

复合环形腔被动相干合成技术重要特性研究

何兵¹ 周军¹ 刘厚康^{1,2} 杨依枫^{1,2} 胡曼^{1,2}

(¹中国科学院上海光学精密机械研究所 上海市全固态激光器与应用技术重点实验室, 上海 201800)
²中国科学院大学, 北京 100049)

摘要 复合环形腔被动相干合成技术是提高激光功率并保持良好光束质量的有效手段。本课题组对该技术进行了理论和实验研究, 其中主要研究分析了基于光纤激光阵列的复合环形腔被动相干合成技术的路数扩展特性、抗相位扰动特性、偏振选择特性、脉冲合成特性以及光束拼接技术。详细报道了相关研究结果并总结分析了该技术方案的发展趋势。

关键词 激光器; 相干合成; 光纤放大器; 被动锁相

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0601001

Study on Characteristics of Passive Coherent Beam Combination with All-Optical Feedback Loop

He Bing¹ Zhou Jun¹ Liu Houkang^{1,2} Yang Yifeng^{1,2} Hu Man^{1,2}

¹ Shanghai Key Laboratory of All Solid-State Laser and Applied Techniques,
Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy Sciences, Shanghai 201800, China
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Coherent beam combination (CBC) with an all-optical feedback loop is an effective way of scaling power with good beam quality. Our research focused on the technology in theory and experiment, especially on the channel scaling, anti phase perturbation, polarization self-selection, pulsed combination and beam splice of passive CBC with the all-optical feedback loop. The important development is reported, and trends of CBC with an all-optical feedback loop are summarized.

Key words lasers; coherent beam combination; fiber amplifiers; passive phase locking

OCIS codes 140.3510; 140.3295; 140.3298

1 引言

近年来,随着单根光纤激光器的输出功率不断提高,高功率光纤激光器在材料加工、科学研究和国防军事领域均发挥着越来越重要的作用^[1,2]。但是,由于热效应、光纤端面损伤和非线性效应等因素的影响,单根光纤激光器输出功率的提升受到了一定的限制^[3]。光纤激光器具有很多其他激光器无法比拟的优势,尤其易于实现相干合成。基于光纤激光器阵列的相干合成技术是获得更高亮度激光输出的有效技术途径,是近年来激光技术研究领域的热

点。光纤激光器阵列的相干合成,是通过对各路光纤激光的相位特性进行控制,使其输出激光保持相位锁定,在目标处实现相干叠加,从而在总功率提升的同时,保持良好的激光光束质量^[4]。根据相位锁定的方式不同,相干合成可分为主动相干合成^[5-7]与被动相干合成两大类。主动相干合成技术采用电学反馈的方法控制各激光链路的光程差,以实现相位锁定。而被动相干合成技术则通过光信号的直接耦合或反馈,控制系统中运转激光的纵模来实现各路光纤激光的相位锁定。被动相干合成技术无需复

收稿日期: 2013-01-24; **收到修改稿日期**: 2013-03-27

基金项目: 国家科技重大专项(2010ZX04013)、国家 863 计划(2011AA030201)、国家自然科学基金(60908011, 60907045)和上海市青年科技启明星计划(12QH1401100)资助课题。

作者简介: 何兵(1975-),男,副研究员,主要从事高功率光纤激光器、放大器和相干合成技术等方面的研究。

E-mail: bryanho@mail.siom.ac.cn

杂的相位探测和电学反馈控制链路,具有锁相速度快、结构简单等优势,备受关注。目前,被动相干合成的方法包括全光纤自组织法^[8]、倏逝波耦合法^[9]、自傅里叶腔法^[10]、自成像腔法^[11]、相位共轭法^[12]和复合环形腔法等。

基于复合环形腔的光纤激光阵列相干合成技术是最早由 Lhermite 等^[13]于 2007 年提出,使用一根反馈光纤作为空间滤波器,选择同相模式作为反馈信号进入反馈链路,再作为种子激光注入到各路光纤放大器中进行功率放大。复合环形腔相干合成技术中,由于各个链路可采用主振荡功率放大(MOPA)结构,单链路输出的激光功率可通过光纤级联放大的方法提升;而且具有锁相调节方便、稳定、路数扩展性好等特点,且不需要窄线宽的种子源,是一种有前途的相干合成技术,备受国内外研究人员关注。本文主要介绍了基于复合环形腔技术的被动相干合成的发展现状,详细报道了复合环形腔的理论和实验最新研究成果。深入分析了复合环形腔被动相干合成技术的路数拓展特性;相位扰动特性研究证明该腔有较强的抗扰动能力;同时,利用该腔进行相干合成可以改善输出光束的偏振特性;实现了脉冲宽度为 9.7 ns,重复频率为 2.023 MHz 的相干脉冲输出,远场干涉条纹对比度为 71%;提出以光束集中度因子(DFND)衡量光束拼接质量,并基于复合环形腔建立了 8 路光纤激光相干合成系统实现了 1066 W 的功率输出。

2 基于复合环形腔的被动相干合成研究进展

2.1 复合环形腔被动相干合成的路数扩展研究

复合环形腔结构是在自成像结构的基础上,选择一根单模光纤作为空间滤波器来进行同相反馈信号的收集,其原理如图 1 所示。该结构由 N 路光纤放大器(A)阵列、光纤分束器(C)和单模反馈光纤(FF)回路组成。光纤放大器阵列准直输出的激光经过一个分束镜(BS)进行分光,反射的小部分激光作为反馈信号光通过聚焦透镜(L)耦合入单模反馈光纤,经过单模反馈光纤的空间滤波作用,非同相模式被抑制,同相反馈信号进入回路放大器得到放大,再经过分束器均匀的分成 N 路信号光,分别进入光纤放大器阵列,从而构成了环形腔结构。如图 1 所示,由于外界振动和热效应的影响,每一路光纤放大器的光程($L_c = nL$, n 为折射率, L 为光纤放大器实

