

文章编号: 0258-7025(2002)Supplement-0257-03

# 强激光反射镜热变形的瞬态特性研究\*

程祖海 彭玉峰 张耀宁 周次明 余文峰 陆宇灵 王寿增 李锋

(华中科技大学激光技术国家重点实验室, 武汉 430074)

**提要** 利用2kW CO<sub>2</sub>激光器作为激光照射源,采用测量精度为 $\pm 0.03 \mu\text{m}$ 的 Twyman-Green 干涉仪、CCD 摄像技术、计算机数据采集与处理系统,对普通硅镜和相变致冷硅镜在强光照射下不同时刻的热变形进行了实时对比测量,得到了在不同激光照射时间下镜面热变形的干涉条纹序列图以及热变形量随激光照射时间的变化实验曲线。

**关键词** 反射镜, 热变形, 高功率激光器

**中图分类号** TN248 **文献标识码** A

## Experimental Investigation on Transient Characteristics of Thermal Deformations of High-power Laser Mirrors

CHENG Zu-hai PENG Yu-feng ZHANG Yao-ning ZHOU Ci-ming

YU Wen-feng LU Yu-ling WANG Shou-zeng LI Feng

(The State Key Laboratory of Laser Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

**Abstract** By utilizing of 2 kW CO<sub>2</sub> laser as a laser source, a Twyman-Green's interferometer, CCD photography technology, and a computer data collection and procession system, the thermal deformations of two types of mirrors have been measured, respectively. The experimental results show that the thermal deformations of the phase-change-cooled mirrors are smaller than those of general silicon mirrors, and that the initial thermal distortions of the mirror surface increase greatly with increasing of laser irradiation time; after about two seconds, the thermal distortions increase slowly. The thermal deformation interferograms of the mirrors at different times are obtained.

**Key words** mirror, thermal deformation, high power laser

### 1 引言

在高功率激光器中,激光腔镜热吸收变形是光束质量的主要影响因素。通常情况下,激光腔镜受强激光的直接辐照,除大部分激光被镜面反射,总还有部分光穿入镜体内部或在其表面被吸收后产生局部蓄热,引起光学元件的非均匀温升,形成温度和应力梯度,反射镜面发生热变形,使激光谐振腔工作参数偏离设计值,引起模式耦合,激发起多模振荡,导致激光输出的频谱加宽、相干长度变短、激光束的发散角增加、光束质量变坏、激光输出功率下降等多种不良后果,制约了高功率激光器性能的提高。

1978年美国空军武器研究实验室的 T. S. Acceffa 等认为:全反镜的热吸收变形和输出窗口厚度、折射率随温度的变化,是强激光系统光学畸变五

大因素中最重要的两个因素。同年,俄罗斯科学院列别捷夫物理所的 V. V. Apollonov 提出了采用微孔结构冷却激光镜的可能性。1981年,他们<sup>[1]</sup>又对采用多孔结构液态金属冷却的强光光学元件进行了理论计算。同年,美国贝尔空间电子公司冷却激光镜小组的 F. M. Anthony 和美国空军武器研究实验室的 A. K. Hopkins 等<sup>[2]</sup>在美国国防研究发展中心和美国空军部的支持下,对主动冷却(actively cooled)硅镜进行了研究,认为采用主动冷却的硅镜是强激光反射镜的最佳方案。1989年,加州大学圣巴巴拉分校的 W. W. Tuen 和 R. V. Fleishmen 等又提出了微孔丝网夹心三明治结构的超薄多层镜结构,并获得了  $9.5 \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{K})$  热传导效率的良好结果<sup>[3]</sup>。1991年,美国技术公司的 John Bluege 发明了“固-液相变冷却镜”<sup>[4]</sup>。该发明采用了超薄镜结构,基体材料选用硅,其工作机理是依靠储存于镜体内的相变材料的相变吸热过程,达到冷却目的。同

时,近几年来我们也开展了强激光不变形镜的实验与理论研究工作<sup>[5,6]</sup>,其中“相变致冷不变形镜”获得国家发明专利。

本文利用 2 kW CO<sub>2</sub> 激光器作为激光照射源,对普通硅镜和相变致冷硅镜在强光照射下不同时刻的热变形进行了实时对比测量,得到了在不同激光照射时间下镜面热变形的干涉条纹序列图以及热变形量随激光照射时间的变化实验曲线等。

