

文章编号 1004-924X(2004)02-0226-04

准分子激光脉冲直写刻蚀速率与能量密度的关系

魏仁选¹, 姜德生¹, 周租德²

(1. 武汉理工大学 光纤传感技术研究中心, 湖北 武汉 430070;

2. 武汉理工大学 机电工程学院, 湖北 武汉 430070)

摘要:为了探索低成本、大深宽比加工方法,建立了实用的准分子激光微加工系统。以玻璃为实验靶材,用精密微动平台准确调节靶材位置,利用波长248 nm的KrF准分子激光器,研究了准分子激光直写刻蚀过程中平均刻蚀速率与激光脉冲能量密度之间的关系。加工出的沟槽剖面形状均呈现锥型,单脉冲烧蚀速率随脉冲数的增加而减小,激光脉冲对材料的刻蚀具有能量阈值,加工槽的深度具有上限值。采用平行激光束或对加工过程进行动态控制还可实现矩形深槽或圆柱深孔的加工。

关键词:激光微细加工;准分子激光器;激光直写;能量密度;阈值

中图分类号: TG665 **文献标识码:** A

Relationship between average etching velocity and laser pulse energy density during excimer laser direct etching

WEI Ren-xuan¹, JIANG De-sheng¹, ZHOU Zu-de²

(1. *Fiber Optic Sensing Technology Research Center,*

Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

2. *Mechanics and Electronics Institute, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)*

Abstract: In order to search for an economical high depth-width ratio micro-fabrication method and build up an excimer laser direct etching system, the relationship between average etching velocity and laser pulse energy density during excimer laser direct etching was investigated by using KrF excimer laser with a wavelength of 248 nm to ablate and etch glass material accurately located with a high-precision micro-motion controlling system. Experimental results showed that all the yielded grooves are V-grooves; the single laser pulse etching velocity decreases as the number of laser pulses increases; the depth of the yielded grooves becomes constant when the laser pulses add up to a definite number, there is an upper limit threshold for excimer laser pulse energy density in the etching process; and rectangular deep grooves or cylindrical deep holes can be produced by using parallel laser beams or dynamic control of etching process.

Key words: laser microprocessing; excimer laser; laser direct writing energy density; threshold

1 引言

准分子激光刻蚀包括诱导刻蚀和光解剥离

(APD)刻蚀。其中 APD 是激光直接与材料相互作用,依靠高能紫外光子击断化学键实现刻蚀。准分子激光刻蚀属于微细加工技术中的“干法”工艺,具有刻蚀精度高、无损伤、无热效应或极少有

热效应、加工边缘齐整以及可以实现选择性刻蚀和无掩模刻蚀等优点^[1]。尤其是光解剥离技术,是准分子激光刻蚀独有的技术,现已引起广泛的重视^[2-6]。但在实际应用中,仍需要在改进工艺过程和参数方面做大量的工作。本文通过实验,研究了准分子激光直写加工过程中脉冲激光刻蚀速率和加工形状与激光脉冲能量密度之间的关系。

2 准分子激光直写微加工实验系统

实验所用激光器是德国 Lambda Physik 公司生产的 COMPLEX 150T 激光器。工作气体为 KrF, 输出波长为 248 nm, 脉宽为 27.2 ns, 最大重复率为 50 Hz, 输出光斑为 5 mm × 20 mm, 发散角 2 mrad。

实验光路采用单透镜系统,如图 1 所示。COMPLEX 150T 输出脉冲激光,采用方孔尺寸为 18 mm × 4 mm 的光阑选择基模中能量较为均匀的部分作为聚焦光源。利用激光束均匀系统和聚焦系统得到 3 700 μm × 51.63 μm 的矩形光斑,用它在工件表面烧蚀出一条条沟槽,工件固定于精密微动平台上,通过微动平台准确控制靶材的位置和高度。微动平台系法国 Newport 公司生产,可在水平、垂直方向实现二维移动,位置控制精度为 1 μm。

