

文章编号 1004-924X(2024)14-2247-09

多光谱硫化锌光学窗口离子束抛光工艺研究及参数优化

蔡 根¹, 朱蓓蓓², 秦 琳², 张楚鹏¹, 陈 肖^{1*}

(1. 现代制造质量工程湖北省重点实验室, 湖北工业大学, 湖北 武汉 430068;

2. 上海航天控制技术研究, 上海 201109)

摘要: 多光谱硫化锌因其在近、中、远红外等多个光谱波段具有较高的光学透率, 广泛应用于红外光学制导导引头、光电探测雷达、机载光电吊舱。为了获得超高面形精度的多光谱硫化锌光学元件, 并提高离子束抛光效率, 采用正交实验方法对硫化锌进行离子束单点刻蚀实验, 获取各工艺参数下的去除函数特征量及体积去除率。通过对正交实验数据进行直观法分析和极差法分析, 以体积去除率最大为目标进行工艺参数优化, 获得的优化工艺参数组合为: 离子束流电压 1 100 V、射频功率 110 W、加速电压 200 V、氩气流量 7 sccm、加工距离 30 mm。通过调控工艺参数获得不同的离子束束斑直径对口径为 80mm 硫化锌进行组合抛光, 加工后的硫化锌面形精度 PV 值由 467 nm 下降到了 71.506 nm、RMS 值由 112 nm 下降到 10.758 nm。以上实验结果表明, 采用大、小束径离子束组合能够有效提升多光谱硫化锌光学元件的加工效率和面型精度。

关键词: 硫化锌; 离子束抛光; 去除函数; 工艺优化; 极差分析

中图分类号: TQ163; TN249 文献标识码: A doi: 10.37188/OPE.20243214.2247

Ion beam polishing process parameters optimization and polishing experiment of ZnS

CAI Gen¹, ZHU Beibei², QIN Lin², ZHANG Chupeng¹, CHEN Xiao^{1*}

(1. Key Laboratory of Modern Manufacturing Quality Engineering in Hubei Province,

Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China;

2. Shanghai Aerospace Control Technology Institute, Shanghai 201109, China)

* Corresponding author, E-mail: chenxiao1987jz@163.com

Abstract: Multispectral zinc sulfide is widely used in infrared optical guidance seeker, photoelectric detection radar and airborne photoelectric pod because of its high optical transmittance in near, middle and far infrared spectral bands. In order to obtain multi-spectral ZnS optical element with ultra-high surface shape accuracy and improve ion beam polishing efficiency, the orthogonal experiment method was used to carry out ion beam single point etching experiments on ZnS, and the removal function characteristics and volume removal efficiency were obtained under each process parameter. Through direct analysis of orthogonal ex-

收稿日期: 2024-02-26; 修订日期: 2024-05-29.

基金项目: 硬脆光学元件激光辅助超精密加工机理与工艺 (No. IMETKF2023008); 现代制造质量工程湖北省重点实验室开放基金资助 (No. KFJJ-2022006)

perimental data and range analysis, the process parameters were optimized with the target of maximum volume removal rate. The optimized process parameters were obtained as follows: ion beam voltage 1 100 V, radio frequency power 110 W, acceleration voltage 200 V, argon flow rate 7 sccm, and processing distance 30 mm. By adjusting the process parameters, different ion beam spot diameters were obtained for combined polishing of 80 mm diameter zinc sulfide. After processing, the surface shape accuracy of zinc sulfide decreased from 467 nm to 71.506 nm and from 112 nm to 10.75 nm. The above experimental results show that the combination of large and small diameter ion beams can effectively improve the processing efficiency and surface shape accuracy of multi-spectral ZnS optical elements.

Key words: ZnS; ion beam polishing; removal function; process optimization; range analysis

1 引 言

硫化锌是目前最主要的多光谱波段红外光学材料,具有较高的光学透过率和优良的力学性能,是用于导弹整流罩、保形光窗、红外制导视窗等的首选材料^[1-4]。硫化锌材料硬度较低且脆性大,加工过程中易造成脆性断裂,采用切削加工易引起表面凹坑和裂纹,降低表面质量,同时切削加工会造成较大的亚表层损伤厚度^[5],采用磨削加工方式易产生划痕,造成亚表面损伤,影响材料表面光洁度、性能和使用寿命^[6-7],而采用传统研抛方式进行硫化锌光窗加工,加工效率低且对于具有复杂形状的光窗形状难以保证加工表面精度^[8-9]。离子束抛光是一种高确定性、非接触式、原子量级别的光学加工技术,具有面形收敛快、加工精度高、无边缘效应和亚表面损伤等优点^[10-12],广泛应用于超高精度光学元件的加工中。离子束抛光技术用于光学元件的精抛阶段,其属于原子量级别的抛光使得去除效率低,且需要通过多次迭代加工^[13]来提高光学元件的面形精度,对前道工序加工后的面形精度有一定的要求。

