

光阑法变口径离子束修形仿真研究

康乐, 蒋世磊*, 孙国斌, 张余豪, 刘卫国

西安工业大学光电工程学院, 陕西 西安 710021

摘要 采用一种仿真优化驻留时间分布和修形工艺的方法。通过在离子源出光口处添加光阑来改变离子束的束形, 在 MATLAB 软件上模拟不同光阑尺寸的离子束并按照不同的叠加间距对其进行修形仿真。仿真过程中, 引入修正法来获得驻留时间分布和去除面形残差分布并分析其去除规律, 从而确定最佳的光阑尺寸、叠加间距和驻留时间分布。融石英平面的初始面形峰谷值为 1079.59 nm, 方均根值为 304.95 nm, 直径为 120 mm, 在模拟仿真的基础上对其进行修形。经 13 h 修形后, 面形的精度峰谷值提高到 95.62 nm, 方均根值提高到 8.99 nm, 面形的方均根值收敛比达到 33.92。

关键词 图像处理; 离子束修形; 光阑; 叠加间距; 修正法

中图分类号 TH161

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0810016

Simulation Study on Ion Beam Polishing with Changing Aperture by Diaphragm Method

Kang Le, Jiang Shilei*, Sun Guobin, Zhang Yuhao, Liu Weiguo

School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an, Shaanxi 710021, China

Abstract A simulation method is used to optimize the residence time distribution and modification process. The beam shape of the ion beam is changed by adding a diaphragm at the light exit of the ion source. Ion beams with different apertures are simulated on MATLAB software and the ion beam is modified according to different stacking intervals. In the simulation process, we introduce a correction method to obtain the residence time distribution and residual distribution of the surface shape remaining after the removal of material. We analyze the removal rules to determine the best aperture size, stacking interval, and residence time distribution. The initial peak and valley value of the fused silica plane is 1079.59 nm, the root mean square value is 304.95 nm, and the diameter is 120 mm. The shape is modified on the basis of simulation. We modify the surface shape on the basis of the simulations. After 13 h of modification, the peak-to-valley accuracy of the surface profile is improved to 95.62 nm, RMS value is improved to 8.99 nm, and RMS value of the convergence ratio of the surface profile is 33.92.

Key words image processing; ion beam shape modification; diaphragm; superimposed spacing; correction method

OCIS codes 100.6890; 220.5450; 220.4610; 350.4600; 350.4800

1 引言

离子束修形作为一种非接触式光学加工方法, 具有加工精度高、去除函数稳定、面形收敛速度快、无边效应和亚表面损伤等特点^[1-2], 不仅广泛应用

于超高精度和超高陡度光学元件的加工, 在微纳制作和特殊功能膜的制备等也具有广泛的应用前景^[3-6]。最近几年, 离子束光阑工具的应用逐渐受到世界各国的关注, 而驻留时间的求解是离子束加工过程的关键步骤之一^[7]。常用的驻留时间求解方法

收稿日期: 2020-08-07; 修回日期: 2020-09-08; 录用日期: 2020-09-14

基金项目: 陕西省教育厅重点实验室科研计划(18JS053)

* E-mail: jiangshilei8@163.com

有傅里叶逆变换法^[8-9]、迭代求解法^[9]和线性矩阵求解法^[10]等。国内基于上述三种方法提出了一些优化算法^[11-14],而且每种方法均取得了一定的进展。相比于研究较多且成熟的驻留时间求解算法,离子束修形仿真的工作却鲜有重视和具体研究。

随着现代计算机技术的进步,仿真技术在工程应用中发挥着越来越重要的作用。众所周知,离子束修形仿真可以实现加工前预测。为了使离子束修形仿真的工作更完善,本文基于光阑法获得变口径离子束并对其修形仿真研究。通过添加光阑来获得去除速率和刻蚀直径各不相同的离子束去除函数,并使用 MATLAB 工具建立去除函数模型。结合不同束径的离子束各自的修形特点,加入叠加间距影响因子来建立修形仿真的数理模型。通过模拟不同束径的离子束在不同叠加间距下各自的去除特性,并引入驻留时间修正算法优化修形仿真结果,可以得到一系列不同的驻留时间分布和残差分布的仿真结果。通过仿真结果可以直观地获得不同束径的离子束最佳的叠加间距参数和驻留时间分布,结合实际要求便可以选择最合适的光阑。

2 离子束束形数学模型的构建

2.1 去除函数的模型概述

离子束修形的去除函数是指在单位时间内去除的材料深度,其是类似于高斯分布的去除

函数,使用自研的离子束修形设备通过单点刻蚀的方式来获得去除函数,接着使用三维高斯函数进行仿真拟合。三维高斯去除函数的数学表达式为

$$G(x, y) = A \cdot \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right), \quad (1)$$

式中: $G(x, y)$ 为三维高斯去除函数; A 为去除函数的峰值去除率; σ 为高斯分布参数,其能够表达出去除函数在 x 和 y 两个方向的分布情况。去除函数的半峰全宽(FWHM)可表示为 $x_{\text{FWHM}} = 2\sqrt{\ln 2}\sigma$,去除函数的直径 D 为 6σ 。

2.2 不同参数的去除函数三维模型

修形系统使用的光源是射频离子源,在加工过程中通过改变离子源出光口的光阑口径,可以达到改变离子束束径的目的。现有的光阑口径为 5, 8, 12, 16 mm,如图 1 所示。

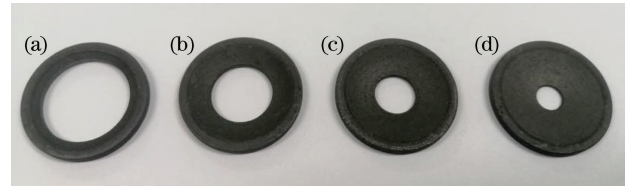


图 1 不同口径的光阑。(a) 16 mm;(b) 12 mm;(c) 8 mm;(d) 5 mm

Fig. 1 Diaphragms of different apertures.

