

高功率光纤激光阵列被动相干组束技术研究

周 军 何 兵 薛宇豪 漆云凤 刘 驰 丁亚茜 刘厚康 李 震 楼祺洪

(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)

摘要 对高功率光纤激光的被动相干组束技术进行了理论和实验研究。介绍了几种典型的被动相干组束技术, 并对其功率可提升性进行了分析。详细报道了课题组在光反馈环形腔结构光纤激光相干组束方面的研究进展, 研究分析了该相干组束技术的输出光谱特性和路数可提升性, 建立了 4 路和 8 路高功率光纤放大器的相干组束系统, 并分别实现了 1062 和 1090 W 的相干耦合激光输出。

关键词 激光技术; 光纤激光; 相干组束; 环形腔

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0900129

Study on Passive Coherent Beam Combination Technology of High Power Fiber Laser Arrays

Zhou Jun He Bing Xue Yuhao Qi Yunfeng Liu Chi Ding Yaqian
Liu Houkang Li Zhen Lou Qihong

(Shanghai Key Laboratory of All Solid-State Laser and Applied Techniques, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract Passive coherent beam combination of high power fiber laser arrays is researched theoretically and experimentally. Some typical technologies of passive coherent beam combination of fiber laser arrays are introduced, and their power scaling is analyzed. The principle of passive coherent beam combination based on ring cavity is analyzed. The coherent output spectrum characteristics and array size scalability of the passively coherently phased fiber laser arrays are explored. High power passive phase locking of 4-channel and 8-channel fiber amplifier arrays with ring cavity are experimentally demonstrated, and the maximum coherent output powers are up to 1062 and 1090 W, respectively.

Key words laser technology; fiber laser; coherent beam combination; ring cavity

OCIS codes 140.3510; 140.3295; 140.3298

1 引 言

基于包层抽运技术的高功率光纤激光器具有光束质量好、效率高、易于散热和结构紧凑等特点, 在激光工业加工、科学研究和国防军事等领域均具有重要应用^[1~3]。随着高功率半导体激光技术、双包层光纤制备技术和高效率抽运耦合技术的发展, 单根光纤激光器的输出功率不断提高。目前, 美国 IPG 公司单根光纤激光已经实现了万瓦级的近单模连续输出^[4]。本课题组采用国产掺镱双包层光纤,

单纤在 2009 年实现了 1758 W 的振荡激光输出, 并研制出 1200 W 的全光纤化光纤激光器。然而, 由于光纤中的非线性效应、光纤端面激光损伤和热效应等因素的制约, 单根光纤激光器的输出功率将受到一定限制。

将多个高功率光纤激光组成阵列, 以实现各路激光的功率合成是获得更高功率激光输出的有效途径。光纤激光阵列的相干组束技术可以在提升激光输出功率的同时, 保持良好的激光光束质量, 是目前

收稿日期: 2011-07-25; **收到修改稿日期**: 2011-08-04

基金项目: 国家 863 计划(2011AA030201)、国家重大科技专项(2010ZX04013)、国家自然科学基金(60908011)和上海科技启明星基金(09QB1401700)资助课题。

作者简介: 周 军(1972—), 男, 博士, 研究员, 主要从事高功率光纤激光及其相干组束技术、准分子激光技术等方面的研究。E-mail: junzhousd@mail.siom.ac.cn

国际上高功率激光技术领域的研究热点。光纤激光阵列的相干组束是通过对各路光纤激光相位特性的控制,使其输出激光保持相位一致,获得锁相的激光输出,从而在总功率提升的同时,保持良好的激光光束质量。根据光纤激光相位调整或控制方式的不同,相干组束可以分为主动相干组束^[5~7]与被动相干组束^[8~18]两大类。在主动相干组束技术中,采用的是电子学反馈控制的方法,通过主动控制各路激光的光程差,实现同相激光输出;在被动相干组束技术中,各路激光是通过光信号的直接耦合或反馈,由光纤激光阵列自动选择不同的波长纵模,来实现各路光纤激光的同相位锁定输出。被动相干组束技术由于无需复杂的相位探测和反馈控制电路及相应的收敛算法,具有结构简单、响应速度快等特点,备受关注,目前已经报道的被动相干组束技术包括全光纤结构^[8,9]、多芯结构^[10,11]、自傅里叶腔^[12~14]、自成像腔^[15~17]和环形腔^[18]结构等。

本文首先介绍几种典型的被动相干组束技术,并对各种技术的相干耦合功率可提升性进行分析。然后对基于空间滤波技术的光纤激光阵列自成像腔

和光反馈环形腔被动锁相技术进行理论和实验研究,分析光反馈环形腔相干组束技术的输出光谱特性和光束路数可扩展性,建立了4路和8路高功率光纤放大器的相干组束系统,并均实现了千瓦级的相干耦合激光输出。

2 几种典型的被动相干组束技术

对于光纤激光阵列的被动相干组束,国内外已经提出了多种技术方案,并进行了相应实验验证,下面仅就其中几种典型的被动相干组束技术进行介绍。

2.1 自组织全光纤结构的被动相干组束技术

自组织全光纤结构被动相干组束主要是指采用一个或多个光纤耦合器构成全光纤化的光纤激光器阵列,各路光纤激光器的激光信号通过在光纤耦合器中的相互耦合,实现同相振荡的高功率激光输出。2009年Wang等^[8,9]利用自组织全光纤结构实现了两路和四路光纤激光的被动相干组束,最高输出功率为75.5 W,相干合成效率达85%,其实验原理如图1所示。

