

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20170221002

Duhocamis 放电特性之空心阴极与热阴极的协同效应

赵渭江, 付东坡, 巩玲华, 杨向军, 丁杏芳, 刘克新

(1. 北京大学 重离子物理研究所, 北京 100871; 2. 北京大学 核物理与核技术国家重点实验室, 北京 100871)

摘要: Duhocamis(双空心阴极金属离子源)是在 GSI 间接热阴极 PIG 离子源基础上, 利用空心阴极圆筒取代空心阳极圆筒, 磁镜场取代均匀磁场的强流金属离子源。通过系列变化空心阴极与间接热阴极电源电压的弧放电试验, 了解其对离子源工作及金属等离子体形成的贡献和影响。试验结果分别给出了空心阴极与间接热阴极弧放电特性曲线, 它们的弧压对弧流关系具有不同的弧阻抗特性; 通过磁分析器对等离子体中各种离子成分比例的分析, 进一步显示出空心阴极与间接热阴极弧放电两者相互强化和联动的协同效应; 尤其空心阴极电位从零开始变化的弧放电试验, 揭示了离子源从 PIG 空心阳极放电向双空心阴极放电转换的过程; 协同效应不仅证实空心阴极作为赖以产生金属离子的溅射电极, 而且对于确立离子源工作模式与优化产生所需金属离子的放电条件至关重要。

关键词: 离子源; 金属离子束; 潘宁放电; 空心阴极

中图分类号: O461.2

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2017)04-0008-06

Synergistic Effects of Hollow Cathode and Heated Cathode on Duhocamis Discharge Characteristics

ZHAO Wei-jiang, FU Dong-po, GONG Ling-hua, YANG Xiang-jun, DING Xing-fang, LIU Ke-xin

(1. Institute of Heavy Ion Physics, Peking University, Beijing 100871; 2. State Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology, Peking University, Beijing 100871)

Abstract: The Duhocamis (dual hollow cathode metal ion source) was derived from the indirectly heated cathode GSI-PIG ion source, which was modified by introducing a hollow cathode cylinder and a magnetic bottle-shaped field to replace a hollow anode cylinder and a homogeneous magnetic field. To understand the different discharge characteristics of Duhocamis than that of PIG, a series of arc discharge experiments with variation of the hollow cathode and the heated cathode power supply voltages were realized, and the dual hollow cathode and the indirectly heated cathode arc discharge curves were presented. The effects of these voltages on arc discharge and metal plasma formation with their different impedance characteristics were discussed. It is emphasized the synergistic effect of hollow cathode and heated cathode on arc discharge. Especially, a transformation process of discharge characteristics from the PIG hollow anode discharge mode to the dual hollow cathode discharge has been revealed when the hollow cathode potential started from zero. Therefore, the hollow cathode can not only provide the materials for metal ions as a sputter cathode, but also greatly enhance the arc discharge of the source and establish the metal plasma with the dual hollow cathode discharge because of the synergistic effect.

Keywords: ion source; metal ion beam; Penning discharge; hollow cathode

收稿日期: 2017-02-21; 修回日期: 2017-06-14

网络出版日期: 2017-06-21 09:32; 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20170621.0932.006.html>

通讯作者: 赵渭江(1938—), 男(汉), 教授; 研究方向: 离子源/离子束的物理与应用; E-mail: wjzhao@pku.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(11475011)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (11475011)

引文格式: 赵渭江, 付东坡, 巩玲华, 等. Duhocamis 放电特性之空心阴极与热阴极的协同效应[J]. 中国表面工程, 2017, 30(4): 8-13.

ZHAO W J, FU D P, GONG L H, et al. Synergistic effects of hollow cathode and heated cathode on Duhocamis discharge characteristics[J]. China Surface Engineering, 2017, 30(4): 8-13.

