

文章编号:1002-2082(2019)01-0284-07

# 射频聚焦离子源熔石英高确定去除特性研究

惠迎雪,刘卫国,马占鹏,张进,周顺

(西安工业大学 陕西省薄膜技术与光学检测重点实验室,陕西 西安 710021)

**摘要:**在离子束抛光工艺过程中,材料确定性去除特性对预测光学元件的各工位材料去除量和驻留时间具有极其重要的作用。采用射频离子源对熔石英光学元件的离子束刻蚀特性进行了研究,利用ZYGO激光干涉仪获得准确的去除函数,系统分析了气体流量、屏栅电压、离子束入射角和工作距离等因素对熔石英去除函数的影响,并分析了各单一工艺因素微小扰动时,材料峰值去除率、半高宽和体积去除率的相对变化率。实验结果表明,相同工作真空条件下,工作气体质量流量的微小变化对去除函数影响极小,在典型的工艺条件下,屏栅电压在 $\pm 5\text{ V}$ 、离子束入射角 $\pm 1^\circ$ 、工作距离在 $\pm 0.5\text{ mm}$ 范围内变化时,熔石英峰值去除率、体积去除率和峰值半高宽的相对变化均小于5%,去除函数具有较好的确定性和稳定性。

**关键词:**射频离子源;去除函数;离子束抛光;熔石英

**中图分类号:**TN305.2

**文献标志码:**A

**DOI:**10.5768/JAO201940.0203002

## Research on high deterministic removal characteristics of fused quartz using RF focused ion beam source

XI Yingxue, LIU Weiguo, MA Zhanpeng, ZHANG Jin, ZHOU Shun

(Shaanxi Province Thin Film Technology and Optical Test Open Key Laboratory,

Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

**Abstract:** The characterization of the deterministic material removal plays an important role in the ion-beam figuring (IBF) polishing process, which is used to predict the material removal and help to determine the dwell time needed at different positions of the workpiece. The ion beam etching characteristics of fused quartz optical components were studied by radio frequency(RF) ion source, the precise removal function was calculated and obtained by using ZYGO interferometer, and the influences of the plasma source operational parameters such as work gas mass flow rate, screen voltage, incidence angle of ion beam and work distance on the material removal function of fused quartz were investigated. Furthermore, the relative change rates of the material peak removal rate, the full-width-at-half-maximum (FWHM) of peak and the material volume removal rate were measured and calculated when individual work parameter was perturbed. The experiment results show that the variation of removal functions varies slightly with the gas mass flow rate under the same work vacuum pressure. It is found that the relative errors of the removal function's peak removal efficiency, the FWHM and the volume removal efficiency can

**收稿日期:**2018-01-05; **修回日期:**2018-10-31

**基金项目:**国防基础科研项目(JCKY2016208A002);总装先进制造项目(41423020111);陕西省教育厅重点实验室科研计划(2015JS032);陕西省科技厅重点实验室项目(2013SZS14-Z02);西安市科技计划项目(201805031YD9CG15)

**作者简介:**惠迎雪(1974—),男,博士,副教授,硕士生导师,主要从事光电功能薄膜和等离子体应用技术研究。

E-mail:xiyingxue@163.com

all controlled in 5% when the screen voltage fluctuation is  $\pm 5$  V, the incidence angle deviation of ion beam is  $\pm 1^\circ$  and the work distance deviation is  $\pm 0.5$  mm, respectively. Hence the removal function of IBF for fused quartz by using RF focusing ion source has better certainty and stability.

**Key words:** radio frequency ion source; removal function; ion beam figuring; fused quartz

## 引言

离子束修形技术(ion beam figuring, IBF)建立在计算机控制光学表面成形(computer controlled optical surfacing, CCOS)基础之上<sup>[1-3]</sup>,在计算机的控制下,通过控制离子束在各加工区域的驻留时间,可将元件材料的去除量精确地控制在原子量级,具有纳米、亚纳米级别的加工精度,与传统的光学加工相比具有明显优点<sup>[4-6]</sup>,无载荷效应和边缘效应,在刻蚀过程中,由于离子束与光学元件表面微弱的相互作用,几乎不会引入表面及亚表面亚损伤。