(a) 16 mm;(b) 12 mm;(c) 8 mm;(d) 5 mm

在融石英光学元件中装夹不同口径的光阑并对其进行单点刻蚀,光阑在不同口径下的去除函数数据如表 1 所示。

表 1 光阑在不同口径下的去除特性参数

Table 1 Removal characteristic parameters of diaphragm in different apertures

Target distance/mm	Aperture/mm	Removal characteristic			
		FWHM/mm	σ /mm	Maximum removal rate/(nm · min ⁻¹)	Effective etching diameter/mm
10	5	3.5	1.47	318.8	8.4
	8	5.6	2.38	325.4	11.1
	12	7.1	3.02	330.6	16.3
	16	7.3	3.10	352.8	20.0

从表 1 可以看到,在 10 mm 的靶距下,随着光阑口径的减小,去除速率也随之下降;对于口径为 16 mm 的光阑,去除速率最高为 352.8 nm/min;对于口径为 5 mm 的光阑,FWHM 值为 3.5 mm。

在 10 mm 的靶距下,在 MATLAB 软件上拟合不同口径的光阑的高斯去除函数模型,如图 2 所示。

2.3 一维叠加间距的仿真

仿真和修形均采用栅格加工路径的方式对一维叠加间距进行理论仿真^[15],一维叠加过程中不同位置处的离子束分布函数为

$$R_i(x) = A \cdot \exp\left\{-\frac{[x + \sigma k(i-1)]^2}{2\sigma^2}\right\}, i \in (1, n), \quad (2)$$

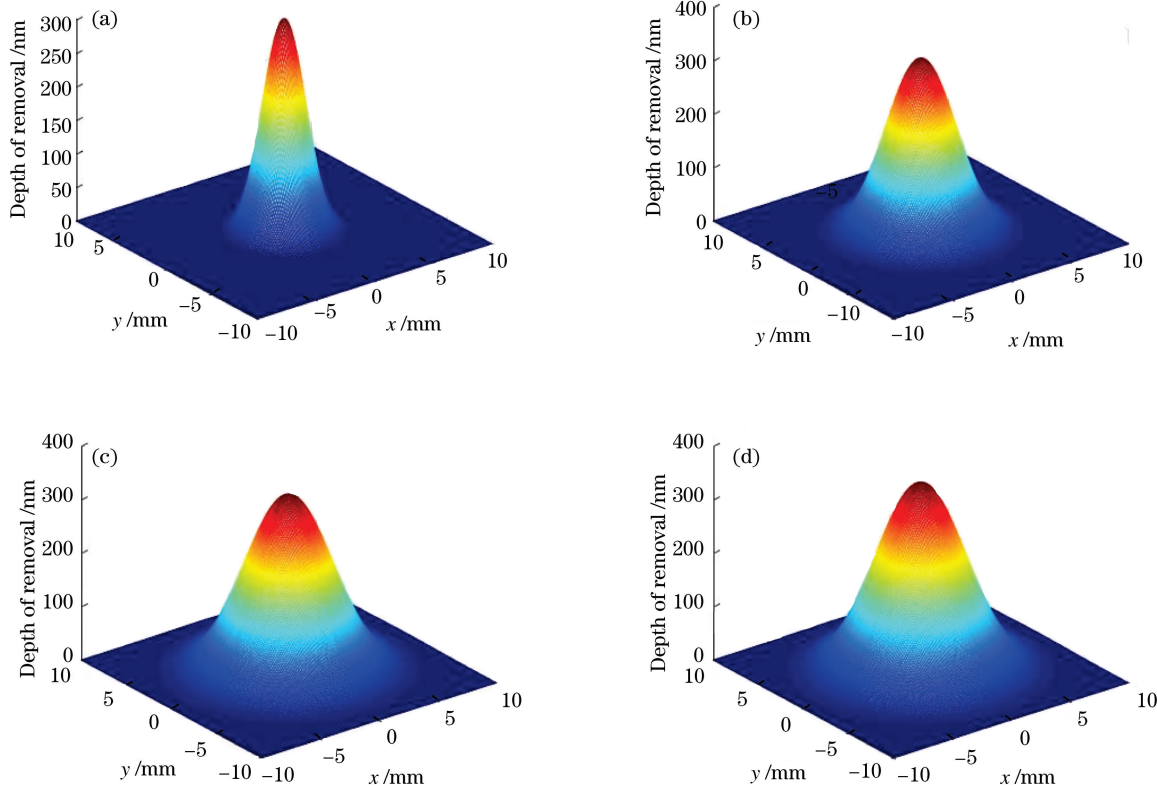


图 2 光阑在不同口径下的离子束去除函数模型。(a) 5 mm; (b) 8 mm; (c) 12 mm; (d) 16 mm

Fig. 2 Ion beam removal function model of diaphragm in different apertures. (a) 5 mm; (b) 8 mm; (c) 12 mm; (d) 16 mm