0 引言

双空心阴极金属离子源(Dual hollow cathode metal ion source, Duhocamis),是在研究运行德国重离子研究所(Gesellschaft für Schwer ionenforschung mbH, GSI)潘宁离子源(Penning ion gauge ion source, PIG)过程中,提出的在磁镜场中由圆筒形空心阴极溅射出所需金属原子并进一步电离而特别有利于产生和引出多种电荷态金属离子束的强流离子源^[1-2]。在北大建设 Duhocamis 研究平台之前曾在 GSI 经历了两个研发阶段:一是所谓紧凑型热阴极 PIG 离子源(Compact PIG source, CPIG),即用一个小型低磁镜场大间隙电磁铁代替产生高强度轴向均匀场的大电磁铁,在磁极间隙内安装了原有 GSI-PIG 离子源放电室结构。其原初目的是为了摆脱引出电压对磁场强度与离子荷质比的严格依赖关系,可以提高引出电压来引出更高离子流^[3];二是将 PIG 放电室结构改成双空心阴极放电结构(Dual hollow cathode discharge, DHCD),即将 PIG 结构中带引出口的空心阳极圆筒切割成3段(相邻2段都有间隙),其较长的中央段由带引出口的空心阴极圆筒取代并且用以溅射、电离、产生所需金属离子,成为一种特别适合产生强流金属离子束的放电室结构;它可以在均匀磁场或磁镜场中工作,试验表明后者可以更稳定地工作并获得更强金属离子流^[4]。PIG 离子源的基本工作原理是电子被高强度轴向磁场约束在空心阳极之中,并保持在位于阳极两端外侧的两个阴极之间震荡,从而实现很高的电离效率;能够产生中高电荷态的气体和金属离子流。它在回旋加速器和直线加速器中曾被重用并进行过深度研究,然而对于 PIG 放电仍有不清楚的地方^[5]。Duhocamis 是基于 CPIG 和 DHCD 的结构特征与研究经验,进一步采用高强度轴向磁镜场和电位独立可调的空心阴极;保留着电子被高强度轴向磁场约束并在阴极之间震荡的 PIG 放电的基本条件。Duhocamis 研究平台为研究等离子体放电多重机制提供了一个新的试验装置^[6],用以研究阴极溅射和再沉积、金属等离子体形成及其特征^[7-10],对开发各类金属离子束技术有着广阔的应用前景^[11-14]。

利用 Duhocamis 试验平台,曾研究了高强度磁镜场中空心阴极弧放电特性^[2],显示出特别的磁场效应:弧放电阻抗(弧压对弧流之比)起初随离子

源磁场强度增加单调下降,当中心磁场升达 0.4 T 以上,弧放电阻抗几乎不再下降;而且在弧流高过 3 A 后,弧压随弧流增加几乎不变。对比相似条件下 PIG 放电模式时却没有观察到这种效应。文中研究的是另一方面的特性,即双空心阴极电位与间热阴极电位分别对弧放电过程和离子源工作的影响及其相互关系。以往试验^[2,4]都是热阴极和空心阴极由同一个电源供电而处于相同电位,因此没有能够观测到这方面的现象。

文中将通过系列变化空心阴极与间热阴极电源电压进行弧放电试验,给出空心阴极与间热阴极弧放电特性曲线,分析弧压与弧流关系及其相互影响;尤其空心阴极电位从零开始变化的弧放电试验,帮助了解离子源从 PIG 空心阳极放电模式向双空心阴极放电模式转换和形成金属等离子体的过程;基于对等离子体中离子成分和离子比的分析,初步确立优化产生金属离子的双空心阴极放电的基本条件,对双空心阴极和间热阴极弧放电之间的相互强化和联动的协同效应作进一步的讨论。

1 试验装置

1.1 离子源结构

Duhocamis 离子源的结构与供电示意图见图 1。图 1(a)中 1 为加热阴极的钨丝;2 和 6 为一个被加热的间热阴极和它的对阴极;3 和 5 为位于空心阴极两侧的一对阳极;4 为带有离子引出口的空心阴极;8 和 12 为加减速引出电极;11 为一对间隙为 20 cm 的离子源磁铁磁极,其间产生磁镜比接近 2 和最高中心磁场大约 0.6 T 的磁镜场。它的边缘磁场在离子束引出方向延伸至 50 cm;采用磁屏蔽后,仍有 7~8 cm 范围的边缘磁场使引出离子轨道发生偏转。为了修正这种偏转、提高离子束传输效率,紧接引出电极在磁屏蔽体端面装有一对静电导向偏转板,作为离子引出系统的一部分^[15]。