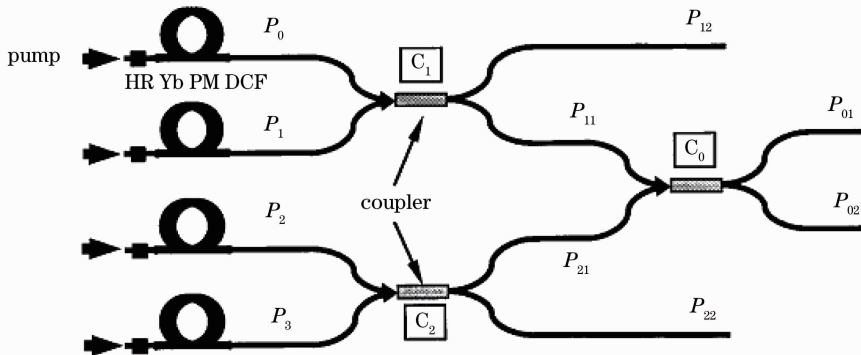


图1 4路高功率全光纤被动相干组束示意图

Fig. 1 Schematic of all-fiber passive coherent array combining four lasers

该技术方案具有结构紧凑、可靠性高和合成效率高等特点,但由于单路激光功率的提升受到光纤耦合器限制,使得该技术的激光功率可提升性遇到较大困难。

2.2 基于多芯有源光纤的被动相干组束技术

设计和采用具有多个掺杂纤芯的特种光纤,通过控制有源纤芯的参数和纤芯间距,使得各纤芯的激光在产生和传输中能够互相耦合,从而实现相位锁定,获得高光束质量的激光输出。2001年,Cheo等^[10]实现了7芯光纤激光的相干耦合输出,输出功率超过5 W,斜率效率为65.2%。2004年,Huo

等^[11]利用19芯有源光纤获得了功率达100 W的激光输出,光束质量因子 M^2 约为1.7,如图2为输出激光的近场和远场光斑三维图样。

在基于多芯光纤的被动相干组束技术中,通常还需要采用外部的空间选模措施来保证获得高光束质量的同相激光输出。理论与实验表明,在该技术中,随着纤芯数目的增多,输出激光的光束质量也将逐步下降。此外,与常规光纤激光功率提升的限制瓶颈类似,多芯光纤也同样存在着高功率抽运光耦合和热管理等方面的限制。

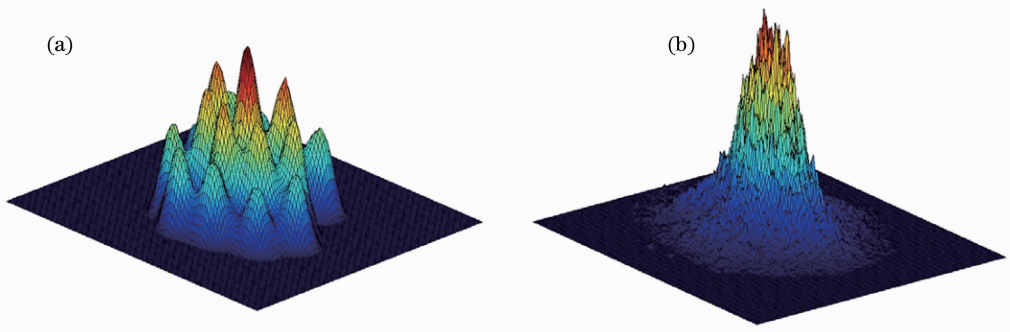


图 2 相干耦合激光输出的三维图样。(a)近场;(b)远场

Fig. 2 3D view of the coherent beam. (a) Near field; (b) far field

2.3 自傅里叶腔被动相干组束技术

自傅里叶腔被动相干组束技术的原理如图 3 所示,由一个平面镀有半透膜的平凸透镜作为光纤激光阵列的外腔耦合输出镜,激光经过外腔往返一次正好完成一次傅里叶变换。要使光纤激光器阵列所发出的光学图样与经过一次傅里叶变换后的图样完全一样,就必须要保证

$$b = \sqrt{F\lambda} \sqrt{1 - \pi^2 a^4 / (F\lambda)^2} \approx \sqrt{F\lambda}, \quad (1)$$

式中 F 是透镜的全程(外腔中的往返)焦距(其中 $F=f/2$, f 是平凸透镜的实际焦距), λ 是工作波长, b 是输入光纤纤芯间的空间距离。通过设计适当的光纤输入结构,就可提供足够的信号光反馈回光纤纤芯中,从而实现同相振荡激光输出。

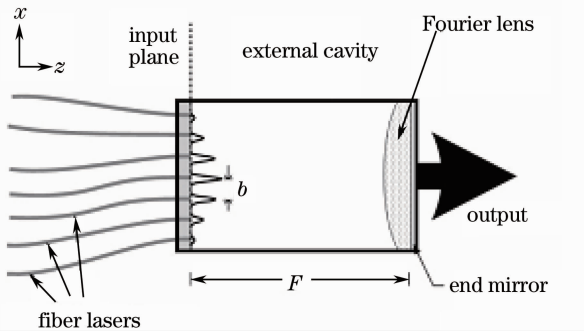


图 3 自傅里叶变换腔原理图

Fig. 3 Schematic of self-Fourier laser cavity

2005 年,Corcoran 等^[12]利用自傅里叶腔结构成功实现了 7 路光纤激光器的相干组束,相干输出图样的可见度 $V=0.87$,相干度为 0.73,总的输出功率为 0.4 W,图 4 给出了相干耦合激光输出的远场光斑图样。该技术的主要缺点是相干组束的效率较低,如在他们 2008 年报道的 7 路光纤激光相位锁定结果中,参与组束激光阵列的总功率 70 W,但相干耦合输出功率仅为 6 W^[14]。

