

# 单晶硅柱面反射镜离子束倾斜入射加工工艺优化

宋 辞<sup>1,2,3\*</sup>, 田 野<sup>1,2,3</sup>, 石 峰<sup>1,2,3</sup>, 张 坤<sup>1,2,3</sup>, 沈永祥<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>国防科技大学智能科学学院, 湖南 长沙 410073;

<sup>2</sup>湖南省超精密加工技术重点实验室, 湖南 长沙 410073;

<sup>3</sup>装备综合保障技术重点实验室, 湖南 长沙 410073

**摘要** 针对单晶硅柱面镜加工过程中面临的加工效率低、加工精度差以及表面质量难控等问题,提出采用离子束倾斜入射的方法来进行单晶硅柱面镜的加工工艺优化。通过建立离子束倾斜入射的去除函数理论模型,揭示去除效率同入射角度的关联规律;通过分析离子束倾斜入射的微观形貌作用机理,揭示表面质量同入射角度的关联规律;综合优化去除效率和表面质量,获得倾斜入射的最佳入射角度,并建立基于离子束倾斜入射的新工艺路线。在一块尺寸为100 mm×100 mm的单晶硅凸柱面镜上采用新工艺路线进行加工实验,结果表明:在保证加工精度和表面质量的情况下,加工时间节约53.7%,验证了离子束倾斜入射加工的先进性。

**关键词** 光学设计; 离子束; 倾斜入射; 单晶硅; 柱面镜; 去除效率; 表面质量

中图分类号 TH162

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1222001

## Process Optimization for Cylindrical Single-Crystal Silicon Mirror with a Tilted Incident Ion Beam Figuring

Song Ci<sup>1,2,3\*</sup>, Tian Ye<sup>1,2,3</sup>, Shi Feng<sup>1,2,3</sup>, Zhang Kun<sup>1,2,3</sup>, Shen Yongxiang<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>College of Intelligent Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China;

<sup>2</sup>Hunan Provincial Key Laboratory of Ultra-Precision Machining Technology, Changsha, Hunan 410073 China;

<sup>3</sup>Laboratory of Science and Technology on Integrated Logistics Support, Changsha, Hunan 410073, China

**Abstract** In the fabrication of cylindrical single-crystal silicon mirrors, there are many disadvantages, including low removal efficiency, poor figuring accuracy, and difficult surface-quality controllability. Herein, ion-beam figuring (IBF) with a titled incident beam was proposed to optimize the process technology of fabricating cylindrical single-crystal silicon mirrors. First, the theoretical model of the tilted incident IBF removal process was established to determine the relationship between removal efficiency and incident angle. Second, when the ion beam was incident obliquely, the mechanism of the microcosmic morphology was also analyzed to determine the relationship between surface quality and incident angle. Finally, the removal efficiency and surface quality were comprehensively optimized to obtain the optimal incident angle for the tilted incident IBF process, and an innovative process technology based on tilted incident IBF was proposed. A convex cylindrical single-crystal silicon mirror with dimensions of 100 mm×100 mm was tested using the tilted incident IBF process. The total machining time was reduced by 53.7% using the titled incident incident IBF process compared with that using the vertical incident IBF process. Experimental results indicate that the tilted incident IBF process can not only improve the machining efficiency but also obtain high accuracy and quality surface.

**Key words** optical design; ion beam; tilted incidence; single crystal silicon; cylindrical mirror; removal efficiency; surface quality

**OCIS codes** 220.4610; 220.5450; 140.3070; 240.5450

收稿日期: 2020-03-10; 修回日期: 2020-03-18; 录用日期: 2020-03-24

基金项目: 国家自然科学基金(51775551, U1801259, 51835013)

\* E-mail: songci@nudt.edu.cn

## 1 引 言

随着国防科技的发展,高能激光系统凭借其“发现即摧毁”的超快速毁伤能力和超高的效费比,有望替代现有的热化学毁伤,成为新型常规对抗形态的关键武器之一<sup>[1-5]</sup>。高能激光武器系统中的激光器系统一直以来是激光器发生器与能量传输系统的核心,而其中光学元件的精度与激光负载能力已成为制约激光系统实际性能的瓶颈<sup>[6]</sup>。光学元件需要在高能量激光束的辐照下实现高精度、高稳定性的光束传输,而在光束传输过程中,元件精度会影响光束传输质量,且其激光负载能力也至关重要,一旦激光负载能力低于指标要求,元件就会在高能激光辐照下发生一系列元件损伤与失效等问题,进而制约激光器出光时间、输出功率的进一步提升。频发的激光损伤需要频繁地更换元件,这不仅降低了系统可靠性,还增加了使用成本。

高能激光系统最初使用铜基反射镜<sup>[7]</sup>,其反射率只有 98%左右,能量吸收率高达 1.5%,并需要庞大的水冷系统,但仍然存在严重的热变形和激光损伤问题。1975 年左右,美国海军实验室采用金属钼作为反射镜基底材料<sup>[8]</sup>,元件整体反射率可以达到 99.8%左右,吸收率可达  $1680 \times 10^{-6}$ 。当时研究者就已发现,基底表面加工质量较差是造成能量吸收和元件损伤的主要原因<sup>[9]</sup>。在激光辐照下,加工过程中带来的裂纹、划痕等加工缺陷和杂质污染等均会诱发元件的激光损伤。单晶硅由于具有密度低、机械强度高、热稳定性好等优点,成为高能激光系统中光学元件基底的理想材料而被广泛应用。随着激光技术的发展,高能激光武器系统要求光学元件形状复杂,元件表面加工面形控制精度高,为了实现低能量吸收,要求其表面加工粗糙度极低,表面加工缺陷近乎于零,以实现超高反射率和高能量传输比的要求。例如:为实现激光光束质量整形,采用的单晶硅柱面镜要求面形精度优于  $\lambda/50$  RMS(Root Mean Square,均方根值),表面粗糙度优于 0.5nm RMS,表面光洁度达到 I 级。

传统的单晶硅反射镜加工方法主要包括超精密磨削和化学机械抛光。超精密磨削在面对平面单晶硅磨削时展现出比较强的缺陷控制能力<sup>[10-12]</sup>,但在曲面单晶硅磨削时还未能很好地解决亚表面损伤问题。化学机械抛光借助于磨粒的机械摩擦作用和抛光液的化学腐蚀作用来实现单晶硅表面的材料去除,以实现无加工缺陷的超光滑表面<sup>[13]</sup>,但目前还

存在去除效率低、曲面适应性弱等缺点。总的来说,这两种方法目前针对小口径平面单晶硅元件加工时具有较好的效果,但对大口径单晶硅曲面元件时特别是柱面元件加工时效果欠佳。

