

文章编号 1004-924X(2015)01-0031-09

离子束抛光去除函数计算与抛光实验

唐 瓦^{1,2*}, 邓伟杰¹, 郑立功¹, 张学军¹

- (1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 由于传统的离子抛光工艺采用的确定去除函数的方法操作复杂且成本很高, 本文提出了利用法拉第杯对离子束流空间分布进行测量、标定的方法, 并计算得到不同离子源工作参数对应的去除函数。首先, 基于离子束抛光材料去除原理, 研究了离子束抛光过程中束流分布与能量对去除函数的影响, 并提出简化的离子束抛光去除函数模型。然后, 设计实验并得出离子束流空间分布与去除函数相关参数间的关系, 计算得到了不同离子源工作参数产生的离子束流对应的去除函数。对硅和熔融石英玻璃的相关实验表明: 利用法拉第杯扫描结果计算相同材料的去除函数的单位时间体积去除率与实际测量值误差小于 2%。结合抛光实验, 对 $\Phi 800$ mm 碳化硅表面硅改性层平面镜进行抛光, 得到的初始面形误差均方根(RMS)值为 57.886 nm, 两次抛光后 RMS 值为 11.837 nm, 收敛率达到 4.89, 满足精密光学加工对去除函数的确定性及精度的要求, 并大大提升了确定去除函数的效率。

关键词: 光学加工; 离子束抛光; 溅射效应; 法拉第杯扫描; 去除函数

中图分类号: TN305.2 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152301.0031

Calculation of removal function of ion beam figuring and polishing experiment

TANG Wa^{1,2*}, DENG Wei-jie¹, ZHENG Li-gong¹, ZHANG Xue-jun¹

- (1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)
- * Corresponding author, E-mail: tangwtang@126.com

Abstract: As the method to get the removal function by traditional Ion Beam Figuring (IBF) has complicated operation and higher costs, this paper proposes a new method to calculate the removal function. The method uses the Faraday cup scan to measure and calibrate the temporal distribution of ion beams and to obtain the different working parameters of ion sources which corresponds to removal functions. Firstly, the material removal theory of IBF was studied based on the Sigmund sputtering theory, and the influence of ion beam distribution on the removal function was researched. A simplified IBF removal function model was proposed. Then, an experiment was conducted to obtain the relationship between the temporal distribution of ion beam and the related parameter of removal

收稿日期: 2014-02-26; 修订日期: 2014-03-31.

基金项目: 国家 973 重点基础研究发展计划资助项目 (No. 2011CB013205); 国家自然科学基金重点项目 (No. 61036015)

function, and the different removal functions of various working parameters were calculated with the combination of the basic removal experiment and Faraday cup scan results. Experiments were performed on silicon and fused silica, and the experimental results show that the peak value of the removal function for the same material is proportional to the that of the scan result. A mirror with a $\Phi 800$ mm silicon flat modification layer was polished, obtained the Root Mean Square (RMS) of surface error is 57.866 nm. After polishing for two times, the RMS is 11.837 nm, and the convergence rate is up to 4.89. These results meet the requirements of optical fabrication for polishing accuracy and improve the determining efficiency for removal functions.

Key words: optical fabrication; ion beam polishing; sputtering theory; Faraday cup scan; removal function;

1 引 言

离子束抛光是一种非接触式的高确定性光学加工手段,利用从离子源发射出的具有一定能量与空间分布的离子束流轰击待加工工件表面,高能离子入射到工件表面后发生溅射效应——当溅射粒子能量大于工件材料的表面束缚能时,便可以飞离工件表面,实现确定性的材料去除。从离子源发射出的离子束流经过离子光学系统的修形,其空间密度具有高斯型的空间分布,从而能够在工件表面得到近高斯型的去除函数^[1-2],再利用计算机控制表面成型(CCOS)原理加工工件^[3]。随着现代航天航空事业的发展,空间光学系统对镜面面形提出了更高的要求,面形误差 RMS 值要求优于 12 nm。光学镜面的精细抛光阶段主要有古典抛光法、计算机控制光学成型法、磁流变抛光法和离子束抛光法^[4],但传统加工工艺难以实现确定性的材料去除,收敛率在 1.1~1.3,且加工效率偏低。与传统加工方法相比,离子束抛光的收敛率更高,而且无边缘效应和复印效应,更适合光学镜面精细抛光阶段的需求^[5-7]。实际工程应用中考虑加工效率与成本,离子束抛光的的面形误差 RMS 值通常要求优于 40 nm,材料表面的粗糙度 R_a 值优于 2 nm,相关实验表明在离子束抛光过程中,材料表面粗糙度的变化微小^[8]。

作为一种高确定性的加工手段,离子束加工具有十分有利于光学加工的近高斯型去除函数,加工过程中通过改变离子源的工作参数可以改变离子束流的空间分布与离子能量,实现对去除函数的控制。德国 IOM 研究所的 A. Schindler、T. Hänsel 等人指出离子束抛光材料的去除率随着入射参数的改变而改变,并开发出 X, Y, Z 三轴

