

高功率脉冲光纤激光光束合成的最新研究进展

粟荣涛 王小林 周朴 马阎星 许晓军

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

摘要 光束合成作为提高脉冲激光功率的有效手段,近年来得到了人们越来越多的关注。综述了几种典型的脉冲光纤激光光束合成方法,详细介绍了近年来不同时域特性(如飞秒、皮秒、纳秒)脉冲光纤激光光束合成的最新进展,分析了各种合成方法的技术特点,总结了脉冲光纤激光光束合成的发展趋势。

关键词 激光技术;脉冲光纤激光;光束合成;光谱合成;偏振合成;相干合成

中图分类号 TN248 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP48.101401

Recent Research and Development of Beam Combination of High power Pulse Fiber Laser

Su Rongtao Wang Xiaolin Zhou Pu Ma Yanxing Xu Xiaojun

(College of Optoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract Beam combination is an effective way of scaling the energy of pulse fiber laser and has attracted more and more interest in recent years. The typical methods of beam combination of pulse fiber laser are briefly introduced. The new development of beam combination of pulse fiber laser of different pulse widths (such as femtoseconds, picoseconds, nanoseconds) is presented. The characteristics of those techniques are analyzed and a review on development for this technique is made.

Key words laser technique; pulse fiber laser; beam combination; spectral combination; polarization beam combination; coherent beam combination

OCIS codes 140.3298; 140.3538

1 引言

脉冲激光在医疗、遥感、机械加工等领域有着广泛应用。掺稀土光纤、双包层抽运光纤结构以及高亮度激光二极管(LD)抽运技术使光纤激光器在输出功率、光束质量、转换效率和波长范围等方面具有独特的优势^[1]。但是,由于受非线性效应、热损伤、热透镜效应等影响,单根光纤的输出功率受到限制,这种限制在脉冲光纤激光器中更为突出。光束合成是突破单根光纤激光输出功率极限,实现高功率高亮度激光输出的有效手段^[2]。国内外针对连续激光光束合成的研究不断深入发展^[3~11],采用光谱合成^[12~14]、偏振合成^[15~17]、相干合成^[18~20]以及非相干合成^[21]等方法获得了高功率激光输出。由于脉冲激光的相位检测和控制、各路脉冲时域同步等难度较大,光束合成的研究集中于连续光领域。随着连续光纤激光光束合成技术的成熟以及工业、国防等领域对高功率需求的不断提升,脉冲激光光束合成已成为热点。美国国防部高级研究计划局2009年11月发布了光纤激光脉冲源(FILPS)的项目公告,用于发展高能量脉冲光纤激光器和放大器,通过对多路光束的合成,实现高能量脉冲光纤激光输出。近年来,美、德、法、中等国研究人员在连续激光光束合成的基础上对脉冲光纤激光的光束合成展开研究,采用光谱合成、偏振合成和相干合成等方法实现了不同时域特性(如飞秒、皮秒、纳秒)的脉冲光纤激光的光束合成。本文对近年来国内外脉冲光纤激光光束合成的研究进展进行了详细综述,对各种合成方法的技术特点进行了分析,认为其中基于主振荡功率放大器(MOPA)的主动相位控制相干合成有望成为未来脉冲光纤激光光束合成的重要发展方向。

收稿日期: 2011-04-12; **收到修改稿日期**: 2011-04-27; **网络出版日期**: 2011-08-06

作者简介: 粟荣涛(1984—),男,博士研究生,主要从事高能激光方面的研究。E-mail: surongtao@126.com

导师简介: 许晓军(1973—),男,研究员,博士生导师,主要从事高能固体激光器、大气光学与自适应光学等方面的研究。

E-mail: xuxj@21cn.com

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网(www.opticsjournal.net)

2 脉冲光纤激光光束合成研究进展

和连续激光相比,脉冲激光的光束合成需要考虑更多因素,例如各合成光束的脉冲必须严格保持时域上的同步,其脉宽等特性也必须保持一致,并且在近场和远场都要有良好的交叠^[22]。这使脉冲光纤激光相干合成具有更大的技术难度。近年来,国内外相关研究人员在连续激光光束合成的基础上,采用不同的合成方法展开了脉冲激光光束合成的研究,主要包括光谱合成、偏振合成和相干合成等。

2.1 光谱合成

光谱合成一般是通过光栅和双色镜面等器件实现多个不同波长的激光器/放大器的光束合成。光谱合成对激光器的线宽要求较低,系统稳定性高^[9]。光谱合成最常见的结构如图 1 所示,不同波长的光通过反射镜面阵列以不同的角度入射到反射光栅,光栅使各光束以相同方向衍射,形成高亮度的合成光束。

2008 年,德国 Friedrich Schiller 大学的 Schmidt 等^[23]首次报道了两路脉冲激光的光谱合成实验,实验装置如图 2 所示。函数发生器产生数字信号对两只激光二极管(波长在 1029~1065 nm 之间可调)进行强度调制,输出两路波长分别为 1040.7 nm 和 1043.8 nm,重复频率为 100 kHz,脉宽为 10 ns 的脉冲激光。对其中一个强度调制信号施加延时,以保证两路脉冲激光在时域上同步。两路脉冲激光作为种子光,分别经过两级放大后,输出的单路激光平均功率为 2.5 W,单脉冲能量为 25 μ J。两束激光通过一个在 1040 nm 波长的衍射效率为 96% 的光栅(1250 lines/mm)合为一束。合成光束的质量因子 $M^2=1.18$,与合成前相比,光束质量基本不变,如图 3 所示。