离子束抛光作为一种非接触式加工手段,利用具有一定能量的离子束流对光学材料进行物理溅射以达到抛光目的,抛光的主要过程是离子与材料原子间的级联碰撞,其中获得足够能量的材料原子逃离工件表面,实现材料去除。相比于传统的抛光方法,离子束抛光具有以下优点<sup>[14-15]</sup>:1)具有非常稳定的高斯型去除函数,通过 CCOS(Computer Controlled Optical Surfacing)方法可以实现材料的高确定性去除;2)由于是非接触式加工,加工过程中与光学元件间没有直接的接触,不会产生边缘效应;3)通过离子的物理溅射作用实现材料去除,避免了传统抛光中抛光液、磨料的影响,加工过程不会引入抛光杂质污染,可以实现低缺陷加工。因此,离子束抛光技术有望成为单晶硅柱面镜加工的有效方法之一。

典型的离子束加工采用垂直入射的方式进行加工,在面向大口径单晶硅柱面镜加工时不仅存在加工效率低、周期长等问题,而且由于曲面光学元件的曲率变化容易引起表面粗糙度的恶化和不同区域的差异,从而降低单晶硅柱面光学元件的性能。为进一步提升离子束的加工能力,本文提出采用离子束倾斜入射的方式对单晶硅柱面镜进行加工,以加工效率和表面质量为目标进行入射角度优化,并建立基于离子束倾斜入射的加工工艺路线,从而提升单晶硅柱面镜的加工能力。

## 2 离子束倾斜入射时材料去除效率分析

### 2.1 离子束倾斜入射时材料去除函数建模

离子束抛光是借助离子的物理溅射作用实现去除材料的目的,其原理是在加工过程中具有一定能量的离子与光学元件表面的原子发生级联碰撞使原子获得能量,而当其原子获得的能量足以克服晶格束缚能、移位能和表面束缚能等约束时,原子逃离元件表面,如图 1 所示。离子束对材料原子的溅射效应,主要依据 Sigmund 溅射模型进行理论分析。基于 Sigmund 溅射模型,离子在入射过程中通过级联碰撞将能量传递给材料原子,并且此能量传递是在一定的空间内进行的,而元件表面某一点处的材料去除效率与该位置所沉积的能量呈正相关<sup>[16]</sup>。

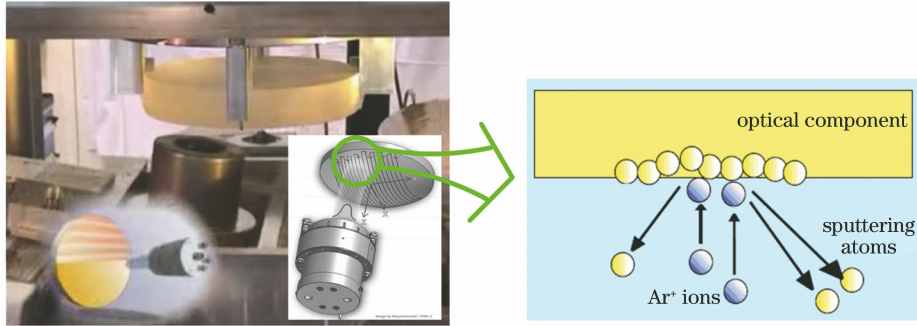


图 1 离子束加工原理图

Fig. 1 Schematic diagram of ion beam figuring

材料去除效率与入射离子束流在表面的能量沉积有关,材料表面某一点所沉积的能量越多,这一点处材料的去除效率越大。离子束去除函数的形状与束流密度分布相一致,而去除效率则与入射离子能

量、入射角度等相关。根据 Sigmund 理论,Bradley 和 Harper 推导建立了均匀离子束溅射至任意表面  $z=h(x,y)$  上的刻蚀速率数学模型<sup>[17]</sup>,即

$$V(\theta, c_1, c_2) = \frac{J}{n} Y(\theta) [\cos \theta - \Gamma_1(\theta) c_1 - \Gamma_2(\theta) c_2], \quad (1)$$

$$\begin{cases} \Gamma_1(\theta) = \frac{A}{B_1} \sin \theta - \frac{B_2}{2B_1} \left(1 + \frac{A^2}{B_1}\right) \cos \theta - \frac{AC}{B_1^2} \left(3 + \frac{A^2}{B_1}\right) \cos \theta \\ \Gamma_2(\theta) = -\frac{\mu^2}{a^2} \cos \theta \left(\frac{1}{2} B_2 + \frac{AC}{B_1}\right) \end{cases}, \quad (2)$$

式中:  $\theta$  为入射角;  $c_1 = a \frac{\partial^2 h}{\partial x^2}$ ,  $c_2 = a \frac{\partial^2 h}{\partial y^2}$ ,  $a$  为离子入射深度,  $h$  为入射表面的高度;  $J$  为离子束流密度;  $n$  为单位体积内的原子数量;  $Y(\theta)$  为均匀离子束倾斜入射至平面的溅射产额;  $A = \left(\frac{a}{\sigma}\right)^2 \sin \theta$ ,  $B_1 = \left(\frac{a}{\sigma}\right)^2 \sin^2 \theta + \left(\frac{a}{\mu}\right)^2 \cos^2 \theta$ ,  $B_2 = \left(\frac{a}{\sigma}\right)^2 \cos \theta$ ,  $C = \frac{1}{2} \cdot \left[\left(\frac{a}{\mu}\right)^2 - \left(\frac{a}{\sigma}\right)^2\right] \sin \theta \cos \theta$ , 其中  $\mu$  为沉积能量在垂直于入射方向上的高斯分布函数,  $\sigma$  为沉积能量在平行于入射方向上的高斯分布函数。

虽然 BH 理论<sup>[17]</sup>是在均匀束流密度下推导的,但是离子束溅射发生在微观领域,而束流密度是宏观变化的,所以束流密度在镜面上任意局部点可以看作是均匀束流,从而可以借助其公式建立去除函数的数学模型,即

$$V(x, y) = \frac{1}{n} Y(\theta) [\cos \theta - \Gamma_1(\theta) c_1 - \Gamma_2(\theta) c_2] J(x \cos \theta, y). \quad (3)$$

周林等<sup>[15]</sup>对公式中  $\Gamma_1(\theta)$ 、 $\Gamma_2(\theta)$  进行了数值计算,

其大小仅在  $10^{-9}$  量级,因而可以忽略这两项对去除函数的影响,(3)式可以简化为

$$V(x, y) = \frac{1}{n} Y(\theta) J(x \cos \theta, y) \cos \theta, \quad (4)$$

当离子束垂直入射工件表面时,  $\theta=0$ ,可以得到去除函数的基本模型,即

$$R(x, y) = \frac{1}{n} Y(0) J(x, y). \quad (5)$$

从(4)式和(5)式可以看出,在离子束垂直入射平面的情形下去除函数与离子束流密度表现出简单的线性关系,即离子束去除函数的体积去除率与溅射产额正相关。但当离子束倾斜入射时,离子束流密度发生变化,由于离子束流的坐标系同工件表面的坐标系以入射角度发生了旋转,不再重合。因此需要对坐标系进行变换,将离子束流坐标系下的离子束流密度空间分布转换为工件坐标系下的离子束流密度分布。

