

文章编号: 0258-7025(2006)12-1605-04

热畸变激光光束的闭环自适应补偿

李捷, 陈海清, 吴鹏

(华中科技大学光电子工程系, 湖北 武汉 430074)

摘要 随着基于硅微加工技术的微机电(MEMS)技术的发展, 搭建低成本的自适应光学系统以校正激光束畸变成为可能。首先根据模态耦合理论分析了热畸变对光束质量的影响, 并用数值方法得到理想基模和畸变基模耦合振幅与泽尼克(Zernike)畸变之间的关系。然后采用一种新型的微机电变形反射镜搭建了一个闭环自适应光学实验系统, 用来对热畸变激光光束进行补偿, 并对自适应闭环控制方法进行了研究。闭环实验结果显示: 闭环自适应光学实验系统能很好地改善激光束质量, 斯特列尔比(Strehl Ratio)平均可以达到80%。

关键词 自适应光学; 热畸变补偿; 微变形镜

中图分类号 TN 241 **文献标识码** A

Closed-Loop Adaptive Compensation for Thermally Induced Aberration Laser Beams

LI Jie, CHEN Hai-qing, WU Peng

(Department of Optoelectronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract With the development of micro-electro-mechanical system (MEMS) based on silicon micromachining technology, it becomes possible to develop a low-cost adaptive optics system to compensate the aberration of laser beams. The effect of thermally induced aberration on laser beam quality is analyzed based on mode coupling theory. The relation between coupling amplitude of ideal and aberrated fundamental mode and Zernike aberration is numerically simulated. An adaptive optics system is presented based on a MEMS deformable micro-mirror to compensate the thermally induced aberration. From the test result, it is explicit that the adaptive system can correct the thermally induced aberration of high power lasers and increase the Strehl ratio to about 80% averagely.

Key words adaptive optics; thermally induced aberration compensation; deformable micro-mirror

1 引言

激光晶体的热畸变效应是影响固体激光器高功率运转的重要因素之一。随着激光器抽运功率的增加, 晶体材料内部由于温度分布不均匀引起双折射和热透镜效应, 导致激光器的基模(TEM₀₀)输出功率和光束质量大幅度下降。为了克服热畸变对激光器性能的影响, 有的使用相位共轭镜和衍射光学器件来减少激光器的热畸变^[1], 然而这仅对于静态畸变有效, 对由于激光能量波动和其他原因造成的动

态畸变则无能为力。

为了降低激光光束的动态畸变, 自适应光学是一种有效的方法, 但传统的自适应光学系统复杂、价格昂贵, 限制了它的应用^[2]。随着基于硅微加工技术的微机电(MEMS)技术的发展, 搭建低成本和低复杂度的自适应光学系统成为可能。本文对热畸变激光光束的闭环自适应补偿技术进行了研究, 并采用一种新型微机电微变形反射镜搭建了一个闭环自适应光学实验系统, 用来对热畸变激光光束进行补偿。

收稿日期: 2006-03-10; **收到修改稿日期:** 2006-06-23

基金项目: 国家自然科学基金(10476010)资助项目。

作者简介: 李捷(1976—), 男, 广东人, 华中科技大学光电子工程系博士研究生, 主要从事自适应光学和微机电器件研究。E-mail: lj14163@yahoo.com.cn

导师简介: 陈海清(1947—), 男, 江苏人, 华中科技大学光电子工程系教授, 博士生导师, 研究方向为光信息存储与处理, 微机电(MOEMS)技术及激光光电子系统及技术。E-mail: hqchen@mail.hust.edu.cn

2 热畸变对光束质量的影响

对于理想的基模光束来说,热畸变效应会导致激光束从基模进入更高阶的厄米-高斯模态,从而降低了激光的基模输出功率。可以通过计算耦合到高阶厄米-高斯模态的光所占比例来评估激光的光束质量^[3]。由模态耦合理论可知

$$c_{x,y}(\psi_{ab}, \psi_{m,n}) = \int_{-\infty}^{+\infty} dy \int_{-\infty}^{+\infty} \psi_{m,n}(x,y) \cdot \psi_{ab}^*(x,y) dx, \tag{1}$$

