



## 含氘电极真空弧等离子体空间分布特性诊断研究

李杰 郑乐 董攀 龙继东 王韬 刘飞翔

## Spatial distribution characteristics of vacuum arc plasma with occluded deuterium electrode

Li Jie Zheng Le Dong Pan Long Ji-Dong Wang Tao Liu Fei-Xiang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 042901 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20211835

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211835>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 纵磁作用下真空电弧单阴极斑点等离子体射流三维混合模拟

Three-dimensional hybrid simulation of single cathode spot vacuum arc plasma jet under axial magnetic field

物理学报. 2021, 70(5): 055201 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201701>

#### 2 cm电子回旋共振离子推力器离子源中磁场对等离子体特性与壁面电流影响的数值模拟

Numerical simulation of influence of magnetic field on plasma characteristics and surface current of ion source of 2-cm electron cyclotron resonance ion thruster

物理学报. 2021, 70(7): 075204 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201667>

#### 旋转滑动弧放电等离子体滑动放电模式的实验研究

Experimental study on gliding discharge mode of rotating gliding arc discharge plasma

物理学报. 2020, 69(19): 195203 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200672>

#### 亚大气压六相交流电弧等离子体射流特性研究:实验测量

Characteristics of meso-pressure six-phase alternative current arc discharge plasma jet: Experiments

物理学报. 2018, 67(4): 045201 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172556>

#### 外电极长度对同轴枪放电等离子体特性的影响

Effect of length of outer electrode on plasma characteristics in coaxial gun

物理学报. 2021, 70(10): 105201 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201724>

#### 磁过滤阴极真空弧技术制备厚且韧TiN涂层

Thick yet tough TiN coatings deposited by filter cathode vacuum arc technology

物理学报. 2020, 69(10): 108103 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200036>

## 含氘电极真空弧等离子体空间分布特性诊断研究\*

李杰<sup>1)2)</sup> 郑乐<sup>3)</sup> 董攀<sup>1)†</sup> 龙继东<sup>1)</sup> 王韬<sup>1)</sup> 刘飞翔<sup>1)</sup>

1) (中国工程物理研究院流体物理研究所, 绵阳 621900)

2) (中国工程物理研究院研究生院, 绵阳 621900)

3) (四川新网银行股份有限公司, 成都 610000)

(2021 年 10 月 2 日收到; 2021 年 10 月 28 日收到修改稿)

真空弧放电等离子体含有多种离子成分, 并且各离子在空间上具有不同的分布规律. 本文针对金属氧化物电极真空弧离子源, 搭建了一台紧凑型磁分析装置, 用来研究放电等离子体中氘离子与金属离子的空间分布. 当离子源弧流为 100 A 左右时, 该装置能有效地传输引出束流, 并且具有较好的二次电子抑制效果, 可准确获得各离子流强. 利用该装置测量并获得了氘化钛含氘电极真空弧放电等离子体内氘离子和钛离子空间分布规律, 结果表明: 径向上, 氘离子和钛离子都呈高斯分布, 但氘离子分布均匀, 而钛离子相对集中在轴线附近, 导致轴线附近氘离子比例最低; 轴向上, 所有离子数量都以自然指数函数减少, 而且相对幅度接近, 所以氘离子比例几乎不变. 本文研究结果不仅有助于理解真空弧放电等离子体膨胀过程, 还可以指导金属氧化物电极真空弧离子源及其引出设计.

**关键词:** 真空弧离子源, 金属氧化物, 磁质谱, 离子空间分布**PACS:** 29.25.Ni, 52.80.Vp, 41.85.Qg, 52.70.Nc**DOI:** 10.7498/aps.71.20211835

## 1 引言

中子不同于电子、质子等带电粒子, 不会与物质发生库仑作用, 特别适合探测 H, O, C 等轻元素, 从而被广泛地应用于石油探井、爆炸物检测、元素活化分析、中子照相、材料辐照等领域<sup>[1-6]</sup>. 中子发生器作为中子的一种主要产生方式, 主要利用加速后的高能粒子(质子、氘等)轰击靶(氘、氚、锂和铍等)产生高产额中子. 中子发生器基于各种不同的加速原理, 形成了各种不同的类型, 如直流倍加器型、射频四极场(radio frequency quadrupole, RFQ)型、回旋加速器型、串列加速器型等. 这些中子发生器的离子束流最大只能到数十毫安, 为了获得高产额中子, 只能提升加速电压, 导致发生器的

