

文章编号: 0253-2239(2009)04-0853-06

# 用于激光二极管抽运固体激光器热畸变补偿的 MEMS 微变形镜设计

谭佐军<sup>1,2</sup> 陈海清<sup>1</sup> 康竟然<sup>1</sup> 张 坤<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 华中科技大学光电子科学与工程学院, 湖北 武汉 430070; <sup>2</sup> 华中农业大学理学院应用物理系, 湖北 武汉 430070)

**摘要** 以 MEMS 微变形镜驱动方式的选取为出发点, 从光学特性和力学特性两方面对 MEMS 微变形镜进行分析, 从中得出相关结构参数对微变形镜性能的影响关系, 并在此基础上结合补偿激光二极管抽运固体激光器 (DPL) 热畸变的使用要求设计了一种新型 MEMS 连续面型微变形镜, 并采用设计的 MEMS 变形镜搭建了一个闭环自适应光学实验系统, 补偿了激光光束的热畸变。实验结果显示该 MEMS 连续面型微变形镜可对腔内畸变进行有效补偿, 同时提高了激光器的输出功率及光束质量。

**关键词** 自适应光学; 微变形镜; 激光热畸变; 光束质量

**中图分类号** TN256 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092904.0853

## Design of MEMS Deformable Micro-Mirror for Compensating Thermally Induced Aberration of Laser Diode-Pumped Solid-State Laser

Tan Zuojun<sup>1,2</sup> Chen Haiqing<sup>1</sup> Kang Jingran<sup>1</sup> Zhang Kun<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Optoelectronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430070, China  
<sup>2</sup> College of Basic Sciences, Huazhong Agriculture University, Wuhan, Hubei 430070, China

**Abstract** The drive mode of MEMS deformable micro-mirror is initially selected. Based on theoretical analysis of optics and mechanics characteristics of MEMS deformable micro-mirror, the relation between correlation structure parameter and performance of deformable mirror is obtained according to the requirements which compensate thermally induced aberration of laser diode. Pumped solid-state laser, a novel electrostatic actuated deformable micro-mirror with continuous facet is designed. It is used to set up a closed-loop control adaptive optics system, which has compensated thermally induced aberration of laser beam. The experimental result shows the intra-cavity aberration was effectively compensated and the output power and beam quality were improved by the novel MEMS deformable micro-mirror.

**Key words** adaptive optics; deformable micro-mirror; thermally induced aberration; beam quality

## 1 引 言

在激光二极管抽运固体激光器 (DPL) 增益介质中由热引起的畸变现象是影响激光器性能的主要因

素<sup>[1]</sup>。为了补偿热畸变对激光器性能的影响, 可采用插入固定焦距的负透镜进行补偿、构造望远镜谐振腔进行补偿以及加入衍射光学元件进行补偿等方法, 通过对谐振腔腔体进行合理设计、引入畸变补偿器件,

收稿日期: 2007-12-05; 收到修改稿日期: 2008-01-14

基金项目: 国家自然科学基金 (10476010) 资助项目。

作者简介: 谭佐军 (1977—), 男, 讲师, 博士研究生, 主要从事光电检测、自适应光学及引信光学、图像处理研究。

E-mail: tanzuojun@163.com

导师简介: 陈海清 (1947—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光电控制与自适应光学技术的研究。

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

可有效地减小由热透镜效应引起的畸变中的球差部分,但对于非球差畸变则难以进行补偿,当热量增加时,最终导致激光器效率低,并会形成多模振荡<sup>[2,3]</sup>。

近年来随着基于硅微加工技术 MEMS 的发展,大规模、低成本地制造 MEMS 微变形镜 (MEMS-DMs) 成为了可能, MEMS 变形镜突破了传统变形镜研究的瓶颈,给变形镜的发展带来新的途径和解决方案<sup>[4]</sup>, MEMS 变形镜比传统变形镜更有利于推动自适应光学系统向微型化、集成化及单片集成化 (SOC) 的方向发展,因此采用 MEMS 变形镜搭建一个低成本和低复杂度的自适应光学实验系统,用来补偿热畸变对激光器性能的影响成为可能<sup>[5~7]</sup>。

