

文章编号 1004-924X(2010)08-1781-07

高能激光反射镜热变形补偿

冯志庆^{1,2}, 白 兰³, 张增宝⁴, 林冠宇⁵

- (1. 大连理工大学 物理与光电工程学院, 辽宁 大连 116024; 2. 大连民族学院 理学院, 辽宁 大连 116600;
3. 大连民族学院 机电信息工程学院, 辽宁 大连 116600;
4. 中国科学院 大连化学与物理研究所 化学激光国家重点实验室, 辽宁 大连 116023;
5. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘要:研制了一套由压电陶瓷驱动器、压力传感器、环状力施加机构和控制电路组成的反射镜动态热变形补偿系统用于补偿激光反射镜热变形球差。圆形反射镜在两个同轴不同半径的环形力作用下, 其内环区域产生曲率可变的抛物面形变, 由此补偿反射镜热变形带来的球差项。对镜体进行了有限元数值计算, 建立了变形量与沉积热量与受力的关系。采用口径为 100 mm, 厚度为 8 mm 平面反射镜进行了受力-变形以及辐照-受力-变形实验, 利用干涉仪对面型进行监测。研究表明, 在不同推力作用下, 有效区域内变形始终保持抛物面形。给出了推力-面型变化曲线, 在 225 N 推力下, 中心最大变形超过 3 μm 。在不同热沉积量下, 镜体中心位移和受力保持线性关系, 力-变形系数为 0.013 $\mu\text{m}/\text{N}$ 。

关键词: 高能激光; 反射镜; 球差; 热变形; 热补偿;

中图分类号: TN243 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20101808.1781

Thermal deformation compensation of high-energy laser mirrors

FENG Zhi-qing^{1,2}, BAI Lan³, ZHANG Zeng-bao⁴, LIN Guan-yu⁵

- (1. *Colloge of Physics & Optoelectronic Technology, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China*; 2. *School of Science, Dalian Nationalities University, Dalian 116600, China*;
3. *School of Electromechanical & Information Engineering, Dalian Nationalities University, Dalian 116600, China*; 4. *National Key Laboratory of Chemical Lasers, Dalian Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Dalian 116023, China*;
5. *State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*)

Abstract: A compensation system composed of a PZT, a pressure sensor, an annular force mechanism and a control circuit is developed to compensate the sphere error brought by thermal deformation of a laser mirror. Under the effect of two coaxial annular forces with different radii, the circular mirror produces parabolic deformation in the inner region, which can compensate the sphere error brought by the thermal deformation of the mirror. The finite element method is used to analyze the mirror and the relation among the center displacement with energy absorbance and the force is derived. The experi-

收稿日期: 2010-04-23; 修订日期: 2010-06-17.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目

ments of force-deformation and energy absorbance-force-deformation are conducted for a flat mirror with the diameter of 100 mm and the thickness of 8 mm, in which an interferometer is used to monitor the surface deformation. Obtained results show that under different forces, the deformation of effective region always maintains a parabolic shape. Furthermore, the force-deformation curve is obtained, which shows that the centre displacement is over $3 \mu\text{m}$ under 225 N. Under different energy absorbances, the central displacement of the mirror varies with the force in linearity and the coefficient of force-centre displacement is $0.013 \mu\text{m}/\text{N}$.

Key words: high energy laser; mirror; sphere error; thermal deformation; thermal compensation

1 引言

光束质量是激光器非常重要的性能指标之一, 光束质量蜕变会随着激光器功率的增大, 出光时间的增加越来越严重。

腔镜热变形也是引起光束质量蜕变的主要原因, 减小腔镜蜕变, 主要有以下几种办法(1)选用超低热膨胀材料。目前比较好的材料是单晶硅, 碳化硅, 但这些材料仍无法使光束质量维持在 5 倍衍射极限以下。(2)提高光学镀膜反射率, 减少腔镜吸收。目前光学镀膜反射率已经达到 99.99%, 继续提高非常困难, 因为在激光实际使用中, 腔内存在一定程度的污染, 光学器件反射率一般也不会超过 99.99%。(3)采用腔镜水冷技术。这是目前最为先进的技术, 但系统复杂, 造价昂贵, 国内微细加工技术还有些问题需要解决, 不过相关理论和数值分析工作已经开展^[1-6]。(4)运用变形镜技术。李捷, 刘良清, 胡放荣等人开展了 MEMS 微变形镜研究, 用于补偿介质热效应引起的波前畸变^[7-9], J. SCHWARZ 等研究了利用环型力驱动直径 25.4 mm 薄平面镜外凸变形来补偿固体激光圆柱型介质棒热透镜效应^[10], 激光最大功率为 800 W。但利用主动变形镜实现更大口径, 更高功率(千瓦以上)激光器腔镜热变形补偿的研究尚未见报道。