式中: k 为 σ 的倍率系数; n 为驻留点的数量。一维叠加去除函数分布为

$$R(x) = \sum_{i=1}^n R_i(x) = \sum_{i=1}^n A \cdot \exp\left\{-\frac{[x + \sigma k(i-1)]^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (3)$$

以口径为 16 mm 的光阑为例, A 值为 352.8 nm/min, σ_{16} 值为 3.1 mm, 对 $\sigma_{16} \sim 1.8\sigma_{16}$ 的叠加间距进行一维叠加仿真, 结果如图 3 所示, 其中叠加效应如图 3(a) 所示, 不同叠加间距的叠加波动率如图 3(b) 所示。

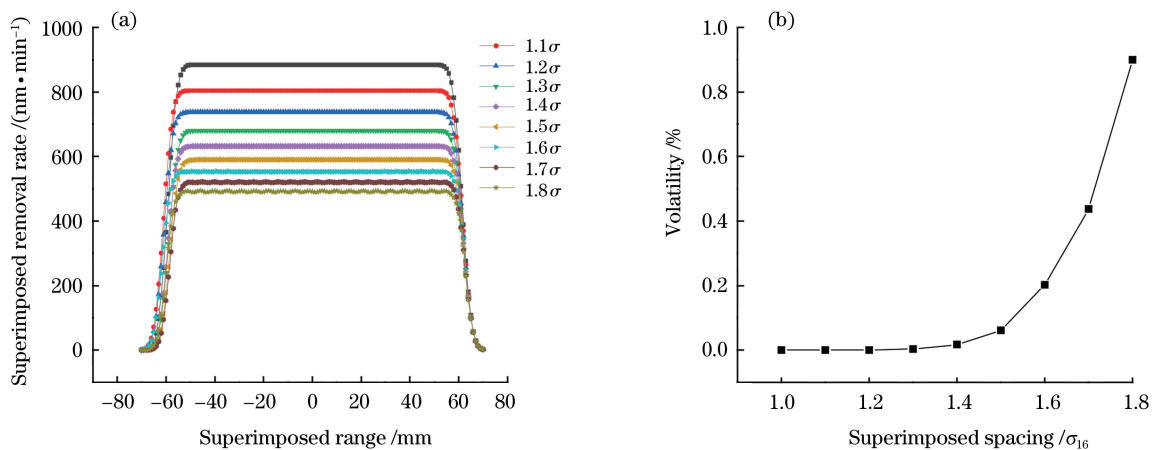


图 3 16 mm 的光阑的离子束一维叠加仿真结果。(a) 叠加效应; (b) 波动率

Fig. 3 Simulation results of ion beam one-dimensional superposition with 16 mm diaphragm.

(a) Superimposed effect; (b) volatility

从图 3(a) 可以看到, 叠加系数越小, 叠加去除速率越高; 到达光滑的过渡区域, 在小范围内有间断

性的变化。从图 3(b)可以看到,当叠加间距在 $\sigma_{16} \sim 1.8\sigma_{16}$ 之间时,叠加的波动率都在 1%以内,可以认为在这个范围内等量叠加间距可以进行平滑去除。根据前期的仿真和实验结果可知,叠加波动率随 σ 的改变很小,主要取决于叠加间距的变化。

3 抛光仿真与分析

3.1 抛光仿真数学模型

设 Y 为原始面形的高度矩阵, G 为高斯去除函数矩阵,可表示为

$$Y = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1q} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2q} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{p1} & a_{p2} & \cdots & a_{pq} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$G = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1v} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2v} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ b_{u1} & b_{u1} & \cdots & b_{uv} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中: a_{pq} 为原始面形第 p 行、第 q 列面形高度矩阵的元素; b_{uv} 为高斯去除函数第 u 行、第 v 列去除速率矩阵的元素。驻留时间求解的过程:去除函数 G 在 Y 中,以栅格轨迹按一定的间隔 d 进行卷积。设 S 为驻留时间矩阵,可表示为

$$S = Y \otimes G_k = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & \cdots & t_{1s} \\ t_{21} & t_{22} & \cdots & t_{2s} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ t_{r1} & t_{r1} & \cdots & t_{rs} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中: G_k 为以 a_{pq} 为轨迹中心坐标,间隔为 d 的高斯分布矩阵; t_{rs} 为驻留时间矩阵中第 r 行、第 s 列驻留时间矩阵的元素。仿真去除的数学矩阵 M 可表示为

$$M = Y - G_k \otimes S = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1q} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2q} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{p1} & a_{p2} & \cdots & a_{pq} \end{bmatrix} - G_k \otimes \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & \cdots & t_{1s} \\ t_{21} & t_{22} & \cdots & t_{2s} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ t_{r1} & t_{r1} & \cdots & t_{rs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & \cdots & m_{1f} \\ m_{21} & m_{22} & \cdots & m_{2f} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ m_{e1} & m_{e2} & \cdots & m_{ef} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

式中: m_{ef} 为第 e 行、第 f 列数学矩阵 M 的元素。 M 同时也是去除残差分布矩阵,对其进行矩阵变换,可表示为

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & \cdots & m_{1f} \\ m_{21} & m_{22} & \cdots & m_{2f} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ m_{e1} & m_{e2} & \cdots & m_{ef} \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & \cdots & m_{1f_t} \\ m_{21} & m_{22} & \cdots & m_{2f_t} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ m_{e_t1} & m_{e_t2} & \cdots & m_{e_tf_t} \end{bmatrix} = M_t, \quad (8)$$

