

红外窗口的激光损伤热过程及保护的研究*

周东平** 范正修[√] 范瑞英 赵强 刘立明

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海, 201800)

TN213

A

摘要 利用光热偏转技术对红外窗口材料进行了激光损伤实时研究,通过对硅片、加半反保护膜的硅片和加全反保护膜的硅片的损伤过程的研究,发现介质保护膜能大大提高硅窗口的激光损伤阈值,同时发现了全反介质保护膜的激光损伤逐层的破坏过程.

关键词 激光损伤, 实时研究, 损伤过程.

红外窗口材料

引言

光学薄膜的激光损伤是一个十分复杂的过程,其机理说法不一,各种理论和试验结果都不能很好的符合.本文介绍利用光热偏转技术对薄膜损伤进行实时研究,可以观察薄膜损伤过程中薄膜的热力学性质的实时变化,从中可观察薄膜损伤的发生、发展和完全损伤的过程.

薄膜激光损伤的定义为薄膜光热信号发生了不可逆的变化,这时薄膜的热性能及结构也发生了不可逆的变化,薄膜发生了损伤^[1].

在导弹和卫星的导引系统中,红外窗口往往是导弹和卫星系统被攻击的目标.通过对硅片及加保护膜的硅片进行实时激光损伤的研究,发现了全反介质保护膜的激光损伤的逐层破坏过程,同时寻找硅片窗口保护的方法.

1 实验原理

光热光声技术是成熟的热波探测技术之一^[2,3,4],主要用来探测样品的热性能.它的实验方案有多种,本文主要采用光热位移偏转方案.其基本原理如图1所示.

当受调制的泵浦光入射到样品时,由于样品的吸收,使表面发生局部温升,产生周期性形变,另一个测量光入射到形变部分,其反射光也发生周期性偏转,利用位置探测器可以探测到偏转信号,分析信号可以得到关于样品的热性能和形貌的信息.在泵浦光调制频率较低时,热扩散长度大于薄膜厚度,这时薄膜试样一般是热薄的,光热信号为:

$$\varphi \propto \beta l \alpha_m P (1 - R_0), \quad (1)$$

式(1)中 β 为薄膜的吸收系数, l 为样品厚度, α_m 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,薄膜的结构及热性能发生变化,光热信号也随着变化.

* 国家 863 基金资助项目
** 现在工作单位:中国科学院上海技术物理研究所,上海,200083
本文 1995 年 8 月 14 日收到,修改稿 1995 年 10 月 25 日收到

2 实验装置及结果

实验装置如图 2 所示. 采用 Nd:YAG 激光器, 其波长为 $1.06 \mu\text{m}$, 脉宽为 50 ps , 脉冲重复频率为 75 MHz , 峰值最大功率为 5.8 kW . 这是一种准连续激光. 这种激光具有模式稳定,



图 1 光热偏转技术原理图
Fig. 1 Principle of photothermal displacement technique (PDT)

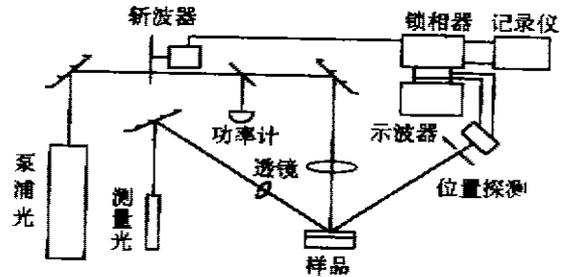


图 2 观察激光损伤的光热偏转技术的实验装置
Fig. 2 Experimental setup of PDT for investigation of the laser-induced damage

功率可调, 光束质量高的优点. 采用 5 mW He-Ne 激光管作为探测光源, 探测光会聚在泵浦光斑束腰半径的 0.70 处 (实验和理论计算都得出探测光在光斑半径方向移动时, 光热信号此处最大), 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过程. 对光洁硅片 ($n_0\alpha\text{BG}$)、加半反保护膜的硅片 ($n_0\text{H(LH)}\alpha\text{BG}$)、加全反介质保护膜的硅片 ($n_0\text{H(LH)}\alpha\text{BG}$) 进行了激光损伤的实时研究. 这些样品在 $1.06 \mu\text{m}$ 的光学性能, 如损伤阈值的结果见表 1, 实验中还研究了这些样品在激光损伤过程中的行为, 其结果如图 3、4、5 所示.