式中 $\psi_{ab}(x,y)$ 为畸变光束在镜面上的电场, $\psi_{m,n}(x,y)$ 为二维厄米 - 高斯模态, $c_{x,y}(\psi_{ab}, \psi_{m,n})$ 为 $\psi_{ab}(x,y)$ 和 $\psi_{m,n}(x,y)$ 的振幅耦合系数。

从畸变光束耦合到 TEM₀₀ 基模输出的能量耦合系数 k 可以表示为 $c_{x,y}(\psi_{ab}, \psi_{0,0})$ 及其复共轭 $c_{x,y}^*(\psi_{ab}, \psi_{0,0})$ 的乘积

$$k = |c_{x,y}(\psi_{ab}, \psi_{0,0}) \cdot c_{x,y}^*(\psi_{ab}, \psi_{0,0})|. \tag{2}$$

对于理想的 TEM₀₀ 激光光束和畸变激光光束之间的耦合,由于不存在解析表达式,因此只能用数值方法求解。

畸变的 TEM₀₀ 激光光束在镜面上的电场 ψ_{ab} 可以表示为振幅 $|\psi_{0,0}|$ 和一个相位项 $e^{i\phi}$ 的乘积^[4]

$$\psi_{ab} = |\psi_{0,0}| e^{i\phi}, \tag{3}$$

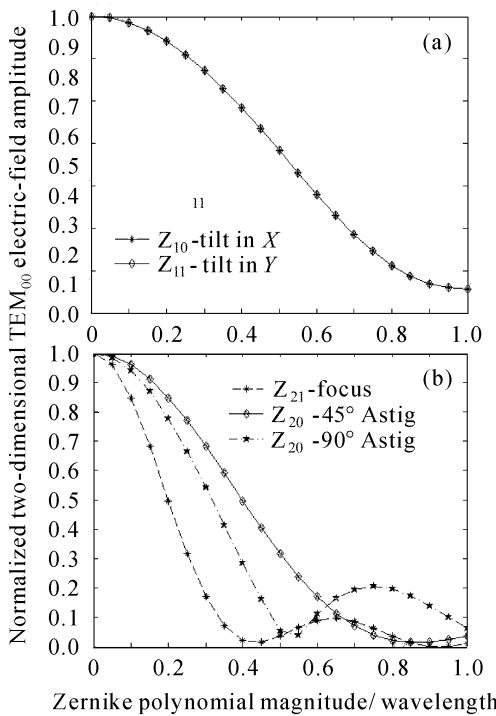


图 1 基模输出振幅和泽尼克多项式 Z₁₀, Z₁₁ (a)和 Z₂₀, Z₂₁ (b)的关系

Fig.1 Electric field amplitude in the lowest-order Hermite-Gaussian laser mode versus the magnitude of Zernike polynomials Z₁₀ and Z₁₁ (a), Z₂₀ and Z₂₁ (b)

其中 $\phi(x,y) = \frac{2\pi}{\lambda} \varphi(x,y)$, $\varphi(x,y)$ 为畸变波前和未畸变波前之间的光程差, 它可以用一组泽尼克 (Zernike) 正交多项式系数来进行描述

$$\varphi(x,y) = \sum_{k=0}^N a_k Z_k(x,y), \tag{4}$$

式中 $Z_k(x,y)$ 为泽尼克多项式, 而 a_k 为相应多项式的系数。求解(1)~(4)式就可得出畸变光束耦合到 TEM₀₀ 基模输出的振幅和能量。图 1 为用数值方法得到理想 TEM₀₀ 模和畸变 TEM₀₀ 模耦合幅度与二阶泽尼克畸变之间的关系图。从图中可以看到, 随着泽尼克畸变振幅的增加, 基模耦合幅度呈下降趋势, 但对不同泽尼克系数, 其下降速度不同。

