

# 固体激光器波前畸变自适应校正技术及研究进展

郭广妍<sup>1,2</sup> 樊仲维<sup>1</sup> 余锦<sup>1</sup> 葛文琦<sup>1</sup> 康治军<sup>1,2</sup> 唐熊忻<sup>1</sup> 貂泽强<sup>1</sup> 王昊成<sup>1,2</sup> 王治昊<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>中国科学院光电研究院, 北京 100094; <sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 自适应光学(AO)作为一种主动光学补偿技术,由于具有结构简单、校正效果好、可闭环运行等优势,被大量用于校正激光波前畸变,并于近年逐渐应用于高能激光器系统中。综述了AO系统工作的基本原理,系统论述了近年来国内外在AO系统校正固体激光畸变方面的研究进展。按照校正固体激光器波前畸变的AO系统中有无采用波前传感器,将其分为无波前探测和有波前探测的AO校正技术进行介绍,分析了各个研究工作的关键性技术。最后总结了目前存在的技术难题,并对AO技术在固体激光器中的应用前景进行了展望。

**关键词** 激光器; 固体激光器; 自适应光学; 波前畸变; 光束质量

**中图分类号** TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP51.030001

## Solid-State Laser Distortion Wavefront Adaptive Correction Technology and Its Research Progress

Guo Guangyan<sup>1,2</sup> Fan Zhongwei<sup>1</sup> Yu Jin<sup>1</sup> Ge Wenqi<sup>1</sup> Kang Zhijun<sup>1,2</sup>  
Tang Xiongxin<sup>1</sup> Mo Zeqiang<sup>1</sup> Wang Haocheng<sup>1,2</sup> Wang Zhihao<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** As an active optical compensation technology, adaptive optics (AO) is used to correct wavefront distortion extensively because of its advantages such as simplicity, instantaneity and validity. In recent years, AO technology is increasingly used in high-energy laser system. We review the basic principles of the AO system, and discuss the research progress of solid-state AO correction technology at home and abroad. Introduction to two categories is presented according to if there is a wavefront sensor in an AO system to correct the wavefront distortion in solid state lasers, and the key technologies are introduced. Finally, the existing technical difficulties are summarized, and the application prospect is presented.

**Key words** lasers; solid-state laser; adaptive optics; wavefront distortion; beam quality

**OCIS codes** 140.3580; 140.6810; 140.3535; 220.1000; 220.1010;

## 1 引言

近年来,高精度跟瞄及测距系统<sup>[1]</sup>和空间科学<sup>[2]</sup>对高能量、高光束质量的脉冲激光提出了越来越高的要求。固体激光器由于可以实现稳定运行及维护方便等优点<sup>[3]</sup>成为获得高功率、高光束质量激光输出的首选,但是由于工作物质的热效应及光学元件的加工和装调误差、元器件微小瑕疵等不可避免地在输出光束中引入波前畸变。基于自适应光学(AO)的光束净化技术利用校正器补偿光束波前畸变,适用于脉冲或连续激光束的波前校正<sup>[4]</sup>。

AO的最初设想是Babcock<sup>[5]</sup>于1953年提出来的,到20世纪70年代该设想才得以实现。此后,又经过20余年的发展,AO技术日趋成熟,而且应用领域正在从大型望远镜和激光装置扩展到民用领域<sup>[6]</sup>。在激光

收稿日期: 2013-10-20; 收到修改稿日期: 2013-11-25; 网络出版日期: 2014-03-01

基金项目: 国家自然科学基金(61205136)、中国科学院光电研究院创新项目(Y30B16A13Y)

作者简介: 郭广妍(1988—),女,硕士研究生,主要从事激光技术及自适应光学系统方面的研究。

E-mail: guo Guangyan@aoe.ac.cn

导师简介: 樊仲维(1965—),男,研究员,主要从事全固态激光技术、衍射光学理论与器件、光学仪器设计与研制等方面的研究。E-mail: fanzw002@163.com(通信联系人)

波前校正方面,1985年中国科学院光电技术研究所研制的19单元激光波前校正系统,被用于“神光I”激光惯性约束聚变(ICF)装置上<sup>[7-8]</sup>。20世纪90年代初美国劳伦斯·利弗莫尔国家实验室(LLNL)建立了一个校正激光像散的AO系统<sup>[9]</sup>。之后AO系统被广泛应用于CO<sub>2</sub>气体激光器腔内校正<sup>[10]</sup>、全固体激光器像差控制<sup>[11-12]</sup>以及飞秒激光脉冲整形等各类光束控制系统<sup>[13-14]</sup>。本文介绍了各国AO校正固体激光器波前畸变技术的研究工作进展,并按照校正固体激光器波前畸变的AO系统中有无采用波前传感器(WFS),将其分为无波前探测和有波前探测的AO校正技术进行介绍。

## 2 AO用于光束畸变校正的原理简介

AO是以光学波前为对象的控制系统<sup>[15-16]</sup>,利用对光学波前的测量-控制-校正,使光学系统具有适应外界条件变化、保持良好运作状态的能力。有波前探测的AO系统<sup>[6]</sup>一般包括3个基本组成部分:波前探测器,波前控制器和波前校正器。探测器实时测量光学波前误差,控制器把探测器测得的畸变信息转化成校正器的控制信号,以实现对外部光学波前的控制,其工作原理如图1所示。

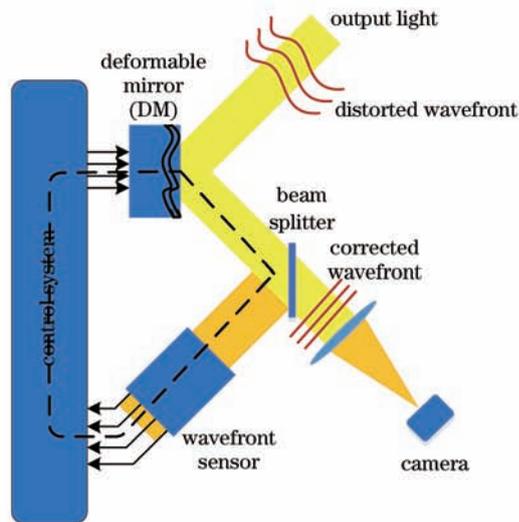


图1 光束净化原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of beam cleanup

哈特曼-夏克(H-S)传感器是常用的波前传感器,该传感器的基本构成是微透镜阵列和光斑采集相机,其原理如图2所示。微透镜阵列由按一定规律排列的子透镜组成,波前经微透镜后形成一个光斑阵列。将参考光的光斑质心作为基准,得到待测畸变波前光斑质心坐标与参考波前的光斑质心坐标之差,再经过几何关系推演即可求出待测畸变波前被阵列透镜分割的子透镜范围内的波前平均斜率。利用波前斜率信息,采用波前重构理论中的模式法或区域法可以直接重构出光波前。随着波前传感技术的不断进步,H-S传感器在子孔径数目比较多和参考光线很弱的AO系统中以及光学元件质量检测等方面的应用越来越广泛<sup>[17]</sup>。