图 1 50 路光谱合成示意图

Fig. 1 Schematic illustration of a spectral combination of 50 channels

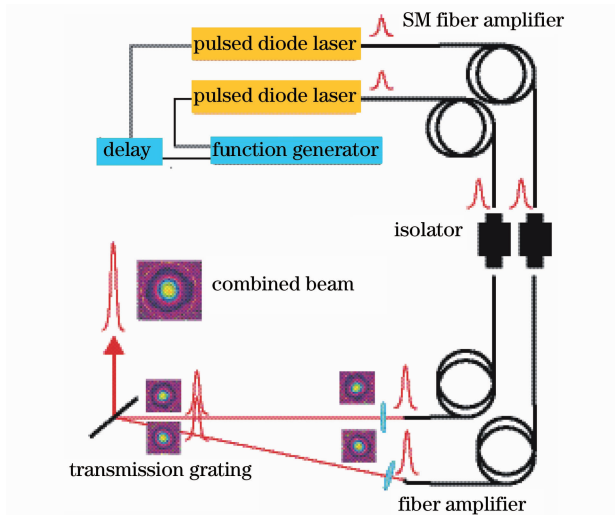


图 2 两路光谱合成的实验装置

Fig. 2 Experimental setup of a spectral combination of 2 channels

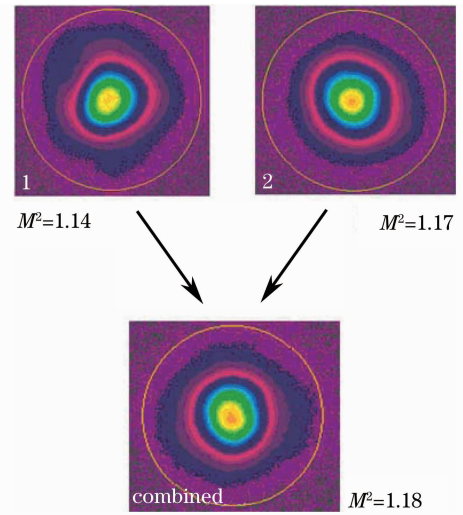


图 3 光束合成前后的光束质量

Fig. 3 Beam quality of the separate beams and the combined beam

利用该方案,O. Schmidt 分析了 50 路光谱合成的可能性^[23],认为通过光谱合成方式,能够得到平均功率大于 10 kW、单脉冲能量大于 100 mJ、峰值功率大于 100 MW 的纳秒脉冲激光输出。

2008 年,美国 Michigan 大学的 Regelskis 等^[13]报道了另一种光谱合成方法,采用干涉滤光片实现了三路脉冲激光的光谱合成。实验装置如图 4 所示,6 个带通/阻滤波器完成光束的分离与合成,滤波器对于波长在带通范围的光的透射率大于 95%,对于波长在带阻范围的光的反射率大于 99.97%。其中, F_1 和 F_3 把中心波长在 1050 nm 的宽带种子光分为中心波长分别相差 2 nm 的三束窄带光(在图中用红、绿、蓝三种颜色表示不同波长的光), F_2 和 F_4 滤除波长在各窄带光之间的光,使各窄带光具有更窄的线宽。三束窄带光经过放大后由 F_5 和 F_6 完成光谱合成。红、绿、蓝三种颜色代表的光的合成效率分别为 92.1%、91% 和

97%。当重复频率为 10 kHz 时,输出总功率为 52 W。

2009 年,O. Schmidt 等^[24,25]采用和文献[23]类似的方法实现了 4 路脉冲激光的光谱合成。首先对脉宽为 2 ns,重复频率为 50 kHz,平均功率 5 μ W 的 4 路脉冲激光进行三级放大,然后采用与图 1 相似的装置实现光束合成。由于保偏光纤的稳定特性和光栅的高效率,系统合成效率达到 97%,输出脉冲的平均功率为 187 W,峰值功率为 1.7 MW,单脉冲能量为 3.7 mJ,光束质量为 $M_x^2 = 1.3, M_y^2 = 2.3$ 。同年,他们^[26]利用重复频率为 5 MHz、脉宽为 5 ns 的 4 路脉冲激光进行光谱合成,获得了平均功率为 1.1 kW 的脉冲激光输出,合成效率高达 99%,光束质量为 $M_x^2 = 1.5, M_y^2 = 2.7$ 。

2.2 偏振合成

偏振合成一般是利用特殊的分光器将线偏振种子光源分成不同偏振方向的几束光,对各束光分别进行放大后再进行偏振合束,得到高功率、高偏振度的激光输出。研究人员对连续激光的偏振合成进行了较为广泛的研究^[15~17,27~29],脉冲激光的偏振合成也在近两年来逐渐展开。

2010 年,德国 Friedrich-Schiller 大学 Seise 等报道了两路脉冲激光的偏振合成实验^[22,30]。他们在实验中采用了啁啾脉冲放大(CPA)技术,首先用光栅展宽器将脉冲展宽,对展宽后的脉冲激光进行放大,然后对放大后的脉冲进行压缩,得到短脉宽、高能量的脉冲激光。实验装置如图 5 所示。利用重复频率为 10 MHz,波长 1030 nm,脉宽为 400 fs 的脉冲光作为种子源。种子光首先由一个 1450 lines/mm 的透射光栅将脉宽展宽到 16 ps,再经过一个半波片和一个起偏器变成平均功率为毫瓦量级的线偏振脉冲光。线偏振脉冲光以 45°入射角入射到偏振分光镜,被分为功率相当的 s 偏振光和 p 偏振光。s 偏振光在安装压电陶瓷的镜面上反射,压电陶瓷通过一定的平移步长来使两个干涉臂的光程差基本匹配。s 偏振光两次穿过 1/4 波片将产生一束能够直接穿过分光镜的 p 偏振光。两束光分别进入光纤放大器中进行放大。分光镜、光纤放大器以及合光棱镜构成一个马赫-曾德尔干涉仪。两束经过放大的偏振光准直入射到合光棱镜上,合为一束偏振光。利用采样镜片(倾斜放置)提取一小部分合成光束,用于两束光的相位探测。利用探测到的相位信息进行一定的处理,就能得到压电陶瓷步长的反馈信号,通过压电陶瓷调节其中一束光的光程,实现两束光的相位锁定。该系统获得了平均功率为 530 mW、偏振度为 97.2%的脉冲激光输出,合成效率高达 96.8%。

