

多脉冲激光作用下光学薄膜损伤的累积效应

王 涛^{1,2} 赵元安^{1,2} 黄建兵^{1,2} 贺洪波¹ 邵建达¹ 范正修¹

(1 中国科学院上海光学精密机械研究所光学薄膜技术研发中心, 上海 201800)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘 要 研究了高反射膜在多脉冲激光作用下损伤的累积效应. 实验中使用 1064 nm 调 Q 的 Nd:YAG 激光器, 脉宽是 12 ns, 频率为 10 Hz. 实验发现: 高反射膜的损伤阈值随辐照脉冲数增加而降低, 表现出明显的累积效应. 通过对损伤阈值和损伤概率以及辐照次数的统计性研究, 并结合单脉冲辐照的结果, 说明了存在于薄膜中微小的缺陷参与了多脉冲激光对薄膜的损伤过程, 得到了制备 IBS 高反射膜的损伤阈值和照射次数的关系式, 用 Nomarski 偏光显微镜观察了实验过程中样品的损伤形貌, 发现是典型的缺陷损伤.

关键词 Ta₂O₅/SiO₂ 介质反射膜; 累积效应; 单脉冲; 多脉冲; 损伤阈值

中图分类号 O484.4

文献标识码 A

0 引言

在多脉冲激光辐照下, 光学薄膜的抗激光损伤强度要比在单脉冲激光照射时下降很多^[1~4], 由于光学薄膜是激光器中必不可少且最容易损伤的元件, 因此这一性质严重限制了高功率激光器的发展. 尽管对这一问题已经进行了多年的研究^[5~8], 但是至今仍然没有合理的解释和对这种机制的完全理解. 本文在对重复率激光对高反膜的损伤实时监测的基础上, 对损伤阈值和照射脉冲激光数目的关系进行了统计分析研究, 并提出了可能的损伤机制.

1 实验

1.1 实验装置

实验装置如图 1, 所用的激光器为基模 (TEM₀₀) 调 Q Nd:YAG 激光器, 输出波长为 1064 nm, 脉冲宽度为 12 ns, 频率为 10 Hz. 样品被放置在一个由步进电机驱动的二维平台上. 能量衰减系统由

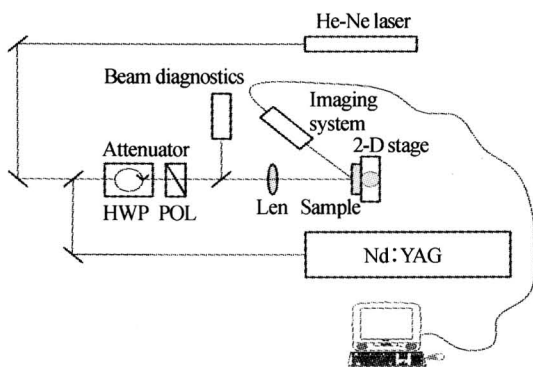


图 1 激光损伤测试装置

Fig. 1 Experimental setup of laser damage testing

一个可旋转的半波片和一个偏振片组成. 通过旋转半波片来调整入射到样品表面的激光的能量. 用能量计来记录每一个入射到样品的激光能量. He-Ne 激光器用来准直和帮助对损伤过程的实时监测. 一个包含数字图像处理的光学显微镜用来保证精确的、实时的监测. 测试点被照射前后的显微图像被保存并比较以保证一个正确的是否损伤的判断.

1.2 样品制备和损伤测试程序

样品为离子束溅射 (IBS) 方法制备的高质量的高反射膜. 高、低折射率材料分别为 Ta₂O₅ 和 SiO₂.

测试方式为 S-ON-1, 即是用一定数目的同样能量的入射光照射每个点, 每个点相互隔开以免互相影响; 并且当损伤已经发生时, 将马上对下一点进行测试, 以避免损失的进一步扩大. 每一个固定能量的入射光照射 10 个点. 因而, 每个能量激光辐照损伤概率 $p = n/10$, n 为 10 个点中损伤的点的数目.

