

高功率光纤激光相干合成关键技术*

马阎星, 司磊, 周朴, 王小林, 张侃, 赵海川, 许晓军, 赵伊君
(国防科技大学光电科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

摘要: 光纤激光的相干合成是获得高功率和高光束质量激光的重要途径,也是当前激光领域的研究热点之一。文章针对基于 MOPA 方案的光纤放大器相干合成系统,对抖动法相位锁定技术、光束拼接技术和压电陶瓷相位调制器等关键技术和器件进行了详细介绍,为高能光纤激光相干合成的进一步发展提供参考。

关键词: 光纤激光;相干合成;相位锁定;光束拼接;相位调制器

中图分类号: TN248 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2012)01-0038-05

The key technologies in coherent beam combination of high power fiber laser

MA Yanxing, SI Lei, ZHOU Pu, WANG Xiaolin, ZHANG Kan, ZHAO Haichuan, XU Xiaojun, ZHAO Yijun
(College of Opto-electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Coherent beam combination of fiber laser/amplifiers is believed to be a promising way to acquire the high power and beam quality laser. Some key technologies are studied in this paper, including dithering phase-locking technology, laser beams combining technology and PZT phase modulator, which can provide reference for development of coherent beam combination of fiber lasers.

Key words: fiber laser; coherent beam combination; phase-locking; laser beams combining technology; phase modulator

同气体或常规固体激光器相比,光纤激光器结构简单、光束质量好、转换效率高、阈值低,而且便于维护,已被广泛应用于通信、材料加工、医疗和印刷等多个领域^[1]。随着光纤激光应用领域的不断拓展,对其功率的要求也越来越高,目前 1070nm 单模光纤激光器的最高输出功率可达 10kW^[2],多模激光器最高输出功率已超过 50kW^[3]。但是受到掺杂光纤非线性效应、热损伤以及光学损伤等物理机制的限制,单纤输出功率的提升空间受限^[4]。为了进一步提高光纤激光器/放大器的输出功率,业界先后提出了非相干合成、相干合成等光束叠加合成技术。非相干合成是将多台激光器/放大器输出激光进行合束,实现光强叠加,从而获得高输出功率,但是由于外界环境(例如温度、机械振动、声波)和本身参数起伏的影响,各激光器间的相位差起伏不定,合成光束的相干性和光束质量将会下降,在一定程度上限制了光纤激光的应用范围。与非相干合成相比,相干合成引入相位控制机制,将各光束间的相位差锁定为一个恒定值,从而提高了合成光束的相干性和光束质量,其峰值光强比非相干合成时提

高了 N 倍(N 为参与合成的光束数目),因此相干合成受到格外重视。目前采用主动相位控制方法已分别实现了 64 路低功率光纤激光相干合成^[5]和 105kW 板条激光放大器相干合成^[6],这也是目前相干合成领域在路数和功率上最高的水平。高功率光纤激光相干合成主要包括以下几项关键技术,高功率单链路光纤激光器技术、相位锁定技术和光束拼接技术,本文针对后两项关键技术进行了深入研究。

1 主动锁相相干合成技术简介

基于主动相位控制技术的相干合成方案的主要思想是将单频种子激光分束,将分束后激光分别进行功率放大,最后将大功率光束进行相干合成(如图 1 所示)。该方案解决了单路光纤激光器/放大器输出功率受限的难题,但是由于外界环境和放大器本身参数起伏等原因造成各放大器相位随机起伏,引入相位噪声,致使合成后光束的相干性和光束质量严重下降。为了避免这一缺陷,引入相位控制机制对各路放大器相位进行控制,实现各放大器间的相位锁定。不同相位控制方法

* 收稿日期:2011-10-25

作者简介:马阎星(1985—),男,山西大同人,博士研究生,E-mail:xm_wisdom@163.com;
赵伊君(通信作者),男,教授,院士,博士生导师,E-mail:zhaoyiz70@sina.com

的锁相原理各不相同,但其控制过程基本相同。首先对各路光束或参考光束进行移频或者相位扰动,为以后的相位探测提供依据。在合成光束中,移频信号或相位调制信号将以光斑抖动的形式体现出来,经光电探测器后转化为电信号并传递给信号处理器。信号处理器将会依据前面的移频或相位调制信号从中分析提取出各光束间的相位误差信号,并将之转化为控制信号加载到相位调制器上。经校正后的各路放大器相位将保持一致,相干性和光束质量得到提升,从而获得高亮度激光输出。

