

膜系结构对激光损伤阈值的影响

吴周令 范正修

(中国科学院上海光学精密机械研究所)

提 要

本文以 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 及 $\text{ZrO}_2/\text{SiO}_2$ 膜系为例, 研究了 $A(HL)^mHG$ 、 $A[(2p+1)HL]^m(2p+1)HG$ 以及 $A[H(2q+1)L]^mHG$ 等不同膜系结构对激光损伤阈值的影响。同时结合光学损耗测量及保护膜厚度效应研究, 对光学薄膜的激光损伤机理作了初步探讨。

关键词: 光学薄膜; 激光损伤; 光学损耗。

一、引 言

薄膜的激光损伤是激光与薄膜相互作用的结果, 它涉及薄膜与激光两个方面。正确认识这两个方面的实验规律, 有助于揭示光学薄膜的激光损伤机理, 提高膜层的损伤阈值^[1,2]。

本文以 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 及 $\text{ZrO}_2/\text{SiO}_2$ 多层介质反射膜为例, 研究了 $A(HL)^mHG$ 、 $A[(2p+1)HL]^m(2p+1)HG$ 以及 $A[H(2q+1)L]^mHG$ 等不同膜系结构对激光损伤阈值的影响。发现随着高折射率介质层厚度的增加, 光学膜系激光损伤阈值单调下降; 而随着低折射率介质层厚度的增加, 其激光损伤阈值先是单调地得到较大幅度的改善。然后, 当 $(2q+1) \geq 7$ 时, 相关膜系激光损伤阈值急剧下降, 远低于标准膜系 $A(HL)^mHG$ 。

根据厚度效应的初步实验结果, 结合光学损耗测量, 对光学薄膜的激光损伤机理作了初步的探讨。

二、实 验

1. 样品制备: 全部样品都蒸镀在 K_9 玻璃基底上。膜系设计、工艺条件及膜料折射率如表 1 所示。

2. 实验方法: 激光损伤实验装置如图 1 所示。实验数据列于表 2。损伤实验采用 1-on-1 方式, 即在样品表面上同一位置只照射一次激光, 而不管这一位置是否发生破坏。样品的损伤情况由置于其后的高倍显微镜观察判断。损伤阈值按传统阈值定义, 其表达式为^[3]:

$$F_{th} = \frac{[E_{max}(ND) + E_{min}(D)]/2}{A},$$

式中 $E_{max}(ND)$ 为样品不发生损伤的最高能量, $E_{min}(D)$ 为样品发生损伤的最低能量, A 为

Table 1 Coating design deposition parameters and refractive indices of the samples investigated ($\lambda=1.06 \mu\text{m}$)

No.	Material	design		deposition parameters	n
		(p, q)	$A[(2p+1)H(2q+1)L]^{2(p+1)}HG$		
1	HiTiO ₂ LiSiO ₂	(0, 0)	$A(HL)^3HG$	EB evaporation $T_s=200^\circ\text{C}$ $T_{\text{baking}}=400^\circ\text{C}$	$n_H=2.40$ $n_L=1.46$
2		(1, 0)	$A(3HL)^3HG$		
3		(2, 0)	$A(5HL)^3HG$		
4		(0, 1)	$A(H3L)^3HG$		
5		(0, 2)	$A(H5L)^3HG$		
6		(1, 3)	$A(H7L)^3HG$		
7	HiZrO ₂ LiSiO ₂	(0, 0)	$A(HL)^3HG$	EB evaporation $T_s=200^\circ\text{C}$ $T_{\text{baking}}=200^\circ\text{C}$	$n_H=1.90$ $n_L=1.46$
8		(1, 0)	$A(3HL)^3HG$		
9		(2, 0)	$A(5HL)^3HG$		
10		(0, 1)	$A(H3L)^3HG$		
11		(0, 2)	$A(H5L)^3HG$		
12		(0, 3)	$A(H7L)^3HG$		