离子源采用脉冲放电,为热阴极与空心阴极供电的是两个独立的、脉宽和频率可调的同步触发脉冲电源,分别外接一个 150 Ω 与 100 Ω 的电阻用以稳定弧流。从图 1(b)中可看到阳极电位处于离子源高压平台的地电位。当空心阴极电源电压为零,即和阳极同电位时,离子源工作为磁镜场中准 PIG 模式(因为一对阳极与空心阴极之间都有

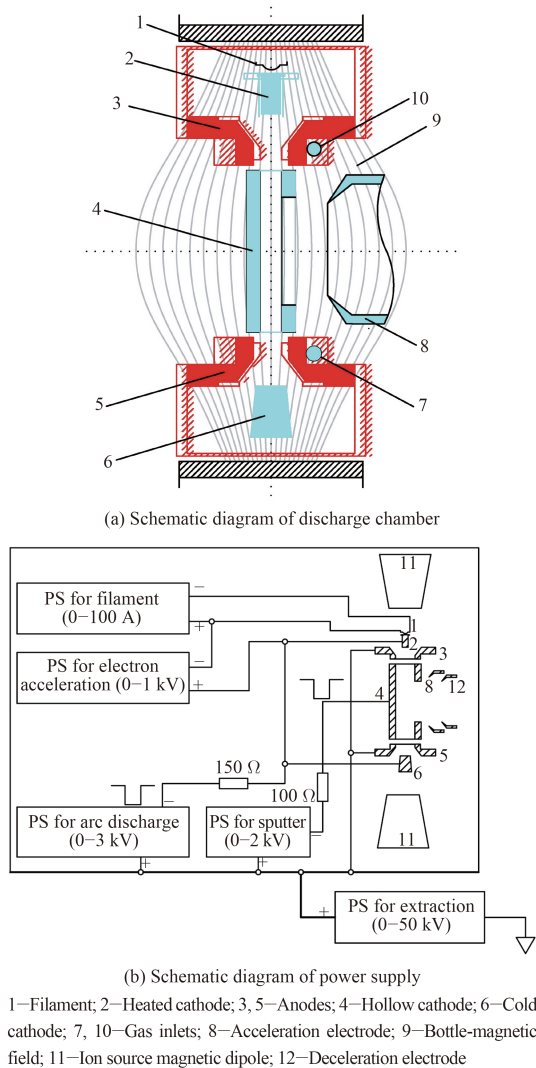


图1 Duhocamis 放电室结构和供电示意图

Fig.1 Schematic diagram of discharge chamber structure and power supply for Duhocamis

间隙, 不是一个完整的阳极)。因此从空心阴极电位由零开始降低变化的试验过程, 可以观测到离子源从准 PIG 空心阳极放电模式转换到双空心阴极放电模式并建立金属等离子体的过程。引出电源电压最高允许 50 kV, 考虑到多电荷离子, 金属离子的能量高端可不低于 100 keV。利用特殊引出系统设计, 离子束低端能量可小于 1 keV。因此, 该离子源将能产生多种电荷态、能量可变范围近百倍、脉冲宽度与重复频率可调的各类金属离子束, 将适用于金属等离子体和金属离子束技术与应用的基础性研究。

1.2 试验平台

现阶段主要研究离子源的等离子体放电特性

及其离子成分分析, 试验平台主要由 Duhocamis 离子源系统、一个 90°磁分析器及其后的一个简易靶室 3 部分组成(见图 2)。离子源系统包括图 1 所示的离子源磁铁、放电室、全部电源及隔离变压器和它们的测量和遥控系统, 配有离子源和磁铁及其电源的去离子水冷系统、放电供气系统、真空系统和操纵台。双聚焦型 90°磁分析器的偏转半径为 35 cm、磁极间隙为 5 cm, 它与离子源距离约 1 m 左右。磁分析器后的简易靶室带有插板阀和独立分子泵, 缝宽为 20 mm 的法拉第杯与可进行离子辐照的样品转动靶。磁分析器前后没有其它束流输运部件。