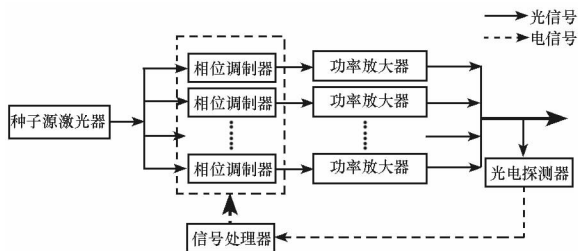


图 1 基于主动锁相技术的相干合成原理图
Fig. 1 The scheme of coherent beam combination based on active phase-locking technique

2 相位锁定技术

目前,主动相位控制相干合成方案中主要有三种相位控制算法,外差探测法^[7-8],SPGD 算法^[9-10]和抖动法^[11-12]。采用外差法实现相干合成时,需要提供一路参考光束和与合成光束数量相同的光电探测器,且对探测器阵列排列精度要求很高,随着合成光束数量的增加,这一方案的实现难度将会明显增加^[7-8]。基于 SPGD 算法的相干合成,不需要参考光束且只需要一个光电探测器,大大缓解了外差探测法中遇到的困难,但是 SPGD 算法对信号处理器的运算速度要求较高,随着合成路数的增加,算法的控制速度将会下降^[10]。基于多抖动法的相干合成也只需要一个光电探测器,而且相位控制速度不受合成光束数量限制,但是需要对各路光束进行高频相位调制,随着合成路数的增加,将会出现频率资源短缺,相位控制系统设计难度增大等问题。基于上述情况,本文基于抖动法,对相位控制技术进行了研究。

2.1 多抖动法锁相技术

多抖动法相干合成原理如图 2 所示,种子激光器输出激光经分束器后分为四路,每一路光束经相位调制器、功率放大器和光纤准直器输出到空间,四个准直器紧密排列,实现光束的高占空比

合成。合成后光束经光电探测器后转换为电信号输入到信号处理器。在信号处理器中,执行多抖动锁相算法计算出各路光束间的相位差,并将之转换为相位控制信号施加到相应的相位调制器上,实现光束阵列的相位锁定。

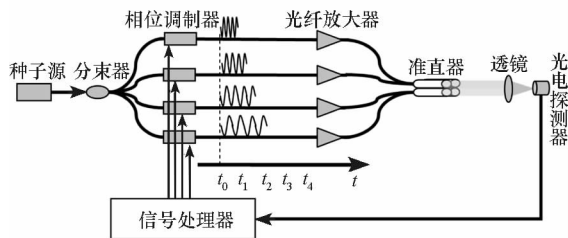


图 2 多抖动法相干合成原理图
Fig. 2 The schematic for coherent combination with multi-dithering technique

多抖动法的工作原理如下:信号处理电路首先在各路光束的相位调制器上分别施加一个频率不等的高频小幅相位调制信号(如图 2 所示),它们并行工作在各路光束的调制器上。这些相位调制信号最终以合成光束远场光斑抖动的形式反映出来。光电探测器将这些抖动的光强信号转化为电信号传递给信号处理器。在信号处理器中,执行多抖动算法获得光束间的相位差,并据此产生相位控制信号,实现光束阵列的相位锁定。采用该技术,Shay 等已于 2011 年实现了 16 路 1.4kW 光纤激光的相干合成^[11]。

多抖动法要求采用多个调制频率,为了使相位控制系统具有较大的控制带宽,这些调制信号之间必须保持一定的频率间隔。在进行大量光束相干合成时将会占用大量的频域资源,大大增加了信号处理电路的制作难度和实验的复杂程度。为此,我们在文献[12]中提出了基于时分复用概念的单频抖动法锁相技术。

2.2 单频抖动法锁相技术

单频抖动法相干合成原理如图 3 所示,系统设置与图 2 相同,只是锁相算法不同。

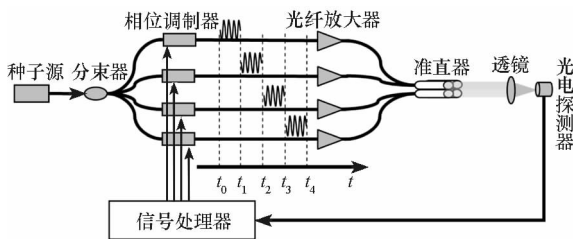


图 3 单频抖动法相干合成原理图
Fig. 3 The scheme of coherent combination with single frequency dithering technique

