

研究简报

# 弗瑞曼型重离子源的实验和应用

蒋渭生 苏士俊 毛兴旺 李淑琴

(中国原子能科学研究院, 北京)

关键词 电磁分离器 重离子源

## 一、引言

弗瑞曼(J. H. Freeman)在1963年改进了Calutron型离子源, 研制成功一种新型离子源, 即称为弗瑞曼源<sup>[1]</sup>。此源的特点是无振荡(“hash”), 能散度小, 可得到极高的分辨; 通用性好, 能产生各种元素的离子束, 流强较大, 并且所用的辅助磁场强度小, 节省了功率。它原来主要用于扇形同位素分离器, 后来, 此源在强流离子注入机和离子外延设备上被广泛地采用<sup>[2-6]</sup>。近些年来, 我国不少科研和生产部门, 对强流离子束机的需要日益增加, 因此, 弗瑞曼源也将会得到广泛的使用。

我们研制的弗瑞曼源是用于稳定同位素的分离, 要求能产生多种重元素的离子, 有中等的工作温度, 束流毫安量级。在一台实验室型的电磁同位素分离器上使用, 成功地分离了若干种同位素, 取得了较好的结果。

## 二、结构

离子源的结构见图(1)。我们将引出电极系统与高压绝缘圈固定在一起, 拆卸时与放电室一同拆下, 便于电极系统的清洗。引出电极的负高压是从真空室的侧旁引入的, 这样

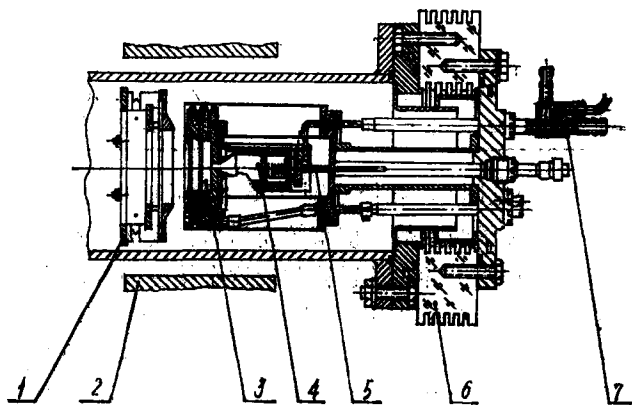


图1 离子源结构示意图

1——引出电极系统, 2——源磁铁, 3——放电室, 4——坩埚, 5——热电偶, 6——绝缘环, 7——引线导杆。

使整体结构大为缩小。

弧室体的材料为石墨或防磁不锈钢。它由两根串联的螺旋形钨丝加热，其通电的方向应使得两螺旋管产生的磁场在放电室的中部互相抵消。灯丝是 $\phi 2$ 的钨棒，为了避免灯丝在加热后伸长弯曲，灯丝下端的引线块是悬垂着的。

出口板用石墨制成，厚约5 mm，缝口宽1—2 mm，长30—40 mm。缝外侧上下张角约 $30^\circ$ ，左右张角约 $45^\circ$ 。灯丝到出口板的距离约5 mm。坩埚是卧式的，采用内加热方式，热效率较高。源的工作温度可达 $850^\circ\text{C}$ ，满足绝大多数固态工作物质的放电要求。

束的拉出采用三电极系统，引出电极的电压在0—20 kV可调，加速电压30—40 kV。离子源的辅助磁场最大可达600高斯。

### 三、实验研究

用 $\text{BF}_3$ 做工作气体时，测得的拉出束流与放电参数之间的关系。辅助磁场的最佳值在150高斯左右。

在离子束机的光路计算中，源所给出的发射度是很重要的参数。我们用氩做工作气体，测定了发射度及相应的束流密度分布。

从纵向发射度及束流密度分布图可以看到，束的纵向分布很不均匀。狭缝引出的离子源，大都存在这种情况<sup>[7,8]</sup>，其造成的原因是很多的。对于弗瑞曼源，我们经过实验和分析<sup>[9]</sup>，认为这主要是由于灯丝电流产生的磁场，造成发射的一次电子都趋向于灯丝通电方向的正端，使得正端附近的等离子浓度大于负端，因而出口缝处离子发射的弯月面的凹凸情况沿纵向变化较大，再加上狭缝两头的终端效应，就造成离子束沿纵向分布的不均匀，这在新装灯丝（上下粗细一致）的情况下更为明显。例如，从图(2a)所示的发射度，可推测出源的等离子体发射面沿纵向的形状，见图2b。即灯丝正端的发射面比负端较为外凸。而且，灯丝正端因受离子轰击较严重，也显著地比负端更快地变细，这是我们使用时经常遇到的情况。

