

高能量大束流氩离子枪的研发

朱美强¹ 石晓倩¹ 唐 瓦² 邓伟杰² 郭方准¹

1(大连交通大学 大连 116028)

2(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 长春 130033)

摘要 为了实现对大口径碳化硅非球面反射镜的表面改性层硅的高精度快速抛光,设计制作了高能量大束流氩离子枪。通过热灯丝和阳极栅网的组合实现氩原子的离子化,通过调节氩离子所处区域的电位来确定离子的能量,通过静电聚焦透镜来实现氩离子的聚焦。调节灯丝和阳极栅网之间的电压达到离子化率的最大化,调节静电聚焦透镜的尺寸和相对位置实现氩离子的高透过率。氩离子枪的材料选择既需满足超高真空使用又要避免产生真空放电。通过理论计算和模拟氩离子束流的轨迹,确定了氩离子枪各主要组件的参数。测试结果表明:氩离子的加速电压可达20 kV,在工作距离为30 mm和氩气分压为 1.2×10^{-2} Pa的情况下,可产生50 μ A的氩离子束流,束斑的直径在19~24 mm之间连续可调。该氩离子枪体积小,可以安装在真空多维位移台上进行大范围的运动,实现对大口径光学元件的高真空表面抛光。

关键词 氩离子枪, 光学镜面抛光, 表面科学, 静电透镜

中图分类号 TL99

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.090401

Development of high energy and high flux argon ion gun

ZHU Meiqiang¹ SHI Xiaoqian¹ TANG Wa² DENG Weijie² GUO Fangzhun¹

1(Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China)

2(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract [Background] Large size aspherical mirrors have been widely used in space communication systems because of their high angular resolution and energy harvesting ability. [Purpose] This study aims to develop a high energy and high flux argon (Ar) ion gun for the rapid polishing of modified silicon layer on the surface of large size SiC aspherical mirror. [Methods] First of all, Ar ionization was realized by filament and anode grid. Ar⁺ energy was determined by anode voltage whilst the extractor and electrostatic lenses were employed to achieve Ar⁺ emission and focusing. The high transmittance of argon ions was realized by adjusting the voltage between the filament and the anode grid to maximize the ionization rate, and adjusting the size and relative position of the electrostatic focusing lens. The materials in the Ar ion gun were selected not only suitable for ultra-high vacuum, but also preventing from vacuum discharge. Then, the parameters of the main components of argon ion gun were determined by theoretical calculation and simulation of the trajectory of argon ion beam. Finally, preliminary experimental tests were carried out to verify its performance. [Results] The test results show that the Ar⁺ energy and beam flux can reach 20 keV and 50 μ A, respectively, at 30 mm working distance and Ar partial pressure of 1.2×10^{-2} Pa. The beam size can be

国家自然科学基金(No.11803037)资助

第一作者: 朱美强, 男, 1997年出生, 2019年毕业于巢湖学院, 现为硕士研究生, 研究领域为先进装备仪器

通信作者: 郭方准, E-mail: guofz@hotmail.co.jp

收稿日期: 2021-04-12, 修回日期: 2021-05-04

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.11803037)

First author: ZHU Meiqiang, male, born in 1997, graduated from Chaohu University in 2019, master student, focusing on advanced equipment and instruments

Corresponding author: GUO Fangzhun, E-mail: guofz@hotmail.co.jp

Received date: 2021-04-12, revised date: 2021-05-04

continuously adjusted from 19 mm to 24 mm. [Conclusions] This developed argon ion gun with small size, high energy and high flux, can be installed on a vacuum multi-dimensional displacement table for a wide range of movement to achieve high vacuum surface polishing of large aperture optical elements.