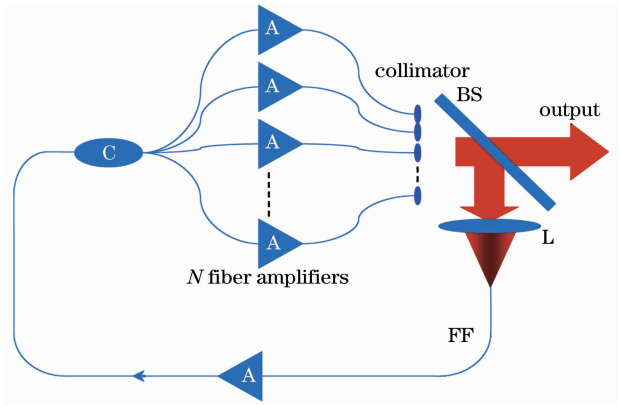


图 1 N 路光纤放大器耦合到单模光纤的复合环形腔相干合成原理图

Fig.1 Ring laser configuration for coherent beam combination of N fiber amplifiers coupled to a single mode feedback fiber

际长度)会发生变化,输出相位也在随时间无规则变化。在这种系统中,一般光程有几十米,光传播速度极快,在环形腔内循环一次的时间约为百纳秒。在一般实验室条件下,外界影响引起的光程变化频率在几百到几千赫兹量级,在很短的时间 Δt (如 1 ms)内仍然可以认为各路放大器的光程是不变的,即每一路的输出相位是不变的。由于掺 Yb 光纤的增益带宽较宽,很多波长的纵模在单模反馈光纤处分别形成干涉叠加,但是由于波长不同,其相位也不同,不同波长的纵模分布叠加后的远场峰值功率也不同,即斯特雷尔比不同。假设在某个很短的时间 Δt 内,每一路光纤放大器的光程为 $L_{c,i}$,每一路光纤放大器输出的相位为

$$\phi_i = 2\pi f L_{c,i} / c. \quad (1)$$

设各路光纤放大器的平均光程为 $L_{c,avg}$,那么它们的相对时间延迟为

$$\tau_i = (L_{c,i} - L_{c,avg}) / c. \quad (2)$$

相对相位可以表示为 $\phi_i = 2\pi f \tau_i$ 。假设每路光纤放大器的放大特性一致,即输出具有相同的振幅强度,则相干耦合光场在单模反馈光纤处的斯特雷尔比可以表示为

$$S = \left| \sum_{i=1}^N \exp(j\phi_i) \right| / N^2 = \left| \sum_{i=1}^N \exp(j2\pi f \tau_i) \right| / N^2. \quad (3)$$

假设光纤放大器阵列中 N 路光程服从正态分布, L_{RMS} 为各路相对光程 $L_{c,i} - L_{c,avg}$ 的均方根, τ_{RMS} 为各路相对时间延迟 τ_i 的均方根,在频率为 f_0 时,到达单模反馈光纤处相位一致,那么斯特雷尔比与频率

带宽的关系可以用一个高斯函数表示^[14]：

$$S(f - f_0) = \exp[-4\pi^2(f - f_0)^2 \tau_{\text{RMS}}^2]. \quad (4)$$

在相干合成研究中,参与合成的路数可扩展性是一个重要特性。使用斯特雷尔比分析了复合环形

腔的路数扩展性^[15]。作者假设各路光程差满足随机正态分布,在一定的光谱范围内模拟不同路数情况下斯特雷尔比随波长的变化,结果如图 2 所示。

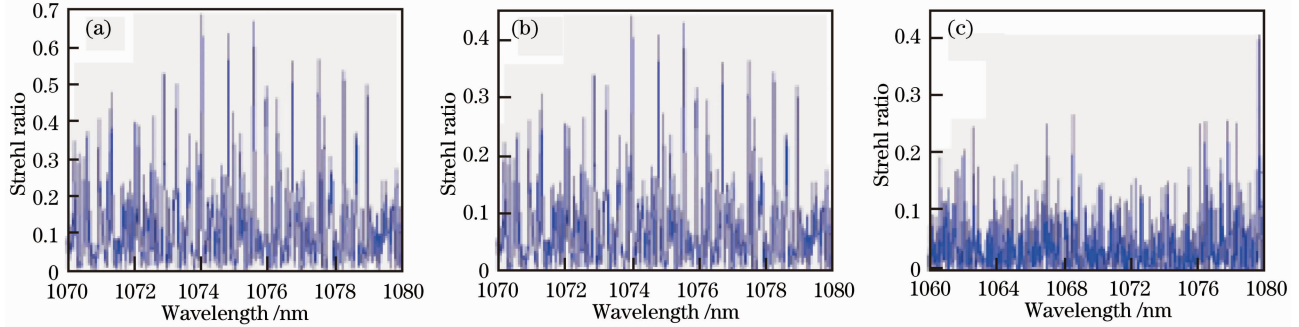


图 2 N 路光纤激光阵列中斯特雷尔比随波长变化。(a) $N=9$; (b) $N=16$; (c) $N=25$

Fig. 2 Strehl ratio versus wavelength in an N -channel fiber array. (a) $N=9$; (b) $N=16$; (c) $N=25$