式中: M_t 为根据驻点对残差面形进行划分并求均值后的变换矩阵。若 $m_{e_tf_t}$ 值不为 0,则引入修正因子并对驻留时间进行修正。设修正因子为 K ,则

$$K = \frac{Y_t}{Y_t - M_t} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & \cdots & K_{1h_t} \\ K_{21} & K_{22} & \cdots & K_{2h_t} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ K_{g_t1} & K_{g_t2} & \cdots & K_{g_th_t} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

式中: Y_t 为对初始面形根据驻留点进行矩阵划分的变换矩阵。设修正后的驻留时间矩阵为 S_{new} ,可表示为

$$S_{new} = K^T \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & \cdots & t_{1s_t} \\ t_{21} & t_{22} & \cdots & t_{2s_t} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ t_{r_t1} & t_{r_t1} & \cdots & t_{r_t s_t} \end{bmatrix}. \quad (10)$$

设置优化次数,循环中用 S_{new} 代替 S 并重复计算(6)~(10)式,直到 M 中的元素没有收敛趋势为止。

3.2 不同束径的离子束修形仿真

对直径为 120 mm 的融石英样片进行仿真模拟和实验加工,初始面形如图 4 所示。从图 4 可以看到,检测面形的尺寸为 337 pixel \times 337 pixel,初始峰谷值为 1079.59 nm,方均根值为 304.95 nm。在 MATLAB 软件上建立修形仿真模型。选取 σ_{16} 值为 3.1 mm,最大去除速率为 352.8 nm/min,由 3.1 节计算求得的残差方均根值变化曲线如图 5 所示。

从图 5 可以看到,当叠加间距为 $1.5\sigma_{16}$ 时,经过三次修正优化,面形残差方均根值快速收敛到 11.5 nm,仿真的残差面形如图 6 所示。

从图 6 可以看到,初步仿真计算得到的残差面形中有严重的边缘去除现象。对于边缘去除现象的处理,常采用边界延拓的方法,但是对于边缘陡峭的面形来说,边界延拓常会引入大量的驻留时间,这里引入修正法对原始驻留时间进行优化,三次优化结果如表 2 所示。

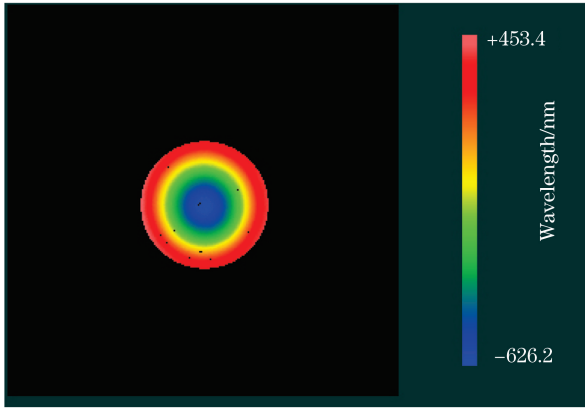


图 4 直径为 120 mm 融石英样片的初始面形
Fig. 4 Initial profile of fused quartz sample with diameter of 120 mm

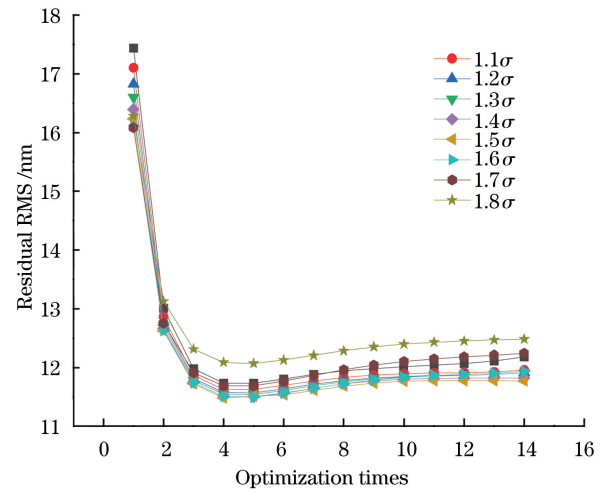


图 5 16 mm 的光阑的离子束残差变化曲线
Fig. 5 Ion beam simulation of residual variation curves with 16 mm aperture