离子束抛光形成的去除函数稳定,形状为高斯形,去除函数对光学元件的材料去除率决定了离子束的抛光效率,通过改变离子源工艺参数,来对离子束的形状和大小进行调控^[14-16],实现对去除函数的控制。王登峰^[17]通过研究工艺参数对去除函数的去除特性影响,指出根据离子束抛光的不同加工阶段选择不同的工艺参数,能够在保证加工质量的前提下提高加工效率。席燕飞^[18]通过单因素实验法研究了不同工艺参数下离子束抛光硫化锌镜片时表面粗糙度的变化,得出了能有效减小硫化锌镜片表面粗糙度的最佳

工艺参数。湛贵阳^[19]通过研究射频离子源的各工艺参数对去除函数的峰值去除率、半峰全宽值以及体积去除率的影响规律,根据光学镜面离子束修形加工对束形及去除效率的要求,提出了各参数的选取区间。针对不同的材料,不同的离子源工艺参数加工时的去除效率及加工质量影响可能不同。

目前,关于离子束抛光工艺参数对多光谱硫化锌加工效率与表面质量的影响相关的研究较少。本文通过设计多光谱硫化锌离子束抛光的正交实验,研究离子束能量、射频功率、加速电压、气体流量和工作距离对去除函数特性的影响,对各组参数组合下束径和体积去除率大小的计算,并通过极差分析对工艺参数进行优化,得到体积去除率最大的工艺参数组合以实现高效率离子束抛光,以及得到束径最小的工艺参数组合来提高修形能力以实现工件的高面形精度。采用获得的最佳工艺参数组合进行硫化锌元件离子束抛光实验,并对抛光后面形精度进行测量及分析,为多光谱硫化锌光学元件的高效率、高精度的离子束抛光工艺提供研究基础。

2 离子束抛光技术

2.1 离子束抛光原理

离子束抛光在真空的环境下,利用离子源发射出的离子束对光学镜面轰击发生物理溅射效应实现光学元件表面材料的去除^[20]。如图 1 所示,加工时由离子源发射出的离子束对光学元件表面进行轰击,轰击过程中,当光学元件表面原子获得足够的能量能摆脱表面束缚能时,原子就会脱离工件表面,实现材料去除。

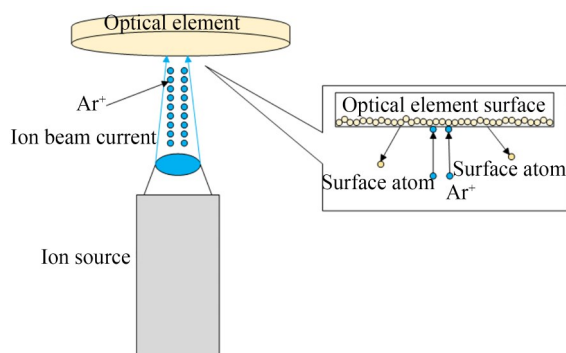


图1 离子束抛光原理

Fig. 1 Ion beam polishing principle

离子束抛光的去除函数是离子束在单位时间内轰击光学元件表面固定点产生的材料去除量空间分布。离子束抛光采用聚焦式离子源,其发射出的离子束流基本呈对称分布的高斯形,故产生的去除函数也服从高斯分布,所以离子束抛光的去除函数 $R(x, y)$ 可由式(1)表示^[21]:

$$R(x, y) = A_{\max} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right), \quad (1)$$

式中: $A_{\max}$ 为峰值去除率, nm/s; σ 为去除函数的高斯分布系数。

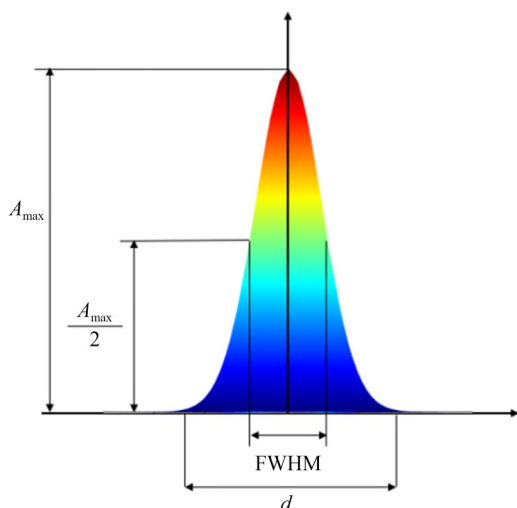


图2 去除函数二维示意图

Fig. 2 Remove the two-dimensional schematic diagram of the function

如图2所示, $d=6\sigma$ 是去除函数的束径, FWHM 是去除函数的半高宽^[16], 可由式(2)表示:

$$\text{FWHM} = 2\sqrt{2\ln 2} \sigma. \quad (2)$$

去除函数的主要评价指标为峰值去除率、半高宽和去除强度, 去除强度 B ^[16] 为去除函数所在其直径范围内的积分, 由式(3)表示:

$$B = \iint_{\Omega} r(x, y) dx dy, \Omega: \sqrt{x^2 + y^2} \leq r, \quad (3)$$

式中: 去除强度 B 又被称为体积去除率, 描述了单位时间内工件表面被去除材料的体积, 单位是 mm^3/s ; $r(x, y)$ 为去除函数; Ω 是指在离子束半径 r 内的二重积分区域; r 是去除函数的半径, $r=1/2d=3\sigma$ 。

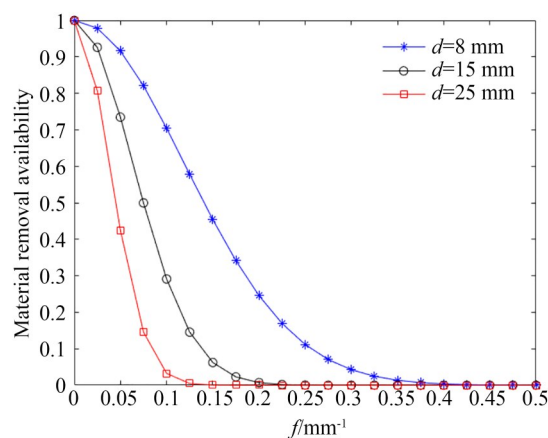
2.2 表面误差修形能力分析

在离子束抛光过程中, 由于高斯形的去除函数具有一定宽度, 使得加工实际的材料去除量大于期望的材料去除量。对于高斯形去除函数的修形能力, 提出了用材料去除有效率^[22]来衡量其修形能力的方法, 由式(4)表示:

$$\eta = \exp\left[-\frac{\pi^2}{18}\left(\frac{d}{\lambda}\right)^2\right], \quad (4)$$

式中: η 为材料去除有效率; d 为去除函数的直径; λ 为误差空间波长。

不同去除函数束径的材料去除有效率 η 随空间频率 f 的变化如图3所示。由图3可以看出, 当去除函数的束径不变时, 材料去除有效率 η 随着空间频率 f 的增大而迅速下降; 当空间频率不变时, 去除函数的束径越小, 材料去除有效率越高。

图3 不同去除函数束径下材料去除有效率 η 随空间频率 f 的变化Fig. 3 Change of material removal efficiency with spatial frequency f under different removal function beam diameter

当材料去除有效率低于 0.1 时,离子束不再具有修形能力,其对应的频率称为修形截止频率^[23],如式(5)所示:

$$f_c = \frac{3\sqrt{2\ln 10}}{\pi d}. \tag{5}$$

离子束直径的大小决定了离子束抛光工艺的修形能力,通过减小离子束直径来提高修形能力。由于光学元件初始面形误差较大,为提高加工速度并保证加工精度,初始阶段采用大束径离子束去除函数进行加工。随着面形误差的改善和收敛速度的降低,再使用小束径的去除函数修形来提高面形精度。

3 硫化锌离子束抛光去除率实验

3.1 正交实验设计

根据前期的研究^[17-19],离子束抛光中影响抛光效率的主要因素是:离子束能量、射频功率、加速电压、气体流量和工作距离。本次正交试验考虑以上 5 个因素,并为每个因素设置 4 个水平,建立因素水平表,如表 1 所示。根据因素水平的数量,选用 5 因素 4 水平的标准正交表 $L_{16}(4^5)$ 进行

抛光试验。

表 1 工艺因素水平表

Tab. 1 Process factor level table

Process factor	Level 1	Level 2	Level 3	Level 4
Ion beam voltage/V	800	900	1 000	1 100
RF power/W	50	70	90	110
Accelerating voltage/V	100	150	200	250
Gas flow/(sccm)	4	5	6	7
Working distance/mm	20	30	40	50

根据正交表在超精密离子束抛光系统上进行单点刻蚀实验。本系统采用 13.56 MHz 射频激发的射频离子源,离子源的口径为 40 mm,并采用三栅网结构(37-37-37)。在离子束其他条件一致的情况下,按照上面所示的正交表中各组参数进行实验,分别对每组参数下得到的峰值去除率以及半高宽进行记录。

