

# 激光相干偏振光束合成技术的研究进展

马鹏飞 周 朴 马阎星 王小林 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** 激光相干偏振光束合成是近几年光束合成领域的热点。综述了国内外关于相干偏振光束合成的研究方案,对几种典型的方案进行了分析和评价。研究表明,基于主振荡功率放大(MOPA)结构的相干偏振光束合成方案有同时获得大功率、高光束质量的可行性,并且易于扩展。

**关键词** 激光技术;偏振合成;光束质量;相干偏振合成

**中图分类号** TN248 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.070005

## Development of the Polarization Beam Combining Technique of Lasers

Ma Pengfei Zhou Pu Ma Yanxing Wang Xiaolin Liu Zejin

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

**Abstract** The coherent polarization beam combining technique is the highlight in the field of beam combination, which attracts extensive attention recently. Tracing the typical coherent polarization beam combining techniques, some typical schemes are analyzed and evaluated. It is evident that coherent polarization beam combining based on master oscillator power-amplifier (MOPA) structure has the possibility of achieving high power with excellent beam quality and can be extended easily.

**Key words** laser technique; polarization combining; beam quality; coherent polarization beam combining

**OCIS codes** 140.3280; 140.3290; 140.3580

## 1 引言

高功率高光束质量的激光在传感、工业等领域有着广泛的应用。由于增益介质的热效应、非线性效应和光学损伤等机理的影响,单个激光器获得高功率高光束质量的激光输出存在很大瓶颈<sup>[1]</sup>。合成是一种解决这种瓶颈的可行方法。现有的合成方案主要包括相干合成<sup>[2~19]</sup>、非相干合成<sup>[3,5,20]</sup>和光谱合成<sup>[3,5,21~23]</sup>等。国内外很多研究机构已经在这方面展开了大量的研究。美国诺格(Northrop Grumman)公司 Goodno 等<sup>[14]</sup>用外差法实现了 7 路板条放大器 105 kW 的锁相激光输出;Wang 等<sup>[18]</sup>实现了 9 路全光纤光纤激光相干合成,输出功率达 1.14 kW。Wirth 等<sup>[21]</sup>利用光谱合成的方法实现了 8.2 kW 4 路光子晶体光纤放大器合成。相干合成大都采用基于孔径拼接的阵列激光实现,使得部分能量分散到旁斑,降低了合成后光束的能量集中度<sup>[24]</sup>。相干偏振合成使得光束同轴输出,避免了阵列合成能量向旁斑分散的问题,受到研究者的重视,并提出了多种实验方案。本文首先对非相干偏振光束合成做简要介绍,说明其向多路大功率发展的局限性,然后对国内外几种典型的相干偏振合成技术方案进行总结和探讨,说明相干偏振合成向多路发展的可能性,并对目前的各种相干偏振合成方案提出新的思考。

## 2 非相干偏振合成

传统的偏振合成基本原理是将两束线偏振激光束通过偏振合束器合成为一束。其原理图如图 1 所示。光束 1 和光束 2 是两束线偏振光束,通过偏振合束器(PBC)进行合成,合成后的光束为非偏振光,被认为不是一种

收稿日期: 2011-12-19; 收到修改稿日期: 2012-01-10; 网络出版日期: 2012-04-01

作者简介: 马鹏飞(1987—),男,硕士研究生,主要从事高能激光技术方面的研究。E-mail: shandapengfei@126.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方面的研究。E-mail: zejinliu@vip.sina.com

获得大功率的有效途径<sup>[25]</sup>。此方案一般用来提高抽运功率,在固体激光器端面抽运等领域被广泛地应用<sup>[26]</sup>。国内 Dong 等<sup>[27]</sup>利用非相干偏振合成方法进行了气体激光器全空间结构的同轴合成理论分析和实验研究。此种方案没有对参与合成的光束之间的相位进行控制,如果有放大器,放大器会产生随机相位噪声,随机相位噪声会严重影响参与合成光束的偏振态。因此,非相干偏振合成不易向多路扩展,很难实现高功率高光束质量的激光输出。