单频抖动算法的工作流程如下:

(1) 假设 t_0 时刻系统开始工作,当 $t_0 < t \leq t_1$

时,信号处理器首先将一高频小幅相位调制信号施加到第一路光束的相位调制器上,信号处理器根据相位调制信号计算出第一路光束与其他各路光束相位均值之间的相位差,并转换为控制信号加载到第一路光束的相位调制器上,实现相位校正。此段时间内,其他各路光束的相位调制信号和相位控制信号均为 0。

(2) 当 $t_1 < t \leq t_2$ 时,相位调制信号和控制信号加载到第二路光束上,加载到第一路光束上的相位调制信号为 0,控制信号保持 t_1 时刻的值不变,其余各路光束的相位调制信号和控制信号仍旧保持为 0。

(3) 当 $t_{i-1} < t \leq t_i (i \leq 4)$ 时,相位调制信号和控制信号加载到第 i 路光束上,其余各路光束上的相位调制信号为 0,控制信号保持 $t = t_{i-1}$ 时的取值。当 $i > 4$ 时,令 $m = i \bmod 4$,将相位调制信号和控制信号加载到第 m 路光束上,其余各路光束的调制信号为 0,保持上一时刻的控制信号不变。

当系统的相位控制周期 $T = t_{i+4} - t_i$ 小于相位噪声的特征周期时,系统就可以通过循环执行上述算法完成各路光束间的相位锁定,实现多路光束的相干合成。

由于单频抖动法在任一时刻只需要一路相位调制信号,因此信号处理器设计容易,实验简单,更易于走向实用。但是当进行大数量光束相干合成时,单频抖动法的串行工作模式会降低控制系统带宽,影响相干合成效果。基于此,本文在这一技术基础之上提出了多、单抖动法混合控制锁相技术。

2.3 多、单频抖动法混合控制锁相技术

多、单抖动法混合控制锁相技术原理如图 4 所示,该方案的实验系统结构与图 2 和图 3 相同,只是控制算法有所差异。为了便于说明,将图 4 中的光束分为两组,第一、二路为第一组,第三、四路为第二组,各组采用单频抖动法合成,两组间采用多抖动法合成,即各组之间并行工作。这样,一方面缓解了多抖动法频率资源紧缺的困难,另一方面缓解了单频抖动法控制带宽随光束数量增加而下降的瓶颈。当合成光束数目增加到几十束甚至上百束时,这一锁相技术的优势将迅速凸显出来。

为了验证这一技术方案的可行性,进行了 4 路光束的相干合成实验,相位控制系统开环和闭环时的远场长曝光光斑如图 5 所示。当系统开环时,由于受到环境中机械振动、温度起伏、声波以

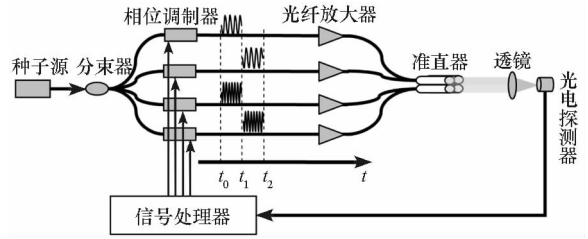
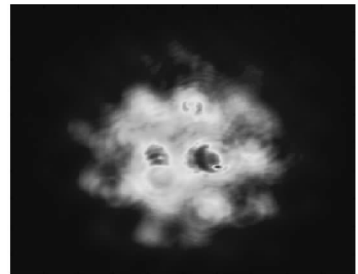


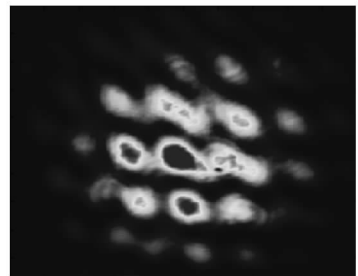
图 4 基于单、多抖动法混合相位控制的相干合成原理图

Fig. 4 The scheme of coherent beam combination based on mixed control with single frequency dithering and multi-dithering technique