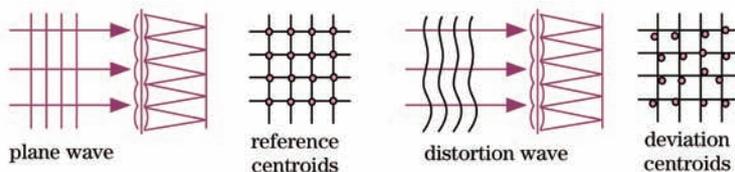


图2 H-S波前探测器原理图

Fig.2 Schematic diagram of H-S wavefront sensor

校正器是一种可以快速改变波前相位的能动光学器件。控制器提供的控制信号使校正器镜面发生形变,当镜面形状与畸变相位满足相位共轭关系时,畸变就会被抵消掉,从而波前得到恢复,现在使用较多的波前校正器件是变形反射镜(DM)。按照驱动方式的不同,传统的DM可以分为压电式、电磁式、电致伸缩式及液压式。其中压电式驱动的可变形反射镜响应速度最快。国内外用得比较普遍的分立式压电DM具有灵敏度高、校正自由度多、动态范围大等优点,但造价昂贵,结构复杂,加之随着控制电极的增多,信号处理电

路也变得复杂,导致整个系统的响应速度变慢。相比之下双电压电变形镜<sup>[18]</sup>具有工作电压低、动态范围大、结构简单、造价低廉以及系统响应速度快等优点。不足之处是它只适合于校正低阶像差。在多数情况下,这已能满足使用要求,因此仍有广阔的应用前景。

在很多AO系统中由于波前探测精度等问题,可以采用无波前探测的AO技术,即将畸变波前细分成多个子波前(分别对应着波前校正器的各个驱动信号),采用优化算法控制波前校正器的驱动信号,使系统的标量形式的性能评价函数趋于极值。此类AO系统主要由性能评价函数传感器(光强探测器或像清晰度传感器)、优化控制器、波前校正器三个基本部分组成。

随着高性能微电子机械系统(MEMS)波前校正器的开发,特别是1900年以来收敛速度更高的优化算法的发明,极大地促进了无波前探测AO系统的发展<sup>[19]</sup>。1997年,随即并行梯度下降(SPGD)优化算法被引入AO<sup>[20-22]</sup>系统,与传统的“爬山法”<sup>[7]</sup>相比,SPGD算法具有收敛速度快、效率高、便于在超大规模集成(VLSI)芯片中实现的突出优点<sup>[20]</sup>,因此近几年在AO中得到了广泛研究<sup>[23-27]</sup>。

实现DM镜面的受控变形实质上是确定镜面形变化量与各个驱动电极所产生的驱动静电力之间的关系<sup>[28]</sup>。如果用 $W$ 表示目标镜面的面形变化量(二维函数), $F$ 表示各个驱动电压加电压后产生的致动力,则镜面受控变形问题以函数形式表示为

$$F = f(W).$$

如果需要得到某个面形变化,即可通过上式求得在各个驱动器上需要施加力的大小,从而实现面形控制或者残余面形误差校正。

### 3 国内外AO技术校正固体激光畸变的研究现状及分析

AO主动补偿技术的主要用途之一即是校正激光器波前畸变,实现高平均功率、高光束质量的激光输出。Freeman等<sup>[29-31]</sup>在1978年首次报道了闭环AO在CO<sub>2</sub>气体激光谐振腔内的校正实验研究,将探测到的能量作为优化目标校正激光器波前畸变,并提出了使用倾斜镜代替DM的想法。本文按照校正固体激光器波前畸变的AO系统中有无采用波前传感器,将其分为无波前探测和有波前探测的AO校正技术进行介绍。

#### 3.1 无波前探测AO校正技术

无波前探测的AO校正技术由于可以在谐振腔内实现校正,能够克服波前探测精度有限等问题,被广泛应用于固体激光器的光束净化中。无波前探测的优化式AO方法在国内首先应用于中国科学院上海光学精密机械研究所的LF12 ICF波前畸变校正系统中<sup>[32]</sup>。

1985年中国科学院光电技术研究所研制的19单元激光波前校正系统,首次应用于“神光I”ICF装置<sup>[7-8]</sup>,

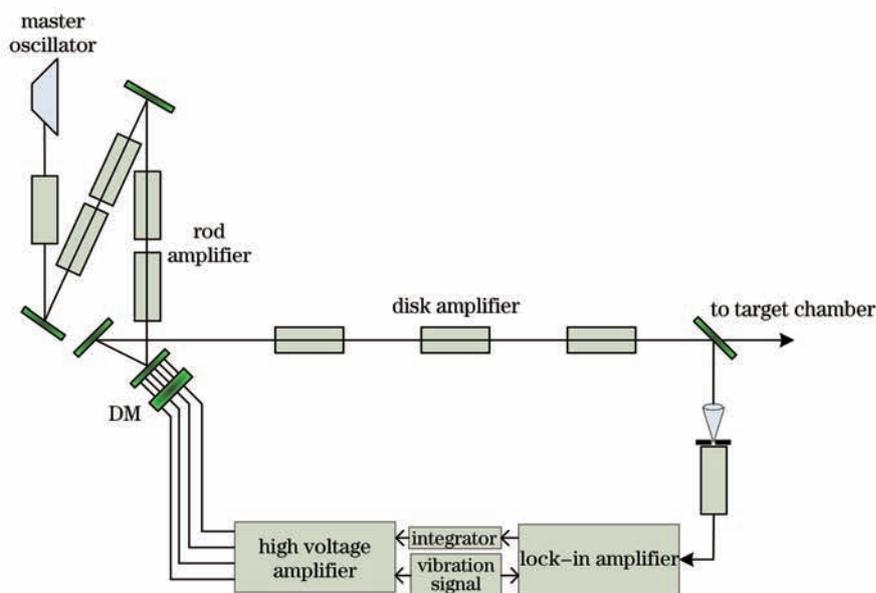


图3 “神光I”激光惯性约束核聚变装置中的激光波前校正系统

Fig.3 Laser wavefront correction system of “Shengguang I” ICF facility

在放大器系统内进行波前畸变校正,如图3所示。在光路的起始端引入一束与主激光波长相同、方向一致的小功率连续激光,即所谓的信标光,利用这一束激光作为光源进行校正,在光路的中段设置一个19单元的DM作为波前校正器。其主要目的是校正这一装置中的静态误差,校正后静态焦斑能量集中度提高了3倍,成为国际同类装置中首先成功试用的AO系统,比美国LLNL同类装置早6年<sup>[32]</sup>。

从1985年起,中国科学院光电技术研究所共为我国的ICF装置研制过5种12套自适应光学系统<sup>[32]</sup>,如表1所示。

表1 ICF中的自适应光学系统  
Table.1 AO systems for ICF facilities

| No. | ICF facility                  | Number of actuator DMs | Aperture of DM/mm | Wavefront sensor     | Sets | Year |
|-----|-------------------------------|------------------------|-------------------|----------------------|------|------|
| 1   | “Shengguang I”                | 19                     | $\Phi 70$         | Hill-climbing        | 1    | 1985 |
| 2   | “Shengguang III”<br>prototype | 45                     | 70×70             | Hartmann-Shack 22×22 | 1    | 2004 |
| 3   | “Shengguang III”<br>prototype | 45                     | 70×70             | Hartmann-Shack 22×22 | 8    | 2007 |
| 4   | “Shengguang II”<br>petawatt   | 55                     | $\Phi 380$        | Hartmann-Shack 22×22 | 1    | 2009 |
| 5   | “Shengguang III”              | 31                     | 390×390           | Hartmann-Shack 22×22 | 1    | 2011 |

