

# 激光引起玻璃表面的破坏\*

孟绍贤 王笑琴 管富义 薛志玲 徐晓言 张守都 林尊琪

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

**摘 要** 探讨了高功率激光对玻璃表面的破坏。测量了在 200 ps 激光正入射照射下 K8 玻璃的破坏阈值。解释了样品输入面和输出面破坏阈值不同的原因。

**关键词** 光压, 激光破坏机构, 输入面和输出面的破坏。

## 1 引 言

在高功率激光系统中, 包含大量的光学元件, 它们价格昂贵, 光路中任何光学元件的破坏都将造成很大的损失, 甚至使激光系统不能正常运行。因此研究光学元件在激光照射下的破坏具有重要意义。

光学元件的破坏包括表面破坏和体破坏, 一般情况表面破坏阈值更低, 这是因为表面更容易受到灰尘、油类及有机物的污染, 形成吸热的中心; 再者表面加工不光滑, 形成条纹和凹坑, 使其表面受的分子间力减小, 容易造成破坏; 即使表面没有污染和加工十分光滑, 但由于表面原子和分子所受的引力比其内部基质小, 亦易挥发, 升华造成破坏; 对于镀膜的光学元件, 由于镀膜前光学元件加工状况, 污染情况, 镀膜方式不同形成的附着情况, 镀膜均匀性等亦可降低破坏阈值。

本文作者在最初研究钎玻璃被动锁模激光器时, 就明显的观测到用蒸发镀膜的全反射镜很容易形成散点式的破坏, 而改用电子枪镀膜后则没有发生这种情况, 并提出了光压造成破坏的机理<sup>[1, 2]</sup>。

造成表面破坏的外部原因, 是由于照射激光空间分布不均匀, 局部场强很强, 由此形成光学表面的局部破坏。为了准确地测定表面破坏阈值, 首先要求照射激光空间均匀性好, 其次是光学加工有非常好的光洁度( $\nabla_{10}$ ), 并且表面清洁。这些条件不同, 测得的表面破坏阈值就不同, 甚至破坏光强阈值可达到数量级的变化。

本文从理论上和实验上探讨表面破坏的机理, 并为提高表面破坏阈值提出可行方法。

## 2 表面破坏机理

由表面加工质量和污染造成的破坏具有随机性, 本文主要讨论在理想条件下的本征破坏

\* 国家科委 863 高科技项目。

收稿日期: 1994 年 9 月 20 日; 收到修改稿日期: 1994 年 11 月 17 日

问题。

表面破坏的实质是表面原子和分子在激光照射下融化、蒸发、升华、原子间价键断裂、表面等离子体形成等一系列过程, 包括热过程和电磁力过程。一般情况, 长激光脉冲照射下热过程占优势, 而短激光脉冲照射则主要为电磁力过程。当然两者没有明确的界限, 因为即使短脉冲激光, 由于它可能有宽的激光背底, 在一定情况下, 也存在热效应。而长脉冲激光也经常包含短脉冲激光成分。

本文研究高功率激光引起的破坏, 主要考虑电磁力的作用。

通常光辐射流入射在两种介质的相边界处, 分成反射和折射成分。此时光子动量发生改变。作用于样品表面的激光压力  $P_L$  由动量守恒定律决定。对于垂直入射情况有<sup>[3]</sup>:

$$P_L = \left[ \frac{I_R + I_i}{C} - \frac{I_T}{C_s} \right] f(r, t) = \left[ (1 + R) \frac{I_i}{C} - (1 + R) \frac{I_i}{C_s} \right] f(r, t) \quad (1)$$

这里  $I_R$ 、 $I_i$  及  $I_T$  是反射、入射及透射光的峰值强度,  $C$  和  $C_s$  是光在入射介质和出射介质中的光速,  $f(r, t)$  描述激光脉冲的空间和时间形状。

若样品折射率为  $n$ , 则入射面所受压力为:

$$P_{L1} = - \frac{2(n-1)}{n+1} \frac{I_i}{C} f(r, t) \quad (2)$$

根据材料力学, 样品受压力为负, 拉力为正。而在输出面受的拉力

$$P_{L2} = + \frac{8n^2(n-1)}{(n+1)^3} \frac{I_i}{C} f(r, t) \quad (3)$$

那末, 样品输出面和输入面所受力之比(忽略负号)则为:

$$\frac{P_{L2}}{P_{L1}} = \frac{4n^2}{(n+1)^2} \quad (4)$$

若样品为 K8 玻璃,  $n = 1.5132$ , 求出  $P_{L2}/P_{L1} = 1.45$ , 即输出面所受力比输入面大 1.45 倍。因而输出面破坏阈值比输入面低 1.45 倍。若入射激光为会聚光, 则输出面更易破坏。