2.4 自成像腔被动相干组束技术

自成像腔被动相干组束的原理如图 5 所示,利

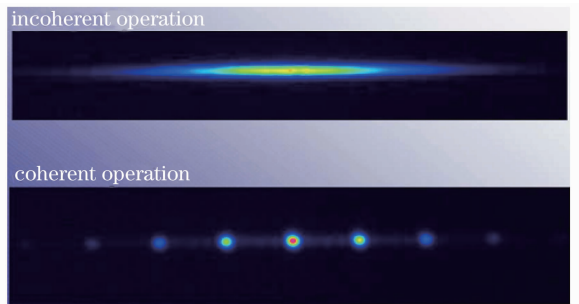


图 4 7 路光纤激光相干耦合输出的远场光斑图样

Fig. 4 Far field spot pattern of incoherent and coherent of 7-channel fiber laser array

用空间滤波器和输出耦合镜构成的外腔,实现多路光纤激光的同相输出。光纤准直器阵列和输出耦合镜分别放置在傅里叶透镜 $L3$ 的前焦面和后焦面上,激光阵列输出光场在腔内往返一次正好产生自己的像。在输出耦合镜上放置一个空间滤波器,将其异相模式进行滤除,将同相模式进行反馈,从而使得同相模式在多路光纤激光腔内产生振荡,实现相位锁定。

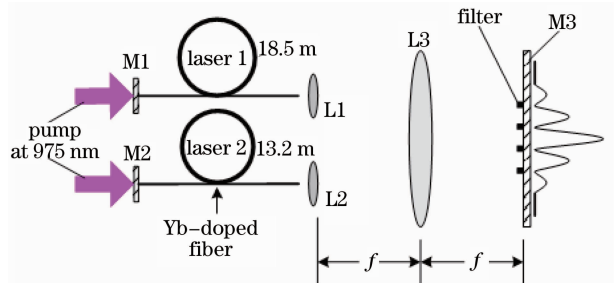


图 5 自成像腔相干组束原理图

Fig. 5 Schematic of self-imaging resonator

2006 年,本课题组利用自成像腔结构实现了 2 路和 4 路二维光纤激光阵列的相位锁定^[15,16]。自成像腔被动相干组束功率提升的限制之一在于空间滤波器的激光损伤,为了防止高功率情况下对空间滤波器的激光损伤,采用如图 6 所示的改进自成像

腔结构,将空间滤波反馈外腔移出出大功率输出光路,实现了 134 W 的 4 路二维光纤激光阵列的相干组束^[17],合成效率为 84%。图 7 为相位锁定后的远场干涉图样。

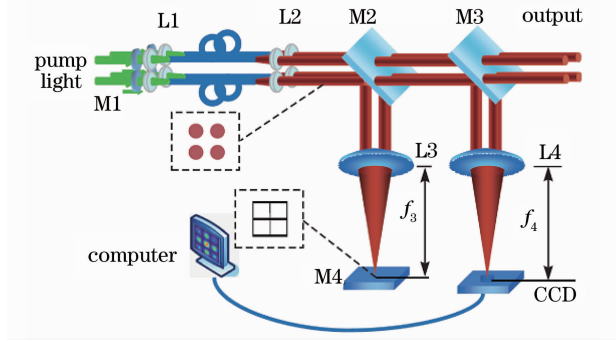


图 6 基于自成像腔结构二维四路光纤激光阵列的相干组束

Fig. 6 Coherent beam combination of 4-channel-fiber laser array in the two-dimensional distribution

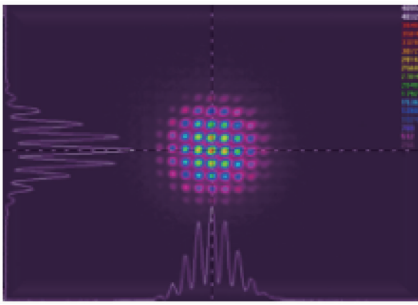


图 7 相位锁定后的远场干涉图样

Fig. 7 Far-field interference pattern of phase locking

在自成像腔被动相干组束技术中,空间滤波器是限制相干耦合输出激光功率提升的主要因素。此外,由于反馈信号光是通过各路光纤激光的输出端耦合入光纤的,在高功率工作时光纤端面易于发生损伤,影响功率的提升。

2.5 光反馈环形腔被动相干组束技术

光反馈环形腔结构是在自成像腔结构的基础上发展而来的,同样也利用了空间滤波器的选模原理。如图 8 所示,多路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,反射的小部分激光通过傅里叶透镜耦合入单模反馈光纤(FF),经过单模反馈光纤的空间滤波作用,异相模式被滤除,而同相模式被选择,作为反馈光信号进入反馈回路,通过分束再作为各路光纤放大器的种子激光进行功率放大,构成了环形腔结构,实现多路光纤激光的相位锁定。2007 年,Lhermite 等^[18]采用上述环形腔结构,实现了一维四路低功率掺铒光纤放大器阵列的相干组束。

