

## 532nm 激光对光学薄膜的损伤\*

夏晋军 李仲伢 程 雷

(中科院上海光学精密机械研究所, 上海, 201800)

摘要: 本文报导了 532nm 激光对光学薄膜的激光损伤和多脉冲损伤的积累效应, 研究了激光预辐照对光学薄膜损伤阈值的影响。

关键词: 激光损伤 积累效应 激光预辐照

## 532nm laser-induced damage to optical film

*Xia Jinjun, Li Zhongya, Cheng Lei*

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

**Abstract:** The laser damage threshold of optical film and the accumulation effect of multi-pulsed laser damage to optical film at 532nm are summarized in this paper. In the experimental research, the various optical film are used to detect the damage threshold under the condition of single pulse or multi-pulse radiation. Meanwhile, the effect of laser pre-irradiation on damage threshold of the optical films are investigated.

**Key words:** laser damage accumulation effect laser pre-irradiation

### 一、引 言

高功率脉冲激光系统的负载常常受到光学元件激光破坏的限制。在实际应用中所承受的最大功率又常受多脉冲破坏的主宰。由于多脉冲激光损伤的积累效应<sup>[1~3]</sup>, 使得光学元件的损伤阈值明显低于单次脉冲的损伤阈值。研究脉冲数和多脉冲损伤阈值与激光强度之间的关系, 对预测光学元件的使用寿命有重要意义。薄膜光学元件是激光系统中最薄弱的环节, 如何提高它们的激光破坏强度对提高高功率激光系统的输出功率很有实际意义。

本文对 532nm 激光常用的 3 种光学薄膜和 ZrO<sub>2</sub> 单层膜进行了激光损伤实验, 测量了它们的损伤阈值, 研究了多脉冲损伤与激光破坏强度的关系, 激光预辐照对光学薄膜破坏强度的影响。

### 二、实 验 方 法

损伤实验装置与文献[4]基本相同。YAG 激光系统输出 1.064 $\mu$ m 激光, 用 KDP 晶体倍频, 获得 532nm 的二倍频激光, 脉宽为 10ns。用刀口扫描法测得焦斑直径  $d(1/e^2)$  为 72 $\mu$ m。样品损伤情况由置于其后的高倍显微镜观察判断。

单脉冲损伤实验用 1-on-1 方式, 在样品的一个位置只照射一次激光, 不管这一点发生破坏与否, 下一次则另换位置继续实验。损伤阈值定义为二个极值的平均值, 即样品产生破坏的最低能量与不产生破坏的最高能量两者的平均值。文中表内损伤阈值后面的数据并非表示实验误差, 而是损伤阈值的扩展<sup>[5]</sup>, 这个数据的大小主要取决于样品本身质量的好坏。多脉

\* 国家高技术基金资助。

损伤用  $s_{-on-1}$  方式, 在样品的某个位置上用相同激光能量多次照射, 直至样品发生破坏。

实验样品为 532nm 激光常用的光学薄膜, 增透膜、半反膜和高反膜以及  $M4$  ( $\lambda=532\text{nm}$ ) 的  $ZrO_4$  单层膜。样品分为二组: 一组为普通样品, 一组为经过  $CO_2$ , XeCl 和 Cu 蒸气激光预辐照的样品。所谓预辐照即在样品进行 532nm 激光损伤实验前, 先用低于单脉冲损伤阈值的激光能量进行辐照。激光辐照在远场进行, 选取远场光斑中强而均匀部分的光束辐照样品, 使样品各部分的辐照剂量尽可能相等。

本文预辐照所采用的激光为 XeCl 准分子脉冲激光、Cu 蒸气准连续激光和  $CO_2$  连续激光, 它们的激光参数和辐照条件为: 准分子激光器为多模脉冲器件, 输出波长 308nm, 单次输出能量为 300mJ, 脉宽 60ns, 输出平均功率为 30W。脉冲重复率 1~100Hz 可调。辐照功率为  $1\text{MW}/\text{cm}^2$  (能量为  $60\text{mJ}/\text{cm}^2$ )。Cu 蒸气激光波长为 510nm, 输出功率为 20W, 脉宽 30ns, 重复频率为 5000Hz。辐照功率为  $\sim 1\text{W}/\text{cm}^2$ 。 $CO_2$  连续激光, 波长 10.6 $\mu\text{m}$ , 输出功率 500W, 辐照功率为  $25\text{W}/\text{cm}^2$ 。

### 三、实验结果

#### 1. 损伤阈值

532nm 激光对光学薄膜损伤的实验结果如表 1 所示, 其中半反膜(SR) 的损伤阈值较高, 增透膜(AR) 的损伤阈值较低。实验过程中从显微镜观察到增透膜的表面缺陷较少, 膜层质量较好。半反膜和高反膜的表面缺陷很多, 膜的质量不够好。表中损伤阈值后面扩展范围也