Key words Argon ion gun, Optical mirror polishing, Surface science, Electrostatic focusing lens

大口径非球面镜是空间科学研究、热核聚变、强激光发射和天文光学等领域中的核心部件,离子束抛光是非球面镜制作的主要技术之一^[1-3]。20世纪90年代以来,欧洲和亚太地区的科研机构,比如德国NTG(Neue Technologien GmbH)公司和德国IOM(Institute für Oberflächenmodifizierung)研究所、意大利INAF-OAB(Istituto Nazionale di Astrofisica-Osservatorio Astronomico di Brera)天文台和日本Canon公司等相继开展了对离子束抛光技术的研究。中国科学院长春光机所在2012年先后引进了德国NTG公司的IBF1000和IBF1500离子束抛光设备^[4-5],也期待国产的高能量大束流氩离子枪的早日成功。

离子枪的核心功能是中性分子/原子的离子化、加速和聚焦,主要用于表面刻蚀和离子注入^[6-9]。实验室作为表面处理而通常使用的氩离子枪能量在数百至两千电子伏特之间^[10-11],喷射到样品表面之后实现对表面原子层的剥离^[12-13]。选用氩离子的原因:一方面是惰性气体的离子不会和其他物质的表面发生化学反应;另一方面质量较大,而且成本低。离子束对固体表面的剥离作为研磨技术,避免了接触应力,能达到原子级别的精度^[14-18],是先进的光学元件抛光技术。

要实现对大口径光学元件表面的超精度快速抛光,则需要更高能量更大束流的氩离子枪。氩离子能量的提高意味着真空绝缘和选材的难度增加,而大束流的实现则一方面要求氩离子的密度大,同时也要求静电透镜的电压设定和空间尺寸排列更加合理。氩离子的产生,通常有冷阴极和热阴极两种方式^[19]。冷阴极方式通过真空中的高电压放电和外加磁场的组合实现^[20-21],占用空间较大。热阴极方式通过灯丝受热升温后释放热电子,然后激发氩原子而产生离子。热阴极方式不需外加磁场,因此结构紧凑,适合在真空中的驱动。热阴极方式通过设定热电子的能量,可以最大限度地提高氩原子的离子化率,而且能将氩离子束缚在有限空间的阳极栅网内,提高氩离子的密度。改变阳极栅网所处的电位,就能控制氩离子的能量。

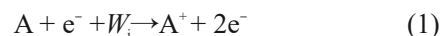
本文分析氩离子的产生原理,计算模拟各关键组件的电位和形状,设计制作了用于抛光大口径高精度碳化硅非球面反射镜表面改性层硅的20 keV

高能量大束流氩离子枪。该氩离子枪体积小,可以安装在真空多维位移台上进行大范围运动,实现对大口径光学元件的高真空表面抛光。

1 氩离子枪的工作原理和设计

1.1 氩离子枪的工作原理

热阴极氩离子枪的灯丝通电升温后可以释放热电子,热电子被加速到一定能量后可以使中性的气体原子(分子)失去电子而电离,电离的过程如下:



式中:A是被离子化的中性气体原子; W_i 是电离能; e^- 是电子; A^+ 是离子。

在距离氩离子枪灯丝2 mm处放置筒形阳极栅网,栅网的电位比灯丝高180 V。电子在电场作用下加速飞向阳极栅网,少部分电子撞到栅网上损耗,大部分电子进入栅网中。电子的产生和加速如图1所示,栅网中的部分氩原子受电子的激发而电离。电子的能量设定为180 eV,是因为所对应的德布罗意波长和氩原子的半径一致,以提高氩原子的离子化率^[22]。在阳极栅网外部设置一个外罩,与灯丝等电位,少量溢出阳极栅网的电子受到电场力作用后返回到栅网中,使得电子被束缚在栅网之内,这增大了氩原子的电离几率。阳极栅网上方设一引出孔(Extractor),不仅约束离子束流的指向,也可以实现离子束流的整形。灯丝和阳极栅网悬浮在高电压上,此高电压连续可调,最高值20 kV,决定射出的氩离子能量。

