

文章编号: 0253-2239(2006)08-1198-5

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*

李 捷 陈海清 余洪斌

(华中科技大学光电子工程系, 武汉 430074)

摘要: 在很多高功率的激光器中,由于热效应的缘故会导致激光器的光束质量大幅下降。为了改善激光光束的动态畸变,自适应光学是一种有效的方法。作为自适应光学系统的核心部件,设计了一种可用于大功率激光二极管抽运固体激光器(DPL)热畸变补偿的新型可变形反射镜,并且通过工艺流片实际制造出有效反射面积为 $30\text{ mm}\times 30\text{ mm}$,拥有49个静电驱动单元的可变形反射镜。对该机电系统(MEMS)微变形镜的变形特性进行了详细的理论分析和模拟研究,并和实际测量结果进行了比较,得到了满意的结果。为了实现闭环控制,对微变形反射镜的光学影响函数矩阵进行了全面测量,并用得到的电压矩阵对畸变激光光束的波前进行了校正。实验结果表明,微变形反射镜可以有效地改善激光光束质量。

关键词: 自适应光学;热畸变补偿;微变形镜;激光二极管抽运固体激光器

中图分类号: TN256 文献标识码: A

Study of Deformable Mirror for Compensating the Thermally Induced Aberration of Laser Diode-Pumped Solid-State Laser

Li Jie Chen Haiqing Yu Hongbin

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

Abstract: Many high-power lasers typically suffer from reduced beam quality due to thermally induced aberrations. Adaptive optics is an effective way to compensate the dynamic aberration. As a key component of adaptive optics system, a novel deformable mirror with $30\text{ mm}\times 30\text{ mm}$ effective reflecting surface and 49 electrostatic actuators has been fabricated successfully for wavefront correction of high average power lasers. The characteristics of this deformable mirror is analyzed and simulated in detail and the simulation result agrees well with the measured result. To meet the requirement of closed loop control, the optical influence function matrix is measured thoroughly. Based on the matrix, the laser wavefront aberration is corrected. From the result, it is explicit that the thermally induced aberration of high-power lasers is compensated by the deformable micro-mirror.

Key words: adaptive optics; thermally induced aberration compensation; deformable micro-mirror; laser diode-pumped solid-state laser

1 引 言

激光二极管抽运固体激光器(DPL)具有体积小、可靠、高效和光束质量好等特点。正是由于这些优点使得激光二极管抽运固体激光器尤其是大功率激光二极管抽运固体激光器在激光材料加工、航天通信和军事方面有着重要的应用。

在激光二极管抽运固体激光器中,晶体吸收的

抽运光有相当一部分转换为热能存储在晶体内部,使得晶体内部温度分布不均匀,引起热畸变效应,导致激光器的输出功率和光束质量大幅下降。

为了克服热畸变对激光器性能的影响,有学者使用相共轭镜和衍射光学器件来减少激光器的热畸变^[1],然而这仅仅对于静态畸变有效,对于由于激光能量波动和其它原因造成的动态畸变则无能为力。

* 国家自然科学基金(10476010)资助课题。

作者简介: 李 捷(1976~),男,广东湛江人,华中科技大学博士研究生,主要从事机电系统工艺及相关器件的研究。

E-mail: lj14163@yahoo.com.cn

收稿日期: 2005-11-21; 收到修改稿日期: 2006-01-17

自适应光学是一种有效的补偿动态畸变,改善光束质量的技术,但是因为其中的核心部件-变形镜制造复杂,价格昂贵所以限制了它的应用。

最近随着微机械加工技术的出现,大规模,低成本制造变形镜成为了可能。斯坦福大学的 J. Mansell 等^[2]使用微变形镜成功地对用于激光干涉重力波观测仪的激光器内的畸变进行了校正,获得了良好的 TEM₀₀ 单模输出,并显著改善了它的输出功率。