熔石英材料因其具有良好的化学稳定性、透紫外性、均匀性和耐辐射性,广泛应用于高能量激光窗口、航空航天、短波光学、微电子及其他光学领域<sup>[7]</sup>。随着光学元件口径的增大,光学系统重量大幅增加,自重变形和热膨胀变形也成为光学加工领域中的新问题<sup>[3]</sup>,采用熔石英材料的熔接轻型熔石英中大口径光学元件,最大口径尺寸可达 8 m 以上,减重比 70%,已成为重大光学系统和空间光学领域主流材料<sup>[8]</sup>,因此解决熔石英光学元件的超精密加工问题,一直是光学加工领域的研究重点。

目前,可用于离子束修形的离子源主要有考夫曼(Kaufman)、射频(RF)和微波电子回旋共振(ECR)离子源三种<sup>[9-10]</sup>。其中,RF 离子源可通过射频匹配网络将能量耦合至放电腔内实现气体高密度电离,获得较高的刻蚀速率,辅助于多轴运动系统,该源可在真空状况下由点及面,实现光学元件表面面形修正,因此,RF 离子源已成为离子束整形加工的首选离子源。中和器是离子束抛光系统中的核心部件之一,它的作用是发射电子中和离子束电荷,防止正电荷在离子束中的堆积<sup>[11]</sup>,能够用于 RF 离子源光学加工的中和器主要有浸没式钨丝、等离子桥、空心阴极、射频中和器等几种<sup>[12]</sup>,浸没式钨丝中和器易于氧化,使用寿命较短,且由于钨丝浸入在等离子体中,会造成工件表

面的金属污染,而等离子体桥亦采用钨丝,使用寿命大约仅数十个小时,空心阴极具有较长的使用寿命,但其电子发射能耗高,效率低,加热器亦需要定期更换灯丝,射频中和器优势在于无阴极,无温度效应,但是其在使用过程中需要增加一套射频激励装置,成本高,对多维运动控制系统的抗干扰性能提出更高的要求。本文采用一种新型的独有的脉冲开关式(beam switch)技术,通过一个脉冲控制开关控制单元(PLM)交替地将阳极与屏栅电源和负偏压连接,当石墨阳极与屏栅电源接通时,离子源正常工作,而当阳极接入负脉冲电压时,此时加速栅联动接地,离子源用作电子源,发射电子束对带正电荷的离子束进行中和,由此,通过调整 PLM 单元的频率和离子束的流脉冲占空比,实现中和器的功能。该中和方式虽然牺牲了部分效能,但是无需外置特别的器件,仅采用 KHz 的脉冲电源即可工作,无使用寿命问题。

要实现光学元件表面面形的高精度修正,体现在离子束对元件的刻蚀去除函数高确定性控制,为了适应加工元件各种复杂面形曲率的变化,离子束的去除函数必须在一定参数范围内实现线性调节变化,同时,去除函数必须在一定的工艺范围内保持较好的稳定性<sup>[13]</sup>。本文以一种新型脉冲开关式射频离子源离子束去除函数为研究内容,以熔石英光学元件为加工对象,通过系统的工艺实验,研究射频离子源离子束对熔石英元件材料的去除函数的形状和大小,以及材料去除效率随工艺参数变化的规律,并着重分析特定工艺参数的小扰动对去除函数的影响。

## 1 离子束刻蚀实验及去除函数获得

### 1.1 离子源及实验条件

实验在西安工业大学自行开发的 IBE-3000S 离子束抛光刻蚀光学平台上进行,该平台配置了德国 SICA 公司生产的 RF40i 离子源和自制的二维运动系统。离子源采用 13.56 MHz 的射频电

源,工作气体为高纯氩(>99.999%),离子光学系统是由屏栅、加速栅和减速栅构成的三级栅网,各栅网均采用直径 150 mm 的高纯石墨球面栅,发射离子经过栅网系统的加速、聚焦和准直,向球面栅球心位置运动,形成高密度离子束。选择商业购置单抛平面  $\Phi 25\text{ mm}\times 2\text{ mm}$  的熔石英玻璃作为刻蚀样品,依据离子源的聚焦特性,在束腰位置会得到密度最大、能量最高的离子束束斑。在实验开始之前应提前标定好离子束束腰位置,选择斑点实验法研究熔石英的刻蚀特性。实验时,预先将离子束抛光刻蚀系统的真空腔室本底真空抽至  $2.0\times 10^{-4}\text{ Pa}$ ,离子源点火后,将射频 RF 功率预设 180 W,屏栅电压 1 000 V,通入 6 sccm 氩气,工作距离 25 mm(束腰位置),调节气动阀门将工作真空维持在  $5.0\times 10^{-2}\text{ Pa}$ ,待离子源工作稳定后进行刻蚀实验,持续工作 30 min。