联动的离子束抛光系统,在抛光球面、非球面的过程中引入变去除函数算法,得到的面形误差 RMS 值优于 10 nm^[9]。韩国 Young-Sik Ghim 等人研究了去除函数尺寸对于工件材料表面质量的影响,指出当去除函数半宽增大时,材料表面的粗糙度将变大^[10]。中国国防科技大学的周林、廖文林等人研究指出,在一定尺寸的去除函数半宽下离子束抛光能够有效去除的残差空间频率也受到限制^[11]。针对不同应用情况下去除函数的研究表明,离子束抛光过程中,去除函数的准确性至关重要,对加工效率与抛光后镜面质量有较大的影响。为确保加工质量,离子束抛光前需要准确测量与计算去除函数。

目前,国内外相关研究者获取离子束抛光去除函数的主要手段仍是实验测量法^[9-10,12]。为提升实验精度与定位可重复性,并排除面形误差对去除函数的影响,实验通常选用 $\Phi 150$ mm 左右、面形精度高(RMS 值优于 6.5 nm)的实验平面,应用设定能量与空间分布的离子束流对它进行定点材料去除实验,再利用干涉仪测得去除量的分布信息,最后通过计算得到去除函数的参数信息。抛光曲面时,去除函数发生变化,常用的获取去除函数的手段是进行一系列的斜入射平面去除函数实验,并由此获得近似的抛光曲面去除函数信息。上述方法复杂繁琐、周期长、成本高,且需要多次测量,这会引入诸多不确定因素,影响测量的准确性。

本文基于 Sigmund 溅射理论对离子束抛光材料去除进行了分析,得到离子束抛光过程中束流分布与去除函数间的关系,通过计算具有一定能量与空间分布的离子束流得到了它对应的去除函数,大大提高了确定去除函数的效率。设计了实验针对不同材料与不同入射情况下的去除函数

进行测量与计算,利用计算结果进行抛光实验。结果表明,本文提出的方法能够简单快速地得到去除函数,计算得到的去除函数能够很好地满足精抛光需求,为实际加工提供指导。

2 理论分析

2.1 溅射效应与材料去除率

从微观角度看,离子束抛光材料去除率的形成可以用溅射产额^[13]Y来表示:

$$Y = \frac{n_0}{n_i}, \quad (1)$$

式中: n_0 为飞离工件表面的粒子数, n_i 为入射到工件表面的离子数。入射到工件表面的离子与工件原子发生碰撞,将其具有的动能传递给工件原子,当工件原子获得的能量大于其晶格束缚能时便具有一定的速度,从而在工件表面下一定深度范围内引发级联碰撞效应,最终能够到达工件表面且能量大于工件材料的表面束缚能的粒子便会飞离工件表面,实现材料去除。Sigmund 系统地研究了这一过程,并建立模型描述了入射粒子在工件表面的能量分布^[14-15],其主要结论之一是入射粒子在工件表层内的能量分布成高斯型。如图 1 所示,其中 a 为入射离子的平均入射深度, P 点周围的能量分布呈高斯型。 O 点为工件表面上入射离子作用范围内的任意点,则 O 点处的能量沉积为:

$$E(r) = \frac{\epsilon}{(2\pi)^{3/2} \sigma \mu^2} \exp\left[-\frac{Z^2}{2\sigma^2} - \frac{X^2 + Y^2}{2\mu^2}\right], \quad (2)$$

式中: ϵ 为入射离子的总能量, Z 为 P 点至 O 点沿离子入射方向的距离, X, Y 分别为 P 点至 O 点沿垂直于 Z 的方向上的距离, σ, μ 分别为描述能量沿平行于和垂直于离子入射方向的高斯分布系数。

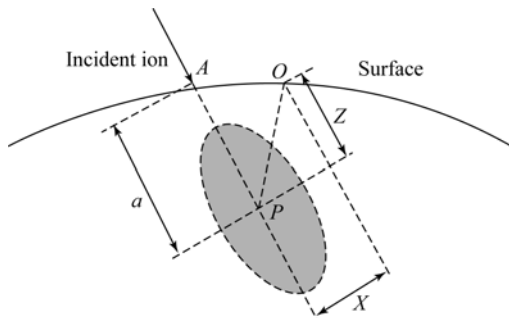


图 1 入射离子能量在工件中分布示意图

Fig. 1 Schematic illustration of energy distribution of an incident ion

在实际加工中,具有一定能量与空间分布的离子束流入射到工件表面,在有效作用范围内有更多的能量沉积在 O 点,则 O 点的法向材料去除率为:

$$V_0 = p \int_S \Phi(r) E(r) dr, \quad (3)$$

式中: S 为入射离子的有效作用区域, p 为与材料性质有关的常数, Φ 为入射离子束流在工件表面的分布。实际抛光中,需要将工件表面坐标转化到实验室坐标系中,工件表面坐标系与实验室坐标系的关系如图 2 所示。式(3)求得的是沿工件表面法向的材料去除率,将其转化到实验室坐标系,可以求得当离子束流沿实验室坐标系 $-h$ 方向入射到工件表面时,作用范围内任一点沿 Z 向的材料去除率,如式(4)所示:

$$Z_w = \frac{J(x, y) \epsilon p}{\sigma (2\pi)^{3/2}} \exp\left[-\frac{a_e^2}{2}\right], \quad (4)$$

