

# TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>、ZrO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> 多层介质膜光学 损耗及激光损伤研究

吴周令 范正修

(中国科学院上海光机所)

## Measurement of optical loss and damage resistance of TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> and ZrO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> laser mirrors

Wu Zhouling, Fan Zhengxiu

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

**提要:** 以 TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> 及 ZrO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> 多层介质膜为例, 测试了不同工艺条件及不同膜系结构下薄膜样品的光学损耗及激光损伤阈值, 同时对实验结果作了初步的分析讨论。

**关键词:** 光学薄膜, 激光损伤, 光学损耗

### 一、引言

任何光学薄膜都存在一定的损耗, 这种损耗包括吸收与散射两部分, 它们都与光学薄膜的激光损伤有紧密的联系<sup>[1,2]</sup>。正确认识这种联系及其机制, 有助于进一步揭示光学薄膜的激光损伤机理, 提高膜层的光学质量。本文基于这一目的, 以 TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> 及 ZrO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> 多层介质反射膜为例, 研究了不同工艺条件及不同膜系结构下薄膜的光学损耗及激光损伤阈值, 并对二者间的关系及相关机理作了初步的探讨。

膜系设计及工艺条件如表 1 所示。

薄膜吸收测量采用脉冲光热偏转技术<sup>[3,4]</sup>。实验装置布局为共线式, 即泵浦光 (Nd:YAG,  $\lambda=1.06\mu\text{m}$ ) 与探测光 (He-Ne,  $\lambda=632.8\text{nm}$ ) 相互平行并近似共线<sup>[4]</sup>, 如图 1 所示。

用这种方法测量多层介质膜的光吸收, 灵敏度达  $A\sim 10^{-5}$ , 重复精度优于 10%。

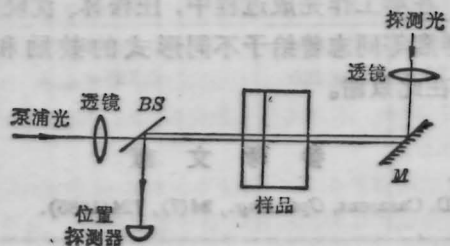


图 1 光热偏转技术示意图

### 二、实验方法

样品一律蒸镀在 K<sub>9</sub> 玻璃基底上。相关

收稿日期: 1988 年 12 月 5 日

表1 被测样品膜系结构、工艺条件及相应膜料的折射率

样品序号	材料	膜系结构	制备工艺	膜料折射率	
S <sub>1</sub>	H: TiO <sub>2</sub> L: SiO <sub>2</sub>	A(HL) <sup>3</sup> HS	电子束热蒸发	T <sub>S</sub> : 冷基板 T <sub>A</sub> : 室温	n <sub>H</sub> =2.46 n <sub>L</sub> =1.40
S <sub>2</sub>				T <sub>S</sub> : 冷基板 T <sub>A</sub> : 400°C	
S <sub>3</sub>				T <sub>S</sub> : 200°C T <sub>A</sub> : 室温	
S <sub>4</sub>				T <sub>S</sub> : 200°C T <sub>A</sub> : 400°C	
S <sub>5</sub>				T <sub>S</sub> : 200°C T <sub>A</sub> : 400°C	
S <sub>6</sub>				T <sub>S</sub> : 200°C T <sub>A</sub> : 400°C	
S <sub>7</sub>	H: ZrO <sub>2</sub> L: SiO <sub>2</sub>	A(HL) <sup>3</sup> HS	电子束热蒸发	T <sub>S</sub> : 冷基板 T <sub>A</sub> : 室温	n <sub>H</sub> =1.90 n <sub>L</sub> =1.46
S <sub>8</sub>				T <sub>S</sub> : 冷基板 T <sub>A</sub> : 200°C	
S <sub>9</sub>				T <sub>S</sub> : 200°C T <sub>A</sub> : 室温	
S <sub>10</sub>				T <sub>S</sub> : 200°C T <sub>A</sub> : 200°C	
S <sub>11</sub>				T <sub>S</sub> : 200°C T <sub>A</sub> : 200°C	
S <sub>12</sub>				T <sub>S</sub> : 200°C T <sub>A</sub> : 200°C	

T<sub>S</sub>: 基板烘烤温度; T<sub>A</sub>: 成膜后空气中烘烤温度。

薄膜总积分散射测量是在本所研制的激光薄膜散射测量仪上进行的。该仪器以 He-Ne (λ=632.8nm) 激光为光源, 采用光调制弱信号同步锁相技术, 灵敏度达 10<sup>-5</sup>, 相对测量误差优于 15%<sup>[5, 6]</sup>。

激光损伤实验装置如图 2 所示。激光系统由 Nd:YAG 振荡器和两级 Nd:YAG 放大器组成。振荡器采用 LiF 晶体调 Q, 小孔光阑选模, 输出波长 1.06μm, 脉宽(FWHM) 10ns, 工作于单模状态。入射光束由一消色差非球面透镜(f≈80mm)会聚于样品表面, 光斑直径(1/e<sup>2</sup>)为 44μm。薄膜的损伤情况由置于其后的高倍显微镜观察判断。损伤实验中, 在样品表面上同一位置只照射一次激光, 而不管这一点发生破坏与否。薄膜损伤阈值定义为两个极值的平均值, 即使薄膜破

坏的最低能量和不能使薄膜破坏的最高能量两者的平均值。

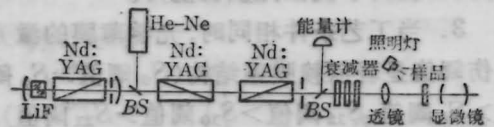


图2 光学薄膜激光损伤实验装置示意图

### 三、实验结果及讨论

被测薄膜样品光学损耗及激光损伤阈值测试结果如表 2 所示。

由表 2 可以看出:

1. 对 TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> 多层介质膜系, 当膜系结构相同时, 薄膜光学损耗与激光损伤阈值都与工艺条件有明显的关系, 其主要规律有:

表2. 薄膜样品光学损耗及激光损伤阈值测试结果

被 测 项	样 品											
	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>4</sub>	S <sub>5</sub>	S <sub>6</sub>	S <sub>7</sub>	S <sub>8</sub>	S <sub>9</sub>	S <sub>10</sub>	S <sub>11</sub>	S <sub>12</sub>
吸收率 (10 <sup>-4</sup> )	8.7 ±0.6	7.6 ±0.6	8.8 ±0.5	7.1 ±0.5	9.5 ±0.8	7.6 ±0.7	6.1 ±0.7	5.9 ±0.5	6.0 ±0.6	5.8 ±0.6	9.8 ±1.2	6.2 ±0.6
散射率 (10 <sup>-4</sup> )	—	4.83 ±0.35	—	3.28 ±0.27	6.58 ±0.72	3.15 ±0.22	—	8.15 ±0.31	—	7.83 ±0.25	12.1 ±0.31	6.65 ±0.19
损伤阈值 (J·cm <sup>-2</sup> )	8.5 ±2.1	11.5 ±2.2	10.4 ±1.6	13.8 ±1.8	7.0 ±1.6	15.2 ±1.8	11.6 ±3.6	14.2 ±4.1	11.5 ±3.8	16.2 ±1.9	10.3 ±3.1	18.4 ±1.6

(1) 基板烘烤有助于改善散射损耗 (样品 S<sub>4</sub> 散射率 < 样品 S<sub>2</sub> 散射率), 而成膜后空气中烘烤则可显著减小吸收率 (S<sub>2</sub> 吸收率 < S<sub>1</sub> 吸收率; S<sub>4</sub> 吸收率 < S<sub>3</sub> 吸收率); (2) 基板烘烤与成膜后空气中烘烤都有助于提高 TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> 多层介质膜的激光损伤阈值。后者源于烘烤明显减少了吸收, 前者则可能由于改善了膜层微结构和内应力。

2. 对 ZrO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> 多层介质膜系, 当膜系结构相同时, 薄膜光学损耗与制备工艺基本无关, 而激光损伤阈值却由于成膜后在空气中烘烤而得到了显著的提高 (S<sub>10</sub> 阈值 > S<sub>9</sub> 阈值, S<sub>8</sub> 阈值 > S<sub>7</sub> 阈值)。我们对这一现象的解释是: 烘烤不仅改善了 ZrO<sub>2</sub> 膜的结晶构造, 而且使不同材料之间的内应力消除得最好, 因而提高了抗激光损伤能力。

3. 当工艺条件相同时, 光学薄膜的激光损伤阈值显著依赖膜系结构 (S<sub>6</sub> 阈值 > S<sub>4</sub> 阈值 > S<sub>5</sub> 阈值; S<sub>12</sub> 阈值 > S<sub>10</sub> 阈值 > S<sub>11</sub> 阈值)。这是由于高折射率膜层厚度的增加显著加大了吸收损耗, 从而降低损伤阈值; 而低折射率膜层厚度的增加, 有助于改善薄膜样品的界面结构<sup>[7]</sup> 和补偿强激光作用下产生的热应力<sup>[8]</sup>。

由表 2 可进一步看出:

(1) 散射损耗较低的样品一般具有较高的损伤阈值。由于散射损耗通常表征样品的表面形貌与微观结构, 这一实验结果说明, 样

品表面形貌与微观结构在多层介质膜的激光损伤中起着重要作用。

(2) 薄膜激光损伤与光吸收的关系呈复杂状态。一方面, 对 TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> 膜系, 损伤阈值一般随吸收的增加而降低, 说明吸收在损伤过程中起着主导作用。这一结论与我们前期对 TiO<sub>2</sub> 单层膜的研究结果是一致的<sup>[9]</sup>。另一方面, 对本文工艺条件下的 ZrO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> 膜系, 多数情况是: 吸收基本不变的条件下损伤阈值发生了显著的变化。这一现象说明: 在本文所研究的 ZrO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> 膜系激光损伤过程中, 起主导作用的是除吸收之外的其它因素, 如膜层的结晶构造<sup>[10]</sup>。

作者感谢范瑞英、陆月妹、高扬、陈奕升、李成富、施柏煊、李仲伢等同志在样品制备及测试过程中给与的有益帮助和讨论。

### 参 考 文 献

- 1 C. K. Carniglia, *Thin Film Technologies II*, 1986, SPIE Vol. 692, p. 202
- 2 H. E. Bennett *et al.*, *Appl. Opt.*, **25**(2), 258(1986)
- 3 D. L. Balageas, *J. Appl. Phys.*, **59**(2), 348(1985)
- 4 W. B. Jackson *et al.*, *Appl. Opt.*, **20**(8), 1333(1981)
- 5 陈奕升, 王文桂, *中国激光*, **12**(3), 183(1985)
- 6 Y. S. Chen, W. G. Wang, *ICO-13 Conference Digest*, 1984, p.546(Sappore, Japan)
- 7 Z. L. Wu *et al.*, *NBS Spec. Publ.*, to be published
- 8 E. Welsch *et al.*, *Thin Solid Films*, **152**, 433(1987)
- 9 施正荣, 范正修, 邓和, *中国激光*, **15**(1), 22(1988)
- 10 范正修, *激光*, **9**(9), 582(1982)