本文以 MEMS 微变形镜驱动方式的选取为出发点,从光学和力学两方面对 MEMS 微变形镜进行分析,从中得出相关结构参数对微变形镜性能的影响关系,并在此基础上结合补偿 DPL 激光热畸变的使用要求设计了一种新型的 MEMS 连续面型微变形镜,并采用设计的 MEMS 变形镜搭建了一个闭环自适应光学实验系统,实现了对激光光束腔内热畸变进行有效的补偿。

## 2 热畸变补偿的系统原理

要补偿激光的热畸变,可以采用外腔补偿和内腔补偿两种结构。对于外腔补偿结构而言,微变形镜只能用来对激光二极管抽运固体激光器的输出激光进行整形,而不能对输出激光的能量和模态进行控制。因而可以采用图 1 所示的内腔原理结构进行补偿<sup>[8]</sup>。

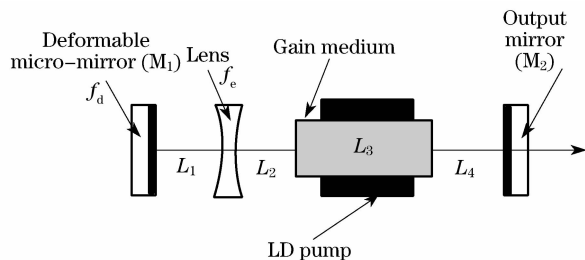


图 1 有 MEMS 微变形镜补偿装置的 DPL 线性腔结构示意图  
Fig.1 Schematic diagram of DPL linearly internal cavity with MEMS-DMs

图 1 中变形镜  $M_1$  和输出镜  $M_2$  构成激光器的谐振腔,通过扩束镜使得入射在  $M_1$  上的光束能覆盖尽可能大的  $M_1$  镜面有效工作面积。同样利用扩束镜重新将反射光束缩小,最终通过  $M_2$  输出激光。 $L_1$  表示变形镜  $M_1$  到扩束镜之间的距离; $L_2$  表示扩束镜与 Nd:YAG 棒端面之间的距离; $L_3$  表示 Nd:

YAG 棒的长度; $L_4$  表示 Nd:YAG 棒另外一个端面到输出镜  $M_2$  之间的距离。 $f_d$  表示变形镜的曲率半径,在校正热畸变的闭环系统中它的值随着热透镜的等效曲率半径的变化而产生相应的变化; $f_e$  表示扩束镜的曲率半径。

## 3 MEMS 微变形镜的具体设计

### 3.1 微变形反射镜驱动方式的选取

由于本设计中的微变形反射镜是用于补偿 DPL 激光热畸变的,设计时首要考虑的是由于 DPL 激光热畸变所引入的光路快畸变是实时变化的,同时考虑到信号获取、传输、处理的延时,因而要求器件具有较高的响应频率。其次是反射镜的体积和能耗方面的性能。由于上述热畸变的程度较小,相应的对反射镜变形范围的要求相对较小。通常情况下,反射镜的控制信号是经由集成电路处理芯片产生并通过键合引线发送的,由封装方面的知识可知,这将带来很大的体积和时间浪费,而如果能够实现反射镜与控制电路的集成将进一步缩小器件体积和提高反应时间,从而极大的改善反射镜性能。

在 MEMS 技术中,器件的驱动方式有多种形式,包括压电驱动、电磁驱动、静电驱动和热驱动等等,压电驱动、电磁驱动、热驱动方式器件体积大,响应速度慢,位移量较大,加工难度较大,能耗较高,相比之下,静电驱动器件体积小,响应速度快,位移量小,加工难度低,能耗较小<sup>[9]</sup>。综合考虑上述对补偿 DPL 激光热畸变的反射镜各方面性能的要求,采用静电驱动是较好的选择。

### 3.2 MEMS 变形镜结构参数的确定

参考主流的商用 DPL 激光器参数,设定激光器谐振腔参数为:Nd:YAG 棒直径 5 mm,  $L_1=50$  cm,  $L_2=5$  cm,  $L_3=10$  cm,  $L_4=25$  cm,  $f_e=35$  mm,热透镜效应在子午和弧矢方向上产生的等效焦距最大值  $f_x=42$  cm,  $f_y=34$  cm。所设计的微变形反射镜的镜面面积为  $30 \times 30$  mm<sup>2</sup>,在此基础上进一步确定出驱动单元数为 37,各单元之间的间距为 2 mm。在设计补偿 DPL 激光热畸变的微变形镜中主要关心的是反射镜的变形范围以及响应频率。下面将从光学和力学两方面着手可变形反射镜进行分析,从中得出相关结构参数对反射镜性能的影响关系,并在此基础上结合补偿 DPL 激光热畸变的使用要求,最终确定它们相应的值。