在光反馈环形腔被动相干组束技术中,单路激

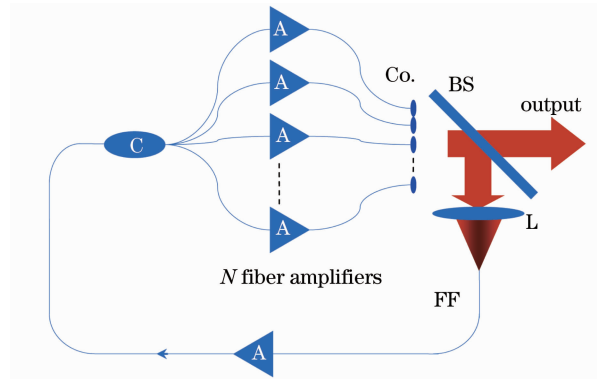


图 8 环形腔结构相干组束原理图

Fig. 8 Coherent beam combination with a ring cavity 光采用主振荡功率放大(MOPA)结构,可通过多级光纤级联放大的方法提升单路激光的功率;同时,单路激光采用 MOPA 结构,与基于主动相位控制的 MOPA 相干组束技术类似,参与组束的光束路数可扩展^[19,20]。因此,从原理上讲,该相干组束技术具有单路激光功率可提升、光束路数可扩展的特性,是一种可定标放大器的被动相干组束技术。

3 光纤激光阵列光反馈环形腔被动相干组束的理论及实验研究

3.1 光反馈环形腔被动相干组束的理论分析

在光纤激光阵列的被动相干组束系统中,由于外界振动和热效应的影响,参与组束的每一路光纤放大器的光程(nL)会发生变化,放大输出激光的相位也将随时间无规则变化。在该系统中,通常单路激光的光程有几十米,在环形腔内光反馈循环一次的时间约为百纳秒量级。在实验室条件下,外界环境微扰等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,就可认为各路光纤放大器的光程是不变的,而光反馈循环次数可达数千次,足以实现稳定的激光输出。

Strehl 比是用来描述激光在远场峰值强度信息的物理量,对于相干组束,Strehl 比反映了各路光纤输出的相位差信息,当相位差为 0 时,即完全同相时,Strehl 比为 1;在相位差不等于 0 时,Strehl 比介于 0~1 之间。设每一路光纤放大器的激光输出到达单模反馈光纤的相位为

$$\phi_k = 2\pi f(nL)_k/c, \quad (2)$$

各链路光纤放大器的平均光程为 $(nL)_{\text{avg}}$,则它们的相对时间延迟为

$$\tau_k = [(nL)_k - (nL)_{\text{avg}}]/c. \quad (3)$$

相对相位可以表示为 $\phi_k = 2\pi f\tau_k$,假设每路光

纤放大器的放大特性一致,即放大激光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 Strehl 比表示为

$$S = \left| \sum_{k=1}^N \exp(j\phi_k) \right| / N^2 = \left| \sum_{k=1}^N \exp[j2\pi f\tau_k] \right| / N^2. \quad (4)$$

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 $(nL)_k - (nL)_{\text{avg}}$ 的均方根, τ_{RMS} 为各路相对时间延迟 τ_k 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 Strehl 比与频率带宽的关系可以用一个高斯函数表示,

$$S(f - f_0) = \exp[-4\pi^2(f - f_0)^2\tau_{\text{RMS}}^2], \quad (5)$$

在 $L_{\text{RMS}} = 1$ cm 时, $\tau_{\text{RMS}} = 33$ ps, 计算了 Strehl 比与带宽的关系,如图 9 所示,其半峰全宽(FWHM) Δf 为 8.0 GHz。根据(5)式得,半峰全宽 Δf 与相对光程的均方根 L_{RMS} 成反比,有

$$\Delta f = \frac{\sqrt{\ln 2}c}{\pi} \cdot \frac{1}{L_{\text{RMS}}}, \quad (6)$$

根据文献[19],可以由 Strehl 比计算出相位误差为

$$\sigma = \sqrt{\ln \frac{N-1}{NS-1}}. \quad (7)$$

以 4 路光纤激光的被动相干组束为例,假设在某个很短的时间 Δt 内,四路光纤放大器的光程分别为 23.941, 24.020, 24.011 和 24.052 m,根据(5)式

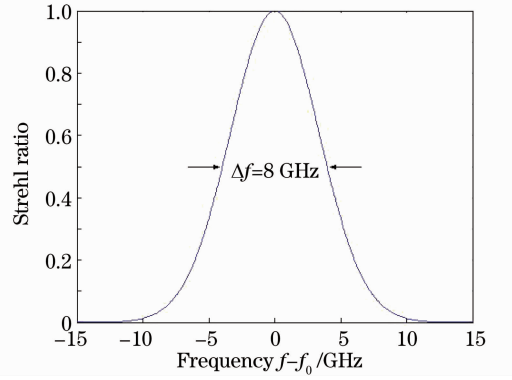
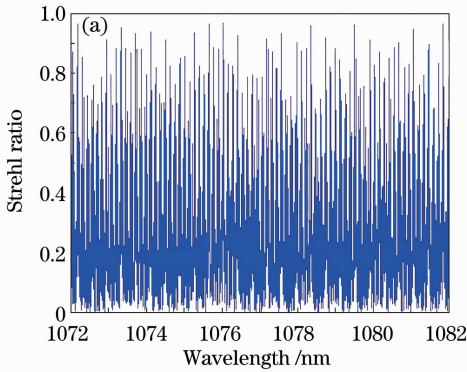


图 9 Strehl 比与带宽 $f - f_0$ 的关系

Fig. 9 Strehl ratio versus bandwidth

在不同带宽的波长范围内计算了不同波长的纵模分别相干叠加后的 Strehl 比,如图 10 所示。图 10(a)是波长在 1072~1082 nm 范围,带宽 10 nm 下的计算结果,可以看出有许多波长的纵模可以实现高的 Strehl 比,即这些纵模的相位差较小,而其他的纵模相位差较大。同样在 1064.5~1066.5 nm 的带宽为 2 nm 的范围内计算了 Strehl 比随波长的变化关系,如图 10(b)所示,可见仍有多个波长的纵模可以实现高 Strehl 比,最高值为 0.963。从而表明,锁相激光输出具有多纵模同时输出的光谱特性,这对参与组束的单链路光纤放大器激光功率的提升非常有益。当 4 路光纤激光的近场排布为正方形时,相干耦合输出激光的远场干涉图样如图 11 所示。

