2.3 kW average power[C]. European Conference on Lasers and Electro-Optics-European Quantum Electronics Conference, 2015: 11-14.
- [53] Yu C X, Shatrovov O, Fan T Y. All-glass fiber amplifier pumped by ultra-high brightness pumps[C]. SPIE, 2015, 9728: 972806.
- [54] Yang Yifeng, Shen Hui, Chen Xiaolong, *et al.* All fiber high efficiency narrow linewidth laser with 2.5 kW power with diffraction limited beam quality[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(4): 0419004.
- 杨依枫, 沈 辉, 陈晓龙, 等. 全光纤化高效率、窄线宽光纤激光器实现 2.5 kW 近衍射极限输出[J]. 中国激光, 2016, 43(4): 0419004.
- [55] Huang Z H, Liang X B, Li C Y, *et al.* Spectral broadening in high-power Yb-doped fiber lasers employing narrow-linewidth multilongitudinal-mode oscillators[J]. Applied Optics, 2016, 55(2): 297-302.
- [56] Beier F, Hupel C, Nold J, *et al.* Narrow linewidth, single mode 3 kW average power from a directly diode pumped ytterbium-doped low NA fiber amplifier[J]. Optics Express, 2016, 24(6): 6011-6020.
- [57] Beresnev L A, Weyrauch T, Vorontsov M A, *et al.* Development of adaptive fiber collimators for conformal fiber-based beam projection systems[C]. SPIE, 2008, 7090: 709008.
- [58] 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.
- [59] Yu C X, Kinsky J E, Shaw S E, *et al.* Coherent beam combining of a large number of PM fibers in a 2D fiber array [C]. Conference on Lasers and Electro-Optics/Quantum Electronics and Laser Science Conference and Photonic Applications Systems Technologies, 2006: CThAA6.
- [60] Geng C, Li X Y, Zhang X J, *et al.* Coherent beam combination of an optical array using adaptive fiber optics collimators[J]. Optics Communications, 2011(284): 5531-5536.
- [61] 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.
- [62] 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, 19(24): 1781-1784.
- [63] Optrnicus Corporation. Adaptive fiber array technology [EB/OL]. [2016-1-4]. http://www.optonicus.com/conformal_optical_systems/.
- [64] Bourderionnet J, Bellanger C, Primot J, *et al.* Collective coherent phase combining of 64 fibers[J]. Optics Express, 2011, 19(18): 17053-17058.
- [65] Anderegg J, Brosnan S, Cheung E, *et al.* Coherently coupled high power fiber arrays[C]. SPIE, 2006, 6102: 61020U.
- [66] Fan X Y, Liu J J, Liu J S, *et al.* Coherent combining of a seven-element hexagonal fiber array[J]. Optics & Laser Technology, 2010(42): 274-279.
- [67] Liu Zejin, Xu Xiaojun, Chen Jinbao, *et al.* Multi-beam high fill factor beam combiner: ZL200920065407.7[P]. 2010-06-23.
- 刘泽金, 许晓军, 陈金宝, 等. 多光束高占空比合束器: ZL200920065407.7[P]. 2010-06-23.
- [68] Jones D C, Turner A J, Scott A M, *et al.* A multi-channel phase locked fibre bundle laser[C]. SPIE, 2010, 7580: 75801V.
- [69] Xue Y H, He B, Zhou J, *et al.* High power passive phase locking of four Yb-doped fiber amplifiers by an all-optical feedback loop[J]. Chinese Physics Letters, 2011, 28(5): 54211-54212.
- [70] Wang X, Leng J, Zhou P, *et al.* 1.8-kW simultaneous spectral and coherent combining of three-tone nine-channel all-fiber amplifier array[J]. Applied Physics B, 2012, 107(6): 785-790.
- [71] 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.
- [72] Harrison J, Rines G A, Moulton P F, *et al.* Coherent summation of injection-locked, diode-pumped Nd:YAG ring lasers[J]. *Optics Letters*, 1988, 13(2): 111-113.