1.2 去除函数

通常聚焦离子束作用于元件表面,产生的去除函数类似高斯形状<sup>[14-15]</sup>。利用 ZYGO 激光波面干涉仪测量可得离子束去除函数。去除函数模型为

$$r(x,y)=A\exp(-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}) \tag{1}$$

式中: $A$  与高斯函数中心最高点的值相等,表示离子束去除函数中心具有最大的材料去除速率,在不混淆的情况下可以称为峰值去除速率; $\sigma$  是分布参数,描述了去除函数的分布情况。最终的体积去除率  $B$  为去除函数在直径范围内的积分,即:

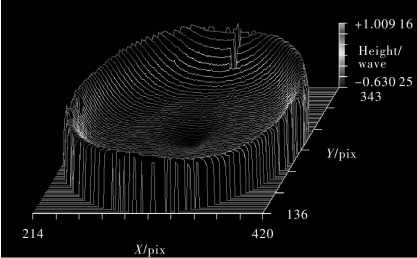
$$B=\iint_{\Omega}r(x,y)\mathrm{d}x\mathrm{d}y,\Omega:\sqrt{x^2+y^2}\leqslant r \tag{2}$$

半高宽 FWHM 参数,是去除函数  $r(x,y)$  取峰值一半值时对应的  $x$  方向和  $y$  方向的宽度。去除函数的形状和大小可以用上面的峰值去除率  $A$ 、体积去除率  $B$  和半高宽 FWHM 为指标来表征<sup>[16]</sup>。图 1 是 RF 功率 250 W,屏栅电压 1000 V,氩气流量 6 sccm 条件下获得的典型去除斑点,根据斑点处的材料去除量和刻蚀时间的比值计算出去除函数。首先,采用 ZYGO 激光干涉仪测量刻蚀前后熔石英样品的面形分别如图 1(a)和 1(b)所示,将刻蚀前后的面形做差,可得去除函数的三维立体图 1(c)和 3D 网状立体图 1(d);之后得到去除函数的俯视图 1(e),最后分别沿着  $X$  获得二维的高斯曲线轮廓线图 1(f)。由图 1(f)可获得去除

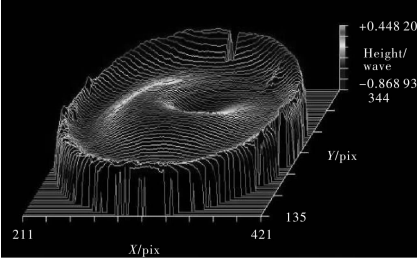
函数峰值,将其与刻蚀时间相除得到峰值去除率  $A$ ,之后由图 1(f)可得离子束在  $X$  方向高斯曲线轮廓线图,以及  $Y$  方向得到高斯曲线轮廓线图(图中未给出),最终得到实际去除函数为

$$r(x,y)=16.926\exp(-\frac{x^2+y^2}{2\times 2.546^2}) \tag{3}$$

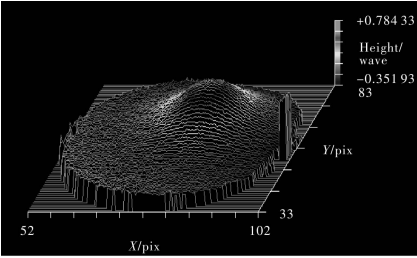
由此,通过去除函数获得最终的体积去除率  $B$  和峰值半高宽 FWHM 值。