3 实验与分析

3.1 实验方法

将激光器振荡器电压调至 20 kV 并保持不变,放大器电压在 18~26 kV 的范围内进行调节,激光脉冲重复率为 10 Hz,单脉冲有效能量随放大器电压的变化而变化,光路如图 1 所示。样品为普通载玻片,利用微动平台将工件准确置于焦点处,并上下移动工件,在载玻片的不同位置烧蚀出一系列沟槽。为了探索深槽刻蚀时的情况,实验采用了多脉冲刻蚀,以平均刻蚀速率为计算标准。刻蚀时间均为 4 min,刻蚀脉冲为 2 400 个。实验结束后观察其剖面,测试相关尺寸。加工过程中,采用 VectorTM S310 型能量计对辐射到工件表面的激光脉冲能量进行精确测定。

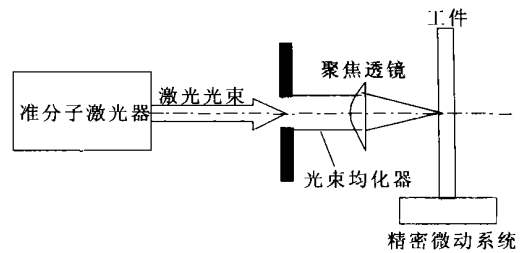


图 1 实验系统示意图

Fig. 1 Experimental system

3.2 实验结果与讨论

按照上述方法测量的结果如表 1 所示。沟槽长度为 3.7 mm。在实验中发现:

- (1) 沟槽剖面为“V”字形,且能量越大,表面宽度越大;
- (2) 随着激光脉冲能量密度的增大,烧蚀速率的增大幅度逐渐减小。

表 1 实验激光脉冲参数和刻蚀槽尺寸

Tab. 1 Laser pulse parameters and sizes of the etching grooves

序号	能量 (mJ)	深度 (μm)	宽度 (μm)	平均能量密度 (J/cm ²)	平均刻蚀速率 (nm/pulse)
1	53.24	128.7	42.9	27.87	53.63
2	80.23	171.6	42.9	42.01	71.5
3	100.18	178.75	42.9	52.45	74.48
4	118.07	185.9	50.05	61.82	77.46
5	132.06	207.35	57.2	69.14	86.4
6	144.75	228.8	57.2	75.79	89.38
7	156.13	214.5	57.2	81.74	92.35
8	165.56	221.65	57.2	86.68	95.33
9	178.25	228.8	57.2	93.32	95.33

表 1 中能量密度根据下面的公式计算:

$$F = \frac{E}{S} = \frac{E}{ab}$$

其中 F 为激光脉冲能量密度, S 为沟槽的面积 (a, b 分别为沟槽表面长和宽), E 为激光单脉冲能量。

平均刻蚀速率 v_a 由下式求得:

$$v_a = \frac{h}{N}$$

其中 h 为刻蚀深度, N 为激光脉冲个数。

根据表 1 做图并对实验数据进行拟合,得出如图 2 所示曲线。

图中平滑曲线为回归曲线,刻蚀速率与激光脉冲能量密度关系的回归曲线方程为

$$v = 34.867 \ln(F) - 62.025 \text{ (nm/脉冲)}, \quad (1)$$

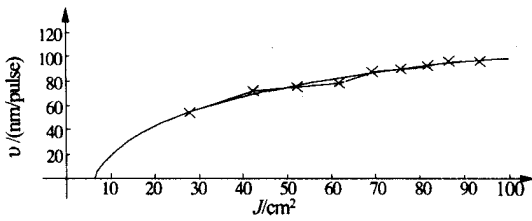


图 2 刻蚀速率与能量密度的关系

Fig. 2 Relationship between etching rate and energy density

v 为刻蚀速率, F 为激光脉冲能量密度。拟合曲线与实验数据之间的相关系数为 0.988。

由式(1)可以看出,在脉宽不变的情况下,能量在刻蚀中起决定作用。紫外激光烧蚀玻璃存在一个能量密度阈值 F_{th} , 能量密度大于阈值才有烧蚀现象,小于阈值没有明显的烧蚀现象。只要材料内部某处的辐射能量密度达到或超过阈值,就会产生烧蚀现象,能量阈值与材料的吸收系数等参数有关。按照这一基本规律,可以根据能量在材料内部的分布规律来推导烧蚀速率与能量密度的准定量关系。

