

熔石英的快速激光刻蚀

潘 大 任

(四川大学物理系)

提 要

使用 $10.6\mu\text{m}$ 连续波 CO_2 激光和几种工作气体, 对熔石英实现了快速的激光刻蚀。得到了刻蚀速度高于 $200\mu\text{m/s}$ 的干净、光滑的表面; 并根据所提出的机理对观察到的实验结果进行了解释。

关键词: 材料加工、激光刻蚀、熔石英。

一、前 言

激光的使用为蚀刻技术的发展提供了有利的条件, 甚至使诱人的无掩膜直接蚀刻成为可能, 因此激光蚀刻的研究在八十年代已经颇受青睐。有系 SiO_2 类物质的激光刻蚀, 近年来曾有一些报道。从原理上说, 这种研究基本上属于激光诱发下的化学蚀刻。其技术方案可分为两类。文献[1]、[2]的特点是选用的激光频率在工作气体的吸收光谱区内, 在激光作用下气体分子激发或离解与 SiO_2 发生光化学反应。这类反应是在基片温度升高不大的情况下进行的, 反应速度易于控制, 但主要的缺点是蚀刻速度很慢。例如在 Cl_2 气体中使用 Ar^+ 激光刻蚀熔石英(fused SiO_2)时, 激光功率密度达 $5 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ 蚀刻速度才 3 \AA/s ^[1]。文献[3]、[4]则代表另一类方案, 选用的激光频率在固体基片的吸收光谱区内, 激光加热基片使其温度升高, 与工作气体的“热化学反应”速度加快。用此方法对 SiO_2 类的 BK-T 玻璃(软化温度约 640°C)取得了 $2\mu\text{m/s}$ 的蚀刻速度和良好的质量^[3], 但是, 对高熔点的熔石英(软化温度约 1650°C)蚀刻速度仍然很小^[4]。

鉴于常温和不太高的加热温度下的化学蚀刻非常缓慢, 本文报道的对熔石英的激光刻蚀, 采用物理的汽化和化学反应相结合的新方案。将 CO_2 激光聚焦于基片表面直至焦点区的固态物质平稳地熔解和汽化, 同时, 在高温和激光等离子体等多种激发下化学性质活泼的工作气体与 SiO_2 发生不可逆反应, 在这样的综合机制下得到了更满意的结果。鉴于微区物质的快速去除主要基于物理“雕刻”(汽化)而不是化学“腐蚀”, 故称此法为“刻蚀”以区别原称“蚀刻”。

二、实验装置与结果

实验装置如图 1 所示, 连续波 CO_2 激光器 1 的输出光束经电控光阑 2, 分束器 3, ZnSe 透镜 4 通过不锈钢样品室 6 的前窗片 5(KCl), 聚焦于后窗片 7(熔石英基片)的内侧表面上, 样品室应先抽到不低于 10^{-5} Torr 的真空气度, 然后充以工作气体, 如 Cl_2 , Br_2 , HCl ,

收稿日期: 1987年7月5日; 收到修改稿日期: 1987年9月14日

CF₃Br 等。

为了指示 CO₂ 激光的光斑位置, 通过分束器 3 将 He-Ne 激光器 13 的光束耦合进 CO₂

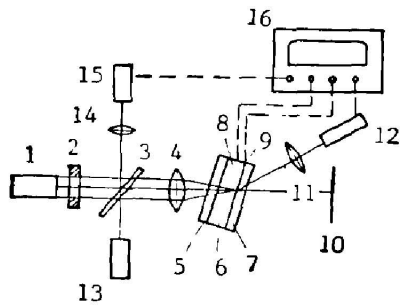


Fig. 1 Schematic of apparatus

1—CWCO₂ laser; 2—Shutter; 3—Beam splitter
4—Lens; 5—Cell window; 6—Cell; 7—SiO₂
substrate; 8—Grid; 9—Electrode; 10—Screen
11—Lens; 12—P. M. T.; 13—He-Ne laser
14—Lens; 15—IRdetector; 16—Oscilloscope

