

doi: 10.3788/lop47.021401

孔径填充——光纤激光阵列相干合成中的关键技术

周 朴 王小林 马阎星 马浩统 许晓军 刘泽金

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 光纤激光相干合成能够获得高功率、高光束质量的光束输出。目前国内对于相干合成技术的研究集中于各路激光的相位控制,即光束如何“相干”。而相干光束的“合成”,即如何提高相干激光阵列的填充因子,作为影响相干合成光束质量的一个重要因素,则较少受到关注。为了保证相干合成激光的光束质量,需辅以相应的孔径填充技术尽可能增大激光阵列的填充因子。跟踪国外近年来发展的孔径填充技术,如幅相转换、自成像波导、光束整形、衍射光学法、光束截断法等,并对每一种技术加以分析和评判。结果表明,光束截断法不需要复杂的光学设计,实施起来最为简单有效,有可能最终用于多路大功率光纤激光的合成。

关键词 光纤激光阵列; 孔径填充; 相干合成; 光束质量

中图分类号 TN24 OCIS 140.3510 060.2320 文献标识码 A

Aperture Filling——an Important Technique in Coherent Beam Combining of Fiber Laser Array

Zhou Pu Wang Xiaolin Ma Yanxing Ma Haotong Xu Xiaojun Liu Zejin

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

Abstract Coherent beam combining of fiber lasers can achieve high power laser with good beam quality. Most studies on coherent beam combining focus on phase controlling, i.e., how to make the beamlets coherent. Beam combining of the coherent beamlets, i.e., how to improve the fill factor of the coherent laser array, is also an important factor that affects the beam quality, yet it has seldom been taken into account. In order to ensure the beam quality of the coherently combined beam, the aperture filling technique should be employed to improve the fill factor of the fiber laser array. Recent progress on the aperture filling technique, i.e., amplitude-to-phase technique, self imaging waveguide, beam shaping, diffraction optics and beam truncation was introduced. Each technique was analyzed and evaluated in detail. It is shown that the beam truncation technique is free of complicated optical system design and easy to implement, which holds great potential in coherent beam combining of high power fiber laser array.

Key words fiber laser array; aperture filling; coherent combining; beam quality

1 引 言

光纤激光相干合成能够获得高功率、高光束质量的光束输出,在国防和民用的多个领域都有广阔的应用前景,目前国内外多家研究机构都开展了激光相干合成技术的研究^[1-18]。美国诺格(Northrop Grumman)公司 G. D. Goodno 等^[2]利用外差法实现 2 路板条放大器 19 kW 近衍射极限的锁相激光输出,美国麻省理工学院 J. E. Kinsky 等^[7]利用随机并行梯度下降算法实现了 48 路激光相位锁定。我国近年来在相干合成领域也取得了许多突破性进展,中国科学院上海光机所何兵等^[8]利用自成像腔实现了 4 路光纤激光锁相输出,总功率达到 26 W,中国科学院西安光机所 J. Li 等^[9]利用自成像腔实现了 2 路光子晶体光纤激光锁相输出,

收稿日期: 2009-05-16; 收到修改稿日期: 2009-06-17

作者简介: 周 朴(1984—), 男, 博士研究生, 从事光纤激光器及光束合成等方面的研究。E-mail: jnck621@163.com

导师简介: 刘泽金(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事高能激光技术等方面的研究。E-mail: zejinliu@vip.sina.com

总功率达到了 80 W。

除去输出功率外, 激光光束质量也是评判相干合成效果的重要依据。影响相干合成激光光束质量的因素有很多, 如: 相位误差、填充因子、倾斜误差等^[19,20]。其中填充因子指的是近场激光阵列有效出光面积占整个孔径的比率, 文献[20~22]明确指出填充因子是影响远场能量集中度的一个重要因素。光纤激光的基模近似服从高斯分布, 因此光纤激光阵列的填充因子小于 1^[2], 再加上机械装配等因素的影响, 各路光束排布不可能无限紧密, 实际光纤激光阵列相干合成系统的填充因子一般远小于 1。由此将造成锁相激光阵列产生多旁瓣的远场衍射光斑, 相当部分的能量将分布在阵列远场的旁瓣中, 光束质量严重退化。截至目前, 国内对于光纤激光相干合成的实验研究集中于采用主动或被动相位控制的方法实现多路激光光束之间的相位锁定^[8-18], 即使得多路光束之间彼此相干。而相干光束之间的合成, 即如何利用孔径拼接等方式尽可能提高相干激光阵列的填充因子很少受到关注, 导致相干合成实验结果均为相位锁定的远场干涉条纹, 中央主瓣内能量很少, 能量集中度低, 光束质量较差。