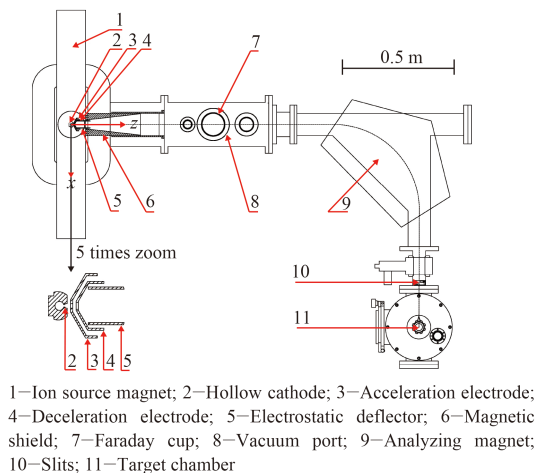


图2 Duhocamis 离子源实验平台示意图

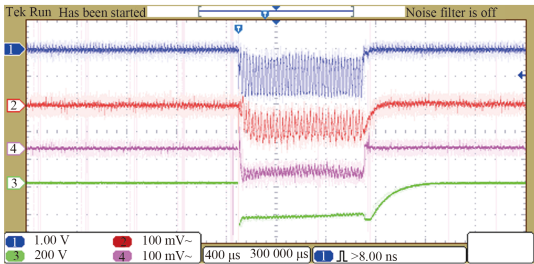
Fig.2 Schematic diagram of the test bench for Duhocamis

2 结果与讨论

2.1 方法与条件

在研究空心阴极与间热阴极电源电压变化对双空心阴极等离子体影响时, 空心阴极与间热阴极电源电压分别为弧放电时唯一系列调变参数; 影响放电的其余参数分别为: 氩气进气量 1 mL/min, 真空度 1.6×10^{-3} Pa, 灯丝加热功率 240 W, 间热阴极电子功率 0.9 kW, 弧放电脉冲宽度、频率为 1 ms、10 Hz, 离子源磁铁中心场强 0.26 T(为了避免高磁场效应^[4]而设置成低于 0.4 T), 引出电压 25 kV 和抑制电压 -2 kV。使用内径为 8 mm, 长为 60 mm 的半铜半铝的圆筒形空心阴极, 其中半个铜电极带引出口并面向加速电极。利用这样的溅射阴极结构, 可得到铜和铝离子, 也可以了解空心阴极不同部位的原子溅射、电离和迁移情

况。离子束从离子源引出后直接通过磁分析器, 由法拉第杯接收给定荷质比的分析离子流, 并由脉冲示波器检测、记录; 同时由一台四通道示波器记录弧放电时空心阴极和间热阴极的弧压、弧流脉冲波形(见图 3)。



1, 2—Arc voltage and current of indirectly heated cathode arc discharge;
3, 4—Arc voltage and current of hollow cathode discharge

图 3 弧压和弧流脉冲的波形照片

Fig.3 Photo for pulses of arc discharge voltage and current

试验先给定间热阴极电源输出电压如-600 V, 然后空心阴极电源输出电压从零开始降低至如-200 V、-400 V 等, 对应每一对热阴极和空心阴极电压进行离子源放电试验。同时记录间热阴极和阳极之间的热阴极弧、空心阴极和阳极之间的空心阴极弧的弧流、弧压, 通过磁分析器测量与之对应的离子谱。或者反之, 先给定空心阴极电源输出电压, 然后系列变化间热阴极电源输出电压。显然, 不同的间热阴极电压和空心阴极电压的组合, 会形成不同的弧放电条件。直接表征弧放电特性的是它们的弧压、弧流, 以及等离子体中的离子成分和离子比。

2.2 结果与讨论

2.2.1 热阴极和空心阴极的弧放电特性

图 4 和图 5 分别给出了固定空心阴极电源或间热阴极电源电压后, 弧放电时的热阴极 (Indirectly heated cathode, IHEC) 和空心阴极 (Dual hollow cathode, DHOC) 的弧压与弧流变化特性。图 4 中空心阴极电源电压为 0 V 的放电曲线(即与阳极同电位时的准 PIG 放电曲线), 与空心阴极电源电压 200 V 时放电曲线可进行对比。但其余曲线表示提高空心阴极电源电压则明显强化热阴极的放电, 而且这种作用随着空心阴极放电的加强进一步增强; 或者说, 在同一 IHEC 弧压时不仅达到更高的 IHEC 弧流, 而且弧阻抗(弧压对弧流之比)在减小。在试验参数范围内, 弧流和弧阻抗

