

# 光学薄膜激光损伤的波长效应\*

李仲伢 李成富 郭聚平 孙 畅 范正修

(中国科学院上海光机所, 201800)

摘要: 本文报道了采用三种波长的单横模脉冲激光对  $ZrO_2$ 、 $TiO_2$  和  $Ti_2O_3$  的单层膜和多层膜的激光损伤阈值和损伤形貌。研究了损伤阈值与波长的关系。

关键词: 光学薄膜, 损伤阈值, 波长效应

## Wavelength effects on laser induced optical thin film damage

*Li Zhongya, Li Chengfu, Guo Juping, Sun Yang, Fan Zhengxiu*

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

**Abstract:** Laser damage threshold and their morphologies are reported of  $ZrO_2$ ,  $TiO_2$  and  $Ti_2O_3$  single and multilayers at  $1.06 \mu m$ ,  $0.53 \mu m$  and  $0.35 \mu m$  with a pulsewidth of 10 ns in  $TEM_{00}$  mode. It is found that the damage threshold is directly proportional to  $\lambda^{1.2 \sim 1.5}$ .

**Key words:** optical thin film, damage threshold, wavelength effect

### 一、实验装置

实验采用具有一级振荡和两级放大的 YAG 激光系统。振荡器为平凹稳定腔, 腔长 59 cm,

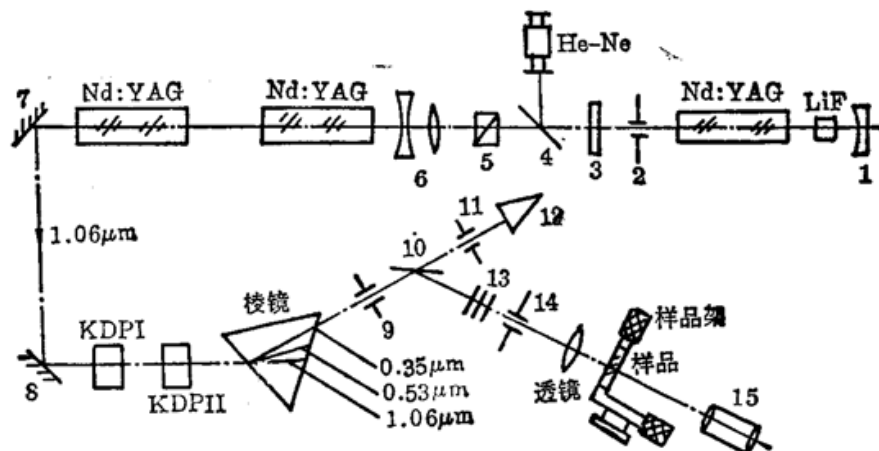


图1 实验装置

1— $R=3m$  全反射镜; 2, 9, 11, 14—光阑; 3—反射镜  $T=50\%$ ; 4, 10—分束镜;  
5—偏振器; 6—扩束器; 7, 8—全反射镜; 12—能量计; 13—滤光片; 15—显微镜

收稿日期: 1989年7月6日。

\* 本工作由国家自然科学基金资助。

四面镜的曲率为  $3m$ 。用  $\text{LiF:F}_2^{-1}$  晶体调  $Q$ ，腔内加小孔光阑选模，输出为  $1.06 \mu\text{m}$  的  $\text{TEM}_{00}$  模，脉宽为  $10\text{ns}$ ，经过  $1:2$  的望远镜扩束和两级 YAG 放大器放大，总的输出能量可达  $400\text{mJ}$  以上。测量损伤的实验装置如图 1 所示，用倍频晶体 KDPI 进行二倍频，获得  $0.53 \mu\text{m}$  激光，用晶体 KDPII 对  $1.06$  和  $0.53 \mu\text{m}$  和频产生  $0.35 \mu\text{m}$  激光。用色散棱镜将  $1.06$ 、 $0.53$  和  $0.35 \mu\text{m}$  的激光分开。用屏蔽光阑屏蔽其他两个波长的光。用 He-Ne 激光准直光路。损伤阈值的定义和测定与文献[1]相同。