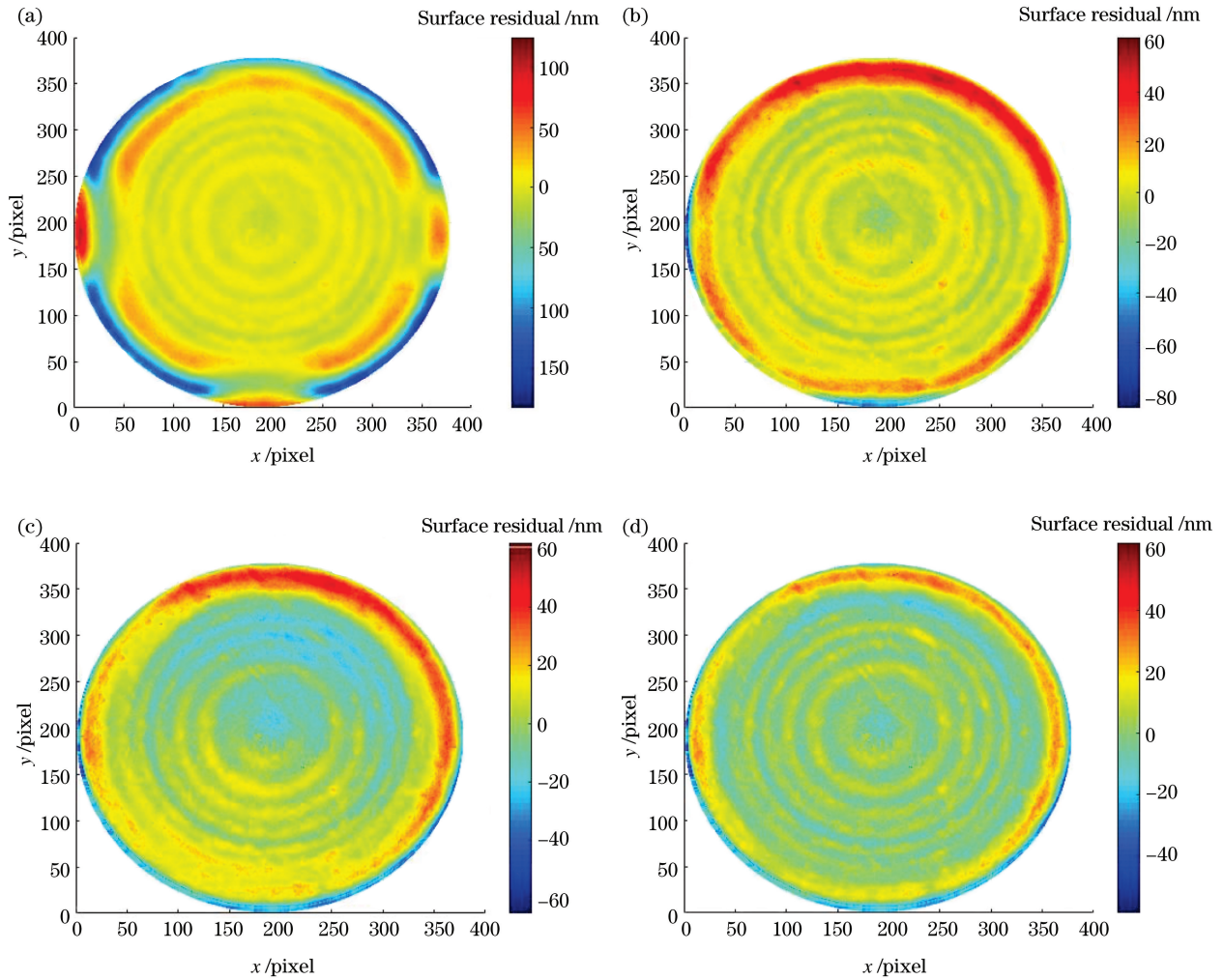


图 6 16 mm 的光阑在不同优化次数下的优化面形。(a) 初步仿真；(b) 第一次优化；(c) 第二次优化；(d) 第三次优化
Fig. 6 Optimal surface shapes of 16 mm aperture with different number of optimizations. (a) Preliminary simulation; (b) 1st optimization; (c) 2nd optimization; (d) 3rd optimization

表 2 修正后的优化结果

Table 2 Modified optimization results

Optimization times	Residual peak to valley/nm	Residual RMS/nm	Total residence time/min
1	184.7	12.66	587.2
2	137.5	11.74	539.3
3	119.8	11.51	542.4

从图 5、图 6 和表 2 可以看到,修正法可以抑制

边缘效应,但当面形残差出现较高频的误差后,继续优化驻留时间分布,残差没有明显的改善;当较高频的残差周期与离子束的束径相当时,大束径离子束的修形能力便受到了限制,所以以口径为 16 mm 的光阑仿真结果为例,对光阑口径分别为 12,8,5 mm 的离子束进行修形仿真。仿真残差随叠加间距和优化次数的变化曲线,如图 7 所示。采用不同口径的光阑后,离子束修形的仿真结果如表 3 所示。