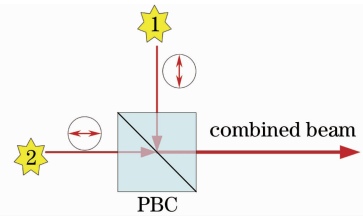


图1 两路光束偏振合成原理图

Fig. 1 Principle schematic of polarization combining of two beams

### 3 相干偏振合成

#### 3.1 被动锁相相干偏振合成

##### 3.1.1 激光二极管阵列锁相偏振合成

在美国国防高级研究计划局(DARPA)和新加坡科技情报局(DSTA)的支持下,新加坡南洋理工大学 Ng 等<sup>[28]</sup>进行了激光二极管阵列的被动锁相相干偏振合成研究。这种方案基于晶体的各向异性和双折射效应,通过合理的晶体组合设计改变各路光束的偏振态,使得从二极管阵列发出的光在空间重合,再通过特殊的腔型设计,使得激光腔对偏振方向不同的光的损耗不同,最终实现阵列偏振合成锁相输出。该小组基于该方案设计了4路二极管阵列的偏振合成实验,方案如图2所示。

激光二极管阵列光束通过焦距为0.6 mm的快轴准直器(FAC)进行准直,然后通过设计一对双折射晶体对使得1、2和3、4两束光的偏振态分别互相垂直。双折射晶体对的内部结构和作用如图3所示<sup>[27]</sup>。

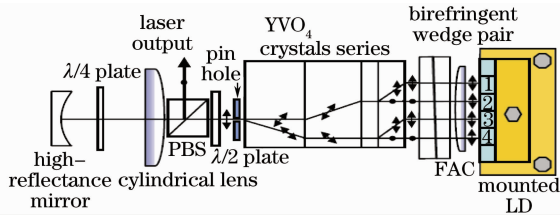


图2 激光二极管阵列被动锁相偏振合成示意图

Fig. 2 Schematic of passively phase-locked polarization combining of laser-diode array

双折射晶体对和YVO<sub>4</sub>晶体系列构成了空间光束合成器,它是此系统的关键光学元件,不仅使得4路光束空间上重合,而且通过补偿保证了4路光束具有等光程性。为了能够承受大功率,各个晶体之间采用光胶粘合。YVO<sub>4</sub>晶体系列使得4路光束进行偏振合成,其内部结构和作用如图4所示<sup>[28]</sup>。针孔作为腔内的空间滤波器阻止高阶模振荡,同时阻挡非相干光束进入谐振腔,从而有利于相干锁相过程的建立。在偏振分束器(PBS)和针孔之间加入半波片调整合成之后的光束偏振态,使得透过偏振分束器进入谐振腔的光强最大,有利于谐振腔起振。 $\lambda/4$ 波片可以改变锁相后光束的偏振态,所以通过调节 $\lambda/4$ 波片可以得到最佳的输出功率,最终实现锁相输出。

该方案输出的光束接近衍射极限,竖直方向的 $M^2$ 因子为1.03(非相干合成时为1),水平方向的 $M^2$ 因子为1.5(非相干合成时为224)<sup>[28]</sup>。二极管阵列的亮度提高了近50倍,系统具有高的稳定性和承受外界小震动的能力,长时间运作时光强的起伏小(小于5%/h)。这种方法可以有效地提高二极管阵列的光束质量和亮度。