2011 年,Seise 等^[31]利用类似的方法实现了更高功率的脉冲光纤激光偏振合成。他们以 91%的效率获得了重复频率为 100 kHz,脉宽为 500 ps,平均功率为 18.2 W,偏振度为 82%的脉冲激光。利用效率为 66%的光栅压缩器,对脉冲激光的脉宽进行压缩,获得了单脉冲能量为 120 μ J,脉宽为 1.12 ps 的脉冲激光。

同样在 2011 年,Daniault 等^[32]也报道了类似的偏振合成研究。以 90%的合成效率输出了脉宽为 150 ps,平均功率为 7.2 W 的脉冲激光输出。脉冲经过压缩后,得到脉宽为 325 fs,平均功率为 4.3 W 的脉冲激光输出。

2.3 相干合成

相干合成作为激光技术领域的研究热点,在提高激光功率、保证良好光束质量的同时,还能将激光峰值功率提高 N 倍(N 为合成光的路数)。国内外对连续光纤激光的相干合成的研究已经较为成熟,近年来,针

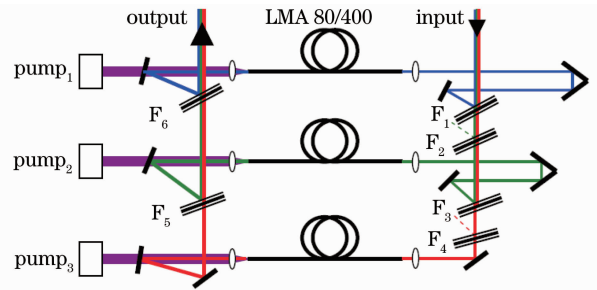


图 4 3 路光谱合成的实验装置

Fig. 4 Experimental setup of a spectral combination of 3 channels

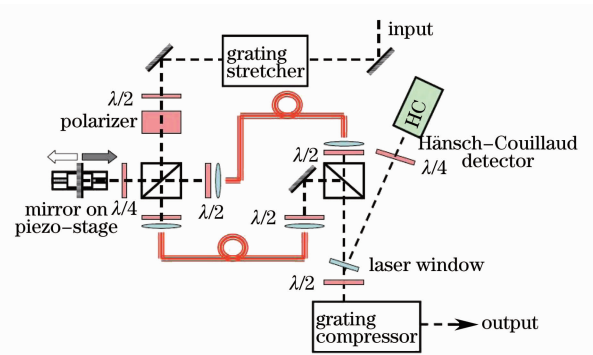


图 5 两路飞秒脉冲激光偏振合成的实验装置

Fig. 5 Experimental setup of polarization combination of two femtosecond pulse fiber laser beams

对脉冲激光相干合成的研究也越来越多。相干合成的关键在于实现各路激光的相位锁定,为了实现相位锁定,目前为止,主要有被动锁相^[33,34]、主动锁相^[35~37]和混合相位控制^[38]这三种相位控制技术。

2.3.1 被动锁相相干合成

被动锁相相干合成一般是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的相位起伏的自动补偿。根据其物理机制而言,比较典型的方法有自组织相干合成^[39,40]和相位共轭相干合成^[41]等。

自组织相干合成利用光纤激光器能量互相注入,使得各个光纤激光器中的光场振荡互相牵制,达到自组织锁相运行。由于容易实现,在脉冲激光相干合成的初期一般采用自组织方案,文献^[42]对2004~2008年脉冲光纤激光相干合成的研究情况进行了详细报道,其中绝大多数是自组织相干合成。

相位共轭相干合成一般是利用受激布里渊或受激拉曼散射产生多束相位锁定的斯托克斯光,利用相位共轭放大器使斯托克斯光在沿着原光路返回的过程中实现功率放大和相位畸变补偿,使各路光的相位达到一致。2008年,Bellanger等^[43]报道了利用数字全息技术对二维光纤阵列进行相位补偿的方案,利用全息图再现时产生的-1级相位共轭波补偿光纤放大器引入的相位畸变。他们进行了连续光纤激光相干合成的实验验证,将相位残差控制在 $\lambda/10$ 。

数字全息技术实现相位补偿的原理如图6所示,平面波 Φ_m 在传输过程中由于携带各路光纤的活塞相差,变成非平面波 $\Phi_{(x,y)}$,参考平面波 Φ_{R1} 与非平面波 $\Phi_{(x,y)}$ 进行干涉并记录在CCD上。通过CCD记录的干涉条纹信息产生驱动信号控制空间光调制器(SLM)对参考平面波 Φ_{R2} 进行相位调制,产生与 $\Phi_{(x,y)}$ 相位共轭的非平面波 $-\Phi_{(x,y)}$,将 $-\Phi_{(x,y)}$ 注入到光纤当中,就能对各路光纤的活塞相差进行补偿。