去除强度是检验离子束束流对材料去除的重要依据,通过单点刻蚀实验所得数据进行拟合得出去除函数,根据式(3)可以计算出各实验组的体积去除率,实验结果如表 2 所示。

表 2 $L_{16}(4^5)$ 正交表与单点刻蚀实验结果

Tab. 2 $L_{16}(4^5)$ Experimental results of orthogonal table and single point etching

No.	Ion beam voltage/V	RF power/W	Accelerating voltage/V	Gas flow/sccm	Working distance/mm	Peak removal rate $A_{max}/(\text{nm/s})$	FWHM/mm	Volumetric removal rate $V/(10^{-4}\text{mm}^3/\text{s})$
1	800	50	100	4	20	5.362	7.287	3.191
2	800	70	150	5	30	7.287	7.563	4.672
3	800	90	200	6	40	9.735	7.754	6.558
4	800	110	250	7	50	8.969	8.267	6.868
5	900	50	150	6	50	6.233	6.986	3.422
6	900	70	100	7	40	7.871	5.787	3.035
7	900	90	250	4	30	9.876	6.264	4.342
8	900	110	200	5	20	8.575	7.914	6.017
9	1 000	50	200	7	30	9.423	8.722	8.032
10	1 000	70	250	6	20	9.488	6.689	4.756
11	1 000	90	100	5	50	8.878	7.382	5.421
12	1 000	110	150	4	40	10.788	7.548	6.886
13	1 100	50	250	5	40	9.876	8.257	7.544
14	1 100	70	200	4	50	12.022	8.954	10.811
15	1 100	90	150	7	20	10.132	9.743	10.776
16	1 100	110	100	6	30	10.843	9.214	10.323

3.2 实验结果及分析

正交实验下各组的体积去除率及束径的计算结果如图 4 所示。

根据表 2 中得出的实验结果,对正交实验结果进行直观分析,得出体积去除率最大的实验组,再进行极差分析确定优化后的工艺参数并进行单点刻蚀实验,对比实验结果确定最佳的工艺参数。

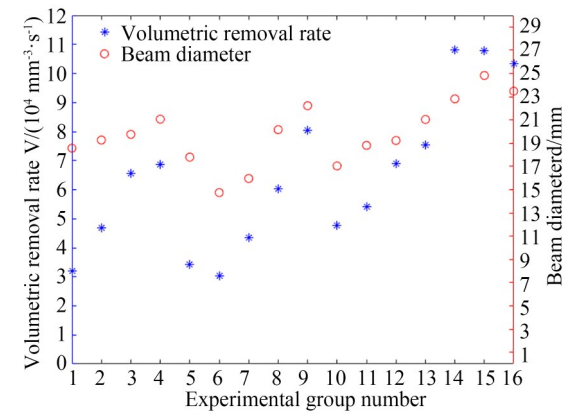


图 4 不同实验组的体积去除率及束径

Fig. 4 Volume removal rate and beam diameter of different experimental groups

由图 4 可以看出,体积去除率最高的实验组序号为 14,它的体积去除率为 10.811 nm/s,束径为 22.8 mm,工艺组合为:离子束流电压 1 100 V、射频功率 70 W、加速电压 200 V、氩气流量 4 sccm、工作距离 50 mm;束径最小的实验组序号为 6,它的去除函数束径为 14.7 mm,工艺组合为:离子束流电压 900 V、射频功率 70 W、加速电压 100 V、氩气流量 7 sccm、工作距离 40 mm。第 6 组与第 14 组工艺参数下拟合出的去除函数模型如图 5 所示。

采用极差分析法分析实验结果,其中 A,B,C,D,E 分别代表离子束流电压、射频功率、加速电压、氩气流量、工作距离;通过计算以下公式^[24]中的 K_i 值与 R_j 值对各因素间的主次、优水平及优组合进行判断。

$$K_i = \sum_{j=1}^n Y_j,$$
 (6)

$$k_i = 1/n K_i,$$
 (7)

$$R_j = k_{\max} - k_{\min},$$
 (8)

其中: K_i 表示为每个因素在各水平下的体积去除

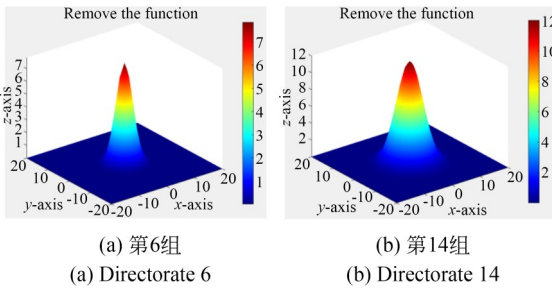


图 5 拟合的去除函数模型

Fig. 5 Fitted removal function model

率之和; Y_j 表示每个因素下各水平的体积去除率, k_i 表示对应的 K_i 除以其总的水平数计算得到的平均值, R_j 各因素的极差值,根据其大小可以得出评判指标的影响权重,表 3 为极差分析结果。