表 1 红外窗口及加保护膜的窗口的光学特性及其损伤阈值
Table 1 Optical characters and damage thresholds of the infrared window and the infrared window with protecting films

| 膜系 | α | 反射率 ($R\%$) | 透射率 ($T\%$) | 吸收率 ($\%$) | 损伤阈值 ($\times 10^3 \text{ W/cm}^2$) |
|----------------------------------|----------|---------------|---------------|--------------|---------------------------------------|
| $n_0\alpha\text{BG}$ | 155.7 | 25.75 | 19.73 | 54.52 | 7.07 |
| $n_0\text{H(LH)}\alpha\text{BG}$ | 155.7 | 75.53 | 7.04 | 19.44 | 14.14 |
| $n_0\text{H(LH)}\alpha\text{BG}$ | 155.7 | 98.32 | 0.448 | 1.24 | 12.3 |

BG—K9 H—ZrO₂ L—SiO₂ α —Si

3 实验分析

3.1 硅片损伤的热过程

由图 3 可见, 硅片的损伤热过程. 在开始阶段, 吸收使硅片表面发生局部形变, 这时光热信号迅速上升, 较短时间就达到一个平稳阶段. 在这个阶段, 硅片表面的局部形变基本上达到弹性形变的最大极限. 继续泵浦, 吸收能量在硅片中累积, 直至局部温升超过硅片的熔点,

这时硅片局部发生熔化, 光热偏转信号迅速上升, 说明这里的表面斜率变化很大, 局部熔化下陷, 同时这一点硅片的热性能也发生变化.

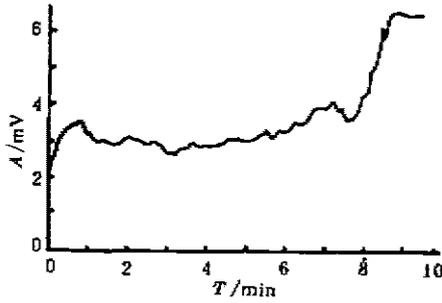


图 3 硅片激光损伤实验结果
Fig. 3 Experimental results of laser-induced damage in silicon wafer

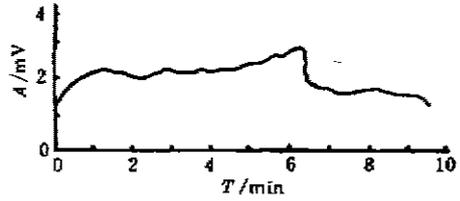


图 4 半反保护膜的激光损伤的实验结果
Fig. 4 Experimental laser-induced damage process of Si-window with half-reflectance-protecting films

3.2 加半反保护膜的硅片损伤的热过程

由图 4 可见, 半反保护膜硅片的损伤热过程. 它与硅片的光热偏转信号有些不同. 开始时, 信号上升较为缓慢, 这是由于半反介质保护膜使硅片的吸收减少, 能量累积过程减慢, 而介质膜的热性能参数及力学性能参数都小于硅片, 使介质膜表面的形变斜率变化较小. 光热信号接着有一个平稳过程, 这是一个能量累积过程, 介质膜和硅片的热性能及力学性能都发生非线性变化. 到一定的时间, 光热信号突然下降, 接着很快趋于平稳, 这时样品已经损伤 (破裂). 这个样品的损伤过程与硅片不一样, 我们认为, 这时的损伤是介质膜与硅片的界面发生了损伤, 这是因为在这个过程中介质膜吸收系数极小, 被吸收的能量主要沉积在硅片与介质膜之间的界面, 并导致该区域急剧升温, 使硅片与介质膜的界面产生很强的热力耦合, 引起介质膜产生应力, 当应力超过介质膜的应力极限时, 介质膜破裂.

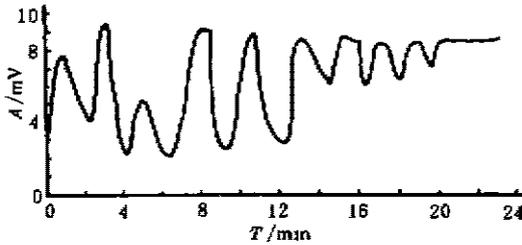


图 5 全反保护膜的激光损伤的实验结果
Fig. 5 Experimental results of laser-induced damage of Si-window with full-reflectance-protecting films

