

多脉冲激光对光学薄膜的损伤*

李仲伢 李成富 郭聚平

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

提 要

本文报道了 $1.06\ \mu\text{m}$ 和 $0.35\ \mu\text{m}$ 的多脉冲激光对光学薄膜损伤的积累效应, 研究了损伤几率与激光能量和重复频率的关系。

关键词: 多脉冲, 损伤, 积累效应。

一、引 言

多脉冲激光对光学材料和薄膜的损伤虽已有不少学者作了研究^[1~4], 它有助于了解激光损伤的物理过程。然而, 关于多脉冲激光的损伤机理远未令人满意, 还有不少问题有待人们去进行研究和探索。

本文报道了 TiO_2 、 ZrO_2 和 Ti_3O_5 单层膜及 $1.06\ \mu\text{m}$ 高反膜的多脉冲激光损伤阈值和损伤形貌。多脉冲激光的损伤阈值低于单脉冲, 且表现出明显的损伤积累效应; 文中研究了损伤几率与激光能量和重复频率的关系, 并对实验结果进行了分析和讨论。

二、实验方法

激光损伤实验装置如图1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:F_2^- 晶体调 Q, 小孔光阑选模, 输出波长为 $1.06\ \mu\text{m}$ 、脉宽 10 ns、

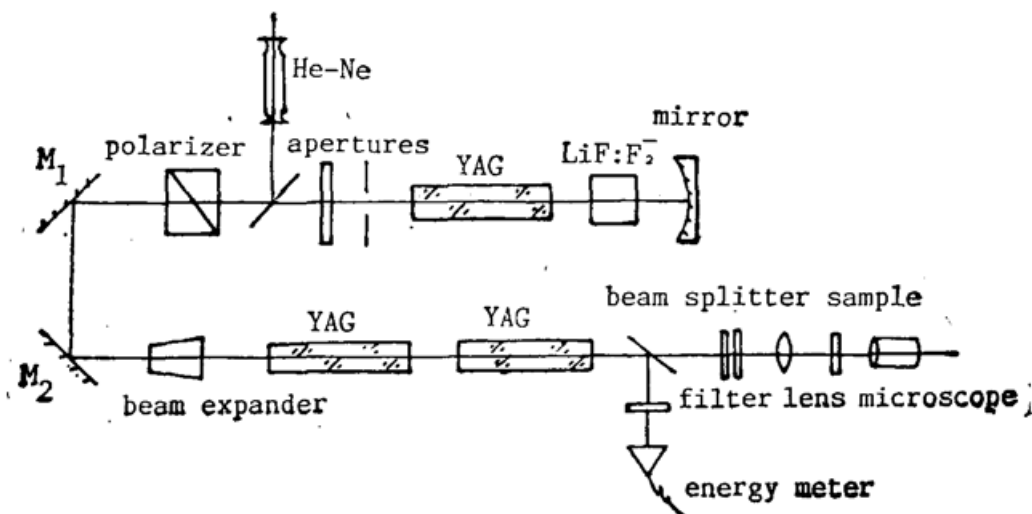


Fig. 1 Experimental setup for laser induced damage

收稿日期: 1990年7月2日; 收到修改稿日期: 1990年10月4日

* 国家高技术基金资助的项目。

TEM₀₀ 模、光强分布为高斯型。为了防止激光束偏振面旋转和提高输出激光能量的稳定性, 采用 1.06 μm 线偏振光输出进行损伤实验。入射光束由一消像差非球面透镜 (f=80 mm) 会聚至样品表面。光斑直径 (1/e²) 为 59 μm。

实验方法。首先测定样品的单脉冲损伤阈值* 和最小损伤能量。然后进行多脉冲损伤实验, 采用 *n-on-1* 的方式进行。选择一个适当的能量, 任选 10 个位置, 每个位置照射 10 次。根据样品损伤的次数算出在该激光能量照射下的损伤几率**, 然后作出不同激光能量与损伤几率关系的曲线。

三、实验结果和分析

1. 损伤阈值和形貌

用 1 pps 重复率的 1.06 μm 激光对 ZrO₂、TiO₂ 和 Ti₃O₅ 等三种单层膜和一种多层膜 (1.06 μm 高反膜) 进行损伤实验, 其结果如表 1 所列。无论是单层膜还是多层膜, 其多脉冲最小损伤能量和损伤阈值均比单脉冲低, 分别低 30~80% 和 1~70% 左右。其中 Ti₃O₅ 膜的多脉冲损伤阈值降低最多。单层膜中 ZrO₂ 的多脉冲损伤阈值最高, 表明该膜抗多脉冲损伤的性能较好。