- [73] Veldkamp W B, Leger J R, Swanson G J. Coherent summation of laser beams using binary phase gratings[J]. *Optics Letters*, 1986, 11(5): 303-305.
- [74] Leger J R, Swanson G J, Veldkamp W B. Coherent laser addition using binary phase gratings[J]. *Applied Optics*, 1987, 26(20): 4391-4399.
- [75] Leger J R, Swanson G J, Veldkamp W B. Coherent beam addition of GaAlAs lasers by binary phase gratings[J]. *Applied Physics Letters*, 1986, 48(14): 888-890.
- [76] Uberna R, Bratcher A, Tiemann B G. Coherent polarization beam combination [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2010, 46(8): 1191-1196.
- [77] 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): 6762-6765.
- [78] 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.
- [79] Ma Pengfei, Wang Xiaolin, Su Rongtao, *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.
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.
- [80] 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.
- [81] Christensen S E, Olivia K. 2-dimensional waveguide coherent beam combiner[C]. *Advanced Solid-State Photonics*, 2007: WC1.
- [82] Corcoran C J, Durville F. Passive phasing in a coherent laser array[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2009, 15(2): 294-300.
- [83] Corcoran C J, Durville F. Experimental demonstration of a phase-locked laser array using a self-Fourier cavity[J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 86(20): 201111.
- [84] Li J F, Duan K L, Wang Y S, *et al.* High-power coherent beam combining of two photonic crystal fiber lasers[J]. *IEEE Photonics Technology Letter*, 2008, 20(11): 888-890.
- [85] Lhermite J, Desfarges-Berthelemot A, Kermene V, *et al.* Passive phase locking of an array of four fiber amplifiers by an all-optical feedback loop[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(13): 1842-1844.
- [86] Michaille L, Taylor D M, Bennett C R, *et al.* Characteristics of a Q-switched multicore photonic crystal fiber laser with a very large mode field area[J]. *Optics Letter*, 2008, 33(1): 71-73.
- [87] Michaille L, Bennett C R, Taylor D M, *et al.* Multi-core photonic crystal fibers for high-power laser and amplifiers [J]. *SPIE*, 2006, 6102: 61020W.
- [88] Wang B S, Anthony S. All-fiber passive coherent beam combining of fiber lasers and challenges[C]. *Lasers, Sources, and Related Photonic Devices*, 2012: FTh3A.
- [89] Wang B S, Mies E, Minden M, *et al.* All-fiber 50 W coherently combined passive laser array[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(7): 863-865.
- [90] Chen Z L, Zhou P, Wang X L, *et al.* Synchronization and coherent addition of three pulsed fiber lasers by mutual injection and phase modulation[J]. *Optics and Laser Technology*, 2009, 41(6): 710-713.
- [91] Valeri K, Robert G H, Anca M. Coherent beam combining of fiber amplifier array output through spectral self-phase conjugation via SBS[C]. *Conference on Lasers and Electro-Optics/Quantum Electronics and Laser Science Conference and Photonic Applications Systems Technologies*, 2006: C67.
- [92] Steinhauser B, Brignon A, Lallier E, *et al.* High energy, single-mode, narrow-linewidth fiber laser source using stimulated Brillouin scattering beam cleanup[J]. *Optics Express*, 2007, 15(10): 6464-6469.
- [93] Fridman M, Nixon M, Davidson N, *et al.* Passive phase locking of 25 fiber lasers[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(9): 1434-1436.
- [94] Glova A F. Phase locking of optically coupled lasers[J]. *Quantum Electronics*, 2003, 33(4): 283-306.
- [95] Glova A F, Lysikov A Y. Phase locking of 2D laser arrays by the spatial filter method[J]. *Quantum Electronics*, 2002, 32(3): 277-278.