本文对一种可用于大功率激光二极管抽运固体激光器热畸变补偿的微变形镜^[3]的特性进行了理论分析、模拟和测试研究。

2 激光二极管抽运固体激光器中的热畸变

在激光二极管抽运固体激光器中,由热效应产生的激光光束波前畸变可以用一组泽尼克(Zernike)正交多项式系数来描述,此时光束波前的展开式为:

$$\varphi(x, y) = \sum_{k=0}^N a_k Z_k(x, y), \quad (1)$$

式中 $Z_k(x, y)$ 为泽尼克多项式,而 a_k 是相应多项式的系数。

图 1 所示的是用哈特曼(Hartmann)波前传感器测量的,用 175 W 的光纤耦合抽运 Nd:YAG 板条激光放大器产生的波前热畸变图^[2]。图中波前畸变的峰谷(PV)值为 813 nm。波前畸变的相应泽尼克系数如表 1 所示^[2]。

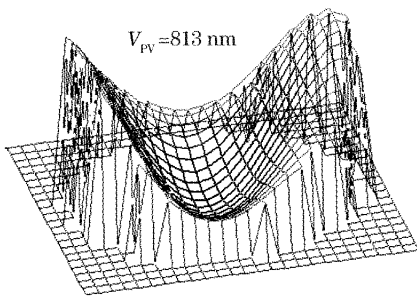


图 1 板条激光放大器产生的波前畸变

Fig. 1 Wavefront aberrations of slab laser amplifier

从表 1 中可以看到,在由板条激光放大器引起的光波波前畸变中,低频成分占绝大部分。特别是整体倾斜误差占全部光波波前畸变的 65% 左右,而离焦和像散占 25% 左右,剩下的是较少的高频成分。所以在校正热效应波前畸变时,重点校正低阶像差就可以取得良好的校正效果。

表 1 板条激光放大器中产生的波前畸变的泽尼克系数
Table 1 Zernike coefficients of the laser wavefront aberration in the slab laser amplifier

Term	Coefficient μm	Description
Z10	0.84	Tilt about x axis
Z11	0.806	Tilt about y axis
Z22	0.352	Astigmatism with 0° or 90° axis
Z21	0.23	Focus shift
Z42	-0.075	Third order spherical aberration
Z43	-0.054	

3 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。因而采用图 2 所示的内腔原理结构^[4]。

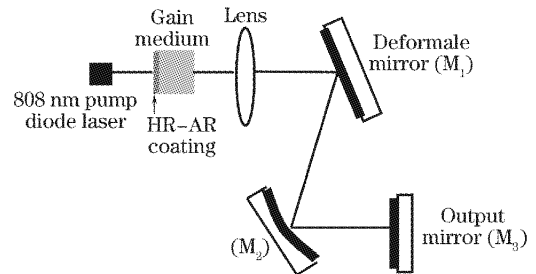


图 2 内腔补偿结构原理图

Fig. 2 Schematic of laser internal cavity compensation

此时激光器的谐振腔由 M_3 和增益介质一端的双向色膜构成,当采用 Nd:YAG 作为增益介质时,此膜对 808 nm 光增透而对 1064 nm 的振荡光全反。通过扩束镜使得入射在 M_1 上的光束能覆盖尽可能多的 M_1 的驱动单元,从而获得更大的补偿范围。利用 M_2 重新将光束缩小,最终通过 M_3 输出激光。

4 微变形镜变形特性的理论分析和模拟

设计了一种可用于大功率激光二极管抽运固体激光器热畸变补偿的新型可变形反射镜,并且通过工艺流片实际制造出有效反射面积为 30 mm×30 mm,拥有 49 个静电驱动单元的可变形反射镜。在这里,主要对微变形镜变形特性进行理论分析、模拟和测试,至于微变形镜的结构和制造过程可参考文献^[3]。

由于充当镜面的硅膜厚度与所确定的 30 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,可用弹性薄板的小挠度理论对变形反射镜进行分析。由相关知识可知,在垂直于板面的横向载荷作用下小挠度薄板的弹性曲面满足如下微分方程^[5]。

$$D \left[\frac{\partial^4 w(x,y)}{\partial x^4} + \frac{2\partial^4 w(x,y)}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w(x,y)}{\partial y^4} \right] = q(x,y), \quad (2)$$

式中 $w(x,y)$ 为薄板的变形函数, $q(x,y)$ 为所施加的横向分布载荷, D 为薄板的弯曲刚度,可表示为

$$D = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)}, \quad (3)$$

其中 E 和 ν 分别为板材料的杨氏模量和泊松比, t 为薄板的厚度。

通过推导得到当薄板受到 (ξ, η) 处的集中载荷 P 作用时,产生弯曲变形的挠度函数为

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

其中 W 为变形镜的长度和宽度。当给变形镜加上驱动电压时,变形镜在静电力的作用下发生变形,而静电力在反射镜的变形过程中随着两极板间的瞬时距离的变化同时也在变化。这是一个动态变化过程,一直进行到静电力和回复力达到平衡时才结束。

