

# 光学薄膜的小光斑扫描激光预处理研究

赵 强 裘 弘 刘 晔 范正修 王之江

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

**摘 要** 激光预处理是一种提高光学薄膜破坏阈值的新技术, 采用小光斑扫描并逐步提高预处理能量的方法, 对不同类型的薄膜进行激光预处理, 实验结果发现, 除了  $\text{HfO}_2/\text{MgF}_2$  多层反射膜外, 其它样品的 0 几率破坏阈值  $F_{0\%}$ 、发生破坏的最低能量密度值  $F_{Dmin}$ 、不发生破坏的最高能量密度值  $F_{NDmax}$  以及 50% 几率损伤阈值  $F_{50\%}$  都有不同程度的提高。这说明, 激光预处理不仅可以清除薄膜中的杂质和缺陷, 而且可以改进薄膜的整体性能。

**关键词** 光学薄膜, 激光预处理, 激光损伤阈值。

## 1 引 言

长期以来, 激光对光学薄膜元件的破坏是限制激光向高功率、高能量方向发展的“瓶颈”, 也是影响高功率激光薄膜元件使用寿命的主因。由于采用的是物理气相沉积(PVD), 大多数薄膜为堆积密度较低的柱状生长结构, 使得膜状材料的导热系数要比块状材料低一至两个数量级, 其密度、机械强度等物理参量也表现出了与块状材料的巨大差异<sup>[1]</sup>; 而周边环境杂质、水分的介入, 又使得膜状材料的吸收系数远远高于块状材料。薄膜元件的这些性质使得其损伤也极大地区别于块状材料的损伤, 从而也使得光学薄膜的激光损伤研究在全世界范围内引起了薄膜与激光工作者的强烈兴趣。如何增强薄膜元件的强度、提高其损伤阈值成为人们所关注的问题。

在光学薄膜的激光损伤研究过程中, 人们发现以低于阈值的激光辐照薄膜元件可使其阈值得到提高。这也就是激光预处理的由来。尽管有报道表明, 这一增强效应可能是临时性的<sup>[2]</sup>, 但更多的数据却显示出预处理的永久性增强效果, 并且最高达 10 余倍的增强效果已见报道。这使得激光预处理成为提高薄膜破坏阈值的一种重要技术。围绕激光预处理的增强机理和具体工艺, 人们开展了多方面的探索。关于预处理的机理, 一种看法是“激光清洗机制”<sup>[3]</sup>, 即激光预处理去除或消融了膜层表面的吸附杂质、缺陷以及吸附水分等, 相应地可以认为这种增强是临时性的; 另一种看法是“电子杂质缺陷机制”<sup>[4]</sup>, 即激光预处理可将介质材料的价带中的杂质、缺陷能级中的束缚电子激回禁带, 从而去除了可能诱致破坏的导带中自由电子的来源。这种看法认为, 激光预处理的增强效果是永久的、不可逆的。关于预处理的方式, 有大光斑(薄膜样品口径大小)处理和小光斑扫描处理两种方案, 但都是基于能量逐级

抬升的途径的。由于获得理想光斑模式的困难，大光斑处理难以获得均匀的处理效果，而采用小光斑扫描，可均匀地处理薄膜元件。但迄今为止，仍有许多问题亟待解决，如预处理的光斑效应、能量分级措施、各种薄膜工艺和材料的影响等。

本文作者建立了一套同步扫描驱动系统实验装置，对不同工艺条件下制备出来的具有不同材料成分的薄膜样品进行了激光预处理，结果普遍地观察到了增强效应，并且这种增强效应随具体的薄膜而发生变化。本文最后给出了可能的解释。