若样品输入面镀增透膜, 即  $R \rightarrow 0$ , 则:

$$P_{L1}^{R \rightarrow 0} = (1 - n) \frac{I_i}{C} f(r, t) \quad (5)$$

与没镀增透膜情况比(忽略负号)

$$P_{L1}^{R \rightarrow 0} / P_{L1} = (n + 1) / 2 \quad (6)$$

即此时增透膜所受光压稍许增加, 即破坏阈值稍许下降。

若样品输入面镀全反射膜, 即  $R \rightarrow 1$ , 则:

$$P_{L1}^{R \rightarrow 1} = 2I_i f(t) / C \quad (7)$$

此时所受压力与没镀膜情况恰好相反。所受压力与没镀膜情况相比:

$$P_{L1}^{R \rightarrow 1} / P_{L1} = (n + 1) / (n - 1) \quad (8)$$

若  $n = 1.5132$ , 则  $P_{L1}^{R \rightarrow 1} / P_{L1} \approx 5$ , 即破坏阈值几乎下降 5 倍。

可见, 任何膜板总比平板破坏阈值低。这个分析基本上与已有的实验结果相一致。

### 3 实验装置与结果分析

实验是在六路激光系统二路上进行的, 激光输出波长  $1.064 \mu\text{m}$ , 末端实验排布如图 1。振荡器采用主被动锁模技术, 利用声光调制进行主动锁模, 再加上可饱和吸收体五甲川二氯

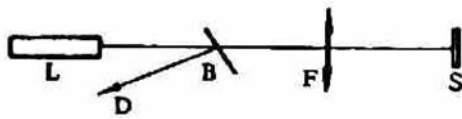


Fig. 1 Apparatus for laser damage testing

L; laser beam, b; beamsplitter, f; focus lens, S; glass sample, d; thermopile or streak camera

乙烷溶液进行被动锁模和调Q,以增加锁模脉冲列的功率水平。为保证单横模输出,在半共焦腔内加 $\phi 2\text{ mm}$ 的小孔,这时输出光束空间分布为高斯型,另外在腔内加标准具,以获得 $200\sim 300\text{ ps}$ 宽度的脉冲序列。这个脉冲列经过激光触发火花隙电光开关选出单一脉冲,然后经过放大、隔离、空间滤波等技术,以获得有好的时间和空间质量的激光。最后经过 $\phi 70\times 520\text{ mm}$ 放大器放大,能量可达 $10\text{ J}$ 。这个激光经过 $f=1$

m的透镜会聚,以提高单位面积的光强。将 $3\text{ cm}$ 厚的 $\text{K}_2\text{O}$ 玻璃样品放在透镜后的近场 $70\text{ cm}$ 处,以测量其破坏阈值,并进行破坏机理分析。

用条纹相机测量激光输出的脉冲波形如图2。其脉冲宽度为 $214\text{ ps}$ ,波形基本光滑。

能量监测利用与光路成小角度的平板分出一部分光,用能量计监测。从而保证测量的准确性。本文以样品最初出现小的破坏点做为破坏阈值。本文作者观察到在逐渐增加光强时,样品的输出面最先出现破坏,对 $3\text{ cm}$ 厚的 $\text{K}_2\text{O}$ 玻璃样品,其输出表面破坏阈值为 $3\text{ J/cm}^2$ ,此时光强为 $1.5\times 10^{10}\text{ w/cm}^2$ 。

本文测得的破坏阈值偏低,其原因有二:首先,实验环境清洁度不够,有些灰尘会附着在平板表面,形成吸热点,造成优先破坏;其次,泵浦光束空间均匀性不够好,取样品表面光强平均值做为破坏阈值,显然比实际破坏阈值偏低,从对破坏的形态观测中可看到这一点。

采用高放大倍率的显微镜观测破坏的形态。

低放大倍率下,玻璃表面破坏形态如图3所示。可见破坏成斑点形状,且分布很不均匀,由于测得样品表面光学均匀性很好,因此它反应了激光输出的不均匀性。

将显微镜调焦到材料内部,拍摄其破坏形态如图4所示。可见这些破坏点尺寸在几微米到几十微米之间。它可能由于会聚光束加速自聚焦形成的细丝形的破坏,也可能由玻璃不均匀形成的破坏,还有待进一步证明。