体积非常庞大, 不利于小型化和可移动性. 直线感应加速器的束流能力非常强, 可以加速强流脉冲束, 离子束流可达 1 A 以上, 在相同中子产额前提下, 有望大幅降低加速电压. 在国家自然科学基金重点项目支持下, 中国工程物理研究院流体物理研究所正在从事基于直线感应加速原理的中子发生器研究, 有望获得一种新型的高产额强流窄脉冲中子源.

离子源是中子发生器的关键核心部件之一, 为加速器提供足够强度的离子束流. 强流窄脉冲中子发生器采用真空弧离子源, 电极为金属氧化物, 放电时阴极斑烧蚀阴极材料, 可产生极高密度的氘离子和金属离子. 它具有结构简单紧凑、氘离子流强大、气负载小等优点, 有利于后续加速器整体的小型化, 但缺点是等离子体中同时含有大量的金属离

\* 国家自然科学基金(批准号: 11735012, 11975217)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: [panner95@163.com](mailto:panner95@163.com)

子. 离子源中有效氘离子成分是离子源的关键参数指标, 且离子源发射面处离子的空间分布情况对于离子引出设计及束流参数调控至关重要. 早在1981年, 美国 Sandia 实验室的 Walko 和 Rochau<sup>[7]</sup> 利用真空弧离子源获得了 250 mA 左右的氘离子流, 该离子源内有一个含轴向磁场的小孔径通道, 磁场可以约束氘离子通过通道, 但不能有效约束金属离子, 所以大部分金属离子在通道内碰壁损失, 从而获得了极高比例的氘离子束流. 俄罗斯全俄自动化研究所 (VNIIA) 和大电流所等单位在含氘阴极离子源上研究较多, 获得了较多研究成果, 特别是 VNIIA 将真空弧离子源用在了商业脉冲真空中子管<sup>[8]</sup>. Shkol'nik<sup>[9]</sup> 对比了 Ti 和 TiH 阴极在真空弧放电下的表现, 发现 TiH 阴极阴极斑蚀坑更小, 移动速度更快, 离子融蚀率更大. Barengolts 等<sup>[10]</sup> 研究了薄膜形状和圆环形状的 ZrD 真空弧放电性质, 发现阴极为圆环时氘离子比例在放电初期最高, 约为 60%, 并采用数值计算方法研究了等离子体电离过程. Nikolaev 等<sup>[11]</sup> 对比了含氘电极和低气压下真空弧放电产生的氘离子性质, 在 0.2 T 磁场约束下, 含氘电极产生的氘离子比例约为 80.4%, 而低气压下氘离子比例约 32.1%, 这说明含氘电极真空弧放电产生的氘离子效率非常高.

近年, 真空弧质谱实验研究发现, 放电等离子体中, 不同离子具有不同的角分布规律<sup>[12–14]</sup>. 可以推断, 以金属氧化物为电极的真空弧离子源放电等离子体中, 氘离子与金属离子也存在类似的空间分离现象. 通过该分离现象的研究, 不仅可以了解真空弧等离子体膨胀运动规律, 还可寻找提高氘离子利用效率的方法, 进一步提升离子源性能.

目前, 研究人员主要采用飞行时间法 (time of flight, TOF) 来对脉冲真空弧放电等离子体进行质谱分析. Brown<sup>[15]</sup> 用飞行时间质谱法获得了几乎所有金属材料电极放电的电荷态分布. 陈磊等<sup>[16]</sup> 获得了含氢电极的飞行时间质谱结果. Nikolaev 等<sup>[12]</sup> 利用飞行时间质谱法获得了不同轻重离子的角向分布规律. 采用 TOF 的优点在于高分辨率, 可准确分辨出真空弧放电中的绝大部分离子. 不足之处在于 TOF 通常需要对等离子体进行时间取样分析; 倘若用来研究等离子体的空间特性, 则还必须对等离子体进行空间取样. 由于每次放电只能测量一个数据点, 如此时间、空间上的双重取样, 造成实验过程繁琐, 而且真空弧放电通常稳定性较

差, 多次放电给测量结果带来较大的误差.

