

工艺研究

## 等离子体加工光学元件工艺研究

王颖男, 杭凌侠, 胡敏达

(西安工业大学薄膜技术与光学检测重点实验室, 陕西 西安 710032)

**[摘要]** 为了得到超光滑表面且无表层损伤的光学元件, 引入一种新型的超光滑表面加工技术——等离子体抛光。介绍了有关等离子体刻蚀的研究进展以及去除机理, 在已经设计好的实验平台上进行等离子体加工工艺实验, 对影响去除效果的参数进行了实验研究, 最后进行工艺参数优化。结果表明此技术能够应用于对光学元件的加工。

**[关键词]** 超光滑表面; 等离子体抛光; 电容耦合放电; 表面粗糙度; 去除速率

**[中图分类号]** TG174.444

**[文献标识码]** A

**[文章编号]** 1001-3660(2008)01-0051-03

## Super Smooth Surface Fabrication Processes-plasma Etching

WANG Ying-nan, HANG Ling-xia, HU Min-da

(Thin Film Technology and Optical Test Open Key Laboratory, Xi'an Technological University, Xi'an 710032, China)

**[Abstract]** A novel super smooth surface fabrication technology of plasma polishing was introduced. Progress and the mechanism of etching in the development of plasma etching processes were reviewed. Plasma polishing on designed plasma technology stage, the parameters that affect the etching results were studied by experiment, the optimal technological parameters were obtained.

**[Key words]** Super smooth surface; Plasma polishing; Capacitively-coupled discharge; Roughness of surface; Remove rate

### 1 等离子体抛光技术的引入及发展

随着科技发展, 需求超光滑表面会越来越多, 如强激光、短波光学等为代表的工程光学领域迅速发展, 激光聚变系统、紫外光学系统、X 射线系统等所需要的光学元件对于加工精度提出了越来越高的要求。20 世纪随着人们对等离子体物理研究的深入, 发现了许多等离子体的独特性质, 并已经把它运用到许多工程领域中。等离子体技术在电子器件制造领域被用作材料的高精度沉积和刻蚀。现在光学零件的加工正向着超光滑、复杂面形、无损伤方向发展。等离子技术的优点就是精度高, 基底损伤小, 在这样的背景下, 等离子技术被引入光学加工。

等离子体加工技术是等离子体源与化学气相处理设备相结合的新技术, 其工作原理是利用等离子体与工件表层材料发生化学作用去除材料。采用这种方法可以进行大面积平面抛光、局部抛光、非球面的成形和抛光等。采用此方法进行光学零件的加工, 可以避免亚表面损伤层的出现, 提高光学零件表面加工等级, 实现高精密加工, 该项技术涉及到光学加工、自动控制、等离子体物理、化学气相反应以及流体动力学等学科的相关内容, 日本、美国已经开始了对该项技术的应用基础研究, 并取得了初步的研究成果。

日本 Nikon 大学采用的是等离子体化学气相加工技术<sup>[1-3]</sup>, 原理是在射频(RF 150MHz)激励的作用下, 在抛光室中产生等离子体。具有化学活性的等离子体与工件表面物质发生化学反应, 达到去除目的。同时有一套自反馈系统控制, 通过控制被加工工件的转动或移动来控制去除量。该技术对石英玻璃的去除速率为 200 $\mu\text{m}/\text{min}$ , 表面粗糙度达到亚纳米级, 面形误差为亚微米级。

美国 Hughs 公司采用的是 PACE (Plasma assisted chemical etching) 等离子体辅助抛光技术<sup>[4]</sup>, 其抛光原理与等离子体化学气相加工没有本质区别, 只是在激励方式、工作真空度、反应气体和惰性气体的比率等方面不同。该技术对石英玻璃的去除速率为 100 $\mu\text{m}/\text{min}$ , 表面粗糙度也达到亚纳米级, 面形误差为几十微米。