表 3 体积去除率极差分析结果

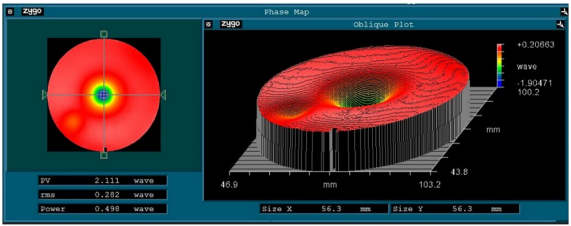
Tab. 3 Volumetric removal rate very poor analysis results

Experimental factors	k_1	k_2	k_3	k_4	Range
A	5.322	4.204	6.273	9.863	5.659
B	5.547	5.818	6.774	7.523	1.976
C	5.492	6.439	7.854	5.877	2.362
D	6.307	5.913	6.269	7.177	1.264
E	6.185	6.842	6.005	6.630	0.837

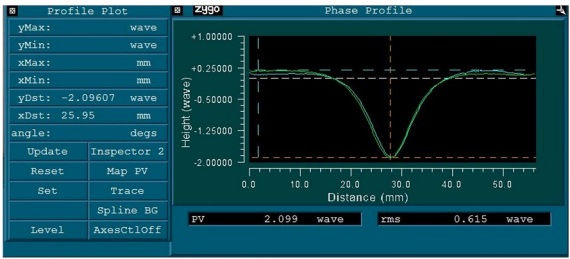
从表 3 可看出,对体积去除率影响显著情况从高到低的顺序依次为离子束流电压、加速电压、射频功率、氩气流量、工作距离,所对应的最优组合为 $A_4B_4C_3D_4E_2$,即离子束流电压 1 100 V,射频功率 110 W,加速电压 200 V,氩气流量 7 sccm,加工距离 30 mm。

对口径为 57 mm 的硫化锌平面光学元件进行单点刻蚀实验,将离子源设置为优化后的工艺参数组合,在离子源开机半小时达到稳定后,在硫化锌材料表面进行单点刻蚀 100 s。图 6 是通过激光干涉仪测量出加工后面形,通过对刻蚀曲线的处理得到去除函数峰值去除率 A、半高宽 FWHM,结果如图 6 所示。

由实验结果得到的去除函数峰值 $A=13.361$ 、半高宽 $F=9.575$,通过计算得到去除函数的束径 $d=24$ mm、体积去除率 $B=13.725$,通过高斯拟合得到的去除函数模型如图 7 所示。



(a) 单点刻蚀实验结果
(a) Single point etching experiment results



(b) 采样直线对应的刻蚀曲线
(b) Sample line corresponds to the etching curve

图 6 单点刻蚀实验结果及采样直线对应的刻蚀曲线
Fig. 6 Etching curve corresponding to the experimental results of single point etching and the sampling line

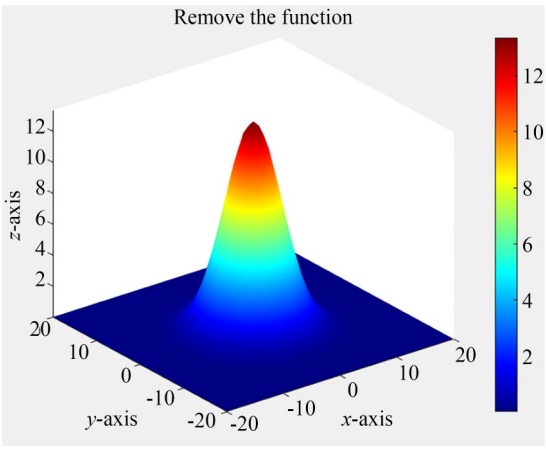


图 7 拟合后的去除函数模型
Fig. 7 Fitted removal function model

与正交实验中第 14 组相比,去除函数的体积去除率 B 和束径 d 均增大,故选用最优组合 $A_4B_4C_3D_4E_2$ 作为硫化锌离子束加工参数能够有效提高抛光效率。

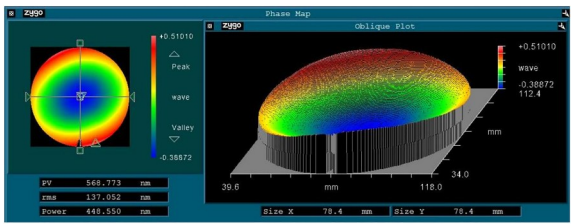
选择不同的工艺参数,可以得到去除特性不同的去除函数。一般来说,离子束是一个反复加工的过程,采用高去除强度、大直径的去除函数与低去除强度、小直径去除函数相结合的方法可以得到较好的结果。先采用高去除强度、大直径的去除函数,在不影响中频误差的情况下,以最

