

铝镜激光损伤的热过程实时研究

周东平 范正修 范瑞英 赵 强 刘立明

(中国科学院上海光机所, 上海 201800)

提要 介绍利用光热偏转技术对铝镜及反射率增强铝镜的激光损伤的热过程进行实时研究。通过研究, 观察铝镜及反射率增强铝镜的激光损伤的光热偏转信号的变化, 初步了解了铝镜的损伤过程及机理, 及其介质膜的存在对损伤过程的影响。

关键词 镜, 激光损伤, 热过程, 光热偏转

1 引 言

光学薄膜的激光损伤^[1]是一个十分复杂的过程, 其机理说法很多, 各种理论和试验结果都不能很好地符合, 各个实验室的损伤阈值离散性很大。这主要是由于目前损伤阈值的测试是以光学显微镜为主要观察手段。这种方法存在劳动强度大, 易受主观因素影响, 以及不便对损伤过程进行量化处理, 不能观察损伤过程等局部影响。薄膜最终破坏是其热过程发展的结果, 本文把光热偏转技术应用到激光损伤检测系统中, 进行光学薄膜损伤过程的研究。这种方法不仅有利于确定损伤阈值, 而且有利于损伤过程和损伤机理的研究。

金属膜作为高反射膜在光学系统中应用得很广泛, 在强激光系统中也频繁使用。由于铝膜在从紫外到红外整个光谱范围都有很好的光谱特性, 所以对铝膜激光损伤的研究很有意义。我们实验室对铝膜及利用介质增强反射率铝膜进行了激光损伤热过程的研究, 得出初步的铝镜保护的概念及设想。

2 实验原理

光热偏转技术是近年发展成熟的一门新型热波探测技术^[2~4], 其基本原理如图 1。

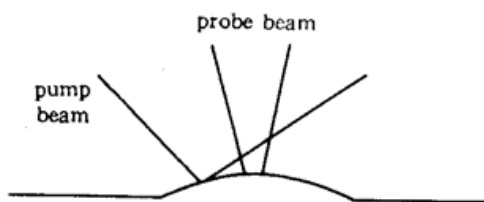


Fig. 1 Principle of photothermal deflection technique

当受调制的泵浦光入射到样品表面时, 由于样品的吸收, 引起局部温升, 使样品表面受热发生周期性形变, 利用另一个测量光入射到形变部分, 其反射光发生周期性的偏转, 使用位置探测器可探测到这一偏转, 分析信号可以得到关于样品的热性能及形貌的信息

$$\frac{\partial U_z(r, 0)}{\partial r} = f(\beta, R, H, D) \quad (1)$$

其中 β 为薄膜的吸收系数, R 为样品的热物性, H 为样品的力学性能, D 为实验条件, 如泵浦能量、光束尺寸及样品厚度等。公式展开很复杂, 对膜厚小于热扩散长度 (调制频率较低 $\omega \leq 1$ kHz) 属于热薄样品时, 公式(1)可简化为

$$\varphi \approx \beta \alpha_{th} P (1 - R_0) \quad (2)$$

l 为样品厚度, α_{th} 为样品热扩散系数, P 为样品表面泵浦光的入射能量, R_0 为样品表面反射率。光热信号中包含了薄膜的热物性及薄膜结构的信息, 由于泵浦光的作用, 引起薄膜的结构及热性能也发生变化, 光热信号也随着变化。

3 实验装置及结果

利用光热偏转技术对铝镜进行了实时研究, 实验装置如图 2。实验中, 泵浦光源为 Nd:YAG 激光器, 波长为 $1.06 \mu\text{m}$, 脉宽为 50 ps, 脉冲重复频率为 75 MHz, 峰值功率为 5.8 kW。利用 5 mW He-Ne 激光管作为探测光源, 探测光会聚在泵浦光斑的束腰半径的 0.70 处 (实验和理论计算都得出探测光在光斑半径方向上移动时, 光热信号此时最大), 采用四象限探测器来接收信号, 用锁相器对微弱的光热信号进行处理, 记录仪实时记录损伤热过程。首先研究了铝镜和介质增强反射率铝膜的损伤阈值, 铝镜的损伤阈值为 $3.39 \times 10^3 \text{ W/cm}^2$, 介质增强反射率铝镜的损伤阈值为 $3.54 \times 10^3 \text{ W/cm}^2$, 其膜系结构为 n_0