Table 2 Experimental parameters of the damage testing

wavelength	1.06 μm
mode	TEM ₀₀
pulse width (FWHM)	10 ns
spotsize $1/e^2$	44 μm

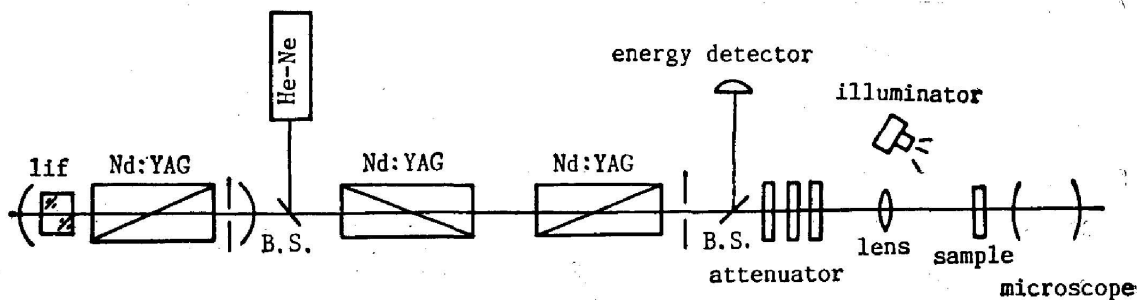


Fig. 1 Experimental Setup for damage testing

样品表面上辐照光斑的面积。

采用脉冲光热偏转技术测量试验膜系的吸收^[4,5]。实验装置为共线式布局,即泵浦光(Nd:YAG, $\lambda=1.06 \mu\text{m}$)与探测光相互平行并近似共线^[6]。如图 2 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%。膜系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 激光为测量光源,采用光调制弱信号同步锁相技术,灵敏度达 10^{-5} , 相对测量误差优于 15%^[7,8]。

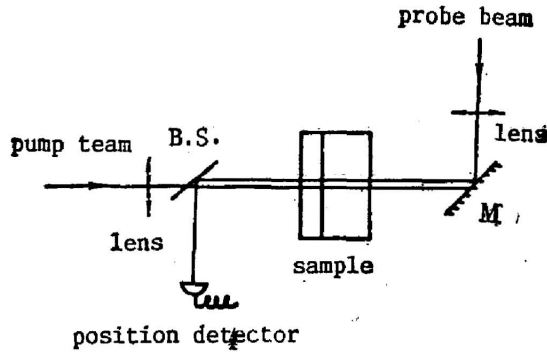


Fig. 2 Schematic illustration of pulsed collinear photothermal deflection technique

三、结果和讨论

被测薄膜样品激光损伤阈值及光学损耗测试结果如表 3 所示。如把这些结果以曲线形式表达, 则如图 3 所示。由表 3 及图 3 可以看出:

1. 激光损伤阈值明显地依赖膜系结构。其一般规律是: 随着高折射率介质层厚度的增加, 激光损伤阈值单调下降; 而随着低折射率介质层厚度的增加, 其激光损伤阈值先是单调地得到较大幅度的改善, 然后, 当 $(2q+1) \geq 7$ 时, 膜系的激光损伤阈值急剧下降, 远低于标准膜系 $A(HL)^3HG$ 的损伤阈值。

2. 吸收与散射损耗对膜系结构也有较强的依赖关系, 其一般规律是: 随着高折射率介质层厚度的增加, 样品吸收与散射都单调递增; 而随着低折射率介质层厚度的增加, 一方面, 样品吸收基本不变, 另一方面, 样品散射先略有下降, 然后很快急剧上升, 与前述损伤阈值的急剧下降形成对照。