基于上述研究, 本文提出了一套反射镜动态热变形补偿系统。该系统采用压电陶瓷驱动器, 通过一个环形施力结构, 令光辐照区域产生曲率可变的抛物面型内凹变形, 以此补偿反射镜热变形带来的球差项, 利用有限元法分析了镜辐照热变形以及镜体受力变形, 建立了变形量与热沉积、环形均布力间的关系。计算表明本补偿系统可以实现非稳腔激光腔镜热变形球差的补偿, 同时在实验上获得了验证。

2 反射镜热补偿结构与原理

圆形反射镜在两个与镜面中心同轴反向的环状力作用下, 镜面产生对称性变形, 如图 1 所示。Warren C. Young, Richard G. Budynas 等在《Roark 应力应变公式》一书等利用薄板理论给出了同轴环型均布力作用下的圆型薄板应变公式^[11], 内环区形变可以用下面公式表达^[10-11]:

$$\begin{cases} y(r) = y_c + \frac{waC_1 r^2}{2D(1+\nu)} \\ y_c = -\frac{wa^3}{2D} \left(\frac{C_1}{1+\nu} - 2C_2 \right) \end{cases}, \quad (1)$$

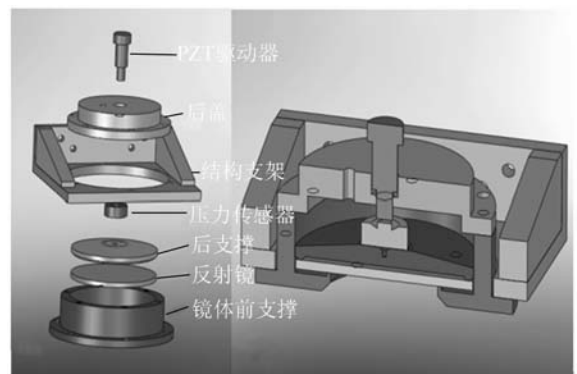
其中:

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

$$C_1 = \frac{r_0}{a} \left[\frac{1+\nu}{2} \ln \frac{a}{r_0} + \frac{1-\nu}{4} \left(1 - \frac{r_0^2}{a^2} \right) \right],$$

$$C_2 = \frac{r_0}{4a} \left[\left(\frac{r_0^2}{a^2} + 1 \right) \ln \frac{a}{r_0} + \frac{r_0^2}{a^2} - 1 \right]. \quad (3)$$

对于几何形状确定, 材料确定的镜体而言: 式



(a) 结构部件分离视图

(b) 结构轴向剖视图

(a) View of separated parts

(b) Axial section view of mechanism

图 1 补偿结构示意图

Fig. 1 Compensation mechanism

中 D, C_1, C_2 均为常数。 y_c 为镜面中心位移, E 为弹性模量, ν 为泊松比, a 为镜面半径, h 为镜体厚度, r_0 为内环半径, w 为环形线均布载荷力。

表达式 1,2,3 成立的条件是 $0.2 \leq \frac{r_0}{a} \leq 0.8$,

如果半径比值不在此区间不能用环形力模型近似。从公式可以看到, 镜面中心位移在弹性微变区间内和施力成正比。

3 热补偿数值分析

实际应用中, 镜面外环施力点并不在 a 处, 为此, 本文使用 ANSYS 有限元软件对实际镜体进行了数值计算, 软件由大连化物所化学激光国家重点实验室提供, 计算了给定吸收辐射量条件下的热形变, 不同均布力载荷条件下的弹性形变以及在不同辐照量和均布力同时施加条件下镜体的辐照面形变。