2009年,Paurisse等^[44,45]在此基础上,用大模场(LMA)光纤代替二维光纤阵列,进行了连续光和脉冲光的相位补偿实验,将相位残差控制在 $\lambda/20$ 。Bellanger等^[43,46]用19芯掺镱多芯光纤(MCF)放大器进行了脉冲激光相位补偿的实验,实验装置如图7所示。分光镜 BS_1 将种子光分为一束探测光和一束参考光,探测光经过多芯光纤传输后变成携带相位差信息的目标光,目标光和透射过偏振分光镜(PBS)的参考光发生干涉,根据记录在CCD1上的干涉条纹产生帧频为12 Hz的信号驱动SLM。经偏振分光镜反射的参考光受到SLM相位调制后再注入到光纤中,补偿光纤放大器引入的相位畸变。CCD2用于观察相位补偿后的远场光斑。

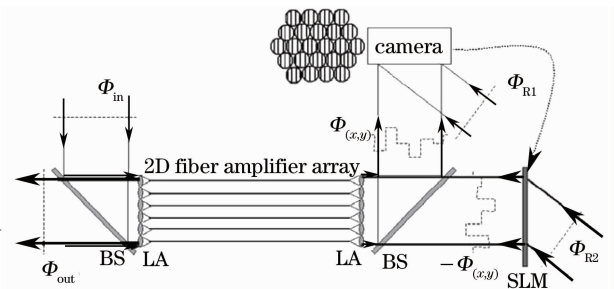


图6 数字全息技术进行相位补偿的原理图

Fig. 6 Principle of phase compensation by digital holography

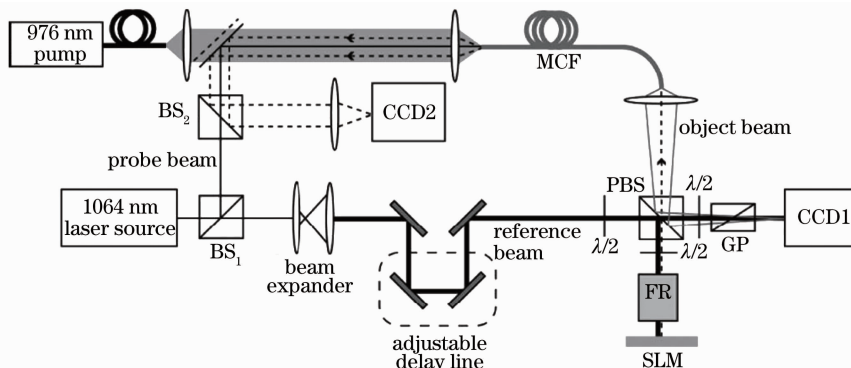


图7 基于数字全息技术的相干合成的实验装置

Fig. 7 Experimental setup of coherent combination by digital holography

实验测量得到的光纤内部增益如图8所示,在最大的抽运功率处得到23 dB增益,得到平均功率为170 mW,脉宽为800 ps,重复频率为40 kHz,中心波长为1064 nm的脉冲激光输出。不同抽运功率的远场和近场图样表明相位补偿在整个抽运范围有效,光束在远场保持高斯光束形态。

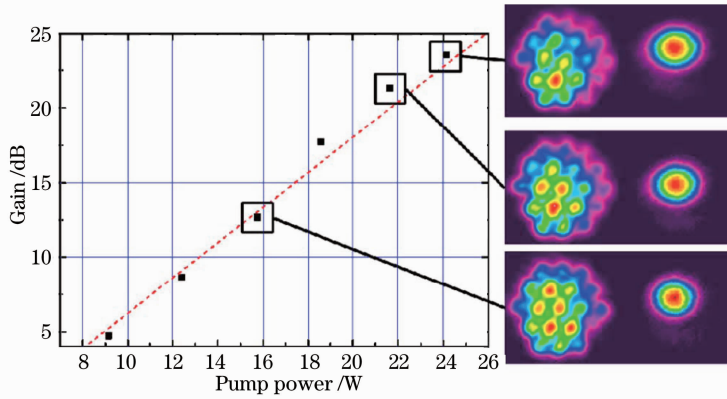


图 8 增益和抽运源的关系以及光的近场和远场传输

Fig. 8 Gain versus pump power and corresponding near fields and far fields

2.3.2 主动锁相相干合成

在相干合成中,主动相位控制是利用相位检测和反馈伺服控制系统对各路激光的相位起伏进行补偿。近年来,国内外对基于主动相位控制的连续激光相干合成进行了广泛研究,目前,用于相干合成的主动相位控制方法主要有外差法^[47,48]、多抖动法^[49,50]和随机并行梯度下降法(SPGD)^[51,52]等。随着对高功率脉冲激光需求的发展和相关技术的成熟,基于主动相位控制的脉冲激光相干合成逐渐成为研究热点。

2010年,国防科学技术大学 Wang 等^[53]报道了基于混合相位控制的脉冲光纤激光相干合成,首次在脉冲光纤激光相干合成中运用了主动相位控制方法。实验装置如图 9 所示。在自组织环形腔激光器内引入一个相位调制器,并在相位调制器上施加周期性相位调制,当调制频率接近激光器的弛豫振荡频率时,两路激光能够得到同步的脉冲激光输出^[54,55]。自组织阵列输出脉冲激光经过相位调制器后由准直器(CO)准直输出,准直光束经过 10 m 的传输后由一个透镜(L)聚焦,模拟激光的远场。会聚光束经过分束镜分为两束,一路(透射光)用红外相机观察干涉图样,另一路反射光通过小孔后进入光电探测器(PD)。光电探测器放置于透镜的后焦平面上,小孔光阑紧贴于探测器前端放置。探测器输出信号经 AD 转换后输入到 SPGD 控制器,控制器执行 SPGD 算法并将计算得到的相位控制信号经过 DA 转换和放大电路后施加给相位调制器,实现锁相控制。