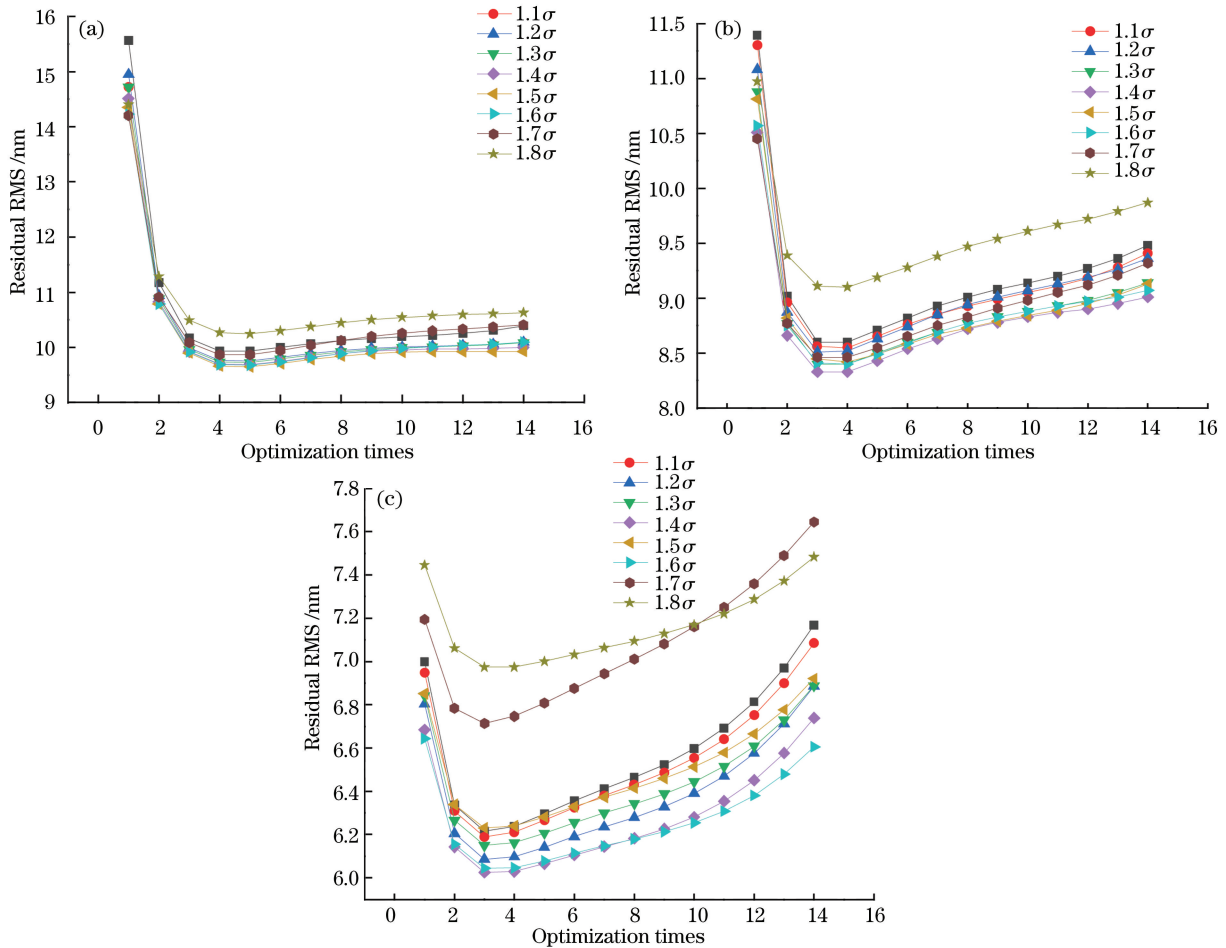


图 7 光阑在不同口径下的方均根值。(a) 12 mm;(b) 8 mm;(c) 5 mm

Fig. 7 Root mean square values of diaphragm at different apertures. (a) 12 mm; (b) 8 mm; (c) 5 mm

表 3 光阑在不同口径下的离子束抛光仿真结果

Table 3 Simulation results of ion beam polishing of diaphragm at different apertures

Aperture/mm	Optimal superimposed distance/mm	Minimum residual peak-to-valley/nm	Root mean square/nm	Total residence time/min
16	$1.5\sigma_{16}$	119.80	11.50	542.40
12	$1.5\sigma_{12}$	108.58	9.66	630.70
8	$1.4\sigma_8$	87.56	8.23	744.53
5	$1.4\sigma_5$	76.42	4.63	1136.82

从表 3 可以看到,对于口径为 16 mm 的光阑,离子束仿真得到的面形精度为 11.5 nm,需要用时 542.4 min;对于口径为 5 mm 的光阑,面形精度最高,值为 4.62 nm,需要用时 1136.82 min。对于不同口径的光阑,得到的离子束仿真面形如图 8 所示。

从图 8 可以看到,仿真结果中虽然存在较小的边缘效应,但其方均根值均在 $\lambda/50$ ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$) 以下,整体面形的低频误差基本被消除,最终保留了原始面形的中高频误差,当离子束的束径越小时,越能校正更高频的面形误差。