在实际应用中, 由于畸变的形状很难用理论进行估计, 所以采用波前传感器来测量畸变的形状。

3 闭环控制系统原理

闭环控制系统原理如图 2 所示。整个光学系统包括微机电变形镜(MEMS-DMs)及其高压驱动器、哈特曼波前传感器、计算机控制平台和反射率为 50% 的分光镜(BS1 和 BS2)等光学元器件。入射的畸变激光光束经光学元件折反射后由哈特曼波前传感器接收并探测波前, 然后将波前的分析结果反馈给控制计算机, 由控制系统产生微变形镜变形所需要的驱动电压, 然后驱动变形镜使之校正激光束的畸变。

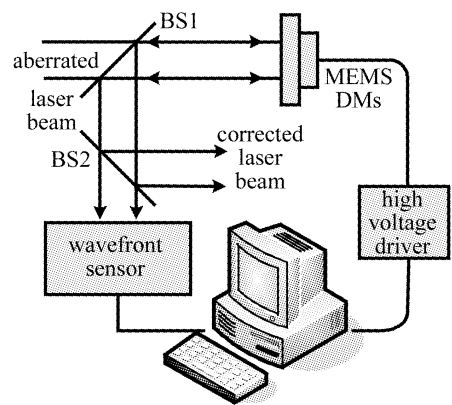


图 2 畸变激光束的闭环控制原理
BS: 分光镜; DMs: 变形镜

Fig.2 Schematic of the closed loop correction for aberrated laser beam

BS: beam splitter; DMs; deformable mirrors

图 3 所示的是用微机电技术制造的变形反射镜的结构示意图。其镜面主体是由具有一定厚度的硅膜构成, 硅膜表面覆盖一层金以提高镜面的反射率。

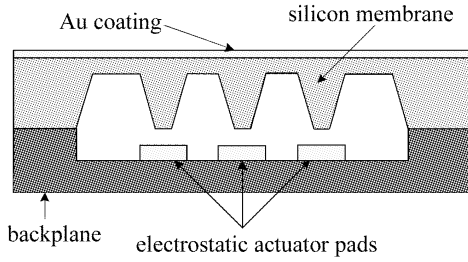


图 3 变形反射镜结构图

Fig. 3 Schematic of deformable mirror architecture

对于波长为 1064 nm 的激光, 其反射率可以达到 99%。硅膜下方是对应的驱动电极, 当给电极施加电压时, 产生的静电力就会拉动硅膜向下运动, 从而使镜面部分发生变形。变形反射镜有 37 个驱动电极, 最大驱动电压可达 200 V。经测试, 在驱动器加最大驱动电压 200 V 时, 镜面的最大变形为 4 μm , 也就是说, 变形反射镜可以补偿热畸变的最大范围为 4 μm 。相对于传统的变形反射镜, 微机电变形反射镜还具有响应频率高 (大于 1 kHz), 功耗低, 可大规模集成, 体积小, 重量轻等优点。

4 自适应闭环的控制方法

在进行闭环运行前首先要进行两方面的工作: 产生波前校正矩阵以及标定系统的响应。波前校正矩阵的产生过程为: 对某个驱动器施加一定的电压, 然后用哈特曼波前传感器对波前进行单帧采集, 计算出描述此时所产生光波波前的各阶泽尼克系数值。

例如, 首先对 1 号驱动器施加某一电压 V , 而其他驱动器为 0 电压, 采集此时的波前, 计算出描述此时所产生光波波前的各阶泽尼克系数值, 即 Z_1, Z_2, \dots, Z_N , 其中 N 代表泽尼克项数。接着连续增加电压, 并依次测得相应的泽尼克系数, 由于镜面变形正比于施加电压的平方, 通过最小二乘平方数据拟合方法可获得 1 号驱动器上施加单位电压时所引起的泽尼克系数值 $Z(1,1), Z(2,1), \dots, Z(N,1)$, 其中括号中后一个数字 1 代表驱动器编号。重复上述步骤, 可以依次测得在第 i 个驱动器上施加单位电压时所引起的对应的泽尼克系数值 $Z(1,i), Z(2,i), \dots, Z(N,i)$ 。由于多个电极同时作用时所引起的镜面变形可近似等于它们单独作用时所引起的畸变变形的线性叠加, 同样的现象也可在泽尼克系数值上得到反映, 继而可得到

$$\begin{bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ \vdots \\ Z_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z(1,1) & Z(1,2) & \cdots & Z(1,i) \\ Z(2,1) & Z(2,2) & \cdots & Z(2,i) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Z(N,1) & Z(N,2) & \cdots & Z(N,i) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1^2 \\ V_2^2 \\ \vdots \\ V_i^2 \end{bmatrix} = \mathbf{B}\mathbf{c}, \quad (5)$$