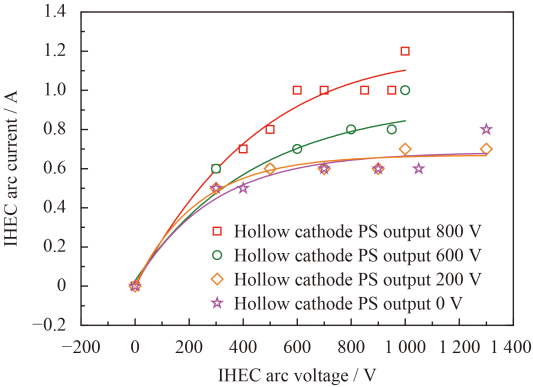


图 4 热阴极弧压与弧流特性的关系

Fig.4 Relationships between indirectly heated cathode arc voltage and current characteristics

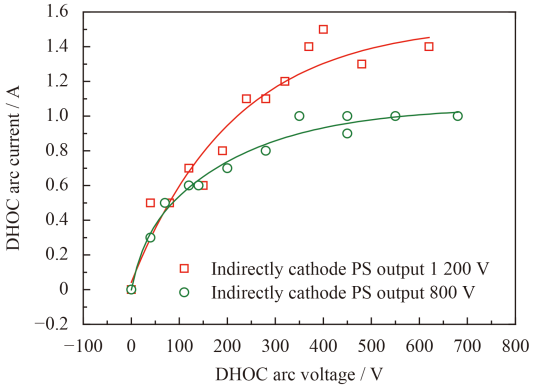


图 5 空心阴极弧压与弧流特性的关系

Fig.5 Relationships between hollow cathode arc voltage and current characteristics

几乎随着空心阴极电源电压升高而分别线性增加和降低。从图 5 可以看到空心阴极弧压与弧流特性与图 4 有类似的变化趋势, 同一条曲线下弧流随着弧压增加而缓慢增加, 即其弧阻抗在增加; 同时 IHEC 放电对 DHOC 的弧流也是增强效应, 或者说降低其弧阻抗并减慢其增长。但是有一点不同, DHOC 的弧流一开始随弧压增长迅速, 即起始弧阻抗比较低, 暗示着 IHEC 放电的影响更加显著。

2.2.2 间热阴极与空心阴极放电的相互影响

放电时的弧压低于其电源电压, 而且随弧流增加而降低(从图 1 中供电回路可以看到这一点)。因此考察间热阴极放电与空心阴极放电之间的相互影响, 需要直接考察间热阴极弧压对空心阴极弧流, 或者空心阴极弧压对间热阴极弧流的影响。图 6 和图 7 分别给出上述两种试验结果。从图 6 可以清楚地看到热阴极弧压对空心阴极弧流

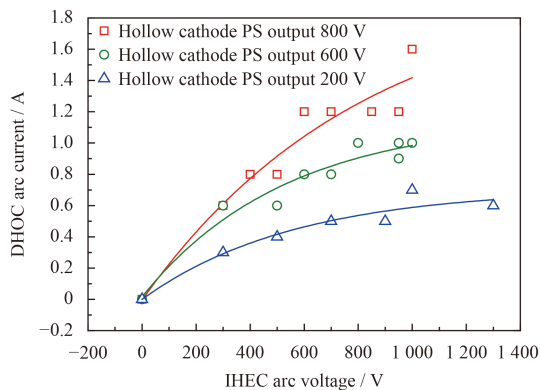


图6 热阴极弧压对空心阴极弧流的影响

Fig.6 Effects of IHEC arc voltage on DHOC arc current

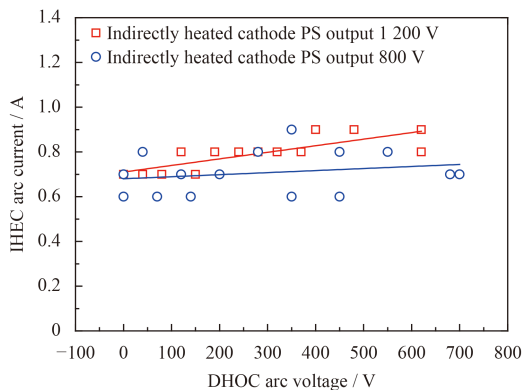


图7 空心阴极弧压对热阴极弧流的影响

Fig.7 Effects of DHOC arc voltage on IHEC arc current

的影响明显, 对其贡献随着热阴极弧压和空心阴极弧压的增长而增大。没有热阴极起弧也没有空心阴极弧流。然而从图7来看, 空心阴极弧压对热阴极弧流的影响不大。进一步说明, 阳极与空心阴极之间等离子体明显地依赖于热阴极放电和空心阴极放电两个方面; 而阳极与热阴极之间等离子体主要决定于热阴极放电, 来自空心阴极放电的贡献很小。