多束光纤激光进行相干合成已经是百千瓦全固态激光器的重要方案^[23-25], 为了保证相干合成激光光束质量, 不仅需要利用各种相位控制方法使得各路光束之间彼此“相干”, 还需要研究相应的孔径填充技术尽可能增大激光阵列的填充因子, 对多束激光进行“合成”, 提高远场光斑的能量集中度。自 2007 年以来, 国外研究人员已经对此问题进行了深入的研究与报道^[26-38]。本文介绍了国外近年来发展的孔径填充技术并加以分析评判, 为百千瓦相干合成光纤激光阵列走向工程实际提供参考。

2 孔径填充技术

2.1 幅相转换

幅相转换技术是美国 Minnesota 大学 M. Khajavikhan 等^[26,27]提出的孔径填充方案。该方案通过有效的光栅设计, 可以使得激光能量几乎全部集中于中央主瓣。幅相转换技术光学系统结构如图 1 所示。假设光纤激光阵列出射面的复振幅分布为 $g(x, y)$, $g(x, y)$ 可以近似成为准周期结构分布。在 L_1 透镜后焦面上的频谱分布 $S(f_x, f_y)$ 是 $g(x, y)$ 的傅里叶变换。由于 $g(x, y)$ 的准周期结构及傅里叶变换的特性, $S(f_x, f_y)$ 仅在某些离散点有值。经过相位板 $P_1(f_x, f_y)$ 后光场的复振幅分布为 $S(f_x, f_y) = \mathfrak{F}\{g(x, y)\} \times P_1(f_x, f_y)$, 其中 \mathfrak{F} 表示傅里叶变换。经过透镜 L_2 后, 在出射面上的复振幅分布可以记为 $q(x, y) = \mathfrak{F}\{S(f_x, f_y)\} \times P_2(x, y)$, 其中 $P_2(x, y)$ 是透镜 L_2 后焦面上的相位分布。整个 $4f$ 系统的几何结构要求 $|S(f_x, f_y)| = |\mathfrak{F}\{g(x, y)\}|$, 同时 100% 的能量转换效率要求 $q(x, y) = 1$, 根据这两个条件, 可以利用相位恢复算法^[28]对 $P_1(f_x, f_y)$ 和 $P_2(x, y)$ 进行最优设计, 使得激光阵列的能量全部集中在中央主瓣内。文献[26]报道的实验利用幅相转换技术将一个填充因子大小仅为 13.9% 的相干合成光纤激光阵列远场中央主瓣内能量提高近 6 倍。

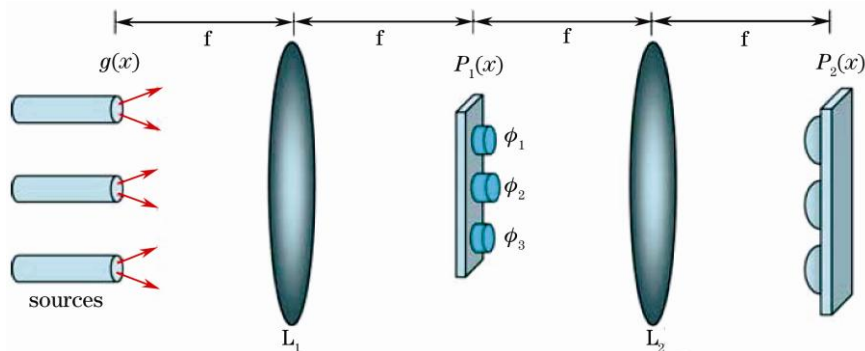


图 1 幅相转换法孔径填充光学系统结构

Fig.1 Optical system for aperture filling employing amplitude-to-phase conversion technique

幅相转换技术的关键之一在于利用相位恢复算法设计相位板上的相位分布, 随着信息光学技术的迅速发展, 相位恢复算法已经十分成熟, 利用计算全息或数字全息技术制备相位分布的相位板也已并非难事^[29]。文献[26]报道的实验结果已经成功实现 5 路 Self-Fourier 腔相干阵列的孔径填充, 并已经成功设计用于 51 束激光孔径填充的相位板, 因此, 该方案具有向多路数扩展的潜力。但随着参与合成的各路光纤激光功率的提升, 相位板 P_1 能否承受透镜聚焦导致的极高的激光功率密度是决定该方案能否用于大功率光纤激光阵列孔径填充的重要因素。