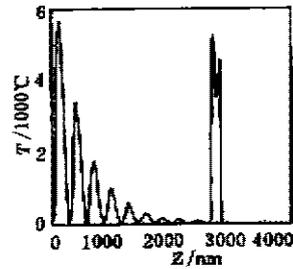


图 6 全反保护膜的温场计算结果
Fig. 6 Calculated results of temperature distribution of Si-window with full-reflectance-protecting films

3.3 加全介质保护膜硅片损伤的热过程

从图 5 可见, 加全反介质保护膜硅片的损伤过程. 以稍低于损伤阈值的泵浦光能量入射

到样品表面,可见光热信号产生很多峰谷的现象.开始时,光热信号迅速上升,达到最大后又下降,出现第一个波峰,接着又出现8个波峰,整个损伤过程产生了9个波峰.我们的保护膜的共有9个HL膜对,这与光信号的波峰的数目相对应.对全反保护膜开始受泵浦光辐射时的温度场进行计算,其结果见图6.图6中横坐标为沿着泵浦光入射薄膜的方向到膜系最外层膜表面的距离,纵坐标为温升.图6给出了最高温升在表面的HL膜对之间的位置,此处温升超过介质膜的熔点,因此,我们认为损伤是发生在HL膜对的界面处.由于最外的HL膜对被损伤破坏,使得紧接着的HL膜对的吸收增加,接着引起了损伤破坏,这样光热信号出现9个波峰,这和实验结果很好地符合.图6中在3000nm处也出现一个较高温升峰,是介质膜和硅片之间出现温升,这也是引起薄膜损伤的潜在原因.

从3个样品的损伤过程中发现了各自不同的规律,硅片的损伤是由于能量累积引起的温升超过硅片的熔点引起的,半反介质保护膜的损伤是由于介质膜与硅片界面之间的热力耦合引起的热应力超过介质膜应力承受范围而引起的,全反介质保护膜的损伤起因于泵浦能量引起HL膜对之间出现较高的温升,达到介质膜的熔点而引起膜对的损伤破坏.认识这些不同的损伤规律,对于提高硅片的损伤阈值具有很好的指导意义.全反射保护对硅片损伤的保护效果并不比半反保护膜的保护效果好.这是因为激光能量已经达到了介质保护膜本身的损伤阈值.要进一步提高损伤阈值,必须改进保护膜本身的材料和膜系.我们设想,设计的膜系使硅片的吸收减小,同时又能使介质膜与硅片、介质膜HL膜对之间的热力耦合减小,从而提高整体样品的损伤阈值.同时,为了提高损伤阈值,可以通过选择热性能匹配较好的介质材料,使它们之间热力耦合尽量减小.在不影响整个系统光学特性的情况下,在硅片表面与介质膜之间,介质膜与空气之间增加一层热性能较好的介质膜,减小硅片和介质保护膜之间的热力耦合,同时加快介质膜的热扩散过程,可以大大降低局部温升,并可以减少热力耦合,提高损伤阈值.

4 结语

利用光热偏转技术对3种样品损伤的热过程进行了实时研究,初步探讨了3种情况下硅窗口的不同损伤热过程规律,提出了红外窗口保护的初步设想.通过对3种不同情况的研究,有助于了解薄膜激光损伤的热机理及热过程,有助于寻找提高损伤阈值的方法,对提高薄膜抗损伤能力有重要意义.

参考文献

- 1 吴周令,范正修,等. *光学学报*,1990,10(3):245
- 2 周东平,范平修,等. *中国激光*,1994,11(A21):893
- 3 Olmstead M A, et al. *Appl. Phys. A*,1983,6(2):141
- 4 范正修,等. *光学学报*,1991,11(2):166

STUDY ON THE LASER-INDUCED DAMAGE PROCESS OF THERMODYNAMICS AND PROTECTION OF INFRARED WINDOWS *

Zhou Dongping** Fan Zhengxiu Fan Ruiying Zhao Qiang Liu liming

(*Shanghai Institute of Optics and fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China*)

Abstract In-situ investigations on the laser-induced damage of the infrared windows by photothermal displacement technique (PDT) were described by the studies on the damage process of the Si-window, Si-window with half-reflectance-protecting films and Si-window with full-reflectance-protecting films. It was found that the laser induced damage threshold of Si-window can be highly increased by using dielectric protecting films, and the damage process of full-reflectance-protecting films is conducted layer by layer.

Key words laser-induced damage, in-situ investigations, damage process.

* The project supported by the National High-Technology Foundation of China

** present address, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China