及光纤激光器本身的影响,各路光束的相位随机起伏,导致远场光斑不断漂移,长曝光图样模糊不清,条纹对比度仅为 30%,这里条纹对比度定义为 $V = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min})$,其中 I_{\max} 为远场光斑中心亮条纹的光强极大值; I_{\min} 为临近暗条纹的光强极小值。当系统闭环时,光束间的相位噪声得到有效补偿,远场光斑稳定,条纹清晰,条纹对比度提高到了 87%。综上所述,多、单抖动法混合控制锁相技术有效实现了四路光束的相位锁定,具有向大数量光束相干合成扩展的潜力。



(a) 开环
(a) open-loop



(b) 闭环
(b) close-loop

图 5 系统开闭环时远场长曝光光斑图像
Fig. 5 Long-exposure far-field intensity profile in open-loop and close-loop

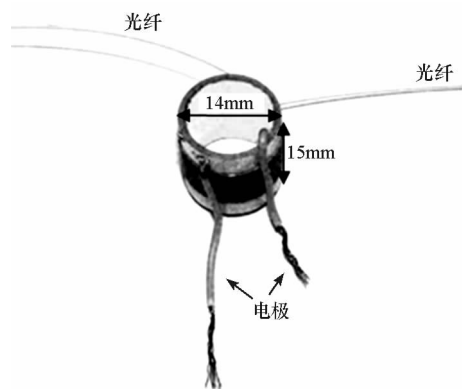
2.4 压电陶瓷相位调制器

作为相位控制算法的最终执行者——相位调制器在相干合成中起着举足轻重的作用。目前,光纤激光相干合成中使用的相位调制器主要有三

种,即声光移频器^[7-8]、铌酸锂电光相位调制器^[11-12]和压电陶瓷相位调制器^[13]。声光移频器通常应用于外差法相干合成中,对参考光束进行移频,相位控制器件采用压电陶瓷相位调制器或其他相位控制器件,若要将声光移频器用于相位控制,则需要配备较为复杂的电路控制系统^[14]。铌酸锂电光相位调制器拥有较宽的频率响应范围和良好的频率响应特性,已被广泛应用于 SPGD 算法、抖动法的相干合成中,但是其光学损伤阈值较低(通常小于 100mW),插入损耗较大(一般为 2~4dB),给高能激光相干合成带来较大困难。由于铌酸锂相位调制器的输出光功率较小,光纤激光需要进行多级放大才能实现高功率输出,增加了系统复杂性和成本。压电陶瓷相位调制器目前主要应用于外差法相干合成中的相位控制,这主要是由于压电陶瓷的频率响应范围较小(仅有几十 kHz 左右),而且随着调制频率的增加,频率响应曲线变化剧烈,从而限制了其在相干合成中的应用。但是压电陶瓷相位调制器具有光学损伤阈值高、插入损耗低、容易扩展至其他波长、不改变光纤的传输特性、可在高功率下应用以及成本相对较低等多种优势。针对上述情况,本文对压电陶瓷相位调制器进行了研究,通过进行结构改进后,将之成功应用于抖动法相干合成中。

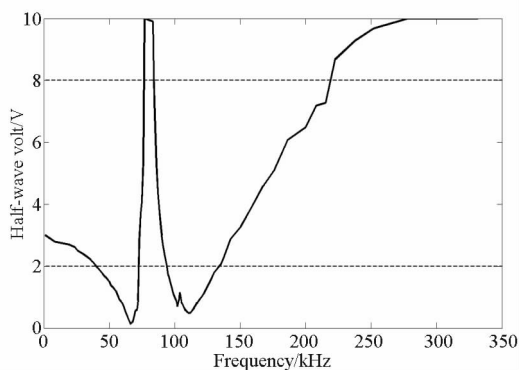
如图 6(a)所示,压电陶瓷相位调制器由管状压电陶瓷和绕在其上的光纤组成,电极用于加载相位调制信号或相位控制信号。压电陶瓷相位调制器的工作原理是通过陶瓷的反压电效应,将电信号转化为陶瓷管的膨胀或收缩,带动其上的光纤随之伸长或缩短,从而改变所在光路的光程,实现相位调制或控制。由于压电陶瓷相位调制器采用机械振动方式实现相位调制,因此存在谐振频率,在谐振频率附近,其频率响应曲线将会剧烈变化(如图 6(b)所示),导致无法进行正常的相位调制和控制。本文采用两种方法解决这一问题,一是减轻压电陶瓷的质量,因为谐振频率和物体的质量相关,质量越小,谐振频率越高,从而可用频率范围就越大;二是与抖动法配合使用,因为抖动法的相位调制信号只需要一个频率点,因此可以将该点取在第一谐振频率之后,例如图 6(b)中 200kHz。控制信号所需的频率范围较窄,压电陶瓷完全可以胜任,这在使用压电陶瓷实现的外差法相干合成中已得到验证。

