

数字化高平均亮度激光器的设想

许晓军

(国防科技大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 提高激光器输出亮度是激光器发展的一个重要方向, 就能否将目前迅速发展的数字化技术应用于激光器平均亮度的提高进行了仔细讨论。在分析了影响激光器平均亮度因素的基础上, 就八种提高平均亮度的技术方案进行了讨论和比较, 指出基于 MOPA 结构的相干合成方案是实现数字化高平均亮度激光器的最佳选择。进一步提出了数字化的高平均亮度激光器的设想和方案。

关键词 数字化; 亮度; 高能激光器; 光束合成; 光束质量

中图分类号 TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS200828s1.0047

Concept of Digital High-Average-Brightness Laser

Xu Xiaojun

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

Abstract High brightness is an important direction of development of laser. How to improve the average brightness of laser by the prevailing digital technology is discussed. Based on the analysis of the influencing factors of average brightness, eight projects for improving brightness are compared and analyzed, and the best way for digital high average brightness laser (DHABL) with the coherent beam combination of chains of master oscillator power-amplifier (MOPA) is chosen. The concept and the project of DHABL are presented.

Key words digitalization; brightness; high-energy laser; beam combining; beam quality

1 引言

高亮度是激光器重要特点之一。自从 1960 年激光器诞生以来, 激光器的高亮度特点使其在工业、医学、国防等许多领域得到了重要应用, 提高激光器输出亮度成为一个重要课题。提高亮度的最直接的手段就是提高单位时间内的激光能量即功率, 目前各种脉冲激光技术^[1]已经使激光器的峰值亮度得到了很大的提高。而高平均亮度意味着激光器能将更多能量发送到更远的距离, 因此在激光通信、定向能等许多领域倍受关注。提高平均亮度的一个重要手段就是提高激光器输出能量, 四十多年来, 高能激光历经了固体激光器、气动激光器、化学激光器等多种形式, 但终因体积太庞大或光束质量太差而落伍^[2]; 另一个重要手段就是提高输出光束质量, 因而在自适应光学产生后, 许多提高光束质量的技术, 如光束净化^[2]、相位共轭^[3]等在提高光束质量方面得到了许多应用。但由于激光器的效率问题, 提高输出能

量必将产生大量废热, 而废热大大影响了激光器的光束质量、体积和规模等。因而, 如何处理好平均亮度中的激光能量和光束质量这一对矛盾是提高平均亮度的根本所在。

数字技术已经在国民经济的各个领域展现了重要作用, 它的一个重要特点就是利用计算机技术使许多简单功能模块集成化, 规模化。目前数字化技术已经使得许多原先不可想象的产品走进了千家万户。本文从讨论激光器平均亮度入手, 分析了提高激光器平均亮度的几种手段, 提出了利用数字化技术实现高平均亮度激光器的设想。

2 激光器的平均亮度

2.1 激光器平均亮度的定义

亮度 B 是指光源在单位时间 dt 、单位面积 dS 和单位立体角 $d\Omega$ 内辐射出的光能量 dE , 若以单位频率 $d\nu$ 范围内的亮度即为谱亮度 B_ν , 则

$$B_\nu = \frac{dE(\nu)d\nu}{dt dS d\Omega}, \quad (1)$$

$$B = \int_0^\infty dE(\nu)d\nu / (dt dS d\Omega), \quad (2)$$

则平均亮度即为一段时间 T 内的亮度的平均,即

$$\bar{B} = \frac{1}{T} \frac{\int_0^\infty dE(\nu, t) d\nu dt}{dS d\Omega} = \frac{dP}{dS d\Omega}, \quad (3)$$

式中 P 为光源的平均功率, \bar{B} 的量纲仍为 $W/(mm \cdot mrad)^2$ 。

可以看出,平均亮度表达式中的分子部分正好表述了激光器的能量属性,而分母正好为光束质量属性,即通常所讲的光参量积($mm \cdot mrad$)。对于激光而言, S 为激光器输出口径的面积, Ω 为激光发散角所对应的立体角。因而就激光器的理想情况而言, Ω 直接取决于 S , 对一输出口径为 D , 波长为 λ 的理想激光器,其第一暗环所对应的发散角为

$$\theta = 1.22 \frac{\lambda}{D}, \quad (4)$$

则其平均亮度为

$$\bar{B}_{ideal} = \frac{P}{S\Omega} \propto \frac{P}{\lambda^2}. \quad (5)$$

即理想激光器的平均亮度仅取决于平均功率和波长。这也间接印证了成像光学系统不能改变亮度的概念,比如增大激光发射口径可以减小发散角,而亮度与光学系统无关,不发生改变。