Table 1 Damage thresholds of single and multiple pulse

thickness		minimal energy		$\frac{E_{t,0}}{E_0}$	damage threshold		$\frac{E_{pt}}{E_t}$
sample		single E_0	multiple $E_{t,0}$		single E_t	multiple $E_{t,t}$	
ZrO ₂	$\frac{\lambda}{4}$	32.0	19.4	0.61	37.3	37.0	0.99
TiO ₂	$\frac{\lambda}{4}$	26.1	17.8	0.68	31.7	27.5	0.87
Ti ₃ O ₅	$\frac{\lambda}{4}$	18.6	4.0	0.23	21.9	6.6	0.30
1.06 μm HR	multi-layer	57.5	18.3	0.32	66.8	51.0	0.76

多脉冲损伤的统计结果表明, Ti₃O₅ 膜的损伤积累效应最明显, 其次是 TiO₂, ZrO₂ 膜的 1.06 μm 积累效应不太明显。损伤积累效应的强弱与表 1 中的 (E_{pt}/E_t) 值之间有很好的对应关系。积累效应强的 Ti₃O₅ 膜, 其 (E_{pt}/E_t) 值最小; 积累效应不明显的 ZrO₂ 膜, 其 E_{pt}/E_t 值最高。

图 2 为高反多层膜和 ZrO₂ 单层膜典型的损伤形貌。图 2(a) 为高反多层膜单脉冲的损伤形貌, 其表面二层膜烧蚀后留下的圈烧蚀环痕迹属烧蚀型破坏。图 2(b) 为高反多层膜的多脉冲损伤形貌, 其中心呈一个熔洞, 周围是多层膜各层烧熔的状况, 再周围是从中心溅射出来的熔融物属摧毁型破坏, 这是由于在薄膜破坏的过程中, 激光加热产生的等离子体向外喷射过程中产生的溅射花样。显然, 多脉冲的损伤程度比单脉冲严重。