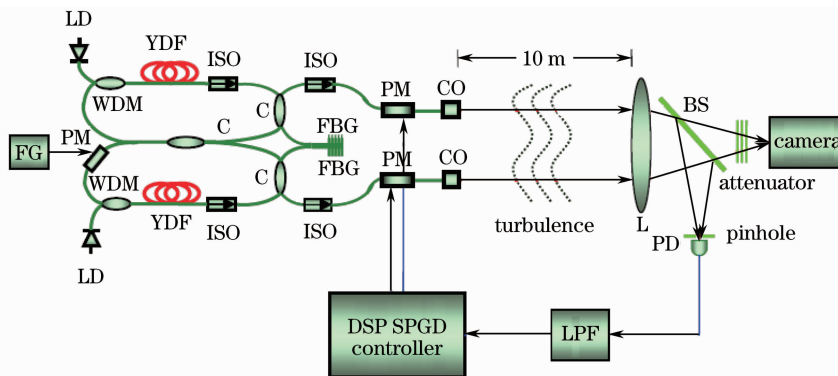


图 9 脉冲激光混合相位控制相干合成的实验装置

Fig. 9 Experimental setup of coherent beam combination of pulsed lasers with hybrid phase control

实验得到了脉宽 $10 \mu\text{s}$ 、重复频率 21 kHz、平均功率几十毫瓦的脉冲激光。主动锁相前后远场长曝光干涉图样如图 10 所示。在未加入主动相位控制之前,由于外界环境的扰动,自组织锁相输出的两束激光之间的相位差随时间快速变化,使得合成光斑长曝光图样是非相干的,条纹可见度接近于 0。在加入主动相位控制之后,合成光强条纹可见度增加到 0.43。光斑主瓣内的能量提高了 1.616 倍。

2011年,Lombard等^[56]报道了基于多抖动法的两束70 ns脉冲光纤激光的相干合成实验。实验装置如图11所示,PREAMP为预放大器;AMP1和AMP2为放大器; A_1 和 A_2 为放大器输出; O_1 和 O_2 为相干合成输出;DET为光电探测器。一个光谱宽度为15 kHz,波长为 $1.5\ \mu\text{m}$ 的连续光种子源被放大到200 mW,再由声光调制器(AOM1)产生重复频率为10 kHz,脉宽为70 ns的高斯形脉冲光和一个低功率连续泄漏光。一个50/50耦合器将信号种子脉冲激光分为两路,每路激光利用一个商用的Keopsys脉冲光纤放大器进行放大,其中一路在放大器前放置一个铌酸锂电光调制器(EOM),用于锁相控制。经过放大器后,两路脉冲激光的峰值功率分别为95 W和123 W。实验中,采用低功率的泄漏光进行相位检测和锁相控制,在探测器前加入声光调制器(AOM2)来抑制脉冲,只让放大的泄漏信号达到探测器,作为相位控制的反馈信号。

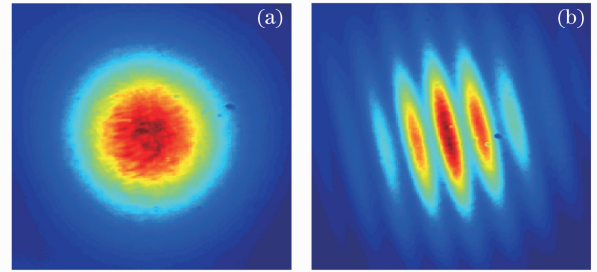


图10 远场长曝光干涉图。(a)被动锁相;
(b)混合相位控制

Fig. 10 Long-exposure far field interference pattern.

(a) Passive phase control; (b) hybrid phase control

经过放大器后,两路脉冲激光的峰值功率分别为95 W和123 W。实验中,采用低功率的泄漏光进行相位检测和锁相控制,在探测器前加入声光调制器(AOM2)来抑制脉冲,只让放大的泄漏信号达到探测器,作为相位控制的反馈信号。

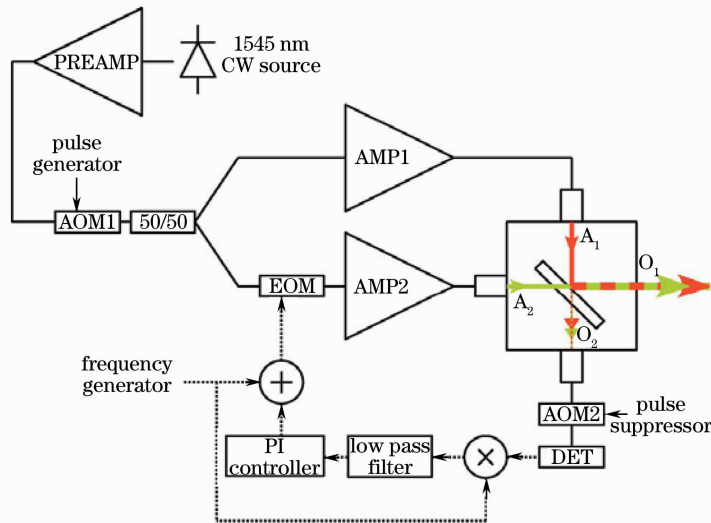


图11 两个光纤放大器相干合成的实验装置

Fig. 11 Experimental setup of coherent combination of two pulsed fiber amplifiers