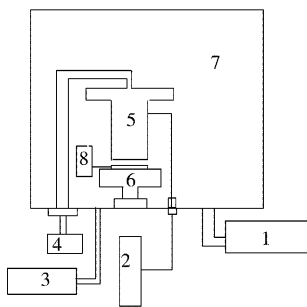
该技术在国内的研究是我们实验室设计了等离子加工实验平台<sup>[5]</sup>, 本文的内容是在此实验装置上进行等离子体加工的初步工艺研究。

### 2 试验装置<sup>[5]</sup>

为了进行等离子体抛光技术研究, 我们课题组设计了等离子体抛光试验平台, 本课题所使用的离子源是电容耦合等离子源。用于研究等离子体抛光工艺和等离子体抛光机理, 如图 1 所示。

**[收稿日期]** 2007-10-23

**[作者简介]** 王颖男(1979-), 男, 满族, 河北承德人, 硕士, 研究方向为光学工艺。



1. 真空系统 2. 射频电源系统 3. 真空测量系统  
4. 供气系统 5. 等离子体源 6. 基片台 7. 真空室 8. 基片

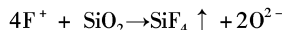
图1 等离子体试验平台的结构示意图

Figure 1 Plasma technology stage system

### 3 等离子体化学反应去除机理

反应等离子在放电过程中产生了许多离子和许多化学活性中性物质(自由基)。相对原来的气体分子而言,这些中性物质常常是活跃的刻蚀剂,它与基片发生化学反应,其典型反应为<sup>[6]</sup>:  $\text{SiO}_2 + 4\text{F}^* \rightarrow \text{SiF}_4 \uparrow + 2\text{O}^{2-}$  (1)

式中,\*表示自由基,由于这类反应只有在反应放热较大时才能自发进行,而且作为反应物的自由基不带电荷只进行自由热运动,另一种化学反应是正离子在鞘层电场作用下与基片发生反应,而且反应集中在电场方向上进行,其典型反应为:



等离子体刻蚀往往是上述几种反应的综合,既包含物理去除,也包括化学反应去除,但气相化学反应去除起主要作用。

### 4 工艺试验

初始的试验参数为:样片直径为24mm的K9玻璃和直径为25mm的石英玻璃;真空度为10Pa;电源频率13.56MHz;电源的入射功率为50W;载气为Ar气,流量200cm<sup>3</sup>/min;反应气体为SF<sub>6</sub>,流量20cm<sup>3</sup>/min。

表面轮廓测量和表面粗糙度采用英国Taylor Hobson公司的Form Taylorsurf Series2和Taylorsurf CCI型检测仪进行测量。

#### 4.1 基片与离子源相对位置的确定

在其他参数不变的情况下做几种不同高度的加工试验(每种高度都有重复试验),具体数值如表1所示,找到了最佳的反应(或刻蚀)高度,其高度为1~2mm之间为最佳。待反应基片与等离子体源较近(即小于1mm)时刻蚀后的表面光洁度较差。去除速率随距离的增大而变小,但是当距离增加到一定程度后,离子源不能够对基片进行刻蚀。基片与源的距离由1mm增大到3mm,刻蚀后基片的表面光洁度没有明显变化。图2是最佳

表1 不同高度下的表面粗糙度和去除厚度

Table 1 Roughness of surface and remove thickness in deferent height

基片与离子源的高度/mm	0.4	1.4	2.4	3.4
去除厚度/nm	800	600	400	0
表面粗糙度/nm	16.7	8.6	9.7	8.5
工作真空度/Pa	13	13	13	13

高度时粗糙度的分析图,此时的Ra值为5.2nm。

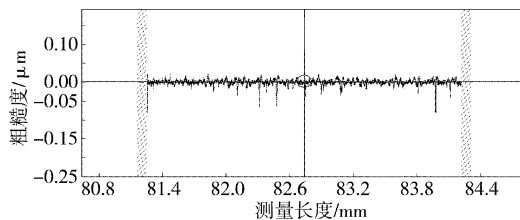


图2 最佳高度时表面粗糙度分析

Figure 2 The analysis of surface roughness at optimal height

#### 4.2 不同压强的影响

改变工作真空度的加工试验:工作气压从4Pa到13Pa而不改变其它工艺参数,结果是气压较大时表面粗糙度值较小,而且表面清洁。气压较小时表面容易留下沉积物。

图3是改变真空度的探针实验的结果,也说明在气压较大(真空度较低)时离子源工作更加稳定。

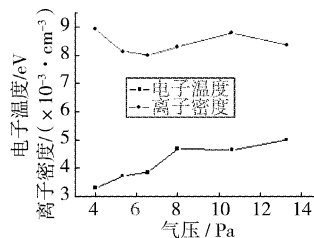


图3 不同气压下电子温度与离子密度的变化情况

Figure 3 The change of the electron temperature and ion density in deferent pressure