对于空间坐标系变换而言,空间坐标系绕 3 个坐标轴旋转,即绕 X 轴旋转  $\alpha$  角度、绕 Y 轴旋转  $\beta$  角度、绕 Z 轴旋转  $\gamma$  角度,对应的 3 个旋转坐标变化矩阵公式为

$$\mathbf{R}(x, \alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix}, \mathbf{R}(y, \beta) = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix}, \mathbf{R}(z, \gamma) = \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

如图 2 所示,对于离子束倾斜入射情形,假设离子束流空间坐标  $O-X'Y'Z'$  是由工件坐标系  $O-XYZ$  依次绕  $X$  轴旋转  $\alpha$  角度、绕  $Y$  轴旋转  $\beta$  角度、绕  $Z$  轴旋转  $\gamma$  角度得到,则两坐标系的关系可表示为

$$[x, y, z]^T = \mathbf{R}(z, \gamma) \cdot \mathbf{R}(y, \beta) \cdot \mathbf{R}(x, \alpha) \cdot [x', y', z']^T. \quad (7)$$

实际离子束加工中不存在绕  $Z$  轴旋转的情况,即

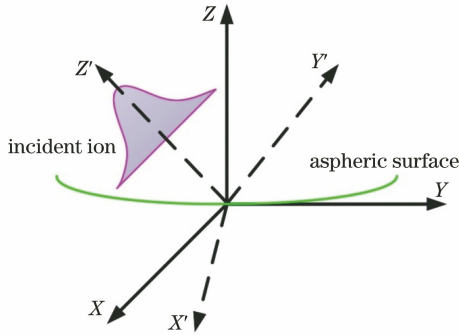


图 2 离子束倾斜入射加工坐标变换示意图

Fig. 2 Schematic diagram of coordinate transformation in tilted incident ion beam figuring process

$\gamma=0$ , 相应的基本旋转矩阵  $\mathbf{R}(z, \gamma)$  是单位矩阵,故(7)式可以简化为

$$[x, y, z]^T = \mathbf{R}(y, \beta) \cdot \mathbf{R}(x, \alpha) \cdot [x', y', z']^T, \quad (8)$$

则两个坐标系坐标之间的对应关系为

$$\begin{cases} x' = x \cos \beta - z \sin \beta \\ y' = x \sin \alpha \sin \beta + y \cos \alpha + z \sin \alpha \cos \beta \\ z' = x \cos \alpha \sin \beta - y \sin \alpha + z \cos \alpha \cos \beta \end{cases}. \quad (9)$$

当离子束作用到曲面上时,离子束流密度会受束散角的影响,考虑束散角的离子束流密度空间分布可以表示为

$$J(x, y, z) = \frac{J_0}{2\pi \left( \eta - \frac{1}{3} z \tan \delta \right)^2} \cdot \exp \left[ -\frac{x^2 + y^2}{2 \left( \eta - \frac{1}{3} z \tan \delta \right)^2} \right], \quad (10)$$

式中: $J_0$  为离子束入射中心点处的离子束流密度; $\eta$  为束流分布的方差; $\delta$  为束散角。

将(9)式代入离子束流密度空间分布方程(10)式,可以得到工件坐标系下离子束流密度的空间分布为

$$J(x, y, z) = \frac{J_0 \cos \alpha \cos \beta}{2\pi \left[ \eta - \frac{\tan \delta}{3} (x \cos \alpha \sin \beta - y \sin \alpha + z \cos \alpha \cos \beta) \right]^2} \times \exp \left\{ -\frac{(x \cos \beta - z \sin \beta)^2 + (x \sin \alpha \sin \beta + y \cos \alpha + z \sin \alpha \cos \beta)^2}{2 \left[ \eta - \frac{\tan \delta}{3} (x \cos \alpha \sin \beta - y \sin \alpha + z \cos \alpha \cos \beta) \right]^2} \right\}. \quad (11)$$

结合(5)式和(11)式即可得到离子束倾斜入射时材料去除函数模型,利用此模型对离子束倾斜入射材料去除的特性进行仿真分析。

### 2.2 离子束倾斜入射时材料去除效率的变化规律

基于工件坐标系下的离子束流密度空间分布模型,分别仿真离子束流密度与不同入射角度之间的关系,入射角度范围为  $0^\circ \sim 89^\circ$ ,可以得到离子束流密度峰值与入射角度的关系曲线,如图 3 所示。为更加直观地观察离子束流密度分布的变化特性,分别仿真获得入射角为  $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$  时的离子束流密度分布图,将离子束流密度归一化后如图 4

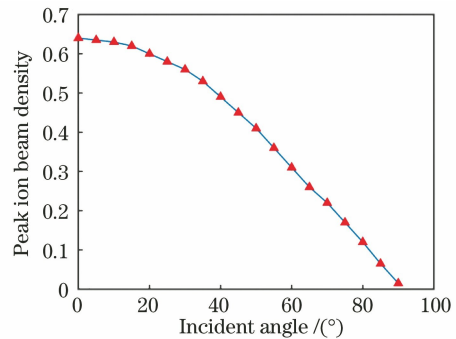


图 3 入射角度对离子束流密度峰值的影响

Fig. 3 Peak ion beam density varying with the incident angle



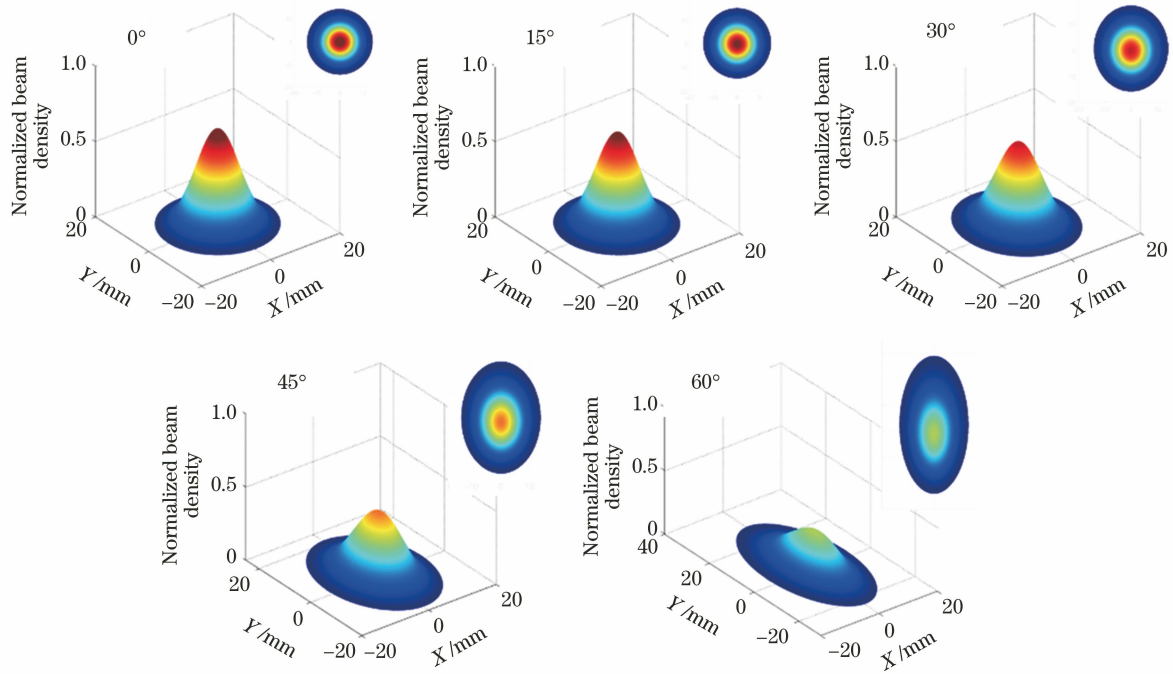


图 4 不同入射角度下归一化离子束流密度分布(0°,15°,30°,45°,60°)