- [96] Goodno G D, Asman C P, Anderegg J, *et al.* Brightness-scaling potential of actively phase-locked solid-state laser

- arrays[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2007, 13(3): 460-472.
- [97] Anderegg J, Brosnan S, Weber M, *et al.* 8-W coherently phased 4-element fiber array[C]. SPIE, 2003, 4974: 1-5.
- [98] Goodno G D, Book L D, Rothenberg J E, *et al.* Narrow linewidth power scaling and phase stabilization of 2- μm thulium fiber lasers[J]. Optical Engineering, 2011, 50(11): 111608.
- [99] Hou Jing, Xiao Rui, Jiang Zongfu, *et al.* Coherent beam combination of three ytterbium fiber amplifiers[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2006, 18(10): 1585-1588.
侯 静, 肖 瑞, 姜宗福, 等. 三路掺镱光纤放大器的相干合成实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(10): 1585-1588.
- [100] 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.
- [101] Metin M, Hans B, Monica M, *et al.* Atmospheric aberration mitigation and transmitter power scaling using a coherent fiber array[C]. IEEE Aerospace Conference Proceedings, 2004: 1745-1750.
- [102] Shay T M, Benham V. First experimental demonstration of fiber array phase locking by RF phase modulation[C]. Proceedings of the 17th Solid State and Diode Laser Technology Review, 2004: BEAM-7.
- [103] Shay T M, Benham V, Spring L J, *et al.* Self-referenced locking of optical coherence by single-detector electronic-frequency tagging[C]. SPIE, 2006, 6102: 6102V.
- [104] 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.
- [105] Angel F, Shay T M, Lu C A, *et al.* Coherent beam combining of fiber amplifiers in a kW regime[C]. CLEO: Laser Applications to Photonic Applications, 2011: CFE3.
- [106] 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.
- [107] 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.
- [108] Zhou Pu, Ma Yanxing, Wang Xiaolin, *et al.* Coherent beam combining of fiber amplifiers based on stimulated annealing algorithm[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2010, 22(5): 973-977.
周 朴, 马阎星, 王小林, 等. 模拟退火算法光纤放大器相干合成[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(5): 973-977.
- [109] Liu L, Vorontsov M A. Phase-locking of tiled fiber array using SPGD feedback controller[C]. SPIE, 2005, 58950: 58950P.
- [110] Wang X L, Zhou P, Ma Y X, *et al.* Active phasing a nine-element 1.14 kW all-fiber two-tone MOPA array using SPGD algorithm[J]. Optics Letter, 2011, 36(16): 3121-3123.
- [111] Shawn M R. Active coherent combination of >200 semiconductor amplifiers using a SPGD algorithm[C]. CLEO: Laser Applications to Photonic Applications, 2011: V1.
- [112] Weyrauch T, Vorontsov M, Ovchinnikov V, *et al.* Atmospheric turbulence compensation and coherent beam combining over a 7 km propagation path using a fiber-array system with 21 sub-apertures[C]. Imaging and Applied Optics, Seattle, 2014: W2E-W3E.
- [113] Tian Haochen, Song Youjian, Ma Chunyang, *et al.* Timing and carrier envelope phase synchronization from two independent femtosecond lasers[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(8): 0801003.
田昊晨, 宋有建, 马春阳, 等. 两台独立飞秒激光器的脉冲序列与载波包络相位同步[J]. 中国激光, 2016, 43(8): 0801003.
- [114] Huang S W, Cirmi G, Moses J, *et al.* High-energy pulse synthesis with sub-cycle waveform control for strong-field physics[J]. Nature Photonics, 2011, 5(8): 475-479.
- [115] Chanan G, Ohara C, Troy M. Phasing the mirror segment of the keck telescope II: The narrow-band phasing algorithm[J]. Applied Optics, 2000, 38(5): 4706-4714.