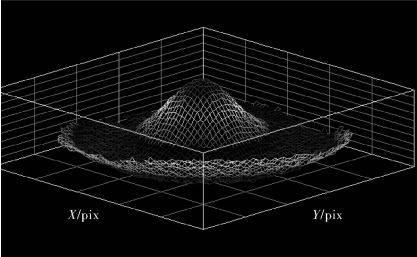
(a)刻蚀前熔石英面形



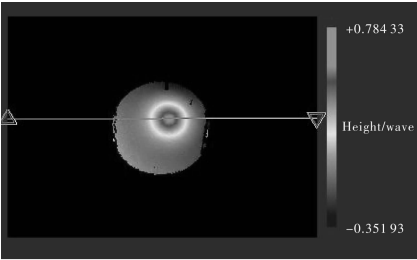
(b)刻蚀后熔石英面形



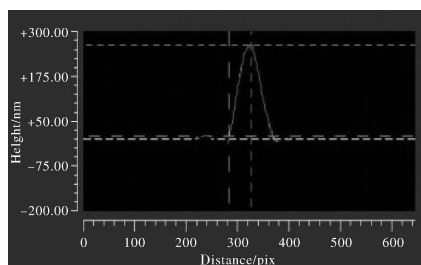
(c)单点形貌图



(d)单点高斯斑3D网格立体图



(e)高斯斑俯视图



(f) X方向二维去除函数轮廓

图1 典型熔石英离子束刻蚀后去除函数的测量

Fig. 1 Measurement of removal function after typical fused quartz ion beam etching

## 2 熔石英离子束刻蚀特性实验

离子束对熔石英的刻蚀特性研究,着重分析气体流量、屏栅电压、入射角度及工作距离对熔石英去除函数的特征量变化的影响规律,继而分析各参数微扰变化对去除函数稳定性的影响规律。实验的基本工作条件为:保证离子束对材料的高确定性去除。理论上, $5.0 \times 10^{-2}$  Pa时,氩气流量6 sccm,射频功率  $P_{RF} = 250$  W,屏栅电压  $V_{Beam} = 1\,000$  V,工作距离  $d = 25$  mm,入射角度  $\theta = 0^\circ$ 。以下各项实验,则是在其他参数不变的情况下,改变某一参数,刻蚀时间30 min,分析其对熔石英的刻蚀特性变化规律。

### 2.1 气体流量对离子束刻蚀特性的影响

图2(a)和(b)是不同气体流量下,刻蚀获得的去除函数峰值去除率  $A$ 、半峰值全宽 FWHM 和体积去除率的变化关系。由图2(a)可知,随着气体流量的增大,峰值去除率  $A$  逐渐变小,而峰值 FWHM 逐渐变大,显然,随着氩气流量的增大,去除函数的形状产生了明显的变化,离子束的作用面积增大,而刻蚀深度降低。去除函数的形状主要由束流的形状决定,可见,随着气体流量的增大离子束斑有增大的趋势,如图2(b)所示,随着氩气流量的增大,材料的体积去除率近似线性增大,这是因为单位时间内引入离子源放电腔室内气体浓度越高,离子束流密度也随之相应增大,这是导致材料去除率增大的主要原因。

在本文实验中,真空系统自动抽速调节,可将工作真空稳定在  $5.0 \times 10^{-2}$  Pa,如此,随着氩气流量的增大,虽然放电腔室局部的气体密度略有增加,离子束束流也会相应增大,但其增大的范围不是很大,故而材料去除速率增大的范围也极小,由图2(b)可知,即使气体流量增大了一倍,离子束对熔石英定点刻蚀的体积去除率变化也不超过5%,

理论上,离子束对材料的刻蚀速率随着束流密度的增大而线性增加<sup>[17]</sup>,而通过稳定工作真空度,即使工作气体流量在较大范围内波动,对材料去除速率的增大的范围也极小。

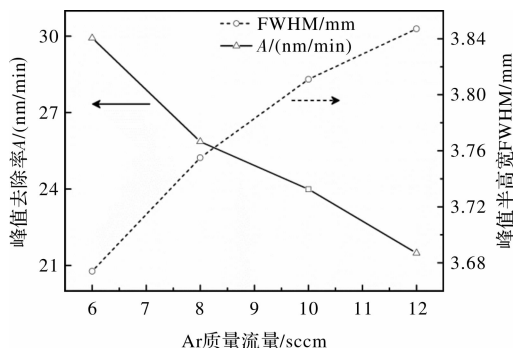
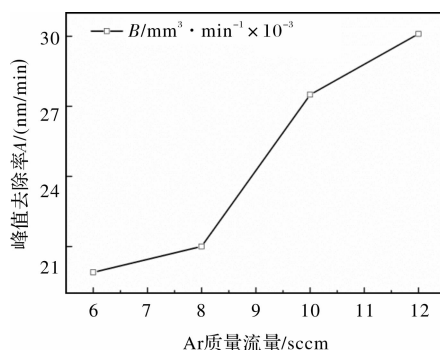
(a) 峰值去除率  $A$  及峰值半高宽 FWHM(b) 体积去除率  $B$ 