1996年,Cherezova等<sup>[12]</sup>将AO系统应用到棒状Nd<sup>3+</sup>:YAG激光谐振腔内,采用双压电片DM校正波前畸变,获得了光束质量良好的激光输出。利用He-Ne激光作为畸变测量光束,近似认为He-Ne光的畸变就是腔内激光的畸变,用手动的方式对变形镜施加电压校正波前畸变。为了使激光束和变形镜的通光口径相匹配,使用了扩束系统,如图4所示。像差代表了激光在产生及传播过程中的畸变,像差系数偏离零越多畸变就越大。表2列出了校正前和校正后的前5阶像差系数,从表中可以看出,校正后的像差系数大约是校正前的1/5,这也表明双压电片变形镜对于低阶像差的校正效果较好。由于采用了手动方式、扩束系统等,对AO系统的校正效果产生了影响。在此基础上,对实验系统进行进一步研究,通过对DM施加电压实现了输出模式可控和像差校正的效果。

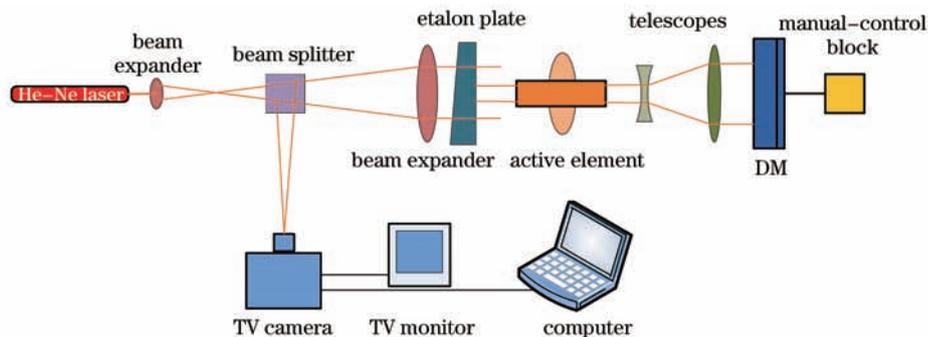


图4 棒状YAG激光器波前畸变检测和校正实验装置图

Fig.4 Experimental setup for testing and correcting aberrations of the rod YAG active element

表2 2.8 kW抽运功率下校正前后前5阶波前畸变系数对比图(单位: mm)

Table 2 Coefficients for the first five aberrations, with wavefront distortions before and after compensation (2.8 kW pumping)(unit: mm)

|                   | A <sub>1</sub> | A <sub>2</sub> | C <sub>1</sub> | C <sub>2</sub> | SA    |
|-------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-------|
| Before correction | -0.22          | 1.90           | -0.27          | -0.24          | -0.06 |
| After correction  | -0.02          | 0.41           | -0.17          | -0.05          | 0.03  |

1998年,Kugler等<sup>[33]</sup>也在Nd:YAG棒状激光器谐振腔内采用AO技术,进行了波前畸变补偿研究,如图5所示,其中Q-Rot指的是90°的石英转子。他们设计了动态稳定的谐振腔结构,同时应用4f像传递和双折射补偿技术,最终实现了连续偏振激光300 W的高功率输出;自适应镜作为谐振腔镜,得到了最高平均输出

功率 145 W, 光束质量因子  $M^2 \approx 2$  的激光输出。此谐振腔结构中使用的变形镜只有一个驱动电极, 通过给其施加电压产生形变来补偿光束畸变。在此基础上, 该研究小组还对变形镜的多个驱动器及闭环控制的发展方向进行了预测和展望。

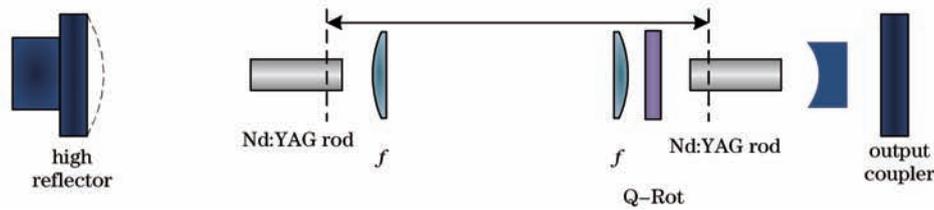


图5 有可变形反射镜和双折射补偿的动态稳定谐振腔装置

Fig.5 Set up of the dynamically stable resonator with birefringence compensation and adaptive high-reflecting mirror

2002年, Gerber等<sup>[34]</sup>进行了Nd:YAG棒状激光器腔内AO技术的研究工作。DM的驱动器采用环形排布方式, 腔内引入负透镜补偿热透镜效应。在不降低输出功率的前提下, 通过手动的方式对变形镜施加电压, 提高输出光束质量。研究表明, 这样的变形镜设计对像散和彗差的校正效果较好。该团队之后的研究表明, 通过不同的驱动器排布方式和数目可以实现不同波前畸变的高效校正, 输出光束质量因子  $M^2$  改善30%以上。

2009年, 国防科学技术大学的王三宏<sup>[35]</sup>等针对无波前探测的优化式AO光学系统, 引入SPGD算法, 并在主振荡功率放大器(MOPA)系统上进行了实验。实验系统的工作带宽为100Hz, 分析了限制SPGD AO系统校正精度的因素。

针对SPGD优化算法, 中国科学院光电技术研究所也进行了大量的研究工作<sup>[36-38]</sup>。2010年, 中国科学院光电技术研究所进行了61单元AO系统SPGD算法动态实验研究<sup>[39]</sup>, 校正后远场光斑峰值提高了近10倍。设计的基于现场可编程门阵列(FPGA)的专用SPGD算法处理机也具有一定的通用性, 稍加改造即可实现更多单元或更高的处理速度。2012年, 该机构采用端抽运的Nd:YAG激光器进行了板条激光光束净化实验<sup>[40]</sup>。光束在进入AO系统前要首先经过扩束镜, 实现跟DM的匹配。采用37单元的双压电片变形镜, 以探测到的光束质量为优化目标函数, 采用SPDG优化算法, 实现了高效、实时的闭环校正效果。

无波前探测的AO校正技术在AO技术发展之初就已经有应用, 并在很多方面取得了很好的效果。但是即使对静态波前畸变的校正, 无波前探测的AO技术系统也往往需要多次调节才能达到较好的效果, 而且在优化算法收敛速度低的情况下, 无波前探测的AO系统校正带宽远远不能满足需求。要扩大无波前探测AO技术的应用, 提高优化算法的收敛速度成为了关键点。