2.2 影响激光器平均亮度的因素分析

实际情况下,由于激光器的发散角并非仅取决于口径的衍射,而是由输出激光的波阵面或相位共同决定。因而激光器的平均亮度除了由激光器平均功率和波长决定外,还取决于激光器的输出波前,即空间相干性。也就是说,造成激光器空间相干性下降的因素就是影响激光器平均亮度的主要因素。

对于半导体激光器而言,由于其单管增益介质很小,废热能量密度很高,导致不能采用大增益介质,因而只在单管条件下相干,可以利用多个单管以一定距离在空间排布成非相干的大功率半导体激光器阵列(LDA)来提高平均功率,亮度不可能提高;对于固体激光器而言,由于介质的热效应,造成了热透镜和热致双折射效应^[4],使输出光波面发生畸变,相干性下降,另外热效应也限制了固体激光器能够输出的平均功率,必须采用复杂的热管理系统;对于气动和化学激光器而言,尽管气流的高速流动带走了废热,但不均匀的流场也给输出激光造成了波面

扰动^[5],另外非常集中的增益区造成激光腔内极高的功率密度,光学元件的热效应也使输出光波面发生畸变。

总而言之,热效应是影响激光器平均亮度下降的主要因素,而高平均亮度所需要的激光器增益区的高度集中导致了热效应的高度集中,而热效应的高度集中却导致平均亮度降低,可见二者是相互制约的。

3 提高激光器平均亮度的几种方案

亮度是对系统有序性的衡量,因而不可能自发地提高亮度,但可以在有先验信息的条件下提高或牺牲局部而提高其它。对于 LDA 来说,由于是非相干光,可以减小管与管的间距缩小光源面积提高平均亮度,一些光束整形就是这样的思路;当然也可以用 LDA 抽运激光介质产生相干光源来提高亮度,即产生新的激光,这些不是本文所讨论的范畴。这里所讨论的几种手段主要包括以下三种类型:1) 共孔径输出,增加在激光器输出口径和发散角内的平均功率;2) 提高光束质量,减小激光器输出波前的起伏;3) 合成孔径,在增大输出口径的同时减小发散角,而增加平均功率。

3.1 共孔径输出,增加平均功率

单纯增加平均功率并不一定能提高激光器的平均亮度,比如非相干合成。而将多台激光器通过特定的手段在同一个发射口径内以一定的发散角内发射就可以提高平均亮度。

1) 偏振合成(Polarized beam combining)

利用激光光束的偏振特性,用偏振分光片可以实现两束线偏振激光以 p 光和 s 光的共孔径输出,如图 1 所示。这种方案可以将平均亮度提高一倍,因而只能在中低功率激光器中得到一些应用。

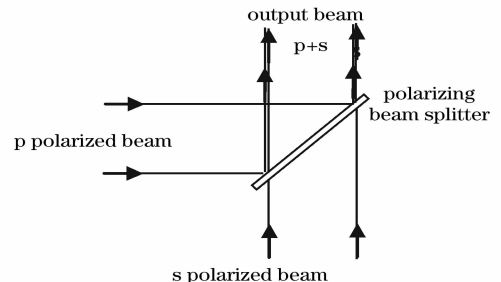


图 1 偏振光束合成示意图

Fig. 1 Schematic of polarized beam combination

2) 光谱合成(Spectral beam combining)^[6]