- [116] Chanan G, Troy M, Ohara C. Phasing the primary mirror segments of the keck telescopes: A comparisom of different technique[C]. SPIE, 2000, 4003: 188-201.
- [117] Yang Ruofu, Yang Ping, Shen Feng. Experimental research on phase detection and correction of two fiber amplifier based on active segmented mirrors[J]. Acta Physica Sinica, 2009, 58(12): 8297-8301.
杨若夫, 杨 平, 沈 锋. 基于能动分块反射镜的两路光纤放大器位相探测及其相干合成实验研究[J]. 物理学报, 2009, 58(12): 8297-8301.

- [118] Nelder J A, Mead R. A simplex method for function minimization[J]. *Computer Journal*, 1965, 7(4): 308-313.
- [119] Yang P, Ao M W, Liu Y, *et al.* Intracavity transverse modes controlled by a genetic algorithm based on Zernike mode coefficients[J]. *Optics Express*, 2007, 15(25): 17051-17062.
- [120] Kolibal J, Howard D. The novel stochastic Bernstein method of functional approximation[C]. *Proceedings of the First NASA/ESA Conference on Adaptive Hardware and Systems*, 1980.
- [121] Su Rongtao, Zhou Pu, Ma Yanxing, *et al.* Multi-beam combiner with optical path adjust function: ZL201210011185.7[P]. 2012-10-11.
粟荣涛, 周 朴, 马阎星, 等. 具有光程调节能力的多光束合束器: ZL201210011185.7[P]. 2012-10-11.
- [122] Su R T, Zhou P, Wang X L, *et al.* Active coherent beam combination of two high-power single-frequency nanosecond fiber amplifiers[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(4): 497-499.
- [123] Hädrich S, Klenke A, Hoffmann A, *et al.* 135 W, 0.5 mJ, sub-30 fs pulses obtained by nonlinear compression of coherently combined fiber CPA[C]. *Advanced Solid-State Lasers Congress, Paris, 2013: AW2A.7*.
- [124] Newport Corporation. MDL series [EB/OL]. (2017-1-4) [2017-01-20]. http://www.newport.com/medias/sys_master/images/images/h00/h32/8797207658526/MDL-User-Manual-112707.pdf
- [125] 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.
- [126] Optiphase Inc. PZ1 high-speed fiber stretcher [EB/OL]. (2010-9-1). http://www.optiphase.com/data_sheets/PZ1%20Data%20Sheet%20Rev%20E6.pdf.
- [127] Ixblue Corporation. NIR-MPX-LN series 1000 nm band phase modulators [EB/OL]. (2017-1-4) [2017-01-20]. https://photonics.ixblue.com/files/files/pdf/Modulators/NIR-MPX-LN_SERIES.pdf.
- [128] Yu Hailong. Study on high power femtosecond fiber lasers and their coherent beam combining technology [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2016.
于海龙. 高功率飞秒光纤激光及其相干合成技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2016.
- [129] Zhang Zhixin, Yu Hailong, Zhi Dong, *et al.* All fiber optical path difference adaptive control method in femtosecond fiber laser coherent polarization beam combination system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(9): 0906003.
张志新, 于海龙, 支 冬, 等. 飞秒光纤激光相干偏振合成系统全光纤光程差自适应控制方法研究[J]. *光学学报*, 2016, 36(9): 0906003.
- [130] Thalhammer G, Bowman R W, Love G D, *et al.* Speeding up liquid crystal SLMs using overdrive with phase change reduction[J]. *Optics Express*, 2013, 21(2): 1779-1797.
- [131] Wang Xiong, Wang Xiaolin, Zhou Pu, *et al.* Recent research and development of tilt-tip wavefront control in coherent beam combination of fiber lasers[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(s1): s101001.
王 雄, 王小林, 周 朴, 等. 光纤激光相干合成中倾斜波前控制的研究进展[J]. *中国激光*, 2012, 39(s1): s101001.