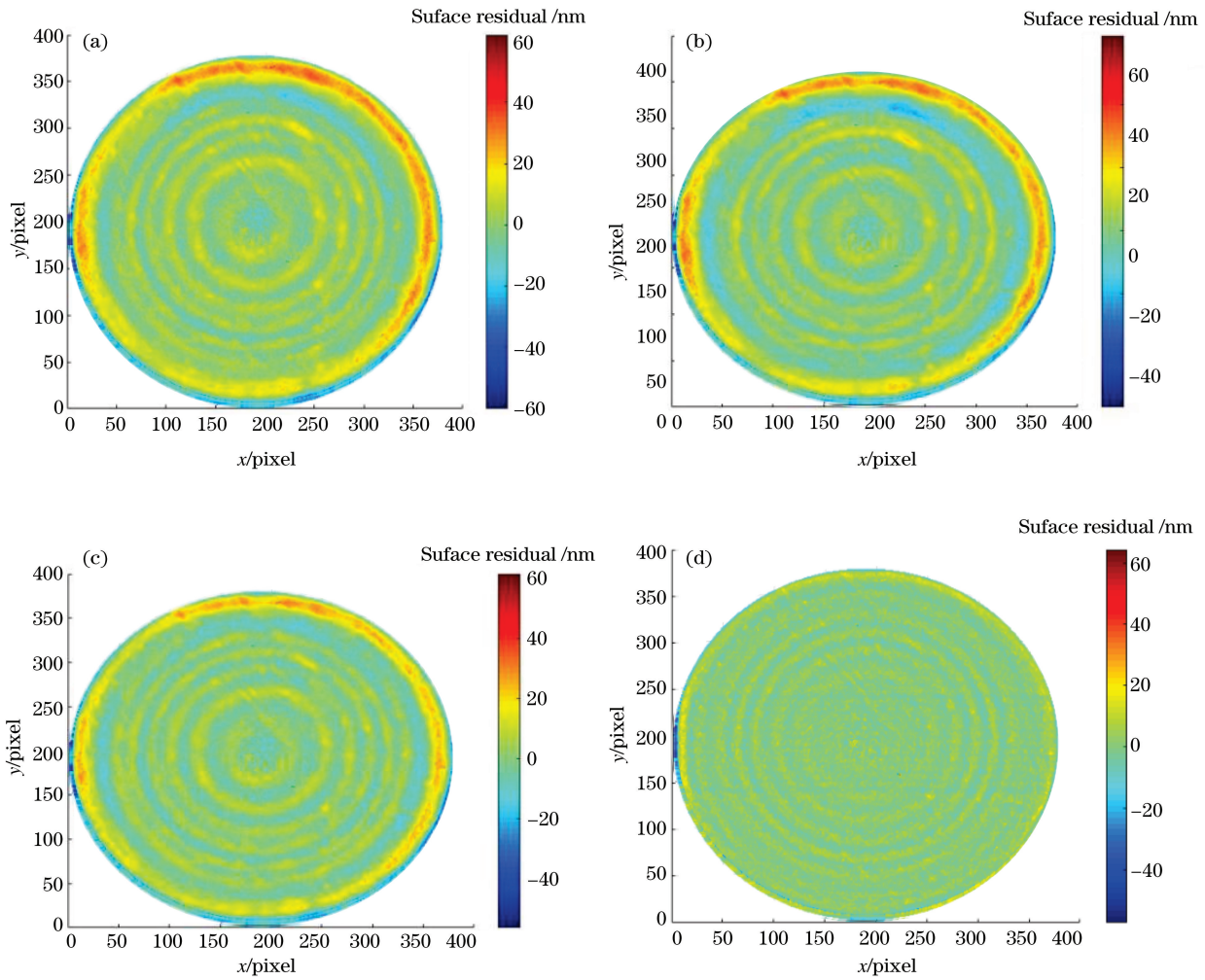


图 8 光阑在不同口径下的离子束仿真面形残差。(a) 16 mm;(b) 12 mm;(c) 8 mm;(d) 5 mm

Fig. 8 Ion beam simulation surface residual of diaphragm at different apertures. (a) 16 mm; (b) 12 mm; (c) 8 mm; (d) 5 mm

3.3 实验验证

由表 3 可知,当光阑口径为 5 mm 时,驻留时间过长,不利于实际加工。根据精度要求,选择口径为 8 mm 的光阑进行修形实验。驻留时间分布如图 9 所示。根据前期的实验,设置离子源的射频功率为 200 W,屏栅电压为 900 V,屏栅电流为 13 mA,氩气流量为 $8.3 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$,稳定工作压强为 $4.5 \times 10^{-2} \text{ Pa}$,入射角度为 0° ,工作靶距为 10 mm。开机启动,在预热 30 min 后进行加工,最终经过单次 13 h 的修形,检测加工后的面形如图 10 所示。从图 10 可以看到,加工后的面形峰谷值为 95.63 nm,方均根值为 8.99 nm,方均根值收敛比达到 33.92,与仿真结果的误差仅为 0.76 nm。由于加工过程中的离子束去除函数会受到一系列电气参数等因素的影响,难以使用标准的高斯函数准确描述,因此与仿

真使用的标准高斯去除函数存在差异,从而仿真的面形与加工后的相似度降低。

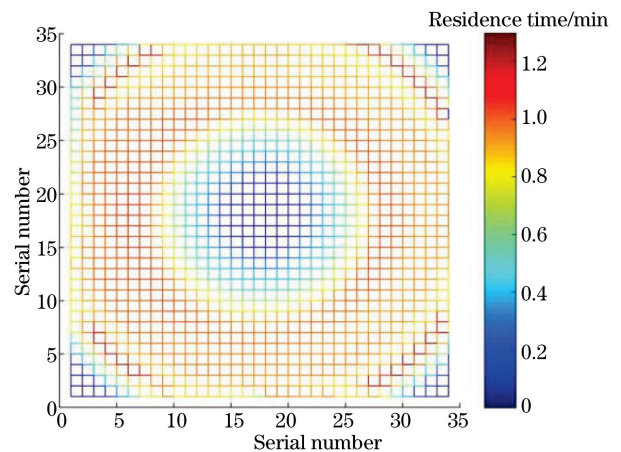


图 9 驻留时间分布

Fig. 9 Residence time distribution

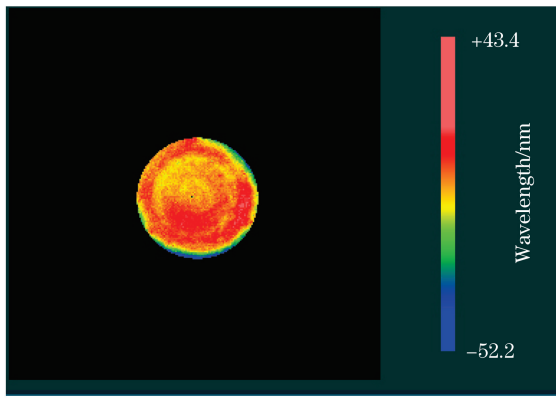


图 10 加工后的面形

Fig. 10 Surface shape after processing

4 结 论

采用光阑法获取不同光阑口径的离子束,通过对一维叠加波动率的分析,可以确定最佳的叠加范围为 $\sigma \sim 1.8\sigma$,之后采用 4 种不同光阑口径的离子束对直径为 120 mm 的融石英样片进行修形仿真。仿真结果表明,确定在靶距为 10 mm 的情况下选择 8 mm 口径的光阑进行样镜修形,对应的最优叠加间距为 1.5σ ,经过一次修形后的面形精度峰谷值为 95.63 nm、方均根值为 8.99 nm,收敛比为 33.92。结果表明,通过该修形仿真分析不仅可以优化驻留时间分布和修形工艺,而且使修形仿真结果更具有目的性和科学性,也可以更高效地获得最佳工艺参数,以及在保证面形精度的同时达到更高的修形效率。

