

文章编号: 0258-7025(2002)01-0021-04

# 强激光辐照下硅基片超薄多层 金属镜的热畸变

彭玉峰, 程祖海, 张耀宁, 周次明, 余文峰, 陆宇灵, 李 锋

(华中科技大学激光技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

**提要** 对硅基片超薄多层金属镜在  $\text{CO}_2$  激光辐照下的热特性进行了实验观测与理论分析。给出了超薄多层镜的结构设计方案, 以及不同激光功率情况下镜面热变形与激光照射时间的关系曲线。结果表明, 当反射镜吸收功率为 120 W, 光照时间为 4 s 时, 普通硅镜的热变形量为  $0.71 \mu\text{m}$ ; 同等条件下硅基片超薄多层金属镜最大热变形量仅为  $0.25 \mu\text{m}$ 。理论计算与实验结果基本相符。

**关键词** 反射镜, 热畸变, 激光损伤

中图分类号 TN 243 文献标识码 A

## Thermal Distortion in a Super-thin Multilayer Metal Mirror with Silicon Substrate Subjected to Irradiation of High Power Lasers

PENG Yu-feng, CHENG Zu-hai, ZHANG Yao-ning,  
ZHOU Ci-ming, YU Wen-feng, LU Yu-ling, LI Feng

(National Key Laboratory for Laser Technology, Huazhong University of  
Science and Technology, Wuhan 430074)

**Abstract** In this paper, the thermal properties of a super-thin multilayer metal mirror with silicon substrate subjected to irradiation of high power lasers are experimentally demonstrated and theoretically analyzed. The structural designs for the mirror and the relations between thermal deformation and laser irradiating time are presented. The results show that under the condition that absorption laser power is 120 W, and laser irradiating time 4 s, the thermal deformation of the silicon super-thin multilayer mirror is  $0.25 \mu\text{m}$ , but that of the general silicon mirror  $0.71 \mu\text{m}$ . Theoretical calculations are relatively accordant with the experimental results.

**Key words** mirror, thermal distortion, laser damage

### 1 引 言

在高功率激光器中, 诸如透镜、棱镜、反射镜等光学元件体内及其表面, 因吸收激光功率引起光学元件的非均匀温升, 形成温度梯度, 产生热畸变和内部压力, 使谐振腔工作参数偏离设计值, 引起模式间耦合, 从而激发起多模振荡, 激光束的发散角大大增加, 光束质量变坏, 激光输出功率下降。多纵模振荡

还将使激光输出的频谱加宽, 相干长度变短。因此制约了高功率激光器性能的提高。

1991 年, 美国技术公司的 John Bluege 和 Lake Park 发明了“固-液相变冷却镜”<sup>[1]</sup>。该发明采用了超薄镜结构, 基体材料选用硅。其工作机理是依靠贮存于镜体内的相变材料的相变吸热过程, 达到冷却目的。近几年来, 我国科技工作者也对高功率激光器件的热特性进行了研究<sup>[2,3]</sup>, 某些方面已经取

收稿日期 2000-12-08; 收到修改稿日期 2001-01-31

基金项目 国家自然科学基金(批准号 69878008), 教育部重点基金、国家“863”计划(863-410-04-8)资助项目。

作者简介: 彭玉峰(1963—), 男, 河南人, 副教授, 博士, 主要从事高功率激光器件以及激光光谱研究。E-mail: yufengp@

得重大突破。

本文介绍了水冷超薄多层镜的结构设计,并对反射镜的热畸变特性进行了实验观测,给出了镜面热变形与激光照射时间、吸收激光功率等关系曲线。实验结果为进一步优化镜体结构,并使之实用化奠定了基础。

## 2 镜体结构设计

超薄多层镜关键技术是镜体结构与冷却方式。普通水冷铜镜,由于水压以及压力波动等因素将引起镜面面形的附加非均匀形变,因此导致激光束波阵面相位畸变。为了克服和减少水冷压力波动的影响,比较常用的办法是增加反射镜的镜面厚度,但当反射镜在强激光系统中使用时,由于激光功率密度很高,镜面厚度大,热传导时间较长,镜面温升较高,热变形量就比较大,同样导致激光束输出光束质量变差。为了有效地克服通水冷却压力及其波动对镜面的附加影响,以及有效减少镜面热吸收变形,提高镜面的抗损伤能力,我们采用了特殊复合镜结构。图1所示为双层致冷板结构简图,板与板之间用铜锌合金焊接。所用材料可以为钼、铜、镍等,在实际