### 3.2 有波前探测AO校正技术

有波前探测的AO校正技术根据光束质量评价标准定义一个标量的系统性能评价函数, 采用优化算法控制变形镜的校正电压使系统性能评价函数逐渐逼近极值以达到光束净化的目的。

1991年美国国家点火装置(NIF)利用AO控制激光波前畸变, 结合空间小孔滤波, 显著地提高了激光束到目标靶上的聚焦效果, 波前像差得以校正。NIF系统简图如图6所示, 其中黑色的部分表示波前控制单元。用H-S传感器进行波前探测, 将39个驱动器的大孔径变形镜作为放大器中的一个腔镜来使用, 对激光

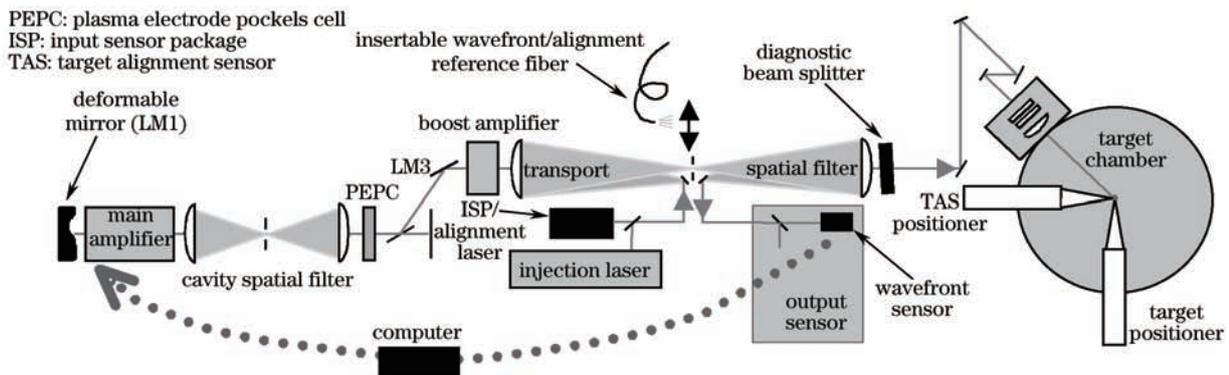


图6 简化的单光束NIF光学系统图

Fig.6 Simplified optical system for one NIF beamlet

束波前畸变进行校正<sup>[41]</sup>。采用 AO 系统进行闭环控制以后, NIF 系统的输出能量集中度有了很大的提高, 基本满足打靶的光束需求。

1998年, Akaoka等<sup>[42]</sup>报道了闭环校正钛宝石啁啾脉冲放大(CPA)的腔外 AO 技术。用于校正脉宽 100 fs、输出功率 0.25 TW、重复频率 30 Hz 的激光器波前畸变。由于闭环工作时系统工作带宽较小, 对倾斜项的校正效果并不是很好。对于这个问题, 可以采用倾斜镜和 DM 共同工作的校正方法解决<sup>[41]</sup>。

美国密歇根大学分别于 1998 年<sup>[43]</sup>和 2004 年<sup>[43]</sup>在太瓦级飞秒激光装置上使用 DM 校正波前畸变, 最终使峰值功率密度提高至  $1.0 \times 10^{22} \text{ W/cm}^2$ 。在 1998 年的工作中, 采用开环的形式, 主要是针对非线性效应进行的波前补偿, 用横向剪切干涉仪进行波前测量, 并在不同的激光器系统上进行实验, 最终得到了斯特雷尔比接近 0.88 的校正结果。2004 年他们在原来的基础上进行闭环实验, 在更大程度上校正了畸变波前, 提高了系统的实时应变能力。

2000 年, 在并行和分布式图像处理的会议上, LLNL 报道了他们设计的热容非稳腔内 AO 系统<sup>[44]</sup>。谐振腔设计原理如图 7 所示。实验中用波前传感器实时探测波前, 近场和远场相机分别探测近场和远场光斑, DM 和倾斜校正器被安装在谐振腔同一端。在对激光器波前畸变成分探测、分析的基础上, 同时采用倾斜镜和 DM 两种校正器件。在激光放大器之前对波前进行校正, 降低了对 DM 损伤阈值的要求。该研究的最大成果是实现了实时闭环控制, 同时开发应用了可移植、低花费的硬件系统, 提高了 AO 系统的工作效率和效果。该设计中完成的硬件系统, 对以后 AO 的闭环校正技术的发展起到了积极的促进作用。针对此系统, LLNL 进行了持续的研究和改进工作, 2004 年报道了其最新的研究结果, 环围能量分析表明, 一倍衍射极限内包含光斑总能量的 33%, 三倍衍射极限内的能量大于光斑总能量的 60%<sup>[45]</sup>。其光学设计如图 8 所示。

