

光纤激光相干合成中倾斜波前控制的研究进展

王 雄 王小林 周 朴 许晓军 舒柏宏

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 相干合成是获得高功率、高光束质量激光输出的有效方法之一。在光纤激光相干合成中,各路激光的活塞相差、倾斜波前和光束拼接方式直接影响合成光束的质量。各个单元光束波前的倾斜误差对合成的效果有重要影响,因而倾斜波前控制具有重要的意义。详细介绍了液晶空间光调制器、高速倾斜镜和光纤自适应准直器等常用的倾斜控制器件,对比目前用于倾斜波前控制的不同方案,分析了各方案的优缺点。并对光纤激光相干合成中倾斜波前主动控制的发展进行了总结和展望。

关键词 光纤激光;相干合成;主动控制;倾斜波前;光束质量

中图分类号 TN248 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.s101001

Recent Research and Development of Tilt-Tip Wavefront Control in Coherent Beam Combination of Fiber Lasers

Wang Xiong Wang Xiaolin Zhou Pu Xu Xiaojun Shu Bohong

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

Abstract Coherent beam combination is an effective way to achieve high-power laser while maintain good beam quality. In coherent beam combination, the piston phase differences, tilt-tip wavefronts and filling factor of each beamlets have direct effects on the combined beam quality. The tilt-tip error of each beamlet have significant influence on coherent combination, so the tilt-tip control is of great significance. The main tilt-tip control instruments, including liquid crystal spatial light modulator, fast steering mirror and adaptive fiber collimator, are introduced detailedly. Advantages and disadvantages of different tilt-tip wavefront active control methods are analyzed. The development and perspective of tilt-tip wavefront control in coherent beam combination are reviewed.

Key words fiber laser; coherent beam combination; active control; tilt-tip wavefront; beam quality

OCIS codes 140.3290; 140.3298; 140.3510

1 引 言

光纤激光器凭借其转换效率高、光束质量好、热管理方便和结构紧凑等优点,在工业加工、材料处理和生物医疗等领域具有广阔的应用情景,成为大功率激光器的重要发展方向^[1~3]。受到热损伤、非线性效应和热透镜效应的限制,单根光纤激光器的输出功率有限^[4]。阵列光束相干合成是提高激光光束功率的有效技术途径^[5,6],在提高输出功率的同时能够保证良好的光束质量,受到激光技术领域研究人员的广泛关注。光纤激光相干合成主要涉及三个

方面^[7]:光束拼接、倾斜控制和活塞相位控制。目前多路光纤激光器相干合成的锁相控制的研究已经趋于成熟^[8~16],而倾斜控制和光束拼接研究的报道则不多见。

无论是在平行发射还是在共形发射^[17,18]的激光阵列中,各个单元光束的倾斜波前控制都是保证各个光束在目标处有效重合的必要条件。如果不进行有效的倾斜控制,就无法使各路光束在目标处重合,就更谈不上相干合成。实际的相干合成系统中,由于装配误差、指向误差、机械振动和大气扰动等因

收稿日期: 2012-02-15; 收到修改稿日期: 2012-03-27

作者简介: 王 雄(1987—),男,硕士研究生,主要从事高能激光方面的研究。E-mail: wangxiong23@gmail.com

导师简介: 舒柏宏(1960—),男,教授,主要从事高能激光技术方面的研究。E-mail: shu_bh@tom.com(通信联系人)

素的影响,各个单元光束的光轴会发生偏移,导致目标处光斑无法有效重合,从而严重影响相干合成的效果^[19]。为了进一步获得更高质量的相干合成光束,必须把倾斜控制、光束拼接与锁相控制有效结合起来^[7,20,21]。

本文首先介绍液晶空间光调制器、高速倾斜镜和光纤自适应准直器等常用的倾斜波前控制器件,然后对目前用于倾斜控制的不同方案及其优缺点进行了对比分析,最后对倾斜波前主动控制的发展进行了总结和展望。

2 光纤激光相干合成中倾斜波前控制技术进展

为了实时校正各个激光单元的倾斜波前误差,需要利用一定的器件进行倾斜控制。目前主要的倾斜控制器件有液晶空间光调制器、高速倾斜镜和光纤自适应准直器等。下面以倾斜控制器件为研究对象,介绍国内外光纤激光相干合成中的倾斜波前控制技术现状。

2.1 液晶空间光调制器

随着微光学器件基础研究的不断深入和制造工艺的日渐成熟,以液晶相控阵为代表的非机械式光束偏转技术成为光束控制领域的研究热点。由于液晶分子的棒状结构及排列特性,液晶材料显示出很多的光电特性,利用液晶的电致双折射效应,可以对光束进行相位调制。当入射光束垂直入射到液晶空间光调制器表面时,通过控制液晶空间光调制器各个相移器的电压,实现对入射光束波前的相位调制。在入射波前上施加一个倾斜相差,就可以实现光束偏转方向的控制^[22~24]。

相对于传统机械式控制装置,液晶空间光调制器结构简单,体积小,成本低,功耗小,且控制速度较高,因而具有广泛的应用前景。基于液晶光调制器的上述优点,研究人员提出了液晶相控阵、液晶微透镜阵列和液晶偏转光栅等新型光束偏转技术,对光束偏转的控制方式、效率和范围进行了广泛的研究^[22,25~27]。

2002年,M. Johansson等^[28]利用液晶空间光调制器对单模光纤的输出光进行偏转控制。2004年,J. Stockley等^[29]利用液晶空间光调制器实现了多点光束光轴的偏转控制,其优点之一是可以同时向不同方位发射信号。他们利用一个 $512\text{ pixel} \times 512\text{ pixel}$ 的空间光调制器作为波前控制器,可以同