式中

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} Z(1,1) & Z(1,2) & \cdots & Z(1,i) \\ Z(2,1) & Z(2,2) & \cdots & Z(2,i) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Z(N,1) & Z(N,2) & \cdots & Z(N,i) \end{bmatrix}, \quad (6)$$

为 $N \times i$ 矩阵, 其各列元素分别代表上面所提到的不同驱动器上施加单位电压时引起畸变对应的泽尼克系数值, 这个矩阵通常也被称之为变形镜影响函数矩阵^[5]。 $\mathbf{c} = [V_1^2 \ V_2^2 \ \cdots \ V_i^2]^T$ 。在实际闭环操作过程中, 首先由哈特曼波前探测器获得初始时的波前情况, 然后将其和影响函数矩阵的逆相乘即可获得对应驱动器上所施加的电压平方值, 此过程可表示为

$$\begin{bmatrix} V_1^2 \\ V_2^2 \\ \vdots \\ V_i^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z(1,1) & Z(1,2) & \cdots & Z(1,i) \\ Z(2,1) & Z(2,2) & \cdots & Z(2,i) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Z(N,1) & Z(N,2) & \cdots & Z(N,i) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ \vdots \\ Z_N \end{bmatrix}. \quad (7)$$

当将通过 (7) 式求得的电压值施加在对应驱动器上时, 所获得的校正效果并不是最好的, 这是由影响函数矩阵测试误差、波前重构误差、矩阵求逆等因素共同作用的结果。因此为获得较理想的校正效果必须在此基础上对施加在各驱动器上的电压进行微调, 为此引入波前方差概念^[6], 定义为

$$\sigma^2 = \frac{1}{\pi} \iint_{\text{aperture}} [\varphi(x,y) - \varphi_0(x,y)]^2 dxdy, \quad (8)$$

式中 $\varphi_0(x,y)$ 代表整个孔径上畸变波前 $\varphi(x,y)$ 的平均值, 为常数。

由泽尼克多项式的正交性可知, 波前方差实际上等于各项泽尼克多项式方差之和, 即

$$\sigma^2 = \sum_{k=1}^N \sigma_k^2 = \sum_{k=1}^N \iint [a_k Z_k(x,y)]^2 dxdy = \sum_{k=1}^N a_k^2 \omega_k^2 = \|\mathbf{a} * \mathbf{w}\|^2, \quad (9)$$

式中 $\omega_k^2 = \frac{1}{\pi} \iint [Z_k(x,y)]^2 dxdy$, \mathbf{a} 为当前所测得的波前泽尼克系数矢量, 而 $*$ 表示两个矢量中元素与元素的相乘运算。

由于此时通过哈特曼波前探测器恢复的波前泽尼克系数, 实际上是包含了反射镜施加前述计算出

的电压并引起相应变形后的结果,因而 \mathbf{a} 可表示为

$$\mathbf{a} = \mathbf{B}\mathbf{c} + \mathbf{a}_{\text{aber}}, \quad (10)$$

其中 \mathbf{a}_{aber} 为反射镜施加电压前的波前畸变。按照标准最陡下降算法,相对于控制信号矢量 \mathbf{c} 来评价所测得的波前误差偏导

$$\frac{\partial \sigma^2}{\partial \mathbf{c}} = 2\mathbf{B}^T(\mathbf{a} * \mathbf{w}^2), \quad (11)$$

(11)式给出了在当前控制矢量设定点处多维控制信号空间中波前误差增加的方向,在相反方向上对控制信号矢量进行微调则可以减小波前误差。因此控制信号的实时更新算法可表示为

$$\mathbf{c}_{\text{new}} = \mathbf{c}_{\text{old}} - 2\eta\mathbf{B}^T(\mathbf{a} * \mathbf{w}^2), \quad (12)$$