离子束流的聚焦采用静电透镜聚焦的方式。静电透镜由三组同心电极环构成,两端的电极环接地

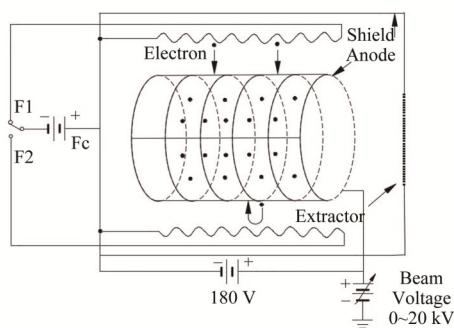


图1 氩离子枪中的热电子产生和加速示意图
Fig.1 Diagram of generation and acceleration of the hot electrons in the Ar ion gun

处于零电位,中间的电极环为高正电位。静电透镜的电场强度分布和聚焦效果如图2所示。从 x 方向看,离子束从A点进入,在B点和C点受到向左的力而减速,在D点和E点受到向右的力加速,到达F点速度增加到和A点一样。从 y 方向看,从A点进入,在B点受到向外的力,到C和D点受到向内的力,到E点又受到向外的力。由于C、D点受到向内的力比B、E点受到向外的力大,且受到向内的力所经历的时间比受到向外的力经历的时间长,所以整体呈现聚焦效果。

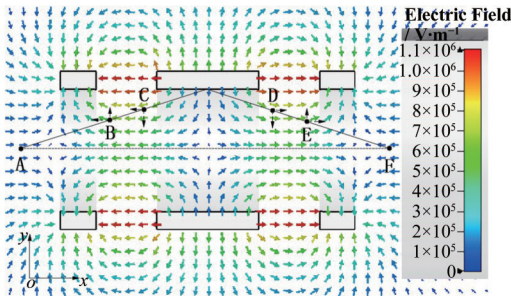


图2 氩离子枪静电透镜聚焦的电场分布和工作原理图
Fig.2 Working principle diagram of electric distribution of the electrostatic lenses in the Ar ion gun

1.2 氩离子枪的基本设计

离子枪的核心构造如图3所示,主要由灯丝、阳极栅网、外罩、离子引出极、静电聚焦透镜和喷气阀等组成。在这个核心构造里可以产生离子束,并完成对离子束的加速和聚焦。灯丝为两根直径0.125 mm的钨丝,共用一个公共电极,使用时先给一根灯丝通电,如果这根灯丝熔断则在不破坏真空环境的情况下使用另一根灯丝。阳极栅网底端封住,使得离子束只能从栅网上端引出。透镜之间使用聚四氟乙烯进行绝缘,同时也起到支撑作用,且可以防止损失的离子束对真空腔体进行溅射。离子枪底部采用4根不锈钢柱支撑,下端与聚四氟乙烯的绝缘台连接。离子枪尾部设有喷气阀,喷气阀通过流量微调阀与脉冲电源相连接,可使氩气以脉冲的方式进入进气腔室,并可以调节氩气流量的大小。