激光光路并调节至两光束共轴。通过屏 10 上 He-Ne 激光衍射花样的变化, 可现场监测基片上蚀刻孔的横向孔径, 而透镜 14, HgCdTe 红外探测器 15 可监测入射的 CO₂ 激光强度。样品室中临近基片的栅状电极 8, 用于收集激光感生的等离子体电流, 它和基片上附着的另一电极 9 之间加有一定直流电压。透镜 11 和光电倍增管 12 用于探测激光在基片表面产生的等离子体发光。15, 8 和 12 的信号都可以在多通道存储示波器 16 上进行观察。

样品室置于可移动平台上, 以改变样品位置进行孔或槽的激光刻蚀。使用专门的剖面形状仪 (Profilometer) 精确测定基片上刻蚀孔或

槽的深度及剖面形状, 也可通过高倍光学显微镜和扫描电子显微镜 (SEM) 来观察刻蚀区域的微区结构。

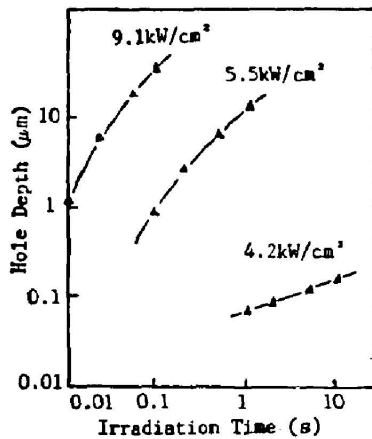


Fig. 2 Etch hole depth in vacuum versus irradiation time for three different laser intensities

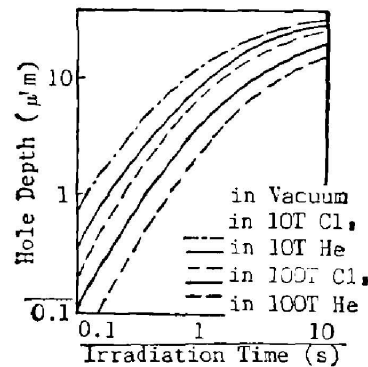


Fig. 3 Hole depth, in Cl₂ and He ambient, versus irradiation time at different pressures

在本研究进行的低激光功率密度 ($< 30 \text{ kW/cm}^2$) 浅刻蚀深度 ($< 50 \mu\text{m}$) 的实验中, 检测结果表明, CO₂ 激光一次辐照所得的孔和槽的剖面形状也和激光光斑的能量分布一样具有高斯线型。而刻蚀结果与激光功率密度、辐照时间、工作气体的化学性质与压强都有蚀密切的关系, 其结果如图 2 和图 3 所示。由图 2 可以看出, 在功率密度较大时, 刻蚀深度随激光辐照时间的增加非常迅速。而当功率密度很小, 例如仅为 4.2 kW/cm^2 时, 刻蚀非常缓慢。经过测定, 当功率密度小于某一阈值 (真空中约 3.3 kW/cm^2), 长达 30 分钟的辐照后也未观察到刻蚀产生。

图 3 表示工作气体对刻蚀速度的影响。由图 3 可知, 无论是在 Cl₂ 或 He 气体中, 激光

刻蚀速度都比在真空中小,并且随着气体压强的增加而减小。另外,在相同的压强(图中为 10 Torr 和 100 Torr 下,在卤素气体 Cl_2 中的刻蚀比在惰性气体 He 中快。即刻蚀速度和工作气体性质有关。

图 4(a)和(b)反映了不同类型的气体对刻蚀表面质量的影响。比较这两张相片可知,在 100 Torr Cl_2 中得到的蚀坑周围比较干净,表面质量好。而相同能量条件下,在 100 Torr He 中得到的蚀坑周围有显著的烧蚀生成物的堆积,由此可体会到正确选择工作气体对于提高刻蚀质量的重要性。