时对多个光束的倾斜波前进行控制。

2003年,X. Wang等^[29]利用硅片上液晶阵列(LCOS)空间光调制器同时实现对光束的波前畸变补偿和光束偏转的控制。该液晶空间光调制器为 $1024\text{ pixel} \times 768\text{ pixel}$,进行光束倾斜波前控制时,在 x - y 平面可以实现 $0 \sim 4\text{ mrad}$ 连续扫描,精确度可达 $10\text{ }\mu\text{rad}$,偏转后的光束质量也保持得很好。一维偏转至最大值 4 mrad 时其效率可以达到 80% 。实验结果说明了该器件可以高效地实现畸变波前的高分辨率校正和倾斜控制。

2005年,M. Vorontsov等^[6]提出了自适应光学锁相阵列(APPLE)系统的概念,利用液晶空间光调制器实现了单元光束的倾斜波前控制。该系统使用小口径发射阵列代替传统的大口径发射镜,通过控制各个子孔径的相位实现对整体波前畸变的补偿。活塞相位的补偿控制通过相位调制器使用随机并行梯度下降(SPGD)算法来实现,倾斜波前的校正则是通过发射口径端口的透射式液晶空间相控阵实现,实验系统如图1所示。种子光经过预放后分束,利用相位调制器进行活塞相位补偿,然后经再次功率放大后通过各个发射子孔径发射。输出端由光纤准直器进行横向位置的微调,光束通过卡塞格林系统发射,发射最末端通过透射式的液晶空间光调制器对倾斜波前进行补偿,达到倾斜波前控制的目的。

2009年,美国D. Engström等^[24]利用铁电液晶光学相控阵(FLC OPA)进行光束的倾斜波前的控制。实验系统如图2所示,其中QWP是 $\lambda/4$ 波片,M为反射镜,FLC array为铁电液晶相控阵。该液晶空间光调制器可以实现对光轴 82° 范围内的偏转控制,对 $0 \sim 2\pi$ 范围的活塞相位可以进行 91% 的补偿,反应速度约为 $200\text{ }\mu\text{s}$ 。

2010年,W. Miniscalco等^[30]利用液晶空间光调制器实现了光时分-空分多路复用器(STDMA)中光束偏转的控制。该器件通过各个子光束之间的相干合成显著地提高了信号传输的接收增益。液晶空间光调制器可以实现快速、精确、灵活的光束预对准。该复用器可以有效地提高空间光通信中的多路复用效果,对相干合成中倾斜波前的控制也提供了重要的参考。

液晶空间光调制器在光束偏转控制方面具有其特有的优势,但是其承受功率较低、偏转范围较小、效率不高等缺点使其主要应用在低功率、小偏转角的场合。

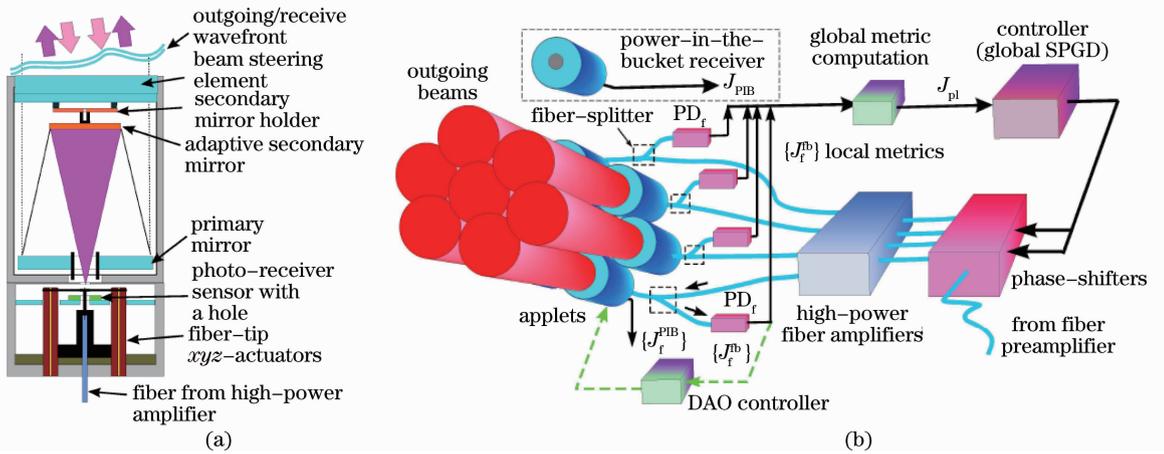


图 1 (a) 发射子孔径结构; (b) APPLE 系统结构

Fig. 1 (a) Optical schematic of sub-aperture; (b) configuration of APPLE

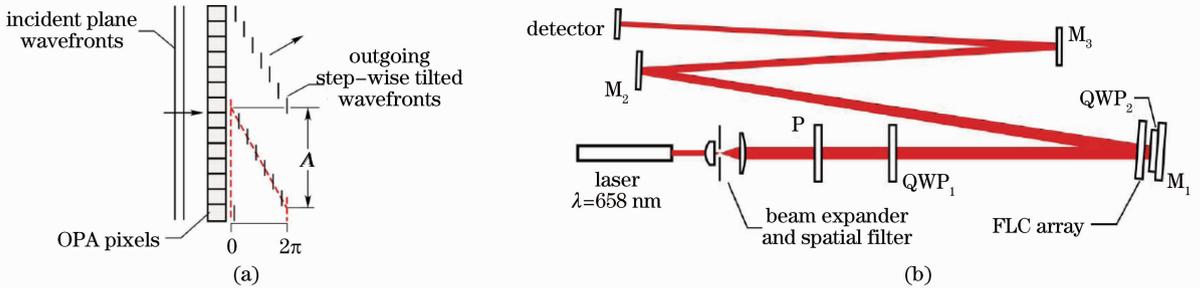


图 2 (a) 入射波前倾斜阶梯相位的施加; (b) 系统光路结构

Fig. 2 (a) Addition of phase steps to tilt incident plane wave-front; (b) optical setup

2.2 高速倾斜镜

高速倾斜镜在分辨率达纳米量级的压电驱动器上安装一块小面积的反射镜,通过高速率、高精度地改变施加在压电器件上的电压大小,控制负载的反射镜高速摆动,使其反射光束波前产生快速、小角度的倾斜变化,达到波前倾斜控制的目的^[31-34]。与传统的电机驱动器件相比,高速倾斜镜具有运动惯性小、响应速度快和角分辨率高等显著优点,在自适应光学、精密跟瞄和光束控制等领域有广泛的应用。