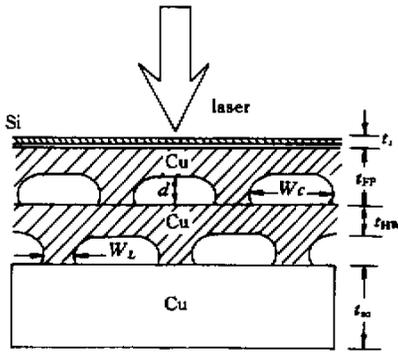


图1 双层致冷板结构简图

Fig. 1 Diagram for the structure of double cooling plate

结构中,选用铜作为致冷板材料。致冷板热壁厚为  $t_{HW}$ ,面板厚度为  $t_{PP}$ ,其通道宽度为  $W_c$ ,深度为  $d$ ,隔离水流通道的散热壁厚为  $W_L$ 。基板厚度  $t_{S0}$  至少是反射镜直径的  $1/6$ 。这种反射镜表面上的稳态温度分布依赖于水流通道宽度  $W_c$  与隔离通道的散热壁厚  $W_L$  之间的关系。如果水流通道太窄或者散热壁厚太厚,在稳态情况下散热壁上的表面温度就会比水流通道的温度高得多,这样散热降温效果就较差。如果水流通道太宽,就会引起通道上方面板的过大水压变形,同时镜体刚度也下降。综合以上两种因

素,当通道跨度与散热壁厚度之比为  $5.5:1.0$  时,是比较理想的结构。利用这种结构,84%的热负荷将由水流通道携带,16%的热负荷由散热壁携带。这种结构的反射镜由于吸收的激光能量绝大部分由冷却水带走,基板前后的温差远小于单层镜面前后的温差,同时,镜体刚度可取较大,故整个反射镜的热变形得以控制。由于硅基片与致冷板紧密相接,具有较高的热交换能力,使得基片温度下降,热畸变减少,在一定镀膜工艺条件下镜面的抗损伤能力也得以提高。

超薄多层镜的光学加工也是一个重要环节。表面粗糙度是引起光散射的主要原因,表面反射率和粗糙度的关系可表示为  $R = R_0 \exp[-(4\pi\delta)^2 \lambda^2]$ ;其中  $R_0$  为完全光滑表面的反射率, $\lambda$  为入射光波长, $\delta$  为表面均方根粗糙度。表面粗糙度除取决于加工工艺外,还和材料的弹性模量  $E$  成正比。由于多层镜的材料选用导热性能好、膜层附着力强的无氧铜,其弹性模量较小 ( $E = 1.179 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$ ),较容易出现划痕,且表面光洁度较难提高。我们采用的方法是:在镜面面形加工后加镀一层镍,再进行抛光,从而提高了铜镜的加工性能。

## 3 实验测量

### 3.1 热变形测试装置

实验测试系统如图2所示,由2 kW 高功率  $\text{CO}_2$  激光器、泰曼-格林干涉仪标准 He-Ne 激光源、被测试样品镜、参考镜、普通反射镜、半透半反分光镜、黑体及透镜组等组成。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。整个实验测试系统测量误差为  $\pm 0.03 \mu\text{m}$ 。

