

## 激光烧蚀刻蚀过程的实时监测技术研究

潘大任  
(四川大学物理系)

Investigation on realtime monitoring technique  
for laser ablative process

Pan Daren

(Department of Physics, Sichuan University, Chengdu)

**提要:** 提出了一种简单而有效的监测激光烧蚀方法。展示了等离子体发光强度-时间曲线用于激光烧蚀刻蚀过程实时监测的良好前景。

**关键词:** 激光烧蚀, 等离子体

## 一、前言

随着玻璃、陶瓷等无机非金属材料应用的迅速开发, 对这些材料的激光刻蚀技术的研究近年来格外活跃。然而对于多种化学结构稳定的上述材料, 通常的激光诱导化学刻蚀速率太慢。例如在  $\text{Cl}_2$  气体中使用  $\text{Ar}^+$  激光蚀刻熔石英 (fused  $\text{SiO}_2$ ) 时, 当激光功率密度达  $5 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$  时, 蚀刻速率仅  $0.3 \text{ nm/s}^{[1]}$ 。

实现对这些材料快速刻蚀的一些做法是以这些材料在激光迅速加热时产生的物理烧蚀为机制的“激光烧蚀刻蚀”(LAE); 还有一些做法是以激光烧蚀为主要机制, 化学腐蚀为辅助机制的“激光烧蚀化学刻蚀”(LACE)。用上述新技术可获得快速刻蚀。例如对熔石英采用 LAE 或 LACE, 在仅  $10^4 \text{ W/cm}^2$  数量级的激光功率密度下都获得

了  $10^2 \mu\text{m/s}$  以上的刻蚀速率<sup>[2,3]</sup>。

对于快速刻蚀的瞬时状态和规律的研究显然比其他慢过程更重要, 而首要的研究手段就是实现过程的实时监测以提供瞬时信息。基于这样的考虑, 本文研究了 LAE 过程的实时监测技术。而由于烧蚀也是 LACE 最主要的机制, 这种技术对研究 LACE 的实时监测也打下了一定的基础。

## 二、监测方案和装置

激光诱发等离子体是烧蚀过程的显著特征之一, 所以我们采取测量与等离子体有关的参量作为对 LAE 的实时监测的基本途径。常见的方法有等离子体发射光谱法和探针法。本文采用前一种方法。

通常的发射光谱测量装置如图 1(a) 所示。根据实际经验, 对于许多材料的 LAE 监

收稿日期: 1987年10月12日。

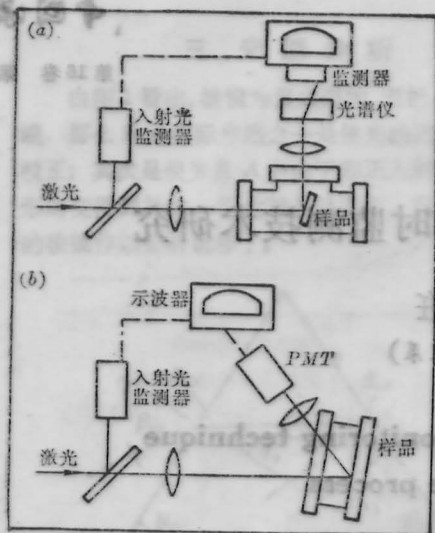


图1 实验装置

(a) 通常的方案; (b) 本文的方案

测, 上面的装置都可简化。以熔石英的情形为例, 由于光源为连续波  $\text{CO}_2$  激光器, 而且主要监测目的不在于产物分析, 所以不使用昂贵的 OMA 也可进行。同时由于其等离子体发光中光谱强度峰值区是在近紫外和可见区, 强度分布对于固定的刻蚀体系也变化不大, 只需测量这个光谱强度峰值区域的总发光强度即可相当满意地模拟刻蚀速率。因此图 1(a) 中监测器前面的光谱仪也可以省去。

本研究中用于熔石英的 LAE 监测的装置如图 1(b) 所示。图中由可调谐  $\text{CO}_2$  激光器 (型号 Applo-750, 连续输出时 1 小时内功率波动不大于 1%) 输出的单模或低阶多模激光在分束后聚焦到样品上, 激光入射时间可以由电动快门 (最小标度 10 ms) 精确控制。样品置于样品室的后窗片位置, 其等离子体发光直接聚焦到光电倍增管 (响应光谱范围为  $0.2 \sim 0.7 \mu\text{m}$ ), 并在 4 通道示波器上显示。在示波器上还可以同时显示入射光监测器的信号以作比较。为了进一步增加监测信号的强度, 我们不用图 1(a) 中的 T 型或 L 型样品室而改用窗口大的扁圆盒形状的专用不锈钢样品室。样品室在装入样品后须抽到

高于  $10^{-5}$  Torr 的真空气度, 然后即可在此真空中进行“真空 LAE”实验, 或再充入低气压 (通常小于 10 Torr) 的 He、Ar 等惰性气体下进行“低压 LAE”实验。