分析上述实验结果, 可以得出一些初步结论。

1. 高折射率介质层体吸收与体散射对膜系总吸收与总散射有着重要贡献。

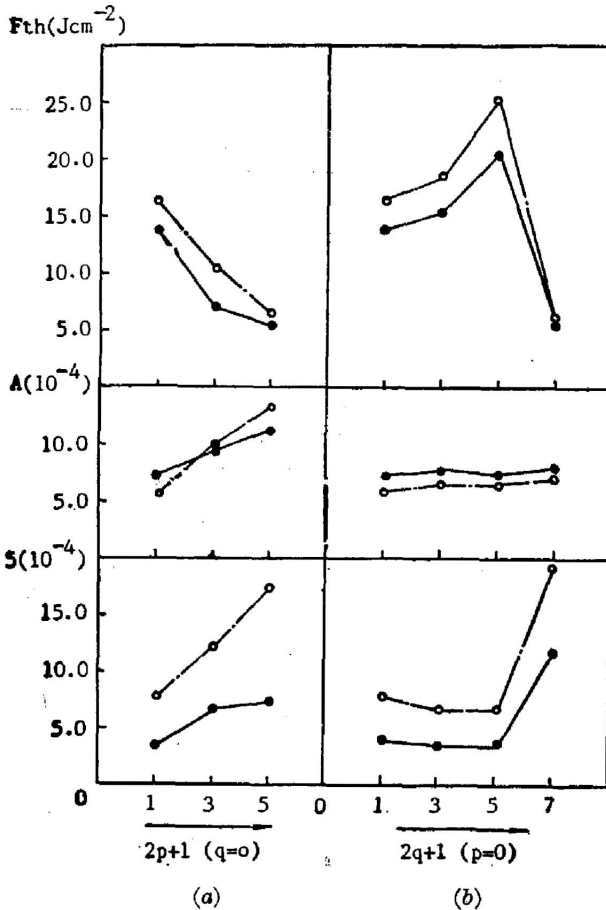


Fig. 3 Representation of the experimental results in table 3

○—TiO₂/SiO₂; ●—ZrO₂/SiO₂

Table 3 Measured damage thresholds and optical losses of the samples investigated

date \ sample	sample					
	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6
$F_{th}(J\ cm^{-2})$	13.8 ± 1.8	7.0 ± 1.6	5.1 ± 1.2	15.2 ± 1.8	20.3 ± 2.0	6.0 ± 3.2
$A(10^{-4})$	7.1 ± 0.5	9.5 ± 0.8	11.2 ± 1.0	7.6 ± 0.7	7.4 ± 0.6	7.8 ± 0.7
$S(10^{-4})$	3.28 ± 0.27	6.58 ± 0.72	7.3 ± 0.81	3.15 ± 0.23	3.01 ± 0.21	10.4 ± 4.3

date \ sample	sample					
	S_7	S_8	S_9	S_{10}	S_{11}	S_{12}
$F_{th}(J\ cm^{-2})$	16.2 ± 1.9	10.3 ± 3.1	6.4 ± 2.8	18.4 ± 1.6	25.1 ± 1.8	5.8 ± 3.3
$A(10^{-4})$	5.6 ± 0.6	9.8 ± 1.2	13.2 ± 1.8	6.2 ± 0.6	6.4 ± 0.8	6.9 ± 0.7
$S(10^{-4})$	7.83 ± 0.25	12.1 ± 0.31	17.3 ± 2.8	6.65 ± 0.19	6.70 ± 0.20	19.2 ± 3.4

2. 光学膜系激光损伤阈值随着高折射率介质层厚度的增加而单调下降,其原因可解释如为:高折射率介质层厚度的增加导致了吸收的增加;高折射率介质膜的剖面结构通常是柱状生长的,随着膜层厚度的增加,柱状结构越来越粗,缺陷越来越多^[9]。

3. 光学膜系激光损伤阈值随着低折射率介质层厚度的增加而得到较大幅度的改善,这一现象可解释为用作低折射率材料的 SiO_2 膜与大多数薄膜的剖面结构都不相同,它是微粒状态生长的,其结构细致均匀^[9]。于是,在多层介质膜系中, SiO_2 对膜层的界面结构有改善作用。这种改善作用随膜厚的增加而增加,在 $2q+1=5$ 时达最佳。此时如再进一步增加低折射率介质层厚度,则由于应力作用,在多层介质