## 2 实 验

对于光斑大小有限的激光束，为了实现大口径光学薄膜元件的均匀的预处理，有必要建立一套同步扫描驱动装置。图 1 示出了该装置的示意图。

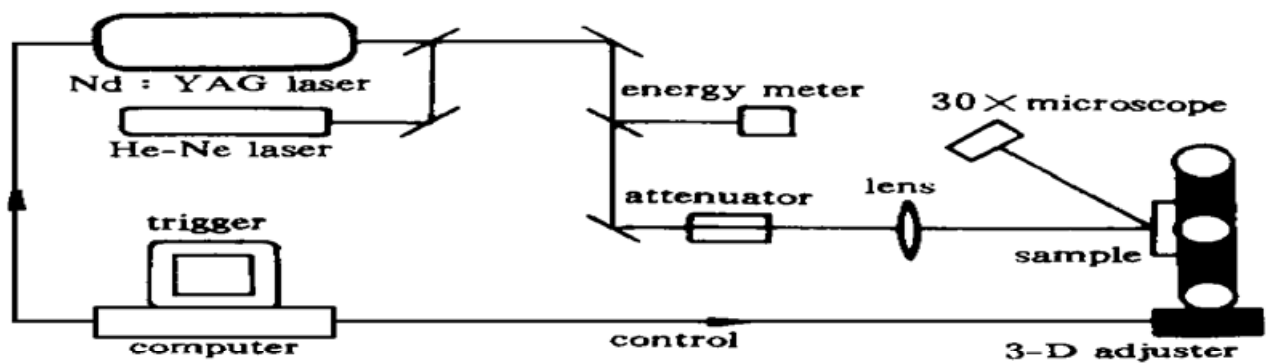


Fig. 1 Synchronizing scanning equipment for laser condition

采用计算机实时控制激光电源和 3 维步进驱动系统，可完全实现同步扫描，即确保每一点在静止状态接受一个脉冲的激光辐照。扫描过程中，为保证处理的均匀性，移动的两点间距必须适当控制，激光的脉冲重复频率为 10 Hz，光斑大小为  $\phi 0.3$  mm，步进驱动的扫描速率为 1 mm/s。图 2 为扫描示意图。

采用  $1.06 \mu\text{m}$  激光作为损伤阈值测试和预处理用的光源。为获得较好的光斑模式，在振荡级中加入一  $\phi 1.9$  mm 小孔进行选模，以 LiF 晶体调 Q，经一级放大，最大可获得 90 mJ 的 10 ns 脉冲。光束经焦距为 210 mm 的透镜聚焦至靶面。图 3 为靶面光斑的光强分布曲线，此曲线通过测量逐级衰减的光斑尺寸获得。光强  $e^{-2}$  处的半径为  $50 \mu\text{m}$ ，该半径范围内的能量占总光斑能量的 60%。

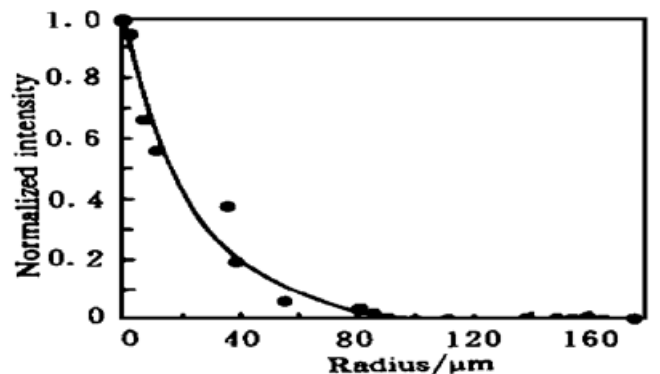
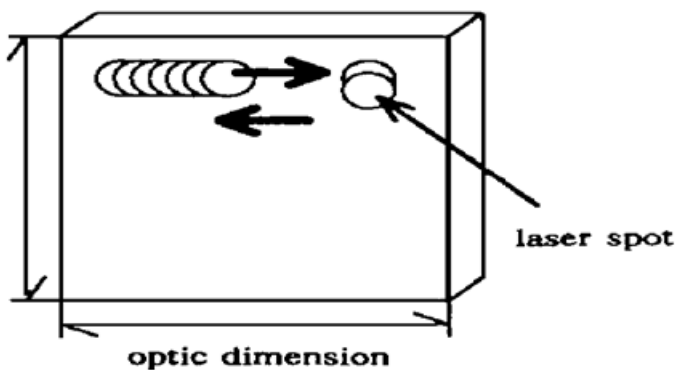