Table 1 Laser damage threshold of optical thin film

sample	AR	SR	HR
damage threshold ( $\text{J}/\text{cm}^2$ )	$10.7 \pm 1.3$	$16.6 \pm 6.3$	$13.8 \pm 4.8$

说明了这一点, 质量好的样品损伤阈值的扩展范围小, 反之就大。

#### 2. 多脉冲损伤

用重复频率为 1Hz 532nm 激光对增透膜进行多脉冲损伤实验, 选择二块样品, 一块经过 Cu 蒸气激光辐照, 一块未经辐照, 其结果由图 1 所示。从图中可以看出, 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, 二块样品均有明显的多脉冲损伤积累效应, 所不同的是经 Cu 蒸气辐照过的样品, 在相同的入射激光能量下能承受更多次脉冲激光的照射, 才产生破坏。因为经过 Cu 蒸气激光辐照后, 膜的表面形貌和微观结构得到改善, 这不仅提高了单脉冲的损伤阈值(见表 2), 同时也提高了抗重复率激光损伤的能力。多脉冲损伤机理是由微缺陷和热的积累而产生宏观破坏, 而激光预辐照可以修复微观缺陷和消除或部分消除余应力<sup>[6,7]</sup>, 因此减少了造成多脉冲损伤的隐患。这个结果表明激光预辐照同样能有效地提高光学薄膜抗重复率激光损伤的能力。

#### 3. 激光预辐照

对四种样品进行预辐照的实验结果如表 2, 增透膜用  $CO_2$  和 XeCl 激光辐照均无效果, 而用 Cu 蒸气激光辐照效果很好, 使损伤阈值提高约 80%。半反膜用  $CO_2$  和 XeCl 激光辐照使损伤阈值分别提高 20% 和 30%。而用 Cu 蒸气激光辐照不但无提高, 反而下降了 26%。高反膜

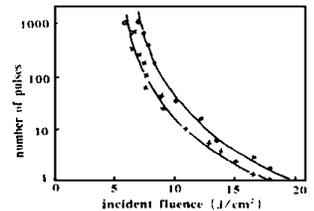


Fig. 1 Dependence of number of pulses on laser fluence of AR coating  
x - non-irradiation • - Cu vapor laser irradiation o - 1000 pulses without damage

Table 2 Summary of damage threshold of various optical film

sample	irradiation condition				damage threshold (J/cm <sup>2</sup> )	
	irradiation	power (W/cm <sup>2</sup> )	time (s)	total energy (J/cm <sup>2</sup> )		
AR	S <sub>1</sub>	—	—	—	10.7±1.3	
	S <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	25	3	75	8.5±2.1
	S <sub>3</sub>	XeCl	1×10 <sup>6</sup>	80 shots	4.8	9.9±1.7
	S <sub>4</sub>	Cu	1	15	15	18.8±3.0
SR	S <sub>5</sub>	—	—	—	16.6±6.3	
	S <sub>6</sub>	CO <sub>2</sub>	25	3	75	19.6±8.3
	S <sub>7</sub>	XeCl	1×10 <sup>6</sup>	80 shots	4.8	21.5±3.1
	S <sub>8</sub>	Cu	1.5	30	45	12.3±3.1
HR	S <sub>9</sub>	—	—	—	13.8±4.8	
	S <sub>10</sub>	CO <sub>2</sub>	25	3	75	15.7±5.0
	S <sub>11</sub>	XeCl	1×10 <sup>6</sup>	80 shots	4.8	15.9±4.6
	S <sub>12</sub>	Cu	1	20	20	17.8±5.3
ZrO <sub>2</sub>	S <sub>13</sub>	—	—	—	15.1±3.8	
	S <sub>14</sub>	Cu	1.2	4	4.8	15.4±4.6
	S <sub>15</sub>	Cu	0.9	8	7.2	16.4±3.8
	S <sub>16</sub>	Cu	1.1	10	11	18.8±4.9

用 CO<sub>2</sub> 和 XeCl 激光辐照均能使损伤阈值提高 15% 左右, 而用 Cu 蒸气激光辐照则可提高约 30%。单层膜 ZrO<sub>2</sub> 样品 S<sub>14</sub>, S<sub>15</sub>, S<sub>16</sub> 用 Cu 蒸气激光辐照, 它们的辐照功率大致相同, 但辐照的总能量各不同, 逐个递增(见表 2), 随着辐照能量的增加, 损伤阈值成线性增加, 见图 2。可见 Cu 蒸气激光对光学薄膜预辐照中能量因素起了决定性作用。