2.2 自成像波导

自成像波导孔径填充技术由美国洛克希德马丁(Lockheed Martin)公司的研究人员提出, 源于多模波导中的自成像效应。如果波导的长度等于输入光束的 Talbot 距离, 则波导输出面的复振幅分布与输入面一致, 即“自成像”效应, 如图 2(a)所示。对于输入面填充因子小于 1 的情形, 光束在波导中传输时首先激发其他众多导模并形成若干分立的区域, 传输经过一段距离后才会特定平面上产生“自成像”效应^[30]。如果波导在某些特定长度被截断, 则有可能在出射面上形成许多“像”, 反之, 该特定长度的波导也可以起到合束的作用, 如图 2(b)所示。图 3 给出了利用自成像波导实现 9 路光束的孔径填充和光束合成的过程。对于图 3 所示的 3×3 光纤激光阵列, 由于单元光束近似服从高斯分布, 如图 4(a)所示, 使得阵列填充因子较小。常用的拼接式光束合成方法仅能使得中央主瓣能量约占激光阵列总能量的 50%, 如图 4(b)所示。而若采用自成像波导进行孔径填充, 则在理论上可将中央主瓣能量提升至总能量的 99% 以上, 如图 4(c)所示。目前洛克希德马丁公司的研究人员已经利用自成像波导实现 2×2 光纤激光阵列的孔径填充与相干合成。

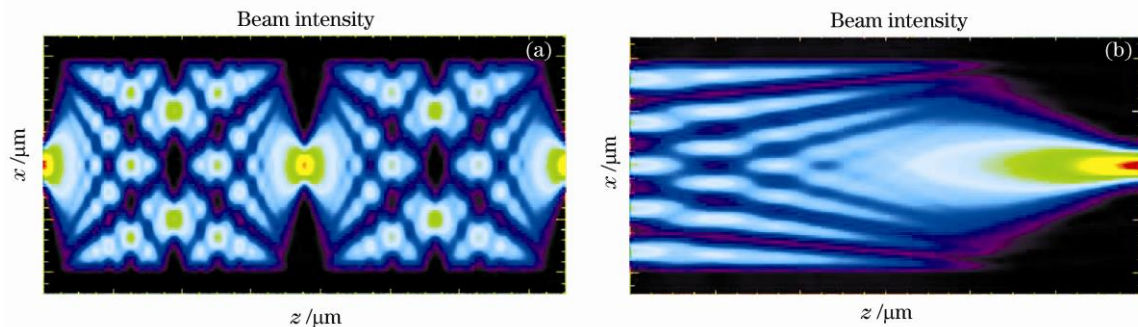


图 2 多模波导中的自成像效应。(a) 波导长度为 Talbot 距离整数倍; (b) 波导长度不足 Talbot 距离
Fig.2 Self imaging effect in multimode waveguides with length. (a) equaling integer multiplies of the Talbot length;(b) less than the Talbot length

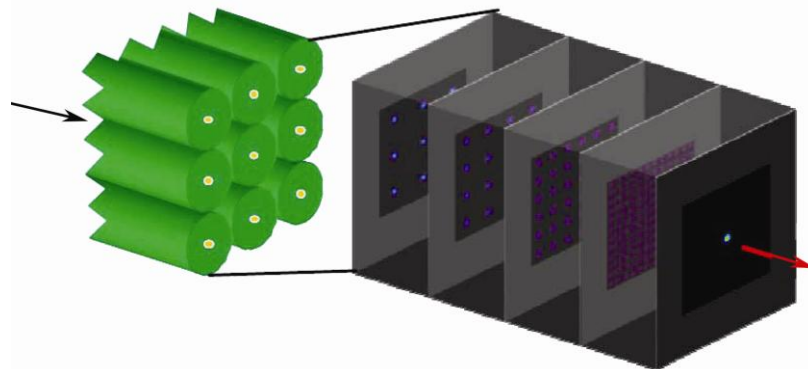


图 3 自成像波导实现 9 路光束的孔径填充和光束合成
Fig.3 Combining nine beams into a single, near diffraction-limit beam using a 2D self-imaging waveguide