### 三、实验结果

事实证明, 按图 1(b) 所示的简单装置对熔石英的 LAE 过程的监测是颇为有效的, 为我们提供了多方面的宝贵信息。

图 2 上图是 5W 的  $\text{CO}_2$  激光在 40ms 的辐照时间内的入射光强-时间曲线, 下图即为处于固定位置的熔石英样品的发光曲线。曲线经历了初期的无发光; 发光强度先上升饱和后又下降; 发光趋于稳定三个阶段。增强入射激光的功率, 我们发现发光曲线的发光开始时间提前, 发光强度峰值区变窄, 峰值高度和稳定发光强度上升, 但基本结构仍不改变, 这反映出 LAE 机理的规律性。

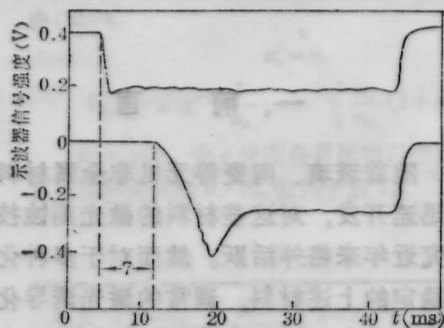


图2 样品固定时对 LAE 的监测结果

将激光烧蚀的过程也划分为相应的下述三个阶段, 就可以建立 LAE 机理的既直观而又可信的物理图像。

(1) 固相加热为主的阶段。此阶段末端开始出现熔解等相变。

(2) 激烈的相变, 气态生成物膨胀, 热离子发射, 形成激波、等离子体和发光。光谱分布的波段为电子态跃迁范围, 而较强的连续谱背景对应着涉及自由电子的跃迁。由于激光激励的燃烧波, 加速了基片表面物质的去

除, 开始出现显著的刻蚀。等离子体和基片上被辐照区的能量交换经历了一个先由后者向前者输送能量为主, 而后又以其逆过程为主的阶段, 因此发光先增强后减弱, 中间有一极值点。

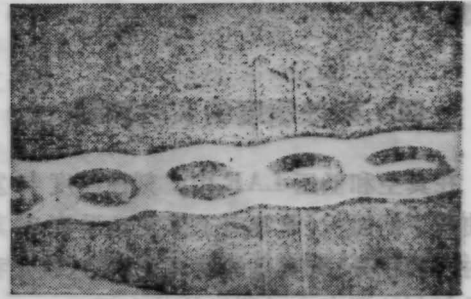
(3) 以上的能量交换达到动态平衡, 此时基片表面物质的去除速率亦不变, 稳态刻蚀开始。

根据以上分析, 发光曲线的三个阶段分别为研究 LAE 机理的三个重要方面: 材料的刻蚀阈值; 等离子体的特性及稳态刻蚀形成条件提供了数据。由图 2 我们可知在 5W 的入射激光下, 激光辐照后约 7 ms 等离子体发光产生, 由此即可计算刻蚀开始时基片的表层温度。这是因为熔石英在  $\text{CO}_2$  激光加热下表层温度的计算方法已由文献 [4] 给出, 根据此法用计算机可算出 5W 激光加热 7 ms 后辐照区温度约  $1800^\circ\text{C}$ , 即可知道熔石英表层产生刻蚀的温度(严格地说, 应为显著刻蚀开始对应的表层温度的极小值)约为  $1800^\circ\text{C}$ 。

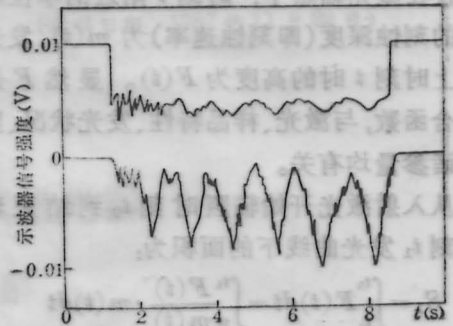
图 3(a) 是在一组刻蚀参数下刻蚀所得直槽(刻蚀中样品作平动)的照片。可以看出, 槽的边缘不齐, 有波纹状的起伏, 槽的纵向深度也不一致。对比其发光曲线(图 3(b) 下图)和入射光强度曲线(图 3(b) 上图), 发现两者都有一致的周期性波动, 和照片中的趋势吻合。证明刻蚀质量可由发光曲线得到反映。

我们发现引起图 3 所示的不稳定刻蚀的主要原因是样品方位不合理, 被安装得表面垂直于入射激光。反射光对入射激光的反馈严重地干扰了刻蚀的稳定, 因为在激光烧蚀时, 入射激光的极小波动也能引起烧蚀速率的极大变化<sup>[2]</sup>。

适当地改变样品方位即可发现曲线中的波动减小。待调整到如图 4(b) 所示的波动大为减小的发光曲线和入射光曲线后再进行刻蚀, 即可得到如图 4(a) 所示的质量良好的