1996年,B. Patel^[31]提出了一种弯曲型高速反射扫镜的设计,可以对 x 和 y 方向分别进行倾斜控制,其谐振频率可以达到 2 kHz。1999年,李新阳等^[35-36]对自适应光学中高速倾斜镜的稳定控制进行了研究,分析了自适应光学系统中高速倾斜镜的机械谐振现象及其对控制稳定性和控制带宽的影响。

2000年,J. T. Nee 等^[32]设计了可伸展的光学平面(TOS)微反射镜。该反射镜谐振频率高、直流偏转角度大,工作频率可以达到 68.2 kHz,动态形变小于 70 nm。在低频工作时镜子的动态形变可低至 20 nm,在其表面镀 50 nm 厚的金对镜子动态形变的影响可以忽略。2001年,A. Tuantranont^[34]分

析了微机电系统(MEMS)透镜阵列用于光束倾斜波前控制的性质,实现了 70 mrad 的光轴偏转。2004 和 2005 年,N. O. P. Arancibia 等^[33, 37]对二轴 MEMS 的光束控制进行了研究,利用逆向自适应控制(AIC)方法实现了倾斜波前的实时控制,并分析了 MEMS 对激光光轴抖动的抑制效果。

2006年,C. C. Wilcox 等^[38]将微机电阵列变形镜组装在一个双轴倾斜平台上,从而同时实现单元光束的活塞相位和倾斜波前畸变的补偿。其中微机电阵列用来补偿活塞相位,倾斜镜底座可以实现 ± 2 mrad 范围内的光束偏转控制。该装置简化了相干合成的光路结构,降低了系统的复杂性。实验中并没有发现在低频工作条件下的变形镜高阶形变,初步证实了该装置在倾斜波前控制中的实际应用前景。实验装置如图 3 所示。

2008年,刘敏等^[39, 40]对快速倾斜镜的建模进行了研究,指出用实验建模方法建立快速倾斜镜四阶模型,采用 routh 降阶方法将快速倾斜镜四阶模型降为二阶模型,设计了基于李亚普诺夫稳定理论模型参考自适应控制器和模糊 PID 自适应控制器,并利用仿真结果证明该控制器能够减小系统稳态误

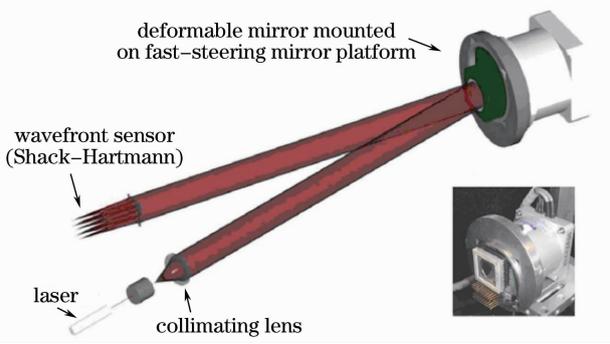


图 3 系统结构示意图

Fig. 3 Schematic of the system's configuration

差、提高系统响应速度,为倾斜镜的快速控制提供了有意义的思路。

2009年,N'estor等^[41]利用微机电反射镜阵列对光束的倾斜波前的控制进行了研究,基于频率加权最小化变量(FWMV)抑制了高速倾斜镜控制中高频控制项,使倾斜镜的工作频率低于安全值,保护倾斜镜不受损坏;该法还去除了输出信号中的尖刺误差项。另外,由于采样率较高和进行了高阶自适应

滤波,该方案控制下的MEMS倾斜镜阵列对倾斜波前的控制效果有了显著的提高。

实验中,光束从光源1发射,利用反射镜阵列2进行倾斜波前校正,利用反射镜阵列3引入倾斜波前误差,光学位置探测器4用来获得光斑位置数据,评价校正效果。反射镜阵列是德州仪器公司(TI)产品,转动的角度范围是 $\pm 5^\circ$,系统工作频率是5 kHz,整个闭环过程由基于计算机的控制程序完成。实验结构如图4所示,其中FSM-C为微机电反射镜阵列(倾斜校正),FSM-D为微机电反射镜阵列(误差扰动)。

2011年,谭逢富等^[42]利用压电陶瓷倾斜镜对激光在大气中传输的倾斜波前进行了校正。实验中,他们通过位移传感器(PSD)进行光束位置的探测,利用高速倾斜镜对倾斜波前误差进行实时补偿。系统具有很好的稳健性,跟踪精度可以到达 $0.6 \mu\text{rad}$,可以满足大气传输中对倾斜波前控制的要求。系统结构如图5所示。