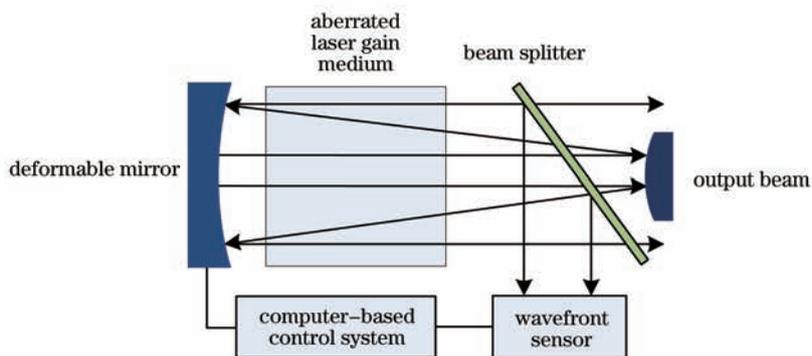


图 7 自适应谐振腔示意图

Fig.7 Schematic adaptive resonator

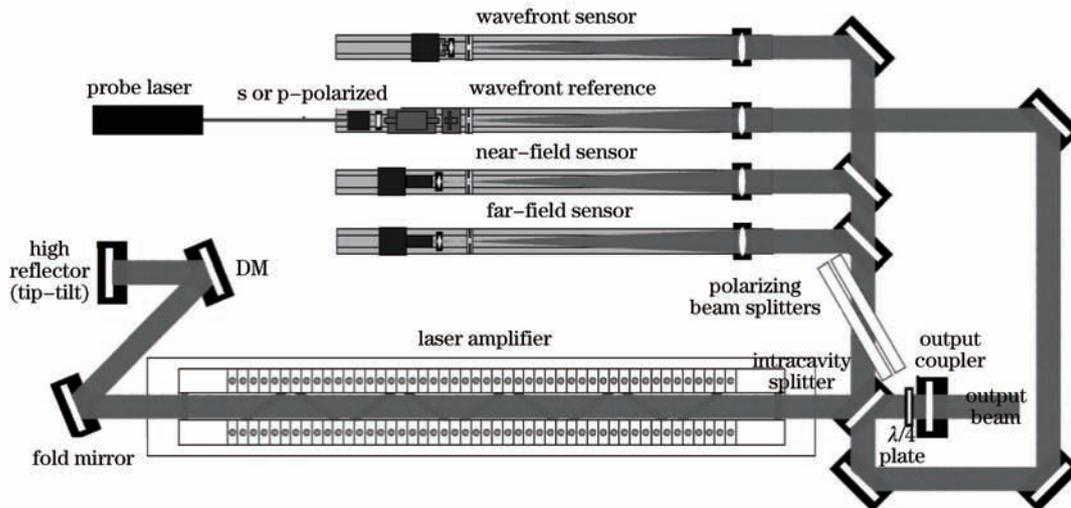


图 8 自适应校正非稳腔系统平面图

Fig.8 System layout of the adaptively corrected unstable resonator

2002年, Baumhacker等<sup>[46]</sup>在10TW钛宝石激光装置ATLAS上使用双DM系统校正波前畸变,同时实现相位和幅度调制,使功率密度提高了1个数量级,如图9所示。第一个DM置于压缩光栅之前,用于校正激光晶体引起的波前畸变并平滑光束的能量分布,避免损坏光栅。第二个DM用于压缩光栅之后,校正光栅在压缩脉冲过程中引入的波前畸变,同时确保高的功率密度。

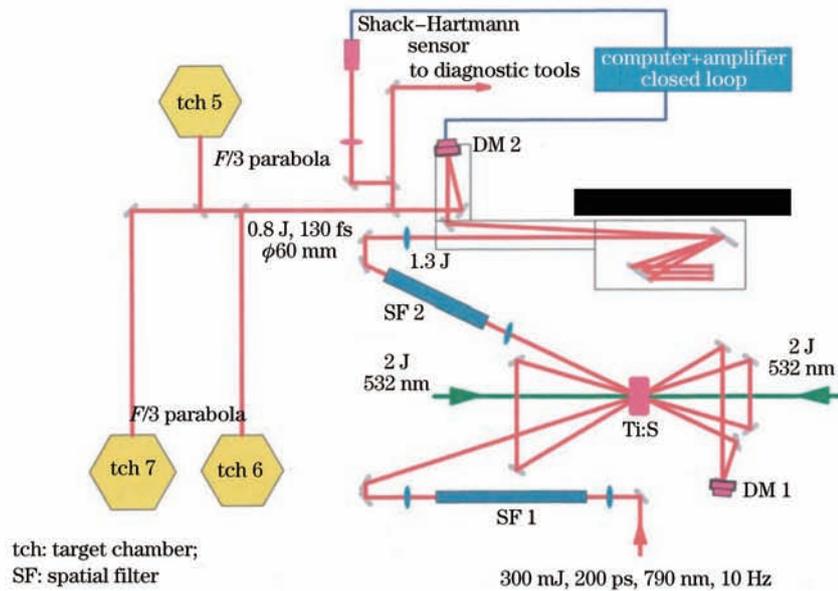


图9 ATLAS 实验装置图

Fig.9 Setup of the final amplifier in the ATLAS facility

2003年, Ito等<sup>[47]</sup>等报道了50 Hz、7 TW的钛宝石激光器,如图10所示。闭环工作时系统的工作带宽为10 Hz,这种固体激光器的波前畸变一般都是静态的,因此在一次校正之后,即使不能实现闭环,其校正效果也很好。结果显示校正后斯特列雷比由0.073提高到了0.865,被测波前的波峰波谷值(PV)也提高了15倍。

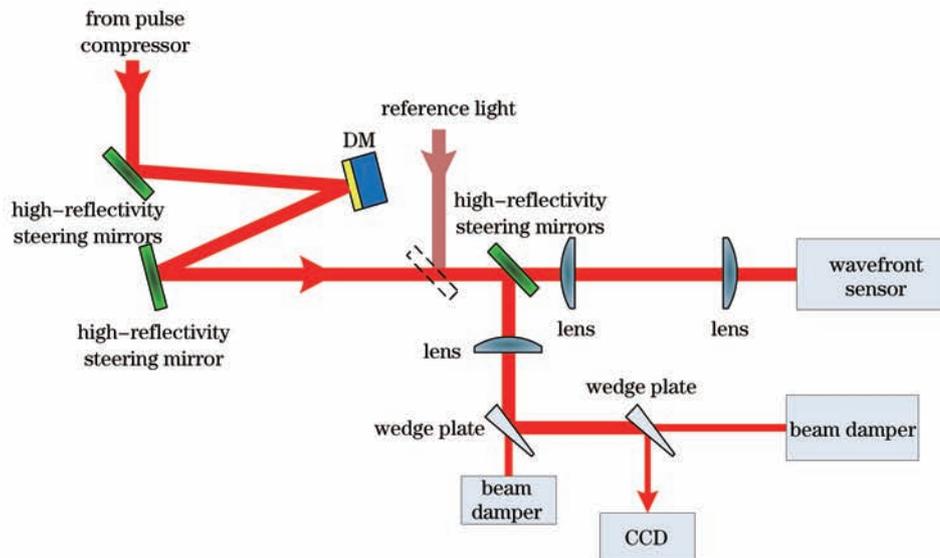


图10 闭环激光脉冲实验装置图

Fig.10 Experimental setup of closed-loop wavefront corrections for laser pulses

2004年,法国强激光应用实验室(LULI)报道了他们在100TW激光装置上使用DM校正波前畸变的研究<sup>[48]</sup>,如图11所示。使用了大孔径的DM,并采用自行研制的三波长剪切干涉仪作为波前探测器,最终实现了斯特列雷比接近0.9的校正效果,激光器的能量集中度有明显提高。

2008年,加拿大200TW激光装置ALLS也使用DM来提高峰值功率密度,获得了超过 $1.0 \times 10^{20} \text{ W/cm}^2$ 的峰值功率密度<sup>[49]</sup>。此研究突破了变形镜的损伤阈值、波前传感器与激光束的大小匹配以及实时观测校正效