通过专门设计压电陶瓷尺寸,本文获得了第一谐振频率约为 70kHz 的相位调制器,与抖动法配合使用,可以实现 200kHz 的相位调制信号,这足以实现几百赫兹相位噪声的校正,即可实现近



(a) 实物图

(a) PZT phase modulator



(b) 频率特性图

(b) frequency characteristic

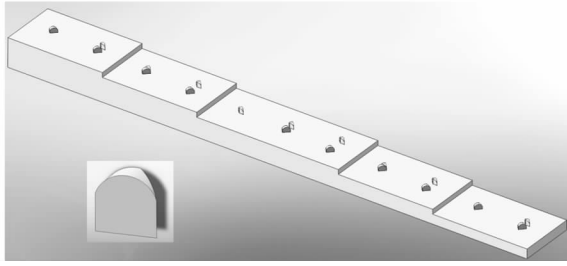
图 6 压电陶瓷相位调制器实物图和频率特性图

Fig. 6 PZT phase modulator and its frequency characteristic

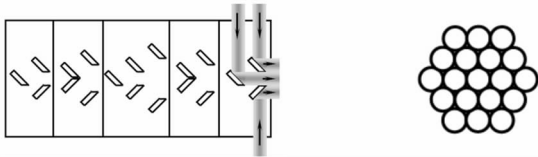
千瓦级的光纤激光相干合成^[15-16]。

3 光束拼接技术

光束拼接技术是高功率光纤激光相干合成系统中的另一项关键技术。经光纤准直器输出到空间的光束阵列占空比直接影响着相干合成的效果^[17]。这里占空比定义为光斑尺寸与光斑排列周期的比值,占空比越高,即光束排列越紧密,相干合成效果越好。目前普遍采用的光束拼接方法主要有准直器直接拼接法^[8,17],基于分立反射镜的拼接方法^[7]和基于圆台棱锥的拼接方法^[18]。由于准直器存在机械支撑装置,而且口径往往大于其输出光斑尺寸,因此采用直接拼接法很难做到高占空比拼接。基于分立反射镜的拼接方法可以实现高占空比拼接,但是需要多个分立器件,而且光路调节繁琐复杂,稳定性较差,很难向大数量光束合成扩展。基于圆台棱锥的拼接方法可以实现较高的占空比,光路调节容易,稳定性较好,但向大数量光束合成的扩展性较差。基于此,本文提出了台阶状大数量高占空比的光束拼接方案,该方案光路调节简单、稳定性高,其可行性和有效性均已得到实验验证。



(a) 合束器实物图
(a) the setup of the combiner



(b) 工作原理 (b) the scheme of combiner
(c) 19 路光束合束后光斑图 (c) the combined intensity pattern of 19 laser beams

图 7 台阶状合束器及其工作原理

Fig.7 The setup and scheme of the step-like laser beam combiner

该技术主要基于自制台阶状的光束合束器实现(如图 7(a)所示),参与合成的光束从合成器两侧入射,经合束器上的 45° 高反镜后,从合成器前端输出,图 7(b)为 19 路光束合成时的光束拼接情形,图 7(c)是拼接后的光斑图样。台阶状合束器将待拼接光束在纵、横两方向上解耦,通过合理设置台阶高度,实现光束在竖直方向上的高占空比合束。利用同一台阶上的多层 45° 高反镜压缩光束在水平方向上的间隔,实现水平方向上的高占空比合束。另外,特制的 45° 高反镜片对实现高占空比也起到重要作用(见图 7(a)中的插图),该镜片顶端为椭圆形, 45° 投影后为圆形,与准直器输出光斑刚好吻合,而且不会遮挡后面光束的出射。镜片向内的一侧均被削成 45° 角,避免遮挡后面光束,实现横向高占空比排列。通过改变台阶层数和每级台阶上的反射镜个数可以实现不同路数的光束拼接,不受光束数目限制。通过改变台阶上的反射镜位置可以改变光束的排列方式,比如方阵排列、六角密集排列等。上述光束拼接技术除了应用于光纤激光的相干合成中外,还可应用于其他类型激光的相干合成和非相干合成中,以及其他需要高占空比光束拼接的领域。