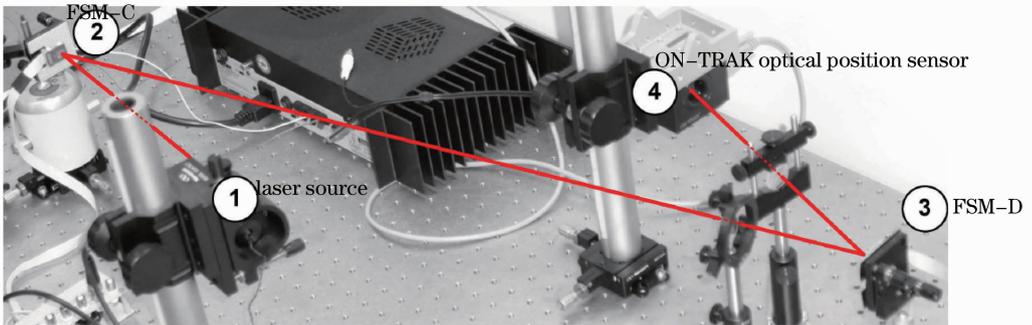


图 4 系统结构示意图

Fig. 4 Experimental setup

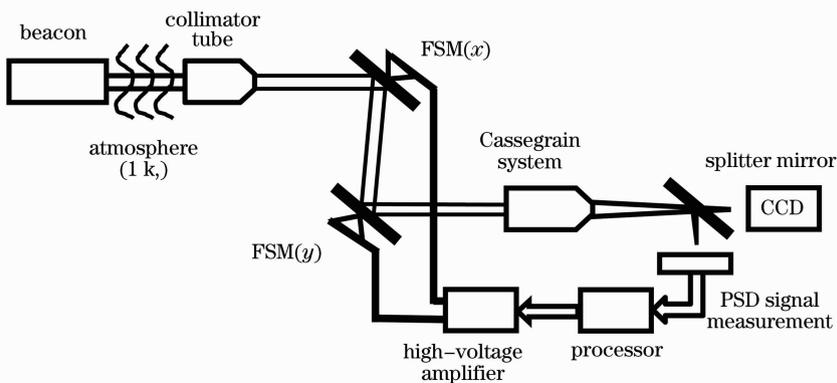


图 5 系统结构示意图

Fig. 5 Schematic of system's configuration

目前,直接使用高速倾斜镜用于光纤激光相干合成阵列的倾斜波前控制尚未见公开报道,但是其相对传统的机械装置良好的控制性能和高功率的可扩展性值得进行深入的实验研究。

2.3 光纤自适应准直器

光纤自适应准直器^[21,43,44]是在光纤激光发射端周围安装横向微型压电陶瓷片的集成器件。该器件通过控制施加在压电陶瓷上的电压对光纤的横向位移进行调整,改变光纤发射端在发射透镜焦平面的位置,从而实现对发射光束波前高速精确的控制倾斜。相对于高速倾斜镜,光纤自适应准直器具有精确控制、惯性小、谐振频率高和结构紧凑等优点。

2005年,L. A. Beresnev等^[43]设计了一种光纤自适应准直器(AFOC),该准直器在光纤发射端安装横向的压电陶瓷片,通过控制压电陶瓷对光纤的

发射端进行横向推拉,从而实现对倾斜波前的控制。这种器件可以直接控制发射光束透射的波前倾斜而不需要反射镜,光路更容易调节。

2007年,L. Liu等^[21]基于3个光纤准直器的共型自适应光学系统,研究了基于SPGD算法的相干合成中倾斜波前和活塞相位的控制方案,同时实现了全保偏光纤结构相干合成锁相控制和倾斜波前误差补偿。实验原理如图6所示,系统利用光纤自适应准直器对倾斜波前相位进行自适应补偿,通过偏振保持相位调制器进行锁相控制。评价函数由光电探测器采集远场光斑的桶中功率获得,同时用于锁相和倾斜控制。实验中的倾斜波前误差是由光路中一个高速倾斜镜引入的,对整束光的波前进行倾斜误差扰动。

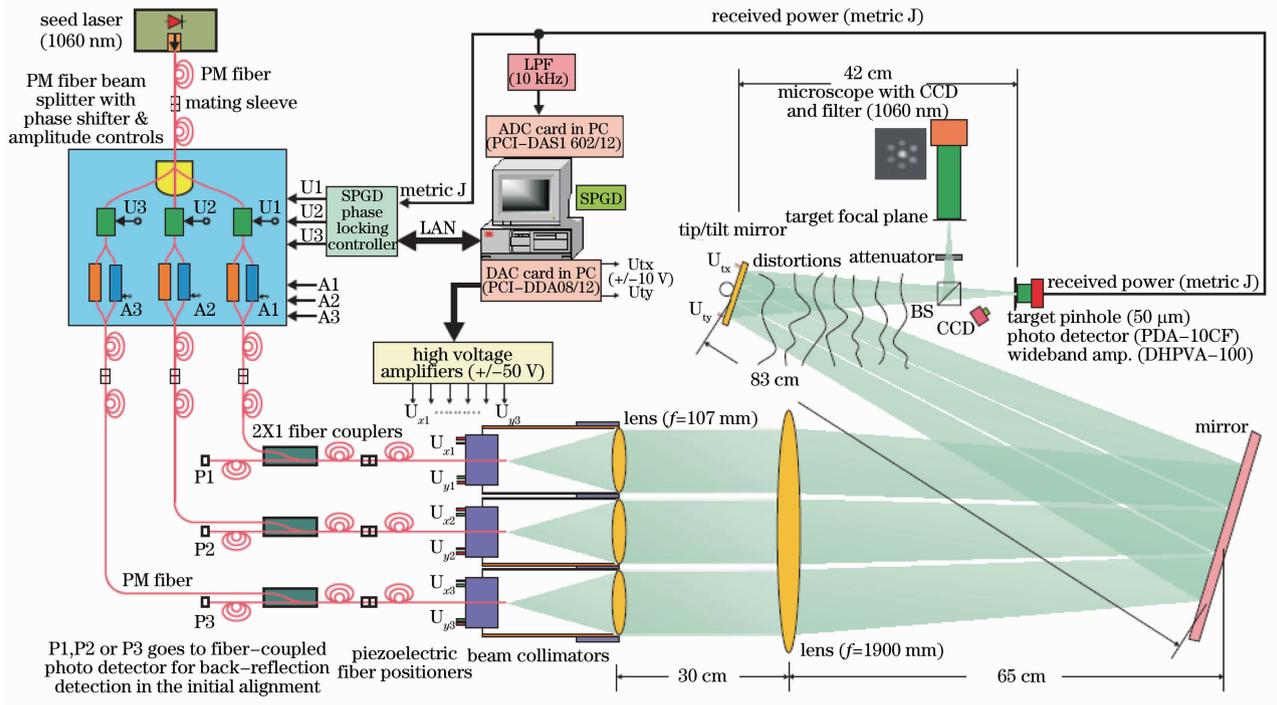


图6 系统结构示意图

Fig. 6 Schematic of the system's configuration

系统的倾斜控制和锁相控制同时进行,倾斜控制时加入一个低通滤波器以消除锁相控制的影响。实验表明在有倾斜波前误差的情况下,系统性能评价函数能够得到显著的提高。实验结果如图7所示。