2 实验结果

2.1 阈值结果

从图 2 可以看出, 随着随着辐照脉冲数目的增加, 激光的损伤阈值有明显的下降. 可以看到样品

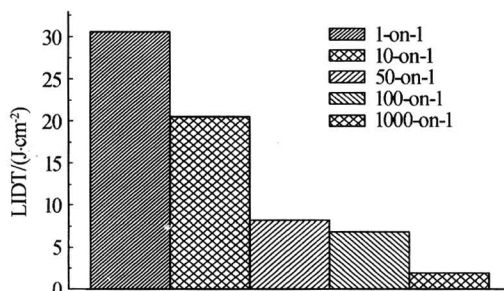


图 2 样品损伤阈值结果

Fig. 2 LIDT results of the samples

在 1000-on-1 下的损伤阈值相比 1-on-1 时的样品损伤阈值下降了 90% 左右。

2.2 损伤形貌

从图 3 可以看到,多脉冲情况下样品损伤形貌和单脉冲情况下是类似的,都是典型的缺陷破坏,缺

陷的原始尺寸为微米或者亚微米量级.并且在多脉冲测试实时观测过程中发现,当第 N 个脉冲造成测试点的不可逆的变化出现前,在前 $(N-1)$ 个脉冲照射没有观察到任何变化.

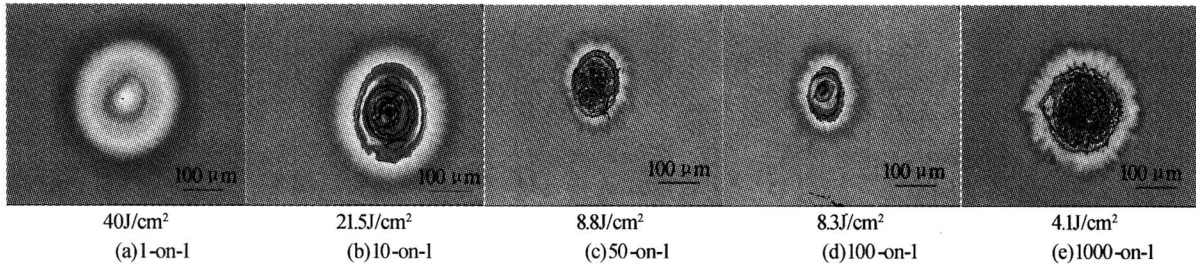


图 3 不同脉冲数目下样品损伤形貌

Fig. 3 Damage morphology of the sample irradiated with different numbers of pulse

3 讨论

3.1 1-on-1

单脉冲辐照情况下样品损伤概率理论模型已经被提出^[9,10],而对于高反射膜来说,由于其损伤是发生在最上面几层,其厚度远远小于 $30 \mu\text{m}$ ^[11],因此可以用表面缺陷损伤概率模型来进行分析,在光束截面为高斯分布,垂直入射情况下,损伤概率和入射能量的关系为

$$p(F) = 1 - \exp[-dS_T(F)] \quad (1)$$

式中, d 是平均表面缺陷密度, S_T 是有效面积,即入射能量密度大于缺陷阈值的光束面积. S_T 被给出

$$S_T = \frac{1}{2} S \ln \left[\frac{F}{T} \right] \quad (2)$$

式中 S 指高斯光斑的面积. 由式(1)和式(2)可得到

$$P(F) = 1 - \left[\frac{F}{T} \right]^{-dS/2} \quad (F \geq T) \quad (3)$$

当 $F < T$ 时, $P(F) = 0$.

从图 4 可以看到,当光斑高斯直径 $\omega_0 = 440 \mu\text{m}$ 时,取 $d = 2500/\text{cm}^2$,使用式(3)对实验数据进行拟合,获得最好的一致性.