图2 气体流量与去除函数特征量的关系

Fig. 2 Relationship between gas flow rate and feature quantity of removal function

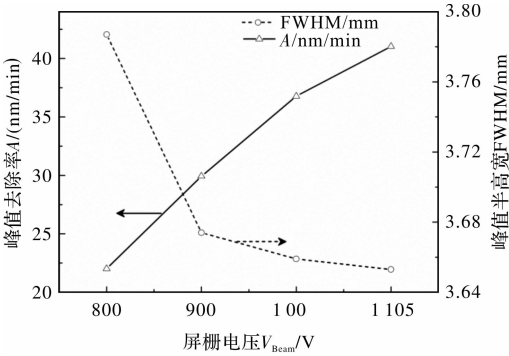
### 2.2 屏栅电压对离子束刻蚀特性的影响

图3(a)和(b)是屏栅电压依次在800 V、900 V、1 000 V和1 100 V时,去除函数的变化情况。由图可知,随着屏栅电压的增大,峰值去除率  $A$  和体积去除率  $B$  均有增大趋势,Steibruchel给出了低能量溅射条件下材料刻蚀去除率  $v$  和入射离子能量  $E_i$  的关系<sup>[18]</sup>:

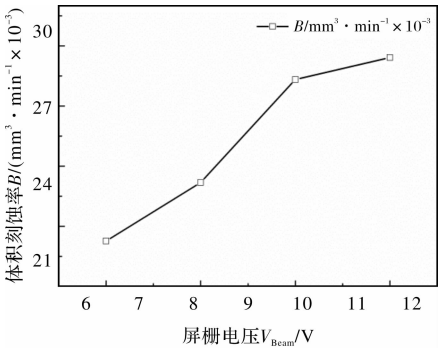
$$v(E_i) = K(E_i^{1/2} - E_{th}^{1/2}) \quad (5)$$

式中,系数  $K$  和溅射刻蚀阈值  $E_{th}$  是与氩离子和材料表面分子结合能相关的常数,去除率与入射离子能量的平方根近似成正比,而离子能量可近似地认为与栅极电压正相关,因此材料峰值去除率和体积去除率均随着屏栅电压的增大而增大,二者并未体现出与(5)式相似的变化关系,主要是因为栅极电压与实际离子束能量略有差异<sup>[3]</sup>,且加速栅电压的大小与屏栅之间的结构位置关系也会对离子束流的能量造成影响。对比不同屏栅电压下去除函数峰值半高宽 FWHM,发现后者随着前者的增大而有减小趋势,表明离子能量的增大,

对离子束在轴向的分布有一定的约束作用,但随着离子能量的进一步增大,这种约束作用会变小,这一结论也符合 Sigmund 溅射理论<sup>[18]</sup>。



(a) 峰值去除率A及峰值半高宽FWHM



(b) 体积去除率B

图 3 屏栅电压与去除函数特征量的关系

Fig. 3 Relationship between screen grid voltage and feature quantity of removal function

为了对比屏栅电压的扰动对熔石英去除函数的影响,在同一熔石英样品表面进行三次点刻蚀对比实验,每个点刻蚀 30 min,在其他工艺条件保持不变的情况下,各点刻蚀屏栅电压依次为 1 095 V,1 100 V 和 1 105 V。以屏栅电压 1 100 V 的去除函数为基准,结果如图 4 所示。