2008年,L. A. Beresneva等^[44]建立了7单元共形发射的光纤自适应准直器系统,并利用该系统进行偏振光束倾斜波前误差的自适应校正。该系统中使用的光纤自适应准直器如图8所示,由双压电陶

瓷片和光纤盒准直器构成,有6个自由度。实验系统结构和L. Liu等^[21]的相似,锁相和倾斜控制均使用同一个评价函数(桶中功率)和控制算法(SP GD)。

在实验中,Beresneva对比了不同情况下系统远场的光斑,如图9所示,在锁相控制的前提下,倾斜控制的引入进一步提高了远场光斑质量。可见倾斜波前的控制获得了明显的效果,对相干合成中光束质量的提高有着不可或缺的作用。

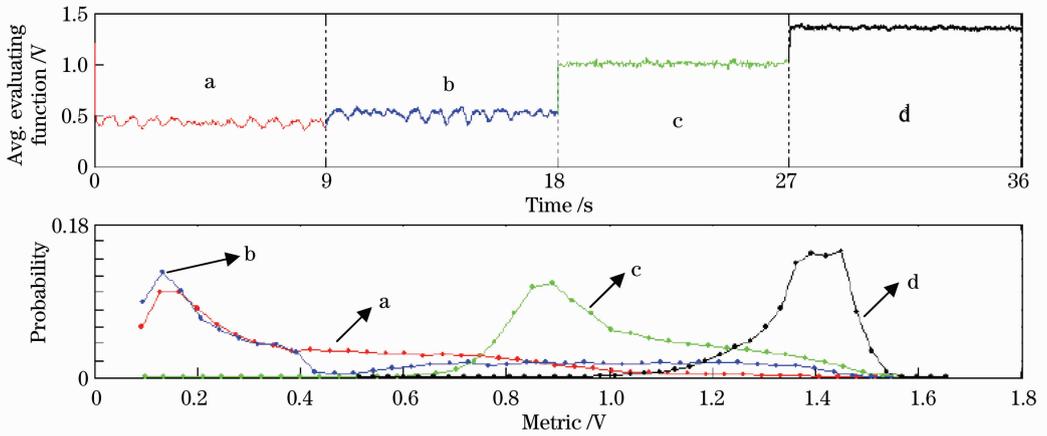


图 7 锁相和倾斜控制结果。上:平均评价函数;下:评价函数的概率分布;曲线 a:无锁相和倾斜控制;曲线 b:仅锁相控制;曲线 c:仅倾斜控制;曲线 d:锁相和倾斜同时控制

Fig. 7 Results of phase-locking and tilt-tip control. Top: averaged evaluating function; bottom: probability distributions of evaluating function. curve a: phase-locking and tilt-tip control are both off; curve b: phase locking is on, tilt-tip control is off; curve c: phase locking is off, tilt-tip control is on; curve d: phase locking and tilt-tip control are both on

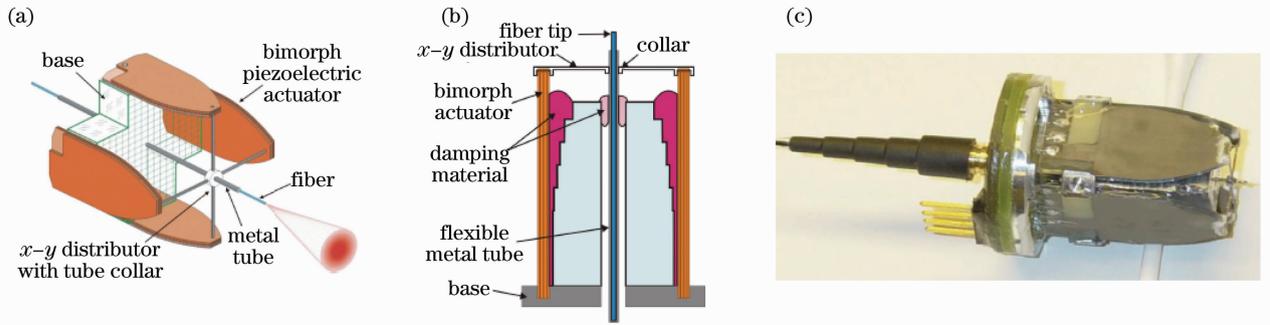


图 8 (a)双压电陶瓷光纤准直器结构;(b)准直器横截面;(c)准直器实物图

Fig. 8 (a) Schematics of piezoelectric bimorph fiber collimator; (b) cross section through collimator; (c) photograph of collimator

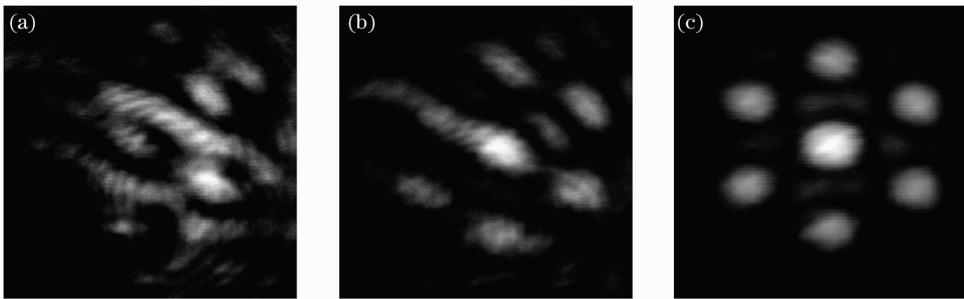


图 9 共形系统远场光斑图。(a)无锁相和倾斜控制;(b)仅锁相控制;(c)锁相和倾斜同时控制

Fig. 9 Far-field images of the conformal aperture system. (a) Fiber collimators are not actively controlled, phase locking is off; (b) phase locking is turned on but fiber collimators are still off; (c) phase locking and active fiber position control are both on