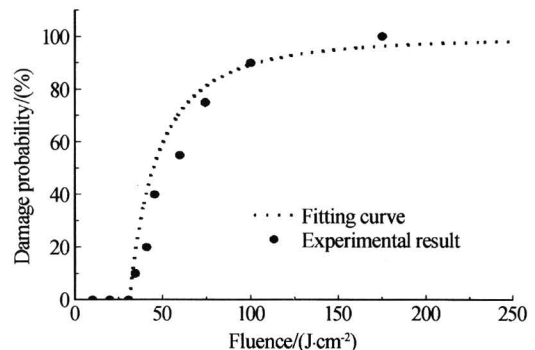
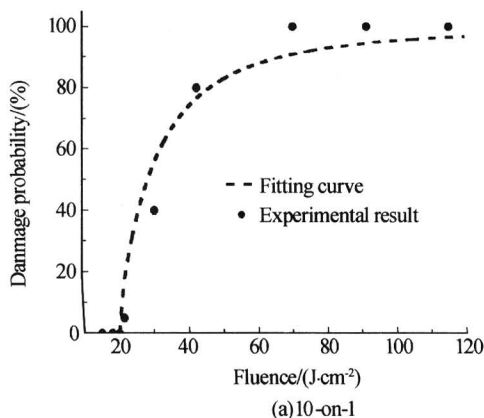


图 4 单脉冲损伤阈值数据和拟合曲线

Fig. 4 Single pulse laser damage threshold curve of sample, together with fit of experimental data

3.2 S-on-1

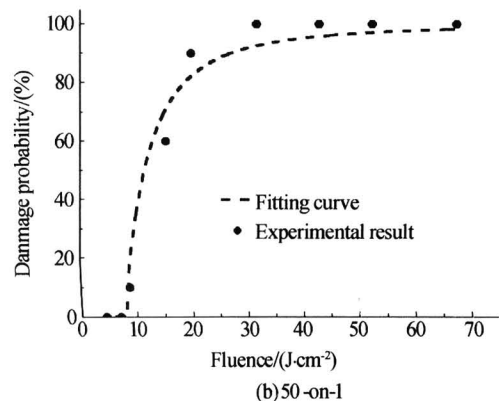
在多脉冲情况下,也是由于微小缺陷而造成薄膜的损伤.本文假定相同的缺陷在单脉冲损伤和多脉冲损伤中起作用,由于多脉冲辐照的累积效应,损伤阈值与辐照次数 N 相关的,即

$$T = T(N) \quad (4)$$

则式(3)可写成

$$P(F) = 1 - \left[\frac{F}{T(N)} \right]^{-dS/2} \quad (5)$$

利用式(5)对多脉冲实验数据进行损伤阈值曲线拟合.图 5 分别列出了在不同辐照脉冲数目“ N ”



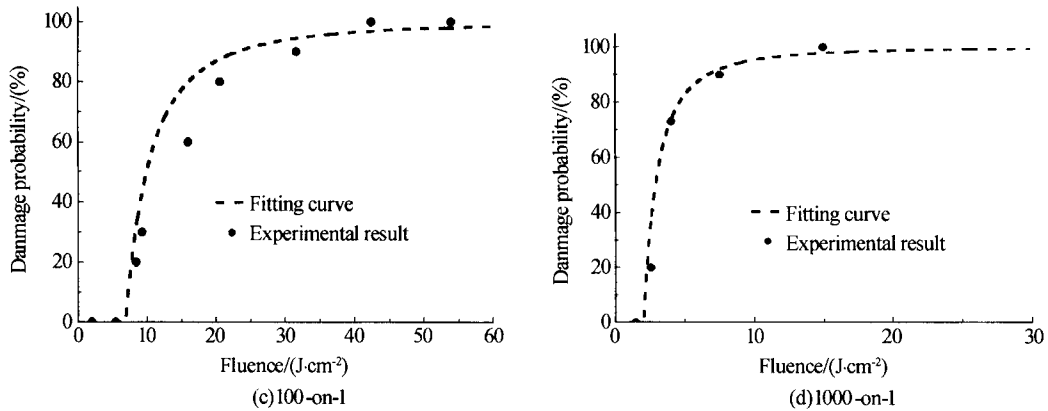


图 5 辐照次数为 10、50、100、1000 的损伤阈值拟合曲线和实验数据

Fig. 5 Laser damage probability curve after 10, 50, 100, 1000 shots. Data are fitted with the model presented in the text