Fig. 4 Normalized beam density distribution versus incident angle (0°, 15°, 30°, 45°, 60°)

所示。从图中可以看出,离子束流密度分布随着入射角度的变化由标准高斯函数向不规则的椭圆高斯函数变化,而束流密度的峰值点随入射角度的增大而减小。

将(11)式代入(5)式,对不同入射角度下的离子束去除函数进行仿真,分别对入射角度从 0°到 85°时的去除函数模型进行求解,得到不同入射角度下离子束去除函数的体积去除率和峰值去除率,变化曲线如图 5(a)所示。从图中可以看出,不论是体积去除率还是峰值去除率,均随着入射角度的增大呈现先增大后减小的趋势,且在 60°附近达到峰值,此时去除函数的体积去除率为垂直入射时的 4.2 倍,峰值去除率为垂直入射时的 2.75 倍。

因此采用离子束倾斜入射加工能够有效提高材

料去除效率。为评估离子束倾斜入射加工的先进性,还采用不同入射角度下的离子束去除函数对同一面形进行仿真加工计算,得到理论驻留时间和残留误差结果,从而可以建立面形精度(PV 表示峰值)、加工时间同入射角度的关系曲线,如图 5(b)所示。可以看出,离子束的加工精度随入射角度的增加而略有变差,但加工时间却大大降低。精度变差主要是由于增大入射角度会导致去除函数束径增大,从而导致修形能力变弱;加工时间降低主要是由于增大入射角度会大大提升去除效率。综合比较来看,采用离子束倾斜入射带来的加工时间降低优势超过面形精度变差的劣势,因此,可以进一步结合表面质量的变化规律对入射角度进行优化。

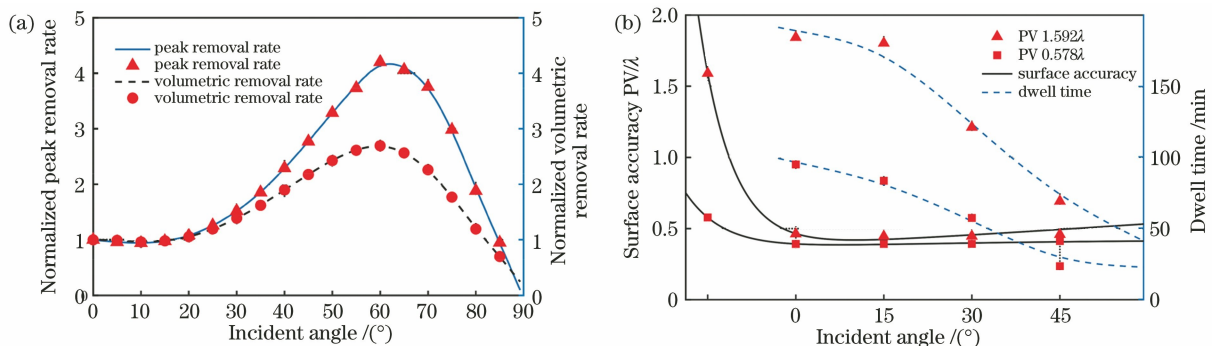


图 5 离子束入射角度的影响曲线。(a)峰值去除率、体积去除率同入射角度的关系曲线;

(b)加工精度、驻留时间同入射角度的关系曲线

Fig. 5 Impact curves of the ion beam incident angle. (a) Peak and volumetric removal rates versus the incident angle;

(b) figuring accuracy and dwell time versus the incident angle

### 3 离子束溅射作用机理及表面质量影响规律

#### 3.1 离子束溅射材料的作用机理

离子束轰击材料表面的过程中, Sigmund 溅射理论描述了入射离子能量在工件表面内部的高斯型分布, 并且指出工件表面某点的材料去除与入射离子在该点所沉积的能量正相关。高斯型的能量沉积分布意味着沉积距离可以用于评判某点处沉积能量的大小<sup>[14]</sup>。当均匀离子束溅射工件表面时, 若工件表面平整即没有凸起或者凹陷时, 离子能量在工件表面各点处的沉积距离应当是一致的, 因此表面各点处具有相同的沉积能量和相同的材料去除速率。当工件表面不平整时, 各点的能量沉积距离会受到表面曲率的影响而具有差异性, 即表现出不同的材

料去除速率。

为了研究波峰波谷等工件表面局部形貌对去除速率的影响, 作以下假设: 3 个相互间隔距离为  $L$  的离子以角度  $\theta$  倾斜入射凸球面和凹球面(表面曲率半径分别为  $R$ 、 $-R$ ), 且其入射深度  $a$  均相等。需要注意的是表面曲率半径  $R$  与入射深度  $a$  的数量级相近, 不能忽略或者简化。如图 6 所示, 很明显,  $\bar{d}_O > \bar{d}_{O'}$  ( $\bar{d}_O$ 、 $\bar{d}_{O'}$  分别为 3 个入射离子在波峰  $O$  和波谷  $O'$  处的能量沉积距离的平均值), 即波谷  $O'$  处具有较短的能量沉积距离, 故波谷处的能量沉积应当比波峰处的强, 波谷处具有更大的材料去除速率。因此, 在局部曲率对材料去除速率的影响下, 离子溅射过程中波谷处将比波峰处去除的材料更多, 波峰波谷的差异变得更大, 即表面粗糙度呈现出恶化的趋势, 即微坑效应。

