

基于能动分块反射镜的七路激光阵列倾斜校正与相干合成实验研究

郑 轶^{1,2} 王晓华^{1,2} 沈 锋¹ 李新阳¹

(¹中国科学院光电技术研究所自适应光学重点实验室, 四川 成都 610209)

²中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要 提出了一种基于能动分块反射镜(ASM)的激光阵列相位控制新方法,用以解决激光主振荡功率放大(MOPA)器相干合成技术中的空间光束倾斜校准与输出端相位调制两大关键问题。介绍了 7 单元能动分块反射镜实现空间光调制的原理,并采用该器件成功验证了 7 路光束合成的方案。实验采用六棱反射锥进行光束合成,并采用两套控制回路分别实现了倾斜与平移校正,获得了小于 $25 \mu\text{rad}$ 和 $\lambda/10$ 的校正精度。闭环后,获得了主瓣占总功率 31.73% 的高质量相干耦合激光输出。

关键词 激光光学;相干合成;能动分块反射镜;自适应光学;主振荡功率放大器

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201138.0802009

Tip-Tilt Correction and Coherent Combination of Seven-Channel Laser Array Based on Active Segmented Mirrors

Zheng Yi^{1,2} Wang Xiaohua^{1,2} Shen Feng¹ Li Xinyang¹

(¹The Key Laboratory on Adaptive Optics, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China)
(²Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract A novel method for laser array phasing is proposed. The active segmented mirror (ASM) is adopted to solve two key problems in the coherent beam combination of master oscillator power amplifiers (MOPA-CBC). The two key problems are the alignment of spatial beamlets and the phase modulation on system's output end. The modulation principle of a seven-element ASM is introduced. Based on this device, the experimental verification of a seven-channel laser array is successfully accomplished. The spatial beamlets combination is implemented by a hexagonal pyramid. Two individual control loops are adopted to implement the piston and tip-tilt corrections. The precisions achieve lower than $25 \mu\text{rad}$ and $\lambda/10$. In close loop, the combined output laser with high quality has been obtained. The power fraction in main lobe achieves is 31.73%.

Key words laser optics; coherent beam combination; active segmented mirror; adaptive optics; master oscillator power amplifier

OCIS codes 140.3290; 140.3298; 010.1080

1 引 言

激光相干合成是一种用于产生高功率激光的先进技术。由于受到热效应、工作介质特性和非线性效应等因素的制约,单条放大链路的输出功率具有理论上限值。而光束合成技术将多路激光功率进行

累加,因此是突破单路功率限制的有效途径。目前,光束合成主要可分为非相干合成与相干合成。在非相干合成中,多路激光简单合成为一路,合成光束质量难以得到保证;而相干合成采用相位控制技术将所有光束锁定为同相,因此在提高功率的同时,还能

收稿日期: 2011-02-28; 收到修改稿日期: 2011-03-15

作者简介: 郑 轶(1984—),男,博士研究生,主要从事自适应光学与激光相干合成技术等方面的研究。

E-mail: zhengyi_ioe@163.com

导师简介: 沈 锋(1969—),男,研究员,主要从事自适应光学技术方面的研究。E-mail: shenfeng@ioe.ac.cn

维持光束质量,获得高集中度的远场能量分布。目前,相干合成的主要技术方案包括基于主动相位控制的主振荡功率放大(MOPA)技术^[1~6]、基于被动锁相的外腔耦合技术^[7,8]和光纤自组织技术^[9]等。在所有的方案中,MOPA技术采用反馈控制系统实时探测和补偿各路激光的动态相位噪声,具有校正精度高、系统扩展性强的特点,是目前该领域内研究较热的一项技术。