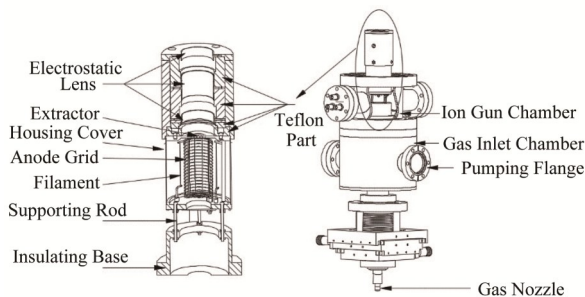


图3 离子枪的结构设计示意图
Fig.3 Design diagram of core structure of the Ar ion gun

针对氩离子枪的设计,运用CST仿真软件对聚焦透镜进行模拟,以获得理想的聚焦透镜尺寸和电压值。所需的主要参数是聚焦透镜的内径 r 、离子引出极与其距离最近的接地透镜之间的距离 D_a 、聚焦透镜间的距离 D_b 。当离子的能量为20 keV时的模拟结果如图4所示。图4(a)是离子束从右侧向左侧喷射时的运动轨迹和在不同位置的能量,离子束在静电透镜中实现了聚焦,但透镜之间的空隙也导致部分离子的损失。图4(b)显示检测到的离子数随着透镜的半径增大而增大,但过大的透镜半径也会导致聚焦效果的减弱。经过综合对比之后,最终选择透镜的半径为12 mm。图4(c)显示检测到的离子数在 D_a 为10~14 mm之间有较大值。考虑到透镜和引出极之间的真空放电问题,最终确定 D_a 为12 mm。图4(d)显示离子数的损失随着透镜间距增大而增大,考虑到静电透镜自身的真空放电,选择 D_b 为12 mm比较合理。

控制电源是氩离子枪的重要组成部分,包括电子电路、显示仪表等。启动离子枪控制电源后,灯丝和阳极栅网之间就自动施加180 V的电压差。调节控制电源的电流旋钮,逐步加大灯丝的通电电流。调节加速电压旋钮,以改变离子束的能量。调节聚焦旋钮,通过可变电阻改变中间静电聚焦透镜电压值,完成离子束的聚焦。氩离子的加速电压和聚焦电压可以连续调节,最高可达20 kV。

2 氩离子枪的测试

为了测试氩离子枪的束流和束斑尺寸,我们制作了检测机构^[22]。将无氧铜薄板固定在陶瓷绝缘件上,通过真空直线导入器实现直线驱动。无氧铜薄板通过同轴BNC馈通和大气中的电流表连接,再与接地端连接形成回路。

测试前,先用万用表确定电源部分连接正确,再对真空系统进行检漏,打开机械泵和分子泵进行抽真空,获得真空腔室的本底真空为 10^{-5} Pa。设置气体流量控制阀的流量值,通过喷气阀向真空腔室内导入氩气。旋转灯丝电流按钮,调节离子加速电压。随着灯丝电流的增加,连接在无氧铜薄板上的微电流表开始出现读数。旋转聚焦旋钮,找到束流最强时所对应的聚焦电压。操作检测机构的直线导入器,记录不同位置的微电流值,得到氩离子束的空间分布。当检测机构的无氧铜薄板进入到氩离子束斑领域时,微电流表上开始出现数值,继续驱动则束流值逐渐变大。若离子束全部射入无氧铜薄板,测得的离子束流达到最大且不变,当无氧铜薄板逐渐离开束斑领域时,束流逐渐减小直至消失。

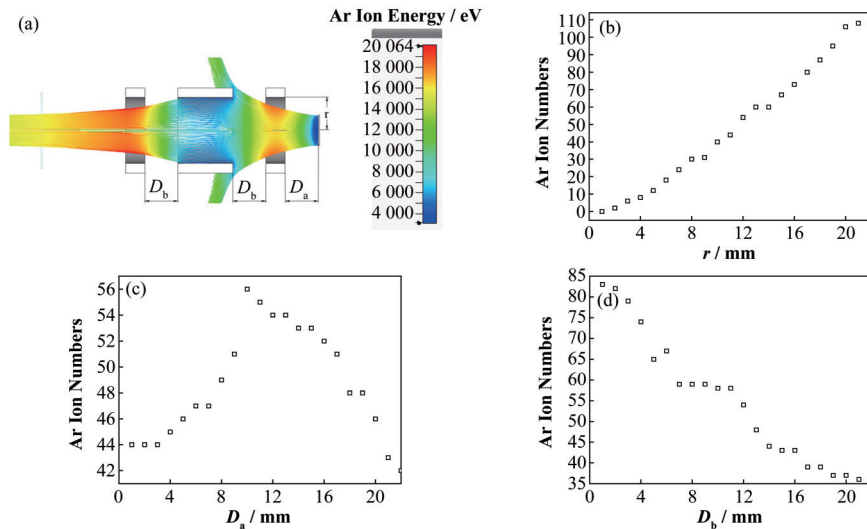


图4 氩离子在静电聚焦透镜中的运动轨迹和能量变化(a), 氩离子数和静电透镜半径的对应关系模拟结果(b), 氩离子数和引出极相对位置的对应关系模拟结果(c), 模拟检测到离子数与透镜间距离的关系(d)