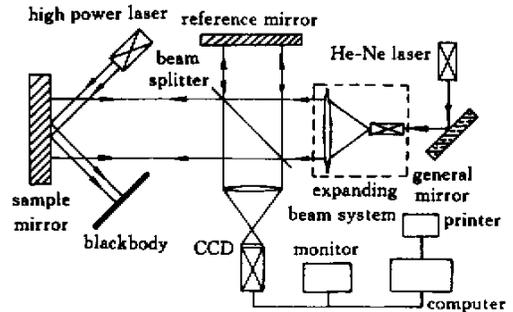


图2 热变形实验测试系统简图

Fig. 2 Diagram for thermal deformation surveying system

### 3.2 实验结果

进行反射镜热变形实验时,利用2 kW  $\text{CO}_2$  激光

器作为激光照射源,激光功率可连续调节。对普通硅镜、超薄多层镜在强光照射下不同时刻的热变形进行实验测量。

实验用超薄多层镜的主要参数为:为实验测试方便起见,镜面反射率为 50%(基片抛光后不镀膜)镜面直径 68 mm,硅基片厚度 1 mm,致冷板与基板厚度为 15 mm。在持续吸收激光功率 120 W,冷却水压 0.13 MPa(室温 25°C,水温 24°C)时,镜面总变形量为 0.25 μm,约为同等条件下普通水冷铜镜总变形量的 1/40。相比之下,同等条件下普通硅镜吸收激光功率 120 W,辐照时间仅 4 s,其热变形量就达 0.71 μm。图 3 所示为水冷超薄多层铜镜热变形与激光照射时间之间的关系曲线。

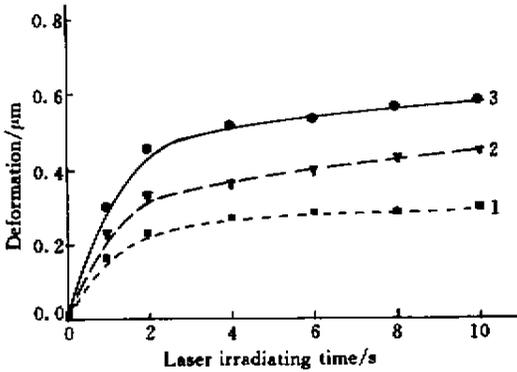


图 3 水冷超薄多层铜镜热变形与激光照射时间之间的关系曲线

吸收功率 1:120 W 2:220 W 3:310 W

Fig.3 Thermal deformation of the water-cooled superthin multilayer copper mirror vs laser irradiating time absorbed power :1—120 W ;2—220 W ;3—310 W

### 3.3 热变形理论分析

硅的热导率为 1.57 W/cmK,比热为 1.66 J/gK,线性热膨胀系数为  $2.33 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 。硅基片厚度为 1.0 mm,直径为 8 cm,反射率为 50%。假定致冷板与冷却水之间能有效地进行热交换,即致冷板温度保持恒定,则镜面热畸变主要来源于硅基片的不均匀温升。设硅基片与致冷板之间的对流换热系数为  $50 \text{ W/m}^2\text{ } ^\circ\text{C}$ 。入射激光功率分别为 200 W,400 W,光斑半径为 1 cm,激光波长为  $10.6 \text{ } \mu\text{m}$ 。利用格林函数法,可以求出基片的温度分布

$$T(r, z, t) = \frac{\alpha}{\kappa} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\exp[-\alpha(\beta_m^2 + \eta_n^2)t]}{N(\beta_m)N(\eta_n)} \times R(\beta_m, r) \times Z(\eta_n, z) \times \int_{\tau=0}^t \int_{r'=0}^b \int_{z'=0}^d \exp[\alpha(\beta_m^2 + \eta_n^2)\tau] \times$$

$$R(\beta_m, r')Z(\eta_n, z')g(r', z') \times 2\pi r' dr' dz' d\tau$$

式中  $\beta_m, \eta_n$  分别为本征函数  $R(\beta_m, r), Z(\eta_n, z)$  的本征值,  $g(r, z)$  为内热源强度。

仅求出温度场还不能解决热变形的计算问题,尚需通过热应力的计算,以满足边界条件。镜体的轴向( $z$ 轴)热变形由三部分组成(1)轴向的自由热膨胀  $\Delta d_f$ (2)边界固定后引起的纵向膨胀  $\Delta d_a$ (3)轴向温度分布的不均匀产生的热弹性位移  $\Delta d_e$ 。即

$$\Delta d = \Delta d_f + \Delta d_a + \Delta d_e$$

其中第一部分可直接由温度场得出。第二部分需在计算出横向应变后,引入波桑比而得出。第三部分则需要算出满足边界条件的热应力后,通过应力应变本构关系来得到<sup>[4]</sup>。