自MOPA技术提出以来,其研究与应用主要集中在基于光纤激光的实验系统中。但是,受限于光纤波导的物理特性,大幅度提高单路光纤激光的输出功率十分困难(百瓦级),若要获得更大的功率(百千瓦级),需要对很多路光纤激光进行合成,是非常难以实现的,并且成本昂贵。下一代MOPA技术应着眼于更高功率的非光纤类激光器,如固体激光器、气体激光器和化学激光器等。目前,一项具有里程碑意义的成果来自于美国Northrop Grumman公司空间技术实验室,该机构在“联合高功率固体激光”(JHPSSL)计划支持之下,通过对7路15 kW级固体激光模块进行相干合成,最终获得了105 kW的高功率固体激光输出^[10~12]。然而,固体激光MOPA系统非常复杂,技术难点众多^[13]。在前端放大链路内存在功率放大模块设计、光束净化和光强整形等技术难点。在系统末端的相干合成技术中,还存在3个关键问题:第一,由于前端放大链路的出光口径较大,使得光束排布与合成问题变得复杂,而光束合成效果直接影响了系统的衍射极限质量;第二,由于系统光路十分复杂,仅靠人工机械调节方法很难完全消除光束间的倾斜误差,而此类误

差将显著降低光束间的空间相干性^[14],因此必须采用更为精确的手段解决光束校准问题;第三,目前主流的相位控制技术大多采用光纤型器件(如铌酸锂相位调制器)在系统前端实施作用(包括JHPSSL计划),因此仍然要求前端光源为光纤激光。而对于真正意义上的激光相干合成,不应受限于前端光源种类,只需输出光束之间具有相干性即可。此时要求相位调制器件能够工作在系统的输出端,对高功率光束直接进行相位控制。

本研究针对MOPA相干合成中的3个技术难点,提出了一种基于能动分块反射镜(ASM)的相干合成新方法,并搭建了一套7路激光阵列实验平台进行验证。该实验采用六棱反射锥解决了7路空间光束的合成问题,并针对分块反射镜的特点,设计了两套控制回路,分别实现了光束阵列的能动倾斜校准与末端相位调制,最终获得了高质量的相干合成光斑。

2 7 单元能动式分块反射镜

图1为分块反射镜的工作原理图。子镜的直径为16 mm,由3个压电陶瓷驱动器所支撑。每一驱动器在高压放大器的作用之下,可产生 $\pm 2 \mu\text{m}$ 的位移。因此,独立控制3个驱动器的电压分布,即可对子镜进行三自由度的偏转控制,从而对空间反射光束实施平移/倾斜调制。此外,由于子镜具有很高的功率损伤阈值(大于 $2 \text{ kW}/\text{cm}^2$),因此该器件可直接作用于相干激光阵列的高功率输出端,突破了传统光纤型相位调制器件必须依附于光纤激光系统,并且只能在系统前端工作的局限性。

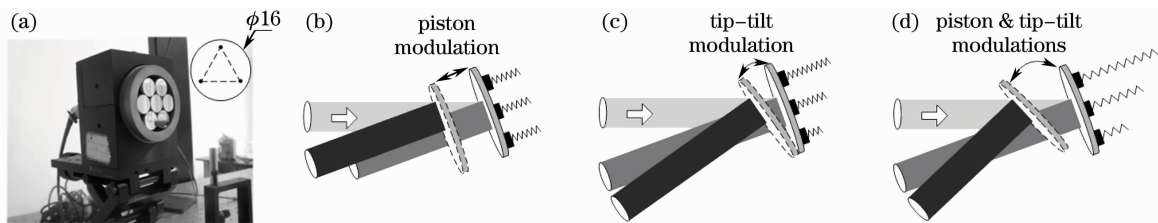


图1 能动分块反射镜工作原理图

Fig. 1 Principle of active segmented mirrors

分块反射镜产生相位调制的过程如图1(b)~(d)所示,当子镜的3个支撑单元被相同电压所驱动时,子镜将沿着垂直方向移动,由此实现平移相位调制。而对于倾斜调制,驱动电压值可采用本文提出的远场质心斜率法进行计算。

在远场质心斜率法中,首先采用透镜对光束进行聚焦,以获取夫琅禾费衍射远场光斑,然后通过焦

平面处的相机进行探测。光斑的质心位置反映了光束的倾斜量。因此,通过控制质心位置,则可实现倾斜控制。并且,对于光束阵列的排布校准,也可简化为质心的共焦控制:即将各路光束的远场光斑质心控制到焦平面上同一位置。对于倾斜控制的驱动电压求解,需要标定分块反射镜各驱动单元对质心斜率的影响函数。