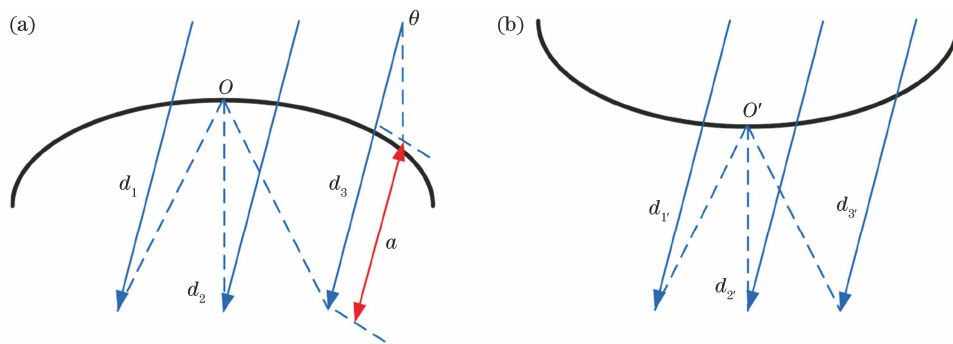


图 6 局部曲率对溅射的影响

Fig. 6 Impact of local curvature on the ion sputtering

表面梯度对于离子束的作用同样具有一定影响, 如图 7(a) 所示, 在离子束倾斜入射的区域, 由于存在表面面形梯度的影响, 局部入射角度将由原来的  $\theta$  增大至  $\theta' = \theta + \alpha$ , 并伴随溅射产额增加。因此, 离子束在溅射具有不同梯度的工件表面时不同梯度的区域具有不同的去除速率, 梯度大的区域比梯度小的区域具有更大的去除速率, 即侧壁相比于平坦区域有更大的去除效率。因此在离子溅射作用下工件表面的凸峰(凹坑)会侧向收缩(扩展), 并最终消失。这是推动表面粗糙度改善的一种平滑作用, 称为削峰效应。当然在表面梯度过大、侧壁上的局部入射角度超过  $80^\circ$  时, 溅射效率显著降低, 削峰效应减弱。另外, 入射离子在大梯度的侧壁区域有可能发生表面反射后再次轰击到工件表面即二次溅射, 这种溅射行为会额外加大凹陷区域的材料去除程度, 加大波峰波谷材料去除速率的差异, 使得峰谷值变大, 表面粗糙度恶化, 如图 7(b) 所示。

当离子束倾斜入射工件表面时, 表面的凹凸不

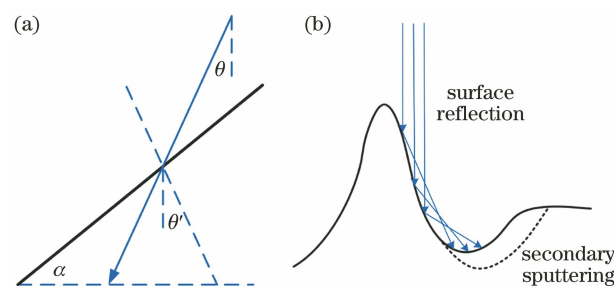


图 7 表面梯度对溅射的影响。(a) 表面梯度对入射角度的影响; (b) 二次溅射

Fig. 7 Impact of surface gradient on the ion sputtering.

(a) Impact of surface gradient on incident angle; (b) secondary sputtering

平会导致凹陷区域被凸起部分遮挡, 这种情况下凹陷区域得到离子溅射的概率大大减小, 被称作遮蔽效应, 如图 8 所示。因此相比于凸起区域, 凹陷区域的离子能量沉积较少, 即凸起区域的去除效率更高, 被优先去除。特别是在大角度掠入射时, 这种效应更加明显, 且在平坦表面反射后发生的二次溅射会

进一步加强表面凸起部位的去除。因此,倾斜入射有助于改善表面粗糙度、平滑表面。

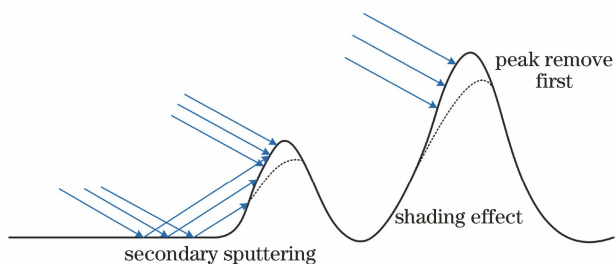


图 8 入射角度对溅射的影响

Fig. 8 Impact of the incident angle on the ion sputtering

综合来说,离子束溅射去除材料的微观作用机制比较复杂,是多因素耦合作用的过程。采用倾斜入射,可能会改变原有垂直入射的作用条件,从而带来表面粗糙度的变化,这个过程中存在一个平衡点,需综合考虑各种因素,使表面质量达到最佳。因此,需要通过实验获取表面质量同入射角度的关联规律,为入射角度优化提供依据。

### 3.2 离子束倾斜入射表面质量演变规律

实验所使用样件为单面抛光的单晶硅,规格为

$\Phi 100\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ ,采用单轴机研磨抛光工艺,使用直径 200 mm 的阻尼布抛光盘进行抛光,抛光后得到表面质量较一致的单晶硅镜,分别采用白光干涉仪 Zygo Newview-700 和原子力显微镜 Dimension Icon 进行表面粗糙度测量。白光干涉仪的测量条件为:10 倍镜头,纵向分辨率 $<0.1\text{ nm}$ ,测量重复性 $<0.01\text{ nm RMS}$ ,测量区域大小为 $0.94\text{ mm} \times 0.70\text{ mm}$ 。原子力显微镜的测量条件为:ScanAsyst 模式,探针型号 TESP-V2,扫描区域大小为 $10\text{ }\mu\text{m} \times 10\text{ }\mu\text{m}$ ,分辨率为 $512\text{ pixel} \times 512\text{ pixel}$ 。两种设备的测量结果分别为 $0.614\text{ nm RMS}$ 和 $0.308\text{ nm RMS}$ ,如图 9 所示。

为了研究入射角度对单晶硅表面质量的影响,实验中使用离子束机床在相同工艺参数、不同入射角度下对单晶硅表面进行处理,实验照片如图 10(a) 所示,在样件表面溅射出 $20\text{ mm} \times 60\text{ mm}$ 的斜面区域,溅射深度由 0 到 500 nm,测量得到溅射后工件表面误差分布如图 10(b) 所示。离子束加工工艺参数如表 1 所示。

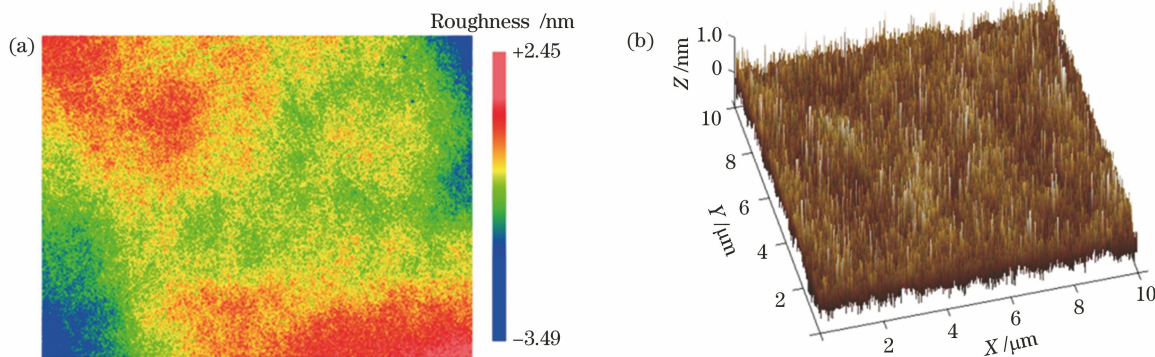


图 9 表面粗糙度测试结果。(a)白光干涉仪测量结果;(b)原子力显微镜测量结果

Fig. 9 Surface roughness results. (a) Interferometer test results; (b) atomic force microscope test results