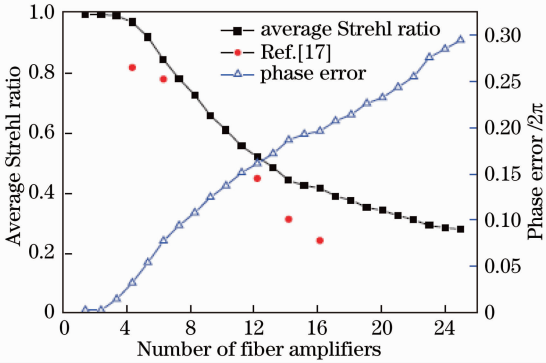


图 3 平均斯特雷尔比和相位误差与光纤放大器路数的关系

Fig. 3 Average Strehl ratio and phase error variation in relation to the number of fiber amplifiers

由图 2 可以看出随着路数的增多,可以获得高斯特雷尔比的波长越来越少,而且所获得的最高斯特雷尔比也越来越低。通过大量模拟并抽取最大的斯特雷尔比进行平均,获得了不同路数条件下的平

均斯特雷尔比和平均相位误差,如图 3 所示。当参与相干合成的路数少于 5 路时,斯特雷尔比接近 100%。但当路数扩展时,由于各路的光程各不相同,难以找到一个波长保证各路之间的相位差很小。在不超过 16 路的情况下,复合环形腔被动相干合成技术可以显著地提升相干输出功率,并保证良好的光束质量。

2.2 相位扰动对复合环形腔被动相干合成的影响

高频相位噪声会增加实时相位锁定的难度,同时光纤中温度梯度导致的热致伸缩和外界环境因素都有可能造成相位扰动,而相位扰动对相干合成的锁相效果有重要影响,对此,不论是主动还是被动相干合成技术,研究人员都十分关注^[16]。本课题组搭建了如图 4 所示的两路复合环形腔被动相干合成系统,通过在其中一路中加入相位调制器来模拟相位扰动,研究了相位扰动的频率和幅度对复合环形腔相干合成效果的影响^[17]。

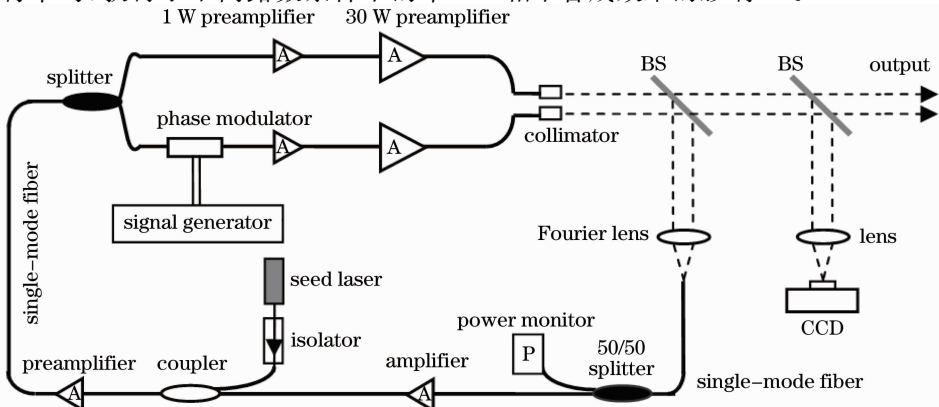


图 4 两路光纤放大器被动相干合成实验装置

Fig. 4 Experimental setup of passive coherent beam combination of two fiber amplifiers

实验结果表明,在不同的相位扰动幅度和频率下,系统的总输出功率没有明显变化。相位扰动主要影响了远场干涉条纹的对比度,如图 5 所示,这意味着相位扰动会使相位锁定变得更加困难。尽管如此,系统在受到数十千赫的相位扰动后仍然能够实

现一定程度的相位锁定。一般的环境因素带来的相位扰动频率不会超过 10 kHz。因此,基于复合环形腔方法的光纤激光阵列相干合成在实际应用中具有很强的抗相位干扰能力。