## 二、实验结果及分析

$\text{ZrO}_2$ 、 $\text{TiO}_2$  和  $\text{Ti}_3\text{O}_5$  三种材料的单层膜在  $1.06$ 、 $0.53$  和  $0.35 \mu\text{m}$  激光波长的损伤阈值如图 2~4 所示。图 2 是厚度  $\lambda/2$  ( $\lambda=1.06 \mu\text{m}$ ) 的  $\text{ZrO}_2$  膜，它们是质量不同的 4 块样品，曲线 1 到 4 对应的缺陷密度分别为  $280$ 、 $320$ 、 $560$  和  $720/\text{mm}^2$ 。图 3 是厚度分别为  $\lambda/2$  和  $\lambda/4$  ( $\lambda=1.06 \mu\text{m}$ ) 的  $\text{TiO}_2$  膜，图 4 是膜厚为  $\lambda/4$  ( $\lambda=632.8 \text{nm}$ )，烘烤温度不同的  $\text{Ti}_3\text{O}_5$  膜。从这些图可以看出这三种单层膜的损伤阈值随着波长变短而明显下降。

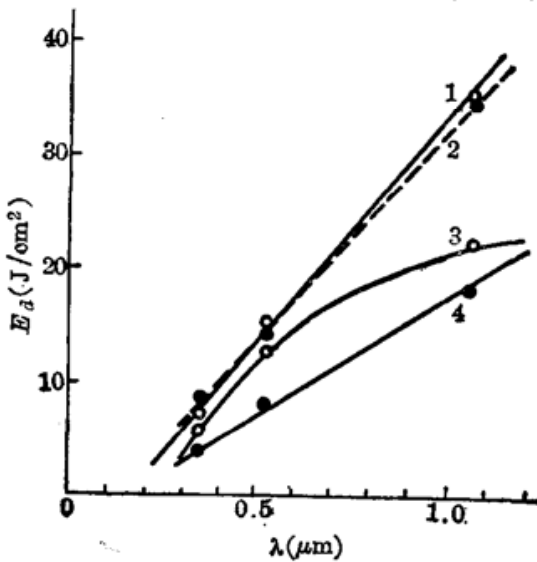


图 2  $\text{ZrO}_2$  膜损伤阈值与波长的关系

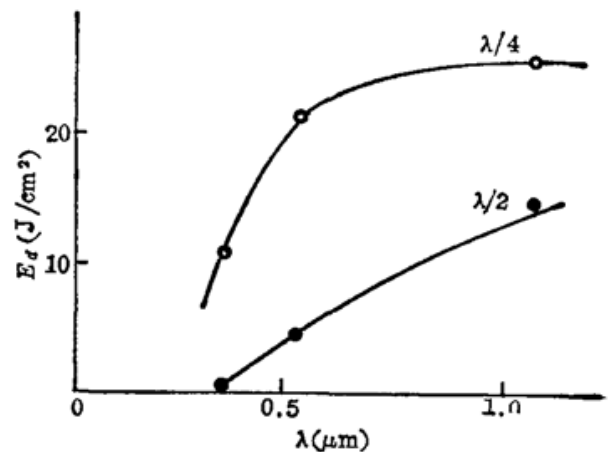


图 3  $\text{TiO}_2$  膜损伤阈值与波长的关系

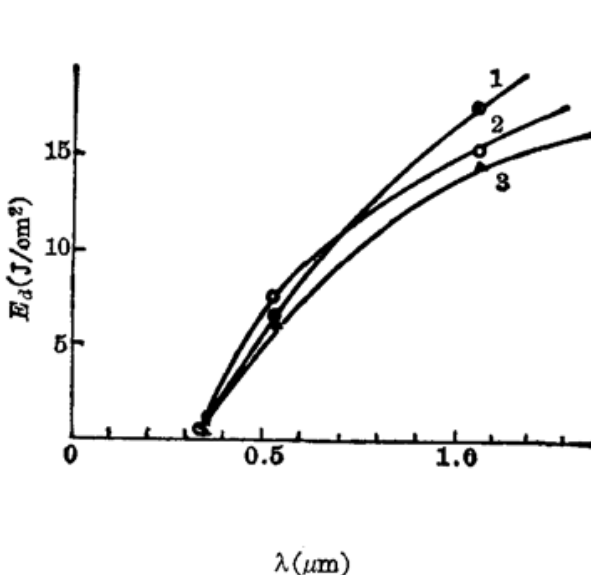


图 4  $\text{Ti}_3\text{O}_5$  膜损伤阈值与波长的关系  
1— $250^\circ\text{C}$ , 2h; 2, 3— $200^\circ\text{C}$ ; 2h.

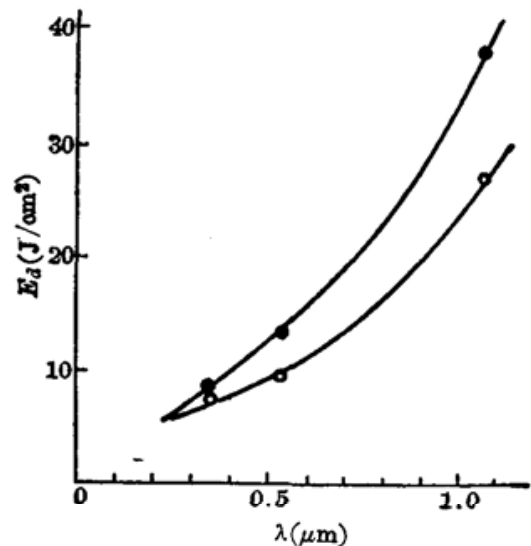


图 5  $\text{ZrO}_2/\text{SiO}_2$  三层膜损伤阈值与波长的关系