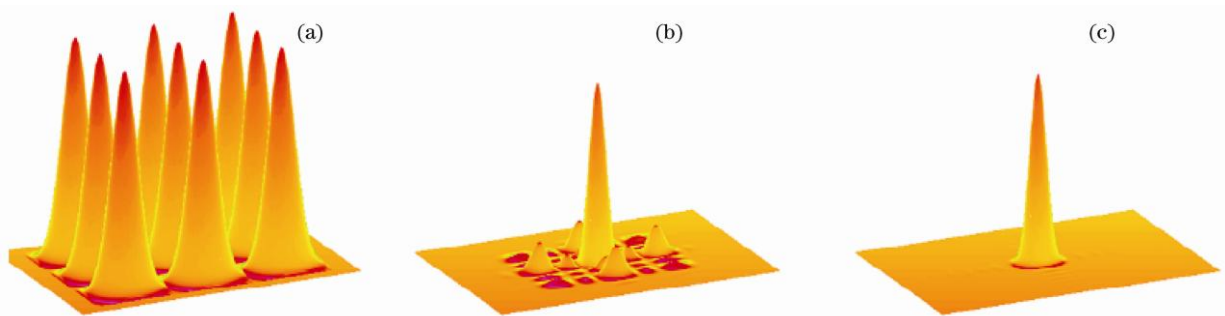


图 4 常规光束合成及自成像波导进行 3×3 光纤激光阵列孔径填充和光束合成效果模拟。(a) 光纤激光阵列近场分布;
(b) 常规光束合成远场光强分布;(c) 自成像波导阵列孔径填充和光束合成远场光强分布

Fig.4 Simulations comparing conventional free-space phased array output with 2D self-imaging waveguide. (a) 3×3 array of lasers;
(b) conventional phased array far-field intensity; (c) waveguide phased array far-field intensity

自成像波导孔径填充技术的一个重要特征是可以级联使用，如对 25 束激光进行孔径填充，可先由 5 组自成像波导将 25 束光束并成 5 个单元光束，再利用 1 组自成像波导将其完全合为一束。洛克希德马丁公司的研究人员在 2007 年的 ASSP 会议上指出，该公司的 2×2 光纤激光阵列合束系统已经具备了扩展到 4×4 甚至 5×5 路光束合成的能力^[30]，目前单路 5 kW 单模光纤激光器已经商用化，因此该方案具有获得百千瓦高功率激光输出的潜力，当然也面临着抑制非线性效应、热损伤等技术难题的挑战。因此，自成像波导孔径填充技术的关键在于耐高功率的自成像波导设计。随着光子晶体光纤理论与制备技术的不断发展与完善，基于光子晶体光纤材料的自成像波导有可能实现多路大功率光纤激光的孔径填充。值得注意的是，自成像波导孔径填充技术获得的是单口径光束输出，有可能失去阵列激光系统具备的湍流补偿能力^[31,32]、无机机械全电光束扫描^[33,34]等优势。

2.3 光束整形法

光束整形法的思路由美国诺格公司 S. B. Brosnan 等^[35]研究人员提出，基本原理在其申请的发明专利中进行了阐述。光束整形法提高光纤激光阵列填充因子的系统结构如图 5 所示，阵列中每一光纤激光单元经过一个透镜组后被整形为振幅、相位均匀分布的平顶光束。平顶光束经几何拼接后形成一束大口径相位均匀分布的平面波，由此可在远场形成高能量集中度的合成光强分布。

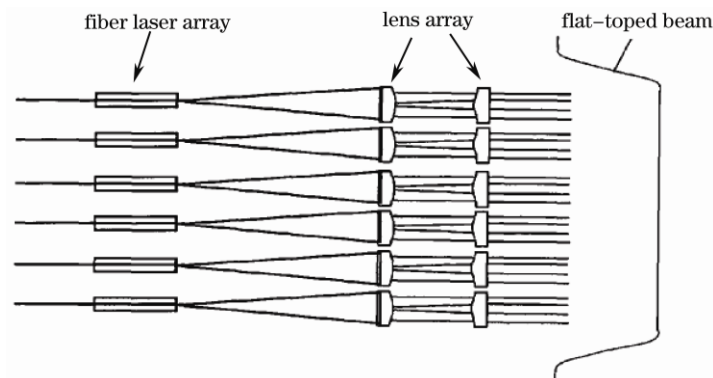


图 5 光束整形法提高光纤激光阵列填充因子的原理图

Fig.5 Scheme for aperture filling employing beam shaping technique

光束整形法的技术难点在于具备光束整形功能的透镜组的设计与制造，该透镜组需要同时完成强度与相位整形，也就是在提高光强均匀度的同时不改变光束质量。现有的光束整形技术^[36,37]很难实现，并且整形过程中有可能造成光束的能量损失。因此，采用光束整形法进行孔径填充提高阵列的填充因子实现难度