Fig.4 Energy change and trajectory of the Ar ions in the electrostatic lenses (a), the simulated relationship between the detected Ar ion numbers and the electrostatic lens radius (b), the simulated relationship between the detected Ar ion numbers and extractor positions (c), the simulated relationship between the detected Ar ion numbers and electrostatic lens distances (d)

离子束流值和束斑的空间分布受多项参数影响,例如氩气气压、离子加速电压、聚焦电压、灯丝电流以及工作距离等。图5是在工作距离为30 mm、加速电压为17 kV、聚焦电压为15 kV、氩气分压为 1.2×10^{-2} Pa的状况下,实测到离子束流值与灯丝电流值之间的关系。从实测结果可知,离子束流值随着灯丝电流增加而增加,且离子束流值可达50 μ A。

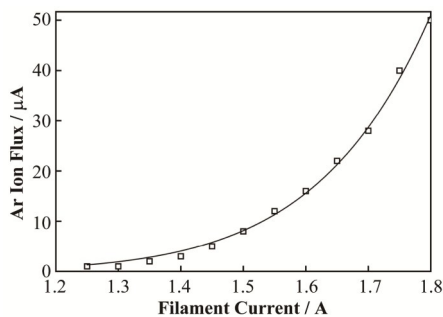


图5 实测的离子束流与灯丝电流之间的对应关系
Fig.5 Relationship between the measured Ar ion flux and filament current

图6是在工作距离为30 mm、聚焦电压为15 kV、灯丝电流为1.25 A、氩气分压为 2.2×10^{-2} Pa的状况下,实测到离子束流与加速电压的关系。加速电压越大离子束流越大,且加速电压可达20 kV。

在工作距离为30 mm、加速电压为17 kV、聚焦电压为15 kV、灯丝电流为1.5 A的状况下,离子束流值与氩气流量的测试结果如图7所示。离子束流随着氩气流量增大而增大,且氩气流量与离子束流值

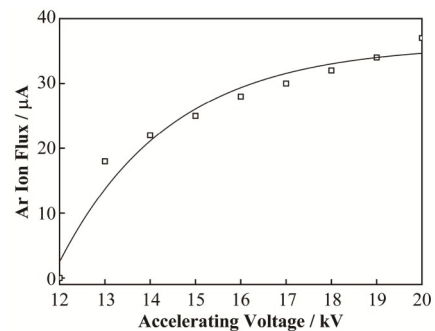


图6 实测的离子束流与加速电压之间的对应关系
Fig.6 Relationship between the measured Ar ion flux and accelerating voltage

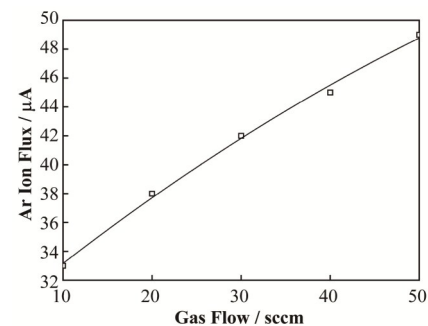


图7 实测的离子束流与氩气流量之间的对应关系
Fig.7 Relationship between the measured Ar ion flux and gas flow

几乎成正比。

图8是在工作距离为30 mm、加速电压为17 kV、灯丝电流为1.5 A、氩气分压为 1.2×10^{-2} Pa的状况下,实测到离子束斑尺寸与聚焦电压之间的关系。调节聚焦电压(0~16 kV),随着聚焦电压增加束

斑尺寸先逐渐减小,再逐渐增大。束斑直径的实测结果最小值是19 mm,最大值是24 mm,束斑直径为最小值时的聚焦电压是13 kV。束斑的直径通过半峰全宽(Full Wave at Half Maximum, FWHM)方式来评价。

