

0.532 μm 激光小光斑扫描预处理 光学薄膜的研究*

胡海洋 范瑞瑛 汤兆胜 范正修
(中国科学院上海光机所 上海 201800)

鲍成芳 邱文法 洪 治
(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室 杭州 310027)

提要 围绕着激光预处理的增强机理和具体工艺,进行了小光斑扫描处理的实验探索,对 0.532 μm 波长预处理的实验结果进行了分析,进一步证实了激光预处理对改善光学薄膜质量、提高光学薄膜损伤阈值的有效性和可行性,并从实验角度给予了一定的分析解释。

关键词 光学薄膜,激光预处理,激光损伤阈值,小光斑扫描

改善薄膜元件抗激光损伤阈值的研究主要集中在薄膜的制备方面,即从薄膜材料的选择、淀积的手段以及膜系设计改进方面入手。过去的 20 年中,许多报告证明,以亚阈值能量密度激光辐照薄膜元件可使其阈值得到提高,这就诞生了激光预处理的概念。尽管人们对于预处理增强机理还不甚清晰,但围绕薄膜元件进行后期处理这方面的工作已广泛展开,其结果也非常明显。有报道表明激光预处理对薄膜的永久性增强效果最高已经达到 10 余倍,其迅猛发展的态势给人以充分的信心,并使得该技术逐渐成为继改善薄膜制备这一技术方案之后又一门新兴的有前景的技术方案。

对于 1.06 μm 波长的激光预处理我们已经进行了一定的实验工作。在这个过程中,发现由于预处理现象的复杂性,同时也由于谐波光学薄膜的特殊要求,使进一步认识谐波波长激光的预处理研究成为必要。本文主要介绍近期由 YAG 激光器倍频得到的 0.532 μm 波段的激光预处理实验研究的初步结果,并对增强机理给出了较为详细的分析解释。

1 实验装置与步骤

1.1 实验装置

采用浙江大学现代光学仪器国家重点实验室研制的 STY-600 Nd:YAG 激光系统作为实验光源,其特性参数列于表 1。

如图 1 所示,该系统以 $\text{KD}^* \text{P}$ Pockels 进行电光调 Q ,并引入 T_1, T_2 两个望远镜系统以提高激光输出光束质量,经振荡和放大级输出的激光再由倍频晶体倍频,通过 Abbe 棱镜分束后获得 0.532 μm 波长的激光输出。出射光最后再经一焦距为 270mm 的消像差非球面透镜 F_1 聚

* 浙江大学现代光学仪器国家重点实验室开放基金资助项目。

表 1 激光特性参数

Table 1 Characteristic parameter of laser

| | | | |
|-----------------|---------------------|----------------------------------|----------------|
| Wavelength | 0.532 μm | Energy output | 40 mJ (532 nm) |
| Transverse mode | TEM ₀₀ | Beam diameter | 6 mm |
| Pulse width | 12~ 14 ns FWHM | Reproducibility of energy output | $\pm 3\%$ |
| Polarization | Linear | | |

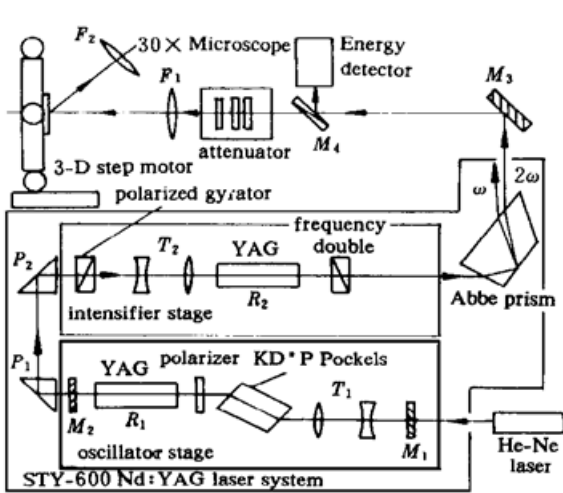


图 1 小光斑同步扫描预处理装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup for laser conditioning

焦, 样品靶面位于三维扫描平台焦前位置。用减光滤光片 (Attenuator) 衰减靶面能量, 测量逐级衰减的光斑尺寸, 得到靶面能量分布图, 如图 2 所示。此曲线与高斯分布基本吻合, 通过对该曲线的计算拟合, 从而得到高斯腰半径, 也就是靶面聚焦的光斑半径 r_0 , 实验样品置于焦前 20 mm 处, 光斑半径为 172 μm 。