2.2.3 离子流强随空心阴极弧压的变化

作为金属等离子体离子源, 需要了解等离子体的各种离子成分比率以及它们的变化规律。图8为热阴极弧电源电压1200V时, 由磁分析器测量得到的各种成分离子流强随空心阴极弧压变化的曲线。空心阴极弧压从100V升至400V, 金属离子流由零增长至最大, 同时 Ar^+ 和 Ar^{2+} 分别在200V和300V左右出现峰值。对应 Ar^{2+} 峰也是总束流峰。表明在100V至400V这个弧压区间, Ar^+ 的能量与流强足以溅射出大量金属原子, 也有大量电子达到一定能量产生二价氩和铜的离子。图9

表示气体离子比和金属离子比随弧压增加而分别减小和增加的过程, 在该弧压区间内离子比发生迅速变化。对照图5, 空心阴极弧流正是在弧压区间从0.5A向1A迅速增长, 暗示其弧流增长中金属离子占据很大比率。显然, 上述弧压区间与阴极溅射能量阈值和放电条件的组合等有关。

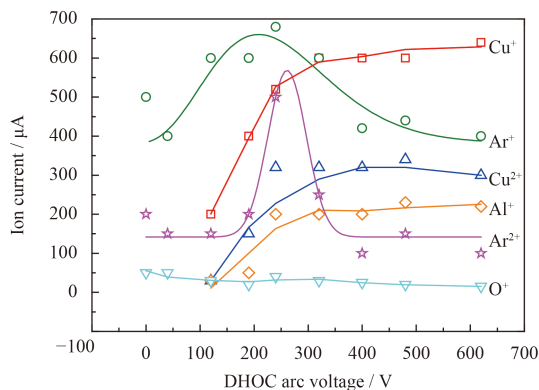


图8 离子流强随空心阴极弧压的变化(热阴极弧电源电压1200V)

Fig.8 Changes of ion currents with DHOC arc voltage (IHEC PS output is 1200 V)

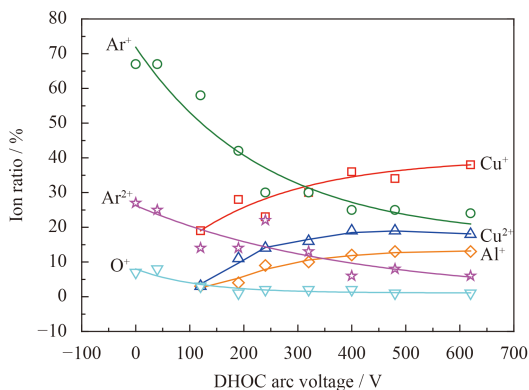


图9 离子比随空心阴极弧压的变化(热阴极弧电源电压1200V)

Fig.9 Changes of ion ratio with DHOC arc voltage (IHEC PS output is 1200 V)

2.2.4 空心阴极与热阴极的协同效应

空心阴极金属离子源在空心阴极内形成金属等离子体并从中引出离子, 它与间接热阴极放电过程关系密切。图6说明热阴极放电是基础, 没有阳极与间接热阴极之间的原初等离子体就建立不起空心阴极等离子体; 图7表明空心阴极电位对热阴极放电也保持着正相关的影响, 但这种关联不是特别紧密; 图8进一步表明空心阴极放电是形成金属等离子体的充要条件, 而且需要优化所需金属离子的空心阴极电位。可见, 空心阴极等离子体的形成过程是空心阴极放电与热阴极放电互

相强化和联动的结果,简言之是两个电极的协同效应所致,尤其影响着金属离子的产生。其过程也揭示了离子源放电模式的转换,或者说,原来在空心阳极中由强磁场约束和两阴极之间来回震荡的电子的状态与作用,因为空心阴极电位降低而发生本质的变化,导致放电模式的变化。当空心阴极电位为零时(即与阳极同电位成空心阳极),离子源工作在磁镜场中 PIG 气体离子源模式。一旦空心阴极电位低于阳极电位($\geq 400\text{ V}$),离子源工作模式就变空心阳极 PIG 放电为双空心阴极放电,其标志是金属等离子体的形成并占主导成分,即空心阴极原子溅射和二次电子发射在空心阴极等离子体形成中占据越来越大的比重,弧流成倍地增加,金属离子比迅速增加,气体离子比随之大幅度下降。