本文搭建了一个紧凑型磁分析装置, 用以研究脉冲金属氧化物电极真空弧离子源放电等离子体中氘离子、金属离子的空间分布规律. 该装置只需要对等离子体进行空间取样, 便可以获得整个放电过程中氘离子与其他离子的束流强度及比例关系, 进而分析放电等离子体中不同离子空间分布规律.

## 2 磁分析装置设计

### 2.1 装置布局

磁分析装置的主体结构如图 1 所示, 包括两电极引出系统、永磁铁和离子收集极. 高密度等离子体由氧化钛电极真空弧离子源放电产生, 含氘电极真空弧离子源参数性质详见文献<sup>[17–19]</sup>. 磁分析装置引出系统包括引出电极与地电极, 相隔 2 mm, 离子源和引出电极同电位, 电势均为 20 kV. 高压波形近似为方波, 平顶部分覆盖全部放电波形, 避免高压前后沿影响等离子体发射面. 离子束偏转区域由一块永磁二极铁构成, 好场区尺寸约为 50 mm × 50 mm, 磁场强度约 0.7 T.

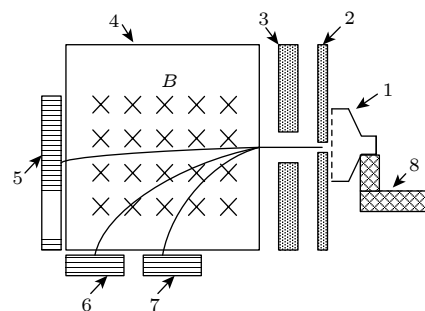


图 1 磁分析装置示意图 (1-离子源, 2-引出电极, 3-地电极, 4-磁铁区域, 5-金属离子收集极, 6-氘离子收集极, 7-氢离子收集极, 8-三维位移平台)

Fig. 1. Schematic of the magnetic analysis device (1-ion source, 2- extraction electrode, 3-grounding electrode, 4-magnetic field area, 5-collector for metal ions, 6-collector for deuterium ions, 7-collector for hydrogen ions, 8-three dimensional displacement platform).

根据电极材料成分, 已知等离子体中的离子成分主要为氘离子、各价态钛离子以及表面吸附水汽离解而来的氢离子. 由于中子发生器离子源有效成分为氘离子, 对金属离子的电荷态分布并不关心. 因此, 为了减小体积和使用方便, 本装置只设置了 3 个收集极. 如图 1 所示, 与束流引出方向垂直的收集极主要用于收集不易偏转的高质荷比金属离

子, 与束流引出方向平行的两个收集极分别用于收集容易偏转的氦离子、氢离子. 在 20 kV 引出电压及 0.7 T 磁场强度条件下,  $H^+$  离子、 $D^+$  离子的偏转半径分别约为 29 mm 和 41 mm, 两者相距较远, 很容易在空间上分离.

磁分析装置与离子源均固定在真空腔内, 实验时腔内真空度优于  $5 \times 10^{-3}$  Pa. 为了降低电源开关动作和击穿过程对收集极信号的干扰, 对磁场区域及收集极做屏蔽处理, 而且电流信号全程通过同轴线传输, 由示波器采集记录. 离子源固定在一台三维位移平台上, 用于调节引出电极取样口和离子源之间的相对位置, 实现离子源发射极处空间分布的取样测量.

## 2.2 引出极设计

为了准确测量各通道收集离子信号强度, 离子束需要尽可能无损地通过传输路径. 该装置的传输路径如图 2 所示, 束流引出后, 最可能损失在地电极和磁铁上.

为了减少束流损失, 设计上采取了三条技术途径. 第一条是减小引出极取样口的直径, 这样可以有效地减小引出束流强度从而降低束流中的空间电荷力, 最终减小束流的发散程度; 此外, 取样口直径减小, 也可提升该系统空间分辨的精度. 第二条是通过引出电极结构给初始引出束流提供一个聚焦力, 使其能够以较小的束包络通过传输通道. 第三条是缩短传输距离, 在束斑扩大至磁铁边缘前被收集极接收. 目前该装置的直线传输距离为 60 mm.

