

第 245 号

CNC-0005
IAE-0006

中国核情报报告

CHINA NUCLEAR SCIENCE & TECHNOLOGY REPORT

强流表面电离离子源



中国核情报中心
China Nuclear Information Centre

TRN CN8600245

CNIC-00005

IAE-0005

强流表面电离离子源

方锦清 林治洲 于丽华

詹荣安 黄国俊 吴建华

(中国原子能科学研究院)

中国核情报中心

北京·1990

摘 要

本文系统地描述了强流表面电离离子源的工作原理和结构。详细论述了研制该源的技术关键,主要有:电离器材料的选择与成型、电离器的加热问题、蒸汽的分配、流向与控制、非所需电离表面的冷却和离子光学等。该源自1972年研制成功以来,已经应用于大型 180° 电磁同位素分离器上,它适于分离硷金属和稀土元素的同位素。例如,分离铷元素,其最大引出总离子流达 10mA ,最大接收总离子流为 66mA ,平均接收离子流大于 25mA 。大量结果表明:该源具有强流、聚焦性能好,稳定可靠等优点,并可望推广应用于其它领域。最后,本文还讨论了该源中出现的一些有趣的实验现象,指出了进一步研究的问题。

关键词 离子源, 表面电离, 硷金属, Rb^+ , 稀土元素

SURFACE IONIZATION ION SOURCE WITH HIGH CURRENT

**Fang Jinqing Lin Zhizhou Yu Lihua
Zhan Rongan Huang Guojun Wu Jianhua**

(Institute of Atomic Energy)

ABSTRACT

The working principle and structure of a surface ionization ion source with high current is described systematically. Some technological keypoints of the ion source are given in more detail, mainly including, choosing and shaping of the material of the surface ionizer, heating of the ionizer, distributing of working vapour on the ionizer surface, the flow control, the cooling problem at the non-ionization surface and the ion optics, etc. This ion source has been used since 1972 in the electromagnetic isotope separator with 180° angle. It is suitable for separating isotopes of alkali metals and rare earth metals. For instance, in the case of separating Rubidium, the maximum ion current of Rb^+ extracted from the ion source is about 120 mA, the maximum ion current accepted by the receiver is about 66mA, the average ion current is more than 25mA. The results show that our ion source have advantages of high ion current, good characteristics of focusing ion beam, working stability and structure reliability etc. It may be extended to other fields. Finally, some interesting phenomena in the experiment are discussed briefly. Some problems which should be investigated are further pointed out,

一、引言

在核科学和空间技术以及在工业、医疗等国民经济部门中,各种离子源获得了极其广泛的应用^[1],而且有着广阔的发展前景。

值得注意的是,表面电离离子源(以下简称表面源),由于具有离子流能散度小,聚焦性能较好,没有源等离子体振荡等优点,因而引起了人们的重视^[2-6]。根据不同应用要求,表面源既可产生弱流又可获得强流,结构简单可靠,使用方便。因而,在国外表面源在近代科技的众多领域有着重要的用途。例如,在空间技术中表面源作为离子静电推进器,就是利用铯表面源具有高发射本领、强离子流密度(几十mA/cm²)和小发射角等特点。在电磁分离器中应用表面源分离稳定同位素,不仅适于分离碱金属同位素,而且可用于分离许多稀土元素的同位素。同样地,在质谱计、极化离子源及溅射负离子源等方面也获得了广泛应用。

国内除在质谱计上广泛应用极弱流(<μA)小型表面源外,迄今未见报道强流大型表面源。鉴于国内对各种稳定同位素的日益增长的需要,特别是对碱金属和稀土元素的需要,我们于1972年研制成功了国内首台强流表面源,随后作了大量实验研究,并应用于我国大型180°电磁同位素分离器上^[7,8],分离了铷元素同位素Rb⁸⁵、Rb⁸⁷,这些产品已应用于精确测定我国珠穆朗玛峰的年龄和研制国产的原子钟等方面。

二、原理和结构

表面电离离子源是利用表面电离现象来获得离子流的一种装置。根据表面电离原理,在无外电场的均匀金属表面的情况下,可以用两个主要物理量表征表面电离过程^[1],即

$$\text{电离度} \quad a = n^+ / n = A \exp \left[\frac{e}{kT} (\varphi - V) \right] \quad (1)$$

$$\text{电离系数} \quad \beta = n^+ / n_0 = A / \left\{ A + \exp \left[- \frac{e}{kT} (\varphi - V) \right] \right\} \quad (2)$$

其中, n^+ 、 n 和 n_0 分别为金属表面上蒸发的离子通量、中性原子通量和入射的总中性原子通量。在稳定的状态下, $n_0 = n^+ + n$ 。A对既定的工作物质为常数,如对碱金属 $A = 1/2$; e 为离子电荷, k 为玻耳兹曼常数, φ 为金属的逸出功, V 为入射工作物质原子的电离电位。