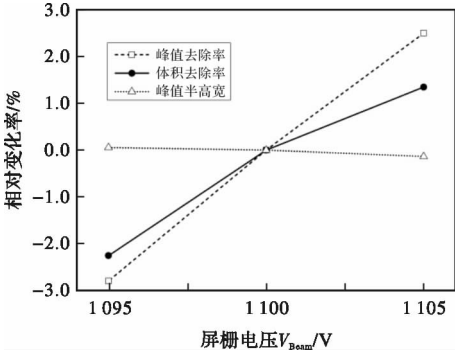


图 4 屏栅电压微扰稳定性

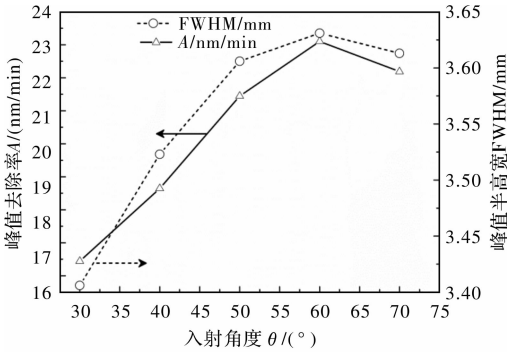
Fig. 4 Screen gate voltage perturbation stability

由图 4 可知,在屏栅电压波动幅度为±5 V 条件下,去除函数的峰值去除率变化小于 5%,体积去除率变化小于 4%,而峰值半高宽受到的影响最

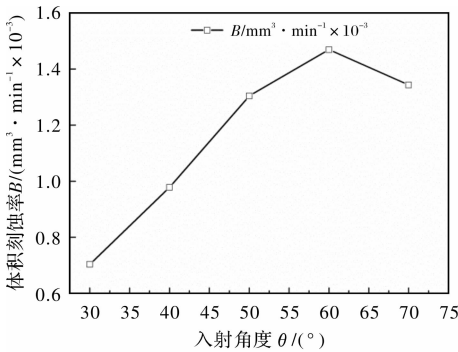
小,其变化不足 1%,表明屏栅电压的小扰动对去除函数的影响小于 5%。

2.3 入射角度对离子束刻蚀特性的影响

图 5(a)和(b)是离子束入射角度依次在 0°、30°、40°、50°、60°和 70°,其他工艺参数保持不变时,去除函数的变化情况。由图可知,随着入射角度的增大,去除函数的各个特征指标均随之增大,在 60°到达峰值,而在 70°时又开始下降。这一结果与文献[20]中报道的 Kaufman 离子源刻蚀现象相类似,在溅射刻蚀过程中,入射离子与元件原子发生级联碰撞,入射离子的溅射产额与入射角的余弦成反比,入射角度越大,刻蚀效率越高,在入射角 60°时刻蚀效率达到了最大。但是,当入射角度过大时,离子反弹效应增加,仅有少量的离子能与元件表面原子发生发生级联碰撞,这也是 70°时去除函数特性参数均下降的原因。



(a) 峰值去除率A及峰值半高宽FWHM



(b) 体积去除率B

图 5 去除函数与离子束入射角度的关系

Fig. 5 Relationship between removal function and incident angle of ion beam

为了对比离子束入射角度的扰动对熔石英去除函数的影响,在同一熔石英样品表面进行三次点刻蚀对比实验,保持其他工艺条件不变,分别将入射角度设定为 59°、60°和 61°,由于入射角度 60°时去除函数的各项特征值最大,以此角度为基准,角度的扰动对去除函数影响最大,其结果如图 6 所示。由图可

知,在入射角度变化为 $\pm 1^\circ$ 条件下,去除函数的峰值去除率变化小于2%,体积去除率变化小于3.1%,而峰值半高宽受到的影响依然最小,其变化小于0.5%,表明即使是在对角度最为敏感的 $60^\circ$ 附近,角度的小扰动对去除函数的影响不超过3%。

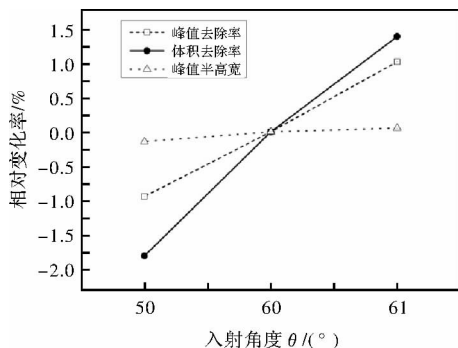
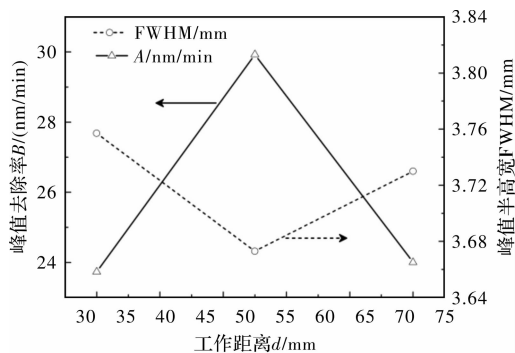