由于等离子体密度随离子源工作状态变化而

变化, 倘若等离子体密度与引出结构不匹配, 束流发射面会往外凸, 这样会极大地增加束流的发散程度, 造成束流的损失<sup>[20]</sup>. 于是, 针对我们的离子源主要工作范围, 优化了一套两电极引出结构与放电等离子体匹配, 具体结构如图 2 所示. 为了验证该引出结构的效果, 在 100 A 弧流条件下, 利用 ZnS 闪烁体测量了不同位置处束斑大小. 20 kV 的引出离子束流轰击在闪烁体上会产生对应束流截面的发光区域, 采用电荷耦合器件 (charge-coupled device, CCD) 记录下束流截面的大小. 选取了两处位置作为束斑监测点, 一处位于地电极后 3 mm 处, 用以观测通过地电极后束流横截面分布, 另一处位于氢离子和氦离子收集极, 用以观测经磁偏转后氢离子、氦离子束流截面分布, 结果如图 3 所示. 从图 3 中可见, 束流通过地电极后 3 mm 位置处的束斑直径约 2 mm, 小于地电极孔径 6 mm, 束流通过地电极时没有发生碰壁损失; 而氢离子和氦离子收集极上束斑尺寸介于 4—5 mm 之间, 束流在磁场传输过程中有所发散, 但小于磁极间隙 10 mm, 说明此时束流并不会碰壁损失, 能被很好地传输到收集极.

## 2.3 二次电子抑制

20 kV 离子束轰击在收集极上, 会引起二次电子发射, 增大收集极上的电流信号, 从而影响测试结果. 该装置采用了两种技术途径来抑制收集极的二次电子发射. 第一种是将收集极紧靠磁铁放置, 利用磁铁边缘场偏转二次电子, 让二次电子回到收集极, 不在收集极上产生电流信号; 第二种是给磁铁加负偏压来抑制二次电子运动. 由于离子激发的

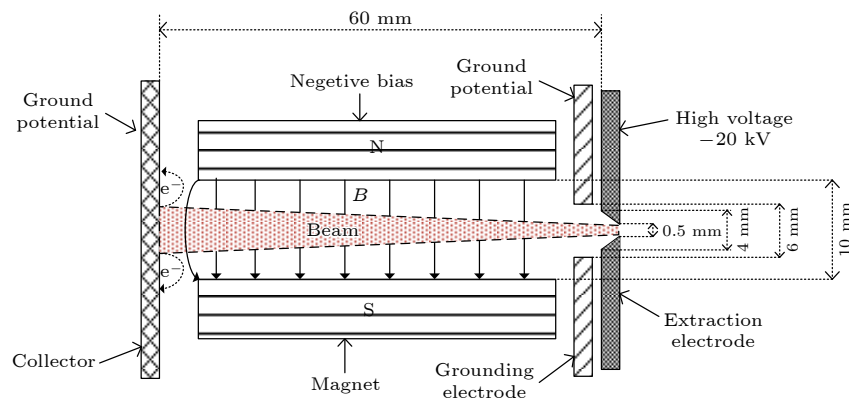


图 2 引出离子束的传输通道示意图

Fig. 2. Schematic of the transmission channel for ion beam extract from the ion source.



二次电子能量大部分小于 50 eV, 所需负偏压并不高<sup>[21]</sup>. 在弧流 120 A 情况下, 测得三个收集极上平均电流随磁铁偏压的变化曲线如图 4 所示. 当磁铁上加正偏压时, 二次电子在电场作用下从收集极引出, 收集极电流迅速增大; 反之磁铁偏压为负时, 二次电子受到电场抑制作用, 二次发射电子流减弱, 当收集极电流随负偏压的加大而保持不变时, 说明此时收集极上的信号基本由离子电流组成.