利用激光的单色特性,逆向使用光谱分光元件,可以实现多束不同谱线的激光不同方向入射而共孔

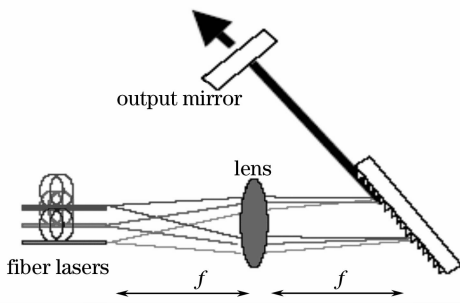


图 2 光束谱合成示意图

Fig. 2 Schematic of spectral beam combination

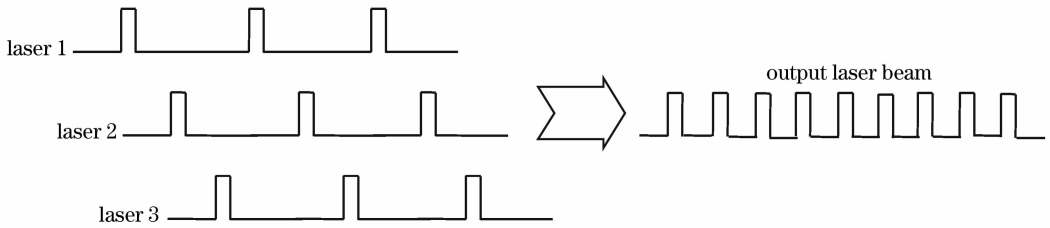


图 3 脉冲时域合成示意图

Fig. 3 Schematic of temporal beam combination

3.2 提高输出光束质量

对于已经成熟高能激光器，其输出功率已达 100 kW 甚至 MW，不需要或很难再进行光束合成，此时提高亮度的重要方法就是进一步提高光束质量，即对激光器输出波面的畸变进行校正，主要包括以下三种技术方案。

1) 自适应谐振腔^[7]

径输出，如图 2 所示。该方案利用了公式(2)的亮度由谱亮度合成的基本原理。该方案可以实现对平均亮度的较大提高，但受限于光谱分光元件的热效应。

3) 脉冲合成(Temporal beam combining)

当激光为重复频率的脉冲输出时，利用脉冲的占空比，将多束激光以一定的时间差共孔径发射，如图 3 所示，等效提高重复频率，实现平均功率的增加，见(3)式。该方案合成光束数量受限于脉冲宽度和斩波器运行速度。另外斩波器的热效应也是限制因素。

由于激光谐振腔的功率密度很高，增益介质和腔镜等的热效应会造成输出光束质量的下降甚至输出功率下降，严重时不能出光。自从自适应光学产生后，腔内自适应光学应运而生。利用波前传感器对腔内采样光束的波前畸变测量，控制腔内的变形反射镜，实现输出光束质量的优化和稳定，该技术已经在高能固体热容激光器中得到成功应用^[8](图 4)。

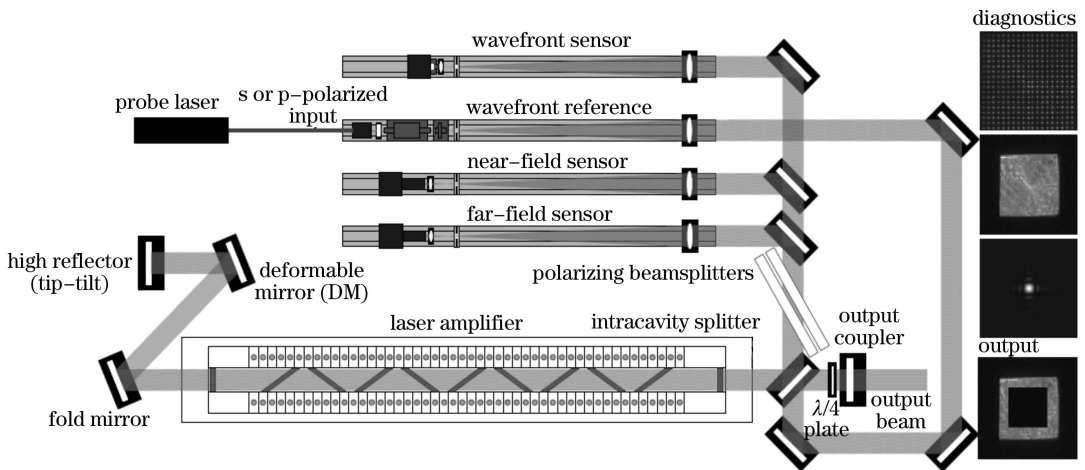


图 4 自适应谐振腔的系统结构

Fig. 4 Layout of the adaptively-corrected, unstable resonator

2) 光束净化^[2]