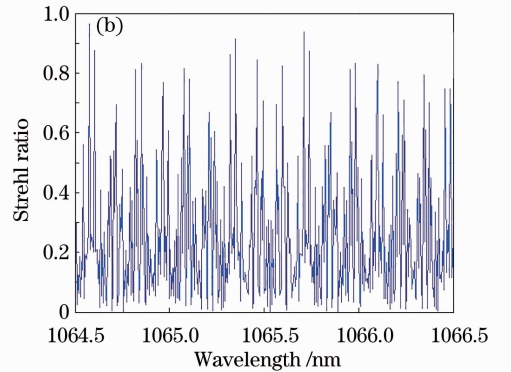


图 10 Strehl 比与波长的关系

Fig. 10 Strehl ratio versus wavelength

3.2 光纤激光阵列被动相干组束的实验研究

基于光反馈环形腔结构的 N 路光纤激光被动相干组束的实验原理装置如图 12 所示,其由 N 路掺 Yb^{3+} 光纤放大器、分束镜、傅里叶透镜、单模反馈光纤及放大器、光纤分束器组成。波长为 1064 nm 光纤输出的激光二极管(LD)通过 50:50 的光纤合束器,引入到单模反馈光纤的放大回路中,作为参考光用于实验中的光路调试,以避免在反馈光信号过

小时 N 路光纤放大器工作在过饱和状态。单链路光纤激光由多个光纤放大模块(YDFA-1 至 YDFA-K)级联构成,实现对小功率反馈光信号的功率放大,各级光纤放大器间均配有光隔离器,以防止信号激光的反向传输。 N 路光纤激光的输出准直器按照一定方式进行空间排布,实现多路激光的并联准直输出。分束镜 BS1 反射的小部分(1%~10%)激光经过傅里叶透镜 L1 耦合入单模反馈光纤中。从

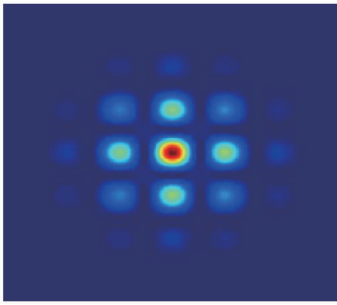


图 11 4 路二维光纤激光的远场光斑图样
Fig. 11 Interference pattern in the far field for 4-channel fiber laser array

单模反馈光纤中通过一光纤分束器分出 10% 的信号光,用以进行反馈光信号功率的监测。从分束镜 BS1 透射出的大部分能量作为相干耦合激光输出。通过分束镜 BS2 反射出的相干耦合激光用于进行远场光斑的监测。

首先建立了低功率 4 路二维光纤激光阵列的光反馈环形腔相位锁定实验系统,4 路光纤激光均为自行研制的单模保偏双包层光纤放大器,各光纤放大器的准直输出呈正方形排列,近场光斑直径为 5.5 mm,相邻光斑中心间距为 9 mm。采用上述装置,通过精密调节,实现了二维四路光纤放大器的被

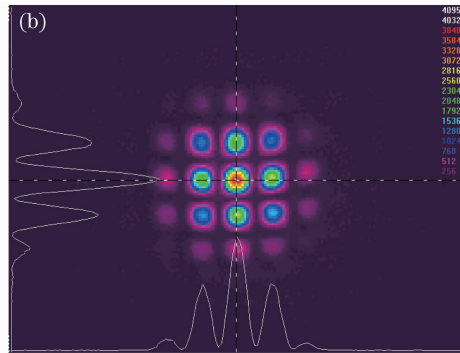
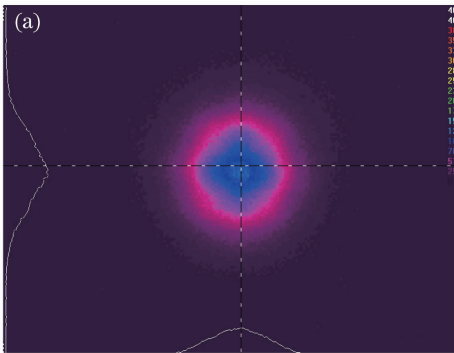


图 13 二维四路光纤放大器的干涉图样。(a)非相干;(b)相干

Fig. 13 Interference pattern of 4-channel fiber amplifier array in two-dimensional distribution. (a) Un-locked; (b) phase-locked

图 14 为相位锁定后某时刻的激光光谱,光谱范围较宽,约 10 nm(1072~1082 nm),且由多个波长的纵模组成。其中单个纵模的 3 dB 带宽约为 0.03 nm (9.1 GHz),由于采用的光谱仪最小分辨率为 0.02 nm,实际各路光纤放大器的光程差可能会大于 1 cm,根据(6)式可知,单个纵模带宽与各路相对光程 L_{RMS} 成反比,所以测量的纵模 3 dB 带宽应该小于 0.03 nm。由于外界振动和热效应等影响,各路光纤放大器到达单模反馈光纤的相位会发生变化,系统将选择其他波长的纵模来实现相位锁定,所以观