#### 3.2.1 光学特性分析

基于自适应光学系统的闭环控制补偿激光热畸

变的系统如图 2 所示<sup>[10]</sup>。

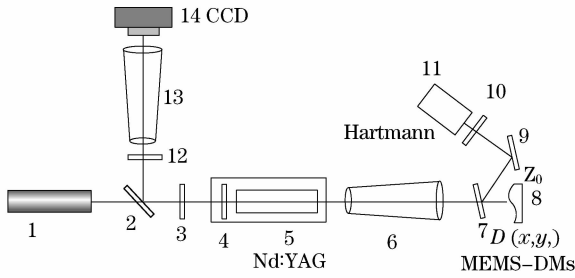


图 2 自适应光学系统光路图

Fig. 2 Beam path diagram of adaptive optics system

在图 2 中，器件 1 为 632.8 nm He-Ne 激光器。器件 2 为 45°全反射镜。器件 3 为窄带滤波片。器件 4 为激光器的输出平面，直径为 20 mm。器件 5 为长度为 10 cm 的增益介质。器件 6 为 3 倍扩束镜，这是因为增益介质的直径为 5 mm，将腔内光束扩束以使微变形镜能更好地对其进行补偿。器件 7 为增透膜镜片，其方向为与主光轴近似垂直但又略微倾斜，以使腔内的部分光反射到器件 9 反射镜上，这是因为如果将增透膜镜片以 45°角放置，则由于损耗太大，激光器无法起振。只有将角度调到足够小，才能保证激光器的正常输出。器件 10 为宽波段的可调谐滤波片。器件 11 为哈特曼波前探测器，器件 12 为衰减片，这是为了防止 CCD 探测的光强太强引起饱和。器件 13 为 3 倍扩束镜。器件 14 为 CCD，用于观测激光器输出模式。

首先对入射光是平面波的情况进行分析，并假设此平面波的振幅为  $U_0$ 。由于只有照射在反射镜表面区域内的光能被反射，故而其作用类似于透射情况下，光传输路径上无穷大不透明平面屏幕上的一个孔，由此可得反射回的光波在  $Z_0$  处的复振幅分布：

$$U'(x, y) = U_0 \exp[j\phi'(x, y)] \cdot t(x, y) \cdot \exp[j\phi(x, y)] = U_0 \text{rect}\left(\frac{x}{W}\right) \text{rect}\left(\frac{y}{W}\right) \cdot \exp\{j[\phi(x, y) + \phi'(x, y)]\}, \quad (1)$$

由于在补偿激光热畸变的自适应光学系统内可变形反射镜的作用是校正激光热畸变对光波的扰动，使得经其反射后的光波回复到平面波状态。因而上述光波复振幅分布表达式中与位置有关的相位部分应为零，即

$$\phi(x, y) + \phi'(x, y) = 0, \quad (2)$$

因此可得

$$2kD(x, y) + \phi'(x, y) = 0. \quad (3)$$

根据实际应用情况，需要校正的相位范围为  $20\pi$ ，由此可得

$$2kD(x, y) = -\phi'(x, y), \quad (4)$$

因此可得

$$\frac{4\pi}{\lambda} D(x, y) \Big|_{\max} = -\phi'(x, y) \Big|_{\max} = -20\pi, \quad (5)$$

最后可得

$$D(x, y) \Big|_{\max} = -5\lambda. \quad (6)$$

因为光波波长  $\lambda$  为 632.8 nm，则可知只有当可变形反射镜的最大变形量达到  $3.2 \mu\text{m}$  时，才能有效满足实际使用中对外界环境引起的畸变进行校正的要求。从静电驱动分析知，能对变形镜实现稳定操作的有效范围仅为起始电极间距的三分之一，由此我们可以确定起始上下电极的距离，即台柱下表面与底电极的距离为  $10 \mu\text{m}$ 。