多层膜的多脉冲损伤主要是热积累引起的。随着脉冲次数的增加, 薄膜吸收激光能量产生的热积累也增加, 温度迅速上升, 并产生等离子体。等离子体的强烈吸收产生局部的高

* 定义和测量方法见文献[5]。

** 为了与单脉冲损伤阈值相对应, 定义损伤几率为 50% 的能量密度为多脉冲损伤阈值。

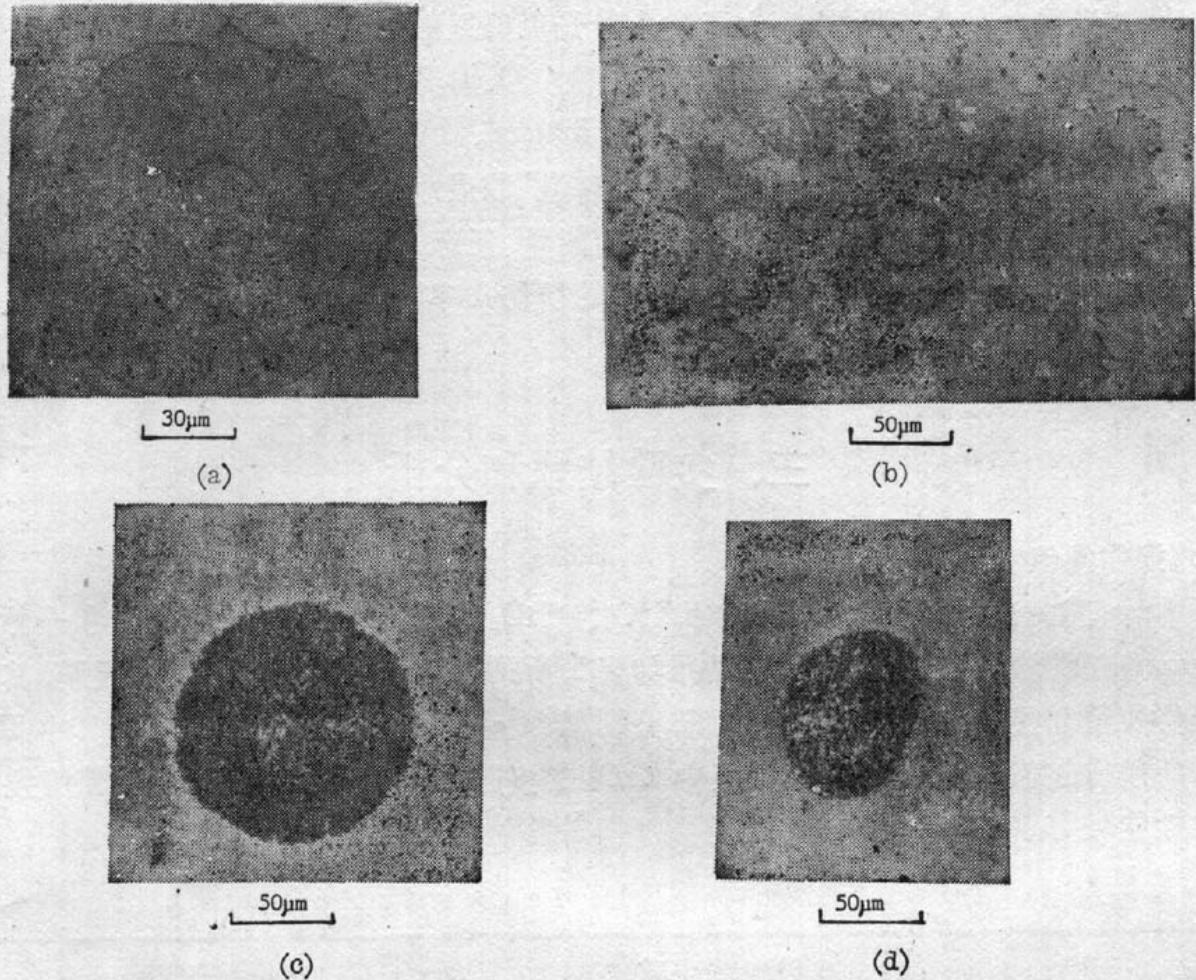


Fig. 2 Damage morphologies

- (a) $1.06 \mu\text{m}$ HR single pulse; (b) $1.06 \mu\text{m}$ HR multiple pulse;
 (c) $\text{ZrO}_2, \lambda/4$, single pulse; (d) $\text{ZrO}_2, \lambda/4$, multiple pulse

温高压使薄膜熔化,同时产生向外的冲击波,将膜层的熔融物喷溅出来。

图 2(c)和图 2(d)分别为 ZrO_2 膜单脉冲和多脉冲的损伤形貌,但它们均属于烧蚀型损伤。从图可以看出,多脉冲的损伤程度较单脉冲轻,是由于单脉冲损伤时所需的激光能量较大,而多脉冲损伤时所需的激光能量较小所致,单层膜的多脉冲损伤主要是微破坏的积累而造成的。前面几个脉冲作用到薄膜上虽未产生宏观破坏,但薄膜内产生了微破坏,如微裂纹等。或者是薄膜原有的特性发生了变化,其中有些变化是可逆的,即在激光停止作用时能恢复;有些是不可逆的,带有破坏性的变化,所以在后续脉冲的作用下;微破坏或不可逆变化进一步加剧,形成了宏观破坏。

2. 损伤几率与激光能量的关系

用 1 pps 重复率的 $1.06 \mu\text{m}$ 激光对光学薄膜进行实验,其结果如图 3 所示。这四种膜的损伤几率随激光能量的增加而线性增加,然而它们上升的斜率不尽相同,其中 Ti_3O_5 膜的斜率最大,其次是 TiO_2 。斜率越大,其多脉冲损伤阈值越低。高反多层膜的斜率最小,其多脉冲损伤阈值也最高。

3. 多脉冲损伤的积累效应

光学薄膜的多脉冲损伤积累效应,不仅与薄膜的材料有关,而且还与激光的波长有关。用 $1.06 \mu\text{m}$ 和 $0.35 \mu\text{m}$ 二种激光波长的多脉冲激光对 TiO_2 和 ZrO_2 膜进行损伤积累效应的实验,其结果如图 4 所示, TiO_2 膜随着 $1.06 \mu\text{m}$ 激光能量的降低,导致薄膜损伤所需的