##### 3.1.2 固体激光器锁相偏振合成

Phua 等<sup>[29]</sup>利用谐振腔的偏振选择性损耗实现了两路正交偏振的固体激光器相干锁相输出,得到了接

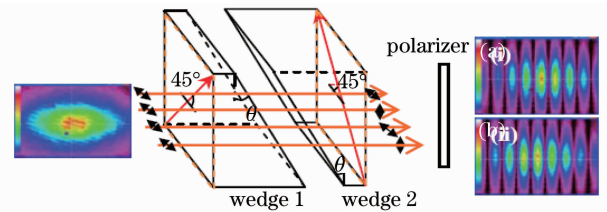


图3 双折射楔型对结构与作用示意图

Fig. 3 Schematic of structure and function of birefringent wedge pair

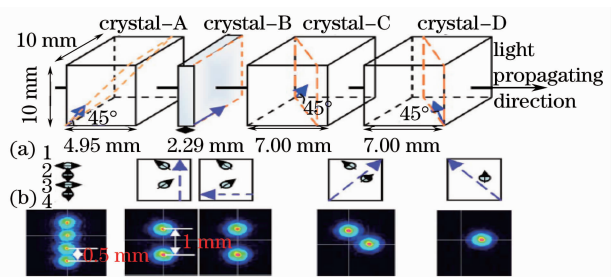


图4 YVO<sub>4</sub>晶体系列结构与作用示意图

Fig. 4 Schematic of structure and function of YVO<sub>4</sub> crystal serial

近理想的合成效率。方案的原理如图 5 所示。其基本原理是利用偏振合束器将两个正交偏振态合成一个新的偏振态,产生的新偏振态在谐振腔中无损耗传输,从而建立稳定的振荡,实现锁相输出。此方案便于调谐,参与合成的两路光的功率不平衡性对合成效率影响小,在两路光束功率极不平衡的情况下仍能得到接近理想(大于 99%)的合成效率。增益介质 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体以布儒斯特角切割,以保证单偏振,通过  $\lambda/2$  波片 1(HWP1)的调整使得参与合成的两路激光束的偏振态相互垂直,经过偏振合束器 1(Pol1)后,一般情况下,合成后的光束是椭圆偏振光。椭圆偏振光可以通过  $\lambda/4$  波片(QWP)和  $\lambda/2$  波片 2(HWP2)的组成校正为线偏振光。此方案中的偏振控制器由一个 QWP 和 HWP2 组成,将合成后的椭圆偏振光变成一个水平偏振的线偏振光。由于只有两路光之间满足合适的相对相位差时(由偏振控制器 2 个波片的慢轴取向决定),才能在谐振腔中稳定存在,从而达到相干偏振锁相输出。方案中针孔(Pin-hole)用来限制谐振腔的模式, $M_1$  和  $M_2$  是两个对 1064 nm 高反射率的腔镜,采用焦距为 20 cm 的透镜实现  $M_2$  和  $M_3$ ,  $M_1$  和  $M_3$  两个谐振腔之间的匹配。

这种方案的主要优点是可以调节偏振控制器的 2 个波片的方向实现任意相位差,任意功率比的锁相偏振合成。文献[29]中已经报道,当两路光束功率比不高于 3:1 时合成效率高于 99%,当两路光束功率比不高于 5:1 时,合成效率高于 95%(锁相输出功率与两路光束总功率的比值)。通过调节 HWP2 的方向即可实现相干锁相效率的测量,而且两个光路是分离的,便于调谐和管理。当然,随着功率比的不断增加,合成效率也会偏离理想锁相结果。同相位两束光合成为线偏振光,仅仅使用 HWP2 进行偏振控制实现锁相是这一模型的简化形式,这种简化形式在实际中是很重要的,也是实际工作中经常使用的方案。

该方案还可望拓展到多路,原理图如图 6 所示。这种方案实现高功率的可扩展性主要受偏振控制器、偏振片和输出光学元件承受大功率阈值等因素的限制,而且热管理复杂,结构不紧凑,不利于模块化集成;另外,此方案还受限于偏振与频率特性的依赖关系。就一个模块而言,两路光束经过不同的臂通过 Pol1 产生的偏振态与频率有很大的依赖关系,在后续的级联合成中,只有那些能够保证同样偏振态的频率成分才能在谐振腔中存在,所以输出一般为单频率谱线。这就要求在多路光束合成时,一般需要单个模块存在多个频率梳进行频率匹配,这就需要采用自组织机理<sup>[29,30]</sup>,给扩展造成严重瓶颈。

卢常勇等<sup>[31]</sup>进行了两路固体激光器的偏振锁相相干合成实验研究,在振幅比为 5 时合成效率仍然在 90% 以上。

综上,被动锁相相干偏振合成技术通过进行特殊的腔结构设计,使得参与合成的各路光束之间进行信息的耦合,整个腔对偏振方向具有选择性损耗,从而通过偏振态的控制实现了被动锁相相干偏振合成输出。

### 3.2 主动锁相相干偏振合成

一般情况下,两路线偏振光通过偏振合束器合成的光束为非偏振光,因此拓展受限。如果将参与合成的两束光之间的相位差锁定为  $n\pi$  ( $n$  为整数),则合成后的光束仍为线偏振光,合成后的线偏振光通过  $\lambda/2$  波片调节偏振态,又可以和另一束偏振方向垂直的线偏振光进行合成,从而实现多路光束的相干偏振合成。两路光束在未进行锁相和进行锁相后的偏振态变化如图 7 所示。可见,锁相是实现多路相干偏振合成的关键。基于主动锁相的相干偏振合成锁相算法在整个系统运行过程中寻求输出光强的极值点。当系统处于闭环时,输出光强取极值,则各路光束之间的相位差被锁定为  $n\pi$  ( $n$  为整数)。