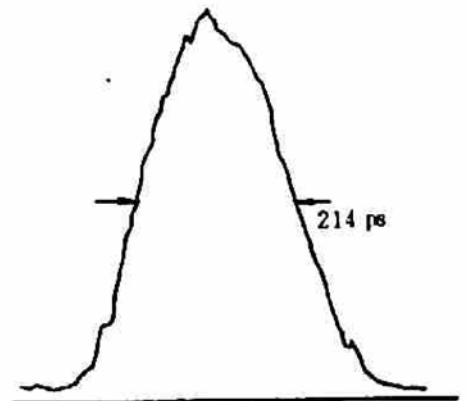


Fig. 2 Typical laser output pulse shape recorded by means of streak camera

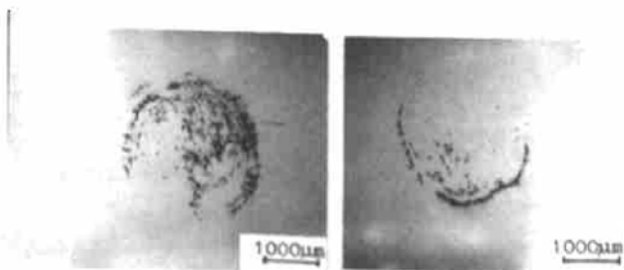


Fig. 3 Optical microscope photograph of scattering site type of damage caused by  $200\text{ ps}$  pulse on surface of glass- $\text{K}_2\text{O}$



Fig. 4 Optical microscope photograph of scattering site type of damage caused by  $200\text{ ps}$  pulse inside of glass- $\text{K}_2\text{O}$

当显微镜放大倍率进一步提高时,观测到的表面破坏如图5。破坏好象大小不同的雨点一样。由此可看出不完全由光压产生,也有热作用在内,由于热作用使破坏处光滑化。



## 4 结果和讨论

证实了理论和实验的初步一致性，为了使理论解释更为完善，还需进一步实验，这包括用四极矩质谱仪对表面破坏产生的飞行物测量；在破坏过程中冲击波形成的测量；破坏过程中激光脉冲波形的变化；破坏过程中的光谱测量；利用 CCD 相机对破坏形态的测量，找出光强的空间分布，算出不同点的光强，以确定真正的光强。另外需进一步改善激光束的光束质量，改进其均匀性。

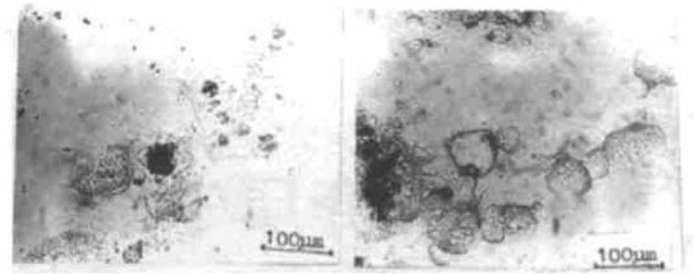


Fig. 5 Higher magnification picture on surface damage of glass-K8

感谢王人淑，夏青生，蒋安民，蒋玉柱，张伟清等在实验过程中给予的帮助。

### 参 考 文 献

- [1] 固体激光导论编写组，固体激光导论，上海，上海人民出版社，1975。
- [2] 孟绍贤等，激光器锁模的一些技术问题，物理，1982，11(5)：295~299
- [3] S. A. Akhmanov, V. E. Gusev. Laser excitation of ultrashort acoustic pulses new possibilities in solid-state spectroscopy, diagnostics of fast processes, and nonlinear acoustics. *Sov. Phys. Usp.*, 1992, 35(3) : 53~192

## Laser Induced Damage of Glass Surface

Meng Shaoxian      Wang Xiaoqin      Guan Fuyi      Xu Xiaoyan  
Xue Zhiling      Zhang Shoudu      Lin Zunqi

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

(Received 20 September 1994; revised 17 November 1994)

**Abstract** This paper describes the investigation of damage of glass surfaces by high power laser beam. Surface damage thresholds for K8 glass are measured for 250 ps laser pulse at near normal incidence. The difference between the entrance and exit thresholds is briefly explained.

**Key words** light pressure, laser damage mechanisms, entrance and exit surface damage.