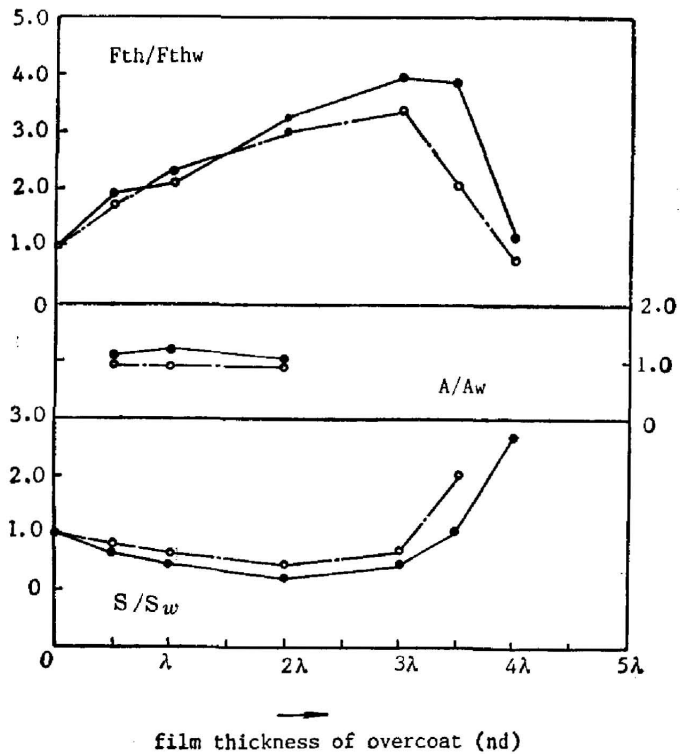


Fig. 4 Film thickness effect of SiO_2 overcoats:
 ○— TiO_2/SiO_2 HR; ●— ZrO_2/SiO_2 HR.
 (Index w indicates measured results of the samples without overcoat)

膜内形成许多微小裂纹,使膜系散射显著增加而损伤阈值大幅度下降。

本文还研究了高反射膜保护膜的厚度效应,相关实验结果如图4所示。比较图4及图3(b),不难看出两者具有非常相似的规律性。这一现象说明,高反射膜具有保护膜的保护作用,与多层介质膜中低折射率膜层对膜系损伤阈值的提高具有相似的机理,低折射率SiO₂膜改善了与之相邻的高折射率介质层的微观结构。

四、结 束 语

本文研究了膜系结构对多层介质反射膜光学损耗与激光损伤阈值的影响,并结合对高反膜保护膜膜厚效应的实验结果,对有关机理作了初步的探讨,得出了一些初步结论。这些结论对强激光薄膜的设计与制造有一定指导意义。膜系的损伤阈值测试结果也可供有关人员参考。

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

参 考 文 献

- [1] C. K. Carniglia; *SPIE*, 1986, **692**, 202.
- [2] K. H. Guenther; *SPIE*, 1987, **801**, 200.
- [3] K. H. Guenther *et al.*; *Appl. Opt.*, 1984, **23**, No. 21 (Nov), 3743.
- [4] D. L. Balageas; *J. Appl. Phys.*, 1986, **59**, No. 2 (Feb), 348.
- [5] W. B. Jackson *et al.*; *Appl. Opt.*, 1981, **20**, No. 8 (Apr), 1333.
- [6] 吴周令;《中国激光》, 1989, **16**, No. 8(Aug), 468
- [7] 陈奕升等;《中国激光》, 1985, **12**, No. 3 (Mar), 183.
- [8] Y. S. Chen *et al.*; *ICO-13 Conference Digest*, (Sappore, Japan 1984), 546.
- [9] 范正修;《激光杂志》, 1982, **9**, No. 9 (Sep), 582.

Damage threshold dependence of multilayer laser mirrors on coating design

WU ZHOULING AND FAN ZHENGXIN

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

(Received 5 December 1988; revised 24 February 1989)

Abstract

Damage threshold of $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ and $\text{ZrO}_2/\text{SiO}_2$ coatings with different structures— $A(HL)^mHG$, $A[(2p+1)HL]^m(2p+1)HG$ and $A[H(2q+1)L]^mHG$ —were measured. The results showed a strong dependence of damage resistance on coating design. Generally, an increase in film thickness of the high refracting component (especially up to $p=2$) lends to a strong decrease in the laser damage resistance, while all the systems had an increase in damage threshold with enhancing thickness of the low refracting component up to $q=2$. The damage threshold of the $q=3$ systems is commonly higher than that of $q=0$ systems, but lower than $q=2$ systems. For the systems with q greater than 3, the damage resistance decreases very quickly, being much lower than that of the standard systems with $q=0$.

In this paper, the above results are described and analysed.

Key words; optical coating; laser damage; optical losses.