基于上述原理,美国洛克希德马丁公司的 Uberna 等<sup>[32,33]</sup>进行了关于光纤激光器相干偏振合成的实验

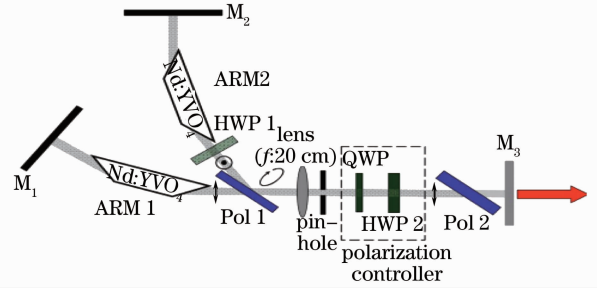


图 5 固体激光器被动锁相偏振合成示意图  
Fig. 5 Schematic of passive locked polarization combining of solid lasers

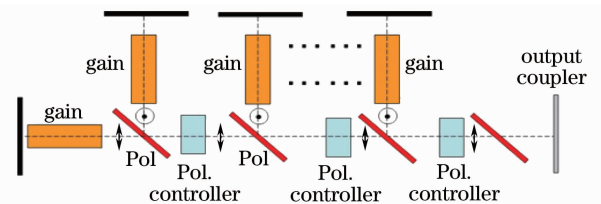


图 6 多路固体激光器被动锁相偏振合成原理示意图  
Fig. 6 Schematic of passively phase-locked polarization combining of multi-channel solid lasers

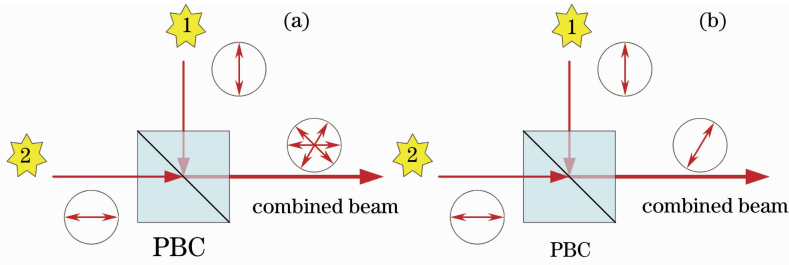


图 7 两路光束偏振合成原理图。(a)未锁相,(b)锁相

Fig. 7 Principle schematic of polarization combining of two lasers with (a) phase-unlocked and (b) phase locked

研究,进行了 4 路小功率光纤激光相干偏振合成的实验验证,得到了 96% 的合成效率和近衍射极限的光束质量。不久,该小组又在前一种方案的基础上进行改进,提出了一种新的方案,如图 8 所示。

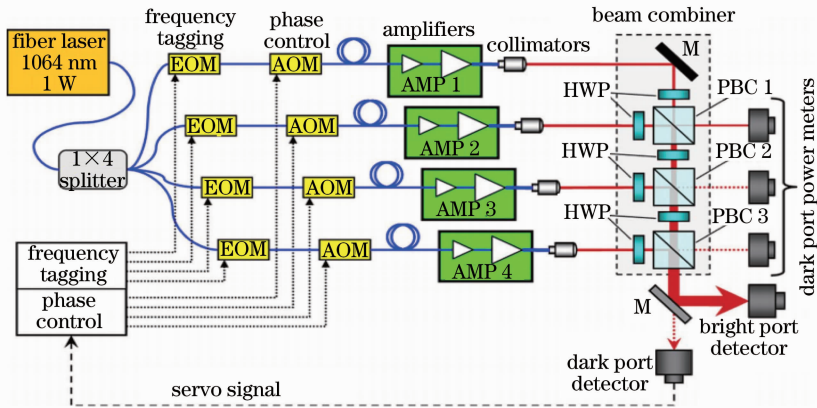


图 8 多路固体激光器被动锁相偏振合成原理示意图

Fig. 8 Principle schematic of coherent polarization combining of multi-channel fiber lasers based on MOPA structure