基于多抖动法的相位控制器在工作中可以使反馈信号处于最小值或者最大值,反馈信号处于最小值时,脉冲在 O_1 处相长相干合成(在 O_2 处相消相干合成),在 O_1 和 O_2 两处测得的平均输出功率分别为146和7 mW。图12为各处的脉冲线形,它们是不受放大影响的高斯线形。输出脉冲激光的峰值功率为208 W,平均功率合成效率为95%。其小部分损失来源于时间和空间交叠的不理想和 $\lambda/27$ 的相位残差。

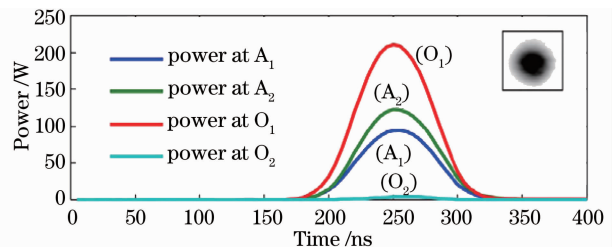


图12 合成前后的脉冲线形测量

Fig. 12 Measured pulse profiles before and after combination

3 小 结

光谱合成技术^[13,23~26,57]对线宽要求较低,合成元件简单,无需进行相位控制,系统稳定性好。由于光谱合成容易实现,在目前报道的脉冲激光光束合成实验中,光谱合成的输出功率高于其他方法。但是,合成光束为多波长激光,各波长之间的光束不会发生干涉。为了减小光束发散角,需要加入大口径镜面来增大光束发射孔径,大大地增加了发射装置的成本^[19]。由于光谱合成技术依赖于多路中心波长不同的高功率、窄线

宽光纤激光器/放大器,激光器研制的难度和成本使光谱合成向更高功率的扩展受到限制。此外光谱合成需要通过光栅等器件单端口输出,器件抗热损伤的能力限制光谱合成向更大功率发展。

偏振合成^[22,30~32]的相位控制实现起来比较简单,即使不进行相位控制也能获得椭圆偏振光输出。如果能够通过一定结构使光在分束与合束时进行级联,从而增加激光放大器的路数,有望获得更高功率的脉冲激光输出^[17]。但是由于偏振合成需要多个偏振合束器件,系统光路调节较为复杂,且其最后合成光束需要通过单一端口输出,向高功率扩展时对偏振合束元件抗热损伤等要求较高。

自组织被动相位控制相干合成无需相位探测和相位控制,实现起来相对容易,多芯光纤自组织耦合和多端口全光纤自组织耦合等技术还可能向大功率扩展。但是,自组织实际上难以获得稳定的同相合成,实际效果与非相干合成类似,存在较大局限性。数字全息法相位补偿^[43~46]可以用较为简单的系统实现多束光路合成。但是,由于SLM不能承受高功率且带宽有限,在相位噪声起伏频率较高时不能实现有效的相位补偿,限制了其向大功率脉冲光纤激光相干合成的发展。MOPA结构主动相位控制^[53,56]相干合成虽然需要较为复杂的脉冲同步、相位检测和控制,但是该方案扩展性强,能够同时保证高功率、高稳定性和良好的光束质量,有望成为脉冲光纤激光合成的一个重点发展方向。

4 结 论

由于单纤脉冲激光输出功率有限,光纤脉冲激光光束合成能够有效提高脉冲激光输出功率,具有重要的现实意义。近年来,国内外相关研究单位利用光谱合成、偏振合成和相干合成等方法对脉冲光纤激光光束合成进行了研究。光谱合成和偏振合成都是单端口输出,其功率提升水平受限于合成器件的抗热损伤能力;被动相位控制相干合成在锁相稳定性方面存在缺陷;基于MOPA的主动相位控制相干合成扩展性强,能够同时保证高功率、高稳定性和良好的光束质量,有望成为未来脉冲光纤激光光束合成的重要发展方向。

参 考 文 献

- 1 D. J. Richardson, J. Nilsson, W. A. Clarkson. High power fiber lasers; current status and future perspectives[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2010, **27**(11): 63~92
- 2 T. Y. Fan. Laser beam combining for high-power, high-radiance sources[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2005, **11**(3): 567~577
- 3 Li Yongzhong, Fan Dianyuan. Beam combining of fiber laser[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2005, **42**(9): 26~29
李永忠, 范滇元. 光纤激光器光束的叠加技术[J]. 激光与光电子学进展, 2005, **42**(9): 26~29
- 4 Li Libo, Lou Qihong. Spectral combining techniques of fiber lasers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2006, **43**(10): 37~41
李立波, 楼祺洪. 光纤激光器的谱叠加技术[J]. 激光与光电子学进展, 2006, **43**(10): 37~41
- 5 Cheng Yong, Liu Yang, Xu Lixin. Recent progress and development of fiber combining technology[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, **36**(2): 163~166
程 勇, 刘 洋, 许立新. 激光相干合成技术研究新动向[J]. 红外与激光工程, 2007, **36**(2): 163~166
- 6 Zhou Pu, Xu Xiaojun, Liu Zejin *et al.*. New technology and new configuration for high energy laser system[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
- 7 Lei Bing, Feng Ying, Wei Lian *et al.*. Study and development of coherent addition techniques of laser beam[J]. *Chinese J. Quantum Electronics*, 2007, **24**(4): 407~414
雷 兵, 冯 莹, 魏立安 等. 激光束相干合成技术的研究进展[J]. 量子电子学报, 2007, **24**(4): 407~414
- 8 Yan Aimin, Liu Liren, Liu Dean *et al.*. Recent progress in phase-locking and aperture filling of fiber laser arrays[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, **45**(8): 33~39
闫爱民, 刘立人, 刘德安 等. 光纤激光阵列锁相和孔径装填技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2008, **45**(8): 33~39
- 9 T. Y. Fan, A. Sanchez. Coherent (phased array) and wavelength (spectral) beam combining compared[C]. *SPIE*, 2005, **5709**: 157~164
- 10 Goodno Gregory D., Asman Charles P., Anderegg Jesse *et al.*. Brightness-scaling potential of actively phase-locked solid-state laser arrays[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2007, **13**(3): 460~472
- 11 Augst Steven J., Ranka Jinendra K., Fan T. Y. *et al.*. Beam combining of ytterbium fiber amplifiers[J]. *J. Opt. Soc.*