其中: Z_w 为材料去除率, $J(x, y)$ 为光学表面的离子束流分布, $a_e = a/\sigma$ 。对于相同材料式(4)可以简化为:

$$Z_w = \epsilon J(x, y) C_m, \quad (5)$$

式中: C_m 为与材料相关的常数。材料相同时,去除函数与束流分布及能量相关。

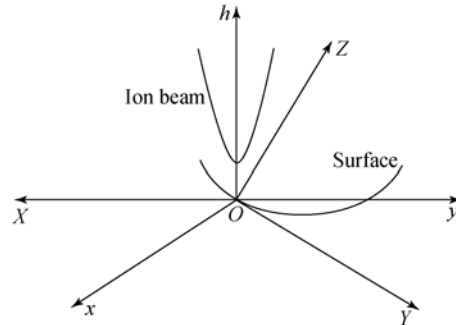


图 2 镜面坐标 (X, Y, Z) 与实验室坐标 (x, y, h) 的转换示意图

Fig. 2 Illustration of local coordinate system (X, Y, Z) and laboratory coordinate system (x, y, h)

式(5)表述离子束正入射到工件表面的情况,实际加工中往往引入入射角度。实验证明,当入射离子束流与 h 轴成一定角度时,材料去除率将随角度的增大而增大^[7],因此,斜入射时有:

$$Z_w = \epsilon J(x, y) C_m C_\theta, \quad (6)$$

其中: C_θ 为与角度相关的常数。斜入射时不仅束流空间分布与正入射不同,材料去除率也会相应地变大,计算去除函数时需要考虑不同入射角度对材料去除率的影响。

由上述结果可知对于相同材料,光学表面上任意点的材料去除率与束流离子能量、空间分布及入射角度有关。因此,计算离子束抛光的去除函数需要先测量束流离子的能量与空间分布,再结合实验得到它们与去除函数的对应关系。

2.2 法拉第杯测量离子束流的空间分布

法拉第杯是一种真空下的绝对测量装置,能够测量带电粒子的入射强度,通过法拉第杯测量得到的电流还能计算出射粒子的数量。对于能量相同的粒子,法拉第杯测得的电流值与入射离子电荷数呈线性关系^[16]。根据静电计原理,法拉第杯由内外两个金属杯壳组成,内外杯之间由绝缘材料隔开,法拉第杯与测试电路之间通过同轴电缆连接。当带电离子入射到法拉第杯后会产生电流或电子流。离子束抛光常采用 Ar⁺ 离子束流,Ar⁺ 能量较低且相对比较稳定,本实验中离子能量为 1 keV,调节离子源的工作参数,例如工作气体流量、射频电源功率、栅网加速电压、入射角度等,会得到不同的束流空间分布。通过法拉第杯对离子束流进行扫描,对于一个连续的带单电荷的离子束来说有:

$$N/t = I/e, \quad (7)$$

式中: N 为离子数量, t 是时间, I 是测量得到的电流, e 是基本电荷量。由此根据测量得到的电流值可以估算出法拉第杯收集到的离子数量。本实验应用的法拉第杯的外杯直径为 15 mm、高 10 mm,内杯直径为 13 mm、高 8 mm,内外杯之间由陶瓷绝缘隔离,法拉第杯的前端中心有直径为 1 mm 的孔,以便束流能够入射到法拉第杯内。测量过程中,调整离子源角度至工作状态,使得离子束流入射到法拉第杯前端面,并使离子源分别

沿实验室坐标系 x, y 轴方向移动,扫描离子束流,从而得到束流分别在 x, y 方向上的分布。根据法拉第杯的扫描结果,在实验室坐标系中入射的离子束流可以由电流值分布描述:

$$I_d = I_{\max} \exp \left[-\frac{x^2}{2\eta_x} - \frac{y^2}{2\eta_y} \right], \quad (8)$$

其中: I_d 为离子束流电流值的空间分布, I_{\max} 为法拉第杯扫描的电流峰值, η_x, η_y 分别为扫描结果在 x, y 方向上的高斯分布系数。法拉第杯的测量误差主要有两种:一是入射离子的反向散射,二是入射的带电离子撞击法拉第杯表面产生的低能量二次电子。但两者对于离子束流测量结果的影响可以忽略。因此离子束抛光前,对从离子源发射出的 Ar⁺ 离子束流进行扫描测量,用测得的电流值分布来表述离子束流的空间分布,并由此进一步计算得到离子束流空间分布所对应的去除函数。

3 实验结果与分析

本实验采用最大加工口径为 1 500 mm 的三轴联动离子束抛光设备 IBF1500,离子源类型为射频离子源,工作气体为氩气。实验中调整离子源的工作参数与抛光工作距离,得到不同的离子束流空间分布,并利用法拉第杯扫描产生的离子束流,测量得到与此空间分布对应的电流分布。针对不同的离子束流空间分布,分别选用硅、融石英材料进行正入射去除函数实验,利用干涉仪检测定点去除实验前后的镜面,得到不同离子束流空间分布对应的去除函数测量值,如表 1、表 2 所示。

表 1 去除函数实验结果(硅)