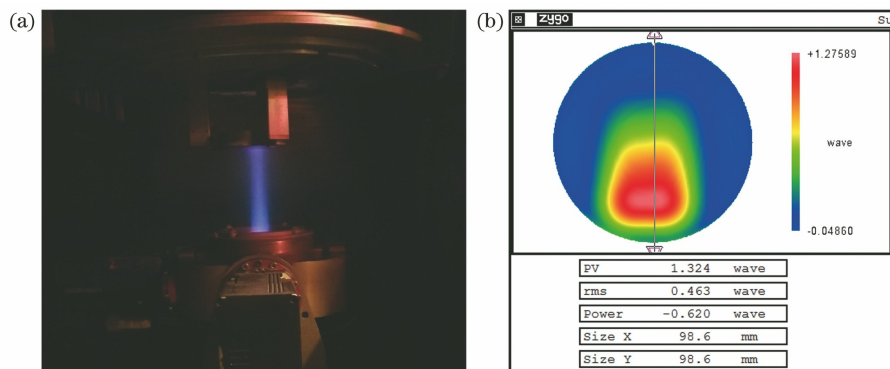


图 10 离子束倾斜入射实验。(a)实验照片;(b)工件面形误差分布

Fig. 10 Tilted incident experiments of ion beam. (a) Experimental photo; (b) surface error map



表 1 离子束加工工艺参数  
Table 1 Process parameters in ion beam figuring process

Beam voltage /V	Anode current /A	Emission current /mA	Acceleration gate voltage /V	Gas flow under the standard conditions /( $\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$ )	Mesh size / mm	Incident angle /( $^{\circ}$ )
800	0.8	30	100	4	30	0/15/30/45/60

将白光干涉仪和原子力显微镜的测试结果分别进行整理,可以得到两种测试条件下表面粗糙度随不同入射角度、不同去除深度的变化曲线,分别如图 11(a)和图 11(b)所示。白光干涉仪的测量结果表明:在不同入射角度和不同去除深度的条件下,表面粗糙度的变化幅值均不超过 0.1 nm,可以认为基

本保持不变,维持在初始水平。原子力显微镜的测量结果表明:表面粗糙度随去除深度的增加而呈现出先增大后减小的趋势,在 100 nm 去除深度时达到最大值,并最终在 500 nm 去除深度时基本恢复到初始水平,其中入射角度为  $60^{\circ}$  时此现象最明显,且最终表面粗糙度变化幅值达到 0.3 nm 以上。

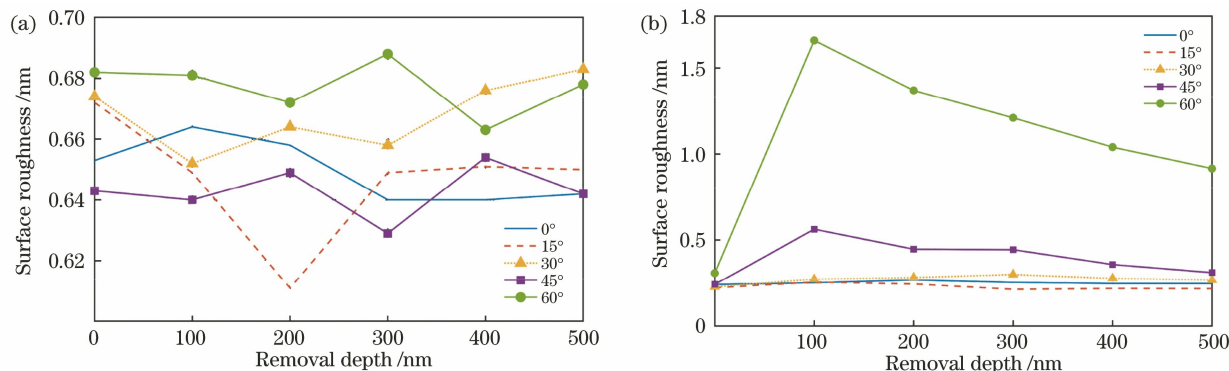


图 11 表面粗糙度变化曲线。(a)白光干涉仪测量曲线;(b)原子力显微镜测量曲线

Fig. 11 Surface roughness variation curve. (a) Variation curve with the interferometer test results; (b) variation curve with the atomic force microscope test results

图 12 给出表面粗糙度变化值随入射角度变化的曲线,由图可以看出,离子溅射过程中不论是表面粗糙度的变化值还是最终表面粗糙度同初始表面粗糙度的差值均随入射角度的增大而增大,在入射角度小于  $45^{\circ}$  时,最终的表面粗糙度的变化可以控制在 0.1 nm 以内,该曲线为入射角度的优化提供了依据。

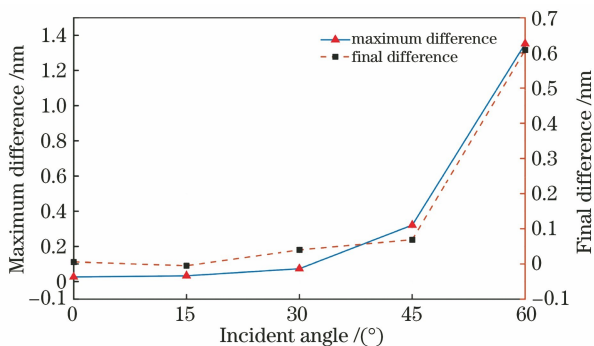


图 12 不同入射角度下的表面粗糙度变化曲线  
Fig. 12 Surface roughness variation curves with different incident angles

## 4 工艺实验验证

### 4.1 基于离子束倾斜入射的工艺流程优化

以加工时间、加工精度和表面质量为优化目标对加工工艺进行优化,基于离子束倾斜入射时入射角度与去除效率的关系曲线和入射角度对面形精度的影响规律,通过理论计算获得时间和精度的优化路线,考虑离子束入射角度对表面质量的作用规律,在优化中加入垂直入射以保证工件表面质量,从而可以建立单晶硅柱面镜的加工工艺流程,如图 13 所示,对该工艺路线后续将采用实验进行评估。

对完成抛光后的单晶硅柱面镜进行加工。对精度达到  $(1\sim 2)\lambda$  PV,表面粗糙度  $R_a$  优于 1 nm 的柱面镜视为初始条件,首先采用氧等离子对单晶硅表面进行清洗,去除表面的污染物,然后采用离子束倾斜入射进行加工,倾斜入射角度综合考虑加工效率和表面粗糙度,最终选取  $45^{\circ}$  作为加工入射角。当柱面镜的加工精度优于  $0.5\lambda$  时,一方面需要进一步提升加工精度,另一方面需要控制表面粗糙度,因此改用垂直入射的方式进行最后的高精度修形,直至加工精度达到既定要求。