2009 年, M. A. Vorontsov 等^[7]搭建了紧凑拼接的 7 单元相干合成光纤自适应准直器阵列系统,同时实现了活塞相位和倾斜波前的控制,并对输出光强起伏进行了优化控制。其所用的光纤自适应准直器与 Beresneva 等实验中所用的一致,锁相控制

通过多通道光纤内置相位调制器实现。各个光纤的准直器可以对倾斜波前相位进行自适应补偿。系统结构和实验结果如图 10 所示,倾斜控制使桶中功率从锁相控制下的 0.4 提高到了 0.6 以上,取得了明显的控制效果。

2011 年,国内成都光电技术研究所耿超等^[20]基于类似于 Vorontsov 的自适应光纤光学准直器,搭建了三单元品字形光纤激光器阵列,用 SPGD 优化

算法同时实现了活塞相位和倾斜波前相位补偿,如图 11 所示。

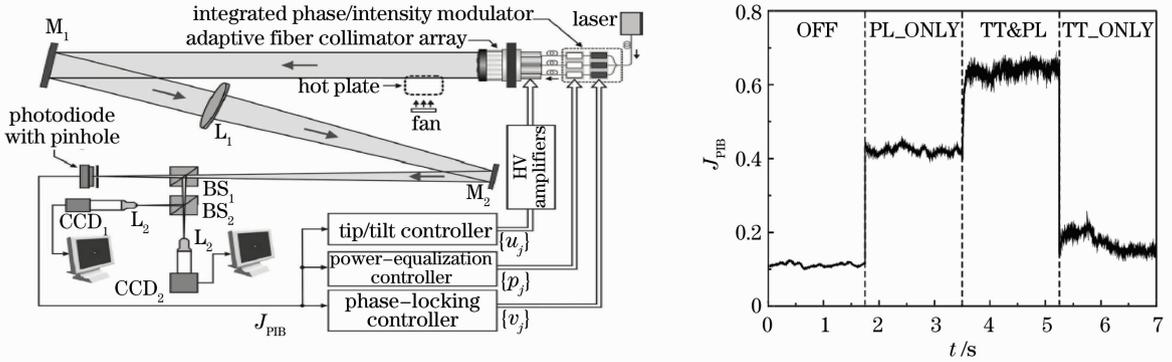


图 10 系统结构示意图和实验结果。OFF:无锁相和倾斜控制;PL_ONLY:仅锁相控制;TT&PL:锁相和倾斜同时控制;TT_ONLY:仅倾斜控制

Fig.10 Schematic of the system and results of experiment. OFF: phase locking and tilt-tip control are both off; PL_ONLY: only phase locking is on; TT & PL: phase locking and tilt-tip control are both on; TT_ONLY: only tilt-tip control is on

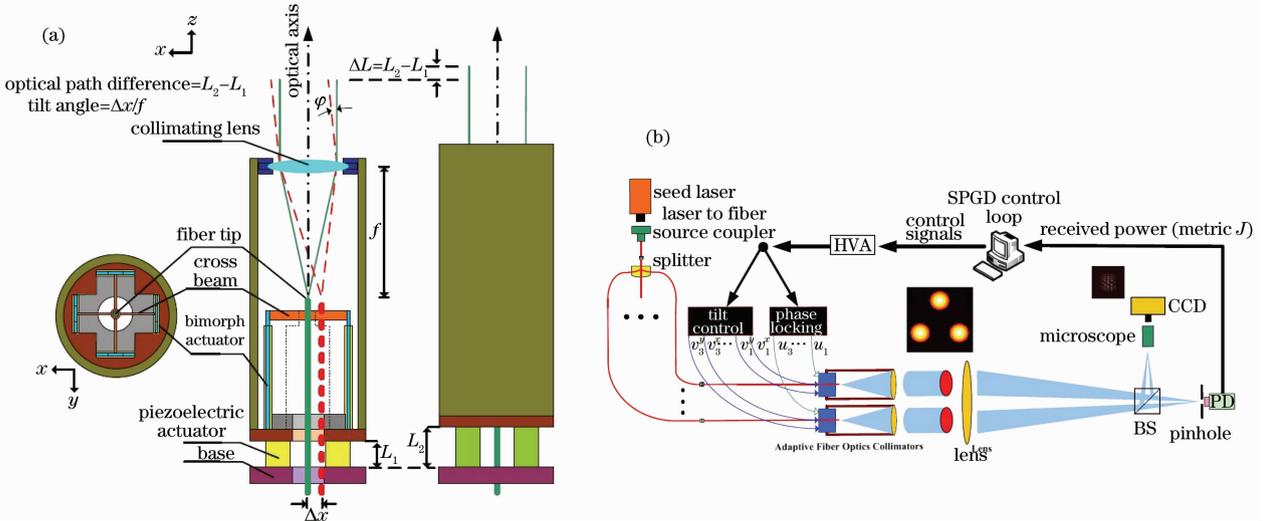


图 11 光纤自适应准直器结构图(a)和系统结构图(b)

Fig.11 Schematic of adaptive fiber collimator (a) and system (b)

该光纤准直器具有同时实现活塞相位和倾斜波前补偿的功能,相比于 Vorontsov 等的光纤准直器有部分改进和创新。实验结果如图 12 所示,实验对锁相控制和倾斜控制进行了论证,通过比较四种情况下相干合成的光斑质量,发现倾斜控制可以有效改善合成的光斑质量,证明了在相干合成中进行倾斜控制的必要性。

光纤自适应准直器进行倾斜波前的控制获得了良好的效果,但是这种准直器在大功率应用和高光束质量输出等方面尚需进一步的研究。对于大功率的激光输出,其子透镜的热效应对光束质量存在一定

的影响,同时,压电陶瓷片对光纤端口的挤压和推拉对光纤中激光的模式和传输效果无疑会产生影响。

3 结 论

光纤激光的相干合成是实现大功率激光的重要技术途径,光纤激光相干合成中倾斜波前的控制对于合成的效果具有重要的意义,值得进行深入的研究。液晶空间光调制器、高速倾斜镜和光纤自适应准直器是目前较为常用的倾斜控制器件,各个器件有着不同的优缺点。