## 2 实验装置

实验测试系统如图 1 所示。其中 2 kW CO<sub>2</sub> 激光器为强激光源,He-Ne 激光器为泰曼干涉仪标准激光源, sample mirror 为被测样品镜, standard mirror 为参考镜, mirror 为普通反射镜, beam splitter 为半透半反分光镜, blackbody 为黑体, lens 为透镜组, shutter 为光闸,另外辅助系统为 CCD 摄像机、监视器、计算机和打印机构成的图像处理系统。

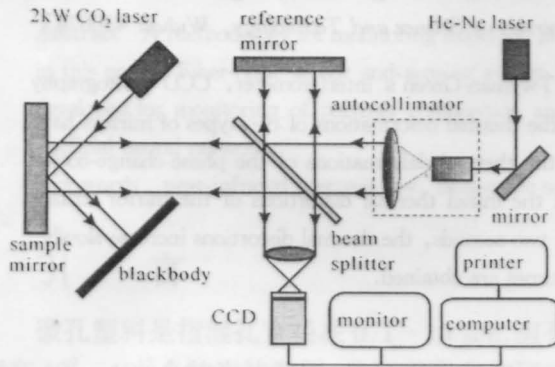


图 1 激光腔镜热变形实验装置

Fig.1 Experimental setup for thermal deformations of laser resonator mirrors

系统的工作原理是:2kW CO<sub>2</sub> 激光器输出的强激光入射到被测样品反射镜上,镜体因吸收部分能量产生热变形。镜表面由泰曼-格林干涉仪产生干涉条纹,经 CCD 摄像机转换成电信号传送到图像采集卡,计算机再通过已有软件对采集卡中获得的信息进行处理、模拟,即可获得镜表面的变形大小。泰曼-格林干涉仪及数据处理测试系统测量精度为  $\pm 0.03 \mu\text{m}$ 。

## 3 反射镜参数与测试结果

在高功率激光器中,激光腔镜的性能直接关系到激光器极限输出功率(或能量)的高低和光束质量的好坏。反射镜薄膜的吸收会降低其激光损伤阈值,而反射镜基片的热吸收会导致镜面发生畸变,致

使激光输出光束质量变坏,激光束的发散角将大大增加,制约了激光器性能的提高。

不变形镜基于提高热交换系数、降低镜面与镜体温度,以达到减少镜体热畸变的目的。镜体冷却方式通常有两种:流体冷却和相变致冷。不变形镜不仅有益于光束质量的提高,而且增加了镜面的抗激光损伤能力。尤其是新型相变不变形镜,不仅热畸变小,而且不存在冷却流体压力引起的附加面形畸变,同时结构紧凑,安装方便。该镜在高功率激光器中具有潜在的应用前景。

实验中,我们用相变致冷硅镜作样品,对其进行了强激光照射下的热变形实验。相变致冷硅镜尺寸为  $\phi 78 \text{ mm}$ ,镜面厚度 10 mm。图 2 所示为相变致冷硅镜在吸收激光功率为 140 W、光斑大小为  $20 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$  情况下,光照时间分别为 1.5 s、3.0 s、4.5 s、6.0 s、7.5 s 时的镜面热变形干涉图。经计算机数据处理后可以得到:当腔镜净吸收激光功率为 140 W,光斑大小为  $20 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$  (椭圆斑)时,镜面最大热变形量为  $0.46 \mu\text{m}$  (光斑中心处)。

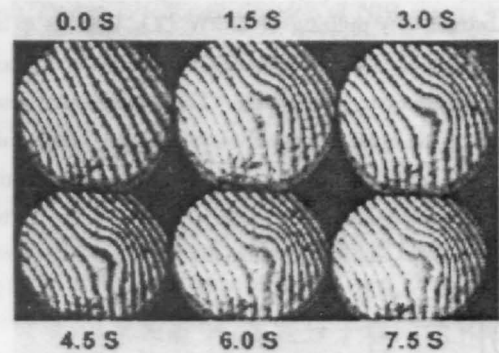


图 2 相变致冷硅镜热变形干涉图

Fig.2 Interferogram of thermal deformation on the surface of the phase-change-cooled silicon mirror