Tab. 1 Results of removal function experiments (silicon)

| Ion beam source parameter | | | | | | Faraday cup scan | | | Removal function | | |
|---------------------------|--------------|---------------|--------------------------------------|---------------|--------------|----------------------|------------|------------|--------------------------------------|--------------|--------------|
| RF power/W | Beam power/V | Acc. power /V | Gas flow / (mL · min ⁻¹) | Work Dis. /mm | Grid size/mm | I_{\max} / μ A | FWHM_X /mm | FWHM_Y /mm | r_{\max} / (nm · s ⁻¹) | η_x /mm | η_y /mm |
| 130 | 1 000 | 100 | 3 | 20 | 10 | 15.76 | 7.229 | 7.203 | 2.942 | 2.49 | 2.480 |
| 130 | 1 000 | 100 | 4 | 75 | 30 | 17.894 | 23.125 | 23.325 | 3.335 | 8.61 | 8.740 |
| 170 | 1 000 | 100 | 5 | 90 | 30 | 19.821 | 20.865 | 21.42 | 3.664 | 7.82 | 8.030 |
| 170 | 1 000 | 100 | 5 | 85 | 37 | 21.42 | 20.95 | 20.71 | 3.956 | 7.83 | 7.75 |
| 170 | 1 000 | 100 | 5 | 80 | 37 | 25.579 | 18.851 | 19.324 | 4.751 | 7.03 | 7.20 |
| 200 | 1 000 | 100 | 7 | 90 | 50 | 27.905 | 50.51 | 51.125 | 5.182 | 19.02 | 19.22 |
| 200 | 1 000 | 100 | 7 | 80 | 37 | 36.862 | 20.241 | 20.154 | 6.849 | 7.65 | 7.56 |

表 2 去除函数实验结果(融石英)

Tab. 2 Results of removal function experiments (fused silica)

| Ion beam source parameter | | | | | | Faraday cup scan | | | Removal function | | |
|---------------------------|--------------|---------------|---|---------------|--------------|--------------------------------|------------|------------|---|----------------------|----------------------|
| RF power/W | Beam power/V | Acc. power /V | Gas flow /($\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$) | Work Dis. /mm | Grid size/mm | $I_{\text{max}} / \mu\text{A}$ | FWHM_X /mm | FWHM_Y /mm | $r_{\text{max}} /(\text{nm} \cdot \text{s}^{-1})$ | η_x / mm | η_y / mm |
| 130 | 1 000 | 100 | 3 | 20 | 10 | 5.663 | 9.121 | 9.082 | 2.326 | 3.62 | 3.60 |
| 130 | 1 000 | 100 | 4 | 15 | 10 | 6.719 | 5.82 | 5.742 | 2.71 | 2.31 | 2.28 |
| 170 | 1 000 | 100 | 4 | 15 | 10 | 7.397 | 8.17 | 8.248 | 2.935 | 3.24 | 3.27 |
| 170 | 1 000 | 100 | 5 | 15 | 10 | 7.945 | 7.559 | 7.593 | 3.087 | 3.00 | 3.01 |
| 170 | 1 000 | 100 | 5 | 10 | 10 | 8.945 | 6.784 | 6.762 | 3.596 | 2.69 | 2.68 |

3.1 去除函数计算

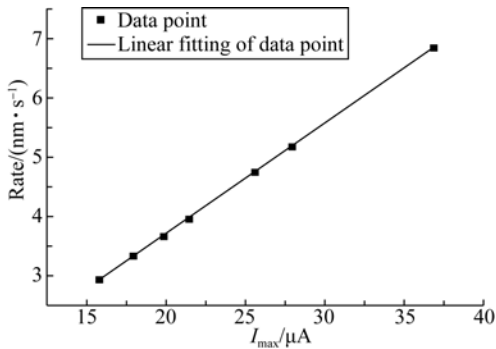
离子束抛光过程中,由离子源发射出的离子束流具有近高斯型空间分布,由溅射理论可知它能够在光学表面形成具有近高斯型分布的去除函数,因此在实验室坐标系下离子束抛光的去除函数近似为:

$$R(x, y) = r_{\text{max}} \exp \left\{ -\frac{x^2}{2\eta_x^2} - \frac{y^2}{2\eta_y^2} \right\}, \quad (9)$$

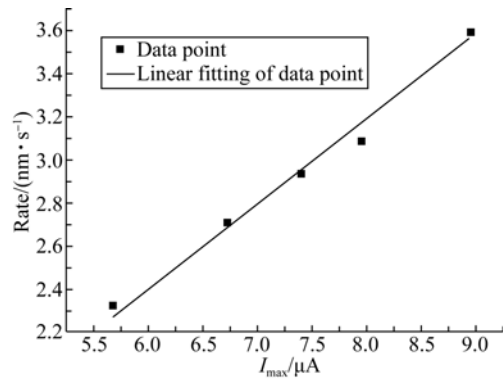
其中: $R(x, y)$ 为离子束抛光去除函数, r_{max} 为材料去除率峰值, η_x, η_y 分别为去除函数在 x, y 方向上的高斯分布系数。由材料去除基理式(3)与式(5)可知,在入射束流能量一定时,材料去除率与离子束流浓度成正比;由式(7)可知,法拉第杯扫描得到的电流值与入射离子数量成正比,由此可得入射角度相同时材料去除率与电流值成正比,即材料相同时有:

$$r_{\text{max}} \propto I_{\text{max}}. \quad (10)$$

由此可见,在实际应用中可以直接由法拉第杯测量得到的电流峰值计算得到去除函数峰值,但计算的前提是标定电流峰值与去除函数峰值两者之间的比例系数。为标定法拉第杯的扫描结果与去除函数间的比例系数,本实验对表 1、表 2 中的实验结果分别进行线性拟合,拟合结果如图 3 所示。