图 4(a)为激光照射时间为 5 s 时反射镜热变形量与镜面半径的关系曲线。图 4(b)所示为反射镜中心处最大热变形与激光照射时间的关系曲线。

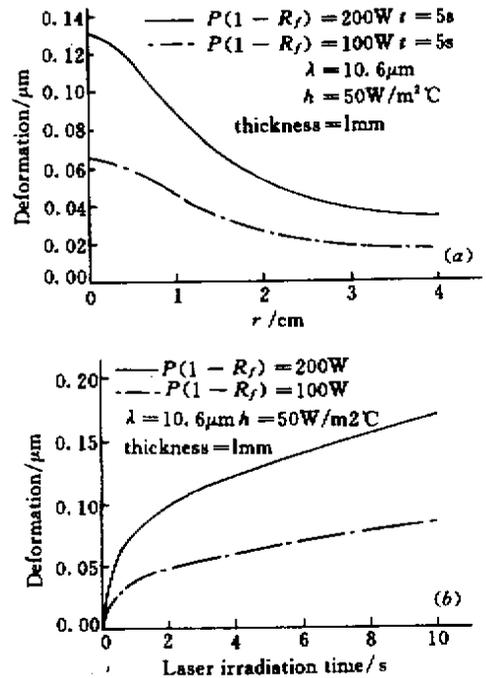


图 4 (a) 镜面热变形与镜面径向坐标的关系; (b) 镜面中心热变形与激光照射时间的关系

Fig. 4 (a) Thermal deformation on the mirror surface vs radial position; (b) Thermal deformation at the center of the mirror surface vs laser irradiating time

由图 4(a)可见,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。中心热变形在

激光照射初始阶段 ( $0 < t < 2 \text{ s}$ ), 变形量随激光照射时间增加而明显增大, 此后, 热变形量变化平缓, 见图 4(b) 所示。比较图 4(b) 与图 3 可以看出, 理论计算跟实验结果基本相符。

## 4 讨 论

本文对超薄多层镜的结构设计进行了介绍, 并利用 2 kW  $\text{CO}_2$  激光器作为强光源对反射镜的热畸变特性进行了实验观测, 给出了镜面热变形与激光照射时间的关系曲线。实验结果为进一步优化不变形镜结构, 并使之实用化奠定了基础。同时利用 Green 函数法以及热弹性位移势法对水冷超薄镜的热变形特性进行了理论分析。计算结果跟实验测量得到的热变形线形基本相符。

对于连续高功率激光器, 激光腔镜产生热畸变的热能量来源主要有以下几个方面 (1) 薄膜介质的吸收系数不理想以及薄膜层与层之间的缺陷或气孔 (2) 硅基片中或其表面的微量杂质及缺陷等会带来较大的热量吸收, 引起局部温升 (3) 硅基

片与冷却板之间焊接存在缺陷或气孔 (4) 硅基片与冷却板之间以及冷却板与流体之间热交换效率不够理想等。

为了满足实际需要, 在不断完善超薄多层镜结构、提高镜体热传导率、减小镜体热变形和内部热应力的同时, 还要改进基片抛光工艺、镜面镀膜工艺等, 以减少镜面温升、提高镜面抗激光损伤能力。

## 参 考 文 献

- 1 John Bluege, Lake Park. Solid-to-liquid phase change cooled mirror arrangement [ P ]. USP. 5076348, 1991
- 2 Ma Yiyong, Cheng Zuhai, Zhang Yaoning. Finite-element method in thermal deformation analysis of high power laser windows [ J ]. *High Power Laser and Particle Beam* ( 强激光与粒子束 ), 1999, **11**( 1 ) 6 ~ 10 ( in Chinese )
- 3 Chunyu Shutai, Gu Yuqiu, You Yonglu *et al.*. Experimental study of damage and destroy of X-ray multi-layer reflector [ J ]. *High Power Laser and Particle Beam* ( 强激光与粒子束 ), 1999, **11**( 4 ) 423 ~ 427 ( in Chinese )
- 4 J. L. Nowinski. Theory of Thermoelasticity with Applications [ M ]. Sijthoff & Noordhoff International Publishers B. V., Alphen aan den Rijn, The Netherlands, 1978