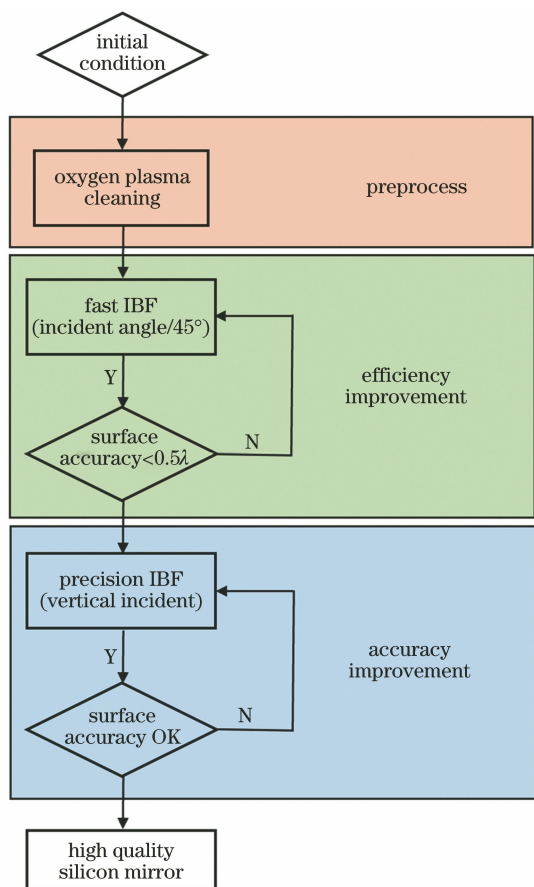


图 13 基于离子束倾斜入射加工的工艺流程图  
Fig. 13 Process flowchart based on the tilted incident ion beam figuring

#### 4.2 单晶硅柱面反射镜的加工实验

采用新建立的加工工艺路线对一块方形的单晶硅凸柱面反射镜进行加工验证,该单晶硅柱面镜的尺寸为 100 mm×100 mm,有效口径为 90 mm×90 mm,曲率半径为 1964 mm,面形精度要求达到  $1/3\lambda$  PV。采用 ZYGO 波面干涉仪和计算机全息图补偿法(CGH)进行单晶硅柱面镜的面形精度测试,采用白光干涉仪 NEWVIEW-700 和原子力显微镜 Dimension Icon 两种设备进行表面粗糙度测试。面形误差分布和表面粗糙度的测试结果如图 14 所示,有效口径的初始面形 PV 值为  $0.786\lambda$ ,表面粗糙度 RMS 值的测试结果分别为 0.529 nm 和 0.326 nm。

首先使用氧等离子体对单晶硅反射镜表面进行预处理,清洗时间为 5 min。然后采用离子束倾斜入射的方式进行加工,入射角度为  $45^\circ$ ,经过 124 min 的加工后,有效口径面形精度达到  $0.371\lambda$  PV,表面粗糙度的 RMS 值分别为 0.570 nm 和 0.248 nm,如图 15 所示。此时按照工艺流程采用离子束垂直入射方式进行加工,经过 100 min 的加工,有效口径面形精度达到  $0.244\lambda$  PV,表面粗糙度的 RMS 值分别为 0.558 nm 和 0.240 nm,如图 16 所示。

该单晶硅柱面镜在离子束倾斜入射和离子束垂直入射两种修形方式的加工总时间为 224 min,面形误差总收敛比达到 3.22。而如果采用传统的工艺流程,即离子束修形阶段全部采用垂直入射方式进

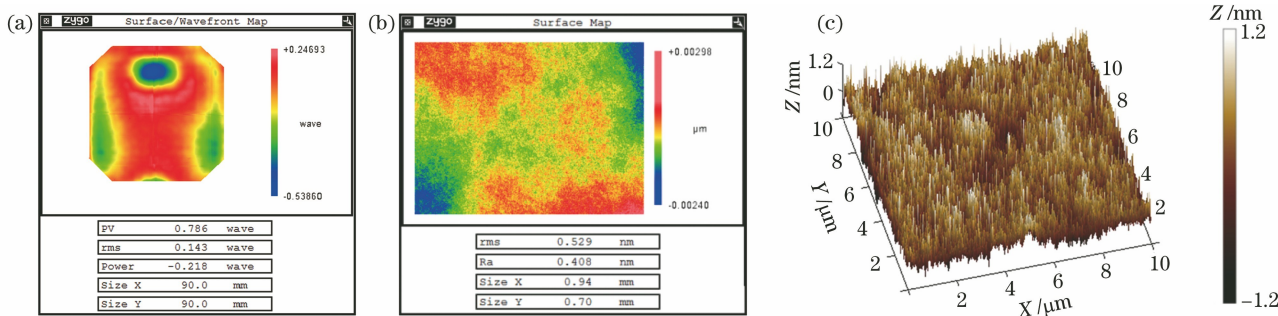


图 14 单晶硅柱面镜的初始面形精度和表面粗糙度。(a)面形误差分布;(b)白光干涉仪表面粗糙度测试结果;(c)原子力显微镜表面粗糙度测试结果

Fig. 14 Initial surface accuracy and surface roughness of the single crystal silicon cylindrical mirror. (a) Surface error map; (b) surface roughness results with the interferometer test; (c) surface roughness results with the atomic force microscope test

行加工,则离子束修形的加工总时间将达到 484 min,新的工艺流程相比原有工艺流程时间缩短 53.7%,并且加工精度和表面质量全部达到要求,故基于离子束倾斜入射的加工工艺路线具有先进性。

## 5 结 论

对离子束倾斜入射方式加工的加工效率和表面质量的影响进行了理论和实验研究,并建立了基于离子束倾斜入射的新加工工艺路线,验证了离子束

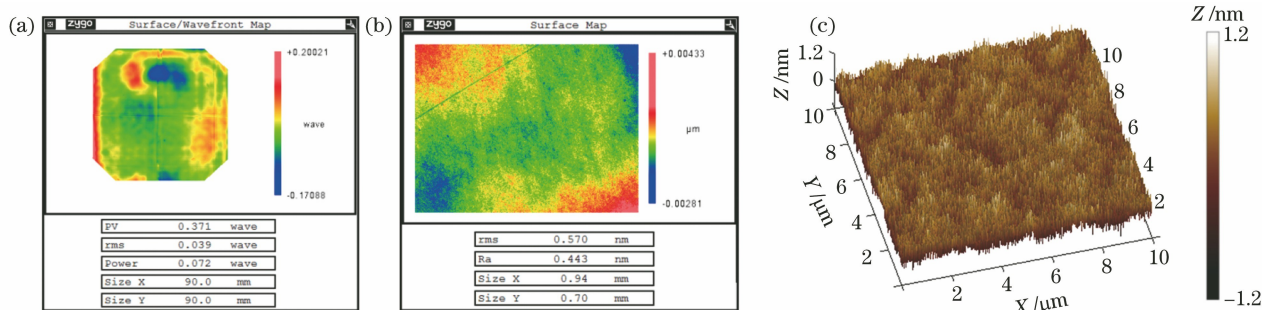


图 15 离子束倾斜入射加工后的面形精度和表面粗糙度。(a)面形误差分布;(b)白光干涉仪表面粗糙度测试结果;(c)原子力显微镜表面粗糙度测试结果

Fig. 15 Surface accuracy and surface roughness with tilted incident ion beam figuring. (a) Surface error map; (b) surface roughness results with the interferometer test; (c) surface roughness results with the atomic force microscope test