因此首先要根据起始电极间距和施加的电压计算出此时的静电驱动力,将此力作为一恒定力计算出由它所引起的镜面变形,接着以变形后实际的电极间距作为新的起始条件,重新计算静电力和此时的回复力,并比较它们之间的大小,如果相等(当这两者之差小于 $10^{-6} \mu\text{N}$,即认为它们相等)则表明此处即为变形后的平衡位置,如果不等则重复前面的处理过程,直至计算出最终的平衡位置。

由于镜面是一连续的整体,故而在某一点 (ξ, η) 上施加力 P 将引起整个镜面的变形,由(4)式可见,同样大小的力施加在镜面不同位置时,所引起的镜面变形也是不同的,根据力平衡原理: $kw = P$, k 为弹性系数,这就意味着镜面的等效刚度也会随着位置的不同而发生变化,因而应首先计算出不同位置处镜面的等效弹性系数,然后根据产生静电力的驱动电极所在位置,选用相应的弹性系数代入上述镜面变形分析中来计算回复力。

由(4)式计算出在施力位置处镜面的变形为

$$w(\xi, \eta) = \frac{1225 \cdot P}{4D \cdot W^{14}} [\xi^2 (\xi - W)^2 \cdot \eta^2 (\eta - W)^2]^2, \quad (5)$$

由此可得镜面在此处的等效弹性系数为

$$k = \frac{4D \cdot W^{14}}{1225 [\xi^2 (\xi - W)^2 \cdot \eta^2 (\eta - W)^2]^2}, \quad (6)$$

以静电力施加在镜面中心处为例进行分析,此时有 $\xi = \eta = 15 \text{ mm}$, 则可得中心处镜面的等效弹性系数为 $k = 96.44 \text{ N/m}$, 根据起始条件可知,当初始电极间距 d 为 $8 \mu\text{m}$, 电极上施加 60 V 电压时,产生的静电力 F_e 为 $62.23 \mu\text{N}$ 。由力平衡原理,可求出在此大小恒定力的作用下,镜面中心处的变形为

$$x = F_e / k = 0.6452 \mu\text{m},$$

此时上下电极的间距变为

$$d' = d - 0.6452 \mu\text{m} = 7.3548 \mu\text{m},$$

则相应的静电力 F'_e 变为 $73.623 \mu\text{N}$, 此时由于

$$F'_e - kx = 73.623 \mu\text{N} - 62.23 \mu\text{N} =$$

$$11.393 \mu\text{N} > 10^{-6} \mu\text{N},$$

故而应重复上述操作。编写 MATLAB 程序对上述过程进行处理,最终经过 13 次循环后,求得此种情况下镜面中心处的变形量为 $0.79562 \mu\text{m}$ 。

为了验证上述结果的有效性,采用有限元分析软件—ANSYS 对同种情况进行分析,图 3 所示结果表明当在中心驱动电极上施加 60 V 电压时,镜面中心的最大变形量为 $0.81826 \mu\text{m}$, 与迭代法计算出的结果相比存在 2.77% 的误差。图 4 所示的是用哈特曼传感器测得的测试结果。从图中可以看到当在中心驱动电极上施加 60 V 电压时,镜面中心的最大变形量为 $0.7568 \mu\text{m}$, 与迭代法计算出的结果相比存在 4.87% 的误差。