图 5 给出了  $ZrO_2/SiO_2$  多层膜的损伤阈值, 其变化规律与单层膜相类似。

我们计算了以上几种膜的损伤阈值与波长之间的对应关系, 发现除  $TiO_2$  和  $Ti_3O_5$  在  $0.35 \mu m$  的损伤阈值特别低外, 其余大多数结果尚存在损伤阈值与波长  $\lambda^{1.2\sim 1.5}$  成比例的关系。 $TiO_2$  和  $Ti_3O_5$  膜在  $0.35 \mu m$  损伤阈值偏低的原因是由于  $TiO_2$  的体吸收限为  $0.3 \mu m$ , 紧靠  $0.35 \mu m$  的激光辐射。上述结果与多光子吸收的损伤机理所描述的损伤阈值与波长的关系相一致<sup>[2, 3]</sup>。

$ZrO_2$ 、 $TiO_2$  和  $Ti_3O_5$  三种单层膜在  $1.06 \mu m$  激光的损伤中均表现出明显的厚度效应<sup>[4]</sup>, 然而在  $0.35 \mu m$  激光的损伤中几乎不存在厚度效应。为了比较, 将  $1.06 \mu m$  的结果也列于表 1,  $0.35 \mu m$  的结果说明在短波长激光损伤的情况下, 不同厚度的膜层, 内部驻波电场强度的分布对损伤阈值的影响已经不起主要作用, 而是由短波长激光产生特有的缺陷<sup>[4, 5]</sup>和多光子吸收占了主导地位, 所以使膜厚效应变得不明显。

表 1 激光损伤与膜厚的关系

材 料	$ZrO_2$		$TiO_2$		$Ti_3O_5$	
	$\lambda/2$	$\lambda/4$	$\lambda/2$	$\lambda/4$	$\lambda/2$	$\lambda/4$
膜 厚						
1.06 $\mu m$ 损伤阈值 ( $J/cm^2$ )	15.3	37.3	17.6	31.7	10.5	21.9
0.35 $\mu m$ 损伤阈值 ( $J/cm^2$ )	3.8	2.9	1.69	1.28	0.31	0.24