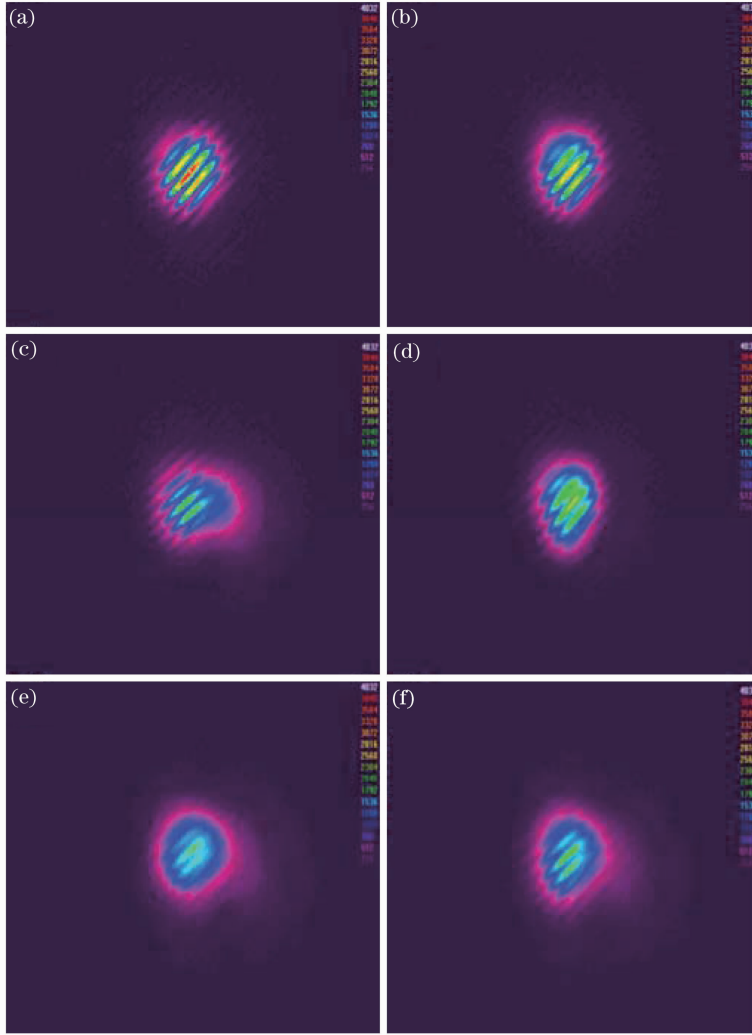


图 5 不同相位调制频率和深度时远场光束图像。(a) 没有相位调制; (b) 相位调制频率为 10 kHz, 调制深度为 $\pi/2$; (c) 50 kHz, $\pi/2$; (d) 80 kHz, $\pi/2$; (e) 100 kHz, $\pi/2$; (f) 50 kHz, π

Fig. 5 Far-field beam patterns corresponding to different phase modulation frequencies and depths. (a) Without phase modulation; (b) phase modulation frequency is 10 kHz and the phase modulation depth is $\pi/2$; (c) 50 kHz, $\pi/2$; (d) 80 kHz, $\pi/2$; (e) 100 kHz, $\pi/2$; (f) 50 kHz, π

2.3 复合环形腔被动相干合成的偏振选择特性

通常相干合成要求各路激光都为线偏振光,且偏振方向一致。这种保偏要求对单链路激光器的制作造成了一定的困难。本课题组研究了复合环形腔的偏振选择特性,并在单链路中采用非保偏光纤获得了近似线偏振光相干合成的效果^[18]。实验装置图如图 6 所示,每一路保偏放大器输出线偏振光进入偏振控制链路。实验共使用了 4 种类型的偏振控

制链路,其中:(a)使用保偏光纤(PMSMF),各路输出激光的偏振方向不一致;(b)使用非保偏光纤和偏振控制器(PC),各路输出激光是线偏振光且偏振方向一致;(c)使用非保偏光纤和偏振控制器,各路输出激光是圆偏振光;(d)使用非保偏光纤,不对输出激光的偏振特性做任何控制。反馈链路中使用一个快轴截止的隔离器(ISO)确保进入放大链路中的反馈光都是偏振方向与慢轴平行的线偏振光。