### 3.2.2 力学特性分析

目前市场上硅片的厚度通常在  $400 \sim 500 \mu\text{m}$  之间，经局部去除后剩余的充当镜面的硅膜厚度则往往在  $10 \sim 100 \mu\text{m}$ ，其值与所确定的 25 mm 的反射镜横向尺寸相比非常小，因而在对可变形反射镜进行力学分析时，可将其按薄板情况来处理。

可用弹性薄板的小挠度理论来对变形反射镜进行分析<sup>[11~13]</sup>。

当薄板受到  $(\xi, \eta)$  处的集中载荷  $P$  作用时，产生弯曲变形的挠度函数为

$$w(x, y) = \frac{1225P}{4DW^{14}} \cdot \xi^2 (\xi - W)^2 \cdot \eta^2 (\eta - W)^2 \cdot x^2 (x - W)^2 \cdot y^2 (y - W)^2. \quad (7)$$

在可变形反射镜工作过程中，外部载荷是以静电驱动力的形式施加的，故而式 7 中的  $P$  应用静电驱动力  $F$ 。来近似代替（应当注意的是静电力并不是恒定的，它是随着镜面的变形而逐步增加的，此处为简化分析，将其看作是由初始条件所决定的一定值，由此所推导出的镜面变形要小于实际情况，故而在此简化基础上按照相关技术指标所确定出的镜面结构参数完全能满足实际应用需要，并存有一定的冗余量）。以电压施加在位于板中心处的单个驱动电极上为例进行讨论，即  $\xi = \eta = W/2$ ，则有

$$w(x, y) = \frac{1225F_e}{1024DW^6} \cdot x^2 (x - W)^2 \cdot y^2 (y - W)^2 = \frac{3675\epsilon_0 \epsilon_r AV^2 (1 - \nu^2)}{512Et^3 \cdot d^2 W^6} \cdot x^2 (x - W)^2 \cdot y^2 (y - W)^2, \quad (8)$$

从上式中可看到，排除与镜面材料性能相关的参数如杨氏模量  $E$ 、泊松比  $\nu$ ，外部施加电压  $V$  以及已经确定了的结构参数如镜面宽度  $W$ 、上下电极的起始间距  $d$ ，此时镜面变形与驱动电极的面积  $A$ （单个驱

动电极面积为台柱下表面边长的平方)成正比,而与镜面厚度  $t$  的三次方成反比,由此可推断出镜面厚度将是决定其变形的首要因素。图 3 所示为它们对镜面变形的等效影响关系。

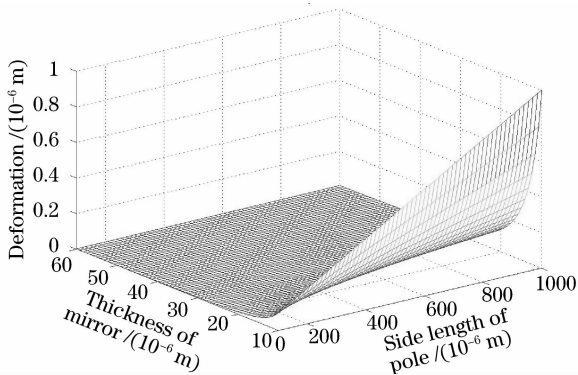


图 3 镜面变形随驱动电极面积和镜面厚度的变化关系  
Fig. 3 Relation between deformation of mirror surface and drive electrode's dimension and thickness of mirror surface

由图 3 可见,当镜面厚度超过 40  $\mu\text{m}$  后,无论所采用的驱动电极面积有多大,镜面变形都将保持在较小范围。由此从镜面变形的角度出发,要求所设计的镜面厚度应小于 40  $\mu\text{m}$ ,而相应的台柱边长则应大于 200  $\mu\text{m}$ 。

由薄板横向自由振动时的微分方程

$$D\nabla^4 w + m \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = 0, \quad (9)$$

可求得振动频率

$$\omega = \sqrt{\frac{1269DW^{14}}{mW^{18} + 396900M \sum_{i=1}^n W_i^2(x_i, y_i)}}. \quad (10)$$

式中  $m$  为单位镜面的质量  $m = \rho_m V_1$  ( $\rho_m$  为镜面材料的密度,  $V_1$  为单位镜面的体积),  $M$  为单个台柱的质