在线性均布力的作用下, 反射镜施力内环区表面变形为抛物型凹面, 中心点位移量与力呈线性关系, 厚度为 8 mm, 直径为 100 mm 的镜体在 300 N 的环形推力下, 镜面中心最大位移为 $3.9 \mu\text{m}$, 图 2 给出了不同力载荷的面形曲线, 力-变形量系数为 $0.013 \mu\text{m}/\text{N}$ 。在前期研究中, 作者针对激光器工作状态反射镜热变形实时测量难的问题, 开展了反射镜热变形有限元分析的工作, 激光器为非稳腔, 贝塞尔光束形式, 激光反射镜处在均匀辐照条件下, 由此产生一个中心对称的温度梯度场, 导致辐照区内的反射面近似为抛物面的热形变。随着辐照时间的增加, 面曲率变大, 图 3 给出了不同辐照时间下镜面热变形有限元计算结果 (小图给出中心点位移随辐照时间的变化曲线),

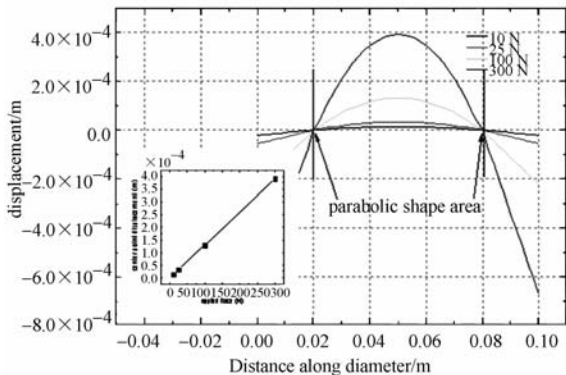


图 2 不同力载荷与镜面变形数值分析结果

Fig. 2 Surface deformation vs different forces

激光功率不变, 镜体处于真空状态, 热交换在计算中可以忽略, 因而不同辐照时间的热形变和不同辐照量是对应的。尽管激光器在实际工作中照射到反射面上的功率密度并不均匀, 但这种不均匀具有随机性, 用均匀辐照简化问题研究球差补偿依然合理, 前提条件是激光光斑中心须与镜面圆心重合。

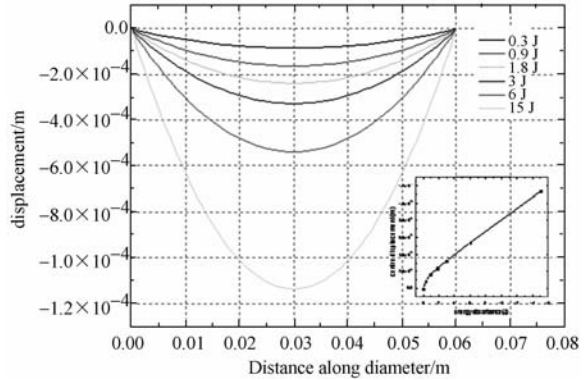


图 3 不同沉积热量(沉积功率为 3 W)与镜面变形有限元计算结果

Fig. 3 FEA results of deformations vs different absorbance energies

在辐照条件下, 施加在镜体上的均布力还需要克服镜体热应力, 这里分别计算了沉积热量为 3 J, 6 J, 15 J 情形下不同力的变形 (沉积功率均为 3 W), 图 4(a) 和 4(b) 给出了 6 J 和 15 J 沉积热量与不同受力条件的面形曲线。计算表明, 在不同辐照量条件下, 镜面变形和力的线性关系不变, 图 5 显示在 3 J, 6 J, 15 J 热沉积条件下, 中心位移和受力关系为较好的线性, 线性拟合度 R^2 均好于 0.999。对本文所用的镜体, 力-变形量系数维持不变, 为 $0.013 \mu\text{m}/\text{N}$ 。但不同辐照的力-中心位移关系曲线截距发生改变, y 轴交点为自由辐照中心点变形量, x 轴交点为克服辐照形变所用的力, 从面形曲线对比可以看出, 吸收热量增大后, 辐照面边缘处面形变差。