如图 2(a)所示,分块反射镜的驱动单元的位置呈三角形分布。采用向量 $\mathbf{r}_i = (x_i, y_i)$ 表示各单元的斜率影响函数。该向量表示单位电压对单一支撑元进行驱动时,反射光束所产生的远场质心位移,其中 (x_i, y_i) 表示质心坐标,下标 $(i = 1 \sim 3)$ 表示驱动器顺序。例如: \mathbf{r}_1 表示单位电压作用于 E_1 , 而 E_2, E_3 保持固定时,远场质心的位移向量。经过多次电压扫描,即可标定出各 \mathbf{r}_i 的准确值。

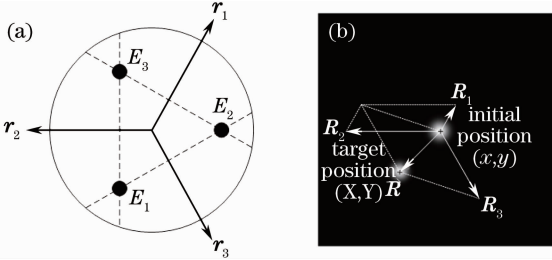


图 2 倾斜校正原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of tip-tilt corrections

倾斜控制过程如图 2(b)所示。各单元驱动电压 V_i 对质心位移的作用向量可表示为

$$\mathbf{R}_i = V_i \cdot \mathbf{r}_i, \quad (1)$$

因此总体倾斜量 \mathbf{R} 为

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_1 + \mathbf{R}_2 + \mathbf{R}_3, \quad (2)$$

联立(1)式和(2)式可得,质心初始位置 (x, y) 与目标位置 (X, Y) 的坐标满足关系式

$$\begin{cases} X = x + V_1 x_1 + V_2 x_2 + V_3 x_3 \\ Y = y + V_1 y_1 + V_2 y_2 + V_3 y_3 \end{cases}, \quad (3)$$

对于硬质子镜,质心斜率满足固有关系

$$\mathbf{r}_1 + \mathbf{r}_2 + \mathbf{r}_3 = 0, \quad (4)$$

由(3)和(4)式可解出驱动电压表达式

$$\begin{cases} V_1 = \frac{(X-x)y_2 - (Y-y)x_2}{x_1 y_2 - y_1 x_2} + V_3 \\ V_2 = \frac{(X-x)y_1 - (Y-y)x_1}{x_2 y_1 - y_2 x_1} + V_3 \end{cases}. \quad (5)$$

实际上,倾斜调制只需用到反射镜的 2 个自由度,因此可以让一个支撑单元保持固定,如令 $V_3 = 0$ 。(5)式给出了分块反射镜在量程允许范围内实现能动倾斜控制的驱动电压计算公式,由此可以方便地调整 7 路激光的相对倾斜量,使其达到精确平行,从而实现光束排布的能动校准。

3 实验系统

实验平台如图 3 所示。实验所采用的光纤器件均为偏振保持型,以保证光束的相干性。种子光源为一个半导体激光器,可输出波长为 1064 nm,功率

为 150 mW 的单模激光,输出光束经分束器 1 分为两路。其中一路再经由分束器 2 产生 7 路并行通道,另一路用于产生参考光束。在 7 路光纤通道中,每一路均配有大口徑光纤准直器,用于产生 7 路直径为 10 mm 的准直光束,模拟了实际工程中系统末端出射的多路空间激光。随后需要解决的是空间光束的孔径合成问题。理想情形是将所有激光合成为完全同轴的一路激光,从而获得最大的能量叠加效率;而实际工程中,由于放大后的输出光束功率巨大,无法使用透射式器件(如分光镜、光栅等)进行同轴合成,因此往往只能通过反射式器件,将多路激光合并为一具有间隙的激光阵列。通常采用“填充因子”来衡量孔径合成效果^[13]。它表示近场激光阵列的有效出光面积占整个孔径的比例。理论上,需要尽量提高填充因子,才能确保更多的能量能够被包围在远场光斑的主瓣之中。对于光纤系统,由于光纤尾端可以任意定位,并且准直器的体积也比较小巧,因此光纤激光阵列的孔径合成问题较易解决。而对于非光纤系统,由于单链路的设备体积往往较为庞大,同时输出光束功率较高,因此不易实现紧凑的光束合成。实验中,可采用文献[15]提出的六棱反射锥方法解决此难题。6 路激光通过 45°斜表面进行反射,第 7 路经由轴上通孔穿出,最终可形成正六边形排布的激光阵列,填充因子达到 0.63。六棱锥的几何尺寸可根据实际需求进行设计,并且能够直接承受高功率激光的照射,因此,很适合应用在非光纤激光的高能 MOPA 系统中。