(a) 硅
(a) Silicon



(b) 融石英
(b) Fused silica

图 3 材料去除率峰值与法拉第杯扫描电流峰值的关系
Fig. 3 Relation between peak value of removal functions and peak value of Faraday scan results

由拟合结果得到在离子能量为 1 keV 时,材料的去除率峰值与法拉第杯扫描结果峰值间的关系为:

$$r_{\text{Si}} = 0.18566 I_{\text{max}}, \quad (11)$$

$$r_{\text{fused Si}} = 0.39912 I_{\text{max}}, \quad (12)$$

式中: r_{Si} 和 $r_{\text{fused Si}}$ 分别为硅和融石英的材料去除率。其线性拟合精度误差均优于 1%,考虑到实际加工中离子源发射束流的正常扰动,此拟合结果精度能够满足高精度加工的要求。对于斜入射情况可以利用 TRIM 软件分别仿真入射角度为 0° 以及 θ 时的溅射产额, C_θ 为:

$$C_\theta = \frac{Y_\theta}{Y_0}, \quad (13)$$

其中: Y_0, Y_θ 分别为正入射与以 θ 角入射时的溅射产额。求得 C_θ 后,结合上述计算结果与式(6)可求得斜入射时的材料去除率峰值。

去除函数的另一关键指标为半高全宽(Full Width Half Maximum, FWHM)。由表 1、表 2 中数据可知,去除函数的 FWHM 与法拉第杯扫描

的 FWHM 并不相同,其原因主要有两个:(1)法拉第杯扫描结果描述的是带正电的 Ar^+ 的空间分布,而去除函数实验中需要中和带正电的离子,进而以中性离子实现材料去除。在中和过程中,电子与离子束流相匹配,对离子束流的空间分布会产生一定的影响,从而使得中性离子束流与正电荷离子束流的 FWHM 有所不同;(2)在离子束入射到工件表面的溅射过程中,形成的材料去除量在测量过程中存在误差,从而使材料去除量的检测结果与法拉第杯的扫描结果不相同。由于以上因素的影响比较复杂,为了简化计算,本文利用如下对于硅、融石英材料均适用的公式来计算去除函数的 FWHM。

$$\frac{I_{\max} H_F}{I_{\text{HR}} H_R} = C, \quad (14)$$

其中: I_{\max} , H_F 分别为法拉第杯的扫描电流峰值和扫描束流 FWHM, I_{HR} 为材料去除率等于去除函数峰值一半处的法拉第杯的扫描电流值, H_R 为去除函数 FWHM, C 为与材料相关的常数。利用式(14)便可由法拉第杯的扫描结果计算得到其对应的去除函数的 FWHM。综上所述,由离子束空间分布计算其对应的去除函数主要包括以下步骤:首先通过实验标定法拉第杯的扫描电流峰值与去除函数峰值,拟合求得二者之间的比例系数。式(11)、式(12)为经过标定的硅、融石英材料去除率峰值的求解公式,将法拉第的扫描电流峰值带入其中能够得到其对应的材料去除率峰值 r_{\max} ,若为斜入射还需将 r_{\max} 乘以斜入射影响因子 C_0 ;其次,将测量数据代入式(14),得到去除函数的 FWHM H_R ,由此得到去除函数的高斯分布系数 η_x, η_y ;最后将上述计算结果代入式(9),便可得

到与束流空间分布对应的去除函数。

3.2 计算误差分析

利用上述方法计算表 1、表 2 中的法拉第杯扫描得到的电流值分布,结果分别如表 3、表 4 所示。将所得到的去除函数信息代入式(15)得到单位时间的体积去除率:

$$V = \iint_S R dxdy, \quad (15)$$

其中: V 为单位时间的体积去除率, S 为去除函数作用区间, R 为去除函数分布。由计算结果可知,对硅材料去除函数的计算精度较高,峰值与 FWHM 的计算误差均优于 1%,单位时间内体积去除率的计算精度优于 2%,能够满足高精度光学加工对于确定性去除函数的要求。

本文中计算去除函数的误差来源主要有:(1)离子源工作状态扰动带来的随机误差,相同工作参数下的离子源发射出的离子束流分布会有微小扰动,对扫描测量结果本身存在一定的干扰,因此实验中需在离子源进入稳定工作状态后多次测量取平均值,以消除随机误差;(2)法拉第杯扫描测量过程中存在的测量误差,与法拉第杯的测量精度与扫描过程中离子源的定位精度有关,属于测量系统误差。实验中应用的法拉第杯扫描误差优于 1%;(3)由实验数据标定束流峰值与材料去除率峰值系数时产生的计算拟合误差,试验中利用 Origin 绘图软件计算的拟合误差均小于 1%,对实际计算结果的影响有限;(4)束流 FWHM 计算式引入的计算误差,此误差小于 1%。因此计算结果与测量结果的整体误差在 2% 以内,计算结果比较可靠,能够应用于实际的抛光过程中。