果的关键技术,同时达到了百太瓦级功率输出、高能量密度、 $10^9$ 的脉冲对比度及 10 Hz 重复频率的参数指标,当时处于世界领先地位。

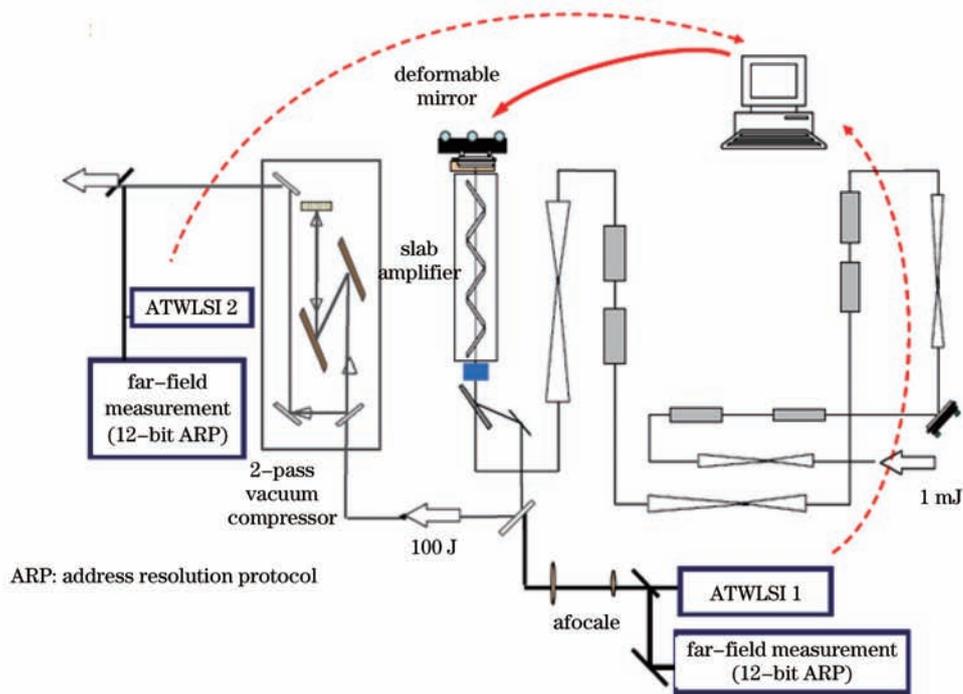


图 11 LULI 100 TW 激光系统的自适应闭环实验结构图

Fig.11 Scheme of the adaptive optics closed-loop system using the 100 mm deformable mirror on the LULI 100 TW chain

2007年,华中科技大学的杨振刚等<sup>[50]</sup>利用有波前探测的AO系统在腔内校正激光畸变。采用从外腔引入信标光的方法,通过H-S传感器探测激光器工作时畸变对信标光束的影响来研究激光器腔内畸变,经AO系统补偿后测试激光器输出光束的变化,如图12所示。通过计算机进行反馈控制系统,实现了闭环校正的效果。校正后的激光器输出功率提高了3倍,光束质量也有了明显的改善,如图13所示。

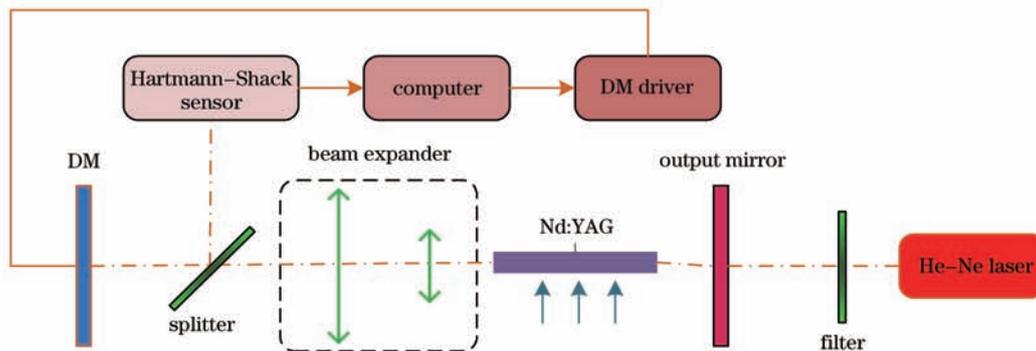


图 12 腔内自适应光学系统示意图

Fig.12 Schematic of intracavity adaptive optics system

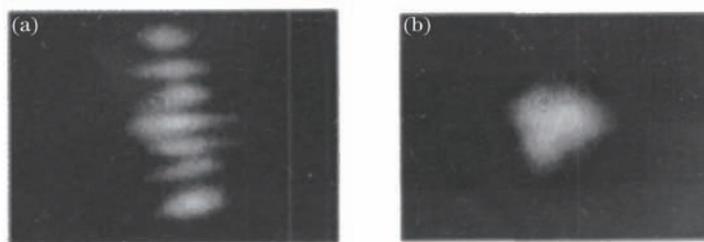


图 13 (a)校正前和(b)校正后的输出光束

Fig.13 Output beam (a) before and (b) after compensation

中国工程物理研究院分别于2006年和2010年在SILEX-I超短脉冲激光装置上进行了AO波前校正系统实验研究<sup>[51]</sup>,研究了波前校正系统对波前畸变、远场焦斑及能量集中度的改善情况。校正后的波前PV值为 $0.438\ \mu\text{m}$ ,波前均方根(RMS)值为 $0.052\ \mu\text{m}$ ,从而为进一步完善波前校正系统的使用做好了准备。

2011年,中国科学院上海光学精密机械研究所的Ren等<sup>[52]</sup>,针对啁啾脉冲放大的钛宝石激光器,在近焦点的位置利用AO技术对球面波进行畸变校正,如图14所示。将DM置于扩束系统前,利用小口径的DM实现了对大光斑的校正;将波前探测器(剪切干涉仪)置于离轴抛物面镜的近焦点位置,即探测球面波的波前,避免了光束和探测器的匹配问题;可以校正包括放大器、压缩器及聚焦镜等所有元件及光路传播过程中产生的波前畸变。最终在10 Hz重复频率及单脉冲输出下实现了斯特雷尔比约0.9的校正效果,输出功率密度高达 $2.59\times 10^{21}\ \text{W}/\text{cm}^2$ 。

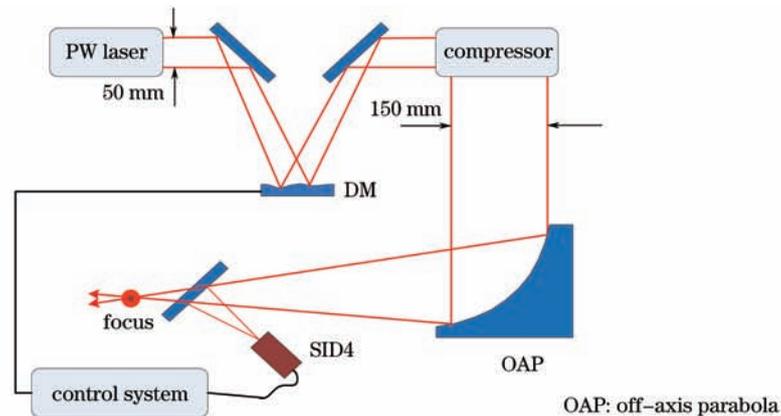


图14 啁啾脉冲放大钛宝石激光器自适应光学实验装置图

Fig.14 AO experimental schematic layout for the Ti:sapphire laser of CPA

2013年,中国工程物理研究院应用电子研究所向汝建等<sup>[53]</sup>针对固体板条MOPA结构激光器进行了光束质量主动控制研究。他们在研究激光系统输出光束特性的基础上,研制了大动态范围空间分辨率DM,设计实现了强光下AO闭环校正控制,光束质量 $\beta$ 因子平均值从7.4改善到4.06。

在可供选择的优化算法的收敛速度普遍很低的情况下,无波前探测的AO校正系统的校正带宽远小于有波前探测的AO校正系统的校正带宽。这一点对特别要求实时性的AO系统来说是致命的缺陷。进入大规模应用阶段之后,有波前探测的AO校正技术在众多应用领域都取得了空前的成功。