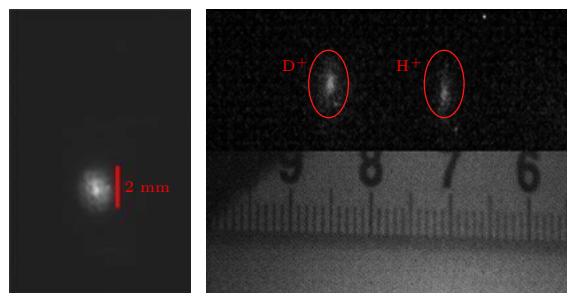


图 3 离子束轰击闪烁体形成的发光区域照片 (a) 闪烁体放置在距离地电极后 3 mm 位置; (b) 闪烁体放置在收集极处  
Fig. 3. Photos of the cross section of ion beam on fluorescent screen: (a) The fluorescent screen was set at the position of 3 mm after the grounding electrode; (b) the fluorescent screen was set at the position of the collectors.

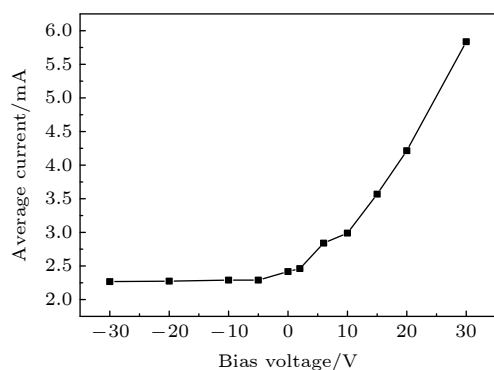


图 4 收集极上的总平均电流随偏压的变化趋势 (偏压从 -30V 到 30 V 变化)

Fig. 4. Average total collected current versus bias voltage from -30 to 30 V.

当磁铁偏压为 0 时, 收集极上发射的二次电子流仅为离子流的 6%, 这说明本系统磁铁的边缘场对二次电子发射抑制效果已经较好. 实际测量时, 给磁铁一个较小的负偏压即可满足要求.

### 3 实验结果与讨论

#### 3.1 离子信号波形

当放电弧流为 100 A 及取样点位于离子源轴

线上时, 收集极获得的各离子典型电流波形如图 5 所示. 对单类离子而言, 离子数量和电流之间的关系可用下式表示:

$$N = \frac{Q}{qe} = \frac{1}{qe} \int I dt, \quad (1)$$

式中,  $Q$  为离子总电荷量;  $q$  为离子电荷态;  $e$  为电子电荷量;  $I$  为离子束流;  $t$  为束流持续时间. 对于 Ti 离子而言,  $q$  可用平均电荷态表示, 约为 2.1<sup>[15]</sup>. 氢离子和氦离子只有 +1 价一个电荷态. 对电流曲线做时间积分可得各离子的总电荷量, 再根据 (1) 式计算离子源内各离子数量, 由于等离子体内各离子体积相等, 从而获得各离子密度在离子源内的相对比例. 图 5 所示为脉冲真空弧放电各离子信号波形, 由此可计算得到离子源发射极轴线上氦离子比例约为 54.0%. 尽管氢离子来自电极表面吸附的水汽, 但其比例并不低, 约为 17.3%.

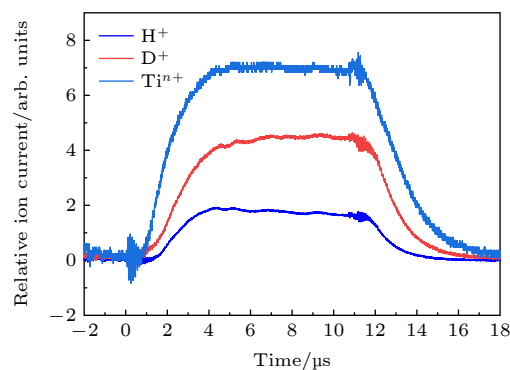


图 5 收集极上的各离子电流信号波形 (放电弧流为 100 A)  
Fig. 5. Typical waveforms of the ion current collected by each collector while the discharging current is 100 A.

该装置可以测得放电等离子体中氦离子、氢离子及金属离子随时间变化规律. 从图 5 中可见, 氦离子流和钛离子流在整个放电过程中保持稳定, 而氢离子一直下降. 这是因为氦离子和钛离子来自金属氧化物内部, 而氢离子来自阴极表面吸附水汽, 被消耗后来不及补充.