较大。

2.4 衍射光学法

衍射光学法的部分系统结构^[38,39]与诺格公司进行的外差法多路激光相干合成系统结构^[2,3,40]一致,如图6虚线左侧所示。在利用外差法锁定各路光束的相位后,再利用一衍射光学元件(DOE)将各路光束并作一路输出,该DOE本质是一个达曼光栅,将光栅这一传统分光元件逆向使用,完成激光合束的功能。诺格公司研究人员利用达曼光栅成功完成了5路光纤激光的合束实验,使得合成光束中央主瓣内的能量占激光阵列总能量的91.4%,与该公司2006年完成的4路光纤激光外差法相干合成中央主瓣能量占阵列总能量63%的实验结果相比,DOE元件的使用大大提高了远场光束的能量集中度。以色列Weizmann科学研究所M. Fridman等^[41]也利用衍射光学元件完成了4路光纤激光的孔径填充与合束,获得了单口径光束质量 M^2 因子为1.15的近衍射极限光束输出。

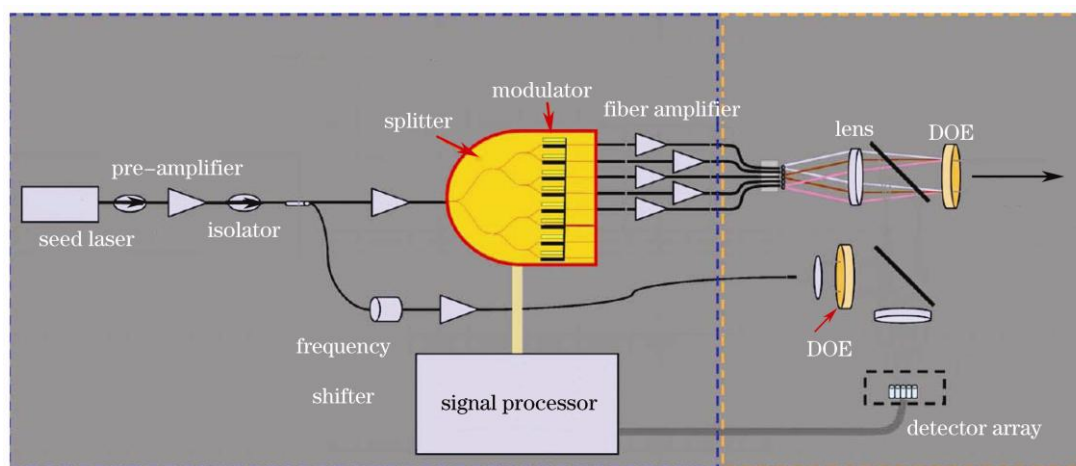


图6 利用衍射光学元件提高光纤激光阵列填充因子的系统结构

Fig.6 System setup for aperture filling employing a diffractive optical element (DOE)

衍射光学法的关键技术在于衍射光学元件的设计与制作,飞速发展的信息光学技术完全能够设计高精度的达曼光栅,但是如将该方案用于大功率光纤激光的合成与孔径填充,则该光栅还需要耐高功率激光辐照,且不会引入热变形等其他因素破坏合成光束的光束质量。诺格公司目前已经制造出耐 20 kW/cm^2 激光辐照的光栅,具备了向高功率扩展的可行性。衍射光学法填充技术最终也是单口径光束输出。

