

文章编号: 0253-2239(2007)12-2205-4

# 内腔自适应光学系统校正激光器畸变\*

杨振刚 陈海清 李 捷 周华东

(华中科技大学 光电子科学与工程学院, 武汉 430074)

**摘要:** 固体激光器中,增益介质由于热沉积产生的热畸变严重影响了激光器的稳定性、输出功率和光束质量。研究了一种内腔自适应光学系统校正激光器腔内畸变的方法,利用微机电变形反射镜作为固体激光器的内腔全反射镜,通过控制变形镜的面型改善激光器输出光束的模式及功率。从腔外引入的一束信标光通过激光器内腔后反射出腔外,用波前探测器可测得激光器工作时腔内畸变对此信标光的影响,并通过搭建的自适应光学系统平台可闭环校正此畸变。实验结果表明,闭环校正后,激光器的输出功率提高了近 3 倍,且激光光束质量得到了明显的改善。

**关键词:** 自适应光学; 畸变补偿; 输出功率; 光束质量

中图分类号: TN241 文献标识码: A

## Lasers Aberration Compensation Using an Intra-Cavity Adaptive Optical System

Yang Zhengang Chen Haiqing Li Jie Zhou Huadong

(*Institute of Optoelectronic Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074*)

**Abstract:** Thermal induced distortion in the gain element is the main obstacle to be overcome in the scaling of solid-state lasers to very high output powers. The method of compensating the aberration by using an intra-cavity adaptive optical system was studied. A MEMS deformable mirror using as the intra-mirror of the solid-state laser could improve the mode and output power of the laser. The effect of the intra-cavity aberration to the beaconing light form out-cavity could be measured with a wave-front detector and an adaptive optic system has been used to compensate the aberration. The experimental result shows that the output power is increased nearly 3 times and the beam profiles are improved obviously by closed loop automatic optimization of the adaptive optic system.

**Key words:** adaptive optics; aberration compensation; output power; beam quality

## 1 引 言

在固体激光器中,激光棒内热沉积是在所难免的,它会导致激光棒内温度分布不均、热应力和受热形变等现象,因此产生热透镜效应<sup>[1~4]</sup>。为弥补热透镜效应,可采用激光棒端面研磨成曲面法、引入透镜法等方法。虽然一个好的内腔结构能有效地减小热透镜效应的球面畸变影响,但不能对非球面畸变进行补偿,当热量增加时,最终导致激光器效率降低,并会形成多模振荡<sup>[5]</sup>。本文提出一种从外腔引入一束参考光作为信标光的方法,通过哈特曼-夏克

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的腔内畸变;并通过自适应光学系统补偿此畸变,测试激光器输出光束的变化。这种方式最特别的是通过计算机反馈控制系统,能对非球面畸变进行补偿,自动优化得到较好的光束质量。

## 2 实验装置

### 2.1 激光器的腔内设置

为了研究内腔变形镜在改变激光器输出光束质量中的作用,构造如图 1 所示的 Nd:YAG 谐振腔。

\* 国家自然科学基金(10476010)资助课题。

作者简介: 杨振刚(1979—),男,湖北人,博士研究生,主要从事光电控制及自适应光学等方面的研究。

E-mail: mikleyang@163.com

导师简介: 陈海清(1947—),男,江苏人,教授,博士生导师,主要从事光电探测和机电系统技术方面的研究。

E-mail: hqchen@mail.hust.edu.cn

收稿日期: 2007-03-26; 收到修改稿日期: 2007-05-28

Nd:YAG 的尺寸为  $\phi 3 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ , 利用电弧灯进行抽运; 输出镜的透射比为 6%; 腔中加入 5 倍的扩束系统, 是为了降低入射到变形镜上的功率密度, 并使得入射到变形镜上的振荡光束口径覆盖尽可能多的电极。在腔内加入一半透半反镜(对波长 632.8 nm 半透半反, 对波长 1064 nm 透射比为 99%), 腔

外由 He-Ne 激光器发出的信标光(前置一 632.8 nm 波长的滤光片, 带宽 12 nm)通过激光棒入射到变形镜(DM)上, 通过半透半反镜反射到哈特曼-夏克传感器上探测波前, 输入到计算机, 经过运算得到变形镜输入电压, 这样就形成一个闭环控制系统。