表 1 镜面结构设计参数

Table 1 Structure parameter of mirror surface

| Designation | Area of mirror surface /mm <sup>2</sup> | Thickness / $\mu\text{m}$ | Area of electrode / $\mu\text{m}^2$ | Initial distance of electrode / $\mu\text{m}$ | Distance of electrode /mm | Dynamic range / $\mu\text{m}$ | Response frequency |
|-------------|---|---------------------------|-------------------------------------|---|---------------------------|-------------------------------|--------------------|
| Size        | 30×30                                   | 30                        | 500×500                             | 10  | 2                         | 3.2                           | 460 Hz             |

### 3.3 MEMS 变形镜驱动器的结构

本文采用如图 5 所示结构,镜面主体是由具有一定厚度的硅膜构成,为提高镜面的反射率通常溅射一层 Ti/Au,在硅膜背面台柱与其相连,台柱的下方是对应的驱动电极(两者相隔 10  $\mu\text{m}$ )。当给电极施加电压时,产生的静电力就会拉动台柱向下运动,由于台柱与充当镜面的硅膜是一整体,从而带动相应的镜面部分发生变形。通过控制通电电极的位置及电压大小,就可获得特定的镜面形状。

量,  $n$  为台柱的个数(本设计中为 37),  $(\partial w / \partial t)_i$  对应第  $i$  个台柱的速度。其中  $M = \rho_p V$ ,  $\rho_p$  为台柱材料的密度,  $V$  为台柱的体积。由式 6 可得到不同镜面厚度和台柱边长情况下对应的镜面振动频率,如图 4。

在实际应用中由于外界环境是实时变化的,这就对反射镜的响应频率提出了一定的要求,如果响应频率太慢,则起不到实时校正的作用。通常情况下,反射镜的响应频率与其自身的固有振动频率之间是存在一定关系的,固有频率越高,响应速度也就越快。由图 4 可见结合实际使用情况,从镜面响应频率的角度出发,要求镜面厚度应大于 15  $\mu\text{m}$ ,而台柱边长则应小于 600  $\mu\text{m}$ 。然而从图 3 可知要获得大的变形,则要求镜面尽可能的薄、台柱边长尽可能的长,从而在这两者之间产生了矛盾,因此必须依据本研究内容中所提出的相关性能指标参数并结合实际的加工技术水平,在它们之间进行折衷选取。最终确定的相关镜面结构参数如表 1 所示。

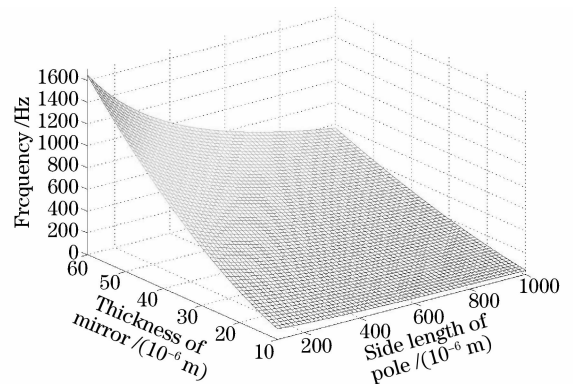


图 4 不同镜面厚度和台柱边长下的镜面振动频率  
Fig. 4 Oscillation frequencies at different thicknesses of mirror surface and side lengths of bed pole

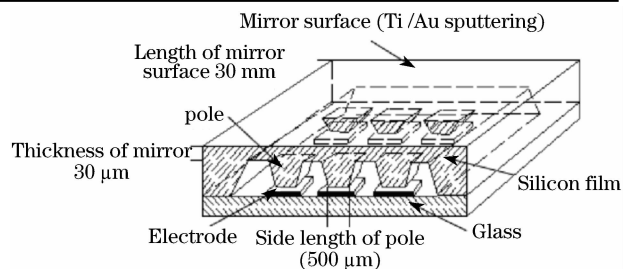


图 5 可变形反射镜结构示意图

Fig. 5 Schematic of deformable micro-mirror sstructure

## 4 实验结果分析与讨论

入射光照亮哈特曼波前探测器的  $25 \times 26$  个小孔阵列, 形成  $25 \times 26$  个子孔径像。这些子孔径像成像在 CCD 焦面上, CCD 光敏面探测接收光强。哈特曼波前传感器将波前的分析结果反馈给计算机, 由控制系统计算并且输出微变形镜变形所需要的驱动电压, 驱动变形镜使之自动校正(补偿)由于激光热畸变所产生的附加相位差。通过计算机不断地取样、循环计算、判断、控制变形镜变形, 直到达到最理想的补偿效果。