- [132] Wang Xiong, Wang Xiaolin, Zhou Pu, *et al.* Experimental research of tilt-tip wavefront and phase-locking control in fiber lasers coherent beam combining[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(6): 1443-1447.
王 雄, 王小林, 周 朴, 等. 光纤激光相干合成中倾斜和锁相同时控制的实验研究[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(6): 1443-1447.
- [133] Goodno G D, Weiss B S. Automated co-alignment of coherent fiber laser arrays via active phase-locking[J]. *Optics Express*, 2012, 20(14): 14945-14953.
- [134] Liu L, Vorontsov M A, Polnau E P, *et al.* Adaptive phase-locked fiber array with wavefront phase tip-tilt compensation using piezoelectric fiber positioners[C]. *SPIE*, 2007, 6708: 67080K.
- [135] 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.
- [136] Wang X, Wang X L, Zhou P, *et al.* Coherent beam combination of adaptive fiber laser array with tilt-tip and phase-locking control[J]. *Chinese Physics B*, 2013, 22(2): 24206.
- [137] 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.
- [138] Zhi D, Ma Y X, Ma P F, *et al.* Adaptive fiber optics collimator based on flexible hinges[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(24): 5434-5438.
- [139] Zhi D, Ma P F, Ma Y X, *et al.* Novel adaptive fiber-optics collimator for coherent beam combination[J]. *Optics Letters*, 2014, 25(22): 31520-31528.

- [140] Zhi D, Ma Y X, Chen Z L, *et al.* Large deflection angle, high-power adaptive fiber optics collimator with preserved near-diffraction-limited beam quality[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(10): 2217-2220.
- [141] 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.
- [142] Stuart J M, Hiroshi K, Weiss S B, *et al.* 100 kW coherently combined slab MOPAs[C]. *Conference on Lasers and Electro-Optics/International Quantum Electronics*, 2009: CThA1.
- [143] Redmond S M, Creedon K J, Kansky J E, *et al.* Active coherent beam combining of diode lasers[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(6): 999-1002.
- [144] Optics Org. DARPA extends laser weapon range[EB/OL]. (2014-3-11)[2017-01-20]. <http://optics.org/news/5/3/13>.
- [145] Dorschner T A. Adaptive photonic phase locked elements-An overview[C]. *MTO Symposium*, 2007.
- [146] Yang Zhenming, Kong Lingjiang, Xiao Feng, *et al.* Coherent beam combination based on array of liquid crystal optical phased arrays[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(12): 121402.
杨镇铭, 孔令讲, 肖 锋, 等. 基于液晶相控阵阵列的激光相干合成方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(12): 121402.
- [147] Chen J, Kong L J, Xiao F, *et al.* Continuously one-dimensional steering of coherently combined beam utilizing phased array of liquid crystal optical phased arrays (PALCOPA)[C]. *SPIE*, 2015, 9344: 934426.
- [148] Silverstein B, Brashears T, Lubin P. Space debris mitigation utilizing laser ablation[EB/OL]. (2013-9-1) <http://www.deepspace.ucsb.edu/wp-content/uploads/2013/09/Final-Draft-Paper.pdf>.
- [149] Hughes G B, Lubin P, Bible J, *et al.* DE-STAR: Phased-array laser technology for planetary defense and other scientific purposes[C]. *SPIE*, 2013, 8876: 88760J.
- [150] Lubin P, Hughes G B, Bible J, *et al.* Toward directed energy planetary defense[J]. *Optical Engineering*, 2014, 53(2): 25103.
- [151] Lubin P, Brashears T, Hughes G, *et al.* Effective planetary defense using directed energy DE-STARLITE[C]. *4th IAA Planetary Defense Conference*, Roma, 2015.
- [152] Hughes G B, Lubin P, Suen J, *et al.* Local phase control for a planar array of fiber laser amplifiers[C]. *SPIE*, 2015, 9616: 961607.