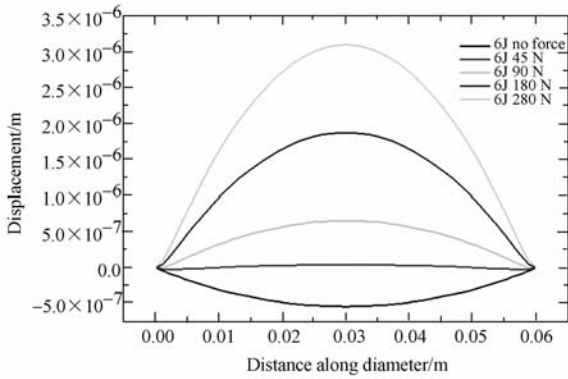
结合计算结果, 可以建立辐照中心位移和热沉积量, 均布力之间的表达式:

$$y_c = -A(Q) + Bf, \quad (4)$$

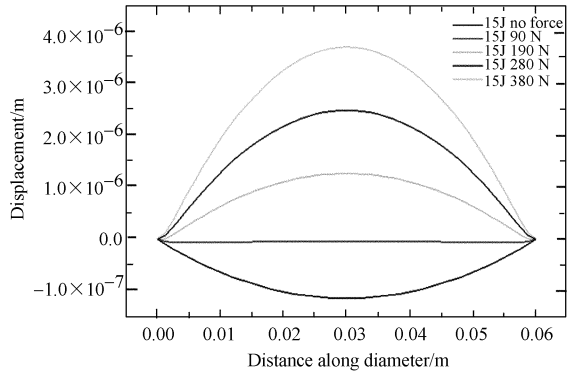
对本文所用镜体, $B = 1.296 \times 10^{-8} \text{ m}/\text{N}$, $A(Q)$ 是相对位移-热沉积量函数, 由图 3 给出。当吸收超过 1 J 后, 中心点位移和沉积热量间可以用线性函数表达:

$$A(Q) = A_1 + A_2 Q, \quad (5)$$

其中: $A_1 = 1.434 \times 10^{-7} \text{ m/J}$, $A_2 = 6.627 \times 10^{-8} \text{ m/J}$



(a) 6 J 辐照吸收热量
(a) 6 J absorbance energy



(b) 15 J 辐照吸收热量
(b) 15 J absorbance energy

图 4 面形计算结果

Fig. 4 Results of surface deformation

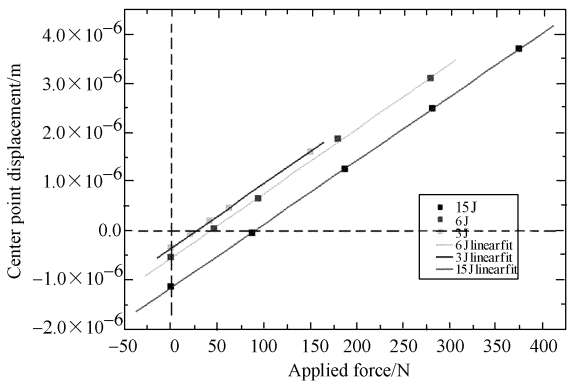


图 5 吸收 3 J, 6 J, 15 J 辐照量, 不同力作用下辐照中心相对辐照边缘位移计算结果

Fig. 5 Center displacement vs different forces under energy absorbances of 3 J, 6 J, 15 J

4 实验

4.1 镜体受力变形实验

本文使用直径为 100 mm, 厚度为 8 mm 的硅反射镜进行力-变形实验, 机械结构如图 1, 材料为铝, 施力的两个环面的平面度公差为 0.002 mm, 传感器表面和环面平行度公差为 0.01 mm, 前支撑、后支撑、后盖均为轴对称, 保证在驱动器推力作用下, 轴向形变一致, 力传感器为 HBM 公司的 C9B, 测量范围为 0~1 kN, 驱动器为 PI 公司的 P212.8 型压电陶瓷驱动器, 自行研制了高压驱动与压力采集模块, 通过单片机实时检测压力信号来控制压电陶瓷驱动器的高压, 实现压力闭环控制, 由于压力和表面形变存在对应关系, 即使机械结构存在形变, 依然可保证镜面具有确定量的形变, 本次研究中驱动器仅起到推力的作用, 面形检测仪器为 4DTechnology 公司的 Fiz-Cam1500 型干涉仪。