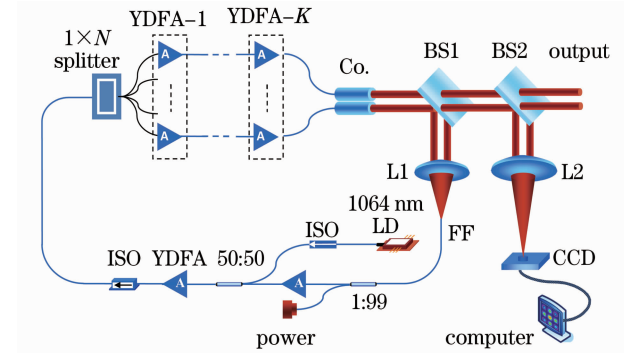


图 12 N 路光纤放大器环形腔相干组束实验装置图
Fig. 12 Experimental setup of coherent beam combination of N -channel fiber amplifier array in two-dimensional distribution

动相位锁定,获得了稳定的相干耦合激光输出,图 13 为实验获得的远场干涉图样,其中图 13(a)为反馈回路未建立下的光斑图样,仅为四个光斑的简单叠加,图 13(b)为反馈回路建立下的同相锁定远场干涉图样,其 Strehl 比为 0.77,中央主瓣的大小 $61 \mu\text{m}$,其占光斑总能量的 18.8%。光束阵列占空比是影响相干组束系统远场光斑分布的重要因素之一,通过缩小光束间距(即提高光束阵列的占空比),将会使得中央主瓣的能量更集中。

察到的激光光谱具有多纵模同时随机出现的特点。由于掺 Yb^{3+} 光纤的增益带宽较宽,且系统中没有使用带宽限制器件,因此输出光谱带宽达 10 nm,若在光学系统中加入带通滤波器,可适当控制相干耦合输出的激光光谱^[21,22]。

3.3 光反馈环形腔技术的功率可提升性实验研究

在上述低功率 4 路二维光纤激光阵列被动相干组束实验的基础上,采用光纤级联功率放大的方法,通过三级光纤放大,将每一路放大激光功率提升到 300W 左右,实现了 4 路二维光纤激光阵列被动相

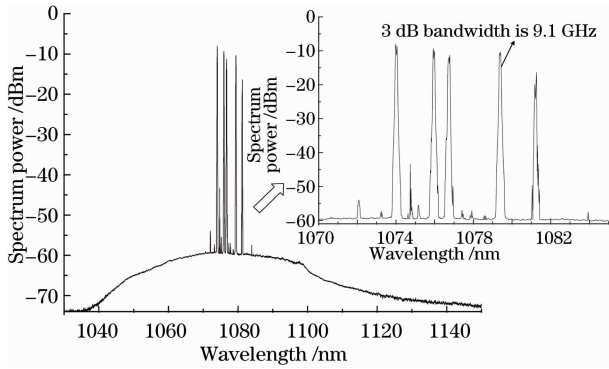


图 14 相位锁定后测量的组束输出光谱
Fig. 14 Output spectrum in phase locking

干组束的千瓦级相干耦合激光输出^[23], 实验装置如图 15 所示。

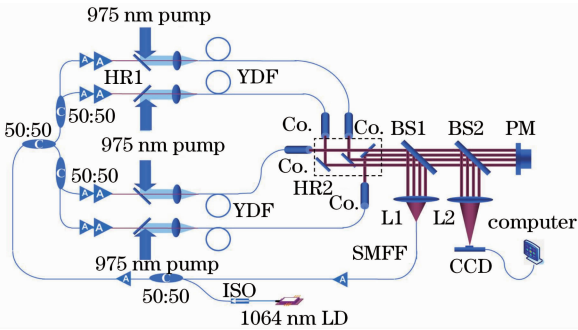


图 15 基于环形腔结构 4 路高功率光纤放大器阵列相干组束装置图

Fig. 15 Experimental setup of coherent beam combination of the 4-channel fiber amplifier array with a ring cavity

系统中, 每一路高功率光纤放大器均包含三级光纤放大, 通过前两级的全光纤保偏光纤放大模块, 将 10 mW 左右的信号光放大到 30 W。受限于实验条件, 功率放大级采用空间抽运结构, 双包层光纤长度 12 m, 内包层直径为 400 μm , 数值孔径(NA)为 0.46, 纤芯直径 30 μm , NA 为 0.06。功率达 300 W 的放大激光通过高功率光纤准直镜输出, 光束直径 6 mm。阵列光束的占空比是影响相干组束远场光斑的重要因素, 采用 3 个反射镜反射, 通过光束空间拼接的方式, 将 4 个光束按正方形排列, 相邻光束近场光斑的中心间距为 9 mm。

采用上述系统, 实现了 4 路二维高功率光纤激光的被动相干组束, 获得了较为理想的稳定的远场相干光斑图样。图 16 为在透镜 L2 焦平面获得的不同功率下的同相干涉图样。当相干输出功率为 100 W 时, 如图 16(a)所示, 其 Strehl 比为 0.71, 随着相干输出功率的增加, Strehl 比逐渐下降, 图 16(b), (c), (d) 为相干输出功率为 500, 800 和 1062 W 时的干涉图

样, 其 Strehl 比分别为 0.41, 0.34, 0.23。从上述结果可知, 随着相干耦合输出激光功率的增加, 组束后的光束质量也在下降。高功率下光纤准直器的热效应是引起光束质量下降的主要原因之一, 在本系统中高功率光纤放大输出头直接由掺杂光纤切 8° 斜角输出, 未熔接传能光纤, 有一定的发热量, 随着抽运功率的增加, 发热量也会增大, 使得准直光束指向性发生漂移, 从而导致耦合到反馈单模光纤中的光信号降低, 因此 Strehl 比有所降低。相干耦合输出的激光功率曲线如图 17 所示, 在总抽运功率为 2400 W 时, 最高相干耦合输出功率为 1062 W, 相对于抽运功率, 其光光转换效率约为 44%。