4 结论

本文对基于 MOPA 方案的光纤激光相干合成中的相位锁定技术、光束拼接技术和相位调制器等关键技术和器件进行了详细介绍,提出了单、多抖动法相结合的锁相方法,基于台阶状合束器的光束拼接方法,并改进了压电陶瓷相位调制器,

使之与抖动法锁相技术完美结合。这些成果为光纤激光相干合成的进一步发展提供了参考。

参考文献 (References)

- [1] Nilsson J, Sahu J, Jeong Y, et al. High power fiber lasers; new developments [C] //Proc. of SPIE, 2003, 4974: 50 - 59.
- [2] IPG photonics successfully tests world's first 10 kilowatt single-mode production laser [EB/OL]. [2011 - 1 - 19]. http://www.ipgphotonics.com/Collateral/Documents/English-US/PR_Final_10kW_SM_laser.pdf.
- [3] YLR-HP series; 1 - 50kW ytterbium fiber lasers [EB/OL]. [2011 - 1 - 19]. http://www.ipgphotonics.com/products_1micron_lasers_cw_ylr-hpseries.htm.
- [4] Dawson J, Messerly M, Beach R, et al. Analysis of the scalability of diffraction-limited fiber lasers and amplifiers to high average power [J]. Opt. Express, 2008, 17 (16): 13240 - 13266.
- [5] Bourderionnet J, Bellanger C, Primot J, et al. Collective coherent phase combining of 64 fibers [J]. Opt. Express, 2011, 19(18): 17053 - 17058.
- [6] Photo release-northrop grumman scales new heights in electric laser power, achieves 100 kilowatts from a solid-state laser [EB/OL]. [2011 - 1 - 19]. http://www.irconnect.com/noc/press/pages/news_releases.html?d=161575.
- [7] Anderegg J, Brosnan S, Cheung E, et al. Coherently coupled high power fiber arrays [C] // Proc. of SPIE, 2006, 6102: 61020U - 1 - 61020U - 5.
- [8] Xiao R, Hou J, Liu M, et al. Coherent combining technology of master oscillator power amplifier fiber arrays [J]. Opt. Express, 2008, 16(3): 2015 - 2022.
- [9] Liu L, Loizos D, Vorontsov M, et al. Coherent combining of multiple beams with multi-dithering technique; 100kHz closed-loop compensation demonstration [C] //Proc. of SPIE, 2007, 6708: 67080D - 1 - 67080D - 9.
- [10] Zhou P, Liu Z, Wang X, 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: 231106 - 1 - 231106 - 3.
- [11] Flores A, Shay T, Lu C, et al. Coherent beam combining of fiber amplifiers in a kW regime [C] //OSA/CLEO, 2011, CFE3. pdf.
- [12] Ma Y, Zhou P, Wang X, et al. Coherent beam combination with single frequency dithering technique [J]. Opt. Lett., 2010, 35(9): 1308 - 1310.
- [13] Jones D, Turner A, Scott A, et al. A Multi-channel phase locked fiber bundle laser [C] //Proc. of SPIE, 2010, 7580: 75801V - 1 - 75801V - 10.
- [14] Augst S, Fan T, Sanchez A. Coherent beam combining and phase noise measurements of ytterbium fiber amplifiers [J]. Opt. Lett., 2004, 29(5): 474 - 476.
- [15] Goodno G, Book L, Rothenberg J. Low-phase-noise, single-frequency, single-mode 608W thulium fiber amplifier [J]. Opt. Lett., 2009, 34(8): 1204 - 1206.
- [16] Jones D, Stacey C, Scott A. Phase stabilization of a large-mode-area ytterbium-doped fiber amplifier [J]. Opt. Lett., 2007, 32(5): 466 - 468.
- [17] 周朴. 光纤激光相干合成技术研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2009.
ZHOU Pu. Study on coherent beam combination technology of fiber lasers [D]. Changsha: National University of Defense Technology. (in Chinese)
- [18] Fan X, Liu J, Liu J, et al. Experimental investigation of a seven-element hexagonal fiber coherent array [J]. Chin. Opt. Lett., 2010, 8(1): 48 - 51.