从单频种子激光器出来的单频线偏光被分束器分为 4 路,电光调制器(EOM)以特定的频率对每一路激光束进行标定,声光调制器(AOM)对每一路相位进行调制,每一路光束经过一个二级放大系统进行放大,4 个准直器对各路光束进行扩束准直。HWP 调整各路线偏振光束的偏振态,实现偏振合成。方案中采用 3 个功率计探测透过每个偏振合束器的光功率来优化光路的调节。合成后的一小部分光经过探测器转化为电信号反馈到控制系统,实现整个系统的锁相输出。系统闭环后的远场光斑如图 9 所示,输出功率为 25 W,合成效率达 94%<sup>[33]</sup>。

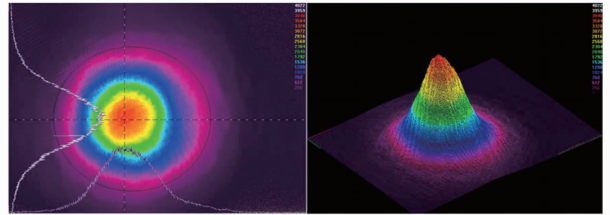


图 9 相干偏振合成远场光斑分布图

Fig. 9 Far-field profiles of coherent polarization beam combining

此种方案基于主振荡功率放大(MOPA)结构实现了相干偏振合成输出,合成效率高,光束质量好( $M^2 = 1.1$ ),与现有的相干合成技术相比较,有其独特的优势。可以进行任意路,任意功率比光束间的相干合成;合成效率理论上可以达到 100%,具有很好的可扩展性。此外,这种方案还具备下列特点:在近场和远场都是重叠的,没有旁斑;适应于大尺寸光束合成;控制与输出分离,容易调节和校准等。但是,随着合成路数的不断增加,最终能不能获得很高的输出功率主要取决于偏振合束器等光学器件所能承受的最大阈值功率。此外,受限于工艺、材料等的限制,PBC 的透射率与发射率不可能做到 100%,向多路扩展还受同轴性误差、相位残差等因素的影响,这些影响因素会导致整个系统合成效率的降低。值得注意的是,保偏光纤放大器的功率可提升性也会影响此方案向大功率发展。文献[33]已经报道,很多厂家已经可以提供高损伤阈值(兆瓦每平方厘米量级)的偏振器件,随着多维高精度调整系统的发展、光纤器件的快速发展和偏振自适应技术的进一步完善,此方案有望同时获得大功率,高光束质量的激光输出。



## 4 结 论

传统偏振合成方案易于实现,但是由于合成光束的偏振态不定,所以可扩展性受到限制,不适合向多路大功率发展。同轴多路非相干偏振合成合成效率高,光束质量好,系统具备一定的可扩展性,但是整个系统基于空间结构,系统体系复杂。由于没有相位控制系统,很难实现大功率的偏振合成输出。外腔被动锁相偏振合成合成效率高,光束质量好,但是向多路大功率拓展受限因素较多,不易实现。主动锁相偏振合成合成效率高,光束质量好,易于拓展。与其他偏振合成方案相比,有其独特的优势,有同时实现高功率高光束质量的可能性。