我们观察了三种单层膜和二种多层膜的损伤形貌, 如图 6~9 所示。图 6 的  $a$ 、 $b$ 、 $c$  为同一块  $\lambda/4$  ( $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ ) 厚度的  $Ti_3O_5$  样品上三个不同的激光波长的损伤形貌,  $1.06 \mu m$  激光的损伤斑点边界清晰无溅射, 为烧蚀型损伤。而  $0.53 \mu m$  和  $0.35 \mu m$  激光的损伤斑点边界毛糙, 周围出现溅射现象像火山爆发似的损伤。图 6(d) 为  $\lambda/2$  ( $\lambda = 1.06 \mu m$ ) 膜厚的另一块  $Ti_3O_5$  样品,  $1.06 \mu m$  激光的损伤形貌。由图可见, 图 6(a) 与 (d) 的损伤形貌很不相同, 我们认为这主要是因工艺条件不同所造成的。图 6(a) 样品在淀积过程中未充  $O_2$ , 其损伤阈值特别低, 只需要很低的激光能量就产生破坏了。图 6(d) 样品在淀积过程中充了  $2 \times 10^{-4} \text{ Torr}$  的  $O_2$ , 其损伤阈值比图 6(a) 约高 20 倍, 表明图 6(d) 膜能承受较强的激光强度, 在高激光能量损伤时出现了熔融环。

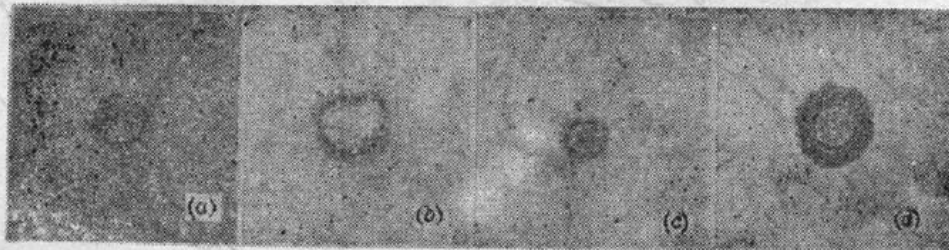


图 6  $Ti_3O_5$  的损伤形貌

(a)  $1.06 \mu m$ ,  $500 \times$ ; (b)  $0.53 \mu m$ ,  $1300 \times$ ; (c)  $0.35 \mu m$ ,  $2000 \times$ ; (d)  $1.06 \mu m$ ,  $800 \times$

图 7 和图 8 分别为  $ZrO_2$  和  $TiO_2$  的损伤形貌,  $ZrO_2$  单层膜  $1.06 \mu m$  激光的损伤阈值很高, 其损伤形貌如图 7(a) 所示, 斑点的边界很不规则, 呈胀裂形破坏。 $0.53 \mu m$  和  $0.35 \mu m$  的损伤呈烧蚀形。图 8  $TiO_2$  膜  $1.06 \mu m$  的损伤为烧蚀环,  $0.35 \mu m$  的损伤为均匀的熔融斑。

图 9 为 23 层  $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$  偏振膜的损伤形貌, 图 9(a) 为典型的多层膜在  $1.06 \mu\text{m}$  的损伤

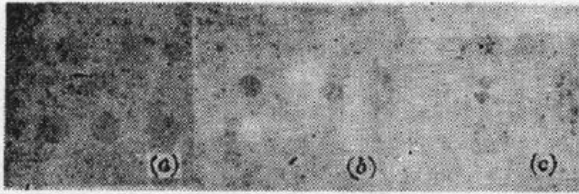


图 7  $\text{ZrO}_2$  的损伤形貌,  $\lambda/2$  ( $\lambda=1.06 \mu\text{m}$ )  
(a)  $1.06 \mu\text{m}$ ,  $400\times$ ; (b)  $0.53 \mu\text{m}$ ,  $1500\times$ ;  
(c)  $0.35 \mu\text{m}$ ,  $3000\times$