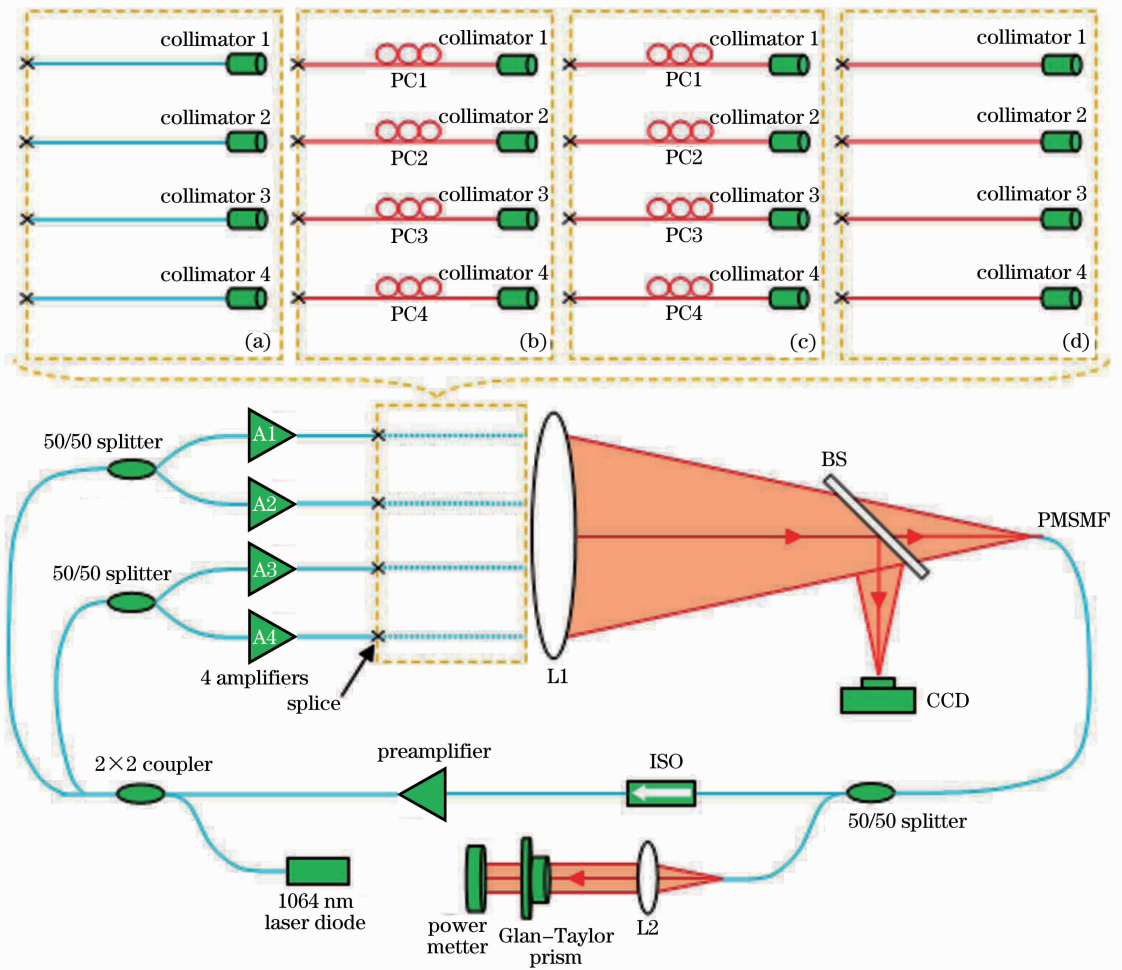


图 6 四路光纤放大器被动相干合成实验装置图

Fig. 6 Experimental setup of passive coherent beam combination of four fiber amplifiers

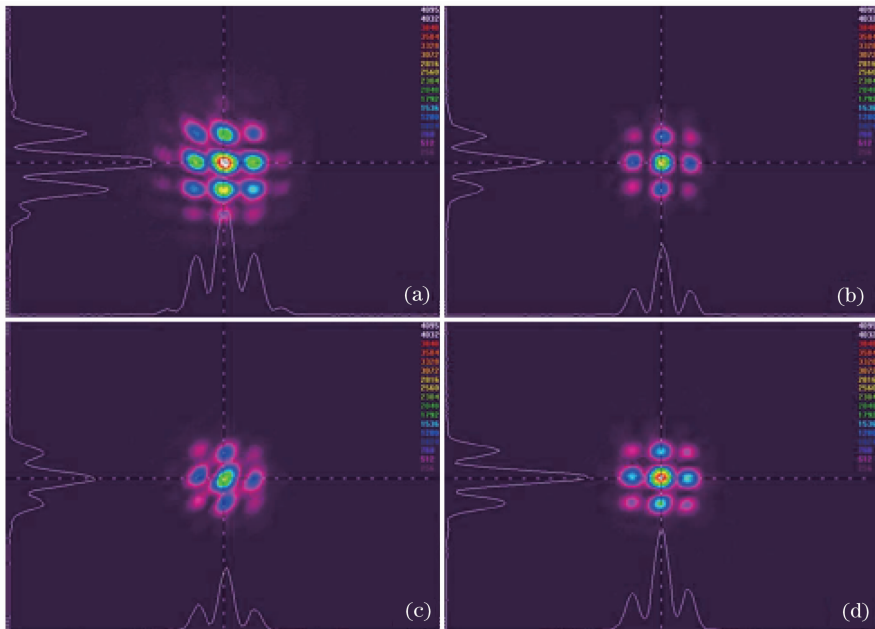


图 7 使用不同偏振控制链路实现相位锁定后远场图像

Fig. 7 Far-field patterns of different polarization control chains after phase locking

由于在非保偏光纤中,两个正交方向的模式传播常数不一致,使得不同波长在经过同一段非保偏光纤后偏振特性不一样。而反馈链路对偏振特性的选择使得只有既满足各路相位一致,又满足各路偏振一致的波长才具有最小的损耗。因此,复合环形腔不仅能锁定相位,同时也可以对各子链路的偏振特性进行调整。4种类型的偏振控制链路在相位锁定后获得的远场干涉图像见图7,图7(a)~(d)的干涉条纹对比度分别为75.5%、95.2%、83.5%、90.3%。使用非保偏光纤进行相干合成仍然可以获得90.3%的干涉条纹对比度,与保偏方向完全一致

的情况下获得结果相比仅下降了5%。锁相前后各链路及合成激光的偏振特性见表1,其中 θ 为水平方向与偏振方向的夹角(沿顺时针方向,且在椭圆偏振光中,偏振方向定义为椭圆的长轴方向)。链路(d)在相位锁定后合成激光的偏振消光比(PER)提高7.4dB,且偏振方向由不一致变为一致,说明复合环形腔能够对合成激光的偏振特性进行一定的改善。复合环形腔的偏振自选择特性使得单个功率放大链路的制作在一定程度上摆脱了保偏器件的限制,有利于提升输出功率,降低成本,简化系统结构。

表1 偏振特性

Table 1 Polarization characteristics

Polarization control chain	Beam	Polarization extinction ratio /dB	$\theta /(^{\circ})$	
(a)	Beam 1	22.2	88	
	Beam 2	20.9	5	
	Beam 3	17.7	85	
	Beam 4	23.9	144	
	Beam in PMSMF	open loop	4.4	95
		closed loop	4.9	45
(b)	Beam 1	16.7	0	
	Beam 2	10.8	0	
	Beam 3	18.4	0	
	Beam 4	19.2	0	
	Beam in PMSMF	open loop	13.4	0
		closed loop	16.3	0
(c)	Beam 1	1.3	55	
	Beam 2	0.9	70	
	Beam 3	1.7	45	
	Beam 4	2.2	25	
	Beam in PMSMF	open loop	2.0	105
		closed loop	7.4	0
(d)	Beam 1	13.8	174	
	Beam 2	14.0	150	
	Beam 3	11.4	170	
	Beam 4	8.5	110	
	Beam in PMSMF	open loop	3.0	6
		closed loop	10.4	0