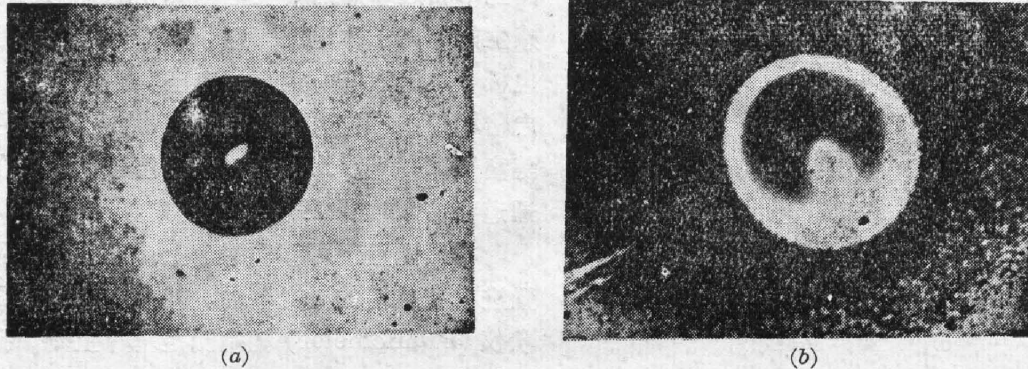


Fig. 4. Optical micrographs of holes etched at laser power density of 9.1 kW/cm^2
(a) in 100 Torr Cl_2 gas; (b) in 100 Torr He gas

三、刻蚀机理的分析

1. CO_2 激光加热下的物理效应

考虑了基片对激光的吸收、反射和固体的热输运现象等因素的表层温度的计算方法如

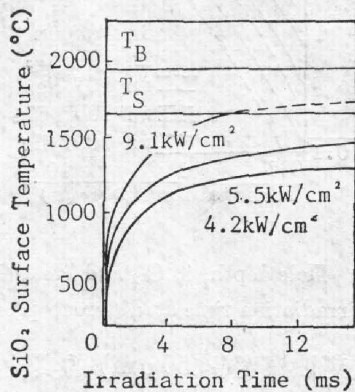


Fig. 5 Computer-calculated SiO_2 substrate surface temperature versus CO_2 laser heating time at three different laser intensities

文献[5]所示。图 5 是根据此法用计算机得到的计算结果。为使计算精确,我们仍采用文献[6]给出的熔石英的热传导系数 K 和热扩散系数 k 随温度非线性变化的公式:

$$K = \exp[a + b \ln T + c(\ln T)^2],$$

$$k = \exp[d + e \ln T + f(\ln T)^2].$$

式中 a, b, c, d, e, f 均为由实验测得的常数。图

5 给出了在激光功率密度分别为 9.1 kW/cm^2 , 5.5 kW/cm^2 和 4.2 kW/cm^2 时基片表面激光焦点中心处的温度 T 与辐照时间的关系。平行于横轴的直线 T_B 代表材料的沸点温度。图中 T_B 的位置为在常用的工作气压 100 Torr 下熔

石英的沸点 $T_B = 1950^\circ\text{C}$ 、 T_S 为软化温度(Softening point),图中为 $T_S = 1650^\circ\text{C}$ 。对晶态材料, T_S 可由其熔点温度代替。

根据图 5 即可解释前面所谈到的刻蚀规律。在不同的激光功率密度下,基片表面升温的速度不同。较强的激光下,被辐照区的温度更早达到 T_S 和 T_B 。因此在相同的辐照时间

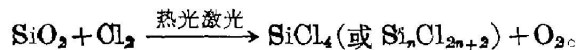
内液化溅出或汽化的体积多,刻蚀快。这和图 2 一致。另一方面, $T \sim t$ 曲线具有 t 大时 T 的增加变慢,遂渐饱和的趋势。如果激光功率密度过小致使激光提供的能量不能弥补实际的表面热损失,那末即使长期辐射焦点处温度也不可能达到 T_B ,即观察不到熔解与汽化,这就表现出具有“刻蚀功率密度阈值”的性质。

此外,在表面存在气体时,基片的沸点温度是随着气压的减小而减小的, T_B 将渐渐接近软化温度 T_S 。因此低气压下,固体温度在略高于 T_S 处即显著汽化,而气压高时实现相同的变化则需要更高的温度。这意味着对相同的激光能量,低压下刻蚀去除量大,真空时最大,这与图 3 所示的结果一致。

在激光能量密度高于刻蚀阈值时,实验中观察到焦点处的基片表面存在微小的星状火花。与此同时,图 1 中栅状电极 8 连通的示波器 16 上有信号,表示电极上收集到带电粒子。这是激光在基片表面产生的等离子体引起的。我们发现,显著的刻蚀现象总是和等离子体的发光相伴随的。激光功率密度处于“刻蚀阈值”以下时观察不到这种发光,而超过此阈值越多发光越强,由示波器上测到的发光开始得越早。可见,等离子体的电学,光学参量能为我们提供有关刻蚀过程的重要信息,对它们进行测量是现场监测刻蚀的一种手段。若将监测信号再反馈给入射激光控制系统,可对刻蚀进行控制。