由于高平均功率激光器利用单谐振腔输出的困难，许多情况采用多级激光放大输出，而放大器增益介质的热效应或气流效应只能在腔外进行补偿。通过对输出光束波前畸变的测量，控制谐振腔外的变

形镜实现对光束波前的校正，完成光束净化，提高光束质量。该技术等同于激光大气传输时自适应光学对大气扰动的补偿(图 5)。

3) 相位共轭^[3]

利用高亮度的脉冲激光和某些材料的非线性

效应如受激布里渊散射,可以实现相位共轭波的反射即相位共轭镜(PCM),使热效应等造成的波前畸

变的抵消,提高光束质量。目前该技术已经在高亮度脉冲激光器领域得到成功应用^[9](图 6)。

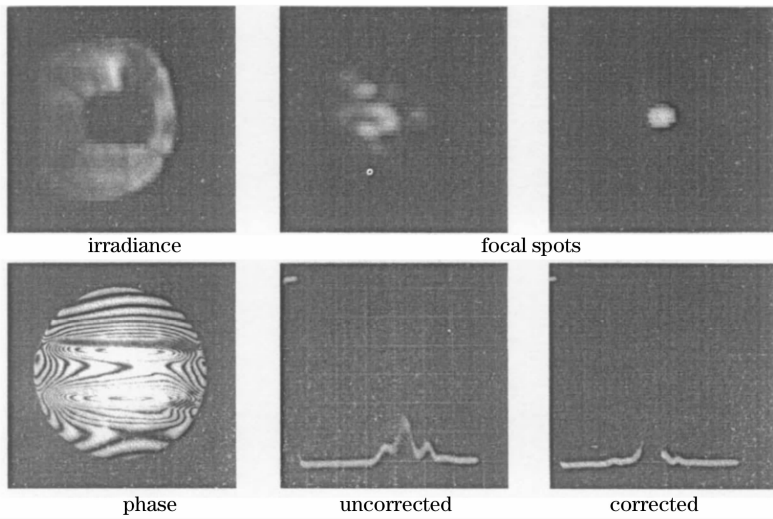


图 5 光束净化效果

Fig. 5 Beam correction for MIRACLE like laser

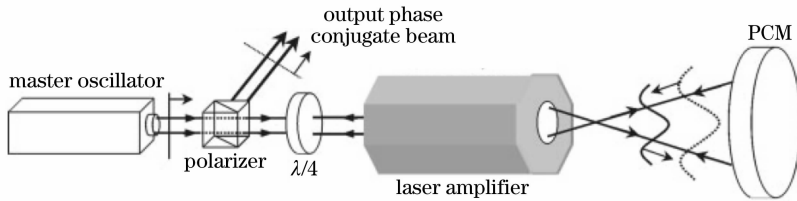


图 6 相位共轭系统示意图

Fig. 6 Layout of MOPA with a phase conjugate mirror

3.3 合成孔径输出,增加平均功率

上述方案均是在单一孔径中提高亮度,尽管前三种方案采用独立激光器输出,热管理容易,但提高亮度的同时必须考虑相应器件的热效应。目前采用多孔径输出,再利用锁相技术实现合成孔径输出,这样保持了原有光束质量,即减小了合成孔径中的发散角,提高了平均功率,实现了平均亮度的提高。这种锁相技术主要有基于主振荡功率放大器(MOPA)结构和自组织结构的两大类型的相干合成。

1) MOPA 相干合成^[9, 10]

主动控制的 MOPA 方案的基本结构如图 7 所示, MOPA 方案既可以应用于光纤激光器的相干合成,还可应用于固体激光器及化学激光器的相干合成。按照相位探测的差异又可以分为外差法^[9]、高频振荡法^[10]和梯度优化法^[11,12]。其中随机并行梯度下降法(Stochastic parallel gradient descent, SPGD)作为一种无波前传感器,依靠高速并行计算优化的自适应光学,必将使相干合成更加趋于实用