## 4 结束语

固体激光器由于其小体积、大能量输出、高稳定性等优点,成为高能激光器的首选,而能够实时、主动提高输出光束质量的AO畸变补偿方法受到了国内外专家学者的普遍关注,并已经广泛地应用到ICF等高能激光器的科学研究和工程应用中。但是,影响AO技术在固体激光器中应用的因素也有很多,如在高功率密度的激光束中进行畸变校正时,DM的损伤阈值限制了AO技术的应用。其他因素诸如波前探测器的探测精度、DM的最大形变量、各个元件之间的匹配及优化算法的收敛速度等都会影响系统的校正效果。因此,提高AO系统的可靠性和稳定性是当前亟待研究和解决的问题。

AO技术具有实时克服光学系统各种动、静态误差影响,保持系统工作在最佳状态的能力,因而能够提高激光器的输出光束质量,应用范围更加广泛。随着AO系统中单元技术的突破,如DM和微透镜阵列的制造技术及工艺(微电子、微机械和微光学技术)、系统工作的实时性的提高等,AO技术在固体激光器波前畸变校正的应用范围将大大扩展。

## 参考文献

- 1 Hammer D X, Ferguson R D, Bigelow C E, *et al.*. Precision targeting with a tracking adaptive optics scanning laser ophthalmoscope [C]. SPIE, 2006, 6138: 613811.
- 2 Wizinowich P L, Le Mignant D, Bouchez A H, *et al.*. The W. M. Keck Observatory laser guide star adaptive optics system: overview [J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 2006, 118(840): 297-309.

- 3 Wang Hailin, Huang Weiling, Zhou Zuoyou, *et al.*. Experimental study of a high power and high efficiency CW diode-pumped Nd: YAG laser [J]. Optics & Laser Technology, 2004, 36(1): 69–73.
- 4 Yang Ping, Ning Yu, Lei Xiang, *et al.*. Enhancement of the beam quality of non-uniform output slab laser amplifier with a 39-actuator rectangular piezoelectric deformable mirror[J]. Opt Express, 2010, 18(7): 7121–7130.
- 5 Babcock, Horace W. The possibility of compensating astronomical seeing[J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 1953, 65(386): 229–236.
- 6 Jiang Wenhan. Adaptive optics [J]. Nature Magazine, 2006, 28(1): 7–13.  
姜文汉. 自适应光学技术[J]. 自然杂志, 2006, 28(1): 7–13.
- 7 Jiang Wenhan, Huang Shufu, Wu Xubin. Hill climbing wavefront correcting system [J]. Chinese J Lasers, 1988, 15(1): 17–21.  
姜文汉, 黄树辅, 吴旭斌. 爬山法自适应光学波前校正系统[J]. 中国激光, 1988, 15(1): 17–21.
- 8 Jiang Wenhan, Huang Shufu, Ling Ning, *et al.*. Hill climbing wavefront correcting system for large laser engineering [C]. SPIE, 1988, 965: 266–272.
- 9 J T Salmon, E S Bliss, T W Long, *et al.*. Real-time wavefront correction system using a zonal deformable mirror and a Hartmann sensor [C]. SPIE, 1991, 1542: 459–467.
- 10 A V Kudryashov, V V Samarkin. Control of high power CO<sub>2</sub> laser beam by adaptive optical elements [J]. Opt Commun, 1995, 118(3): 317–322.
- 11 U Greiner, H Klingenberg. Thermal lens correction of a diode-pumped Nd:YAG laser of high TEM<sub>00</sub> power by an adjustable-curvature mirror [J]. Opt Lett, 1994, 19(16): 1207–1209.
- 12 T Y Cherezova, L N Kaptsov, A V Kudryashov. Cw industrial rod YAG: Nd<sup>3+</sup> laser with an intracavity active bimorph mirror [J]. Appl Opt, 1996, 35(15): 2554–2561.
- 13 F Druon, G Chériaux, J Faure, *et al.*. Wave-front correction of femtosecond terawatt lasers by deformable mirrors [J]. Opt Lett, 1998, 23(13): 1043–1045.
- 14 M R Armstrong, P Plachta, E A Ponomarev, *et al.*. Versatile 7-fs optical parametric pulse generation and compression by use of adaptive optics [J]. Opt Lett, 2001, 26(15): 1152–1154.
- 15 J W Hardy. Adaptive Optics for Astronomical Telescopes [M]. Oxford: Oxford University Press, 1998.
- 16 Jiang Wenhan. Modern Instrumentation Technology and Design [M]. Beijing: Science Press, 2003. 1049–1114.  
姜文汉. 现代仪器仪表技术与设计[M]. 北京: 科学出版社, 2003. 1049–1114.
- 17 Jiang Wenhan, Xian Hao, Yang Zeping, *et al.*. Applications of Shack-Hartmann wavefront sensor [J]. Chinese J Quantum Electronics, 1998, 15(2): 228–235.  
姜文汉, 鲜浩, 杨泽平, 等. 哈特曼波前传感器的应用 [J]. 量子电子学报, 1998, 15(2): 228–235.
- 18 Lin Xudong, Xue Chen, Liu Xinyue, *et al.*. Current status and research development of wavefront correctors for adaptive optics [J]. Chinese Optics, 2012, 5(4): 337–350.  
林旭东, 薛陈, 刘欣悦, 等. 自适应光学波前校正器技术发展现状[J]. 中国光学, 2012, 5(4): 337–350.
- 19 Wang Sanhong. Application of Stochastic-Parallel-Gradient-Descent Adaptive Optics Techniques in Beam Cleanup [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2009. 5–6.  
王三宏. 随机并行梯度下降自适应光学技术在光束净化中的应用[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2009. 5–6.
- 20 Vorontsov M A, Carhart G W, Ricklin J C. Adaptive phase-distortion correction based on parallel gradient-descent optimization [J]. Opt Lett, 1997, 22(12): 907–909.
- 21 Carhart G W, Ricklin J C, Sivokon V P, *et al.*. Parallel perturbation gradient descent algorithm for adaptive wavefront correction [C]. SPIE, 1997, 3126: 221–227.
- 22 Polejaev V I, Vorontsov M A. Adaptive active imaging system based on radiation focusing for extended targets [C]. SPIE, 1997, 3126: 216–220.
- 23 M A Vorontsov, V P Sivokon. Stochastic parallel gradient descent technique for high-resolution wave-front phase-distortion correction [J]. J Opt Soc Am A, 1998, 15(10): 2745–2758.
- 24 M A Vorontsov, G W Carhart, M Cohen, *et al.*. Adaptive optics based on analog parallel stochastic optimization: analysis and experimental demonstration [J]. J Opt Soc Am A, 2000, 17(8): 1440–1453.
- 25 M A Vorontsov. Decoupled stochastic parallel gradient descent optimization for adaptive optics: integrated approach for wavefront sensor in formation fusion [J]. J Opt Soc Am A, 2002, 19(2): 356–368.