施力环形面的加工精度对补偿效果影响很大, 如图 6 所示, 条纹非理想圆形就是加工误差引起环面压强分布不均所致, 通过适当的局部处理会有所改善, 随着施力增加, 力分布逐渐趋于均

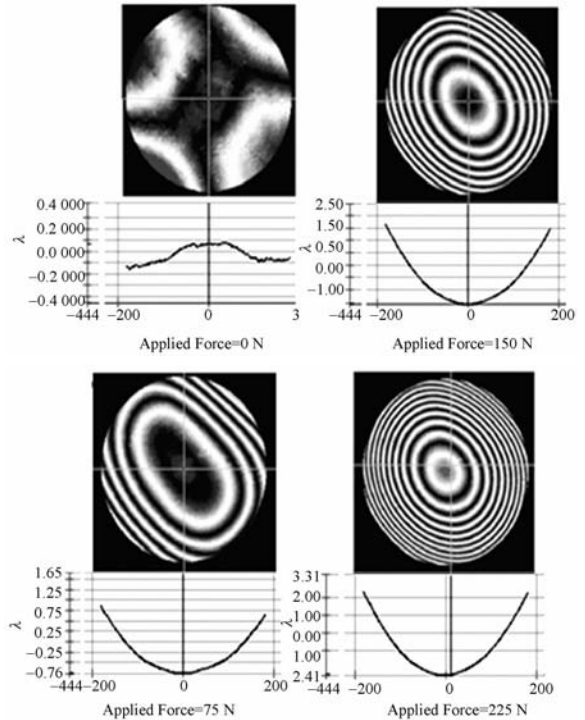


图 6 反射镜受力表面形变测量结果

Fig. 6 Surface deformation vs different forces

匀。图中给出了 x 方向的抛物线型的剖面曲线,坐标以波长形式给出($\lambda = 650 \text{ nm}$),限于图片大小限制, Y 方向剖面曲线没有给出。力-中心位移关系由图 7 给出,实验结果表明力和中心点位移基本为线性关系。实验测得力变形系数为 $0.0145 \mu\text{m}/\text{N}$ 。

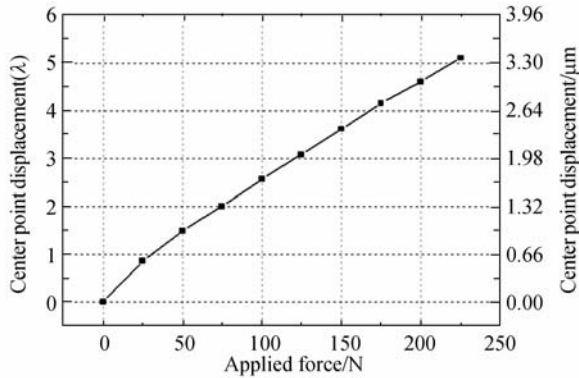


图 7 中心位移和受力关系

Fig. 7 Centre displacement vs different forces

4.2 热变形补偿

使用 30 W , 808 nm 半导体激光器整形后 30° 辐照,变形镜前放置圆形光阑保证辐照区域为圆形并防止镜架接受辐照,激光器输出功率密度可近似认为均匀分布。变形镜表面未镀膜,热沉积功率约为 2.1 W ,辐照 5 s ,利用 zygo 干涉仪获得表面变形,在随后的 2 s 内,给镜体分别施力 50 N , 70 N 和 100 N ,检测面型变化,图 8 给出不同力下的面形。

未加力时, PV 值为 $0.735 \mu\text{m}$, 50 N 时为 $0.076 \mu\text{m}$, 70 N 时为 $0.127 \mu\text{m}$, 100 N 时为 $0.437 \mu\text{m}$,从干涉图可以看出,施加 50 N 力后热变形基本抵消, 100 N 后变为内凹球面,中心点位移和力间基本为线性关系,验证了变形补偿的可行性。由于镜架热传导等实验因素, 5 s 后的最大形变小于计算值约 $0.1 \mu\text{m}$,在施力同时,辐照依然存在,可以推出力-中心位移量系数为 $0.142 \mu\text{m}/\text{N}$ 。和未辐照情况下测得的变形系数比较接近,