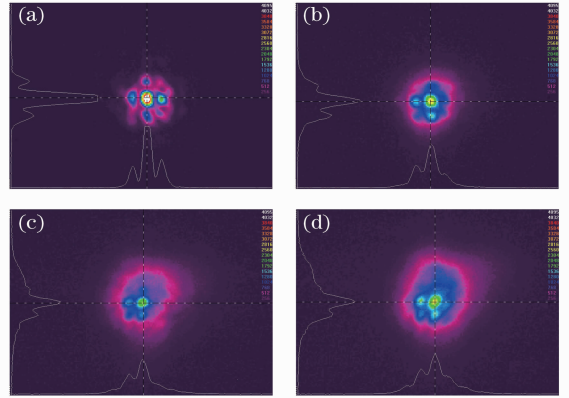


图 16 4 路光纤放大器阵列同相锁定时的远场干涉图样, 输出功率分别为(a) 100 W; (b) 500 W; (c) 800 W; (d) 1062 W

Fig. 16 Far-field interference patterns of the 4-channel fiber amplifier array. (a) 100 W; (b) 500 W; (c) 800 W; (d) 1062 W

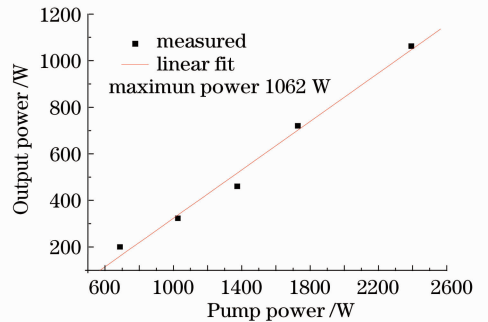


图 17 4 路光纤放大器阵列相干输出功率与抽运功率曲线
Fig. 17 Coherent output power versus launched pump power for the 4-channel fiber amplifier array

最近, 本课题组开展了 8 路高功率光纤激光阵列被动相干组束的实验研究, 采用 8 路百瓦级的全光纤放大器, 搭建了光反馈环形腔相干组束实验系统, 最高相干耦合输出功率达 1090 W。

在 8 路二维光纤激光阵列被动组束系统中, 为

为了提高单路光源的稳定性和可靠性,单路激光采用了4级光纤级联放大的结构。百瓦级的功率光纤放大器中,所用掺镱双包层光纤的内包层直径为400 μm ,NA为0.46,纤芯直径25 μm ,NA为0.06。在该放大光纤的输出端熔接一段1 m左右的相同参数的双包层传能光纤,以方便后续应用和实现高功率准直输出。准直透镜的焦距58 mm,输出激光的光斑直径约为7 mm。对于8路光纤激光阵列的相干组束,光束排列方式和光束间距均是影响相干激光光束质量的重要因素。理论分析表明,图18(a)所示的光束排列方式有利于提高相干组束激光的光束质量,因此,在本系统中,选择了这种光束排列方式。为了尽可能缩小各路光纤激光输出光

束的间距,获得较高的阵列光束占空比,设计和采用了7块按一定空间布局的45°矩形反射镜,通过反射实现了8路激光光束的紧凑拼接,拼接后的8路激光的近场光斑分布如图18(b)所示,阵列光束的外切圆直径为27 mm。

采用上述8路光纤激光相干组束系统,通过精确调整反馈光信号到单模反馈光纤的耦合,优化反馈光信号的光纤放大器和8链路光纤放大器的增益,获得了较为理想的远场相干光斑图样,如图19所示。在总抽运功率约为1600 W时,最高相干耦合输出功率为1090 W,相对于抽运功率,其光光转换效率约为68%,如图20所示。

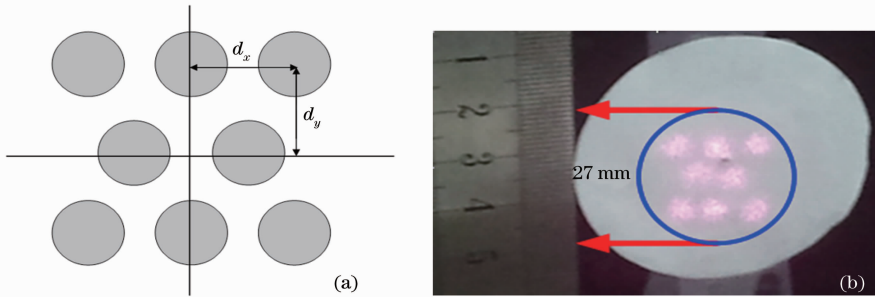


图 18 8路光纤激光阵列近场分布图。(a)理论;(b)实验

Fig. 18 Near-field distribution of the 8-channel fiber amplifier array. (a) Calculated; (b) experimental

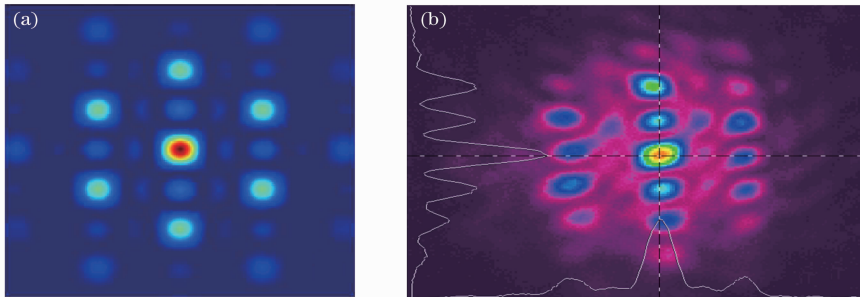


图 19 8路光纤激光阵列的远场干涉图。(a)理论;(b)实验

Fig. 19 Far-field distribution of the 8-channel fiber amplifier array. (a) Calculated; (b) experimental