图6 离子束入射角度的微扰稳定性

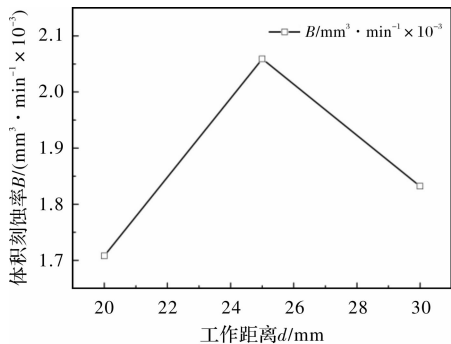
Fig. 6 Perturbation stability of incident angle of ion beam

## 2.4 工作距离对离子束刻蚀特性的影响

图7(a)和(b)是离子源与加工元件距离分别为20 mm、25 mm和30 mm,其他工艺参数保持不变时,去除函数的变化情况。由图可知,由于在实验中采用的是聚焦离子束,故而在束腰位置25 mm附近,去除函数的半高宽最小,且峰值去除率和体积去除率最大。



(a) 峰值去除率A及峰值半高宽FWHM



(b) 体积去除率B

图7 去除函数与离子束入射角度的关系

Fig. 7 Relationship between removal function and incident angle of ion beam

为了对比离子源与加工元件工作距离扰动对熔石英去除函数的影响,在同一熔石英样品表面进行五次点刻蚀对比实验,保持其他工艺条件不变,分别将工作距离设定为24 mm、24.5 mm、25 mm、25.5 mm和26 mm,以工作距离25 mm时为基准,结果如图8所示。由图可知,当工作距离扰动在 $\pm 1$  mm时,虽然峰值半高宽相对变化率仅为1.4%,但峰值去除率相对变化率接近15%,体积去除率相对变化率也超过了5%。当工作距离扰动控制在 $\pm 0.5$  mm时,峰值去除率和体积去除率的相对变化率分别下降至3%和2%。

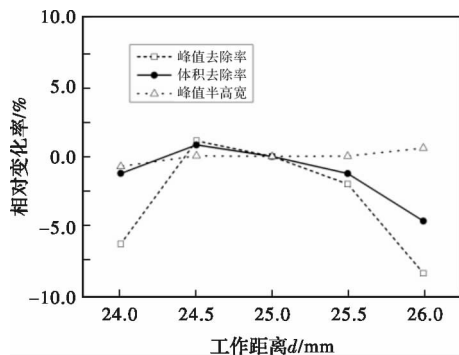


图8 工作距离的微扰稳定性

Fig. 8 Perturbation stability of working distance

## 3 结论

在离子束抛光过程中,材料的高确定性去除是实现光学元件高精密加工的前提和基础,以峰值去除率A、峰值半高宽FWHM和体积去除率为特征量的去除函数是表征离子束材料去除函数的量化指标。本文采用一种新型脉冲式中和器射频离子源对熔石英光学元件进行刻蚀实验,研究了熔石英刻蚀去除函数随着氩气流量、栅极电压、离子束入射角度和工作距离的变化规律,进而分析了各工艺参数的扰动对去除函数稳定性的影响规律。研究结果表明,通过控制工作真空度可有效地避免工作气体流量扰动对去除函数的影响,而栅极电压、离子束入射角度和工作距离的微小扰动,在实验给定的范围内对去除函数特征参量的影响均可控制在5%以内,实验证明了这种新型的脉冲式中和器可应用熔石英光学元件的加工。

## 参考文献:

- [1] ARNOLD T, BÖHM G, FECHNER R, et al. Ultra-precision surface finishing by ion beam and plasma jet techniques: status and outlook[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and As-