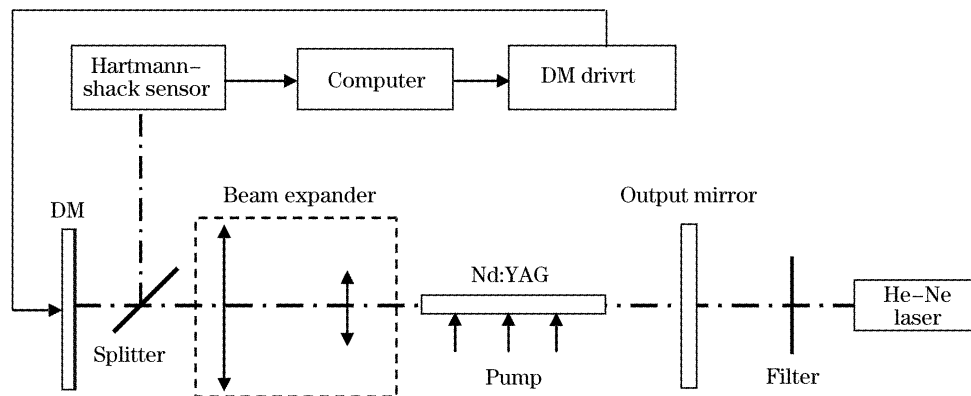


图 1 实验系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram for experimental system

## 2.2 变形反射镜

实验选用的是基于微机电系统(MEMS)技术的连续面型变形反射镜<sup>[6]</sup>, 其口径为 25 mm, 驱动电极数为 37 通道, 最大变形量为 4  $\mu\text{m}$ , 功率密度阈值为 12.5  $\text{kW}/\text{cm}^2$ 。实验中, 电极上电压限制在 200 V 以下。变形镜的电极分布和编号如图 2 所示。

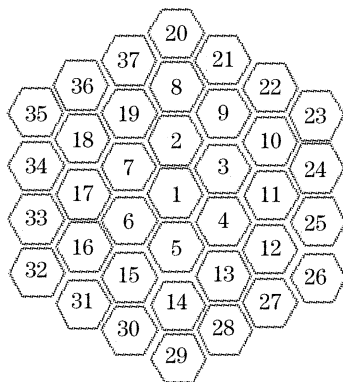


图 2 变形反射镜驱动电极分布图

Fig. 2 Electrode pattern of deformable mirror

## 3 实验过程及结果分析

### 3.1 腔内畸变对信标光的影响

初始时未给变形镜施加电压。激光器未工作时, 可测得信标光波前的波峰-波谷(PV)值为 5.9  $\mu\text{m}$ ; 当抽运功率为 900 W 时, 激光器开始工作, 输出功率为 0, 此时波峰-波谷值为 8.70  $\mu\text{m}$ 。实验中分别测试了不同抽运功率条件下的信标光波前波峰-波谷值及激光器输出功率, 如表 1 所示。

表 1 不同抽运功率下的波峰-波谷值及输出功率

Table 1 Peak-Valley value and output power for different pump power

Pump power / W	PV value of beaconing light / $\mu\text{m}$	Output power / mW
0	5.90	0
900	8.70	0
1100	8.70	0
1300	8.72	48
1500	8.73	110
1700	8.75	230

由表 1 可知, 激光器刚开始工作时, 腔内产生的畸变使得信标光波前发生较大的变化。激光器开始工作之后, 随着抽运功率的增加, 输出功率会相应的增加, 但信标光波前的波峰-波谷值基本上没变化。

### 3.2 变形镜对输出功率的影响

为测得变形反射镜对激光器输出功率的影响, 在抽运功率一定时, 手动给变形镜施加不同的电压模式, 测得的信标光波前波峰-波谷值及激光器输出功率如表 2 所示。表中 Random 指的是随机给不同电极施加不同的电压值, 从中取了两组有代表性的数据。

由表 2 可知, 在一定抽运功率条件下时, 改变变形镜的电压输入模式, 会使得信标光的波前发生相应的变化。当信标光波前接近初始值时, 可认为对激光器腔内畸变进行了一定的补偿, 使得激光器的输出功率得到较大的提高, 为闭环校正激光器腔内

畸变提供了实验基础。

表 2 不同电压输入模式时的波峰-波谷值及输出功率

Pump power /W	Voltage input mode	PV Value of Beaconsing light / $\mu\text{m}$	Output power /mW
0	Null	5.90	0
1300	Null	8.72	48
1300	Defocus	8.97	22
1300	X,Y tilt	7.56	96
1300	Random	9.20	0
1300	Random	7.95	75