- Am. B, 2007, **24**(8): 1707~1713
- 12 Klingebiel Sandro, Röser Fabian, Ortaç Büleend *et al.*. Spectral beam combining of Yb-doped fiber lasers with high efficiency [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2007, **24**(8): 1716~1720
- 13 Kestutis Regelskis, Kai-Chung Hou, Gediminas Raciukaitis *et al.*. Spatial-dispersion-free spectral beam combining of high power pulsed Yb-doped fiber lasers[C]. Conference on Lasers and Electro-Optics/Quantum Electronics and Laser Science Conference and Photonic Applications Systems Technologies, 2008, CMA4
- 14 C. Wirth, O. Schmidt, I. Tsybin *et al.*. 2 kW incoherent beam combining of four narrow-linewidth photonic crystal fiber amplifiers[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(3): 1178~1183
- 15 Brunel Marc, Le Floch Albert, Bretenaker Fabien *et al.*. Coherent addition of adjacent lasers by forked eigenstate operation [J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(12): 2402~2406
- 16 Dong Hongcheng, Li Xiao, Wei Chaoyang *et al.*. Coaxial combination of coherent laser beams[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(11): 1012~1014
- 17 R. Uberna, A. Bratcher, B. Tiemann, Coherent polarization beam combining[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2010, **46**(8): 1191~1196
- 18 Liu Zejin, Hou Jing, Xu Xiaojun *et al.*. Research progress of laser beam combining[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 2273~2279
刘泽金, 侯静, 许晓军等. 激光相干合成的研究进展[J]. 中国激光, 2009, **36**(11): 2273~2279
- 19 Zhou Pu. Study on Coherent Beam Combination Technology of Fiber Lasers[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2009
周朴. 光纤激光相干合成技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2009
- 20 Liu Zejin, Zhou Pu, Wang Xiaolin *et al.*. The history, development and tend of coherent combining of laser beams[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(9): 2221~2234
刘泽金, 周朴, 王小林等. 激光相干合成的历史、现状与发展趋势[J]. 中国激光, 2010, **37**(9): 2221~2234
- 21 Sprangle Phillip, Ting Antonio, Peñano Joseph *et al.*. Incoherent combining and atmospheric propagation of high-power fiber lasers for directed-energy applications[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2009, **45**(2): 138~148
- 22 Seise Enrico, Klenke Arno, Limpert Jens *et al.*. Coherent addition of fiber-amplified ultrashort laser pulses[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(26): 27828~27835
- 23 O. Schmidt, S. Klingebiel, B. Ortac *et al.*. Spectral combining of pulsed fiber lasers; scaling considerations[C]. *SPIE*, 2008, **6873**: 687317
- 24 O. Schmidt, T. V. Andersen, J. Limpert *et al.*. 187 W, 3.7 mJ from spectrally combined pulsed 2 ns fiber amplifiers[J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(3): 226~228
- 25 O. Schmidt, T. V. Andersen, J. Limpert *et al.*. High power spectral beam combining of four 2ns-pulsed fiber-amplifiers [C]. Advanced Solid-State Photonics, 2009, TuA4
- 26 O. Schmidt, C. Wirth, I. Tsybin *et al.*. Average power of 1.1 kW from spectrally combined, fiber-amplified, nanosecond-pulsed sources[J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(10): 1567~1569
- 27 P. B. Phua, Lim Yuan Liang. Coherent polarization locking with near-perfect combining efficiency[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(14): 2148~2150
- 28 A. K. Goyal, M. Spencer, O. Shatrovov *et al.*. Wavelength-beam-combined quantum-cascade-laser array for remote spectroscopy[C]. Lasers and Electro-Optics (CLEO) and Quantum Electronics and Laser Science Conference (QELS), 2010. 1~2
- 29 Uberna Radoslaw, Bratcher Andrew, G. Tiemann Bruce. Power scaling of a fiber master oscillator power amplifier system using a coherent polarization beam combination[J]. *Appl. Opt.*, 2010, **49**(35): 6762~6765
- 30 E. Seise, A. Klenke, J. Limpert *et al.*. Coherent combination of fiber-amplifier ultrashort laser pulses[C]. 4th EPS-QEOD Europhoton Conference, 2010. ThB2
- 31 Seise Enrico, Klenke Arno, Breitkopf Sven *et al.*. Coherently combined fiber laser system delivering 120 μ J femtosecond pulses[J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(4): 439~441
- 32 L. Daniault, M. Hanna, L. Lombard *et al.*. Coherent beam combining of two femtosecond fiber chirped-pulse amplifiers [J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(5): 621~623
- 33 Fabiny Larry, Colet Pere, Poy Rajarshi. Coherence and phase dynamics of spatially coupled solid-state lasers[J]. *Phys. Rev. A*, 1993, **47**(5): 4287~4296
- 34 Zhou Pu, Wang Xiaolin, Chen Zilun *et al.*. Coherent combining of two pulsed fiber lasers in a phase modulated mutually coupled fiber laser array[J]. *Electron. Lett.*, 2008, **6**(7): 523~525