Fig. 2 Schematic diagram of the smaller spot scanning  
实验步骤如下:

Fig. 3 Intensity distribution in target plane of laser

1) 以概率法进行 1-ON-1 损伤阈值测试。损伤观察采用暗场显微镜辅以氦氛散射法，损

伤定义为肉眼可观察到的不可逆形貌变化, 首先得出不同能量密度激光作用下薄膜的破坏几率。以能量密度为纵坐标, 破坏几率为横坐标, 作出几率—能量曲线, 延长曲线与纵坐标交点为 0 几率破坏阈值。

2) 换区域进行激光预处理, 扫描面积为  $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 。预处理采用能量逐级增加的方案, 能量台阶的划分以未处理的 1-ON-1 损伤阈值为标准, 所分的台阶数目、台阶之间的增幅视具体薄膜样品而定, 见示意图 4。最大预处理能量一般不大于 0 破坏几率所用能量的 85%。

3) 在预处理区域进行 1-ON-1 损伤阈值测试以观察预处理的效果。

为了观察不同工艺、不同材料的薄膜的预处理效果, 制备了一系列样品, 表 1 列出了样品的工艺参数和预处理前后的激光损伤阈值。为了观察预处理对薄膜样品的不同区域的影响, 同时列出了发生破坏的最低能量密度值  $F_{Dmin}$ 、不发生破坏的最高能量密度值  $F_{NDmax}$  以及 0% 损伤概率阈值  $F_{0\%}$  和 50% 损伤概率阈值  $F_{50\%}$ 。

Table 1. Parameters and damage threshold of the optical samples

samples		No. 1	No. 2	No. 3	No. 4
materials of the coatings		$\text{ZrO}_2 \cdot \text{Y}_2\text{O}_3 / \text{SiO}_2$	$\text{HfO}_2 / \text{SiO}_2$	$\text{HfO}_2 / \text{MgF}_2$	$\text{HfO}_2 / \text{SiO}_2$
$F_{Dmin}$	before	8.6	6.4	15.6	33.6
	after	46.8	21.7	12.5	59.9
$F_{NDmax}$	before	114.6	59.9	52.3	133.3
	after	132.4	108.2	46.8	218.0
$F_{50\%}$	before	61.6	33.2	34.0	83.5
	after	89.6	65.0	29.7	139.0
$F_{0\%}$	before	4.0	3.1	12.5	15.6
	after	30.6	15.6	8.6	46.8

注: 1)  $F_{Dmin}$ 、 $F_{NDmax}$ 、 $F_{0\%}$ 、 $F_{50\%}$  的单位都是  $\text{J}/\text{cm}^2$ ;

2) 基片采用 K9 玻璃, 并用超声清洗; 薄膜用电子束蒸发, 样品 No. 2 另加离子辅助蒸发;

3)  $F_{Dmin}$ 、 $F_{NDmax}$ 、 $F_{0\%}$ 、 $F_{50\%}$  都是实测值。由于实验过程中衰减片的选择难以达到足够密集的程度,  $F_{Dmin}$  与  $F_{0\%}$  之间存在一定的差距。原则上二者是相近的。

### 3 结果与讨论

考察表 1 中各种阈值的变化情况, 对研究激光预处理有着重要的意义。由于杂质、缺陷或水分等广泛地分布于膜面或膜体中, 使得小光斑扫描处理情况下的薄膜损伤现象明显地表现出概率分布的特点。这样, 损伤概率分布图中低能量破坏端与高能量破坏端就有了完全不同的意义: 低能量破坏端表征了薄膜中杂质、缺陷的抗激光强度, 这是限制薄膜强度的最关键的因素; 高能量破坏端则代表了薄膜体材料的抗激光强度, 这反映了改进薄膜沉积技术以求达到接近块状材料特性的峰值情况。对于用户而言, 所关心的往往是 0% 损伤概率阈值或