- sociated Equipment, 2010, 616(2/3): 147-156.
- [2] ALLEN L N. Progress in ion figuring large optics [J]. SPIE, 1994, 2428: 237-247.
  - [3] LI Shengyi, DAI Yifan, XIE Xuhui, et al. New technology for manufacturing and measurement of large and middle-scale aspheric surfaces [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011.  
李圣怡, 戴一凡, 解旭辉, 等. 中大口径非球面镜制造与测量新技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
  - [4] FAWCETT S C. Ion beam figuring of small optical components [J]. Optical Engineering, 1995, 34(12): 3565.
  - [5] ALLEN L N, HANNON J H, WAMBACH R W. Final surface error correction of an off-axis aspheric petal by ionFiguring [J]. SPIE, 1991, 1543: 190-200.
  - [6] DAI Yifan, ZHOU Lin, XIE Xuhui, et al. Ion beam figuring technology [J]. Journal of Applied Optics, 2011, 32(4): 753-760.  
戴一帆, 周林, 解旭辉, 等. 离子束修形技术 [J]. 应用光学, 2011, 32(4): 753-760.
  - [7] WANG Dongfang. Research on atmospheric pressure plasma processing technology of fused silicon [J]. Journal of Shaanxi University of Technology: Natural Science Edition, 2013, 29(2): 1-5.  
王东方. 大气等离子体加工熔石英技术研究 [J]. 陕西理工学院学报: 自然科学版, 2013, 29(2): 1-5.
  - [8] PHILIP S H. Optica needs for futrue space telescopes [J]. SPIE, 2003, 5180: 1-5.
  - [9] ALLEN D M, SHORE P, EVANS R W, et al. Ion beam, focused ion beam, and plasma discharge machining [J]. CIRP Annals, 2009, 58(2): 647-662.
  - [10] CHEN Guiyang, XIE Xuhui, ZHOU Lin, et al. Removal function and stability study of RF ion source for optics figuring [J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2016, 52(5): 19-22, 40.  
谌贵阳, 解旭辉, 周林, 等. 光学加工射频离子源的去除函数与稳定性研究 [J]. 航空精密制造技术, 2016, 52(5): 19-22, 40.
  - [11] LIU Jinsheng. Ion beam technology and application [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1995.  
刘金声. 离子束技术及应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.
  - [12] ZHANG Zhenpeng, XIE Xuhui, ZHOU Lin, et al. Structure design and performance research of RF neutralizer for optics figuring [J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2017, 53(3): 8-11, 15.  
张振鹏, 解旭辉, 周林, 等. 光学加工射频中和器的结构设计和性能研究 [J]. 航空精密制造技术, 2017, 53(3): 8-11, 15.
  - [13] TANG Wa, DENG Weijie, ZHENG Ligong, et al. Calculation of removal function of ion beam Figuring and polishing experiment [J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(1): 31-39.  
唐瓦, 邓伟杰, 郑立功, 等. 离子束抛光去除函数计算与抛光实验 [J]. 光学精密工程, 2015, 23(1): 31-39.
  - [14] ALLEN L N, KEIM R E. An ion figuring system for large optic fabrication [J]. SPIE, 1989, 1168: 33-50.
  - [15] KONG Bing, WANG Zhao, TAN Yushan. Gaussian fitting technique of laser spot [J]. Laser Technology, 2002, 26(4): 277-278.  
孔兵, 王昭, 谭玉山. 激光光斑的高斯拟合 [J]. 激光技术, 2002, 26(4): 277-278.
  - [16] DUAN Guping. Study of removal characteristics of ion beam polishing [D]. Chengdu: Graduate School of Chinese Academy Sciences (Institute of Optics and electronics), 2013.  
段沽坪. 离子束抛光去除特性研究 [D]. 成都: 中国科学院研究生院 (光电技术研究所), 2013.
  - [17] KATARDJIEV I V. A kinematic model of surface evolution during growth and erosion: numerical analysis [J]. Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films, 1989, 7 (6): 3222-3232.
  - [18] STEINBR C. Universal energy dependence of physical and ion-enhanced chemical etch yields at low ion energy [J]. Applied Physics Letters, 1989, 55 (19): 1960-1962.
  - [19] SIGMUND P. Sputtering by particle bombardment I [M]. Berlin: Springer-Verag, 1981.
  - [20] LIAO Wenlin, DAI Yifan, ZHOU Lin, et al. Optical surface roughness in ion beam process [J]. Journal of Applied Optics, 2010, 31(6): 1041-1045.  
廖文林, 戴一帆, 周林, 等. 离子束作用下的光学表面粗糙度演变研究 [J]. 应用光学, 2010, 31(6): 1041-1045.