对于有限光斑大小的激光, 为了实现大口径光学薄膜元件的均匀预处理, 有必要建立一套同步扫描驱动装置。在确定光斑尺寸和激光频率的条件下, 采用计算机实时控制激光电源和三维步进驱动系统, 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。我们采用计算机打印机并行接口控制二维扫描步进电机驱动源工作, 通过延时程序控制扫描速率和扫描步距以实现扫描过程中连续移动的两点间距为一个光斑的直径, 从而达到均匀处理样品膜面的目的, 图 3 为扫描示意图。

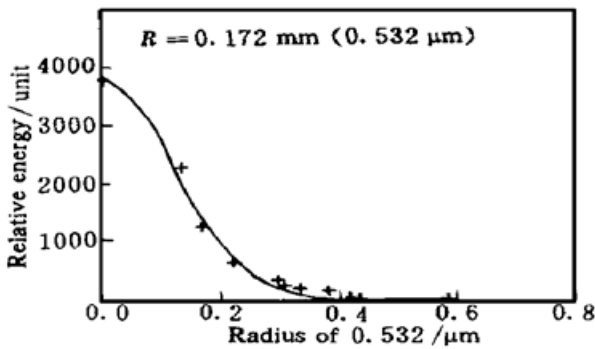


图 2 靶面光斑的光强分布曲线

Fig. 2 The relationship between the light spot intensity on the target surface and the laser radius

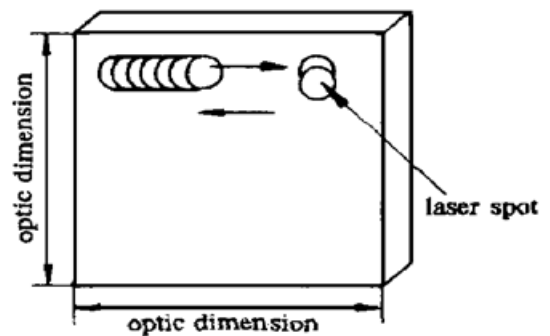


图 3 小光斑扫描示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the small spot scanning

实验中通过激光能量计实时监测脉冲能量, 以消除激光能量输出随机起伏的影响。F₂ 为 30 \times 显微镜, 用以观察单次激光照射所造成的膜表面不可逆形貌变化。

1.2 实验步骤

以概率法进行 1-ON-1 损伤阈值测试。损伤定义为 30 \times 显微镜下可观察到的不可逆形貌变化, 损伤阈值定义为零几率损伤阈值, 单位为 J/cm^2 。

在同一块膜的另外区域进行预处理, 扫描面积为 $15\text{ mm} \times 15\text{ mm}$ 。预处理采用能量逐级抬升的方案, 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, 见图 4。当以某一台阶能量扫描样品时, 坏点出现概率应小于 1%。

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、不同材料薄膜的预处理效果, 制备了一系列样品, 表 2 列出了样品的工艺参数和预处理前后的激光损伤阈值。

表 2 薄膜样品参数及损伤阈值

Table 2 The parameters of coating samples & the laser induced damage threshold

| Sample | No. 1 | No. 2 | No. 3 | No. 4 | |
|-----------------------|------------------------------------|------------------------------------|---|---|-------|
| Coating material | ZrO ₂ -SiO ₂ | HfO ₂ -SiO ₂ | ZrO ₂ ·Y ₂ O ₃ -SiO ₂ | ZrO ₂ ·Y ₂ O ₃ -SiO ₂ | |
| Sort | 3 ω HR | 2 ω HR | 2 ω HR | 2 ω HR | |
| Substrate | BK ₇ | BK ₇ | BK ₇ | BK ₇ | |
| Depositing technology | Wipe, roast, e-beam evaporation | Wipe, roast, e-beam evaporation | ultrasonic cleaning, e-beam evaporation | ultrasonic cleaning, roast, e-beam evaporation | |
| $E_{100\%}$ | Before laser condition | 32.88 | 25.66 | 51.92 | 58.96 |
| | After laser condition | 42.8 | 50.4 | 78.59 | 87.72 |
| $E_{50\%}$ | Before laser condition | 21.06 | 17.5 | 34.08 | 38.35 |
| | After laser condition | 31.3 | 32.95 | 47.94 | 52.13 |
| $E_{0\%}$ | Before laser condition | 9.23 | 9.34 | 16.28 | 14.74 |
| | After laser condition | 19.8 | 15.5 | 17.29 | 16.55 |