#### 3.2 氦离子、金属离子空间分布

弧流 100 A 时, 离子源发射极上氢、氦和钛离子密度径向空间分布如图 6 所示, 横坐标 0 代表离子源轴线位置, 正负数值代表偏离轴线距离. 从图 6 中可以看出, 氢和氦离子径向分布比较均匀, 而钛离子在轴向上更集中. 由于放电点位于阴极边缘, 并不在几何轴线上, 所以等离子体分布中心略有偏

心. 等离子体内离子分布规律与文献<sup>[14]</sup>中气体离子较金属离子具有更广的角度分布现象一致, 来源于不同离子的质量差异. 由于放电点位于离子源轴线附近, 轻重离子均在此产生, 扩散过程中, 在相同的热平衡温度和平均碰撞频率下, 轻离子扩散系数大于重离子使其沿密度梯度扩散的离子通量更大<sup>[20]</sup>. 因此, 轻离子更容易受碰撞作用在径向上分布均匀, 而金属离子在径向上受碰撞作用影响较小, 更容易保持在轴线附近. 利用高斯函数对径向离子信号进行了拟合, 发现拟合得非常好, 这说明径向上离子满足高斯分布, 仅半高宽不同而已. 根据图 6 中的数据, 计算了离子源发射面处氦离子比例在径向上的分布情况, 如图 7 所示. 从图 7 中可以看出, 氦离子比例在轴线附近最低, 而在远离轴线两侧最高.

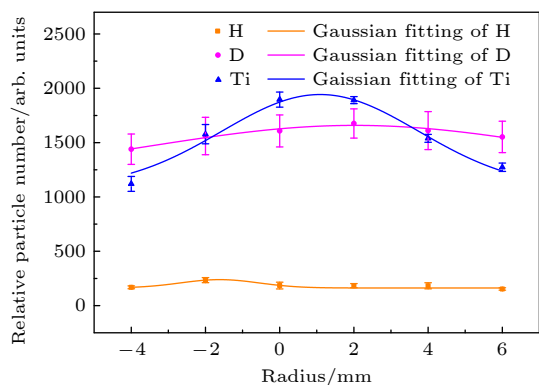


图 6 氢、氦和钛离子密度径向分布

Fig. 6. Radial density distribution of H, D and Ti ions.

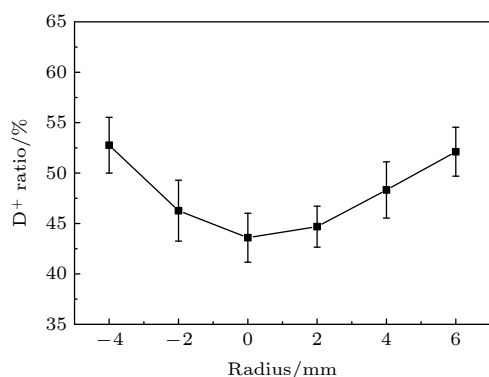


图 7 氦离子比例径向分布

Fig. 7. Radial distribution of the D ion ratio.

氢、氦和钛离子密度在轴向上的空间分布如图 8 所示, 轴向距离指引出极和离子源扩张杯之间的长度, 测量时引出极位置不变, 改变离子源扩张杯位置, 取样点位于离子源轴线上. 从图 8 中可以

看出, 随着轴向距离增加, 所有离子数量都在不停降低. 轴向上离子数量可以很好地用指数函数拟合, 这说明自由膨胀时, 离子数量在轴向上以指数函数减少. 根据图 8 计算了轴向上氦离子比例分布, 如图 9 所示. 从图 9 中可以看出, 氦离子比例在轴向上变化很小, 距离离子源越远, 氦离子比例略有下降的趋势, 这是因为距离越远, 氦离子相对钛离子扩散到周围更多, 所以比例下降. 但等离子体轴向运动速度很快, 径向扩散速度相比而言很小, 所以氦离子比例只是略微下降. 这也说明轴向上, 氢、氦和钛离子密度以近似相同的指数函数减少, 这也被图 8 的拟合函数证实.