图 6(a) 表示, 变形镜不工作时, 即校正前平面波波前的相位分布情况, 此时的激光光束波前的畸变, 主要是由于 He-Ne 激光器输出的光束经过整形后与标准平面波的偏差以及变形镜本身面型不是绝对平整引起的误差(这些都是不可消除的系统误差)所引起的。图 6(b) 表示的是变形镜不工作时的激光束波前质心位移情况, 图中规则的点阵表示参考波面经过哈特曼子孔阵列后在其像面上的成像光斑的质心, 以点阵为端点的线段代表实际波前质心和参考波面波前质心之间的连线的方向和距离, 即线段的两个端点分别代表实际波前质心和参考波面波前质心的位置。可以计算出实际光波波前与理想平面波之间最大正方向上偏离量和最大负方向上偏离量的绝对值之和, 即峰谷值(PV)为  $0.356 \mu\text{m}$ , 均方根值(RMS)为  $0.00623 \mu\text{m}$ 。

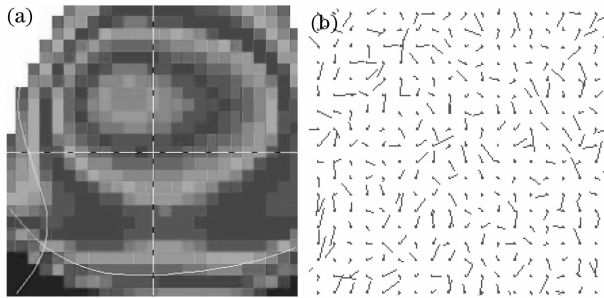


图 6 变形镜不工作时的激光束波前相位分布  
(a)和 HS 传感器质心位移图(b)

Fig. 6 (a) Wavefront phase's distribution and (b) Hartmann sensor barycenter's displacement when deformable micro-mirror is not working

当抽运功率为  $1200 \text{ W}$  时, 激光器输出功率为  $118 \text{ mW}$ , 此时 PV 值为  $9.3 \mu\text{m}$ 。这表明激光器工作时腔内产生的畸变使得参考光波前发生了较大的变化。

使闭环系统正常工作, 闭环系统校正后输出的激光束波前相位分布如图 7(a) 示。此时平面波波

前峰谷值(PV)为  $0.672 \mu\text{m}$ , 均方根值(RMS)为  $0.109 \mu\text{m}$ , 激光器的输出功率为  $406 \text{ mW}$ , 这说明变形镜改变了参考光的波前, 当参考光波前接近初始值时, 可认为补偿了激光器腔内的畸变, 提高了激光器的输出功率及光束质量。从质心位移图 7(b) 来看, 校正后的波前总体趋近于一个平面波, 大部分采样点处质心位移较小。但是由于变形镜边缘的校正能力较弱(受到镜面固定边界的制约), 因此边缘采样点处的质心位移较大, 且分布不规则。

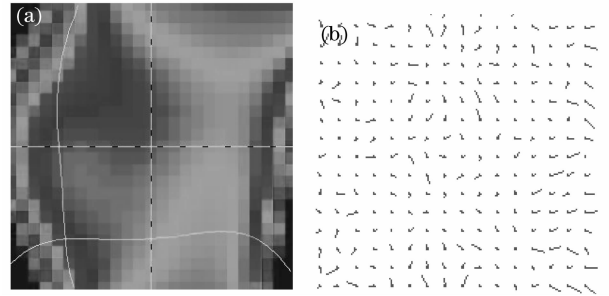


图 7 闭环系统输出的激光束波前相位分布  
(a)和 HS 传感器质心位移图(b)

Fig. 7 (a) Wavefront phase's distribution and (b) Hartmann sensor barycenter's displacement when deformable micro-mirror is working

图 8 为 CCD 测量的对畸变激光光束进行补偿前后的效果图。从图 8 可见通过闭环控制系统自动补偿, 按 Zernike 模式分别调节各阶模式的模系数, 激光的光束质量得到了明显的改善。