2.5 光束截断法

同样是解决基模高斯光束低填充因子的问题,美国马里兰大学M. A. Vorontsov等^[42]提出了一种十分简单有效的方案,直接对高斯光束进行截断,仅取高斯光束中央部分进行合成。由于中央部分激光能量分布较为均匀,阵列的填充因子得到了提高,远场能量更多地集中到中央主瓣内,如图7(a)所示。但同时截断会造成整个激光阵列的能量损失。M. A. Vorontsov等^[42]利用数值计算的方法推导出高斯光束阵列的最佳截断条件,我们课题组最近也利用解析推导的方法计算了最佳截断条件^[43]。对于图7(a)所示的7路高斯激光阵列,若每路光束的出光口径(直径)为 d ,高斯光束的束腰值为 a_0 ,定义截断比为 $f = 2a_0/d$,则远场衍射极限桶内能量占截断前激光阵列总能量的比例 J_{PIB} 与光束截断比的关系如图7(b)所示。在最佳截断条件下,能够使得远场衍射极限桶内能量占激光阵列总能量的80%以上。

与前4种方法相比,光束截断法不需要复杂的光学设计,实施起来最为简单有效。但是光束截断法也有其本身固有的缺陷,只能部分改善远场光束的能量集中度,即便是在最佳截断条件下,远场衍射极限桶内能量也仅占激光阵列总能量的80%以上。

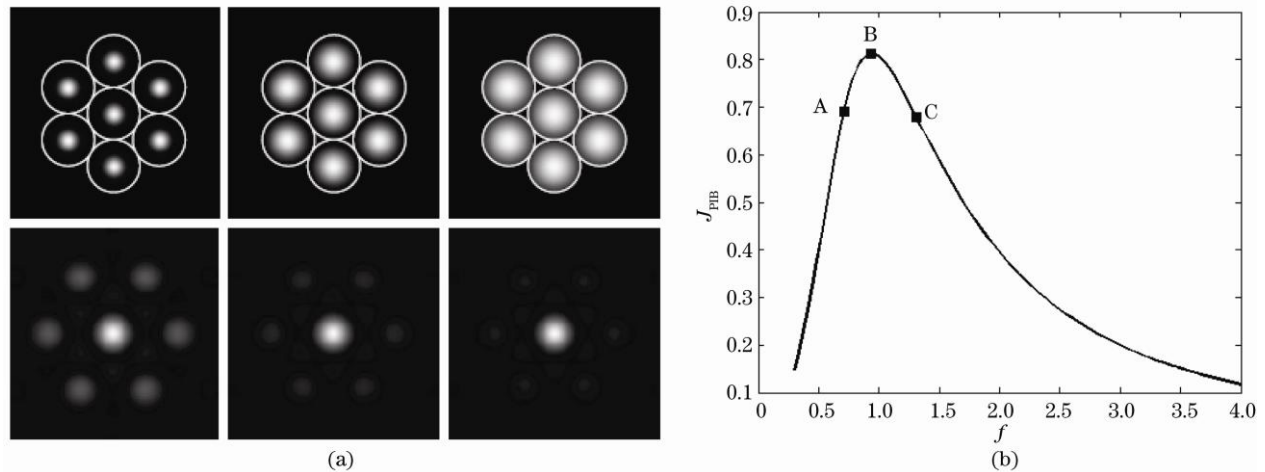


图 7 光束截断法提高光纤激光阵列填充因子的基本原理。(a)不同截断比对远场光束能量集中度的影响, 上图为截断后激光阵列近场光强分布, 下图为对应的远场光强分布; (b)远场衍射极限桶内能量占截断前激光阵列总能量的比例与光束截断比的关系

Fig.7 Basic principle for aperture filling employing beam truncation technique. (a) effect of the truncation on the combined beam intensity distribution (Top: the near field intensity distribution under different truncation factors, Bottom: the corresponding far field intensity distribution); (b) dependence of J_{PIB} on different truncation parameters

3 结 论

文章介绍了自 2007 年以来国外研究人员提出的光纤激光阵列孔径填充的新技术与新方案, 如幅相转换、自成像波导、光束整形、衍射光学法、光束截断法等, 并对每一种技术加以分析和评判。其中基于光子晶体光纤材料的自成像波导与利用耐高功率激光辐照的衍射光学元件有可能实现多路大功率光纤激光的孔径填充与合成, 但最终实现的单口径光束输出使其失去阵列激光系统具备的湍流补偿能力、无机械全光束扫描等优势。文献[42]提出的光束截断法不需要复杂的 optics 设计, 实施起来最为简单有效, 有可能最终用于多路大功率光纤激光的合成。但是也有其本身固有的缺陷, 即只能部分改善远场光束的能量集中度。其结论为百千瓦相干合成光纤激光阵列走向工程实际提供参考。