快的速率去除低频误差。再采用低去除强度、小直径的去除函数,改善中频误差,减小工件表面粗糙度。

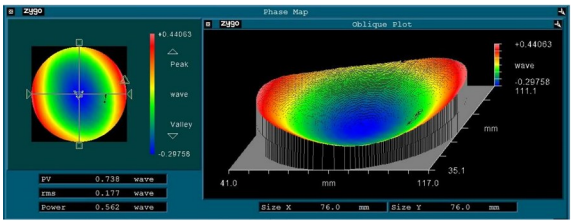
根据前期的正交实验,最优组合得到去除函数是具有最大的峰值去除率,适合初期加工达到快速收敛面形;正交组中第 6 组所得到的去除函数束径最小,其材料去除有效效率最大,故选择用于精修过程。

4 离子束抛光实验

采用上述优化所得到的体积去除率最大和修形能力最好的离子束抛光工艺参数进行抛光实验验证,使用离子束抛光设备,对口径为 80 mm 的多光谱硫化锌光学元件 A、B 表面进行离子束抛光实验,由于被加工件采用挂钩装夹方式,挂钩会挡住零件边缘 2 mm 左右的位置,所以检测时取口径 78 mm 左右进行评价。大束径加工时选用的加工工艺参数为:离子束流电压 1 100 V,射频功率 110 W,加速电压 200 V,氩气流量 7 sccm,加工距离 30 mm;小束径加工时选用的工艺参数为:离子束流电压 900 V,射频功率 70 W,加速电压 250 V,氩气流量 7 sccm,加工距离 40 mm。用激光干涉仪对硫化锌初始面形进行检测,图 8 所示,多光谱硫化锌样件 A 加工前元



(a) 样件A
(a) Sample piece A



(b) 样件B
(b) Sample piece B

图 8 初始面形图

Fig. 8 Initial polygon diagram

件初始面形 PV 值为 568.773 nm, RMS 值为 137.052 nm;多光谱硫化锌样件 B 加工前元件初始面形 PV 值为 467.006 nm, RMS 值为 112 nm。

根据计算机控制光学表面成形技术(CCOS)原理可知,离子束抛光材料去除量表示为去除函数与驻留时间的二维卷积^[25],其表达式如式(9)。材料去除量通过对初始面形与预期目标的面形做差获取,去除函数通过前期实验获取,根据已知的材料去除量和去除函数通过软件仿真计算出驻留时间分布,并生成离子束抛光加工的数控程序,进而对硫化锌进行离子束抛光实验。

$$H(x,y)=R(x,y)\otimes T(x,y), \quad (9)$$

式中: $H(x,y)$ 为材料去除量; $R(x,y)$ 为去除函数; $T(x,y)$ 为离子束在工件表面各点的驻留时间。

先选用大束径工艺参数进行抛光,加工后的多光谱硫化锌样件采用激光干涉仪进行检测并利用 Metropro 软件进行分析,面形结果如图 9 所示。经过离子束抛光实验后,多光谱硫化锌样件 A 面形 PV 值由 568.773 nm 下降至 282.904 nm,收敛率为 50.26%,RMS 值由 137.052 nm 下降至 42.063 nm,收敛率为 69.31%,加工时间为 14.6 min;多光谱硫化锌样件 B 面形 PV 值由 467.006 nm 下降至 194.902 nm,收敛率为 58.27%,表面 RMS 值由 112 nm 下降至 27.21 nm,收敛率为 75.71%,加工时间为 12.6 min。

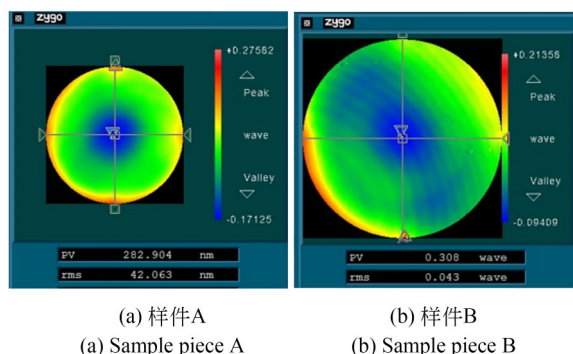


Fig. 9 Measurement results of large beam diameter machining

再选用小束径工艺参数进行抛光,加工后的多光谱硫化锌样件采用激光干涉仪进行检测并利用 Metropro 软件进行分析,面形结果如图 10 所示。经过离子束抛光实验后,多光谱硫化锌样