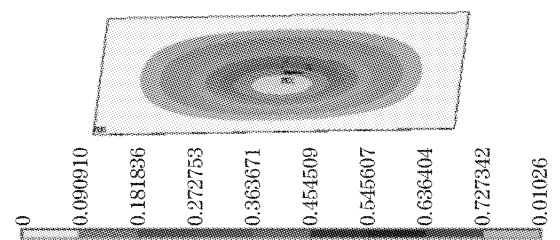


图 3 反射镜变形的 ANSYS 模拟结果

Fig. 3 ANSYS simulation result of the deformable mirror

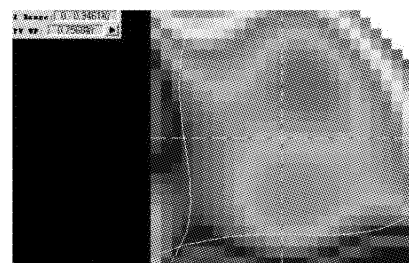


图 4 反射镜变形的测试结果

Fig. 4 Test result of the deformable mirror

上述分析都是基于单一电极上施加电压时的情况进行进行的,然而本设计中反射镜拥有 7×7 个驱动单元,并且在实际使用过程中往往需要多个电极同时作用以达到实现特定镜面面型的目的。下面将对多驱动器同时作用时的情况进行讨论。

施加在 (ξ, η) 处的集中力 P 可表示为

$$P(x, y) = P \cdot \delta(x - \xi) \cdot \delta(y - \eta), \quad (7)$$

其中 δ 为变分符号。类似的,当在多处有集中力作用时,镜面受力情况可表示为

$$P(x, y) = \sum_{i=1}^n P_i \cdot \delta(x - \xi_i) \cdot \delta(y - \eta_i), \quad (8)$$

其中 P_i 表示作用在 (ξ_i, η_i) 处的力, n 表示镜面受力的个数。

经过同样的处理可得此时镜面的挠度函数为

$$w(x, y) = \frac{1225 \sum_{i=1}^n P_i \cdot \xi_i^2 (\xi_i - W)^2 \eta_i^2 (\eta_i - W)^2}{4D \cdot W^{14}} \cdot x^2 (x - W)^2 \cdot y^2 (y - W)^2 = \sum_{i=1}^n \frac{1225 P_i}{4D \cdot W^{14}} \cdot \xi_i^2 (\xi_i - W)^2 \eta_i^2 (\eta_i - W)^2 \cdot x^2 (x - W)^2 \cdot y^2 (y - W)^2. \quad (9)$$

由(9)式可清楚地看到,当多个载荷同时作用在镜面上时,其引起的镜面变形可等效成各载荷单独作用时引起的镜面变形的叠加。因而在实际应用中只需首先确定在各个电极上单独施加不同电压时所引起的镜面变形,然后根据相应的要求对它们进行组合选取,这样一来将大大简化对镜面所要进行的控制。

5 微变形镜特性实验研究

为了实现闭环控制,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。变形镜的光学影响函数是指当仅有一个驱动器作用而其它驱动器仅由弹性力约束时镜面的局部变形。变形镜的整个面形就是各个驱动器的影响函数叠加所确定。变形反射镜的光学影响函数表达式与电极所施加电压的关系如下式所示^[6]:

$$\Delta S(x, y) = S(x, y) - S_0(x, y) = \sum_{j=1}^m c_j \varphi_j(x, y), \quad (10)$$

其中 $S(x, y)$ 为变形镜施加电压后的面形, $S_0(x, y)$ 为变形镜未加电压时的面形, $\varphi_j(x, y)$ 为光学影响函数, m 为电极数目, $c_j = V_j^2$, 表示第 j 号电极控制电压的二次方程。由此可以得出结论: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,而且在理想情况下每一点的变形量是各个电极单独作用时候的叠加。得到变形镜的光学影响函数后,就可以算出控制电压矩阵。图 5 是用算出的控制电压矩阵对激光光束波前畸变进行校正前后的效果图。

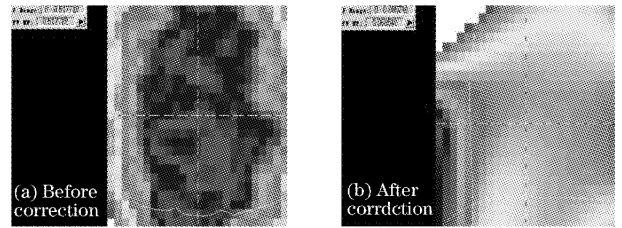


图 5 畸变波前和补偿后的波前

Fig. 5 Aberrated and compensated wavefront

从图 5 中可以看到,校正前的激光光束波前畸变的 V_{PV} 值为 $0.5177 \mu\text{m}$ [图 5(a)],用微机电系统变形镜进行校正后,激光光束波前畸变的 V_{PV} 值减少为 $0.0685 \mu\text{m}$ [图 5(b)]。更多的实验结果如表 2 所示。