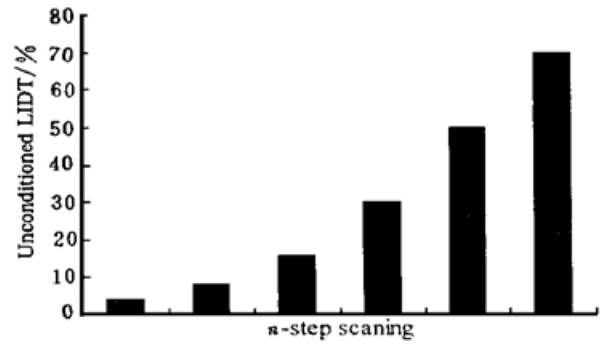


图 4 能量分级扫描图

Fig. 4 Diagram of the energy step scanning for laser conditioning

2 实验结果

由于杂质、缺陷或水分等广泛地分布于膜面或膜体中, 使得小光斑情况下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 $E_{0\%}$ 或最低破坏能量密度; 而对于薄膜制备者来说, 最大不发生破坏的能量密度值 $E_{100\%}$ 在预处理前

后的变化情况也同样地有意义。

基于以上分析,我们分别给出了各个样品的 $E_{0\%}$, $E_{100\%}$, $E_{50\%}$ 在预处理前后的变化情况,如图 5 所示,各个样品的 $E_{0\%}$, $E_{50\%}$ 以及 $E_{100\%}$ 都得到了提高。

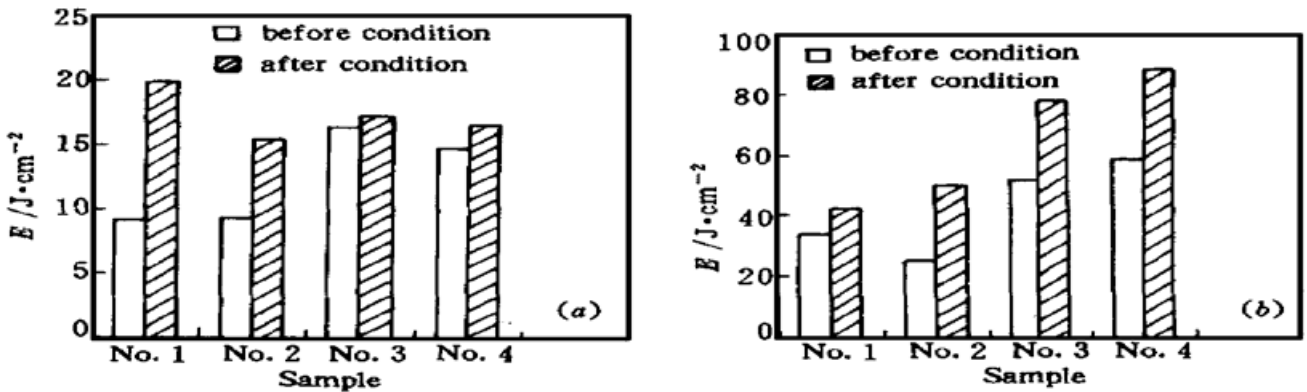


图 5 预处理前后样品的 $E_{0\%}$ (a) 和 $E_{100\%}$ (b)

Fig. 5 $E_{0\%}$ (a) and $E_{100\%}$ (b) before and after laser conditioning

3 分析讨论

关于激光预处理的机理目前主要有两种:一是认为激光预处理去除了膜层表面的吸附杂质、缺陷以及吸附水分,即“激光退火”或“激光清洗”机制;二是“电子缺陷杂质机制”,持此看法者以劳伦斯·里弗莫尔国家实验室(LLNL)的学者为主。

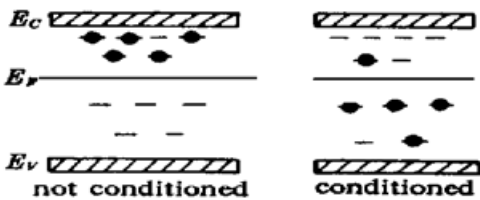


图 6 预处理增强机理示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the mechanism of laser conditioning

从激光预处理的持续性出发,结合实验结果,我们认为第二种机制可能更为重要。在薄膜的破坏中,激光束的相互作用使导带电子发热,接着就转移能量到晶格。当膜层温度达到某个临界值,比如介质材料的熔点时,破坏就会出现。薄膜出现激光损伤应具备以下两个条件:1) 导带中有电子,这些自由电子主要是由热离化或表面缺陷形成的场离化而产生的;2) 激光能量足够高,可转移多余能量至晶格。而激光预处理正是移走了上述