2.4 8路高功率光纤激光阵列被动相干合成

在相干合成研究中,近场光斑的占空比(子光斑直径除以相邻光斑之间的距离)一直被认为是影响合成效率的关键^[19]。进一步研究表明,DFND能够更加客观的反映近场分布对相干合成光束质量的影响^[20]。DFND的定义为

$$f_{\text{DFND}} = \sum d_m / (N\omega), \quad (5)$$

式中 d_m 为第 m 路子光束距近场中心点的距离, N

为子光束的路数, ω 为子光束的直径。理论模拟了4种占空比相同但 f_{DFND} 不同的近场分布形式,如图8所示,其中(a)~(d)的DFND取值分别为2.263、2.263、2.145、1.881。对应的远场图像见图9,其中(a)~(d)的中心光斑能量所占的比例分别为29%、29%、33%、41%。这说明即使占空比相同, f_{DFND} 不同的近场光斑分布仍然会导致远场相干合成图像的中心光斑能量比不同。 f_{DFND} 越小,中心光

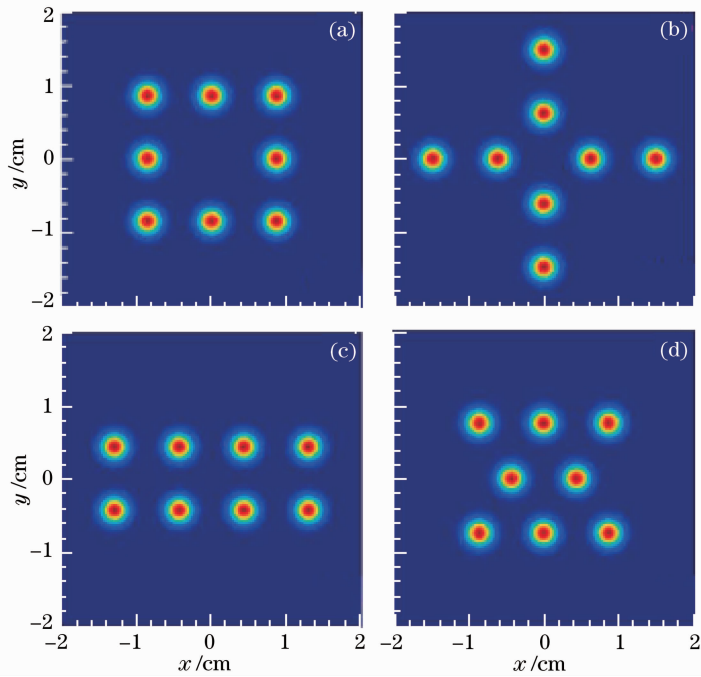


图 8 8 路光束的近场理论分布。(a)正方形分布;(b)十字形分布;(c)矩形分布;(d)交错分布
Fig. 8 Near-field theoretical distributions of eight beams. (a) Square distribution; (b) cross distribution;
(c) rectangular distribution; (d) interwoven distribution

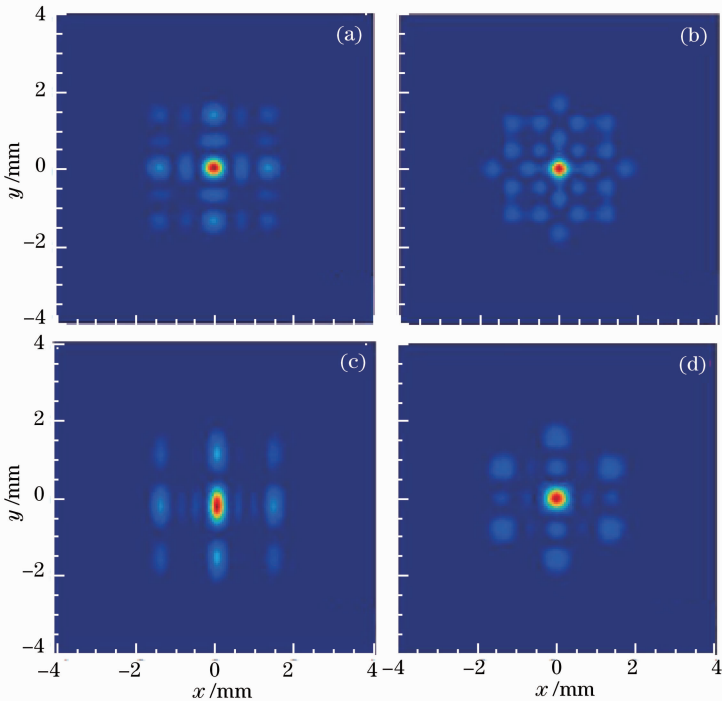


图 9 相位锁定后的远场图像。(a)正方形分布;(b)十字形分布;(c)矩形分布;(d)交错分布
Fig. 9 Far-field interference patterns after phase locking. (a) Square distribution; (b) cross distribution;
(c) rectangular distribution; (d) interwoven distribution

斑能量所占的比例越高。

为了在实验中验证具有较小 f_{DFND} 值的交错分布可有效提高光束质量,本课题组使用 8 路百瓦级高功率光纤放大器,搭建了复合环形腔相干合成实

验系统。为了获得高功率输出,实验中单链路激光采用 3 级全光纤保偏级联放大结构,单链路输出功率在 126~140 W 之间。各路主放大器的输出端熔接一段 2 m 长的传能光纤以方便准直输出,纤芯直