- [153] Riley J, Lubin P, Hughes G B, *et al.* Directed energy active illumination for near-earth object detection[C]. *SPIE*, 2014, 9226: 922606.
- [154] Tajima T, Dawson J M. Laser electron accelerator[J]. *Physical Review Letters*, 1979, 43(4): 267-270.
- [155] Leemans W P, Gonsalves A J, Mao H S, *et al.* Multi-GeV electron beams from capillary-discharge-guided subpetawatt laser pulses in the self-trapping regime[J]. *Physical Review Letters*, 2014, 113(24): 245002.
- [156] Mourou G A, Hulin D, Galvanauskas A. The road to high peak power and high average power lasers: Coherent amplification network (CAN)[J]. *Superstrong Fields in Plasmas*, 2006, 827(1): 152-163.
- [157] Mourou G, Brocklesby B, Tajima T, *et al.* The future is fibre accelerators[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(4): 258-261.
- [158] Leemans W, Esarey E. Laser-driven plasma-wave electron accelerators[J]. *Physics Today*, 2009, 62(62): 44-49.
- [159] International Center for Zetta-Exawatt Science and Technology. Objectives[EB/OL]. (2016-09-08)[2017-01-20]. <https://portail.polytechnique.edu/izest/en/can/objectives>.
- [160] Mourou G. ICAN-B international coherent amplifying network—Building the case for a H2020 future emerging technology project[C]. *ICAN Laser's second wind - A Revolutionnary Laser Design to Address Grand Scientific and Societal Challenges*, Palaiseau, 2014.
- [161] Breitkopf S, Eidam T, Klenke A. A concept for multiterawatt fibre lasers based on coherent pulse stacking in passive cavities[J]. *Light: Science & Applications*, 2014, 3(10): e211.
- [162] Breitkopf S, Eidam T, von Grafenstein L, *et al.* Approaching TW-peak powers at >10 kHz repetition rate by multi-dimensional coherent combining of femtosecond fiber lasers[C]. *SPIE*, 2014, 8961: 896106.
- [163] Seise E, Klenke A, Breitkopf S, *et al.* 88 W 0.5 mJ femtosecond laser pulses from two coherently combined fiber amplifiers[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(19): 3858-3860.
- [164] Zaouter Y, Daniault L, Hanna M, *et al.* Passive coherent combination of two ultrafast rod type fiber chirped pulse amplifiers[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(9): 1460-1462.
- [165] Klenke A, Hoffmann A, Hädrich S, *et al.* 2.1 mJ 210 W femtosecond fiber CPA system[C]. *SPIE*, 2014, 8961:

89611D.

- [166] Guichard F, Zaouter Y, Hanna M, *et al.* High-energy chirped- and divided-pulse Sagnac femtosecond fiber amplifier [J]. *Optics Letters*, 2015, 41(1): 89-92.
- [167] Kienel M, Müller M, Llenke A, *et al.* 12 mJ kW-class ultrafast fiber laser system using multidimensional coherent pulse addition[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(14): 3343-3346.
- [168] 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.
- [169] Su Rongtao, Zhou Pu, Wang Xiaolin, *et al.* Phase locking of a coherent array of 32 fiber lasers[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26(11): 110101.
粟荣涛, 周 朴, 王小林, 等. 32 路光纤激光相干阵列的相位锁定[J]. *强激光与粒子束*, 2014, 26(11): 110101.
- [170] Su R T, Zhang Z X, Zhou P, *et al.* Coherent beam combining of a fiber lasers array based on cascaded phased control [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(22): 2585-2588.
- [171] Defense Advanced Research Projects Agency. Excalibur [EB/OL]. (2014-3-30) [2017-01-20]. <http://www.darpa.mil>.
- [172] Ma P F, Zhou P, Wang X L, *et al.* Influence of perturbative phase noise on active coherent polarization beam combining system[J]. *Optics Express*, 2013, 21(24): 29666-29678.