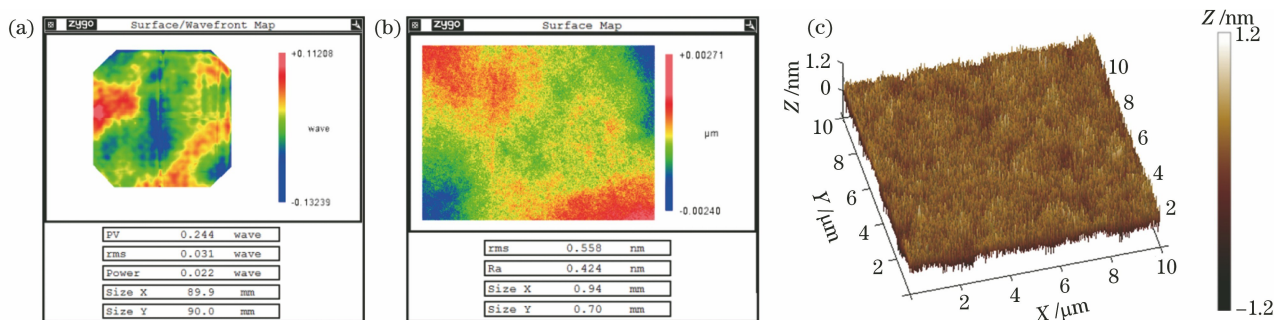


图 16 离子束垂直入射加工后的面形精度和表面粗糙度。(a)面形误差分布;(b)白光干涉仪表面粗糙度测试结果;(c)原子力显微镜表面粗糙度测试结果

Fig. 16 Surface accuracy and surface roughness with vertical incident ion beam figuring. (a) Surface error map; (b) surface roughness results with the interferometer test; (c) surface roughness results with the atomic force microscope test

倾斜入射的加工方式能够大大提升单晶硅柱面镜的加工能力。得到的主要结论如下:

1) 离子束加工的去除效率随入射角度的增加呈现出先增加后降低的趋势,当入射角度为  $60^\circ$  时,体积去除率和峰值去除率均达到最大值,分别为垂直入射的 4.2 倍和 2.75 倍。

2) 离子束加工的表面质量随入射角度的增加逐渐变差,在入射角度小于  $45^\circ$  的条件下表面粗糙度的变化较小,基本可以忽略。

3) 综合考虑加工效率和表面质量的影响规律,确定离子束倾斜入射的最佳入射角度为  $45^\circ$ ,并提出了基于离子束倾斜入射加工的工艺路线,采用该工艺路线对单晶硅柱面镜进行加工实验,有效验证了该工艺路线不仅能够保证加工精度和表面质量,而且能够大大提升加工效率。

### 参 考 文 献

- [1] Hecht J. Beam weapons: the next arms race[M]. New York: Plenum Press, 1984: 23-25.
- [2] Seidel R W. From glow to flow: a history of military laser research and development[J]. Historical Studies in the Physical and Biological Sciences, 1987, 18(1): 111-147.
- [3] Hecht J. Beam: the race to make the laser [J]. Optics and Photonics News, 2005, 16(7): 24-29.
- [4] He Q Y, Zong S G. Research progress and consideration of shipborne laser weapon[J]. Laser & Infrared, 2017, 47(12): 1455-1460. 何奇毅, 宗思光. 舰载激光武器发展进展与思考[J]. 激光与红外, 2017, 47(12): 1455-1460.
- [5] Ren G G, Yi W W, Qi Y, et al. U.S. theater and strategic UVA-borne laser weapon [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(10): 100002.
- [6] Cui Y, He H B, Fan Z X, et al. Development of high energy laser weapon and research of laser protective coatings [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2006, 43(6): 10-13. 崔云, 贺洪波, 范正修, 等. 高能激光武器的发展及卫星激光防护膜的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2006, 43(6): 10-13.
- [7] Larry D, Frank R, Lieto C. Overview of fabrication processes for uncooled laser optics[J]. Proceedings of SPIE, 1995, 2543: 50-58.
- [8] Holmes S J. Dielectric-enhanced mirrors for the 2-6

- region[C]//Glass A J, Guenther A H. Laser induced damage in optical materials. Boulder: NBS Special Publication, 1977.
- [9] Wood R M. Laser damage in optical materials[M]. Boston: Adam Hilger, 1986.
- [10] Zhou L, Kawai S, HONDA M, et al. Research on chemo-mechanical-grinding (CMG) of Si wafer (1st report)[J]. Journal of the Japan Society for Precision Engineering, 2002, 68(12): 1559-1563.
- [11] Zhou L, Shimizu J, Eda H, et al. Research on chemo-mechanical-grinding (CMG) of Si wafer(2nd report)[J]. Journal of the Japan Society for Precision Engineering, 2005, 71(4): 466-470.
- [12] Wang Z G, Kang R K, Zhou P, et al. Ultra-precision grinding of monocrystalline silicon reflector [J]. Optics and Precision Engineering, 2019, 27(5): 1087-1095.  
王紫光, 康仁科, 周平, 等. 单晶硅反射镜的超精密磨削工艺[J]. 光学精密工程, 2019, 27(5): 1087-1095.
- [13] Zhao Y W, Chang L, Kim S H. A mathematical model for chemical-mechanical polishing based on formation and removal of weakly bonded molecular species[J]. Wear, 2003, 254(3/4): 332-339.
- [14] Haensel T, Seidel P, Nickel A, et al. Deterministic ion beam figuring of surface errors in the sub-millimeter spatial wavelength range[C]//Proceedings of the 6th International Conference European Society for Precision Engineering and Nanotechnology, May 28-June 1, 2006, Baden bei Wien, Vienna, Austria. [S. l. : s. n.], 2006: 276-279.
- [15] Zhou L. Study on theory and technology in ion beam figuring for optical surfaces[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008.  
周林. 光学镜面离子束修形理论与工艺研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2008.
- [16] Sigmund P. Theory of sputtering. I. sputtering yield of amorphous and polycrystalline targets[J]. Physical Review, 1969, 184(2): 383-416.
- [17] Bradley R M, Harper J M E. Theory of ripple topography induced by ion bombardment[J]. Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films, 1988, 6(4): 2390-2395.