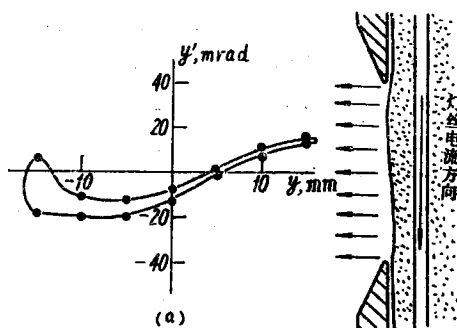


图2 纵向发射度与灯丝电流的关系

文献[10]详细地计算了电子运动的轨迹，结论是相同的，但它没有指出由此造成的等离子体不均匀性。在弱流情况下，离子发射面都是内凹的，这时束流的不均匀性主要由狭缝终端效应所引起，纵向表现为会聚束。

拉出束纵向分布不均匀，使得纵向发射度比较难于掌握；在束经过磁分析器时，容易打到上下壁上而损失束流；在束聚焦处，沿纵向的束流密度分布也将不均匀，这对离子注入或离子束沉积制靶、外延等工作，会造成剂量、厚度的不均匀，因此需要使用扫描的办法。

拉出束纵向分布不均匀，使得纵向发射度比较难于掌握；在束经过磁分析器时，容易打到上下壁上而损失束流；在束聚焦处，沿纵向的束流密度分布也将不均匀，这对离子注入或离子束沉积制靶、外延等工作，会造成剂量、厚度的不均匀，因此需要使用扫描的办法。

#### 四、用于同位素分离的情况

我们用本离子源分离了钆(Gd)、铒(Er)、钾(K)、银(Ag)等的同位素<sup>[11]</sup>。分离工作是在一台 90° 扇形电磁分离器上进行的。离子源的主要运行参数及分离结果分别列于表 1、表 2。

表 1 离子源主要运行参数

元 素	工作物质	坩埚温度, °C	弧 压, V	弧 流, A	辅助磁场, Gs	灯丝平均 寿命, h	出口缝宽×高, mm <sup>2</sup>
Gd	GdCl <sub>3</sub>	680	60	4	75	40	1.5×30
Er	ErCl <sub>3</sub>	620	60	4	20	50	1.5×30
K	KI	500	50	1	130	85	1.1×38

表 2 分 离 结 果

元 素	接收器狭缝尺寸 (宽×高), mm <sup>2</sup>	接收离子流 时间, h	平均接收总 离子流, mA	接收离子流 峰值, mA	接收数量		该同位素丰度, %	
					接收同 位 素	提取数 量, mg	天 然	浓 缩 后
Gd	5×120	270	0.35	0.45	<sup>155</sup> Gd	52	14.8	97.8
Er	5×120	114	0.7	1.2	<sup>147</sup> Er	75.5	22.9	96.4
K	10×130	340	1.02	2.5	<sup>41</sup> K	20	6.91	96.2

银的分离运行时间较短, 参数未列入表中, 其接收离子流约 0.4 毫安, 提取的 <sup>170</sup>Ag 约 20 毫克, 丰度 99.7%。

开始分离钾时, 曾用 KCl 做工作物质。由于钾的电离电位较低, 在放电室外表面产生热电离, 造成过大的高压暗电流而无法工作。为了降低离子源的工作温度以减少热电离。改用 KI 做工作物质, 并采取热屏蔽的方法降低源的表面温度, 这样才能加得上高压。运行过程中, 源的打火比较严重。打火主要是由于喷积在电极和真空盒壁上的钾盐, 在离子轰击下产生大量二次电子返回到源的高压点时形成的击穿效应引起的。为减少打火, 每次拆源时, 均需将电极和源附近的真空盒壁清洗干净。运行时使用较低的加速电压 (35.5 kV), 有时还不得不适当降低束流。

钕与钆虽同属稀土元素, 但离子源的运行情况却大不相同。钆的放电不很稳定, 打火严重, 束流不易调大。运行一段时间后, 放电室出口缝处有堆积物。致使缝口变窄, 钕则没有以上这类问题, 平均束流比钆要大一倍。分离钕的全过程效率 (即提取的同位素总量与坩埚的耗量率之比) 约为 5%。