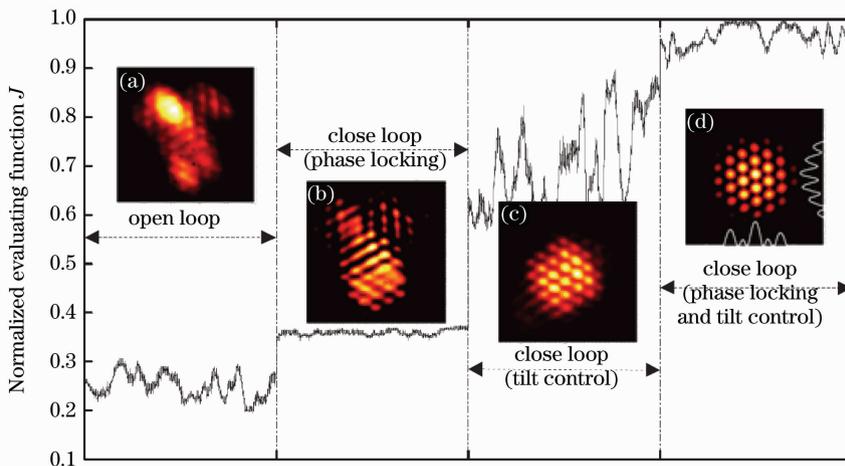


图 12 系统远场光斑图。(a)无锁相和倾斜控制；(b)仅锁相控制；(c)仅倾斜控制；(d)锁相和倾斜同时控制
Fig. 12 Far-field images of the system. (a) Tilt control is off, phase locking is off; (b) tilt control is off, phase locking is on; (c) tilt control is on, phase locking is off; (d) tilt control and phase locking are both on

在功率承受能力方面：液晶空间光调制器受液晶材料性质和工作方式的限制，光束偏转会带来一定的能量损失，且液晶空间光调制器承受的功率十分有限，向高功率拓展具有明显限制，适用于低功率范围的光束倾斜控制；高速倾斜镜利用反射法控制光束方向，目前的反射镜镀膜工艺可以使其承受相当高的功率密度，因而在高功率光纤激光相干合成的倾斜波前控制中具有很大的优势；光纤自适应准直器在小功率量级获得了很好的控制效果，但在高功率条件下该器件对激光模式、光束质量甚至输出功率密度的影响尚不明确。

在控制带宽特性方面：液晶空间光调制器结构紧凑、控制简单，因其非机械性在控制的精确性、灵活性和速度上具有较明显的优势；高速倾斜镜具有惯性较大、系统光路较为复杂、调试困难、控制带宽较低等缺点；光纤自适应准直器属于非机械控制装置，控制速度快、精度高、易于集成，具有广阔的应用前景，有望成为光纤激光相干合成中倾斜控制的重要发展方向。

光纤激光器相干合成中倾斜控制研究取得了一定进展，但亟需进一步深入。液晶空间光调制器具有较大的灵活性，但偏转效率低下、承受功率不高的问题有待解决；高速倾斜镜则需要提高倾斜控制带宽方面进行探索和研究；光纤自适应准直器对波前倾斜控制简单有效，但其是在下一步工作中需要分析其对光束质量的影响以及高功率扩展的可行性。

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): B63~B92.
 2 T. Y. Fan. Laser beam combination for high-power, high-radiance sources[J]. *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, 2005, **11**(3): 567~577
 3 A. Galvanauskas. High power fiber lasers[J]. *Opt. & Photon. News*, 2004, **15**(7): 42~47
 4 J. W. Dawson, M. J. Messerly, R. J. Beach *et al.*. Analysis of the scalability of diffraction-limited fiber lasers and amplifiers to high average power [J]. *Opt. Express*, 2008, **16** (17): 13240~13266
 5 T. A. Dorschner. Adaptive photonic phase locked elements[C]. MTO Symposium; 2007
 6 M. Vorontsov. Adaptive photonics phase-locked elements (APPLE) system architecture and wavefront control concept[C]. *SPIE*, 2005, **5895**: 1~9
 7 M. A. Vorontsov, T. Weyrauch, L. A. Beresnev *et al.*. Adaptive array of phase-locked fiber collimators analysis and experimental demonstration[J]. *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, 2009, **15**(2): 269~280
 8 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
 9 He Bing. Study on Improvement of Properties of Fiber Lasers and Beam Combination Techniques [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2007
 何 兵. 光纤激光特性改善及相干组束技术研究[D]. 上海: 中国科学院上海光学精密机械研究所, 2007
 10 Wang Xiaolin. Study on Optimization Algorithm Based Adaptive Optics in Laser Phased Array [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011
 王小林. 激光相控阵中的优化式自适应光学研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011
 11 X. Wang, J. Leng, H. Xiao *et al.*. Simultaneous spectrum and coherent combination by active phasing dual two-tone all-fiber MOPA chains[J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(8): 1338~1340
 12 C. X. Yu, S. J. Augst, S. M. Redmond *et al.*. Coherent combination of a 4 kW, eight-element fiber amplifier array[J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(14): 2686~2688