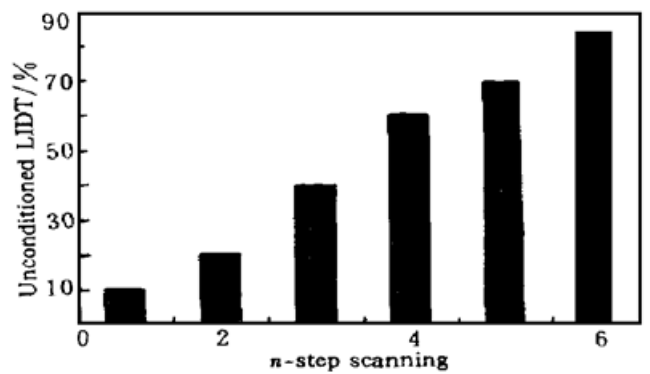


Fig. 4 Schematic diagram of the energy step for laser conditioning. LIDT: laser induced damage threshold

最低破坏能量密度;而对于薄膜制备者来说,不发生破坏的最高能量密度值在预处理前后的变化情况也同样地有意义。

基于以上分析,分别给出了各个样品的  $F_{50\%}$  (损伤阈值)、 $F_{0\%}$ 、 $F_{NDmax}$  在预处理前后的变化情况,见图 5、图 6、图 7。可见,除开 No. 3 样品外,各个样品的  $F_{50\%}$ 、 $F_{0\%}$  以及  $F_{NDmax}$  都得到了提高。这个结果有力地说明了激光预处理不仅可以有效地消除薄膜元件的杂质、缺陷或水分等,而且同样也可以提高薄膜基体的损伤阈值。单独的“激光清洗机制”或“电子杂质缺陷机制”显然已不能作为激光预处理增强效应的唯一机理,而应是复合的机制,并且视具体的薄膜和激光参数而变化。由于激光预处理而导致的薄膜微晶结构的改善或者薄膜残余应力的去除也是可能的解释<sup>[5]</sup>。