### 3.3 控制电压矩阵的测试

微变形反射镜的响应模式研究对于精确控制镜面形状来说很重要。每个电极的通电情况对整个镜面面型有影响<sup>[7]</sup>。在理想情况下,变形镜上每一点的变形量应与某个电极所施加电压的平方成线性关系,而且每一点的变形量是各个电极单独作用时候的叠加。设  $c_j = V_j^2$ , 其中  $c_j$  表示第  $j$  号电极控制电压的二次方程,则镜面面型变化为

$$\Delta S(x, y) = S(x, y) - S_0(x, y) = \sum_{j=1}^p c_j \varphi_j(x, y), \quad (1)$$

其中  $S(x, y)$  表示变形镜施加电压后的面形,  $S_0(x, y)$  表示变形镜初始未加电压时候的面形,  $\varphi_j(x, y)$  为光学影响函数,  $p$  为电极数目。

由于表述光学波前的优势,泽尼克(Zernike)多项式常常用于表述圆域定义内的光学波前,本实验中所采用的变形镜变形量相当微小(中心最大变形量  $\leq 4 \mu\text{m}$ ),所以变形镜的面型也可以用泽尼克多项式来描述:

$$S(x, y) = \sum_{k=1}^N \alpha_k \cdot z_k(r, \theta), \quad (2)$$

式中  $\alpha_k$  为第  $k$  项泽尼克多项式系数;  $z_k$  为第  $k$  项泽尼克多项式;  $N$  为多项式项数。

为了使微变形镜能够产生需要的变形,必须知道控制电压矩阵,而控制电压矩阵就是通过测量变形镜影响函数矩阵来实现的。实验中选取 37 个电极分别加压 100 V 得到 37 组电压值。用 Zygo 干涉仪测得 37 组表示面形的泽尼克系数值,将这 37 组泽尼克系数分别减去对应的原始面形系数,就可以得到每个电极单独加 +100 V 电压时的镜面变形系数矩阵,这就是我们要求的表征变形镜表面面形的泽尼克多项式系数矩阵。根据变形和电压平方成正比,可以推导出单位电压施加时的影响函数矩阵<sup>[8]</sup>。

将第  $j$  个电极加电压后的影响函数  $\varphi_j(x, y)$ ,  $j = 1, 2, \dots, P$  表示为泽尼克多项式的形式为

$$\varphi_j(x, y) = \sum_{k=1}^M b_{kj} z_k(x, y), \quad (3)$$

其中  $b_{kj}$  表示第  $j$  个电极施加电压后泽尼克多项式的第  $k$  项系数。

将(3)式代入(1)式中可得

$$\begin{aligned} \Delta S(x, y) &= S(x, y) - S_0(x, y) = \\ &= \sum_{j=1}^p c_j \left[ \sum_{k=1}^M b_{kj} z_k(x, y) \right] = \\ &= \sum_{k=1}^M \left( \sum_{j=1}^p c_j b_{kj} \right) z_k(x, y) = \\ &= \sum_{k=1}^M \alpha'_k z_k(x, y), \end{aligned} \quad (4)$$

定义一个新的泽尼克多项式系数

$$\alpha'_k = \sum_{j=1}^p c_j b_{kj}, \quad k = 1, 2, \dots, M \quad (5)$$

则(4)式可用矩阵形式表示为

$$\mathbf{a}_c = \mathbf{Bc}, \quad (6)$$

$\mathbf{a}_c = [a'_1 a'_2 \dots a'_M]^T$  是表示变形镜表面面形的  $M \times 1$  阶泽尼克多项式系数矩阵;  $\mathbf{c} = [c_1 c_2 \dots c_p]^T$  是关于电压的阶矩阵;  $\mathbf{B}$  是  $M \times P$  阶电压影响函数矩阵,是由  $b_{kj}$  组成。对  $\mathbf{B}$  求广义逆得到:  $\mathbf{c} = (\mathbf{B}^T \cdot \mathbf{B})^{-1} \cdot \mathbf{B}^T \cdot \mathbf{a}_c$ , 记  $\mathbf{A} = (\mathbf{B}^T \cdot \mathbf{B})^{-1} \cdot \mathbf{B}^T$ , 显然  $\mathbf{A}$  就是我们所要求的控制电压矩阵。

### 3.4 自适应光学系统闭环校正腔内畸变

由变形反射镜、哈特曼-夏克传感器、计算机和变形反射镜电压驱动器构成的自适应光学系统(如图 1 所示)可闭环校正信标光的波前畸变。以信标波前的初始波峰-波谷值(5.90  $\mu\text{m}$ )为优化目标,通过软件设计,利用自适应光学系统的闭环自动校正能力,使得校正后的信标光波前波峰-波谷值接近初始波峰-波谷值。实验中在不同抽运功率的条件下分别对信标光波前进行了闭环校正,实验数据如表 3 所示。图 3 则是抽运功率为 1700 W 时,用 CCD 测量的激光光束校正前后的光斑图形。