辐照时间增加,热扩散影响显著,无法再对计算进行精确验证。

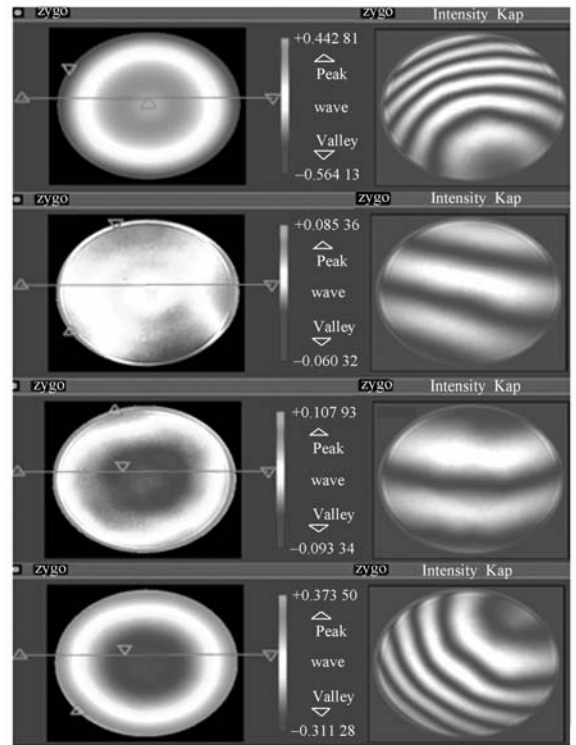


图 8 辐照 $5 \sim 7 \text{ s}$ 时受力后表面形变的测量结果(热沉积功率 2.1 W)

Fig. 5 Surface deformation vs different forces under irradiation of $5 \sim 7 \text{ s}$

5 结 论

本文设计了可用于高能激光反射镜热变形的补偿系统,通过环形施力面作用于反射镜上,引起反射表面内凹抛物面形变,补偿激光辐照产生的球差项。对口径为 100 mm ,厚度为 8 mm 的反射镜进行了数值分析,计算了辐照-受力热变形,并给出了辐照-受力同时存在情况下辐照面形变化与热沉积量和均布力的函数关系。计算表明,当吸收热量 $> 1 \text{ J}$ 后,镜面中心的位移变化是热沉积量以及环形均布力的一次函数。在不同热沉积量情况下,力-中心变形系数不变,均为 $0.013 \mu\text{m}/\text{N}$ 。进行了受力-表面变形实验以及辐照-受力-变形实验,对理论分析进行了验证。研究表明该系统可以补偿自身热变形球差项并能产生较好的抛物面,可以应用于非稳腔、均匀分布激光器腔镜的

热补偿,下一步工作将结合辐照-时间特性研究激

光器腔镜球差的动态控制问题。

参考文献:

- [1] 彭玉峰、程祖海. 强激光反射镜基体材料的热畸变特性有限元分析[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(1): 5-8.
PENG Y F, CHENG Z H. Finite element analyses of thermal distortions of mirror substrates for high power lasers[J]. *High Power laser and Particle Beams*, 2005, 17(1): 5-8. (in Chinese)
- [2] PENG Y F, CHENG Z H, ZHANG Y H, *et al.*. Laser-induced temperature distributions and thermal deformations in sapphire, silicon, and calcium fluoride substrates at $1.315\ \mu\text{m}$ [J]. *Optical Engineering*, 2001, 40(12): 2822-2829.
- [3] 余文峰, 程祖海, 孙峰, 等. 高功率多层水冷硅基反射镜的研究[J]. 中国激光, 2004, 31(z1): 489-491.
YU W F, CHENG Z H, SUN F, *et al.*. Investigation of the multilayer water-cooling Si mirror used in high power laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2004, 31(z1): 489-491. (in Chinese)
- [4] 彭玉峰, 梁珍珍, 张毅, 等. 强激光腔镜温升对腔几何参数和远场光强的影响[J]. 强激光与粒子束, 2007, 19(9): 1421-1424.
PENG Y F, LIANG ZH ZH, ZHANG Y, *et al.*. Influences of temperature rise of high-power laser cavity-mirrors on resonator parameters and far-field intensity [J]. *High Power laser and Particle Beams*, 2007, 19(9): 1421-1424. (in Chinese)
- [5] 刘文广, 饶鹏, 华卫红. 非均匀激光辐照下硅镜热变形对光束传输特性的影响[J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(10): 1615-1617.
LIU W G, RAO P, HUA W H. Effects of thermal distortion of si mirror irradiated by non-uniformity laser intensity on laser propagation[J]. *High Power laser and Particle Beams*, 2008, 20(10): 1615-1617. (in Chinese)
- [6] 周次明, 程祖海. 强激光反射镜热畸变对光束传输特性的影响[J]. 强激光与粒子束, 2003, 15(10): 969-972.
ZHOU C M, CHENG Z H. Influence of thermal deformations of high power laser mirror on beam transfer characteristic[J]. *High Power laser and Particle Beams*, 2003, 15(10): 969-972. (in Chinese)
- [7] 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.
LI J, CHEN H Q, YU H B. 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)
- [8] 刘良清, 袁孝. 微变形镜内腔补偿激光模式畸变研究[J]. 强激光与粒子束, 2007, 19(5): 718-722.
LU L Q, YUAN X. Intracavity aberration compensation of laser mode using membrane deformable mirror[J]. *High Power Laser and Particle Beam*, 2007, 19(5): 718-722. (in Chinese)
- [9] 胡放荣, 姚军. 静电排斥型微机电系统变形镜驱动器[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(1): 41-44.
HU F R, YAO J. Microelectromechanical systems deformable mirror actuator based on electrostatic repulsive force[J]. *High Power Laser and Particle Beam*, 2010, 22(1): 41-44. (in Chinese)
- [10] SCHWARZ J, RAMSEY M, HEADLEY D, *et al.*. Thermal lens compensation by convex deformation of a flat mirror with variable annular force[J]. *Applied Physics B*, 2006(82): 275-281.
- [11] WARREN Y C, RICHARD B G. *Roark's Formulas for Stress and Strain* [M]. 7th Edition. New York, 2002.

作者简介:



冯志庆(1975—),男,吉林榆树人,博士,讲师,1999年于南开大学获得学士学位,2005年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,现为大连理工大学光学工程方向博士后,主要从事光电检测方面的研究。E-mail: fzq@dlnu.edu.cn



张增宝(1976—),男,河北保定人,博士,副研究员,1999年于南开大学获得学士学位,2004年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事光学设计以及高能激光光束质量分析与诊断方面的研究。E-mail: zhangzb@dicp.ac.cn



白兰(1975—),女,吉林人,博士,副教授,1998年于长春大学获得学士学位,2005年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事微光机电集成,光学结构有限元分析等方面的研究。E-mail: bailanbl@yahoo.com.cn



林冠宇(1976—)男,吉林长春人,副研究员,2007年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获博士学位,主要从事光学遥感仪器的研制工作。E-mail: linguanyu760726@sohu.com

● 下期预告

高功率半导体激光器列阵封装引入应变的测量

王 焯^{1,2}, 张 岩^{1,2}, 秦 莉¹, 刘 云¹, 王立军¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 激发态开放实验室, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

高功率半导体激光器列阵在封装过程中极易引入封装应变,影响了激光器的功率,波长和可靠性,所以对激光器的封装应变的测量非常重要。激光器输出光的偏振度变化反映激光器有源区中量子阱的导带到重空穴带和导带到轻空穴带的带隙变化,因此通过测量激光器输出光的偏振度可以间接测量激光器在封装过程中引入的应变,可以作为一种简单有效的测量激光器封装引入应变的方法。本文对800 nm GaAsP/GaInP 高功率半导体激光器列阵有源区的应变进行了测量,测量结果与有限元模拟计算结果吻合较好,将实验测量的结果与理论计算出的有源区的固有应变对比后发现,激光器芯片在封装过程中受到铜热沉的压缩,封装应变被引入到有源区中,激光器中间由封装引入的应变大于边缘由封装引入的应变。测量的激光器有源区的应变起伏比较明显,说明采用电镀方法制备的铜焊接层中存在缺陷,使得测量出的最大的封装应变为 1.370×10^{-6} ,测量的缺陷密度为 40.8%。激光器偏振度的测量能够正确反映出激光器的缺陷和封装应变值,进而可以有效衡量激光器封装质量的好坏。