件 A 面形加工时间为 110.5 min,其 PV 值由 282.904 nm 下降至 91.015 nm,收敛率为 67.83%,RMS 值由 42.063 nm 下降至 12.743 nm,收敛率为 69.7%;多光谱硫化锌样件 B 加工时间为 62.4 min,其面形 PV 值由 194.902 nm 下降至 71.506 nm,收敛率为 63.31%,表面 RMS 值由 27.21 nm 下降至 10.758 nm,收敛率为 60.46%。

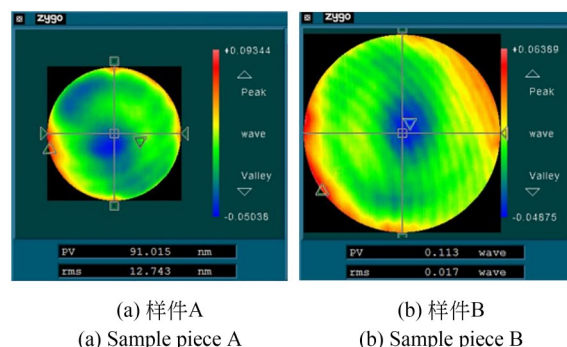


图 10 小束径加工后面形测量结果
Fig. 10 Measurement results of small beam diameter machining

通过两组实验数据可知,可以通过加工前期多采用几次大束径离子束抛光直至面形误差的收敛速度明显降低,再采用小束径离子束继续修形,能够大幅缩短整体加工时间,采用大、小束径组合加工的方式能提高多光谱硫化锌加工效率以及面形精度。

5 结 论

通过正交实验得到各组工艺参数下去除函数特征量及体积去除率,并对正交实验数据进行直观分析和极差分析,得到大束径加工最优的组合工艺参数为离子束流电压 1 100 V,射频功率 110 W,加速电压 200 V,氩气流量 7 sccm,加工距离 30 mm;小束径组合工艺参数为离子束流电压 900 V,射频功率 70 W,加速电压 100 V,氩气流量 7 sccm,加工距离 40 mm。

两次实验均采用大、小束径组合的加工方法,最终得到多光谱硫化锌表面最优的面形 PV 值达到 71.506 nm, RMS 值达到 10.758 nm。由此表明,该工艺参数组合对高效率加工超高面形精度的多光谱硫化锌具有指导意义。

参考文献:

- [1] 李奥凌, 段辉高, 贾红辉, 等. 中红外波段超构透镜研究进展[J]. 光学精密工程, 2022, 30(19): 2313-2331.
LI A L, DUAN H G, JIA H H, *et al.* Research progress of metalenses in mid-infrared band [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2022, 30(19): 2313-2331. (in Chinese)
- [2] BHIMIREDDI R, DHAVALA L, SHET T, *et al.* Effect of ZnSnO_3 on dielectric and ferroelectric properties of $\text{Sr}_2\text{Bi}_4\text{Ti}_5\text{O}_{18}$ ceramics [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2024, 107(2): 984-994.
- [3] CHOUDHURY S P. Nanomaterials and quantum dots for electrochemical sensing of nitro-aromatics-based explosives: a short review [J]. *Surface Review and Letters*, 2024, 31(1).
- [4] 李文雄, 申军立, 张星祥, 等. 低温红外离轴三反准直系统设计[J]. 光学精密工程, 2023, 31(9): 1285-1294.
LI W X, SHEN J L, ZHANG X X, *et al.* Design of low temperature infrared off-axis three-mirror collimation system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2023, 31(9): 1285-1294. (in Chinese)
- [5] ZHANG J G, FU Y F, CHEN X, *et al.* Investigation of the material removal process in *in situ* laser-assisted diamond cutting of reaction-bonded silicon carbide [J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2023, 43(6): 2354-2365.
- [6] 贾珣璠, 朱祥龙, 杨垒, 等. 固结磨料研磨石英晶片材料去除率建模与试验研究[J]. 光学精密工程, 2023, 31(16): 2362-2371.
JIA Y F, ZHU X L, YANG L, *et al.* Modeling and experimental study on material removal rate of quartz wafer by fixed abrasive lapping [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2023, 31(16): 2362-2371. (in Chinese)
- [7] 彭福鑫, 胡中伟, 陈瑜, 等. 蓝宝石衬底双面研磨表面裂纹深度检测[J]. 光学精密工程, 2023, 31(14): 2060-2070.
PENG F X, HU Z W, CHEN Y, *et al.* Surface crack depth detection of sapphire substrate two-sided lapping [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2023, 31(14): 2060-2070. (in Chinese)
- [8] XIE W X, ZHANG Z Y, WANG L, *et al.* Chemical mechanical polishing of silicon wafers using developed uniformly dispersed colloidal silica in slurry [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2023, 90: 196-203.
- [9] DING K W, WANG C, DUAN J A. Effect of wet chemical etching on femtosecond laser fabricated surface microstructure of polycrystalline ZnS [J]. *Materials Letters*, 2023, 351: 135072.
- [10] SAOWADEE N, AGERSTED K, UBHI H S, *et al.* Ion beam polishing for three-dimensional electron backscattered diffraction [J]. *Journal of Microscopy*, 2013, 249(1): 36-40.
- [11] 曾沛, 舒志文, 陈艺勤, 等. 宽束离子束刻蚀快速加工金属纳米间隙结构[J]. 光学精密工程, 2023, 31(1): 109-118.
ZENG P, SHU Z W, CHEN Y Q, *et al.* Rapid fabrication of metallic nanogap structures by shower ion beam etching [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2023, 31(1): 109-118. (in Chinese)
- [12] 伊圣振, 黄秋实, 齐润泽, 等. 等离子体诊断用多层膜 X 射线成像光学研究进展[J]. 光学精密工程, 2022, 30(21): 2783-2792.
YI S Z, HUANG Q S, QI R Z, *et al.* Research progress of multilayer X-ray imaging optics for plasma diagnostics [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2022, 30(21): 2783-2792. (in Chinese)
- [13] 孙国斌, 蒋世磊, 张余豪, 等. 离轴抛物面镜离子束抛光工艺研究[J]. 光学学报, 2022, 42(9): 0922003.
SUN G B, JIANG S L, ZHANG Y H, *et al.* Ion beam polishing process of off-axis parabolic mirror [J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(9): 0922003. (in Chinese)
- [14] 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.
TANG W, DENG W J, ZHENG L G, *et al.* Calculation of removal function of ion beam figuring and polishing experiment [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(1): 31-39. (in Chinese)
- [15] DEMMLER M, ZEUNER M, LUCA A, *et al.* Ion beam figuring of silicon aspheres [C]. *SPIE Proceedings, Optical Components and Materials VIII. San Francisco, California*. SPIE, 2011.
- [16] 吴鹏飞, 王春阳, 李晓静, 等. 熔石英表面离子束抛光去除函数稳定性研究[J]. 表面技术, 2022, 51(4): 284-291.
WU P F, WANG C Y, LI X J, *et al.* Stability of