从上述结果可以看出不同的激光以及辐照条件对 532nm 光学薄膜损伤阈值提高的效果是不同的,

不同的光学薄膜用同一种激光辐照, 其效果也不相同, 以 Cu 蒸气激光辐照为例, 见表 2。它可以使增透膜的损伤阈值提高 80%, ZrO<sub>2</sub> 和高反膜的损伤阈值分别提高了 25% 和 30%, 但半反膜的损伤阈值不但没有提高, 反而下降了 26%。分析其原因, 增透膜在激光作用下薄膜与空气的界面上具有最大的场强分布, 等于入射光强, 而且在该界面上温度分布也很高, 可达 1000~1500℃ 左右<sup>[8]</sup>, 因为 532nm 的增透膜对 Cu 蒸气激光 510nm 波长有非常好的透光性, 因此, 它对膜每个叠层和界面均有较好的处理效果, 所以总的效果相当好。半反膜辐照剂量过大, 辐照过程中, 我们看到膜的表面产生了烟雾, 观察辐照后的膜, 颜色也发生了变化, 这显然是由于辐照过度而使半反膜的损伤阈值不但没有提高反而下降。而对 ZrO<sub>2</sub> 单层膜, Cu 蒸气激光的辐照效果也较好。

综上所述, 表 2 中所选用的几种激光以 Cu 蒸气激光对 532nm 光学薄膜的预辐照效果为最佳, 尤其是对增透膜, 可使损伤阈值提高 80%。进行激光预辐照时必须谨慎的选择辐照功率和辐照能量, 否则不但得不到预期的效果, 反而会使损伤阈值下降。激光预辐照提高了光学薄膜的损伤阈值, 除了通常的原因, 激光辐照可去除膜层表面吸附的 H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> 和灰尘, 使损伤

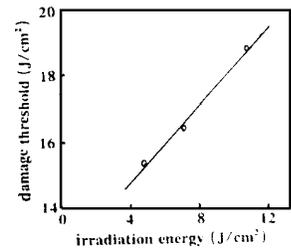


Fig. 2 Dependence of irradiation energy on damage threshold

## 强激光系统中硅镜变形数值分析

夏金安 程祖海 丘军林

(华中理工大学激光技术国家实验室, 武汉, 430074)

**摘要:** 本文运用数值传热学中全隐差分格式交替方向块迭代法, 对周边绝热强激光照射非稳态条件下硅镜的温度及挠变形进行了数值模拟, 给出了形变随激光功率、光斑直径、镜片直径、镜片厚度以及照射时间等参数的变化规律, 并对镜片局部最高温度的变化作了探讨和分析。

**关键词:** 强激光 硅镜 挠变形

## Numerical analysis on silicon mirror in high power laser system

Xia Jinan, Cheng Zuhai, Qiu Junlin

(National Laboratory of Laser Technology, HUST)

**Abstract:** The temperature distribution and deflection of a high power laser silicon mirror are predicted numerically by the finite difference method when its boundary is kept insulated. It is shown how the deflection of a mirror varies with laser power, optical spot diameter, mirror thickness and how its temperature distribution and deflection change with laser run time.

**Key words:** high power laser silicon mirror deflection

### 一、引 言

强激光照射下, 镜片吸收其部分能量产生局部应力和变形。激光功率高, 单位时间内镜片

阈值有所提高外, 另一个更重要的原因, 是薄膜吸收了激光能量, 温度迅速升高, 高温下膜的微观结构发生了变化<sup>[7]</sup>, 表面缺陷得以修复, 均匀性得到改善, 使膜的表面结构变得均匀而完整, 从而提高了抗激光损伤的能力。作者认为激光预辐照的机制最终是热因素在起作用。这种热作用不同于一般的加热, 这是由激光本身的特性所决定的。

### 参 考 文 献

- 1 Jones S C, Branulich P, Casper R T *et al.* Opt Engng, 1989; 28: 1039
- 2 Kuper S, Stuke M. Appl Phys, 1989; A49: 221
- 3 李仲伢, 李成富, 郭聚平. 光学学报, 1991; 11(3): 264
- 4 李仲伢, 李成富, 郭聚平 *et al.* 中国激光, 1991; 18(1): 30
- 5 Walker T W, Guenther A H, Nielsen P E. IEEE J Q E, 1981; QE-17(10): 2041
- 6 Kerr N C, Emmong D C. NIST Sp801, SPIE, 1989; 1438: 164
- 7 李仲伢, 李成富, 龚 辉. 光学学报, 1994; 14(3): 281
- 8 范正修, 吴周令. 激光对光学薄膜破坏的热过程研究. 第三届激光的热和力学效应学术会议论文集. 上海, 嘉定, 1991

\* \* \*

作者简介: 夏晋军, 男, 1971年5月出生。硕士研究生。主要从事光学材料和薄膜的激光损伤研究。