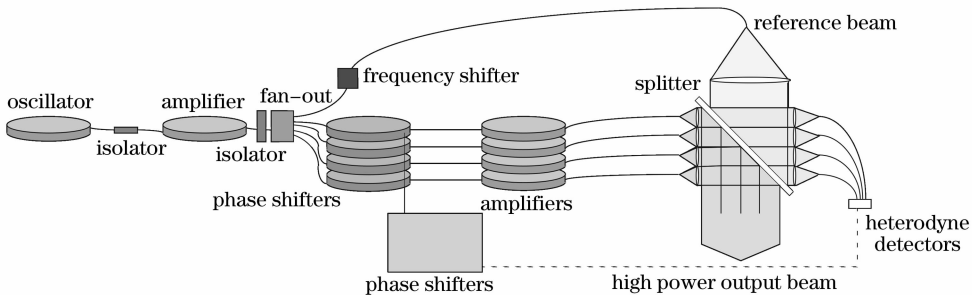


图 7 MOPA 相干合成系统结构

Fig. 7 Schematic of MOPA coherent beam combination

化和数字化。

2) 自组织相干合成^[13~16]

自组织的相干合成就是通过激光器阵列自身的组织调整达到多路输出激光的相位锁定,实现相干合成输出(图8)。该方法效率高,结构简单,光束质

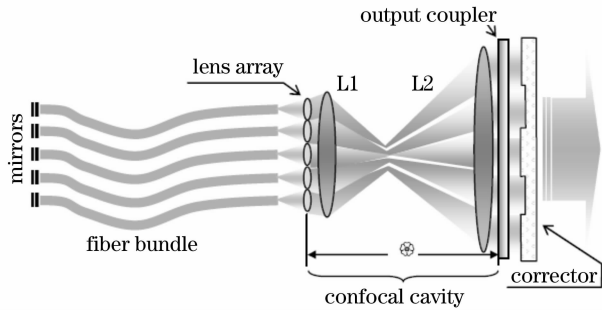


图8 自组织相干合成系统结构

Fig. 8 Schematic of self-organizing coherent beam combination

量好。目前主要途径有多芯双包层光纤,内腔耦合式相干合成和外腔式相干合成等。

4 数字化高平均亮度激光器

数字化技术能否应用于高平均亮度激光器,直接取决于提高亮度的技术方案。表1比较了上述方案在提高亮度的能力、原有激光器热管理、后添加光学元件的热效应、结构复杂性和体积等方面的差异。

从表1的比较可以看出,在实现提高平均亮度的能力方面,偏振合成方案1只能提高2倍,脉冲合成方案2的提高能力与脉冲激光的时间占空比有关,自组织相干合成方案8的研究结果表明相干性会随光束数量增加而下降,而光谱合成方案2,基于提高光束质量的方案4、5、6和MOPA相干合成方案7具有明显的优势。能否进行数字化,取决于方案能否具有以下几个方面的特点。

表1 提高亮度的各种方法的综合比较

Table 1 Comparison of projects for improving brightness

Projects	Capability	Laser thermal management	Optical elements thermal effect	Configuration	Size
1. Polarized BC	$2 \times \bar{B}$	Easy	Small	Simple	Compact
2. Spectral BC	$n \times \bar{B}$	Easy	Large	Simple	Compact
3. Temporal BC	$? \times \bar{B}$	Easy	Large	Complex	Bulky
4. Intracavity adaptive correction	\bar{B}_{ideal}	Difficult	Large	Complex	Bulky
5. Beam Correction	\bar{B}_{ideal}	Difficult	Large	Complex	Bulky
6. Phase conjugation	\bar{B}_{ideal}	Difficult	Large	Simple	Compact
7. MOPA coherent BC	$n \times \bar{B}$	Easy	Small	Complex	Bulky
8. Self-organizing coherent BC	$? \times \bar{B}$	Easy	Large	Simple	Compact

1) 控制数字化

数字化的最大特点就是运算能力强,能实现最优化控制。上述方案中提高光束质量的方案4、5和MOPA相干合成方案7采用了自适应光学技术,在波前相位测量和控制方面均对运算能力提出了很高的要求,方案3的时序控制也需要一定的运算控制,因而数字化技术可以在这四种方案中得到充分利用。另外,可以看出自适应光学技术对提高平均亮度都起到十分重要的作用,无论是单台大激光器提高光束质量,还是多台小激光器相干合成,因而数字化大有作为。