参 考 文 献

- [1] Song C, Tian Y, Shi F, et al. Process optimization for cylindrical single-crystal silicon mirror with a tilted incident ion beam figuring [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(12): 1222001.
宋辞, 田野, 石峰, 等. 单晶硅柱面反射镜离子束倾斜入射加工工艺优化 [J]. *光学学报*, 2020, 40(12): 1222001.
- [2] Fei M M, Chen Z L, Liu W G, et al. Experimental research on sapphire crystal induced by low energy Kr^+ ion beam [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, 48(6): 0616004.
费芒芒, 陈智利, 刘卫国, 等. 低能 Kr^+ 离子束诱导蓝宝石晶体实验研究 [J]. *光子学报*, 2019, 48(6): 0616004.
- [3] Yang G Y, Cai M Q, Li J Y, et al. Preparation of subwavelength nanostructures based on low-energy ion bombardment [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(17): 1736001.
杨高元, 蔡茂琦, 李金昱, 等. 基于低能离子轰击的亚波长纳米结构制备 [J]. *光学学报*, 2020, 40(17): 1736001.
- [4] Chen G, Liu D Q, Ma C, et al. Optical spectra and surface morphologies of near-infrared narrow band-pass filters using dual ion beam sputtering [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(21): 2131001.
陈刚, 刘定权, 马冲, 等. 双离子束溅射制备近红外窄带通滤光片的光谱和表面形貌 [J]. *光学学报*, 2020, 40(21): 2131001.
- [5] Zhao G X, Chen H Q, Yang G G. Acceptable error of etching depth in ion beam etching microlens [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, 19(1): 113-116.
赵光兴, 陈洪璆, 杨国光. 离子束蚀刻微透镜中蚀刻深度允许误差的研究 [J]. *光学学报*, 1999, 19(1): 113-116.
- [6] Zhang X Y, Tang Q L, Zhang Z, et al. Concave refractive microlens arrays fabricated by ion beam etching [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, 21(4): 485-490.
张新宇, 汤庆乐, 张智, 等. 凹折射微透镜阵列的离子束刻蚀制作 [J]. *光学学报*, 2001, 21(4): 485-490.
- [7] Wu J F, Lu Z W, Zhang H X, et al. Optimized dwell time solution for optics in ion beam figuring [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(1): 192-197.
武建芬, 卢振武, 张红鑫, 等. 光学元件离子束加工驻留时间优化求解 [J]. *光学学报*, 2010, 30(1): 192-197.
- [8] Li Q S, Cheng Y, Cai F Z, et al. Dwell time algorithm in computer controlled optical surfacing [J]. *Optical Technology*, 1999, 25(3): 56-59.
李全胜, 成晔, 蔡复之, 等. 计算机控制光学表面成形驻留时间算法研究 [J]. *光学技术*, 1999, 25(3): 56-59.
- [9] Yang L. *Advanced optical manufacture technology* [M]. Beijing: Science Press, 2001.
杨力. *先进光学制造技术* [M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [10] Carnal C L, Egert C M, Hylton K W. Advanced matrix-based algorithm for ion-beam milling of optical components [J]. *Proceedings of SPIE*, 1992, 1752: 54-62.
- [11] Peng X Q, Dai Y F, Li S Y, et al. Dwell time algorithm for MRF of axis-symmetrical aspherical parts [J]. *Journal of National University of Defense*

- Technology, 2004, 26(3): 89-92.
- 彭小强, 戴一帆, 李圣怡, 等. 回转对称非球面光学零件磁流变成形抛光的驻留时间算法[J]. 国防科技大学学报, 2004, 26(3): 89-92.
- [12] Yu M, Yang L, Wan Y J. Optimizing analyse on dwell-time parameters[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2006, 4(1): 5-7.
- 俞敏, 杨力, 万勇建. 驻留时间参数优化分析[J]. 光学与光电技术, 2006, 4(1): 5-7.
- [13] Deng W J, Zheng L G, Shi Y L, et al. Dwell time algorithm based on matrix algebra and regularization method[J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 15(7): 1009-1015.
- 邓伟杰, 郑立功, 史亚莉, 等. 基于线性代数和正则化方法的驻留时间算法[J]. 光学 精密工程, 2007, 15(7): 1009-1015.
- [14] Shi F, Dai Y F, Peng X Q, et al. Dwell time algorithm based on vector for MRF process of optics[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2009, 31(2): 103-106.
- 石峰, 戴一帆, 彭小强, 等. 基于矩阵运算的光学零件磁流变加工的驻留时间算法[J]. 国防科技大学学报, 2009, 31(2): 103-106.
- [15] Wang Y N, Jiang S L, Sun G B, et al. Ion beam polishing equivalent removal and polishing experiments[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(3): 032501.
- 王玉宁, 蒋世磊, 孙国斌, 等. 离子束抛光等量去除的实现及抛光实验[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(3): 032501.