表 3 去除函数计算值与测量值对比(硅)

Tab. 3 Comparison between calculated value and measured value of removal function (silicon)

| Measured data of removal function | | | | Calculated data of removal function | | | | Calculation error |
|--|--------------------|--------------------|--|--|--------------------|--------------------|--|-----------------------------|
| r_{\max} /($\text{nm} \cdot \text{s}^{-1}$) | η_x/mm | η_y/mm | Volume removal rate/($\text{mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$) | r_{\max} /($\text{nm} \cdot \text{s}^{-1}$) | η_x/mm | η_y/mm | Volume removal rate/($\text{mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$) | of volume removal rate/% |
| 2.942 | 2.49 | 2.480 | 0.006 870 | 2.926 | 2.51 | 2.50 | 0.006 921 | 0.74 |
| 3.335 | 8.61 | 8.740 | 0.094 661 | 3.322 | 8.66 | 8.73 | 0.094 712 | 0.54 |
| 3.664 | 7.82 | 8.030 | 0.086 748 | 3.68 | 7.84 | 7.75 | 0.084 397 | 1.71 |
| 3.956 | 7.83 | 7.75 | 0.090 490 | 3.977 | 7.81 | 8.02 | 0.093 952 | 1.83 |
| 4.751 | 7.03 | 7.20 | 0.090 678 | 4.749 | 7.06 | 7.24 | 0.091 442 | 0.85 |
| 5.182 | 19.02 | 19.22 | 0.714 152 | 5.181 | 18.91 | 19.14 | 0.707 171 | 0.98 |
| 6.849 | 7.65 | 7.56 | 0.149 337 | 6.844 | 7.58 | 7.55 | 0.147 572 | 1.21 |

表 4 去除函数计算值与测量值对比(融石英)

Tab. 4 Comparison between calculated value and measured value of removal function (fused silica)

| Measured data of removal function | | | | Calculated data of removal function | | | | Calculation error of volume removal rate/% |
|---|--------------------|--------------------|---|---|--------------------|--------------------|---|--|
| r_{max} /($\text{nm} \cdot \text{s}^{-1}$) | η_x/mm | η_y/mm | Volume removal rate/($\text{mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$) | r_{max} /($\text{nm} \cdot \text{s}^{-1}$) | η_x/mm | η_y/mm | Volume removal rate/($\text{mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$) | |
| 2.326 | 3.62 | 3.60 | 0.011 428 | 2.260 | 3.60 | 3.61 | 0.011 544 | 1.18 |
| 2.710 | 2.31 | 2.28 | 0.005 371 | 2.682 | 2.32 | 2.25 | 0.005 275 | 1.78 |
| 2.935 | 3.24 | 3.27 | 0.011 731 | 2.953 | 3.23 | 3.31 | 0.011 897 | 1.42 |
| 3.087 | 3.00 | 3.01 | 0.010 508 | 2.963 | 2.98 | 3.03 | 0.010 680 | 1.64 |
| 3.596 | 2.69 | 2.68 | 0.009 783 | 3.570 | 2.63 | 2.73 | 0.009 656 | 1.30 |

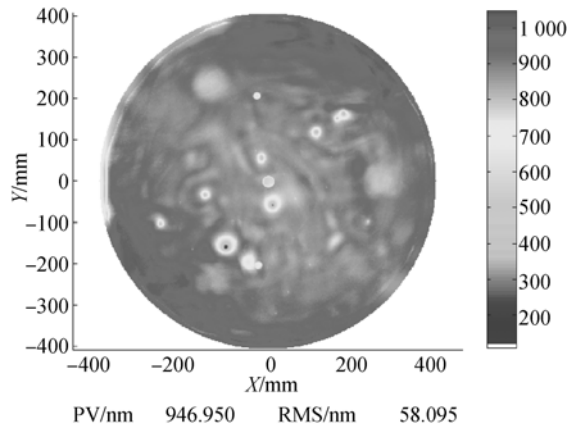
3.3 离子束抛光实验

由于斜入射时材料去除率有所提升,有助于提高光学加工效率,因此采用斜入射抛光平面更为理想。抛光实验选用 $\Phi 800 \text{ mm}$ 碳化硅表面硅改性层平面镜,初始面形误差 RMS 值为 57.886 nm 。斜入射时设定入射角度为 30° ,应用 TRIM 软件仿真得到此时 C_θ 约为 1.65,法拉第杯的扫描结果及其去除函数的计算值与测量值如表 5 所示。由此可见,采用离子束空间分布计算法得到的去除函数与传统去除函数实验测量法十分接近,材料体积去除率差别仅为 0.35% ,因此计算得到的去除函数信息能够用于实际光学加工。

由 CCOS 理论可知,光学加工中表面材料的去除量 $E(x, y)$ 等于去除函数 $R(x, y)$ 与驻留时间函数 $D(x, y)$ 沿加工路径的卷积,即:

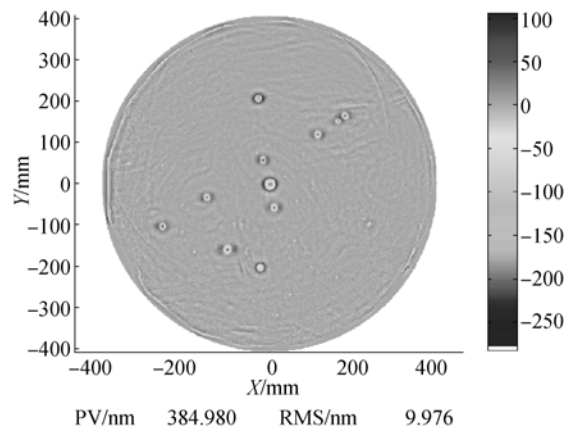
$$E(x, y) = R(x, y) \otimes D(x, y), \quad (16)$$

其中预期材料去除量 $E(x, y)$ 能够由干涉测量结果与目标面形得到。通过上述方法计算得到去除函数 $R(x, y)$,由式(16)能够解算出加工过程中驻留时间分布 $D(x, y)$,再利用驻留时间分布生成加工文件实现对工件的加工。图 4 为待加工表面的面形误差分布的仿真加工结果,仿真前面形误差 RMS 值为 58.095 nm ,仿真后表面面形误差 RMS 值为 9.976 nm 。对实验平面镜进行离子束抛光实验,应用表 5 中的计算结果求解加工驻留时间的分布,经过两次迭代 40 h 抛光,加工后面形误差 RMS 值达到 11.837 nm ,如图 5 所示。加工收敛率达到 4.89% 。



(a) 待加工面形误差

(a) Original shape error



(b) 采用计算值仿真结果

(b) Results of simulation by calculated data

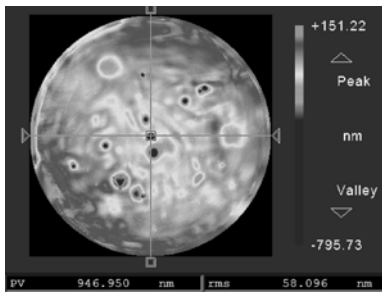
图 4 应用测量值与计算值仿真加工结果图

Fig. 4 Simulation results by measured data and calculated data

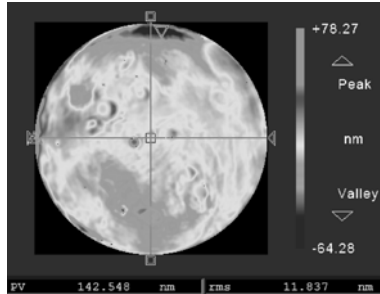
表 5 离子束流以 30°入射时法拉第杯的扫描结果与去除函数结果

Tab. 5 Removal function results and Faraday cup scan results with 30° ion beam angle (silicon)

| Faraday cup scan | | | Removal function | | | |
|------------------|-----------|-----------|-----------------------------|-------------|-------------|------|
| $I_{max}/\mu A$ | FWHM_X/mm | FWHM_Y/mm | $r_{max}/(nm \cdot s^{-1})$ | η_x/mm | η_y/mm | |
| | | | Calculated value | 5.70 | 8.28 | 9.38 |
| 18.563 | 20.886 | 23.655 | Measured value | 5.68 | 8.27 | 9.40 |
| | | | Volume error (%) | | 0.35 | |



(a) 初始面形 RMS=57.886 nm



(b) 抛光结果 RMS=11.837 nm



(c) 离子束抛光过程

(a) Original shape error RMS of 57.886 nm (b) Polishing result for RMS of 11.837 nm (c) Polishing process

图 5 $\Phi 800$ mm 硅平面镜加工的实验结果

Fig. 5 Polishing results $\Phi 800$ mm silicon flat mirror

利用法拉第杯的扫描结果计算离子束加工光学表面的流程如图 6 所示。

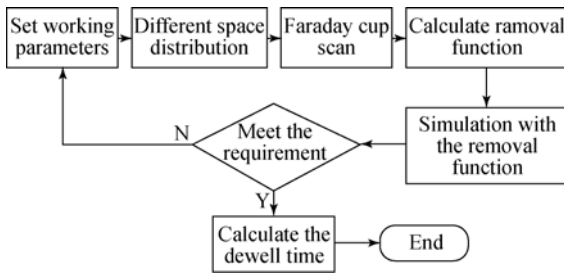


图 6 利用法拉第杯扫描计算去除函数流程

Fig. 6 Flow chart of calculation of removal function by results of Faraday scan

4 结 论

本文基于离子束抛光材料去除 Sigmund 溅射理论,分析了离子束流空间分布、入射角度等参数与离子束抛光去除函数的关系,提出了利用离子束流空间分布计算离子束抛光去除函数的模型,并利用法拉第杯扫描离子束流,获得离子束流