该源在一台分析磁铁气隙为 5 cm 的离子束机上用 Ar 和 BF<sub>3</sub> 调试, 在接收平面处, <sup>40</sup>Ar<sup>+</sup> 流强 5 mA, <sup>11</sup>B<sup>+</sup> 可达 1.3 mA, B<sup>+</sup> 束流占总束流的 20%。

#### 五、结 束 语

通过实验和使用说明, 本离子源的工作性能是良好的, 能用于气态和固态的工作物质, 产生多种元素的重离子, 拉出束流可达 10 mA 以上。 (下转第 427 页)

表7 样品分析结果 (ppm)

样品编号	Fe <sup>2+</sup>	Cr <sup>3+</sup>	Ni <sup>2+</sup>	Fe <sup>3+</sup>	Cr(VI)
I-3	8.0×10 <sup>2</sup>	1.0×10 <sup>3</sup>			
I-4	7.0×10 <sup>2</sup>	5.5×10 <sup>2</sup>	2.7×10		
I-5	3.7×10 <sup>2</sup>	2.2×10 <sup>2</sup>			
I-6	3.5×10 <sup>2</sup>	1.6×10	3.4×10		
II-1				4.5×10	1.5×10
II-2				1.0×10 <sup>2</sup>	2.0×10
II-3					1.1×10 <sup>2</sup>
II-4					1.2×10 <sup>2</sup>
III-1	2.0×10 <sup>2</sup>				
III-2	1.9×10 <sup>2</sup>				
III-3	2.4×10 <sup>2</sup>				
I'	6.5×10				5.7×10
II'+III'+II'+III'(1)				1.7×10 <sup>2</sup>	<1.3×10
II'+III'+II+III(2)				1.2×10 <sup>2</sup>	1.3×10
净化前重水				<3.6×10	<1.3×10
净化后重水				<3.6×10	<1.3×10

注: (1) 表中的空格是没有测出的或者用催化极谱法测得而未列出的<sup>[2]</sup>。

(2) 用清洗液 I, II, III 洗后再用水洗的溶液分别记为 I', II', III'。

M NH<sub>4</sub>OH。在此底液内, 可一次同时测定 Cr(VI)、Fe<sup>2+</sup>(Fe<sup>3+</sup>)、Ni<sup>2+</sup>、Co<sup>2+</sup>、Cr<sup>3+</sup> 五种离子, 共存离子基本不干扰, 清洗液组分亦基本无影响。本方法不需分离、不需调价、为大量测定样品提供了方便。实验结果为了解大修改建中的堆迴路的去污情况及堆迴路管道的腐蚀情况提供了数据。

### 参 考 文 献

- [1] 石井大道, 分析化学(日文), 11(3), 272(1962)。  
 [2] 李开华等, 核化学与放射化学, 3(1), 42(1981)。

(编辑部收到日期: 1983年3月17日)

(上接第454页)

我所原 90°分离器小组的许多同志曾参加了部分工作。

### 参 考 文 献

- [1] Freeman, J. H., *Nucl. Inst. and Meth.*, 22, 306(1963).  
 [2] Freeman, J. H., AERE-R6138, July 1969.  
 [3] Aitken, D., *Nucl. Inst. and Meth.*, 139 125 (1976).  
 [4] Williams, N., *J. Vac. Sci. Technol.*, 15(3) 1067(1978).  
 [5] Freeman, J. H., *Nucl. Inst. and Meth.*, 135 1(1976).  
 [6] Tokugama, T. et al., *Nucl. Inst. and Meth.*, 132/133, Part I. 241(1981).  
 [7] 裴天礼等, 离子束密度纵向分布的不均匀性, 原子能研究所年报, p. 134, 1979年。  
 [8] Chavet, I., *Nucl. Inst. and Meth.*, 139 47(1976).  
 [9] 戚昌文, 弗瑞曼源实验及钆的分离, 内部资料, 1972, 12.  
 [10] Hinkel, H., *Nucl. Inst. and Meth.*, 139 1(1976).  
 [11] 苏士俊等, 在 90° 电磁分离器上分离九种元素的同位素, 原子能所内部资料, 原成 [74]-013.

(编辑部收到日期: 1983年1月7日)