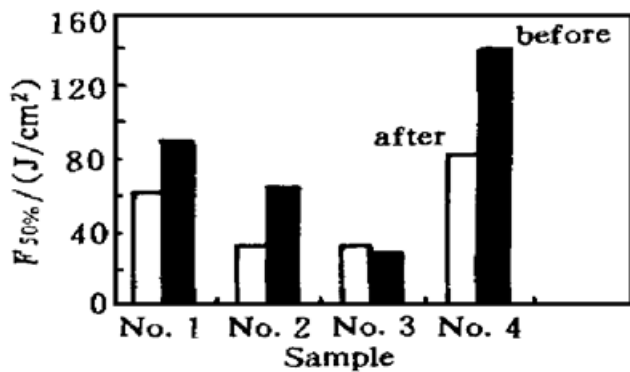


Fig. 5 50% probability damage threshold before and after laser conditioning

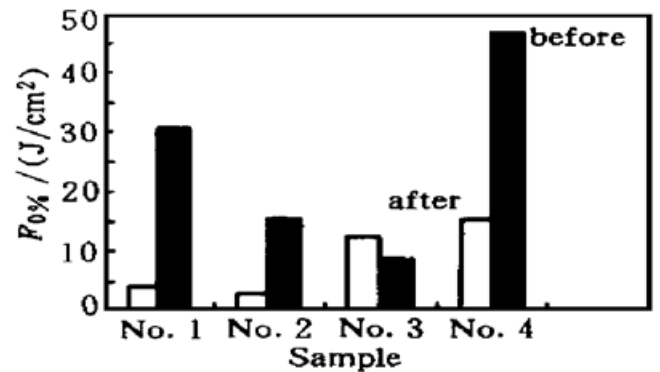


Fig. 6 0% probability damage threshold before and after laser conditioning

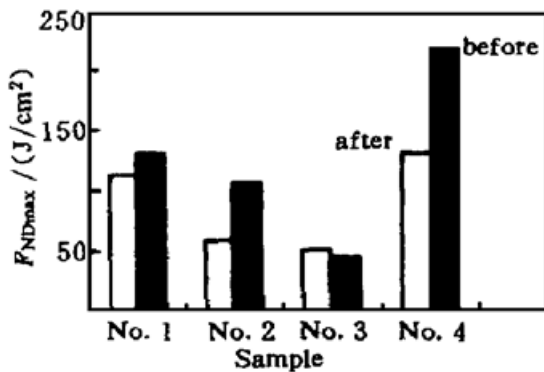


Fig. 7 The maximum energy density without damage before and after laser conditioning

No. 2 样品由于在离子辅助沉积过程中离子能量过高,致使在离子轰击生长的薄膜中,造成薄膜粒子间的结合损伤,微观缺陷增多。如图 5 所示,此片显示出最高的阈值增强效果(2.0x),说明阈值较低的薄膜较之高阈值薄膜可获得更好的预处理增强效果。

No. 3 样品由于预处理而使阈值有所降低。由于  $MgF_2$  膜属于软膜系列,即薄膜基体结构比较脆弱,故其膜体阈值较低,见表 1。预处理过程中多脉冲的重复冲击造成了薄膜元件的微破坏的累积,从而难以观察到预处理增强效应。这也说明预处理并非对任何薄膜样品都是有效的。

**总结** 通过对几种不同的薄膜样品的激光预处理实验,发现预处理不仅可以有效地清除薄膜中的杂质、缺陷,而且可以提高薄膜基体的损伤阈值。低阈值薄膜较之高阈值薄膜更容易获得较强的增强效应。对光学薄膜元件进行小光斑扫描激光预处理是一种有效的、可行的技术方案。

范瑞瑛高级工程师、黄日成工程师为本实验提供了优质的光学薄膜样品,贺洪波博士在实验中给予了很多的帮助,作者特致谢意。

## 参 考 文 献

- [1] 顾培夫. 薄膜技术. 杭州: 浙江大学出版社, 1990. 185~ 203
- [2] Wolfe G R, Kozlowski M R, Campbell J H *et al.*. Laser conditioning of optical thin film. *Proc SPIE*, 1989, **1438**: 360~ 375
- [3] Kozlowski M R, Wolfe G R, Staggs M C *et al.*. Large area laser conditioning of dielectric thin film mirrors. *Proc. SPIE*, 1989, **1438**: 376~ 390
- [4] Brauns B, Schafer D, Wolfe R *et al.*. Effect of the substrate preparation with CO<sub>2</sub> laser radiation on the laser resistance of optical layers. *Thin Solid Films*, 1986, **138**(2): 157~ 162
- [5] Zhao Qiang, Fan Zhengxiu, Wang Zhijiang *et al.*. Study on laser conditioning of optical coatings. *Chinese J. Lasers*, 1996, **B5**(4): 371~ 374

## Study of Laser Conditioning of Optical Coatings with Small Laser Spot Scanning

Zhao Qiang    Qiu Hong    Liu Ye    Fan Zhengxiu    Wang Zhijiang

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

(Received 12 February 1997; revised 17 June 1998)

**Abstract** Laser conditioning is a new technology to enhance laser damage threshold of the optical coatings. The method of the small laser spot scanning and raising of energy step by step is applied to condiation several various multi-layer reflective coatings. It is found experimentally that the damage thresholds of the reflection coatings, except of HfO<sub>2</sub>/MgF<sub>2</sub> multi-layer coating, such as zero-probability damage threshold  $F_{0\%}$ , minimum damage energy density  $F_{Dmin}$ , maximum not damage energy density  $F_{NDmax}$  and 50% probability damage threshold  $F_{50\%}$  are all enhanced. It means that laser conditioning technology not only can eliminate the impurities and defects in the coating, but also can improve the whole properties of the coating.

**Key words** optical coating, laser conditioning, damage threshold.