

## 近阈值能量密度下薄膜的激光损伤特点

马 孜 吕百达

(四川大学电子信息学院,成都,610064)

肖 琦

(西南技术物理所,成都,610041)

摘要:采用毫米量级大光斑的近单模的激光器,控制入射薄膜表面的激光能量,获得了几种常见单层膜和增透膜的损伤形貌,实验结果表明,薄膜的损伤可区分为熔化型和应力型两种,薄膜表面等离子体对损伤斑点的扩大有重要作用。

关键词:光学薄膜 激光损伤 损伤形貌

### Laser damage mechanisms of optical coating under near-threshold energy

Ma Zi , Lü Baida , Xiao Qi \*

( Institute of Optical - Electron Information , Sichuan University , Chengdu 610064 )

( \* South-West Institute of Technical Physics , Chengdu 610041 )

**Abstract :** A laser damage facilities , which has mm size spot and operates in TEM<sub>00</sub> mode , were achieved. In order to know the reasons of laser damage , the laser energy density was controlled near the damage threshold of the oxide thin films. According to the examined near-threshold damage morphology , the damage mechanisms of the optical coatings can be divided into two types. One was caused by melting of the coating materials , another by exploding , induced with the inner stress of the film. The plasma generated was an important reason to expand the damage area.

**Key words :** optical coatings laser damage damage morphograph

## 引 言

光学薄膜的激光损伤一直是光学薄膜研究的的前沿课题之一,多年来一直受到薄膜研究者的注意<sup>[1~4]</sup>取得了许多有意义的成果。在薄膜损伤的研究中,研究薄膜的损伤形貌,对揭示薄膜的损伤机理有着重要意义。由于受激光器本身输出能量和模式的限制,国内进行损伤测试时的光斑偏小,一般仅  $44\mu\text{m} \sim 55\mu\text{m}$ ,为获得较好的检测对比度,只能使用远高于阈值能量的激光照射薄膜,获得的薄膜表面的损伤形貌不能准确地反映薄膜在激光辐照下损伤起始点的形状,不利于了解薄膜损伤起始的机理和薄膜损伤的过程。

我们通过采用 VRM 作输出镜的大能量近单模激光器作测试光源,用大的激光光斑,控制照射在薄膜表面的激光能量,获得了阈值附近 TiO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub>, ZrO<sub>2</sub> 单层膜和 Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, HfO<sub>2</sub> 增透膜的损伤形貌,在此基础上分析了这几种薄膜的损伤特点。

## 1 实验条件

所有膜片均在美国 EDDY 公司的 C-36 镀膜机上镀制,蒸发源为 e 型电子枪,高真空系统为低温泵。TiO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub>, ZrO<sub>2</sub> 单层膜光学厚度为  $\lambda/2$ , Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 增透膜结构为 G/ML/A, HfO<sub>2</sub> 增

透膜结构为 G/0.6H1.4L/A, 所有膜系的参考波长均为  $1.06\mu\text{m}$ 。膜片的激光损伤测试采用一级振荡、一级放大 YAG 激光器, 振荡级采用 VRM 输出镜, 既获得了大能量输出, 又保证了输出模式, KD\*P 调 Q 脉冲持续时间为  $9\text{ns} \pm 1.5\text{ns}$ , 能量用 Moletron 公司 EM500 能量计实时监测, 激光远场模式用 Sensor Physics 公司光束分析仪测试, 与理论高斯模的相似度为 60% ~ 80%。用一平凸非球面消球差透镜聚焦, 焦距为 1m, 光斑直径用刀口法测定为 0.9mm。损伤检测采用江南光仪厂的 XJL-02 金相显微镜, 加配 Normaski 棱镜, 组成微分相衬干涉显微镜, 部分样品镀金后用扫描电镜 (SEM) 观测。测试时采用 1-on-1 方式, 首先测试薄膜的阈值, 用阈值能量密度附近的激光照射, 以保证薄膜表面有点损伤, 但能量又不会太大。

## 2 实验结果及分析

在能量密度较高时, 薄膜材料在激光照射下, 损伤斑很明显, 用肉眼即可观测到, 这样的损伤斑一般在  $100\mu\text{m}$  以上。但在近损伤阈值的情况下, 薄膜的损伤斑点很小, 除了受检测的光学显微镜和扫描电镜的分辨率限制外, 也取决于观测损伤的对比度。一般认为, 薄膜损伤的起始在微米量级, 我们主要研究  $50\mu\text{m}$  以下的薄膜损伤形貌。

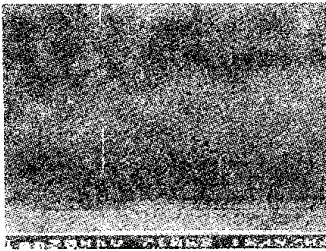


Fig. 1 Small damage sites of  $\text{TiO}_2$   
layer bar =  $100\mu\text{m}$

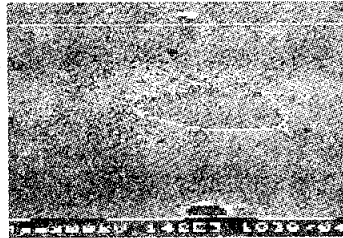


Fig. 2 Larger damage sites of  $\text{TiO}_2$   
layer bar =  $10\mu\text{m}$

### 2.1 $\text{TiO}_2$ 单层膜

如图 1 (标尺为  $100\mu\text{m}$ ) 图 2 (标尺为  $10\mu\text{m}$ ) 所示, 这种材料的损伤起始于薄膜表面较大的区域内 (图 1 中约  $70\mu\text{m}$ ), 出现了近 30 个  $1 \sim 2\mu\text{m}$  的小损伤斑, 当能量继续增大时,