- 13 S. M. Redmond, K. J. Creedon, J. E. Kinsky *et al.*. Active coherent beam combination of diode lasers[J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(6): 999~1001
- 14 J. Lhermite, E. Suran, V. Kermene *et al.*. Coherent combination of 49 laser beams from a multiple core optical fiber by a spatial light modulator[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(5): 4783~4789
- 15 B. Wang, E. Mies, M. Minden *et al.*. All-fiber 50 W coherently combined passive laser array[J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(7): 863~865
- 16 J. Bourderionnet, C. Bellanger, J. Primot *et al.*. Collective coherent phase combination of 64 fibers[J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(18): 17053~17058
- 17 H. Schippers, J. Verpoorte, P. Jorna *et al.*. Broadband conformal phased array with optical beam forming for airborne satellite communication[C]. Aerospace Conference, 2008
- 18 S. L. Lachinova, M. A. Vorontsov. Laser beam projection with adaptive array of fiber collimators. II. Analysis of atmospheric compensation efficiency[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2008, **25**(8): 1960~1973
- 19 P. Zhou, Z. Chen, X. Wang *et al.*. Tolerance on tilt error for coherent combination of fiber lasers[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(1): 39~42
- 20 C. Geng, X. Li, X. Zhang *et al.*. Coherent beam combination of an optical array using adaptive fiber optics collimators[J]. *Opt. Commun.*, 2011, **284**: 5531~5536
- 21 L. Liu, M. A. Vorontsov. Adaptive phase-locked fiber array with wavefront phase tip-tilt compensation using piezoelectric fiber positioners[C]. *SPIE*, 2007, **6708**: 1~12
- 22 R. A. Meyer. Optical beam steering using a multichannel lithium tantalate crystal[J]. *Appl. Opt.*, 1972, **11**(3): 613~616
- 23 J. Stockley, S. Seratia, X. Xunb *et al.*. Liquid crystal spatial light modulator for multispot beam steering[C]. *SPIE*, 2004, **5160**:
- 24 D. Engström, M. J. O. Callaghan, C. Walker *et al.*. Fast beam steering with a ferroelectric-liquid-crystal optical phased array[J]. *Appl. Opt.*, 2009, **48**(9): 1721~1726
- 25 L. Xu, J. Zhang, L. Wu. Numerical modeling for liquid crystal optical phased array and its phase delay characteristic[C]. *SPIE*, 2006
- 26 Kong Lingjiang, Zhu Ying, Song Yan *et al.*. A beam steering approach of liquid crystal phased array based on nonperiodic blazed grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(1): 0123001
孔令讲, 朱颖, 宋艳等. 基于非周期闪耀光栅的液晶相控阵波控方法研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(1): 0123001
- 27 Zhang Jian, Xu Lin, Wu Liying. Study on programmable technology of liquid crystal phased array[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(8): 1~8
张健, 徐林, 吴丽莹. 液晶光学相控阵可编程光束偏转研究[J]. *光子学报*, 2008, **37**(8): 1~8
- 28 M. Johansson, S. Hård, B. Robertson *et al.*. Adaptive beam steering implemented in a ferroelectric liquid-crystal spatial-light-modulator free[J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(23): 4904~4911
- 29 X. Wang, B. Wang, J. Pouch *et al.*. Liquid crystal on silicon (LCOS) wavefront corrector and beam steerer[C]. *SPIE*, 2003
- 30 W. Miniscalco, K. Fisher, S. Waite *et al.*. Coherent beam combination and optical space-time division multiple access[C]. *SPIE*, 2010, **7814**:
- 31 B. Patel. Flexure design for a fast steering scanning mirror; USA, 5550669[P]. *Ang.* 27, 1996
- 32 J. T. Nee, R. A. Conant, R. S. Muller *et al.*. Lightweight, optically flat micromirrors for fast beam steering[C]. Optical MEMS, 2000
- 33 N. O. P. Arancibia, S. Gibson, T. Tsao. Adaptive control of MEMS mirrors for beam steering[J]. *ASME Conf. Proc.*, 2004, **2004**(47063): 71~80
- 34 A. Tuantranont, V. M. Bright, J. Zhang *et al.*. Optical beam steering using MEMS-controllable microlens array[J]. *Sensors and collimators A: Physical*, 2001, **91**(3): 363~372
- 35 Zheng Bin, Ling Ning. Measurement for frequency response function of a fast-steering mirror [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 1999, **26**(5): 58~62
郑彬, 凌宁. 自适应光学系统中高速倾斜反射镜的稳定控制[J]. *光电工程*, 1999, **26**(5): 58~62
- 36 Li Xinyang, Ling Ning, Chen Donghong *et al.*. Stable control of the fast steering mirror in adaptive optics system[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1999, **11**(1): 31~36
李新阳, 凌宁, 陈东红等. 自适应光学系统中高速倾斜反射镜的稳定控制[J]. *强激光与粒子束*, 1999, **11**(1): 31~36
- 37 N. O. P. Arancibia, N. Chen, S. Gibson *et al.*. Adaptive control of a MEMS steering mirror for suppression of laser beam jitter[C]. American Control Conference, 2005
- 38 C. C. Wilcox, J. R. Andrews, S. R. Restaino *et al.*. Analysis of a combined tip-tilt and deformable mirror[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(6): 679~681
- 39 Liu Min. Research of model and control for fast-steering mirrors[J]. *Optical Technique*, 2008, **34**(2): 227~232
刘敏. 快速倾斜镜的模糊PID自适应控制器设计[J]. *光学技术*, 2008, **34**(2): 227~232
- 40 Liu Min. Research of model and control for fast-steering mirrors[J]. *Optical Technique*, 2008, **34**(1): 108~112
刘敏. 快速倾斜镜的建模与模型参考自适应控制技术研究[J]. *光学技术*, 2008, **34**(1): 108~112
- 41 N. O. Perez-Arancibia, J. S. Gibson, T. Tsu-Chin. Frequency-weighted minimum-variance adaptive control of laser beam jitter[J]. *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on*, 2009, **14**(3): 337~348
- 42 Tang Fengfu, Chen Xiutao, Yao Baidong *et al.*. Tilt correction system for laser atmospheric propagation[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, **40**(3): 429~432
谭逢富, 陈修涛, 姚佰栋等. 激光大气传输倾斜校正系统[J]. *红外与激光工程*, 2011, **40**(3): 429~432
- 43 L. A. Beresnev, M. A. Vorontsov. Design of adaptive fiber optics collimator for free-space communication laser transceiver[C]. *SPIE*, 2005
- 44 L. A. Beresnev, T. Weyrauch, M. A. Vorontsov *et al.*. Development of adaptive fiber collimators for conformal fiber-based beam projection systems[C]. *SPIE*, 2008, **7090**(8): 1~10