参 考 文 献

- 1 T. Y. Fan. Laser beam combining for high-power, high-radiance sources[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2005, **11**(33): 567~577
- 2 G. D. Goodno, C. P. Asman, J. Anderegg *et al.*. Brightness-scaling potential of actively phase-locked solid-state laser arrays[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2007, **13**(3): 460~472
- 3 Jesse Anderegg, Stephen Brosnan, Eric Cheung *et al.*. Coherently coupled high power fiber arrays[C]. *SPIE*, 2006, **6102**: 61020U
- 4 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
- 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. Exp.*, 2006, **14**(25): 12022~12027
- 6 L. Liu, M. A. Vorontsov. Phase-Locking of tiled fiber array using SPGD feedback controller[C]. *SPIE*, 2005, **5895**: 58950P
- 7 J. E. Kinsky, C. X. Yu, D. V. Murphy *et al.*. Beam control of a 2D polarization maintaining fiber optic phased array with high-fiber count [C]. *SPIE*, 2006, **6306**: 63060G
- 8 B. He, Q. Lou, W. Wang *et al.*, Experimental demonstration of phase locking of a two-dimensional fiber laser array using a self-imaging resonator [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **92**(25): 251115
- 9 J. Li, K. Duan, Y. Wang *et al.*. High-power coherent beam combining of two photonic crystal fiber lasers[J]. *IEEE Photon.*

- Technol. Lett.* 2008, **20**(11): 888~890
- 10 B. He, Q. Lou, J. Zhou *et al.*. High power coherent beam combination from two fiber lasers[J]. *Opt. Exp.*, 2006, **14**(7): 2721~2726
- 11 B. He, Q. Lou, J. Zhou *et al.*. Phase-locking of two large-core fiber lasers with 60 W of coherent output power[J]. *J. Opt. A*, 2006, **8**(9): 759~762
- 12 Li Jianfeng, Duan Kailiang, Wang Jianming *et al.*. Experiment on coherent-locking of two photonics crystal fiber lasers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(5): 923~926
李剑峰, 段开惊, 王建明 等. 两光子晶体光纤激光器相干锁定的实验研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(5): 923~926
- 13 Cheng Yong, Liu Yang, Xu Lixin *et al.*. Mutual-injection phase-locking fiber laser with corner-cube cavity [J]. *Chinese. J. Lasers*, 2009, **36**(1): 77~81
程 勇, 刘 洋, 许立新 等. 角锥腔互注入锁相光纤激光器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(1): 77~81
- 14 Xiao Rui, Hou Jing, Liu Ming *et al.*. Coherent combining technology of master oscillator power amplifier fiber arrays [J]. *Opt. Exp.*, 2008, **16**(3): 2015~2022
- 15 Hou Jing, Xiao Rui, Jiang Zongfu *et al.*. Coherent beam combining of three ytterbium fiber amplifiers [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(10): 1585~1588
侯 静, 肖 瑞, 姜宗福 等. 三路掺镱光纤放大器的相干合成实验研究[J]. *强激光与粒子束*, 2006, **18**(10): 1585~1588
- 16 Z. Chen, J. Hou, P. Zhou *et al.*. Mutual injection-locking and coherent combining of two individual fiber lasers[J]. *IEEE J. Quantum. Electron.*, 2008, **44**(6): 515~519
- 17 B. Lei, Y. Feng. Phase locking of an array of three fiber lasers by an all-fiber coupling loop[J]. *Opt. Exp.*, 2007, **15**(25): 17114~17119
- 18 P. Zhou, Z. Liu, X. Wang *et al.*. Coherent beam combining of fiber amplifiers using stochastic parallel gradient descent algorithm and its application [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2009, **15**(2): 248~256
- 19 Liu Zejin, Zhou Pu, Xu Xiaojun. Analysis of high energy fiber laser system[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, **20**(11): 1795~1801
刘泽金, 周 朴, 许晓军. 高能光纤激光系统浅析[J]. *强激光与粒子束*, 2008, **20**(11): 1795~1801
- 20 P. Zhou, Z. Liu, X. Xu *et al.*. Numerical analysis of the effects of aberrations on coherently combined fiber laser beams[J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(18): 3350~3359
- 21 Tang Qianjin, Shi Xiangchun, Hu Qiquan. Effect of the filled factor on the far-field profiles of laser beam combination[J]. *J. Propulsion Technology*, 2007, **28**(5): 566~569
唐前进, 施翔春, 胡企铨. 填充因子对激光组束远场功率分布的影响[J]. *推进技术*, 2007, **28**(5): 566~569
- 22 Yan Aimin, Liu Liren, Liu Dean *et al.*. Recent progress in phase-locking and aperture filling of fiber laser arrays[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, **45**(8): 33~39
闫爱民, 刘立人, 刘德安 等. 光纤激光阵列锁相和孔径装填技术研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2008, **45**(8): 33~39
- 23 Mei Suisheng. Solid-state lasers marching to 100 kW [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2005, **42**(10): 2~8
梅遂生. 向100 kW进军的固体激光器[J]. *激光与光电子学进展*, 2005, **42**(10): 2~8
- 24 Ren Guoguang, Huang Yunian. Diode pumped solid state laser stride forward 100 kW[J]. *Laser & Infrared*, 2006, **36**(8): 617~622
任国光, 黄裕年. 二极管抽运固体激光器迈向100 kW[J]. *激光与红外*, 2006, **36**(8): 617~622
- 25 Li Jinmin. Development trend and application of high average power diode pumped lasers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, **45**(7): 16~29
李晋闽. 高平均功率全固态激光器发展现状、趋势与应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2008, **45**(7): 16~29
- 26 M. Khajavikhan, A. Hoyerleitzel, J.R. Leger. Efficient conversion of light from sparse laser arrays into single-lobed far field using phase structures [J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(20): 2377~2379
- 27 M. Khajavikhan, J.R. Leger. Efficient conversion of light from sparse laser arrays into single-lobed far-fields using phase structures[C]. 2008 *CLEO p.CWB1*
- 28 J. R. Fienup. Phase retrieval algorithm: a comparison[J]. *Appl. Opt.*, 1982, **21**(15): 2758~2769
- 29 B. R. Brown, A. W. Lohmann. Computer-generated binary holograms[J]. *IBM J. Res. Dev.* 1968, **13**: 160
- 30 S. Christensen, O. Koski. 2-Dimensional waveguide coherent beam combiner[C]. 2007 *CLEO p.WC1*
- 31 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