图3中电子温度的单位是eV,离子密度单位是 $\times 10^9/\text{cm}^3$ 。

图4是气压为26Pa时粗糙度的分析,此时的Ra值为2.7nm。

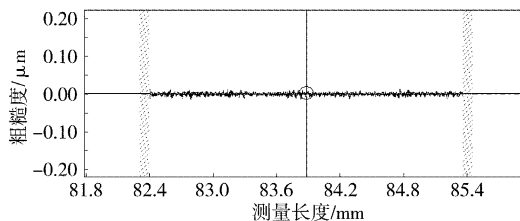


图4 气压较大时表面粗糙度的分析

Figure 4 The analysis of roughness of surface at high pressure

#### 4.3 几种不同尺寸的等离子体源的比较

等离子体源的外形尺寸对离子密度电子温度有明显影响。不同尺寸源的加工试验发现高度/直径的数值在一定范围内,等离子体源的工作稳定,重复性好。同样,对这几种源进行静电探针试验得到的结果是高度与口径的比值过大或过小,伏安曲线的重合度都不好,表明等离子体源不够稳定。

#### 4.4 不同时间的加工试验

用尺寸不同的两个离子源分别对K9玻璃和石英玻璃进行了不同时间的抛光试验。对于K9玻璃在前20min没有去除,如果刻蚀进行30min去除量约200nm,刻蚀120min去除深度约为3200nm。图5是不同时间段的去除深度的曲线图。由图5可以看出,活性气体与基片并不是开始放电后就立即反应,而是需要一段时间才开始,而且每个时间段的去除速率是不相同的,由这些数据我们基本可以认为去除速率随时间的延长是不断增大

的。每个时间段对应的表面粗糙度值如表 2。

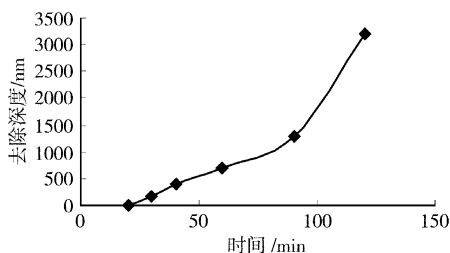


图 5 去除深度随时间变化示意图

Figure 5 The change of the remove high with the time

表 2 不同去除时间的表面粗糙度

Table 2 Roughness of surface in deferent remove time

时间/min	30	40	50	60	90	120
粗糙度/nm	8.7	5.2	5.2	9.2	12.5	20.2

在工艺参数相同的情况下,石英玻璃的去除速率较慢,图 6、图 7 分别给出了最常用的去除时间 60min 下,石英玻璃和 K9 玻璃的面形分析。

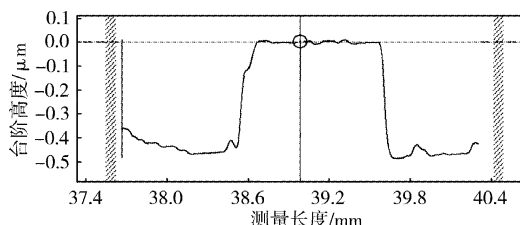


图 6 去除 60min 后的石英的面形

Figure 6 The surface topography of quartz after machining 60 min

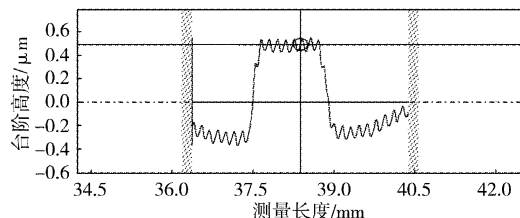


图 7 去除 60min 后的 K9 玻璃的面形

Figure 7 The surface topography of K9 after machining 60 min

## 5 结 论

等离子体抛光技术是等离子体源与化学气相处理设备相结合的技术,是一种全新的抛光技术,涉及到等离子体物理、流体动力学、自动控制、光学加工以及化学气相反应等诸多学科的相关内容,本文所叙述的这套等离子体抛光实验设备还有待完善。