## 参 考 文 献

- 1 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
- 2 Lou Qihong, He Bing, Zhou Jun. Fiber lasers and it's coherent beam combination[J]. *Infrared & Laser Engng.*, 2007, **36**(2): 155~159  
楼祺洪, 何 兵, 周 军. 光纤激光器及其相干组束[J]. *红外与激光工程*, 2007, **36**(2): 155~159
- 3 T. Y. Fan. Laser beam combining for high-power, high-radiance sources[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.*, 2005, **11**: 567~577
- 4 Wu Bo, Liu Yongzhi. Coherent combination of high power fiber laser beams[J]. *Laser & Optoelectron. Progress*, 2007, **43**(8): 56~61  
伍 波, 刘永智. 高功率光纤激光器相干合成研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2007, **43**(8): 56~61
- 5 Li Yongzhong, Fan Dianyuan. Beam combining of fiber lasers[J]. *Laser & Optoelectron. Progress*, 2005, **42**(9): 26~29  
李永忠, 范滇元. 光纤激光器光束的叠加技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2005, **42**(9): 26~29
- 6 D. C. Jones, A. J. Turner, A. M. Scott *et al.*. A multi-channel phase locked fiber bundle laser [C]. *SPIE*, 2010, **7580**: 75801V
- 7 C. J. Corcoran, F. Durville. Experimental demonstration of a phase-locked laser array using a self-Fourier cavity[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **86**(20): 201118
- 8 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. Topics Quant. Electron.*, 2009, **15**(2): 248~256
- 9 T. M. Shay, J. T. Baker, A. D. Sanchez *et al.*. High power phase locking of a fiber amplifier array[C]. *SPIE*, 2009, **7195**: 71951M
- 10 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
- 11 S. J. Augst, J. Ranka, T. Y. Fan *et al.*. Beam combining of ytterbium fiber amplifiers[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, **24**(8): 1707~1715
- 12 Cheng Yong, Liu Yang, Xu Lixin. Recent progresses and development of fiber laser combining technology[J]. *Infrared & Laser Engng.*, 2007, **36**(2): 163~166  
程 勇, 刘 洋, 许立新. 激光相干合成技术研究新动向[J]. *红外与激光工程*, 2007, **36**(2): 163~166
- 13 T. M. Shay, V. Benham, J. T. Baker *et al.*. Self-synchronous and self-referenced coherent beam combination for large optical arrays[J]. *IEEE J. Sel. Topics Quant. Electron.*, 2007, **13**(3): 480~486
- 14 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
- 15 Northrop Grumman. Northrop Grumman Scales New Heights in Electric Laser Power, Achieves 100 Kilowatts from a Solid-State Laser[OL]. [2012-02-15]  
[http://www.irconnect.com/noc/press/pages/news\\_releases.html? d=161575](http://www.irconnect.com/noc/press/pages/news_releases.html? d=161575)
- 16 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 Quant. Electron.*, 2009, **15**(2): 269~280
- 17 T. H. Loftus, A. M. Thomas, M. Norsen *et al.*. Four-channel, high power passively phase locked fiber array[C]. Nara: Advanced Solid-State Photonics, 2008. WA4
- 18 X. L. Wang, P. Zhou, Y. X. Ma *et al.*. Active phasing a nine-element 1.14 kW all-fiber two-tone MOPA array using SPGD algorithm[J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**: 3121~3123

- 19 Ma Yanxing, Wang Xiaolin, Leng Jinyong *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
- 20 P. Sprangle, A. Ting, J. Penano *et al.*. Incoherent combining and atmosphere propagation of high-power fiber lasers for directed energy applications[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 2009, **45**(1-2): 138~148
- 21 C. Wirth, O. Schmidt, I. Tsybin *et al.*. High average power spectral beam combining of four fiber amplifiers to 8.2 kW [J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(16): 3118~3120
- 22 S. J. Augst, A. K. Goyal, R. L. Aggarwal *et al.*. Wavelength beam combining of ytterbium fiber lasers[J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(5): 331~333
- 23 A. Liu, R. Mead, T. Vatter *et al.*. Spectral beam combining of high power fiber lasers[J]. *SPIE*, 2004, **5335**: 81~88
- 24 Zhou Pu, Wang Xiaolin, Ma Yanxin *et al.*. Aperture filling——an important technique in coherent beam combining of fiber laser array[J]. *Laser & Optoelectron. Progress*, 2009, **47**(2): 021401  
周 朴, 王小林, 马阎星 等. 孔径填充——光纤阵列相干合成中的关键技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2009, **47**: 021401
- 25 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
- 26 Hongcheng Dong, Xiao Li, Chaoyang Wei *et al.*. Coaxial combination of coherent laser beams[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(11): 1012~1014
- 27 S. P. Ng, P. B. Phua. Coherent polarization locking of a diode emitter array[C]. *SPIE*, 2009, **7583**: 758311
- 28 P. B. Phua, Yuan Liang Lim. Coherent polarization locking with near-perfect combining efficiency[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(14): 2148~2150
- 29 E. J. Bochore, P. K. Cheo, G. G. King. Self-organization in a multicore fiber laser array[J]. *Opt. Lett.*, 2008, **28**(14): 1200~1202
- 30 Lu Changyong, Liu Xu, Liu Yang *et al.*. Coherent combining of two beams based on polarization phase locking[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(6): 1437~1441  
卢常勇, 刘 旭, 刘 洋 等. 基于偏振锁相的双光束相干合成[J]. *中国激光*, 2009, **36**(6): 1437~1441
- 31 R. Uberna, A. Bratcher, B. G. Tiemann. Coherent polarization beam combination[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 2010, **46**(8): 1191~1196
- 32 R. Uberna, A. Bratcher, B. G. Tiemann. Power scaling of a fiber master oscillator power amplifier system using a coherent polarization beam combination[J]. *Appl. Opt.*, 2010, **49**(35): 6762~6765