- 26 T Weyrauch, M A Vorontsov. Dynamic wave-front distortion compensation with a 134-control channel submillisecond adaptive system [J]. *Opt Lett*, 2002, 27(9): 751-753.
- 27 M Yu, M A Vorontsov. Bandwidth estimation for adaptive optical systems based on stochastic parallel gradient descent optimization [C]. *SPIE*, 2004, 5553: 189-199.
- 28 Tan Zuojun, Chen Haiqing, Kang Jingran, *et al.*. Experiment on correction ability to the static wavefront aberration of MEMS-DMs [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(6): 1070-1073.  
谭佐军, 陈海清, 康竟然, 等. MEMS微变形反射镜校正波前静态畸变实验[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(6): 1070-1073.
- 29 R H Freeman, R J Freiberg, H R Garcia. Adaptive laser resonator [J]. *Opt Lett*, 1978, 2(3): 61-63.
- 30 R R Stephens, R C Lind. Experimental study of an adaptive-laser resonator [J]. *Opt Lett*, 1978, 3(3): 79-81.
- 31 C Harney. Active laser resonator control techniques [J]. *Appl Opt*, 1978, 17(11): 1671-1672.
- 32 Jiang Wenhan, Zhang Yudong, Rao Changhui, *et al.*. Progress on adaptive optics of institute of optics and electronics, chinese academy of sciences [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(9): 0900106.  
姜文汉, 张雨东, 饶长辉, 等. 中国科学院光电技术研究所的自适应光学研究进展[J]. *光学学报*, 2011, 31(9): 0900106.
- 33 N Kugler, S Seidel, H Weber. High-power Nd:YAG laser with birefringence compensation and adaptive HR-mirror [J]. *Laser Physics*, 1999, 9(1): 299-303.
- 34 M Gerber, A V Kudryashov, T Graf. Intracavity beam shaping of a Nd:YAG laser [C]. *SPIE*, 2002, 4629: 58-66.
- 35 Wang Sanhong, Liang Yonghui, Ma Haotong, *et al.*. Beam cleanup experiments for master oscillator power amplifier laser system by adaptive optics based on stochastic parallel gradient descent algorithm [J]. *Chinese J Lasers*, 2009, 36(10): 2763-2768.  
王三宏, 梁永辉, 马浩统, 等. 随机并行梯度下降自适应光学对主振荡功率放大器激光系统的光束净化实验[J]. *中国激光*, 2009, 36(10): 2763-2768
- 36 Yang Huizhen, Li Xinyang, Jiang Wenhan. Simulation and analysis of stochastic parallel gradient descent control algorithm for adaptive optics system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(8): 1355-1360.  
杨慧珍, 李新阳, 姜文汉. 自适应光学系统随机并行梯度下降控制算法仿真与分析[J]. *光学学报*, 2007, 27(8): 1355-1360.
- 37 Yang Huizhen, Li Xinyang, Jiang Wenhan. Comparison of several stochastic parallel optimization control algorithms for adaptive optics system [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, 20(1): 11-16.  
杨慧珍, 李新阳, 姜文汉. 自适应光学系统几种随机并行优化控制算法比较[J]. *强激光与粒子束*, 2008, 20(1): 11-16.
- 38 Yang Huizhen, Chen Bo, Li Xinyang, *et al.*. Experimental demonstration of stochastic parallel gradient descent control algorithm for adaptive optics system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(2): 205-210.  
杨慧珍, 陈波, 李新阳, 等. 自适应光学系统随机并行梯度下降控制算法实验研究[J]. *光学学报*, 2008, 28(2): 205-210.
- 39 Zhang Jinbao, Chen Bo, Wang Caixia, *et al.*. Dynamical wave-front distortion correction experiment based on stochastic parallel gradient descent algorithm for 61-element adaptive optics system [J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(3): 668-674.  
张金宝, 陈波, 王彩霞, 等. 61单元自适应光学系统随机并行梯度下降算法动态实验研究[J]. *中国激光*, 2010, 37(3): 668-674.
- 40 Xiang Lei, Bing Xu, Ping Yang, *et al.*. Beam cleanup of a 532-nm pulsed solid-state laser using a bimorph mirror [J]. *Chin Opt Lett*, 2012, 10(2): 021401.
- 41 R A Zacharias, N R Beer, E S Bliss, *et al.*. National Ignition Facility alignment and wavefront control [C]. *SPIE*, 2004, 5341: 168-179.
- 42 K Akaoka, S Harayama, K Tei, *et al.*. Close loop wavefront correction of Ti:sapphire chirped pulse amplification laser beam [C]. *SPIE*, 1998, 3265: 219-225.
- 43 S-W Bahk, P Rousseau, T Planchon, *et al.*. Generation and characterization of the highest laser intensities ( $10^{22}$  W/cm<sup>2</sup>) [J]. *Opt Lett*, 2004, 29(24): 2837-2839.
- 44 L M Flath, J R An, J M Brase, *et al.*. Real-time control system for adaptive resonator [C]. *SPIE*, 2000, 4118: 119-125.
- 45 K N LaFortune, R L Hurd, E M Johansson, *et al.*. Intracavity adaptive correction of a 10-kW solid state heat-capacity laser [C]. *SPIE*, 2004, 5333: 53-61.
- 46 H Baumhacker, G Pretzler, K Witte, *et al.*. Correction of strong phase and amplitude modulations by two deformable mirrors in a multistaged Ti:sapphire laser [J]. *Opt Lett*, 2002, 27(17): 1570-1572.
- 47 S Ito, H Ishikawa, T Miura, *et al.*. Seven-terawatt Ti:sapphire laser system operating at 50 Hz with high beam quality

- for laser Compton femtosecond X-ray generation [J]. Appl Phys B, 2003, 76(5): 497-503.
- 48 J Zou, B Wattellier, J Fuchs, *et al.*. High focusability performance obtained on the LULI 100TW laser facility by use of a dielectric coated deformable mirror [C]. SPIE, 2004, 5333: 37-44.
- 49 S Fourmaux, S Payeur, A Alexandrov, *et al.*. Laser beam wavefront correction for ultra high intensities with the 200 TW laser system at the advanced laser light source [J]. Opt Express, 2008, 16(16): 11987-11994.
- 50 Yang Zhengang, Chen Haiqing, Li Jie, *et al.*. Lasers aberration compensation using an intra-cavity adaptive [J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(12): 2205-2208.  
杨振刚, 陈海清, 李捷, 等. 内腔自适应光学系统校正激光器畸变[J]. 光学学报, 2007, 27(12): 2205-2208.
- 51 Xie Na, Wang Xiaodong, Hu Dongxia, *et al.*. Experimental study on wavefront correction in ultra-short laser facility [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2010, 22(7): 1433-1435.  
谢娜, 王晓东, 胡东霞, 等. 超短脉冲激光装置波前校正实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(7): 1433-1435.
- 52 Ren Zhijun, Liang Xiaoyan, Yu Hongliang, *et al.*. Efficient spherical wavefront correction near the focus for the 0.89 PW/29.0 fs Ti:sapphire laser beam [J]. Chin Phys Lett, 28(2): 024201.
- 53 Xiang Rujian, He Zhongwu, Xu Honglai, *et al.*. Closed-loop beam quality control for MOPA solid slab laser [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(2): 358-362.  
向汝建, 何忠武, 徐宏来, 等. 固体板条 MOPA 激光光束质量主动控制[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(2): 358-362.