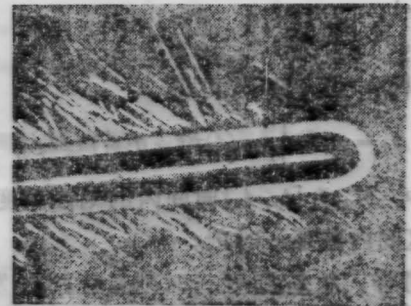


(a) 样品的相片

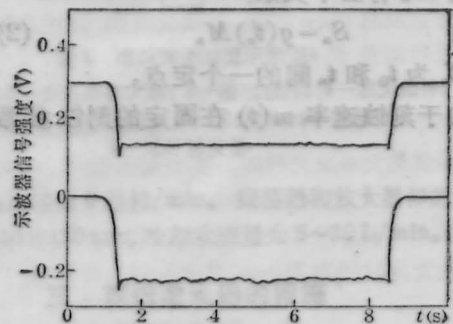


(b) 过程监测所得的曲线

图 3 平动的样品在不恰当的刻蚀条件下的刻蚀结果



(a) 样品的相片



(b) 过程监测所得的曲线

图 4 平动的样品在恰当的刻蚀条件下的刻蚀结果

直槽。

#### 四、刻蚀深度的实时测量

在真空和低压 LAE 中, 刻蚀深度与发光曲线下的面积(即等离子体发光强度对刻蚀时间的积分)有明显的对应关系, 这就是我们进行刻蚀深度实时测量的基本原理。

设在激光辐照下, 时刻  $t$  附近的单位时间内的刻蚀深度(即刻蚀速率)为  $m(t)$ , 发光曲线上时刻  $t$  时的高度为  $F(t)$ 。显然  $F$  是个综合函数, 与激光、样品特性、发光状况、监测器诸参量均有关。

从入射激光开始辐照时刻  $t_0$  到结束辐照时刻  $t_1$  发光曲线下的面积为:

$$S_1 = \int_{t_0}^{t_1} F(t) dt = \int_{t_0}^{t_1} \frac{F(t)}{m(t)} \cdot m(t) dt \\ = \int_{t_0}^{t_1} g(t) m(t) dt$$

上式中, 函数

$$g(t) = \frac{F(t)}{m(t)} \quad (1)$$

运用积分中值定理<sup>[3]</sup>, 可得

$$S_1 = g(t'_1) \int_{t_0}^{t_1} m(t) dt = g(t'_1) \cdot M_1$$

上式中,  $M_1$  为  $[t_0, t_1]$  时间内的刻蚀深度,  $t'_1$  为此区间内的某一时刻。

同样, 从  $t_0$  到任一时刻  $t_n$  区间内发光曲线下的面积  $S_n$  和在这段时间内得到的刻蚀深度  $M_n$  有以下关系:

$$S_n = g(t'_n) M_n \quad (2)$$

式中,  $t'_n$  为  $t_0$  和  $t_n$  间的一个定点。

由于刻蚀速率  $m(t)$  在固定的刻蚀参数

下是确定的函数,  $F(t)$  对固定的刻蚀系统和监测系统也是确定的函数。由(1)式,

$$g(t'_n) = \frac{F(t'_n)}{m(t'_n)}$$

也总是一个定数。

根据(2)式我们即知, 对同一刻蚀系统, 监测系统和固定的刻蚀参量,  $S_n$  和  $M_n$  有明确的对应关系。在稳态刻蚀时对于各个不同长度的区间  $[t_0, t_n]$ ,  $S_n/M_n$  的值在重复的刻蚀中确实波动很小。因此, 即可在常用的各组刻蚀参数下, 对各个不同的  $t_n$  测出  $S_n/M_n$  的值存入数据处理系统或作出校准曲线, 就能在以后的刻蚀过程中根据  $S_n$  算出刻蚀深度  $M_n$ 。由于发光曲线下的面积  $S_n$  很容易测得, 示波器上都可直接读出, 所以可简化数据处理系统, 甚至不用计算机都可进行工作。

在本研究的实验工作中曾得到南加利福尼亚大学 S. D. Allen 教授的热情指导和 B. T. Dai 博士、B. S. Agrawalla 博士的大力支持, 作者深为感谢。四川省科学技术委员会提供的资助使本文能及时完成, 在此表示衷心的感谢。

#### 参 考 文 献

- 1 T. J. Chuang, *J. Vac. Sci. Technol.*, **21**, 798 (1982)
- 2 B. S. Agrawalla et al., *J. Vac. Sci. Technol. B*, **5**, 601(1987)
- 3 D. Pan et al., Symposium of MRS, 1986 Fall Meeting (Boston, U.S. A., Dec. 1986)
- 4 S. D. Allen et al., *J. Appl. Phys.*, **59**, 1653 (1986).
- 5 中国矿业学院数学教研室, 数学手册 (科学出版社, 1980)p. 117