径为 $25\ \mu\text{m}$ 。单链路输出光斑经过准直后直径约为 $4\ \text{mm}$ 。如图 10 所示,使用 7 块矩形反射镜组成的光束拼接平台将 8 路激光的近场分布排布成如左下角小图所示。理论分析证明,这样的光束排布方式

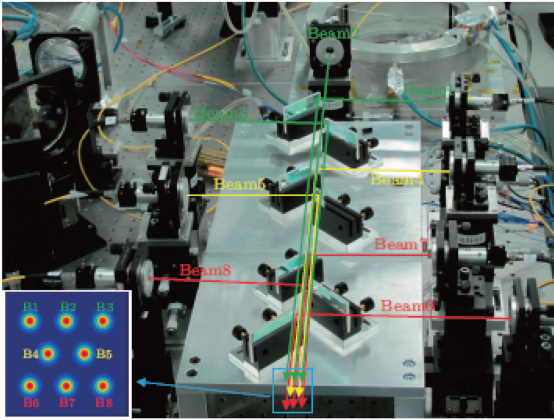


图 10 光束拼接平台和近场光斑分布

Fig. 10 Beam splicing platform and the distribution of beams in near-field

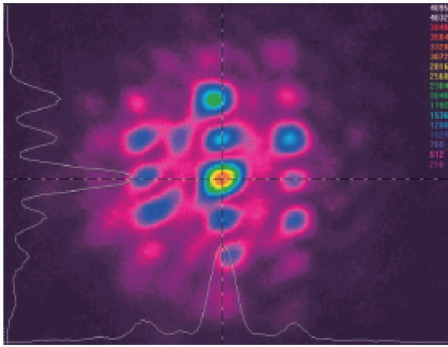


图 11 相位锁定后的相干图像

Fig. 11 Coherent patterns of after phase locking

有利于提高相干合成激光的光束质量。锁相后远场干涉图像见图 11,干涉条纹对比度高达 87% ,系统的最高输出功率为 $1066\ \text{W}$ 。

2.5 使用复合环形腔实现纳秒级光纤放大器的被动相干合成

过去的光纤激光阵列相干合成研究大多是针对连续激光进行的。近年来,脉冲光纤激光阵列相干合成正获得研究人员越来越多的关注^[21]。本课题组将复合环形腔被动相干合成应用到脉冲领域,实现了两路纳秒级光纤放大器的相干合成^[22],实验装置示意图见图 12。通过电光强度调制器(EOAM)产生脉冲激光,调节调制器的重复频率和环形腔的光程相匹配,使得反馈的脉冲信号能够再次通过调制器进入放大链路,光反馈锁相机制得以建立。实验获得的脉冲相干合成激光最小脉冲宽度为 $9.7\ \text{ns}$,重复频率为 $2.023\ \text{MHz}$,平均功率为 $503\ \text{mW}$ 。还进一步研究了复合环形腔的相位锁定所需要的时间。通过调节电光强度调制器的开关周期故意制造与环形腔循环时间($494.3\ \text{ns}$)的失配,并记录远场相干图像。远场干涉条纹随开关周期的变化见图 13。当失配不超过 $2\ \text{ns}$ 时,系统可以实现稳定的锁相,而且失配越小,干涉条纹的可见度越高。对于脉冲宽度为 $20\ \text{ns}$ 的脉冲而言, $2\ \text{ns}$ 失配意味着电光强度调制器产生的每个脉冲在经过 10 次腔循环后就会完全损失,无法形成反馈。所以复合环形腔的锁相建立时间只需 10 个环形腔腔循环时间,即 $5\ \mu\text{s}$ 。基于复合环形腔的被动相干合成免疫 $200\ \text{kHz}$ 以下的相位噪声和环境扰动。

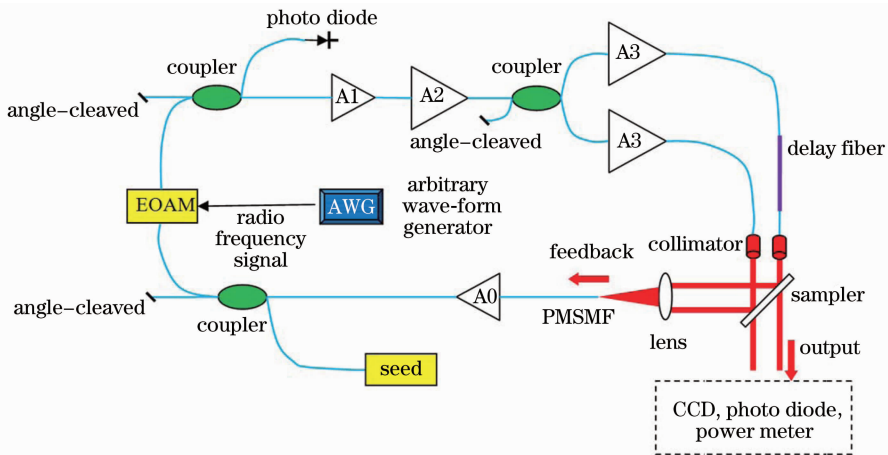


图 12 两路纳秒级光纤放大器被动相干合成实验装置示意图

Fig. 12 Experimental setup of passive coherent beam combination of two nanosecond fiber amplifiers