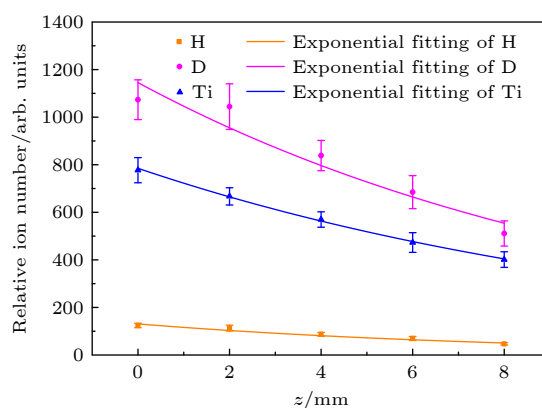


图 8 氢、氦和钛离子密度轴向分布

Fig. 8. Axial density distribution of H, D and Ti ions.

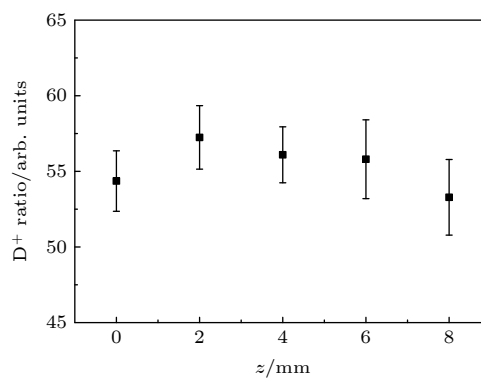


图 9 氦离子比例轴向分布

Fig. 9. Axial distribution of the D ion ratios.

## 4 总 结

本文搭建一个紧凑型磁分析装置, 用以研究金属氧化物真空弧离子源放电等离子体中氦离子、金属离子的密度空间分布差异. 该装置在离子源工作于 100 A 弧流时, 对于取样的离子束流有较好的传

输效果, 可有效地将氘离子与氢离子、金属离子分开, 并且通过抑制收集极上二次电子信号, 准确获得各离子在空间中的分布.

利用该装置对金属氧化物电极真空弧离子源进行了诊断. 结果发现, 径向上金属离子更集中于离子源轴线上, 而氢离子、氘离子沿径向分布更加均匀; 轴向上离子均以指数函数衰减, 氘离子比例变化不大.