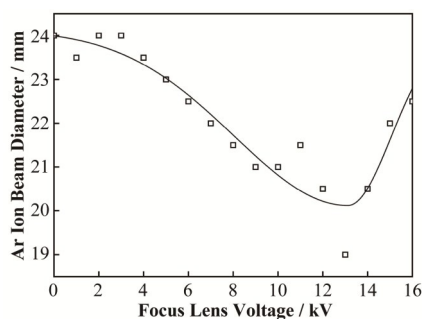


图8 实测的离子束斑直径与聚焦电压之间的对应关系
Fig.8 Relationship between the measured Ar ion beam diameter and focus lens voltage

氩离子的数量和灯丝释放的热电子数量以及氩气的量成正比例的关系。灯丝释放的热电子数量随着温度的升高而呈指数增长,由此带来的氩离子数量也和温度(灯丝电流)呈指数对应关系。发射出去的氩离子能量越大,则穿过静电透镜的数量就越多,而且飞行距离越远,因此检测到的氩离子束流随着加速电压的增大而增加,当所有释放出来的离子都被检测到之后,束流值趋于一个稳定值。

3 结语

本文介绍的高能量大束流氩离子枪将离子产生、加速引出、聚焦等一系列原理体现在设计中,同时配备自主研发的控制电源,实现了在工作距离为30 mm和氩气分压为 1.2×10^{-2} Pa的情况下,氩离子能量20 keV,束流50 μ A,并且束斑的直径在19~24 mm之间连续可调的功能。该氩离子枪的各项性能指标完全满足真空环境中固体表面刻蚀或深度分析的要求,适合大口径高精度碳化硅非球面反射镜的表面改性层硅的快速光滑抛光。

参考文献

- 赵蒙. 大口径非球面精密加工技术综述[J]. 科技视界, 2014, (15): 5, 39. DOI: 10.19694/j.cnki.issn2095-2457.2014.15.001.
ZHAO Meng. Summary of precision machining technology for large-aperture aspheric surface[J]. Science & Technology Vision, 2014, (15): 5, 39. DOI: 10.19694/j.cnki.issn2095-2457.2014.15.001.
- 王之恒. 非球面光学元件离子束抛光技术研究[D]. 西

安: 西安工业大学, 2019.

WANG Zhiheng. Research on ion beam polishing technology of aspherical optical components[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2019.

- Zorina M V, Nefedov I M, Pestov A E, *et al.* Precision aspherization of the surface of optical elements by ion-beam etching[J]. Journal of Surface Investigation X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques, 2015, **9**(4): 765 - 770. DOI: 10.1134/S1027451015040394.
- 张旭. 中大口径光学元件离子束抛光控制技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2019.
ZHANG Xu. Study on control technology of ion beam figuring for medium and large aperture optical components[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2019.
- 梅林宇. 离子束抛光确定性修形技术研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2019.
MEI Linyu. Research on deterministic processing technology of ion beam figuring[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2019.
- Gushnets V, Bugaev A, Oks E. Ion source based on a circular anode layer plasma thruster[J]. The Review of Scientific Instruments, 2019, **90**(11): 113310. DOI: 10.1063/1.5127095.
- Averin I A, Berdnikov A S, Masyukevich S V, *et al.* Ion-optical system of an ion source with energy focusing in the formed beam[J]. Technical Physics, 2019, **64**(4): 564 - 568. DOI: 10.1134/S1063784219040042.
- 靳硕学, 郭立平, 彭国良, 等. 在线低能气体离子源[J]. 核技术, 2010, **33**(3): 211 - 214.
JIN Shuoxue, GUO Liping, PENG Guoliang, *et al.* An online low energy gaseous ion source[J]. Nuclear Techniques, 2010, **33**(3): 211 - 214.
- 刘仲阳, 孙官清, 张大忠, 等. 电子回旋共振离子源的研制及应用[J]. 核技术, 1999, **22**(6): 343 - 347.
LIU Zhongyang, SUN Guanqing, ZHANG Dazhong, *et al.* Development of an electron cyclotron resonance ion source and its application[J]. Nuclear Techniques, 1999, **22**(6): 343 - 347.
- 郭方准. 实用真空技术[M]. 2版. 大连: 大连理工大学出版社, 2020: 120 - 122.
GUO Fangzhun. Vacuum science and technology[M]. 2nd Ed. Dalian: Dalian University of Technology Press, 2020: 120 - 122.
- Zeuner M, Kiontke S. Ion beam figuring technology in optics manufacturing[J]. Optik & Photonik, 2012, **7**(2):