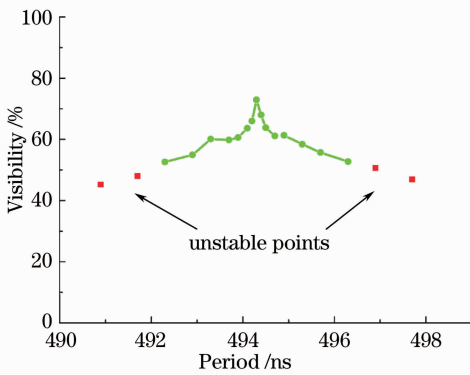


图 13 脉冲周期变化时的远场干涉条纹可见度

Fig. 13 Visibility of far-field patterns when the pulse period of the laser is varied

3 结 论

如何在获得高功率激光的同时保持良好的光束质量一直是激光技术研究人员的关注焦点。基于光纤激光阵列的相干合成技术发展十分迅速。复合环形腔方法在系统成本、锁相速度、功率提升性方面都具有显著优势。对近年来复合环形腔被动相干合成的主要研究成果进行了总结和介绍。本课题组的工作重点除了进一步提高相干合成的总功率以外，也从理论和实验上深入研究了相位锁定的机制和特性。研究表明复合环形腔被动相干合成系统单链路放大器功率可以进一步扩展；该系统抗干扰能力强，并且可部分使用非保偏器件，输出光束的偏振态会自我改善；同时，复合环形腔被动相干合成技术也成功地扩展到脉冲领域，实现纳秒级相干合成。可以肯定的是，基于复合环形腔技术的被动相干合成将继续发展，可以实现更多路数的相干合成和更高功率的输出，在各个应用领域发挥越来越大的作用。

参 考 文 献

- 1 Yoonchan Jeong, Alexander J. Boyland, Jayanta K. Sahu *et al.*. Multi-kilowatt single-mode ytterbium-doped large-core fiber laser [J]. *J. Optical Society of Korea*, 2009, **13**(4): 416~422
- 2 Yuanyuan Fan, Bing He, Jun Zhou *et al.*. Thermal effects in kilowatt all-fiber MOPA [J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(16): 15162~15172
- 3 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): B63~B92
- 4 Zhou Jun, He Bing, Xue Yuhao *et al.*. Study on passive coherent beam combination technology of high power fiber laser arrays[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(9): 0900129

周 军,何 兵,薛宇豪等. 高功率光纤激光阵列被动相干组束技术研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(9): 0900129

- 5 C. X. Yu, S. J. Augst, S. M. Redmond *et al.*. Coherent combining of a 4 kW, eight-element fiber amplifier array [J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(14): 2686~2688
- 6 Gregory D. Goodno, Stuart J. McNaught, Joshua E. Rothenberg *et al.*. Active phase and polarization locking of a 1.4 kW fiber amplifier [J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(10): 1542~1544
- 7 Yanxing Ma, Xiaolin Wang, Jinyong Leng *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
- 8 Baishi Wang, Eric Mies, Monica Minden *et al.*. All-fiber 50 W coherently combined passive laser array [J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(7): 863~865
- 9 E. J. Bochove, P. K. Cheo, G. G. King. Self-organization in a multicore fiber laser array [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(14): 1200~1202
- 10 Christopher J. Corcoran, Frederic Durville. Experimental demonstration of a phase-locked laser array using a self-Fourier cavity [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **86**(20): 201118
- 11 Bing He, Qihong Lou, Jun Zhou *et al.*. High power coherent beam combination from two fiber lasers [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(7): 2721~2726
- 12 B. Steinhasser, A. Brignon, E. Lallier *et al.*. High energy, single-mode, narrow-linewidth fiber laser source using stimulated Brillouin scattering beam cleanup [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(10): 6464~6469
- 13 Jérôme Lhermite, Agnès Desfarges-Berthelebot, Vincent Kermene *et al.*. Passive phase locking of an array of four fiber amplifiers by an all-optical feedback loop [J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(13): 1842~1844
- 14 Joshua E. Rothenberg. Passive coherent phasing of fiber laser arrays [C]. *SPIE*, 2008, **6873**: 687315
- 15 Yuhao Xue, Bing He, Jun Zhou *et al.*. Array size scaling of passive coherent beam combination in fiber laser array [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2012, **10**(1): 011401
- 16 X. L. Wang, Y. X. Ma, P. Zhou *et al.*. Coherent beam combining of two W-level fiber amplifiers in turbulence atmospheric environment based on stochastic parallel gradient descent algorithm [J]. *Laser Physics*, 2009, **19**(5): 984~988
- 17 Zhen Li, Jun Zhou, Bing He *et al.*. Impact of phase perturbation on passive phase-locking coherent beam combination [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2012, **24**(8): 655~657
- 18 Houkang Liu, Bing He, Jun Zhou *et al.*. Polarization self-selection in a coherent beam combination system with an all-optical feedback loop [J]. *Appl. Opt.*, 2012, **51**(27): 6544~6548
- 19 Wei Wang, Qihong Lou, Bing He *et al.*. Effects of space duty cycle on the characteristics of fiber laser coherent beam combination [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2010, **8**(5): 490~492
- 20 Liu Houkang, Xue Yuhao, Li Zhen *et al.*. The improved power of the central lobe in the beam combination and high power output [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2012, **29**(4): 0442042
- 21 Arno Klenke, Enrico Seise, Stefan Demmler *et al.*. Coherently-combined two channel femtosecond fiber CPA system producing 3 mJ pulse energy [J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(24): 24280~24285
- 22 Houkang Liu, Bing He, Jun Zhou *et al.*. Coherent beam combination of two nanosecond fiber amplifiers by an all-optical feedback loop [J]. *Opt. Lett.*, 2012, **37**(18): 3885~3887