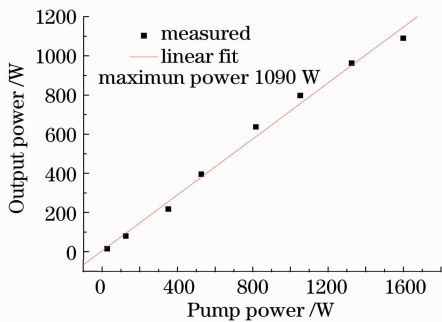


图 20 8路光纤放大器阵列的相干输出功率与抽运功率曲线

Fig. 20 Coherent output power versus launched pump power for the 8-channel fiber amplifier array

4 结 论

在对几种典型的光纤激光阵列被动相干组束技术进行分析的基础上,重点研究了基于空间滤波的自成像腔结构和光反馈环形腔结构光纤激光阵列的相干组束技术。对光反馈环形腔光纤激光阵列被动相干组束技术的输出光谱特性和路数可提升性进行了理论和实验研究,建立了4路和8路高功率光纤放大器的相干组束系统,并分别实现了1062和1090 W的相干耦合激光输出。光反馈环形腔被动相干组束技术具有较好的单路功率可提升特性和光束路数可扩展特性,是一种较有发展前途的高功率

光纤激光阵列相干组束技术。

参 考 文 献

- 1 Y. Jeong, J. K. Sahu, S. Baek *et al.*. Cladding-pumped ytterbium-doped large-core fiber laser with 610 W of output power [J]. *Opt. Commun.*, 2004, **234**(1-6): 315~319
- 2 Y. Jeong, J. K. Sahu, D. N. Payne *et al.*. Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1.36 kW continuous-wave output power [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(25): 6088~6092
- 3 G. Bonati, H. Voelckel, T. Gabler *et al.*. 1.53 kW from a single Yb-doped photonic crystal fiber laser [C]. Photonics West San Jose, Late Breaking Developments Session, 2005, 5709-2a
- 4 M. O'Connor, V. Gapontsev, V. Fomin *et al.*. Power scaling of SM fiber lasers toward 10 kW [C]. Conference on Lasers and Electro-Optics/International Quantum Electronics Conference, 2009, CThA3
- 5 T. M. Shay, V. Benham, J. T. Baker *et al.*. First experimental demonstration of self-synchronous phase locking of an optical array [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(11): 12022~12027
- 6 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
- 7 Pu Zhou, Yanxing Ma, Xiaolin Wang *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
- 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 Baishi Wang, Eric Mies, Monica Minden *et al.*. All-fiber passive coherent arrays combining four high power fiber lasers [C]. SSDLTR, 2009
- 10 P. K. Cheo, A. Liu, G. G. King. A high-brightness laser beam from a phase-locked multicore Yb-doped fiber laser array [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, **13**(5): 439~441
- 11 Y. Huo, P. K. Cheo. Thermomechanical properties of high-power and high-energy Yb-doped silica fiber lasers [J]. *IEEE Photo. Technol. Lett.*, 2004, **16**(3): 759~761
- 12 C. J. Corcoran, F. Durville. Stable operation of a phase-locked laser array using a self-Fourier cavity [C]. Annual Solid State and Diode Laser Technology Review, 2006
- 13 C. J. Corcoran, F. Durville. Passive phasing a coherent laser array [J]. *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electron.*, 2009, **15**(2): 294~300
- 14 C. J. Corcoran, F. Durville. Power scaling a coherent laser array [C]. Annual Solid State and Diode Laser Technology Review, 2008
- 15 B. He, Q. Lou, J. Zhou *et al.*. High power coherent beam combination from two fiber lasers [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(7): 2721~2726
- 16 Q. H. Lou, B. He, J. Zhou. 122 watts coherent beam combination from two Yb-doped double cladding fiber lasers [C]. Conference on Lasers and Electro-Optics, Pacific Rim, 2007. TuA4-6
- 17 Wei Wang, Bing He, Haibo Zhang *et al.*. 134-W phase locking of two-dimensional four-fiber lasers with improved self-imaging resonator [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2010, **8**(7): 680~682
- 18 Jérôme Lhermite, Agnès Desfarges-Berthelemot, 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
- 19 C. D. Nabors. Effects of phase errors on coherent emitter arrays [J]. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(12): 2284~2289
- 20 S. Shakir, B. Culver, B. Nelson *et al.*. Power scaling of passively phased fiber amplifier arrays [C]. *SPIE*, 2008, **7070**: 70700N
- 21 Xue Yuhao, Zhou Jun, He Bing *et al.*. Passive coherent beam combination of four Yb-dop fiber lasers in two-dimensional distribution [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(9): 2314~2317
- 薛宇豪, 周 军, 何 兵等. 四路二维掺镱光纤激光被动相干组束实验研究 [J]. *中国激光*, 2010, **37**(9): 2314~2317
- 22 Li Zhen, Zhou Jun, He Bing *et al.*. Passive phase locking of an array of three fiber lasers in one dimension by a ring cavity [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(11): 3209~3214
- 李 震, 周 军, 何 兵等. 环形腔被动锁相一维三路光纤激光相干组束研究 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(11): 3209~3214
- 23 Xue Yuhao, He Bing, Zhou Jun *et al.*. High power passive phase locking of four Yb-doped fiber amplifiers by an all-optical feedback loop [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2011, **28**(5): 054212