($N=10, 50, 100, 1000$) 下的实验数据作为能量密度的函数,并用式(5)来拟合这些曲线. 可以看到,实验数据和模型拟合曲线的一致性非常好. 可以看出,相同的缺陷在单脉冲损伤和多脉冲损伤中起作用这个假定是成立的.

3.3 T 和 N 关系式

通过对多脉冲辐照数据的拟合可以看到损伤阈值 T 是辐照次数 N 的函数,这些值在图6中被表示.

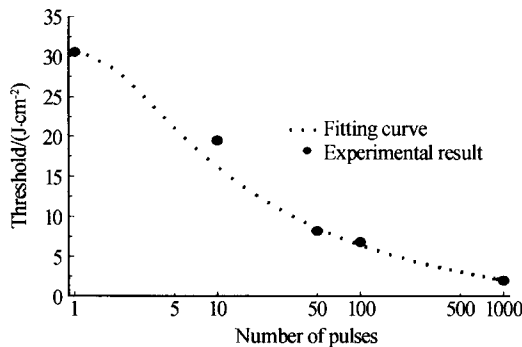


图 6 多脉冲损伤阈值数据和式(6)的拟合曲线

Fig. 6 Multishot damage threshold data and fitting curve with equation 6

从图中可以看到,这些值可以被拟合用一个对数关系,并且他们之间并不是一个线性对数关系,而是非线性的,并且随着辐照脉冲数目的增加,阈值的减小的趋势趋向于平缓. 因此可以得到 T 为 N 函数的一个经验表达式

$$T(N) = T_1 - A \cdot (\log N) \left(1 / \sqrt{\log(N+1)} \right) \quad (6)$$

对于本文所研究的这种反射膜来说

$$T_1 = 31, A = 14.8.$$

可见,用这个表达式可以用来判断光学高反射薄膜元件的使用寿命. 同时,考虑到不同激光损伤机制的前提下,相似的表达式或许也可以应用到其它类型的光学薄膜元件,用来反映它们的使用寿命. 另外,这个表达式对重复辐照次数小于 1000 是有效的. 虽然从阈值减小趋势来看,或许会有一个最低

能量密度,当入射能量密度小于这个值时,不管多大的重复辐照数目,都不会引起损伤. 但是,这种统计研究不但要花费非常长的时间,而且需要在非常多的测试数据的才可能给出. 而如果用高重复频率的激光来做这个研究的话,由于在高重复频率下会有温度的累积效果,这和低重复频率下的损伤机制是不一样的.

3.4 预损伤机制

在单脉冲和多脉冲辐照情况下是同样的缺陷造成薄膜的损伤,而且,在多脉冲辐照下,造成薄膜不可逆变化的那个脉冲前面的脉冲辐照并没有观察到薄膜的损伤. 并且这个脉冲造成的损伤和单脉冲情况下的损伤是相同的. 因此,使用预损伤机制来解释这个现象:首先,当用低于单脉冲损伤阈值的能量密度来照射样品时,第一个脉冲并不能造成薄膜的损伤,但是会造成缺陷的一个微小的不可逆的改变,紧接着后续脉冲会进一步的造成损伤阈值的下降;最终,当缺陷的阈值降低到入射能量密度的程度时,后续的一个脉冲促使薄膜的灾难性的破坏发生.

4 结论

运用统计理论对多脉冲辐照下离子束溅射法制备的高反射薄膜的损伤进行了研究,理论模型和实验结果有很好的的一致性. 得到了阈值 T 和辐照次数的关系式. 并运用预损伤机制很好的解释了实验现象.