7 单元能动分块反射镜安装于系统输出端,用于提供空间光束的倾斜与平移调制。后续光路中,首先采用分光镜 1 与透镜 1,配以高速 CMOS 相机,对各光束的远场质心进行实时跟踪,以实现倾斜探测与控制。相机前的显微物镜用于扩大远场尺寸,以提高探测精度和成像效果。而在分光镜 2 上,激光阵列与大口徑参考光束将发生共轴叠加,产生 7 个零级干涉条纹。此条纹的亮度直接反映了当前光束与参考光束之间的平移相位差。实验设计了一个特殊的光电探测器阵列,对这些零级条纹的强度进行实时探测,然后再通过比例控制算法,计算出分块反射镜的控制电压,从而实现平移相位差的校正。比例控制算法的电压反馈方程为

$$V_j^{k+1} = K_1 V_j^k + K_2 (K_3 V_j^{\max} - V_j^k), \quad (6)$$

式中 V_j^k 表示第 j 路光电探测器在第 k 次循环时的瞬时电压信号;而 V_j^{\max} 表示该路信号在反馈未开启情况下的最大值,此值代表了平移相差为零时的状态,

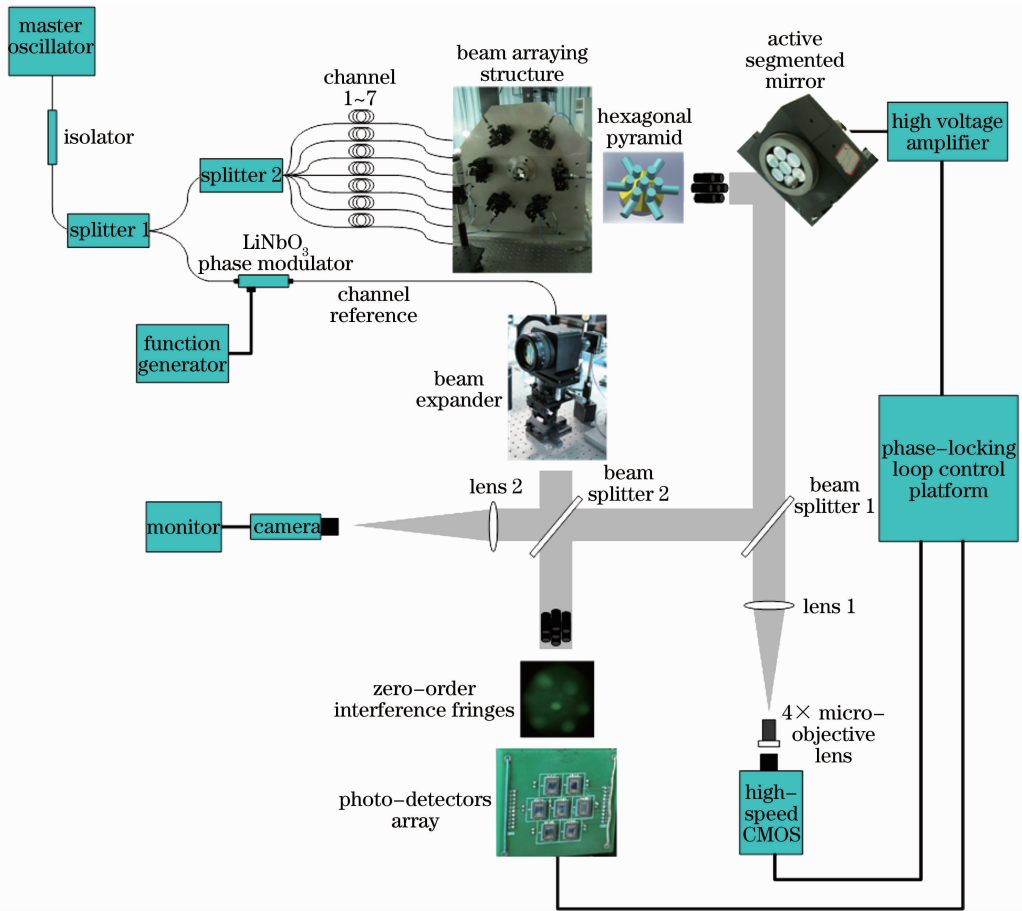


图 3 基于能动分块反射镜的 7 路激光相干合成方案验证实验示意图

Fig. 3 Schematic diagram of seven-channel coherent laser array system based on active segmented mirrors

也是算法的收敛目标; K_1 、 K_2 和 K_3 为控制系数, 根据实际情况进行设定与优化。当算法运行时, 通过分块反射镜的补偿, 所有零级条纹的亮度将保持在最亮值附近, 说明光束阵列与参考光之间实现了同相锁定。事实上, 此方案类似于 MOPA 中的外差锁相技术^[2,10], 它们均利用参考光和单元光的同轴干涉信号实现平移相位的探测与控制。在此类方案中, 由于各路光束的反馈控制回路完全并列, 因此可以方便地添加单元光束路数而不会影响整体闭环能力。