扩展为较大的损伤斑 (图 2)。由于  $\text{TiO}_2$  熔点较低, 为  $1800^\circ\text{C}$ , 吸收较大, 其消光系数为  $1.4 \times 10^{-3}$ , 损伤主要是独立的单点吸收激光, 温升后蒸发所引起, 当入射激光能量增大时, 各独立蒸发点扩大并连成一片。

### 2.2 $\text{SiO}_2$ 单层膜

在薄膜表面存在有大小不等的节瘤, 由于薄膜的厚度有限, 造成薄膜节瘤在平行与表面方向线度大于薄膜厚度方向, 薄膜节瘤宽度约为  $30\mu\text{m}$ , 物理厚度为  $d = 1.06 / (2 \times 1.45) = 0.366\mu\text{m}$ , Inglis (1913)<sup>[5]</sup> 证明, 若材料中存在应力  $\sigma_a$ , 则节瘤处存在应力被加强为:  $\sigma_{\text{tip}} = \sigma_a \times 30 / (0.366/2) = 162\sigma_a$ , 因此, 当节瘤被激光照射, 产生热应力的增强作用导致节瘤处首先损伤, 如图 3。



Fig. 3 Nodular damage  
of  $\text{SiO}_2$  bar =  $10\mu\text{m}$

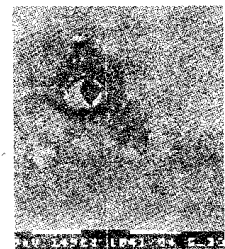


Fig. 4 Damage site of  
 $\text{ZrO}_2$  bar =  $10\mu\text{m}$

### 2.3 $\text{ZrO}_2$ 单层膜

文献 [4] 指出,  $\text{ZrO}_2$  单层膜主要是热应力损伤, 薄膜与基板结合界面处因两者热应力不同, 较大的一块爆出薄膜表面, 因此,  $\text{ZrO}_2$  的损伤起始点较  $\text{TiO}_2$  大,

约为  $5\mu\text{m}$ , 各个方向的形状不一致, 且周围较大范围内, 薄膜和基底表面也开始脱离(图 4)。

## 2.4 $\text{Gd}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ 增透膜

$\text{Gd}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$  增透膜损伤特点为: 在能量较低时, 首先在薄膜与基板表面熔化, 形成  $50\mu\text{m}$  左右损伤点(图 5), 能量增大后, 损伤斑核心部分仍为  $50\mu\text{m}$  左右, 但在厚度方向上加深, 由于等离子体喷溅作用, 直径在  $50\mu\text{m} \sim 120\mu\text{m}$  形成表面损伤(图 6), 同时伴随有明显的等离子体火花。

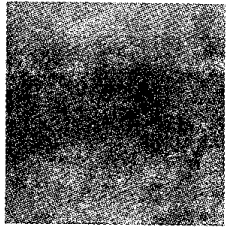


Fig. 5 Damage site of  $\text{Gd}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$  AR

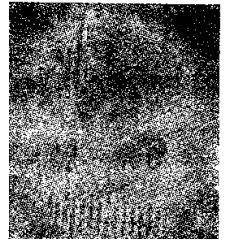


Fig. 6 Expanded damage site of  $\text{Gd}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$  AR, distance between 5 and 6 =  $100\mu\text{m}$

## 2.5 $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ 增透膜

$\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$  增透膜的激光损伤类似于同族  $\text{ZrO}_2$  材料的损伤, 由于应力造成膜片中心直径约  $20\mu\text{m}$  材料的剥落, 形成一个孔洞, 若不借助雾气法, 很难将损伤斑与薄膜的微缺陷区分开来(图 7), 当能量增大时, 等离子体喷溅造成薄膜表面损伤扩展(图 8), 同时观测到等离子体火花。

## 3 结 论

由以上实验可以得出下面结论, 在近阈值能量的激光照射下, 薄膜的损伤主要有两种方式, 一是吸收激光的能量后在一些点上熔化, 如  $\text{TiO}_2$  和  $\text{Gd}_2\text{O}_3$ , 另一种是热应力造成的和薄膜表面脱附, 如  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{SiO}_2$  和  $\text{HfO}_2$ 。表面产生等离子体后, 对薄膜起始点扩大有重要作用。

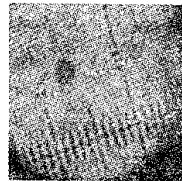


Fig. 7 Damage site of  $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$  AR, distance between 4 and 5 =  $100\mu\text{m}$

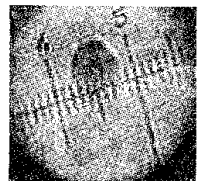


Fig. 8 Expanded damage site of  $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$  AR, distance between 4 and 5 =  $100\mu\text{m}$

## 参 考 文 献

- 1 Walker T W, Guenther A H, Nielsen P E. IEEE J Q E, 1981; QE17(10):2041~2051
- 2 李仲伢, 邓 和, 范正修. 中国激光, 1989; 16(7):413~416
- 3 汤雪飞, 范正修, 王之江. 光学学报, 1992; 12(5):473~475
- 4 龚 辉, 李成富, 王明利. 中国激光, 1996; A23(3):245~248
- 5 斯温 M V 主编, 郭景坤等译. 陶瓷的结构与性能. 第一版, 北京: 科学出版社, 1998: 308~313

\*

\*

\*

作者简介: 马 孜, 男, 1966 年 6 月出生。博士, 高工。现主要从事薄膜研究方面的工作。