参考文献

- 1 Chmel A E. Fatigue laser-induced damage in transparent materials. *Mater Sci Eng B*, 1997, **B49**: 175~190
- 2 范正修, 吴周令, 汤雪飞. 重复率激光对光学薄膜的破坏. *中国激光*, 1994, **A21**(9): 734~738
Fan Z X, Wu Z L, Tang X F. *China Journal of Lasers*, 1994, **A21**(9): 734~738
- 3 Manenkov A A, Nechitailo V S. Physics of multishot

- laser damage to optical materials. *SPIE*, 1991, **1441**: 392~404
- 4 Manenkov A A, Matyushin G A, Nechitailo V S, *et al.* On the Nature of Accumulation Effect in the Laser-Induced Damage to Optical Materials. in Laser induced damage in optical materials, Guenther A H, Milam D, Newnam B E, Eds., NBS Spec. Pub. 669. 1982, 436~447
 - 5 Walker T W, Guenther A H, Nielsen P E. Pulsed laser-induced damage to thin-film optical coatings-Part I: Experimental and Part II: Theory. *IEEE J Quantum Electron*, 1981, **QE-17**(10): 2041~2065
 - 6 高卫东, 张伟丽, 范树海, 等. HfO_2 薄膜的结构对抗激光损伤阈值的影响. *光子学报*, 2005, **34**(2): 176~179
Gao W D, Zhang W L, Fan S H, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(2): 176~179
 - 7 牛燕雄, 张鹏, 姚建铨. 强激光对星载光电系统的干扰与破坏研究. *光子学报*, 2004, **33**(7): 793~796
Niu Y X, Zhang P, Yao J Q. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(7): 793~796
 - 8 王英剑, 金永浩, 李庆国, 等. 氧碘化学激光高反射薄膜的性能研究. *光子学报*, 2003, **32**(4): 402~404
Wang Y J, Jin Y H, Li Q G, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(4): 402~404
 - 9 O'Connell R M. Onset threshold analysis of defect-driven surface. *Appl Opt*, 1992, **31**(21): 4143~4153
 - 10 Picard R H, Milam D, Bradbury R A. Statistical analysis of defect-caused laser damage in thin films. *Appl Opt*, 1977, **16**(6): 1563~1571
 - 11 Natoli J, Gallais L, Akhouayri H, *et al.* Laser-induced damage of materials in bulk, thin-film, and liquid forms. *Appl Opt*, 2002, **41**(16): 3156~3166

Accumulation Effect of Multi-shot Laser-induced Damage to Optical Coatings

Wang Tao^{1,2}, Zhao Yuanan^{1,2}, Huang Jianbing^{1,2}, He Hongbo^{1,2}, Shao Jianda¹, Fan Zhengxiu¹

1 R&D Center for Optical Thin Film Coatings, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800

2 Graduate School of the Chinese Academy of Science, Beijing 10039

Received date: 2005-03-22

Abstract Accumulation effect of multi-shot laser-induced damage to optical coatings was investigated. Laser damage testing was performed at 1064 nm with nanosecond pulses at a pulse length of 12 ns, using an accurate and reliable measurement system. Damage threshold and the number of shots were studied by a statistical method. Comparing the case of single-shot with multi-shot laser damage, it is known that microdefects in the optical coatings were responsible for multiple pulses damage to mirrors. The damage mechanism was used to explain the damage process. The expression for the damage threshold and the number of shots was founded. Nomarski microscope was employed to observe laser-induced damage morphology after laser irradiation.

Keywords $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ dielectric mirrors; Accumulation effect; Single-shot; Multi-shot; Damage threshold



Wang Tao was born in Oct. 1976, and received his B. S. degree from the Department of Electronic Engineering at Zhengzhou University in 1998. He is now pursuing M. S. degree in Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences. His current research interests include laser-induced damage threshold of optical coatings irradiated by laser.