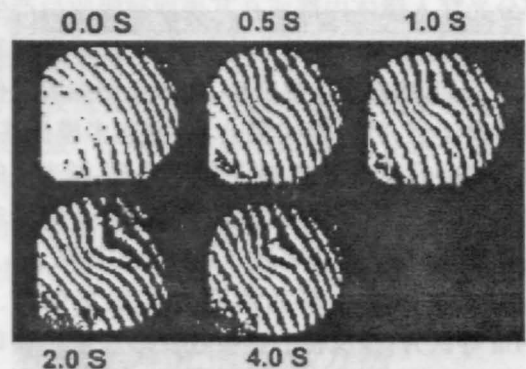


图 3 普通硅镜热变形干涉图

Fig.3 Interferogram of thermal deformation on the surface of the general silicon mirror

图3所示为普通硅镜在吸收激光功率为140 W, 光斑大小为20 mm×25 mm情况下, 光照时间分别为0.5 s、1.0 s、2.0 s、4.0 s时的镜面热变形干涉图。当光照时间为4 s时, 最大热变形量为0.76 μm。图4给出了相变致冷硅镜和普通硅镜在吸收激光功率为140 W、光斑大小为20 mm×25 mm情况下, 最大热变形随激光照射时间的变化实验曲线。

#### 4 结果分析与讨论

由于镜面中心处入射光强最大, 镜体边缘对周围环境进行对流换热, 因此镜面中心处变形量最大, 造成镜面中心凸起。实验中发现: 镜面中心热变形在激光照射初始阶段(0 < t < 2 s), 变形量随激光照射时间增加而明显增大; 此后, 热变形量逐渐变化平缓, 如图4所示。

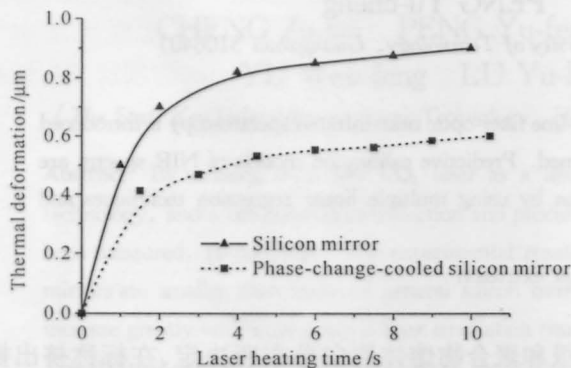


图4 镜热变形与光照时间的实验关系曲线

Fig. 4 Experimental curves of thermal deformations of the mirrors versus laser heating time

实验结果显示: 在实验用硅镜直径为  $\phi 78$  mm, 镜面厚度为 10 mm, 镜面对 10.6 μm CO<sub>2</sub> 入射光的反射率为 68%, 净吸收激光功率为 140 W, 激光辐照时间为 4 s 的条件下, 普通硅镜最大热吸收变形为 0.76 μm, 而相变致冷硅镜最大热吸收变形为 0.46 μm, 约为 1.315 μm COIL 激光波长的 1/3。由此可见, 激光腔镜的热变形是导致 COIL 激光器在出光过程中光束发散角增大和光轴漂移的重要原因之一。

#### 参 考 文 献

- 1 V. V. Apollonov *et al.*. Feasibility of using liquid-metal heat carriers to cool power optics components made of porous structures. *Sov. J. Quant. Electron.*, 1981, **11**(6): 796~798
- 2 F. M. Anthony, A. K. Hopkuis. Actively cooled silicon mirrors. *Proc. SPIE*, 1981, **297**: 196~203
- 3 W. W. Yuen, R. V. Fleishman. A parametric study of mesh enhanced forced convection heat transfer for the cooling of high power density mirrors. *Proc. SPIE*, 1989, **1047**: 43~55
- 4 J. Bluege. Solid-to-liquid phase change cooled mirror arrangement. U.S.P. 5076348, 1991
- 5 Zhang Yaoning, Cheng Zuhai *et al.*. A study of thermal distortions of silicon mirrors. *Chinese J. Laser* (中国激光), 1997, **A24**(8): 688~692 (in Chinese)
- 6 Zhang Yaoning, Peng Yufeng, Cheng Zuhai *et al.*. Research of complex structure of mirror cooled by phase change. *High Power Laser and Particle Beams* (强激光与粒子束), 2000, **12**(s0): 79~81 (in Chinese)