设激光垂直入射材料表面,表面的能量密度为 F_s ,材料结构均匀。根据波尔定律,在表面以下 z 处的能量密度为:

$$F(z) = F_s e^{-z}, \quad (2)$$

为材料对激光的吸收率, $F(z)$ 为材料内部深度 z 处的能量密度。若单脉冲的烧蚀深度为 v_a ,根据阈值 F_{th} 的定义,在烧蚀作用发生时,材料内部 v_a 处的能量密度应不小于 F_{th} , 即

$$F(z) = F_s e^{-v_a} = F_{th}, \quad (3)$$

从工件表面刻蚀的第 1 个激光脉冲的单脉冲的烧蚀深度为:

$$v_a = \frac{1}{F} \ln \frac{F_s}{F(z)}, \quad (4)$$

同理,可得到第 N 个激光脉冲的刻蚀速率,则 N 个连续脉冲的平均刻蚀速率为:

$$v = \frac{1}{N} \times \frac{1}{N} \times \left[\sum_{i=1}^N \ln \frac{F_{si}}{F_i(z)} \right] = \frac{1}{N} \times \frac{1}{N} \times \ln \frac{F_{s1}}{F_i(z)} = \frac{1}{N} \frac{1}{N} \frac{F_{s1}}{F_N(z)}, \quad (5)$$

其中 F_{si} 、 F_i 分别为第 i 个脉冲开始和结束时的槽面位置,其中第 i 个脉冲结束时的槽面位置等于第 $i+1$ 个脉冲开始时的槽面位置。式(5)与图2的实验曲线拟合函数十分相似。

随着槽深度的增加,激光脉冲能量密度减小,由式(1)、(2)可推知。随着加工脉冲数的增加,单脉冲刻蚀深度逐渐减小。对于能量在光束断面呈高斯分布的脉冲激光,随着槽深度的增加,光束断面所在位置离光束束腰(焦点)处越远,光斑面积增大,光斑能量密度逐渐减小,由式(1)和式(2),其刻蚀速率逐渐减小;光斑中心能量密度大于刻蚀阈值的半径逐渐减小,则其刻蚀槽宽或孔半径越来越小,这就是实验结果槽呈锥型的原因。

上述的理论分析与实验结果完全一致。从实验和理论分析可知,利用非平行光束的脉冲激光、工件固定的加工方法,很难得到截面为矩形的槽或圆柱孔。为了实现矩形槽或圆柱孔的脉冲激光刻蚀,一方面可采用平行光束激光,另一方面需采用靶材位置的动态控制,以改变槽或孔底部的激光能量密度。

4 结束语

理论分析和实验表明,高斯分布的准分子脉冲激光加工所得到的沟槽,断面形状为“V”形,烧蚀速率随脉冲数的增加而减小。激光脉冲对材料的刻蚀具有能量阈值,加工槽的深度具有上限值。采用平行激光束或对加工过程进行精密的动态控制可实现矩形深槽或圆柱深孔的加工。实验结果和理论分析结论对激光大深宽比加工工艺参数的确定具有指导意义。

参考文献:

- [1] SMUKA Y, LAWANDYN M. Selective etching in laser written semiconductor-doped glasses[J]. *Optics Communications*, 1998, 156: 297-299.
- [2] 李凤友, 李红军, 卢振武, 等. 激光直写系统焦斑整形的研究[J]. *光学 精密工程*, 2001, 9(1): 297-299.
LI F Y, LI H J, LU ZH W, *et al*. Focused spot shaping in laser writing system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2001, 9(1): 297-299. (in Chinese)
- [3] 刘文波. 准分子激光微加工的应用研究[D]. 武汉: 武汉工业大学硕士论文, 2000.
LIU W B. *Study of application of micromachining by excimer laser* [D]. Wuhan: Wuhan Polytechnology University, 2000. (in Chinese)
- [4] IHLEMANN J, RRBahn K. Excimer laser micro machining: fabrication and applications of dielectric masks[J]. *Applied Surface Science*, 2000, 587-592.
- [5] BRAUN A, ZIMMER K, HOSSSELBARTH B. Excimer laser micromachining and replication of 3D optical surfaces[J]. *Applied Surface Science*, 1998, 911-914.
- [6] OHJI H, FRENCH P J, TSUTSUMI K. Fabrication of mechanical structures in p-type silicon using electrochemical etching[J]. *Sensors and Actuators*, 2000, 82: 254-258.

作者简介:魏仁选(1965 -),男,河南邓州人,副研究员,武汉理工大学光纤传感技术研究中心博士研究生,主要研究方向为光纤传感技术、光电子器件与激光微加工。E-mail: rxwei@mail.whut.edu.cn