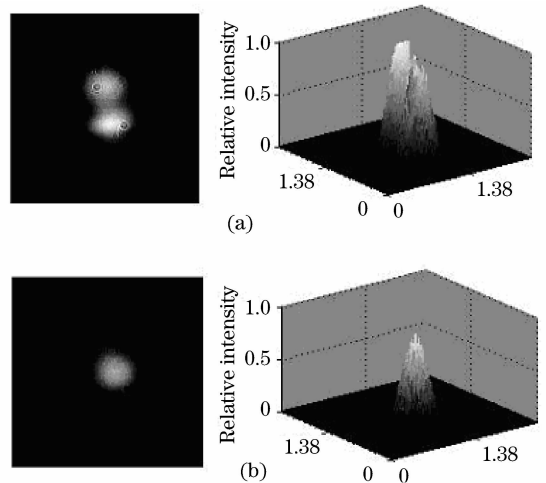


图 8 激光输出模式(a)补偿前(b)补偿后  
Fig. 8 Lasing output mode (a) before compensation  
(b) after compensation

## 5 结 论

以 MEMS 微变形镜驱动方式的选取为出发点,

从光学和力学两方面着手对微变形镜进行分析,得出相关结构参数对微变形镜性能的影响关系,并在此基础上结合补偿 DPL 激光热畸变的使用要求设计了一种新型的 MEMS 连续面型微变形镜,并利用该 MEMS 变形镜搭建了一个闭环自适应光学实验系统,实现了对热畸变激光光束进行补偿。实验结果显示该 MEMS 连续面型微变形镜能对腔内畸变进行有效的补偿,同时提高了激光器的输出功率及光束质量。内腔微变形镜对激光输出的模式具有补偿能力,适当地控制变形镜各电极电压,可使激光输出的光束质量和功率均有所提高,也可以根据实际需要控制激光的输出模式,实现激光输出的自适应实时控制。

### 参 考 文 献

- 1 J. Frauchiger, H. P. Weber. Modeling of thermal lensing and higher order ring mode oscillation in end pumped cw Nd:YAG lasers[C]. SPIE, 1993, **1865**: 1429~1434
- 2 Zhang Guangyin, Song Feng, Feng Yan *et al.*. A solid state laser resonator capable of compensating thermal lens effect adaptively [J]. *Acta Physica Sinica*, 2000, **49**(8):1495~1498  
张光寅,宋峰,冯衍等. 可自适应补偿热透镜效应的固体激光谐振腔[J]. *物理学报*, 2000, **49**(8): 1495~1498
- 3 Li Jie, Chen Haiqing, Yu Hongbi. 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  
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
- 4 Hongbin Yu, Haiqing Chen, Sai Fu. Versatile micromirror with amulti-movement mode[J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(7):1178~1181
- 5 Jie Li, Haiqing Chen, Hongbin Yu. A novel hybrid surface micromachined segmented mirror for large aperture laser applications[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(7):422~424
- 6 Zhou Renzhong, Yan Jixiang. *Adaptive Optics Theory* [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1996. 135~328  
周仁忠,阎吉祥. 自适应光学理论[M]. 北京:北京理工大学出版社, 1996. 135~328
- 7 Lijun Zhu, Pang-Chen Sun, Drik-Uwe Bartsch. Adaptive control of a micromachined continuous membrane deformable mirror for aberration compensation[J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(1):49~53
- 8 W. Lubeigt, G. Valentine, J. Girkin *et al.*. Active transverse mode control and optimization of an all-solid-state laser using an intracavity adaptive-optic mirror [J]. *Opt. Express*, 2002, **10**(1): 1309~1324
- 9 Li Desheng, Wang Donghong, Sun Jinwei *et al.*. *MEMS Technology and Application* [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2002  
李得胜,王东红,孙金玮等. MEMS 技术及其应用[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社, 2002
- 10 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  
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
- 11 S. Timoshenko, K. S. Woinosky. *Theory of Plates and Shells* [M]. NewYork: McGraw Hill, 1987
- 12 Wu Lianyuan. *Theory of Plate and Shells* [M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 1989  
吴连元. 板壳理论[M]. 上海:上海交通大学出版社, 1989
- 13 P. K. C. Wang, F. Y. Hadaegh. Computation of static shapes and voltages for micromachined deformable mirrors with nonlinear electrostatic actuators [J]. *J. Microelectromech. System*, 1996, **5**(3): 205~220