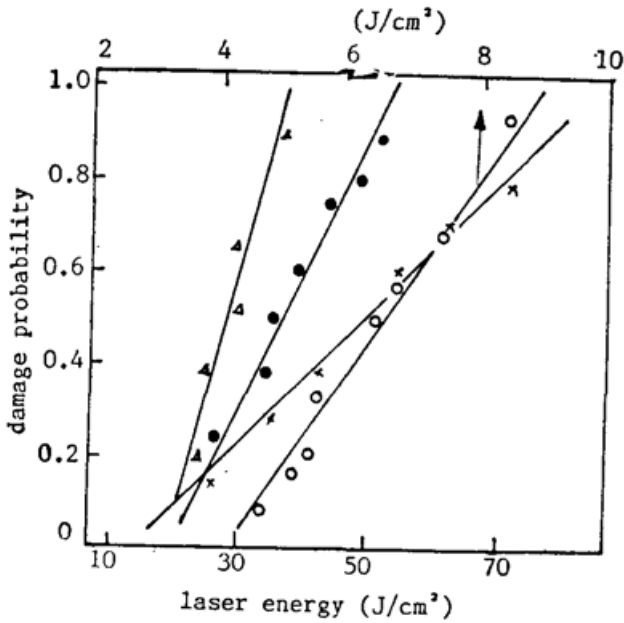


Fig. 3. Dependence of damage probability on laser energy

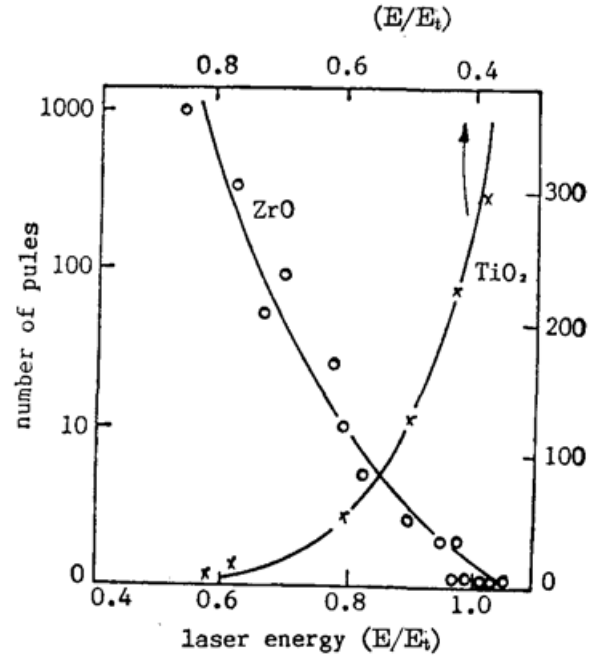


Fig. 4. Dependence of number of pulses on laser energy

○—Ti₃O₅; △—TiO₂; ●—ZrO₂ ×—1.06 μm HR ×—TiO₂, 1.06 μm; △—ZrO₂, 1.06 μm ○—ZrO, 0.35 μm

脉冲数目明显增加, 表明 TiO₂ 膜对 1.06 μm 的多脉冲激光损伤有明显的积累效应。如前所述, ZrO₂ 膜在 1.06 μm 多脉冲激光损伤时的积累效应较小, 而在 0.35 μm 损伤时有明显的积累效应。随着激光能量的降低导致薄膜损伤所需的脉冲数成指数增加。

4. 损伤几率与激光重复频率、膜的种类的关系

多层膜和单层膜的损伤几率与重复频率的关系, 不同材料的单层膜与损伤几率的关系均不相同。

(1) 对高反多层膜当激光重复频率从 1 pps 增加到 2 pps, 如图 5(a) 所示, 其损伤几率曲线向上移动了 15~20%, 表明在相同激光能量照射下, 随着激光重复频率的增加, 高反多层膜的损伤几率也相应增加。当重复频率增加一倍, 激光作用的脉冲间隔就缩短一倍。焦