表 2 实验结果

Table 2 Experimental results

PV of wavefront aberration / μm	PV of wavefront after correction / μm	Strehl ratio / %
0.567	0.021	98.08
0.657	0.050	89.88
0.898	0.051	89.30
1.021	0.057	87.04
1.887	0.067	82.38

由表 2 可以看到,微机电系统变形镜能够很好地改善激光的光束质量。

6 结 论

对微变形镜的特性进行了理论分析、模拟和实验研究,证明了微变形镜可以很好地改善激光二极管抽运固体激光器的光束质量。

参 考 文 献

- 1 S. Makki, J. Leger. Solid-state laser resonators with diffractive optic thermal aberration correction [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1999, **35**(7): 1075~1085
- 2 J. D. Mansell. *Micromachined Deformable Mirrors for Laser Wavefront Control* [D]. USA, Stanford University, 2002. 36~39
- 3 Yu Hongbin, Chen Haiqing, Zhang Dacheng *et al.*. Novel deformable mirror based on silicon micromachining technology[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, **16**(7): 825~829 (in Chinese)
余洪斌,陈海清,张大成等. 基于硅微加工技术的新型可变形反射镜[J]. *强激光与粒子束*, 2004, **16**(7): 825~829
- 4 W. Lubeigt, G. Valentine, J. Girkin *et al.*. Active transverse mode control and optimisation of an all-solid-state laser using an intracavity adaptive-optic mirror[J]. *Opt. Exp.*, 2002, **10**(13): 550~555
- 5 Wu Lianyuan. *Plate Theory* [M]. 1st edition, Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 1989. 16~17 (in Chinese)
吴连元. *板壳理论*[M]. 第1版. 上海:上海交通大学出版社, 1989. 16~17
- 6 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

中国光学期刊网是由中科院上海光学精密机械研究所主办、国内光学期刊界共同参与建设的光学期刊网络信息发布平台。自 2004 年 5 月开通以来,得到了广大科研工作者、企事业单位人士的好评。

欢迎成为《中国光学期刊网》企业会员

中国光学期刊网(<http://www.opticsjournal.net>)是由中科院上海光学精密机械研究所主办、国内光学期刊界共同参与建设的光学期刊网络信息发布平台。自 2004 年 5 月开通以来,得到了广大科研工作者、企事业单位人士的好评。

为进一步提高服务水平,中国光学期刊网从 2006 年起在信息服务上实行会员制度,凡光电子、激光、光通信等相关的企业均可申请成为中国光学期刊网的企业会员,中国光学期刊网将为企业会员提供优质超值的专业服务。

一、会员企业享受的服务包括:

- 1) 企业名称在中国光学期刊网首页的会员企业栏目中出现,并链接到企业自己的网址。
- 2) 会员企业可获赠光学类期刊一份,全年 12 册,在《中国激光》《光学学报》《激光与光电子学进展》《Chinese Optics Letters》中任选一种。
- 3) 可免费在本站“特别推荐”栏目发布文字信息(含广告)10 条,每篇不过 2000 字。
- 4) 如在中国光学期刊网发布广告,可享受广告报价的 80% 优惠。
- 5) 优先或免费参加光学期刊网组织的各类学术和业务活动。
- 6) 可免费阅读本网站期刊全文 300 篇次。

二、会员义务:

- 1) 注册时向中国光学期刊网递交企业真实信息。
- 2) 每年交纳会员费 2800 元,会员资格从交费之日起计算,一年有效。
- 3) 不得将中国光学期刊网提供给会员的信息转给第三方使用。
- 4) 尊重并保护本网及论文作者的知识产权。
- 5) 在本网发布信息必须遵守中华人民共和国相关法律法规。

三、成为企业会员的步骤:

- 1) 注册成为中国光学期刊网的一般用户,也可以直接填写广告投放申请表单,说明您的意向。
- 2) 来信 mail@opticsjournal.net 告知您已经注册成功。并请告知选择何种期刊及收刊地址、联系人。
- 3) 银行汇款 2800 元至下列帐户:
开户行:工商银行上海嘉定支行营业部 户 名:中国科学院上海光学精密机械研究所
帐 号:1001700809026400195
- 4) 联系人:郑继承;电话:021-69918253;Email:expert@mail.siom.ac.cn