2) 集成简单化

数字化技术是对多个单功能模块的集成,因而数字化高平均亮度激光器是对多个激光器的集成,但数字化集成过程中是否会带来别的复杂问题也是能否实现的关键。这些问题中,热效应问题最为重要。上述方案中,4、5、6方案中提高光束质量的同

时并未对激光器本身的热问题采取任何措施,只是承认存在,降低效应,并未管理;而1、2、3、7、8方案将高平均亮度激光器的热管理化整为零,将大激光器的热管理化解为若干台小激光器分别处理,简化了热管理的困难。但与此同时1、2、3、8方案将热负载加在了同一孔径上,限制了合成光束的数量。而方案7光束合成的同时,发射孔径随之合成,热负载并未增加。

3) 功能模块化,易扩展

功能模块化是数字化产品的重要特征,而非对原有产品的修改和完善。其中方案4、5、6是采用自适应光学技术对原有大激光器的性能改善,很难实现模块化,更难扩展;方案1、2、3、7、8可以实现利用功能模块进行集成,但1、2、3、8存在关键元器件的限制,而方案7只存在探测和控制功能的限制,而这真是数字化技术的长处。另外,易扩展是数字化产品的另一特征,从扩展的角度而言,只有方案7能随

着数字化技术的发展而扩展。

综上所述,采用 MOPA 相干合成的是实现数字化高平均亮度激光器的最可行方案。目前,美国 Raytheon 公司已经提出了基于 MOPA 相干合成、发射光束控制和大气传输自适应光学校正为一体的高能激光系统结构^[17] (Adaptive photonic phase locked elements, APPLE),图 9 为 100 W 单模块结构外形图,图 10 为 APPLE 系统结构。

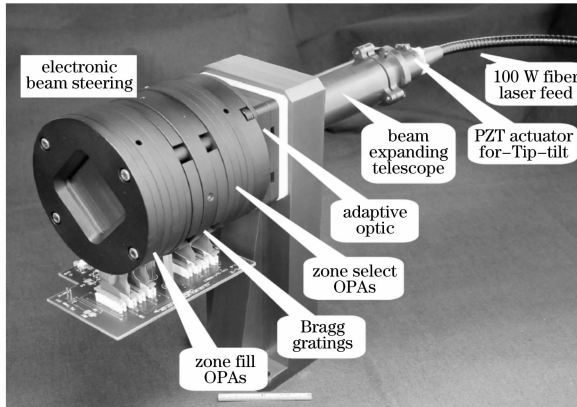


图 9

Fig. 9 Assembled APPLE subaperture

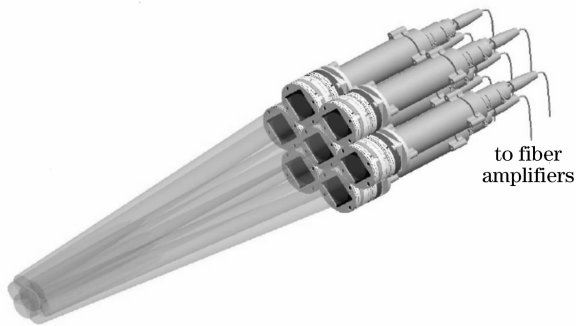


图 10

Fig. 10 Seven-aperture prototype array

APPLE 系统利用多路 100W 商用光纤的 MOPA 结构加扩束系统组成,利用 SPGD 算法结合倾斜+活塞像差的致动器实现相干合成。另外该方案中还考虑了大气的自适应光学校正和发射光束控制的功能。

当 APPLE 系统中去除发射光束控制和自适应光学部分,即为数字化高平均亮度激光器,图 11 给出了数字化高平均亮度激光器的结构图,激光器由光纤振荡器和多路光纤放大器组成多路 MOPA 链后扩束准直发射,利用光纤 XYZ 致动器和 SPGD 优化算法实现相干合成控制。该激光器的单 MOPA 链采用模块化结构,热管理到单模块为止;相干合成完全实现数字化控制,增加模块取决于计