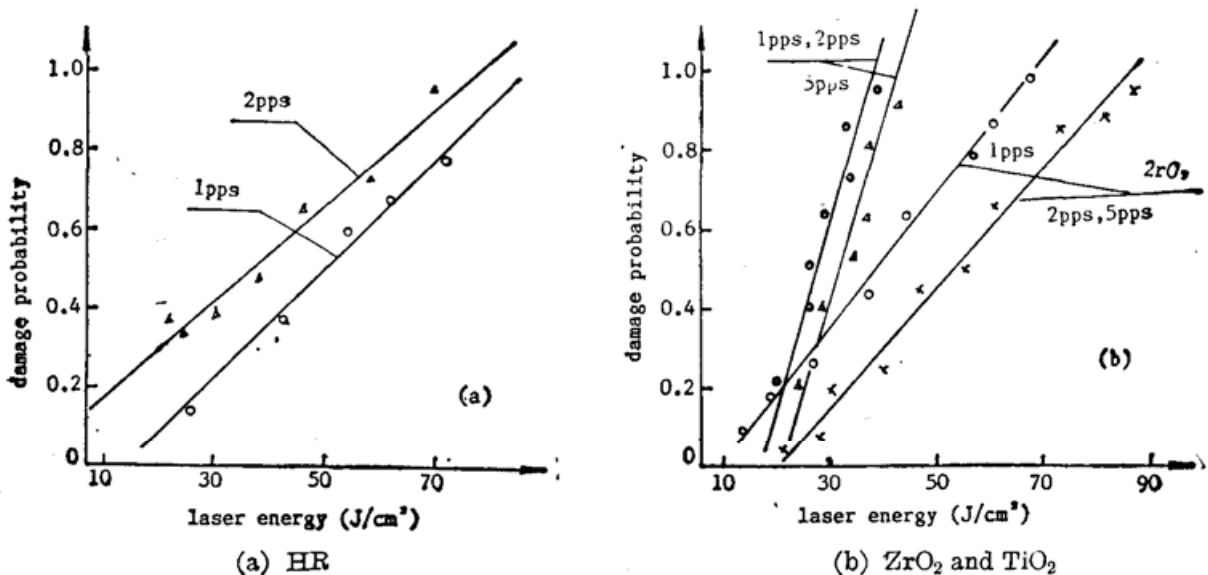


Fig. 5. Dependence of damage probability on pulse repetition frequency

点上激光功率密度约为 8 GW/cm^2 。薄膜在高功率密度的激光作用下, 局部区域的温度可达 $1 \sim 2000^\circ\text{C}$ 以上。而膜的热传导系数却很小^[6], 大约在 1.5×10^{-3} 量级。这样高的温度所产生的热量很难在短时间内全部释放掉, 因此产生了热的沉积, 加剧了膜的损伤。该结果与前面损伤形貌的结果是一致的, 均表明高反多层膜的多脉冲损伤主要是由于热积累所引起的。

(2) 单层膜无论是 TiO_2 膜还是 ZrO_2 膜, 当重复率从 1pps 增到 5pps 总的说来它们的损伤几率不但不增加, 反而有所下降。不同材料的单层膜, 当重复频率从 1pps 增加到 2pps, ZrO_2 膜的损伤几率下降了 20% 左右, 而 TiO_2 膜则没变化; 而当重复率从 2pps 增加到 5pps, ZrO_2 膜的损伤几率几乎不变, 但 TiO_2 膜的损伤几率下降了 20% 左右。这可能是薄膜在亚阈值的激光能量多次照射下, 起到了激光净化的作用^[7]。因单层膜的膜层内、外的电场强度分布比较均匀, 用稍低于单脉冲损伤阈值的激光能量多次照射光学薄膜, 能去除膜层表面的灰尘、污染和吸附, 或消除余应力, 使单层膜提高了抗激光损伤的强度。由于激光净化只对膜层表面起作用, 而高反多层膜的表面是零场, 场强最强区在第二个界面上, 场强最大的地方最容易产生破坏, 因此激光净化对多层膜无改善作用。

感谢范正修同志在样品制备中给予的帮助和有益的讨论。

参 考 文 献

- [1] Larry D. Merkle *et al.*; *Opt. Engng.*, 1983, **22**, No. 4 (Jul), 405~410.
- [2] Dimitrios Kitriotis *et al.*; *Appl. Opt.*, 1989, **29**, No. 5 (Mar), 949~958.
- [3] Robert M. O'Connell *et al.*; *Appl. Opt.*, 1984, **23**, No. 5 (Mar), 682~688.
- [4] Stephen R. Foltyn *et al.*; *NBS Spectroc. Pub.* (1971), 620, 265~275.
- [5] 李仲伢等;《中国激光》, 1989, **10**, No. 7 (Jul), 413~416.
- [6] S. M. J. Akhtar *et al.*; *NBS Spectroc., Pub.* (1986), 752, 345~351.
- [7] J. E. Swain *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1982, **41**, No. 9 (Nov), 782~783.

Multiple pulse laser damage to thin-film optical coatings

LI ZHONGYA, LI CHENGFU AND GUO JUPING

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 201800)

(Received 2 July 1990; revised 4 October 1990)

Abstract

In this paper accumulation effects on multiple pulse laser-induced damage to thin-film optical coatings at $1.06 \mu\text{m}$ and $0.35 \mu\text{m}$ are reported. The relationship between damage probability and laser energy and pulse repetition frequency are investigated.

Key words: multiple pulse, laser damage, accumulation effect.