2. 刻蚀中的化学反应

图 3、图 4 分别反映了不同种类的气体对刻蚀速度和质的影响。注意到这两个图中对 Cl_2 和 He 中的刻蚀结果的比较都是在影响物理烧蚀的主要参数(激光功率密度、辐照时间和气压)完全相同的条件下进行的,其明显的差别显然意味着还存在其他的机制。不难想到,某些气体如卤素或卤化氢,在激光产生的热,激光及等离子体发光(经测定,本实验中 CW CO_2 激光产生的低能等离子体发光主要在可见区)等多种激发下,易于产生活性基因或离子,与受到足够激光的 SiO_2 发生反应产生气态生成物。例如在 Cl_2 气体中可发生下述反应



结果不仅能产生直接的化学蚀刻,而且因反应生成物非固态*,蚀坑周围再淀积的固态物质因此减少,故在 Cl_2 中比在 He 中不仅刻蚀快而且表面干净。

在工作气体中既存在化学蚀刻,也存在因气压、沸点升高而引起的相对于真空情况的汽化的减慢。由于化学腐蚀速度一般比直接的物理汽化小,所以其他条件相同时在工作气体中的刻蚀速度总小于在真空中的刻蚀速度如图 3 所示。使用工作气体虽然降低了刻蚀速度,但却得到了表面清洁度的显著提高,因为干净的表面可简化甚至不作刻蚀后的表面净化处理,故在实际应用中是很有意义的。

四、结 论

根据以上分析,本实验中对熔石英进行的刻蚀可归并于一个新的激光刻蚀机制,它结合了物理烧蚀和化学腐蚀的优点,平稳的物理烧蚀产生了高的表面物质去除速度,而化学反应提高了表面的清洁程度。使用此技术,在刻蚀后的表面保持光滑、干净的前提下,得到了高于 $200 \mu\text{m/s}$ 的平均刻蚀速度。此技术的另一优点是刻蚀深度的可选择范围广,调节方便。

* 例 SiCl_4 等熔点低,低压下为气相。

例如采用适当的工作参数和技术措施, 仅靠改变辐照时间, 即可得到刻蚀深度在 $50 \text{ \AA} \sim 50 \mu\text{m}$ 范围内的表面质量良好的孔和槽, 多次重复, 其深度波动不大于 5%。

对熔石英的如此速度快、质量好, 操作方便的刻蚀技术是有希望在集成电路、光纤、集成光学等领域得到应用的。其原理可能也适用于能够强烈吸收激光能量而形成迅速的温度升高的其他高熔点材料的激光干法刻蚀^[7]。

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 博士和 K. Imen 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的计算工作能及时完成, 在此表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- [1] T. J. Chuang; *J. Vac. Sci. Technol.*, 1982, **21**, No. 3 (Sep), 798.
- [2] S. Yokoyama *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1985, **47**, No. 4 (Aug), 389.
- [3] K. Darsæ, W. Keiker; *Optics and Laser Technol.*, 1978, **10**, No. 2 (Apr), 65.
- [4] K. Darsæ; Private commun.
- [5] S. D. Allen *et al.*; *J. Appl. Phys.*, 1986, **59**, No. 5 (May), 1653.
- [6] A. Goldsmith *et al.*; *Handbook of Thermophysical Properties of Solid Materials*, (Macmillan, New York 1961).
- [7] D. Pan *et al.*; *Symposium of MBS, 1986 Fall Meeting*, (Boston, U. S. A., Dec. 1986)

Rapid laser etching of fused SiO₂

PAN DAREN

(Department of Physics, Sichuan University, Chengdu)

(Received 5 July 1987; revised 14 September 1987)

Abstract

Rapid laser etching of fused SiO₂ has been achieved using a 10.6 μm CW CO₂ laser and several etchant gases. Etch rates of above 200 $\mu\text{m}/\text{s}$ and clean, smooth surfaces have been obtained. The observed experimental results are explained in terms of the presented mechanisms.

Key words: material processing; laser etching; fused SiO₂.