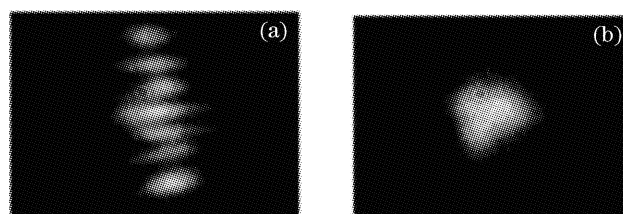


图 3 校正前后的输出光束

Fig. 3 Output beam before (a) and after (b) compensation

表 3 校正前后的波峰-波谷值及输出功率

Table 3 PV value and output power before and after compensation

Pump power /W	PV value of beaconing light / $\mu\text{m}$		Output power /mW	
	Pre-compensation	After compensation	Pre-compensation	After compensation
0	5.90	—	0	—
1300	8.72	6.85	48	128
1400	8.72	6.93	76	205
1500	8.73	7.02	110	310
1600	8.73	7.12	168	420
1700	8.75	7.20	230	546

### 3.4 实验结果分析

实验中的腔内畸变对信标光的影响并不能精确地反映腔内畸变对振荡光束的影响,因为信标光的波长和振荡光束波长并不一致,且信标光通过内腔的次数是一次,而振荡光束的振荡次数则无法确定。但通过实验可证实,对信标光进行校正后可提高激光器的输出功率以及光束质量,所以我们可以认为对信标光的校正可定性地反映对腔内畸变的校正。在现有的实验条件还无法精确地测量出激光器腔内畸变的情况下,此方法为内腔自适应光学系统校正腔内畸变提供了依据。

## 4 结 论

本文提出了一种利用外腔参考光作为信标光的方法,将自适应光学系统中的变形反射镜作为激光器的内腔结构,通过实验证实,对此信标光束进行闭环校正,可以很好地校正腔内畸变,提高激光器的输出功率及光束质量。

### 参 考 文 献

- Supriyo Sinha, Justin D. Mansell, Robert L. Byer. Deformable mirrors for high-power lasers[C]. *Proc. SPIE*, 2002, **4493**: 55~63
- David C. Dayton, Justin D. Mansell, John D. Gonglewski *et al.*. Novel micromachined membrane mirror characterization and closed-loop demonstration[J]. *Opt. Commun.*, 2001, **200**(1~6): 99~105
- Li Jie, Chen Haiqing, Yu Hongbin. Study of deformable mirror for compensating the thermally induced aberration of laser diode-pumped solid-state laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(8): 1198~1202 (in Chinese)  
李 捷,陈海清,余洪斌. 用于激光二极管抽运固体激光器热畸变补偿的微变形镜特性研究[J]. *光学学报*, 2006, **26**(8): 1198~1202
- T. Y. Cherezova, S. S. Chesnokov, L. N. Kaptsov *et al.*. Super-Gaussian laser intensity output formation by means of adaptive optics[J]. *Opt. Commun.*, 1998, **155**(1~3): 99~106
- Walter Lubeigt, Gareth Valentine, John Girkin *et al.*. Active transverse mode control and optimization of an all-solid-state laser using an intracavity adaptive-optic mirror[J]. *Opt. Exp.*, 2002, **10**(13): 550~555
- Jie Li, Haiqing Chen, Hongbin Yu. A novel hybrid surface micro machined segmented mirror for large aperture laser applications [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(7): 422~424
- Li Jie, Chen Haiqing, Wu Peng. Closed-loop adaptive compensation for thermally induced aberration laser beams[J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(12): 1605~1608 (in Chinese)  
李 捷,陈海清,吴 鹏. 热畸变激光光束的闭环自适应补偿 [J]. *中国激光*, 2006, **33**(12): 1605~1608
- Peng Hanlin, Lin Lihuang, Tang Bin *et al.*. Deformable mirror used for spectral phase compensation in 1 kHz Ti sapphire femtosecond laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(3): 351~355 (in Chinese)  
朋汉林,林礼煌,唐 斌等. 变形镜对千赫兹掺钛蓝宝石飞秒激光频谱相位补偿[J]. *光学学报*, 2005, **25**(3): 351~355