实验采用高性能计算机作为控制平台, 处理器为 Intel i5 四核 CPU, 内存为 4 G; 算法采用 VC 编写; 电压信号 AD/DA 分别由 NI 6221 与 6723 卡完成。

4 实验结果与分析

实验研究首先采用分块反射镜完成了空间光束的倾斜校正; 然后通过平移相位控制, 完成了 7 路激光相干合成方案的实验验证。

4.1 能动分块反射镜实现倾斜校正

实验采用一个电热源引入动态倾斜扰动, 被加

热的空气折射率产生变化, 使得光束的传播方向发生微小偏转, 即产生动态倾斜误差。实验中采用 CMOS 相机探测远场光斑的质心, 其位置反映了光束的实时倾斜量。图 4 为质心在相机靶面上的变动轨迹, * 代表其瞬时位置。可见开环时, 由于光束随机抖动, 远场质心也发生快速移动, 其轨迹充满了探测靶面的大部分区域; 而运用(5)式实施倾斜校正之后, 质心被控制在目标位置附近, 其变动范围也缩小为一个很小的范围。该实验结果说明分块反射镜良好地校正了动态倾斜误差。考虑到相机靶面尺寸和光束传播距离, 实验的倾斜校正精度在 $25 \mu\text{rad}$ 以内。在实际系统中, 倾斜误差通常为光路调解中所残留的静态校准误差。而此处考察的是比实际情况更为复杂的动态倾斜误差, 其目的在于能够显著地体现出分块反射镜的倾斜校正本领。若仅针对静态倾斜进行校正, 实际可以获得非常高的精度(小于 $1 \mu\text{rad}$), 此精度足以满足光束阵列的空间相干条件。因此分块反射镜能够非常好地解决 MOPA 输出端的光束排布校准问题。

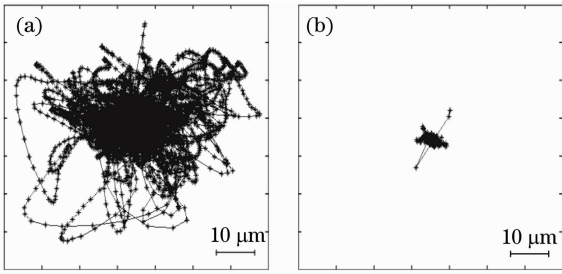


图 4 光束远场质心在相机靶面上的移动轨迹
(a) 开环; (b) 闭环

Fig. 4 Moving track of far-field beam centroid on CMOS. (a) Open loop; (b) close loop