- 56 – 58. DOI: 10.1002/opph.201290051.
- 12 Li S Y, Jiao C J, Xie X H, *et al.* Stitching algorithm for ion beam figuring of optical mirrors[J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2009, **52**(12): 3580 – 3586. DOI: 10.1007/s11431-009-0309-8.
- 13 Wang T Y, Huang L, Kang H, *et al.* RIFTA: a robust iterative Fourier transform-based dwell time algorithm for ultra-precision ion beam figuring of synchrotron mirrors [J]. Scientific Reports, 2020, **10**(1): 8135. DOI: 10.1038/s41598-020-64923-3.
- 14 邢进. 光学非球面 CCOS 抛光理论与技术研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020.
XING Jin. Research on the CCOS polishing theory and technology of optical aspheric surface[D]. Changchun: Jilin University, 2020.
- 15 焦长君, 李圣怡, 王登峰, 等. 离子束加工光学镜面的材料去除特性[J]. 光学精密工程, 2007, **15**(10): 1520 – 1526. DOI: 10.3321/j.issn:1004-924x.2007.10.011.
JIAO Changjun, LI Shengyi, WANG Dengfeng, *et al.* Material removal property in ion figuring process for optical components[J]. Optics and Precision Engineering, 2007, **15**(10): 1520 – 1526. DOI: 10.3321/j.issn: 1004-924x.2007.10.011.
- 16 Lu Y, Xie X H, Zhou L, *et al.* Improve optics fabrication efficiency by using a radio frequency ion beam figuring tool[J]. Applied Optics, 2017, **56**(2): 260 – 266.
- 17 Maishev Y P. Creation and development of the ion beam technology[J]. Russian Microelectronics, 2019, **48**(6): 347 – 363. DOI: 10.1134/S1063739719050068.
- 18 唐瓦, 邓伟杰, 李锐钢, 等. 离子束抛光高陡度离轴非球面的去除函数修正[J]. 光学精密工程, 2015, **23**(6): 1572 – 1579.
TANG Wa, DENG Weijie, LI Ruigang, *et al.* Correction of removal function of ion beam figuring highly steep off-axis asphere[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, **23**(6): 1572 – 1579.
- 19 任春生, 牟宗信, 王友年. 低能高束流氩离子源的结构及性能[J]. 核技术, 2006, **29**(10): 730 – 733.
REN Chunsheng, MU Zongxin, WANG Younian. Construction and characteristics of a low-energy high beam current argon ion source[J]. Nuclear Techniques, 2006, **29**(10): 730 – 733.
- 20 Liu Y G, Ke J L, Zhao G Y, *et al.* Effect of magnetic field distribution on ECR ion source discharge[J]. Nuclear Science and Techniques, 2018, **29**(9): 126. DOI: 10.1007/s41365-018-0464-3.
- 21 Long J D, Yang Z, Dong P, *et al.* Study on a cold-cathode H⁺ PIG-type ion source[J]. Nuclear Science and Techniques, 2013, **24**(4): 040201. DOI: 10.13538/j.1001-8042/nst.2013.04.008.
- 22 臧侃, 董华军, 郭方准. 国产氩离子枪的研发[J]. 物理, 2014, **43**(1): 49 – 53.
ZANG Kan, DONG Huajun, GUO Fangzhun. Development of domestic Ar ion gun[J]. Physics, 2014, **43**(1): 49 – 53.