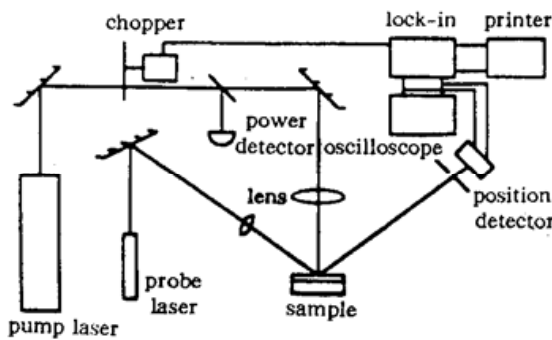


Fig. 2 Experimental setup of the photothermal deflection technique

1.028H1.028L0.514BG, 其中 H-ZrO₂, L 为 SiO₂, B 为 Al。同时研究了铝镜及其反射率增强铝镜的热损伤过程, 结果如图 3 和图 4。

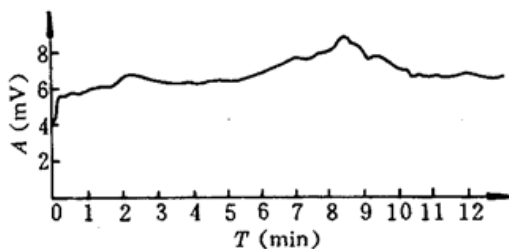


Fig. 3 Experimental result of the laser induced damage in a Al mirror

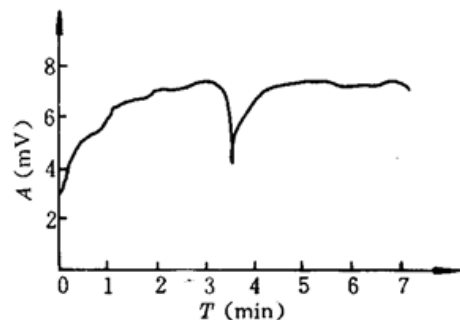


Fig. 4 Experimental result of the laser induced damage in enhanced Al mirror

4 实验结果分析

4.1 铝镜的损伤热过程

在图 3 中, 可以观察到铝镜的损伤热过程。开始时, 由于铝镜在损伤激光波段的吸收, 引起铝膜的局部温升, 使铝膜发生形变, 光热信号明显增大, 经过一段平稳阶段, 即能量累积过程。光热信号接着又开始上升, 这时薄膜的热性能和结构发生非线性变化。光热信号达到最大后, 开始下降, 接着出现平稳阶段。用显微镜对激光作用的膜面进行观察, 证明光热信号出现明显下降, 与铝膜发生可观察的损伤相对应, 这是由于能量的累积使膜层局部温升达到铝膜的熔

点,使其熔融,其表面形变斜率变小,最后使光热信号下降并处于平稳。

4.2 反射率增强铝镜的损伤热过程

在图 4 中,可以发现反射率增强铝镜的损伤热过程和纯铝镜的损伤热过程存在明显的不同。开始时,光热信号上升较缓慢,这是因为在有介质反射率增强膜的情况下,降低了铝镜的吸收,如表 1。由于整个膜系的吸收下降使铝镜和介质膜的界面温升没有纯铝镜上升得高,而且介质膜的热力学性能参数也没有金属膜的大,使表面形变较小。光热信号随着泵浦光能量在薄膜中的累积上升,并达到一个平稳阶段。光热信号突然下降,紧接着又迅速上升达到平稳阶段,出现一个尖锐的谷。这个过程中,由于介质膜吸收系数极小,被吸收的激光能量主要沉积在介质膜与铝膜的界面附近,并导致该区域的急剧温升,使介质膜和铝膜界面产生很强的热力学耦合,其结果使得介质膜破裂并从铝镜表面移除,使光热信号迅速下降。薄膜破坏的显微镜观测,证实当薄膜发生灾难性的破坏对应着光热信号的急剧减小,同时发现薄膜的损伤发生在泵浦光斑的中心。光热信号再次上升对应着激光对铝镜加热的过程,铝膜的热形变使光热信号又增大,达到平稳阶段。