4.2 7 路激光相干合成实验

在 MOPA 中, 由于受到功率放大器中的热效应和非线性效应的影响, 单路激光的平移相位会发生动态漂移。因此, 为了验证系统的实际闭环能力, 采用铌酸锂相位调制器和函数信号发生器, 在参考光路中引入振幅为 λ 、频率为 30 Hz 的动态相位噪声。由于平移相位具有相对性, 因此对于控制回路而言, 该相位噪声等效存在于 7 路激光之中。此设计能够充分模拟实际高功率系统中的相位环境。

图 5 显示了一路光电探测器 (PD) 信号在开闭环状态下的时间变化曲线。开环时, 由于相位噪声的影响, 使得零级干涉条纹的光强发生剧烈抖动, 因此电压信号也随之迅速起伏; 闭环后, 在比例算法的反馈控制之下, 探测器电压信号收敛于最大值附近, 表明零级干涉条纹保持在最亮状态。该曲线说明分块反射镜有效地补偿了平移相位误差, 实现了光束阵列的同相锁定。鉴于电压信号与平移相位间的关系, 系统锁相精度为

$$\delta\phi = \frac{V_{PV}^{\text{cloop}}}{V_{PV}^{\text{oploop}}} \cdot \frac{\lambda}{2}, \quad (7)$$

式中 V_{PV} 为电压曲线的峰-谷值。根据实验数据可得, 系统的闭环精度达到 $\lambda/10$ 以内。

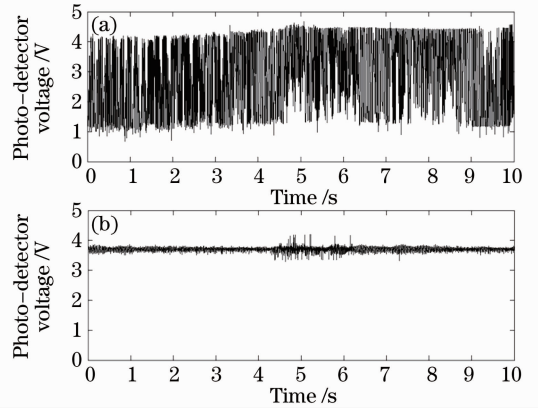


图 5 光电探测器阵列的一路输出电压曲线。
(a) 开环; (b) 闭环

Fig. 5 Output voltage signal of PD array.
(a) Open loop; (b) close loop

实际合成效果可以参考图 6 所示的 10 s 远场光斑长曝光图, 右部曲线为光斑中心处的 y 轴强度分布。开环时, 由于存在平移相位噪声, 远场光斑发生随机漂移, 因此长曝光图亮度暗, 对比度低。闭环后, 相位噪声得到了抑制, 远场出现了清晰的干涉光斑, 能量集中度获得了显著提高, 其强度分布方式已接近于理想情况, 如图 6(c) 所示。对于合成质量, 可采用主瓣功率比 P_{main} 进行评价, 其计算公式为 $P_{\text{main}} = P/P_{\text{total}}$, 其中 P 为主瓣桶中能量, P_{total} 为整个远场光斑的总能量。对于填充因子为 0.63 的相干阵列, 在衍射极限情况下, P_{main} 将达到最大值为 34.33%, 而实验结果为 31.73%, 证明了合成光斑质量已接近于理想情况。

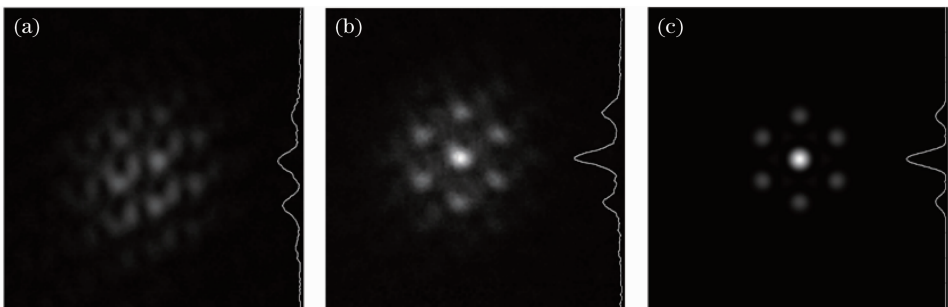


图 6 10 s 远场光斑长曝光图。(a) 开环; (b) 闭环; (c) 理想衍射极限

Fig. 6 10 s long-exposure pattern of far-field. (a) Open loop; (b) close loop; (c) theoretical diffraction limit