的空间分布;然后,结合入射角度等入射参数进一步计算得到了不同离子源工作参数及入射状态对应的离子束抛光去除函数。分别对硅与融石英材料进行了去除函数实验。实验表明:对于能量一定的正入射离子束流,去除函数的去除率峰值与法拉第杯的扫描电流峰值成正比;通过扫描数据计算得到去除函数的 FWHM,去除函数单位时间的体积去除率的计算误差优于 2%,满足实际的光学加工需求。选用 $\Phi 800$ mm、初始面形误差 RMS 值为 57.886 nm 的碳化硅表面硅改性层平面镜进行了离子束抛光实验。考虑到斜入射会提升加工效率,采用斜入射式抛光,设定离子束流入射角为 30°,在相同工作参数下去除函数的测量值与计算值的体积去除率差为 0.35%,应用去除函数计算值求得了加工驻留时间分布。最后,对此平面镜进行抛光实验,经过两次迭代,面形误差 RMS 由 57.886 nm 收敛至 11.837 nm,收敛率达到 4.89。由此表明,利用离子束流空间分布计算离子束抛光去除函数的方法可以满足加工要求,本文研究成果对于离子束抛光具有指导意义。

参考文献:

- [1] ALLEN L N. Progress in ion figuring large optics [C]. *Laser-Induced Damage in Optical Materials: 1994 International Society for Optics and Photonics*, 1995: 237-247.
- [2] DEMMLER M, ZEUNER M, LUCA A, *et al.*. Ion beam figuring of silicon aspheres [J]. *SPIE*, 2011,7934: 793416-793416-6.
- [3] GREENLEAF A H. Computer-controlled optical surfacing [C]. 1980 *Technical Symposium East. International Society for Optics and Photonics*, 1980: 41-55.
- [4] 康健, 宣斌, 谢京江. 表面改性碳化硅基底反射镜加工技术现状 [J]. *中国光学*, 2013, 6(6): 824-833.
- KANG J, XUAN B, XIE J J. Manufacture technology status of surface modified silicon carbide mirrors [J]. *Chinese Optics*, 2013,6(6): 824-833. (in Chinese)
- [5] 王旭. 使用优化的固着磨料磨盘全口径加工碳化硅反射镜 [J]. *光学精密工程*, 2012, 20(10): 2123-2131.
- WANG X. Fabrication of SiC mirror in full aperture with optimized fixed abrasive polishing pad [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(10): 2123-2131. (in Chinese)
- [6] 张峰. 非球面碳化硅表面硅改性层的数控化学机械抛光 [J]. *光学精密工程*, 2013, 21(12): 3015-3020.
- ZANG F. Computer-controlled chemical mechanical polishing of silicon modification layer on aspheric silicon carbide surface [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(12):3015-3020. (in Chinese)
- [7] 李锐钢, 郑立功, 张峰, 等. 大口径高陡度离轴非球面精磨阶段的数控加工 [J]. *光学精密工程*, 2007, 15(5): 633-639.
- LI R G, ZHENG L G, ZHANG F, *et al.*. Computer controlled manufacturing during fine grinding stage of highly steep off-axis asphere with large aperture [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,15(5):633-

639. (in Chinese)

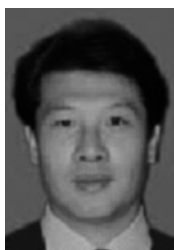
- [8] CSAHOK Z, FARKAS Z, MENYHARD M, *et al.*. Surface morphology development during ion sputtering: roughening or smoothing? [J]. *Surface Science*, 1996, 364(2): L600-L604.
- [9] HAENSEL T, NICKEL A, SCHINDLER A. Ion beam figuring of strongly curved surfaces with a (x, y, z) linear three-axes system [C]. *Optical Fabrication and Testing, Optical Society of America*, 2008.
- [10] GHIM Y S, YOU S J, RHEE H G, *et al.*. Ultra-precision surface polishing using ion beam figuring [C]. *6th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies (AOMATT 2012), International Society for Optics and Photonics*, 2012: 841610-841610-4.
- [11] LIAO W, DAI Y, XIE X, *et al.*. Corrective capability analysis and machining error control in ion beam figuring of high-precision optical mirrors [J]. *Optical Engineering*, 2012, 51(3): 033402-1-8.
- [12] 廖文林, 戴一帆, 周林, 等. 离子束抛光加工矩形离轴非球面镜 [J]. *国防科技大学学报*, 2011, 33(1):100-104.
- LIAO W L, DAI Y F, ZHOU L, *et al.*. Ion beam figuring for rectangular off-axis aspheric mirrors [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2011, 33(1): 100-104. (in Chinese)
- [13] SIGMUND P. *Elements of Sputtering Theory* [M]. 2009.
- [14] MAKEEV M A, CUERNO R, BARABÁSI A L. Morphology of ion-sputtered surfaces [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2002, 197(3): 185-227.
- [15] SIGMUND P. *Sputtering by Ion Bombardment Theoretical Concepts* [M]. Berlin:Springer Berlin Heidelberg, 1981.
- [16] BROWN K L, TAUTFEST G W. Faraday-cup monitors for high-energy electron beams [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1956, 27(9): 696-702.

作者简介:



唐 瓦(1988—),男,博士研究生,主要从事光学超精密加工和检测的研究。
E-mail: tangwtang@126.com

导师简介:



张学军(1968—),男,博士,研究员,主要研究方向为大口径非球面加工与检测、新型空间反射镜制造、空间相机总体设计等。E-mail: zxj@ciomp.ac.cn