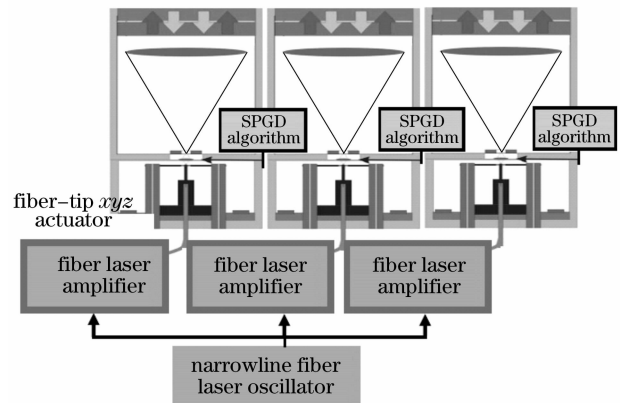


图 11 数字化高平均亮度激光器的结构

Fig. 11 Schematic of digital high average brightness laser 计算机运算控制水平;单模块可以实现功能扩展,兼顾大气传输自适应光学补偿等。从目前技术成熟度来说,建立一套基于光纤激光器 MOPA 结构相干合成的数字化高平均亮度激光器是可行的。

5 结 论

高平均亮度作为激光器发展的一个重要方向,国内外已经开展了许多相关研究。研究表明由于激光器的效率较低,热效应是影响激光器平均亮度下降的主要因素。而目前数字化技术已经在许多领域得到充分应用,使数字化技术在提高平均亮度方面得到应用成为一个重要研究方向。通过对提高激光器平均亮度的八种方案的对比分析研究,指出基于 MOPA 结构的相干合成方案是实现数字化高平均亮度激光器的最佳选择,并给出了设想方案。

参 考 文 献

- 1 N. Akozbek, C. M. Bowden. Femtosecond pulse propagation in air: Variational analysis[J]. *Phys. Rev. E*, 2000, **61**: 4540~4549
- 2 Martin Wacks. The alpha program[J]. *J. Directed Energy*, 2006, **1**: 317~311
- 3 Arnaud Brignon, Jean-Pierre Huignard. *Phase Conjugate Laser Optics* [M]. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2004
- 4 W. Koechner, M. Bass. *Solid-State Lasers: A Graduate Text* [M]. New York: Springer-Verlag Inc., 2003
- 5 S. W. Zelazny, W. A. Chambers, W. F. van Tassel *et al.*. Medium induced phase aberrations in continuous wave /CW/ hydrogen fluoride chemical lasers, wavefront distortions in power optics[C]. *Proc. SPIE*, 1981, **293**: 126~132
- 6 V. Daneu, A. Sanchez, T. Y. Fan *et al.*. Spectral beam combining of a broad-stripe diode laser array in an external cavity [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(6): 405~407
- 7 Kurt Edmund Oughstun. Intracavity adaptive optic compensation of phase aberrations[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1981, **70**(7), **71**(10), **73**(3)
- 8 K. N. LaFortune, R. L. Hurd, J. M. Brase *et al.*. Intracavity

- adaptive correction of a 10 kW, solid-state heat-capacity laser [C]. *Solid State & Diode Laser Technology Review*, Albuquerque, NM, United States, 2004
- 9 T. M. Shay *et al.*. Self-referenced locking of optical coherence by single-detector electronic-frequency tagging [C]. *Proc. SPIE*, 2006, **6102**: 61020V-1~61020V-5
- 10 P. F. McManamon *et al.*. Optical phased array technology[J]. *Proc. IEEE*, 1996, **84**(2):
- 11 Aaron J. Masino, Donald J. Linka. Adaptive optics without a wavefront sensor[C]. *Proc. SPIE*, **5895**: 58950T-1~58950T-9
- 12 Vorontsov M A, Carhart G W. Adaptive phase-distortion correction based on parallel gradient-descent optimization [J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(12): 907~909
- 13 Jesse Anderegg *et al.*. Coherently coupled high-power fiber arrays[C]. *Proc. SPIE*, 2006, **6102**: 61020U-1~61020U-5, 589501-1~589501-9
- 14 Monica L. Minden, Hans W. Bruesselbach *et al.*. Self-organized coherence in fiber laser arrays[C]. *Proc. SPIE*, 2004, **5335**: 89~97
- 15 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
- 16 He Bing, Lou Qihong, Zhou Jun *et al.*. Phase-locking and high coherent power output of two fiber lasers[J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(9): 1154~1158
- 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): 1154~1158
- 17 Terry A Dorschner. Adaptive Photonic Phase Locked Elements, 2007. MTO Symposium