## 参考文献

- [1] Nazarov K M, Muhametuly B, Kenzhin E A, Kichanov S E, Kozlenko D P, Lukin E V, Shaimerdenov A A 2020 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A* **982** 164572
- [2] Wei G H, Han S B, Chen D F, Wang H L, Hao L J, Wu M M, He L F, Wang Y, Liu Y T, Sun K, Zhao Z X 2012 *Nucl. Tech.* **35** 821 (in Chinese) [魏国海, 韩松柏, 陈东风, 王洪立, 郝丽杰, 武梅梅, 贺林峰, 王雨, 刘蕴韬, 孙凯, 赵志祥 2012 核技术 **35** 821]
- [3] Whetstone Z D, Kearfott K J 2014 *J. Radioanal. Nucl. Chem.* **301** 629
- [4] Zaker S, Nafchi S, Rastegarnia M, Bagheri S, Sanati A, Naghibi A 2020 *Petroleum* **6** 170
- [5] El-Taher A, Khater A E M 2016 *Appl. Radiat. Isot.* **114** 121
- [6] Wang G, Yu Q F, Wang W, Song G, Wu Y C 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 102901 (in Chinese) [王刚, 于前锋, 王文, 宋钢, 吴宜灿 2015 物理学报 **64** 102901]
- [7] Walko R J, Rochau G E 1981 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **28** 531
- [8] Aleksandrov V D, Bogolubov E P, Bochkarev O V, Korytko L A, Nazarov V I, Polkanov Y G, Ryzhkov V I, Khasaev T O 2005 *Appl. Radiat. Isot.* **63** 537
- [9] Shkol'nik S M 2001 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **29** 675
- [10] Barengolts S A, Karnaukhov D Y, Nikolaev A G, Savkin K P, Oks E M, Uimanov I V, Frolova V P, Shmelev D L, Yushkov G Y 2015 *Tech. Phys.* **60** 989
- [11] Nikolaev A G, Oks E M, Frolova V P, Yushkov G Y 2019 *Russ. Phys. J.* **62** 1109
- [12] Nikolaev A G, Yushkov G Y, Savkin K P, Oks E M 2012 *Rev. Sci. Instrum.* **83** 02A503
- [13] Nikolaev A G, Yushkov G Y, Savkin K P, Oks E M 2013 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **41** 1923
- [14] Nikolaev A G, Savkin K P, Yushkov G Y, Oks E M 2014 *Rev. Sci. Instrum.* **85** 02B501
- [15] Brown I G 1994 *Rev. Sci. Instrum.* **65** 3061
- [16] Chen L, Jin D Z, Cheng L, Shi L, Tan X H, Xiang W, Dai J Y, Hu S D 2012 *Vacuum* **86** 813
- [17] Lan C H, Long J D, Zheng L, Peng Y F, Li J, Yang Z, Dong P 2014 *Chin. Phys. Lett.* **31** 105202
- [18] Lan C H, Long J D, Zheng L, Dong P, Yang Z, Wang T, Li J 2015 *Chin. Phys. Lett.* **32** 095201
- [19] Zheng L, Lan C H, Long J D, Peng Y F, Li J, Yang Z, Dong P, Shi J S 2014 *Nucl. Tech.* **37** 010202 (in Chinese) [郑乐, 蓝朝晖, 龙继东, 彭宇飞, 李杰, 杨振, 董攀, 石金水 2014 核技术 **37** 010202]
- [20] Zhang H S 1987 *Ion Source with High-Power Neutral Beam Sources* (Beijing: Atomic Energy Press) pp93–100 (in Chinese) [张华顺 1987 离子源和大功率中性束源 (北京: 原子能出版社) 第93—100页]
- [21] Liu M, Ke J L, Huang G, Liang J H, Liu W, Lou B C, Lu B 2012 *Nucl. Electron. Detect. Technol.* **32** 786 (in Chinese) [刘猛, 柯建林, 黄刚, 梁建华, 刘湾, 娄本超, 卢彪 2012 核电子学与探测技术 **32** 786]

# Spatial distribution characteristics of vacuum arc plasma with occluded deuterium electrode<sup>\*</sup>

Li Jie<sup>1)2)</sup> Zheng Le<sup>3)</sup> Dong Pan<sup>1)†</sup> Long Ji-Dong<sup>1)</sup>  
Wang Tao<sup>1)</sup> Liu Fei-Xiang<sup>1)</sup>

1) (*Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China*)

2) (*Graduate School of CAEP, Mianyang 621900, China*)

3) (*Sichuan XW Bank, Chengdu 610000, China*)

( Received 2 October 2021; revised manuscript received 28 October 2021 )

## Abstract

There are many kinds of ions in vacuum arc discharge plasma, which have different distributions in space. In this paper, a compact magnetic analyzer is developed for studying the spatial distribution of deuterium ions and metal ions in vacuum arc discharge with occluded deuterium electrode. When the arc current is about 100 A, the device can effectively transfer the ion beam with good secondary electron suppression, and can accurately obtain the ion current intensity. The spatial distribution of deuterium ions and titanium ions in the vacuum arc discharge with TiD electrode are measured by this device. The results show that both deuterium ions and Titanium ions are Gaussian distribution in the radial direction, but deuterium ions are evenly distributed, while titanium ions are relatively concentrated near the axis, resulting in the lowest proportion of deuterium ions near the axis. Along the axis, the number of all ions decreases as a natural exponential function, and the relative magnitudes are approximately equal, so the proportion of deuterium ions is almost constant. The results of this study not only help to understand the plasma expansion process of vacuum arc discharge, but also guide the design of vacuum arc ion source with occluded deuterium electrode and its ion extraction.

**Keywords:** vacuum arc ion source, metal deuteride, magnetic mass spectrometer, spatial distribution

**PACS:** 29.25.Ni, 52.80.Vp, 41.85.Qg, 52.70.Nc

**DOI:** 10.7498/aps.71.20211835

---

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11735012, 11975217).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [panner95@163.com](mailto:panner95@163.com)