其中 \mathbf{c}_{new} 为更新的控制电压, \mathbf{c}_{old} 为上一次的控制电压, \mathbf{B}^T 为矩阵 \mathbf{B} 的转置, η 为一个表示收敛速率的量,通过实验确定其合适值为 10^{15} 。

5 微变形镜的特性

图 4 所示的是哈特曼测量的对激光光束波前畸变进行校正前后的波前平面等高图。校正前的激光光束波前畸变的峰谷值为 $0.7568 \mu\text{m}$ (图 4(a)),用

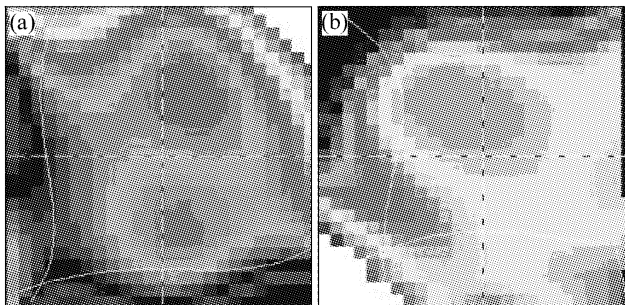


图 4 畸变波前(a)和补偿后(b)的波前
Fig. 4 Aberrated wavefront before (a) and after (b) compensation

表 1 实验结果

Table 1 Experimental results

Peak-valley value before correction / μm	Peak-valley value after correction / μm	Strehl ratio / %
0.579	0.032	96.04
0.672	0.057	87.96
0.976	0.060	86.75
1.212	0.076	79.61
1.967	0.080	77.67
2.113	0.077	77.36
2.785	0.089	70.76
3.981	0.096	67.17

闭环控制系统进行校正后,激光光束波前畸变的峰谷值减少为 $0.0277 \mu\text{m}$ (图 4(b))。

更多的实验结果如表 1 所示。由表 1 可以看到,闭环自适应光学实验系统能够很好地改善激光的光束质量,斯特列尔比(Strehl Ratio)平均可以达到 80%,最大可以校正 $4 \mu\text{m}$ 的波前畸变。

图 5 是用 CCD 测量的对畸变激光光束进行校正前后的效果图。从图中可以看出,激光的光束质量得到了明显的改善。

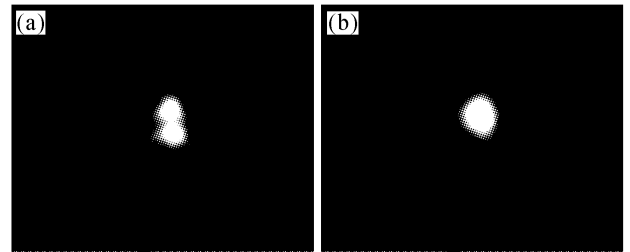


图 5 畸变光束和补偿后的光束
Fig. 5 Aberrated beam before (a) and after (b) compensation

6 结 论

采用一种新型微机电变形反射镜搭建了一个闭环自适应光学实验系统,用来对热畸变激光光束进行补偿。实验结果显示:闭环自适应光学实验系统能够很好地改善激光的光束质量,斯特列尔比平均可以达到 80%,最大可以校正 $4 \mu\text{m}$ 的波前畸变。

参 考 文 献

- 1 Siamak Makki, James Leger. Solid-state laser resonators with diffractive optic thermal aberration correction [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1999, **35**(7):1075~1085
- 2 Robert K. Tyson. Principles of Adaptive Optics [M]. 2nd edition. America: Academic Press, 1998. 16~17
- 3 Justin Dennis Mansell. Micromachied deformable mirror for laser wavefront control [D]. USA: Stanford University, 2002. 36~39
- 4 Javier Alda, José Alonso, Eusebio Bernabeu. Characterization of aberrated laser beams [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1997, **14**(10): 2737~2747
- 5 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
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
- 6 Zhu Lijun, Sun Pangchen, Dirk-Uwe Bartsch *et al.*. Wave-front generation of Zernike polynomial modes with a micromachined membrane deformable mirror [J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(28): 6019~6026