加工过程需要注意的是鞘层在等离子体加工过程中具有重要的地位<sup>[7-8]</sup>,由于几乎所有粒子都必须穿越鞘层才能与基片发生相互作用。鞘层电场要比等离子体内部电场强 2 个数量级,离子进入鞘层后,被鞘层电场加速,以一定的能量轰击基片,而电子则受到鞘层电场的排斥。在气压较高情况下,离子还将与其他中性粒子发生弹性和非弹性碰撞,使离子以一定的角度轰击基片。换言之,鞘层特性决定了离子轰击基片的能量分布

和角度分布,而离子的能量分布和角度分布直接影响到刻蚀速率与刻蚀的面形,进而影响着等离子体加工的产量和质量。

我们在这套等离子体抛光实验设备上进行了一系列的初步工艺试验,试验结果表明此技术能够对光学元件进行有效抛光,有较高的去除速率、良好的面形精度。为等离子体加工超光滑技术的研究和等离子体抛光机理的研究奠定了良好的基础。

## [ 参 考 文 献 ]

- [1] Mori Y, Yamamura K, Yamauchi K, et al. Plasma CVM (chemical vaporization machining): an ultra precision machining technique using high-pressure reactive plasma [J]. Nanotechnology, 1993, 4: 225
- [2] Hideo Takino, Norio Shibata, Hiroshi Itoh, et al. Computer numerically controlled plasma chemical vaporization machining with a pipe electrode for optical fabrication [J]. Applied Optics, 1998, 37(22): 5198
- [3] Hideo Takino, Norio Shibata, Hiroshi Itoh, et al. Fabrication of optics by use of plasma chemical vaporization machining with a pipe electrode [J]. Applied Optics, 2002, 41(19): 3971
- [4] Bollinger D, Gallatin G, Samuels J, et al. Rapid, non-contact optical figuring of aspheric surfaces with plasma assisted chemical etching (PACE) SPIE [J]. Advanced Optical Manufacturing and Testing, 1990, 1333: 44-57
- [5] 胡敏达, 杭凌侠, 刘卫国, 等. 等离子体加工光学元件装置技术研究 [J]. 真空科学与技术, 2007, 27: 38-40
- [6] 许根慧. 等离子体技术与应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006. 26-29
- [7] 菅井秀郎. 等离子体电子工程学 [M]. 北京: 科学出版社, 2002. 108-110
- [8] 甄汉生. 等离子体加工技术 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1990. 29-41

专利名称: 改善晶圆表面平坦度的方法

专利申请号: 03121971.3 公开号: CN1538505

申请日: 2003-04-18 公开日: 2004-10-20

申请人: 台湾省矽统科技股份有限公司

本发明揭示一种改善晶圆表面平坦度的方法, 适用在一晶圆上以化学气相沉积法 (chemical vapor deposition, CVD) 沉积复数层的薄膜, 包括: 一晶圆; 将晶圆置入一第一薄膜沉积设备中, 以化学气相沉积法沉积一第一层薄膜, 其中第一薄膜沉积设备具有至少一第一反应气体注入入口 (injector), 且晶圆相对第一反应气体注入入口具有第一第一方向; 将晶圆置入一第二薄膜沉积设备中, 以化学气相沉积法沉积一第二层薄膜, 其中第二薄膜沉积设备具有至少一第二反应气体注入入口 (injector), 而第一、第二反应气体注入入口的数量与排列方式大体相同, 且晶圆相对第二反应气体注入入口具有第一第二方向, 第二方向与该第一方向具有一第一角度, 使第二反应气体注入入口在晶圆上投影点与第一反应气体注入入口在晶圆上投影点不同。