5 结 论

提出了一种采用能动分块反射镜实现激光相干

合成的新方法, 旨在解决下一代 MOPA 系统中光束排布校准与相位调制的两大关键技术。分块反射镜

不仅能精确控制各路光束的倾斜,同时还能直接应用于高功率激光阵列的输出端实施相位调制。实验中,设计了7单元分块反射镜,并搭建了一套7路激光阵列实验平台,成功实现了空间光束阵列的倾斜校正与相干合成方案验证,并最终获得了稳定的远场光斑。实验所采用的关键器件,如六棱反射锥、分块反射镜和光电探测器阵列等,在几何形状与尺寸上均可灵活设计,以满足实际系统要求。

参 考 文 献

- 1 S. J. Augst, T. Y. Fan, A. Sanchez. Coherent beam combining and phase noise measurements of ytterbium fiber amplifiers[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(5): 474~476
- 2 R. Xiao, J. Hou, M. Liu *et al.*. Coherent combining technology of master oscillator power amplifier fiber arrays [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(3): 2015~2022
- 3 P. Zhou, Z. J. Liu, X. L. Wang *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
- 4 P. Zhou, Y. X. Ma, X. L. Wang *et al.*. Coherent beam combination of a hexagonal distributed high power fiber amplifier array[J]. *Appl. Opt.*, 2009, **48**(33): 6537~6540
- 5 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相位探测及其相干合成实验研究[J]. *物理学报*, 2009, **58**(12): 8297~8301
- 6 P. Yang, R. F. Yang, F. Shen *et al.*. Coherent combination of two ytterbium fiber amplifier based on an active segmented mirror [J]. *Opt. Commun.*, 2009, **282**(7): 1349~1353
- 7 Bing He, Qihong Lou, Jun Zhou *et al.*. 113-W in-phase mode output from two ytterbium-doped large-core double-cladding fiber lasers[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(7): 412~414
- 8 He Bing, Lou Qihong, Zhou Jun *et al.*. Phase-locking and high coherent power output of two fiber lasers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(9): 1153~1158
何兵, 楼祺洪, 周军等. 两个光纤激光器的相位锁定及高相干功率输出[J]. *中国激光*, 2006, **33**(9): 1153~1158
- 9 M. L. Minden, H. W. Bruesselbach, J. L. Rogers *et al.*. Self-organized coherence in fiber laser arrays [C]. *SPIE*, 2004, **5335**: 89~97
- 10 G. D. Goodno, H. Komine, S. J. McNaught *et al.*. Coherent combination of high-power, zigzag slab lasers[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(9): 1247~1249
- 11 J. Marmo, H. Injeyan, H. Komine *et al.*. Joint high power solid state laser program advancements at Northrop Grumman [C]. *SPIE*, 2009, **7195**: 719507
- 12 S. J. McNaught, H. Komine, S. B. Weiss *et al.*. 100 kW coherently combined slab MOPAs[C]. Conference on Quantum Electronics and Laser Science Baltimore, US, 2009. 1~2
- 13 Liu Zejin, Zhou Pu, Xu Xiaojun. 100 kW level LD pumped coherent laser array system [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(1): 011402
刘泽金, 周朴, 许晓军. 对百千瓦级全固态激光相干阵列系统的分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, **47**(1): 011402
- 14 Pu Zhou, Zilun Chen, Xiaolin Wang *et al.*. Tolerance on tilt error for coherent combining of fiber lasers [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(1): 39~42
- 15 Fan Xinyan, Liu Jingjiao, Liu Jinsheng *et al.*. Theoretical and experimental study of multi-element coherent fiber array[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, **59**(4): 2462~2470
范馨燕, 刘京郊, 刘金生等. 多阵元光纤相干阵列的理论及实验研究[J]. *物理学报*, 2010, **59**(4): 2462~2470