第一点中的导带电子的来源。在介质材料的禁带中由于晶格结构上的缺陷或其他原因而引进一些杂质缺陷能级,它们或处于深能级或处于浅能级,其中有些能级被电子所占满,见图 6。当以一低于阈值的激光辐照介质材料时,处于浅能级的束缚电子相对较容易地被激发至导带。因激光能量并不足够高以至引起损伤,导带电子又衰减到深能级。在这些能级上,它们较难被激发至导带。随后,当样品被一比阈值更高的激光照射时,可能转移至导带的电子数已减少,从而转移至晶格的能量很少已不足以引起损伤,从而可观察到预处理增强效应。

图 5 (a) 所示, No. 1 和 No. 2 样品的 0% 几率破坏阈值 $E_{0\%}$ 的预处理增强效应比 No. 3 和 No. 4 样品更明显,这主要是由于 No. 3 和 No. 4 样品在主材料 ZrO_2 中掺杂了 Y_2O_3 , 而 Y_2O_3 填补了原膜系材料中的部分晶格缺陷,使得导带中的自由电子以及导带边缘之下的浅能级中的电子本身就已减少,因而这两片样品在未预处理前就拥有比较高的阈值,而预处理的增强效果却不如两块不掺杂的样品那样明显,这一点有力说明“电子杂质缺陷机制”机理的正确性。

观察预处理后的薄膜样品表面,可以观测到都较之预处理前更为光亮清爽,通过 $30\times$ 显

显微镜做暗场观测,发现薄膜表面原有可见的吸附杂质、水分和擦痕在预处理后都基本消失,这一点有力地证明了“激光清洗机制”的存在。

同时 No. 1 和 No. 2 样品在基底处理上由于只采用擦洗,致使在薄膜生长过程中成膜粒子间结合的微观缺陷增多,而这种缺陷在预处理中得到了很好的补偿,故此该两片显示出最高的阈值增强效果(2.0 \times),说明阈值较低的薄膜较之高阈值薄膜可获得更高的预处理增强效果。

No. 3 和 No. 4 样品的 50% 几率和 100% 几率阈值在预处理后都有显著提高,这说明预处理的增强效应确实存在,如果能采取进一步措施以提高预处理的均匀性,对阈值较高的薄膜获取更高的阈值增强仍是可能的。由此可见激光预处理的增强机理应该是“激光清洗机制”和“电子杂质缺陷机制”两种机制的复合。

致谢 本所杨燕静助理实验师为本实验提供了优质的光学薄膜样品,刘晔高工对薄膜损伤的测量及预处理提供了很有价值的建议,在此,作者特致以谢意。

参 考 文 献

- 1 M. R. Kozlowski, G. R. Wolfe, M. C. Staggs *et al.*. Large area laser conditioning of dielectric thin film mirrors. *Laser Induced Damage in Optical Materials*, 1989, NIST(USA) Spec. Publ. 801, 376~ 390
- 2 B. Brauns, B. Schafer, R. Wolfe *et al.*. Effect of the substrate preparation with CO₂ laser radiation on the laser resistance of optical layers. *Thin Solid Films*, 1986, **138**(2): 157~ 162
- 3 Zhao Qiang, Fan Zhengxiu, Wang Zhijiang. Study on laser conditioning of optical coatings. *Chinese J. Lasers*, 1996, **B5**(4): 371~ 374
- 4 Peifu Gu. *Technology of Thin Film Coating*. Zhejiang: Zhejiang University Publishing House, 1990. 200 ~ 217
- 5 C. R. Wolfe, M. R. Kozlowski, J. H. Campbell *et al.*. Laser conditioning of optical thin films. *Proc. SPIE*, 1989, **1438**: 360~ 375

Study of the Technology of Small Spot Scanning for Laser Conditioning of Optical Coatings at 532 nm

Hu Haiyang Fan Ruiying Tang Zhaosheng Fan Zhengxiu

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

Bao Chengfang Qiu Wenfa Hong Zhi

(State Key Lab of Modern Optical Instruments, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Abstract A significant limitation to the operating fluence (or peak power) of high-peak-power lasers is the laser induced damage threshold (LIDT) of optical components and optical coatings. A lot of work has been done to improve the LIDT of optical coatings in the past years, and recently, it is discovered that laser conditioning is a new technology to enhance laser resistance of the optical coatings. In this paper the latest experimental result from this group of laser conditioning of optical coatings at 532 nm is reported. The method utilized is the small laser spot scanning and the step by step energy raising. Coating samples, which were prepared with various deposition techniques, were conditioned. The effect of enhance of the laser resistance was shown in the great majority of the samples. The feasibility and effectiveness of the laser conditioning were confirmed. The possible mechanism of the laser conditioning was explained.

Key words optical coatings, laser conditioning, laser induced damage threshold (LIDT), small spot scanning