- 32 S. L. Lachinova, M. A. Vorontsov. Performance analysis of an adaptive phase-locked tiled fiber array in atmospheric turbulence conditions[C]. *SPIE* 2005, **5895**: 589500
- 33 P. F. McManamon, T. A. Dorschner, D. L. Corkum *et al.*. Optical phased array technology [J]. *Proc. IEEE*, 1996, **84**(2): 268~298
- 34 P. F. McManamon. Agile nonmechanical beam steering [J]. *Optics Photonics News*, 2006, **17**(3): 24~29
- 35 S. J. Brosnan, M. G. Wichham, H. Komine. Method and apparatus for optimizing the target intensity distribution transmitted from a fiber coupled array [P]. US patent 7283702, (2007)
- 36 D. L. Shealy, J. A. Hoffnagle. Laser beam shaping profiles and propagation [J]. *Appl. Opt.*, 2000, **45**(21): 5118~5131
- 37 J. Hoffnagle, C. M. Jefferson. Design and performance of a refractive optical system that converts a Gaussian to a flattop beam [J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(30): 5488~5499
- 38 E. C. Cheung, J. G. Ho, G. D. Goodno *et al.*. Diffractive-optics-based beam combination of a phase-locked fiber laser array[J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(4): 354~356
- 39 M. Wickham, E. C. Cheung, J. G. Ho *et al.*. Coherent combination of fiber lasers with a diffractive optical element [C]. 2008 ASSP, WA5
- 40 G. D. Goodno, H. Komine, S. J. McNaught *et al.*. Coherent combination of high-power, zigzag slab lasers [J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(9):11247-1249
- 41 M. Fridman, Va. Eckhouse, N. Davidson *et al.*. Simultaneous coherent and spectral addition of fiber lasers [J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(7): 648~650
- 42 M. A. Vorontsov, S. L. Lachinova. Laser beam projection with adaptive array of fiber collimators. I. Basic considerations for analysis [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2008, **25**(8): 1949~1959
- 43 P. Zhou, X. Wang, Y. Ma *et al.*. Optimal truncation of the element beam in a coherent fiber laser array [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2009, **26**(04): 044206