Table 1

	Al mirror	Inhanced Al mirror
Absorptivity (%)	4.38	2.55
Damage threshold (W/cm ²)	3.39×10^3	3.54×10^3

5 实验结论

尽管引起薄膜发生激光损伤的机理很复杂,激光对光学薄膜的破坏的最终过程表现为一个热破坏过程。激光对薄膜的相互作用有三个基本过程:引起膜系吸收辐射能量、膜系产生热能累积、膜系进行热力学响应。当吸收能量的速率超过其热过程扩散速率时,就产生热累积,引起膜层的局部温升,当热累积超过材料本身的热力学响应所能承受的极限时,就产生各种破坏(功能破坏、力学破坏或热烧蚀)。因此,提高损伤阈值的途径可以从三个方面考虑:(1)减小吸收;(2)减小热累积;(3)提高热力学性能。基于上述的考虑,在不影响铝镜的光学性能的前提下,在铝镜上加镀几层介质膜,可以使其对几个激光波段的吸收减少,而对可见和红外波段(0.3~0.5, 8~13 μm)的反射率不产生影响。对铝膜厚度大约为 130 nm,其吸收百分之十以内,加介质膜后,吸收率减小近一倍。通过温度场的计算^[5],加介质膜的铝镜的表面温升明显下降,从而提高其抗激光损伤的能力。

然而,在有介质保护膜条件下,铝膜和介质膜界面附近仍有较高的温升,由于铝膜和介质膜的热膨胀系数的差异,将会在界面上产生很大的热应力,使介质膜层的热应力增加,当应力大于铝膜和介质膜的结合力时,保护膜从铝膜表面移除,从而使增强保护膜破坏。这也就是从上面的实验中看到铝镜和介质增强反射率铝镜的损伤阈值相差不大的原因。

为了提高损伤阈值,就必须减少金属膜和介质膜之间的热力学耦合。我们在以前的工作中,发现金属膜的热扩散系数随着膜厚规律地变化,当膜厚增加时,其热扩散系数也增大,使金属膜的热扩散增加,局部温升下降,这样可使热应力减少。因此,我们可以选择最佳的厚度,使铝镜具有要求的反射率,同时又有较大的热扩散系数,这样可减少能量的累积,降低热力学耦合,同时可选择金属基底,也可减少能量的累积。我们设想为减小金属膜与介质膜的热力学耦合,在铝

镜与介质膜之间增加一层金刚石膜,既可以降低铝膜表面的温升,又可使热力耦合减少,这样可以提高损伤阈值。这些是我们为提高损伤阈值的一些初步设想。

参 考 文 献

- 1 吴周令,范正修等. 光学薄膜激光损伤的光热偏转法实时研究. 光学学报, 1990, 10(3): 245
- 2 周东平,范正修等. 红外滤光片激光损伤的研究. 中国激光, 1994, A21(11): 893
- 3 M. A. Olmstead *et al.*. Photothermal displacement spectroscopy; an optical probe for solids and surfaces. *Appl. Phys. A*, 1983, 6(2): 141
- 4 范正修等. 光学薄膜的光热偏转信号分析. 光学学报, 1991, 11(2): 166
- 5 赵强,范正修等. 利用介质保护膜提高铝镜和硅窗口的抗激光强度. 中国激光, 1996, A23(1): 85~90

Real Time Investigations on Thermal Process of Laser-induced Damage of Al Mirrors

Zhou Dongping Fan Zhengxiu Fan Ruiying Zhao Qian Liu Liming

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 201800)

Abstract Real time investigations on the thermal process of laser-induced damage of a Al mirror and a reflectance-increasing Al mirror by photothermal displacement technique (PDT) are described. In these studies, changes of the signals of PDT of the damage process of Al mirror and reflectance-increasing Al mirror are observed. The mechanism of the thermal damage of Al mirrors and effect of existing dielectric films on the damage process are discussed.

Key words mirror, laser induced damage, thermal process, photo-thermal deflection