- 35 Ma Yanxing, Wang Xiaolin, Leng Jinyong *et al.*. Coherent beam combination of 1.08 kW fiber amplifier array using single frequency dithering technique[J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(6): 951~953
- 36 Zhou Pu, Ma Yanxing, Wang Xiaolin *et al.*. Coherent beam combination of three two-tone fiber amplifiers using stochastic parallel gradient descent algorithm[J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(19): 2939~2941
- 37 Wang Xiaolin, Ma Yanxing, Zhou Pu *et al.*. Coherent beam combining of 137 W 2×2 fiber amplifier array[J]. *Opt. Commun.*, 2011, **284**(8): 2198~2201
- 38 Zhou Pu, Wang Xiaolin, Ma Yanxing *et al.*. Stable coherent beam combination by active phasing a mutual injection-locked fiber laser array[J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(7): 950~952
- 39 Zhou Pu, Hou Jing, Chen Zilun *et al.*. Theoretic analysis on self-organized coherence of fiber laser array[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, **19**(5): 709~712
朴周, 侯静, 陈子伦等. 光纤激光器自组织相干阵列的理论分析[J]. *强激光与粒子束*, 2007, **19**(5): 709~712
- 40 Zhou Pu, Hou Jing, Chen Zilun *et al.*. Experimental study on coherent combining of two self-organized fiber lasers[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, **19**(12): 2007~2010
朴周, 侯静, 陈子伦等. 两路光纤激光器自组织相干合成实验研究[J]. *强激光与粒子束*, 2007, **19**(12): 2007~2010
- 41 B. Steinhäusser, A. Brignon, E. Lallier. High energy, single-mode, narrow-linewidth fiber laser source using stimulated Brillouin scattering beam cleanup[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(10): 6464~6469
- 42 Wang Xiaolin, Zhou Pu, Xu Xiaojun *et al.*. Coherent beam combination of pulse fiber lasers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, **46**(5): 13~23
王小林, 周朴, 许晓军等. 脉冲光纤激光相干合成技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2009, **46**(5): 13~23
- 43 C. Bellanger, A. Brignon, J. Colineau *et al.*. Coherent fiber combining by digital holography[J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(24): 2937~2939
- 44 M. Paurisse, M. Hanna, F. Druon *et al.*. Diffraction-limited operation from a multimode LMA fiber using active digital holography precompensation[C]. Lasers and Electro-Optics 2009 and the European Quantum Electronics Conference, 2009. PDA_6
- 45 M. Paurisse, M. Hanna, F. Druon *et al.*. Phase and amplitude control of a multimode LMA fiber beam by use of digital holography[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(15): 13000~13008
- 46 Paurisse Mathieu, Hanna Marc, Druon Frédéric *et al.*. Wavefront control of a multicore ytterbium-doped pulse fiber amplifier by digital holography[J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(9): 1428~1430
- 47 Augst Steven J., Fan T. Y., Sanchez Antonio. Coherent beam combining and phase noise measurements of ytterbium fiber amplifiers[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(5): 474~476
- 48 Xiao Rui, Hou Jing, Jiang Zongfu *et al.*. Experimental research of coherent combining of three fiber amplifiers[J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(12): 6464~6469
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
- 49 M. Shay Thomas. Theory of electronically phased coherent beam combination without a reference beam[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(25): 12188~12195
- 50 Ma Yanxing, Zhou Pu, Wang Xiaolin *et al.*. Coherent beam combination with single frequency dithering technique[J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(9): 1308~1310
- 51 Zhou Pu, Liu Zejin, Wang Xiaolin *et al.*. Coherent beam combination of two-dimensional high power fiber amplifier array using stochastic parallel gradient descent algorithm[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, **94**(23): 231106
- 52 Wang Xiaolin, Ma Yanxing, Zhou Pu *et al.*. Coherent beam combining of two W-level fiber amplifiers in turbulence atmospheric environment based on stochastic parallel gradient descent algorithm[J]. *Laser Phys.*, 2009, **19**(5): 984~988
- 53 Wang Xiaolin, Zhou Pu, Ma Yanxing *et al.*. Coherent beam combining of pulsed fiber lasers with hybrid phase control[J]. *Laser Phys.*, 2010, **20**(6): 1453~1458
- 54 Wang Xiaolin, Zhou Pu, Ma Haotong *et al.*. Synchronization and coherent combining of two pulsed fiber ring lasers based on direct phase modulation[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2009, **26**(5): 054211
- 55 Chen Zilun. Studies on Mutual Injection-Locking of Fiber Lasers and Post-Processing Techniques of Photonic Crystal Fibers [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2009
陈子伦. 光纤激光器的相互注入锁定和光子晶体光纤的后处理技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2009
- 56 L. Lombard, A. Azarian, K. Cadoret *et al.*. Coherent beam combination of narrow-linewidth 1.5 μm fiber amplifiers in a long-pulse regime[J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(4): 523~525
- 57 Schreiber Thomas, Wirth Christian, Schmidt Oliver *et al.*. Incoherent beam combining of continuous-wave and pulsed Yb-doped fiber amplifiers[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2009, **15**(2): 354~360