形貌, 中心是一个圆形熔孔, 周围是表面上几层膜的损伤, 边界凹凸不规则, 这表明多层膜在  $1.06 \mu\text{m}$  激光损伤时热效应起了主要的作用。激光作用在介质膜上, 膜层吸收了光能温度升高, 局部熔化, 产生了很大的张应力, 当张应力大到超过膜层的机械强度时, 就产生不规则的胀裂破坏。图 9(b) 和 (c) 是  $0.53$  和  $0.35 \mu\text{m}$  激光的损伤斑点, 呈现均匀的烧蚀和熔融斑, 看不出各层的损伤情况。半透半反半层膜的损伤形貌与图 9 有相似的特征。

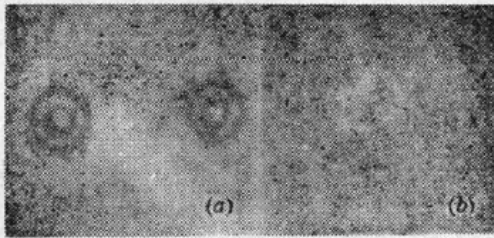


图 8  $\text{TiO}_2$  的损伤形貌,  $\lambda/4$  ( $\lambda=1.06 \mu\text{m}$ )  
(a)  $1.06 \mu\text{m}$ ,  $2000\times$ ; (b)  $0.35 \mu\text{m}$ ,  $3000\times$

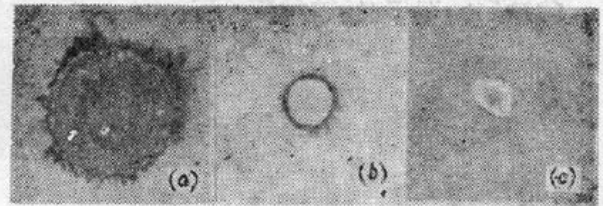


图 9 偏振膜, 23 层  $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$   
(a)  $1250\times$ ; (b)  $1250\times$ ; (c)  $2500\times$

不同波长的激光对光学薄膜的损伤, 随着波长的变短, 不仅损伤阈值下降, 而且损伤斑点也变得愈来愈小。短波长光学薄膜损伤阈值低的机理, 一是短波长光学薄膜的吸收明显增加。二是波长愈短, 光子的能量愈大, 大能量的光子撞击膜层表面容易产生电子、离子和紫外光子。电离效应和多光子吸收加剧了薄膜的损伤。所有的样品在  $0.35 \mu\text{m}$  激光损伤时, 膜层表面浅蓝色等离子体闪光明显减少, 这也是由于电离效应和多光子吸收加剧了薄膜的损伤所造成的。 $0.35 \mu\text{m}$  损伤一般只需要较小的激光能量就能使薄膜产生破坏, 因此不会产生大量等离子体。

### 参 考 文 献

- 1 李仲伉 *et al.*, 中国激光, **16**(7), 413(1989)
- 2 T. W. Walker *et al.*, *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-17**(10), 2053(1981)
- 3 A. Vaidyanathan *et al.*, *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-16**(1), 89(1980)
- 4 R. F. Haglund, Jr., N. H. Tolk, (NBS Spec. Publ. 746, 1985), 497
- 5 N. Mansour *et al.*, (NBS Spec. Publ. 752, 1986), 657

(上接第 20 页)

2 ms 的泵浦脉宽较为合适, 其激光阈值为 220 J, 当输入 1kJ 电泵浦能量时, 获得了 3J ( $1.54 \mu\text{m}$ ) 的激光输出。当泵浦脉宽为 4 ms 时, 激光阈值升高 (350J), 激光输出效率下降。

### 参 考 文 献

- 1 A. A. Kaminskii, *Laser Crystal*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1981
- 2 张秀荣 *et al.*, 激光与红外, **19**(2), 54(1989)
- 3 B. R. Judd, *Phys. Rev.*, **127**, 730(1962); G. S. Ofelt, *J. Chem. Phys.*, **37**, 258(1962)
- 4 于福熹, 科学通报, **2**, 259(1979)
- 5 祁长鸿 *et al.*, 无机材料学报, 待发表