3 结 论

(1) 双空心阴极金属离子源 Duhocamis 具有高强度磁镜场和双空心阴极结构的特点,特别有利于产生各种金属离子束。其中圆筒形空心阴极承担着溅射和再沉积所需的金属原子、产生二次电子、容纳等离子体以及作为引出离子电极的多重功能。深入认识和了解空心阴极工作模式和特征,将为 Duhocamis 的研发应用提供进一步的依据。

(2) 通过系列变化空心阴极和热阴极电源电压的弧放电试验,讨论了 Duhocamis 中空阴极和热阴极弧放电过程的各自特征和它们的相互关系,强调指出它们在形成双空心阴极等离子体尤其金属等离子体过程中互相强化和联动的协同效应。这种协同效应构成了 Duhocamis 弧放电过程的基本特征。

(3) 协同效应同时揭示了离子源工作如何由 PIG—空心阳极放电模式向双空心阴极放电转变的过程与条件,另一方面由此可以确立优化产生所需金属离子的空心阴极和热阴极电位的匹配条件。

参考文献

[1] ZHAO W J, MÜLLER M W O, JANIK J, et al. Duhocamis: A dual hollow cathode ion source for metal ion beams[J]. Review of Scientific Instruments, 2008, 79(2): 02B315.

[2] FU D P, ZHAO W J, GUO P, et al. Discharge characteristics of the DUHOCAMIS with a high magnetic bottle-shaped field[J]. Chinese Physics C, 2014, 38(10): 107006.

[3] MÜLLER M, ZHAO W J. The “compact-PIG-source”[R]. Darmstadt: GSI, 1983.

[4] MÜLLER M. Dual HCD ion source for high current metal ion beams[R]. Darmstadt: GSI, 2001.

[5] Wolf B. Handbook of ion sources[M]. New York: CRC Press, 1995.

[6] 付东坡, 赵渭江, 朱昆, 等. 双空心阴极以及双空心阴极等离子体装置和应用[P]. 中国: 201110386985.2. 2014-04-30.

FU D P, ZHAO W J, ZHU K, et al. Dual hollow cathode and dual hollow cathode plasma device and their application[P]. China: 201110386985.2. 2014-04-30 (in Chinese).

[7] KELLER R. High-intensity ion sources for accelerators with emphasis on H^+ beam formation and transport[J]. Review of Scientific Instruments, 2010, 81(2): 02B311.

[8] KOLODKO D V, MAMEDOV N V, SINELNIKOV D N, et al. Source of metal ions based on Penning discharge[J]. Physics Procedia, 2015, 71: 150-154.

[9] AZUMA K, KIMURA T. Plasma parameters of titanium-based metallic plasma generated by a compact-type high-power pulsed sputtering Penning discharge[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2016, 44(12): 3201-3206.

[10] RYABCHIKOV A I, ANANIN P S, DEKTYAREV S V, et al. High intensity metal ion beam generation[J]. Vacuum, 2017. doi: 10.1016/j.vacuum.2017.03.011.

[11] ZHAO W J, REN X T, ZHAO H W. Development of ion sources for materials processing in China[J]. Review of Scientific Instruments, 2006, 77(3): 03C113.

[12] ZHAO W J, ZHAO Z Q, REN X T. Metal ion sources for ion beam implantation[C]. AIP Conference Proceedings, American Institute of Physics, 2008, 1066: 344-347.

[13] SUGITANI M. Ion implantation technology and ion sources[J]. Review of Scientific Instruments, 2014, 85(2): 02C315.

[14] CUN H, SPESCHA A, SCHULER A, et al. Characterization of a cold cathode Penning ion source for the implantation of noble gases beneath 2D monolayers on metals: Ions and neutrals[J]. Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films, 2016, 34(2): 020602.

[15] WANG J H, ZHU K, ZHAO W J, et al. Design of triode extraction system for a dual hollow cathode ion source[J]. Chinese Physics C, 2011, 35(2): 193-198.