- ion beam polishing removal function on fused silica surface [J]. *Surface Technology*, 2022, 51(4): 284-291. (in Chinese)
- [17] 王登峰. 光学镜面离子束抛光系统工艺参数研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2007.
WANG D F. *Study on Process Parameters of Optical Mirror Ion Beam Polishing System*[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2007. (in Chinese)
- [18] 席燕飞. 硫化锌光学元件射频离子束刻蚀技术研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2019.
XI Y F. *Study on RF Ion Beam Etching Technology of Zinc Sulfide Optical Elements*[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2019. (in Chinese)
- [19] 湛贵阳. 用于离子束抛光的射频离子源控制器设计与性能测试研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2016.
CHEN G Y. *Design and Performance Test of RF Ion Source Controller for Ion Beam Polishing*[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2016. (in Chinese)
- [20] 杜春阳. 复杂曲面铝反射镜离子束加工基础研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2022.
DU C Y. *Basic Research on Ion Beam Machining of Aluminum Reflector with Complex Curved Surface*[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2022. (in Chinese)
- [21] ZHOU L, XIE X, DAI Y, *et al.* Ion beam figuring system in NUDT - art. no. 67224A [J]. *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 2007, 6722.
- [22] ZHOU L, DAI Y F, XIE X H, *et al.* Frequency-domain analysis of computer-controlled optical surfacing processes [J]. *Science in China Series E: Technological Sciences*, 2009, 52(7): 2061-2068.
- [23] LIAO W L. Corrective capability analysis and machining error control in ion beam figuring of high-precision optical mirrors [J]. *Optical Engineering*, 2012, 51(3): 033402.
- [24] 李运鹤. 碳化硅晶圆化学机械抛光工艺优化实验研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2023.
LI Y H. *Experimental Study on Optimization of Chemical Mechanical Polishing Process for Silicon Carbide Wafer*[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2023. (in Chinese)
- [25] 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.
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. (in Chinese)

作者简介:



蔡 根(2000—),男,湖北孝感人,硕士研究生,湖北工业大学机械工程学院研究生在读,主要从事超精密加工与装备研究。E-mail:caigen117@163.com

通讯作者:



陈 肖(1987—),男,湖北荆州人,博士,教授,2011年、2014年于华中科技大学分别获得硕士、博士学位,主要从事超精密制造方面的研究。E-mail:chenxiao1987jz@163.com