由(1)、(2)两式可得

$$\beta = \frac{a}{1 + a} \quad (3)$$

对于有均匀电场作用于均匀金属表面的情形,电离度具有以下形式^[1]:

$$a = A \exp \left\{ \frac{e}{kT} [(\varphi - V) + \Psi] \right\} \quad (4)$$

其中

$$\Psi = Ex_0 + \sqrt{\epsilon E} + \frac{E^2}{2e}(a_0 - a_1) \quad (5)$$

这里, E 为电场强度, a_0 、 a_1 分别为工作物质原子和离子在电场中的极化系数, x_0 为相应于吸附原子的价电子能级移动的距离。当 $E \leq 10^6 \text{ V/cm}$ 时, 则 $\Psi \sim \sqrt{\epsilon E}$ 。

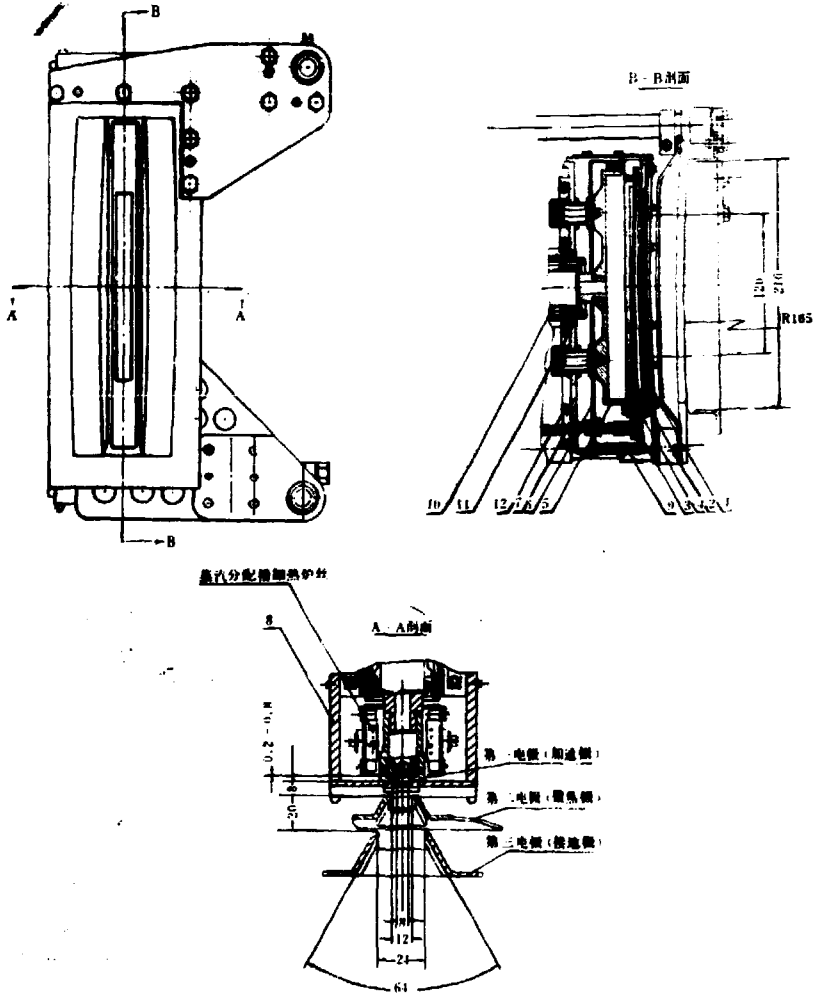


图1 表面电离离子源的主要结构装配图

- 1—电离器; 2—加热器(灯丝); 3—加热器电源引A支头; 4—蒸汽分配槽(“燕尾槽”); 5—电离室;
6—反射盒; 7—方形支持法兰; 8—冷却板; 9—外罩; 10—排屑; 11—炉筒; 12—冷却铜管; 13—第一
电极(加速极); 14—第二电极(聚焦板); 15—第三电极(接地板); 16—电离室加热器炉丝

显然，我们从（1）—（5）可见， $(\varphi - V)$ 越大，则 α 和 β 越大，电离效率高，而电场越高， α 和 β 也越大。因此，我们在设计表面源时，从物理上应考虑以下几点要求：

（1）必须选择逸出功大的金属（如表 1）作为电离表面，并且 $\varphi > V$ 以保证高效率电离；

表 1 几种金属的逸出功

金属 逸出功	Ta	Mo	W	Ni	Pd	Re	Pt
φ, V	4.12	4.27	4.54	5.03	5.29	5.1	5.32

（2）要确保较佳的表面工作温度 T 以获得尽量高的 α 和 β ，从而得到大离子流；

（3）对表面电离器要给以足够高的电场强度才能引出强离子流。

为此，我们用铷作实验，选用镍（Ni）作为表面电离材料，其 $\varphi = 5.03V$ ， $V = 4.16V$ ，熔点为 $1450^\circ C$ 。根据上述公式求得表 2 所示的不同温度下的 α 、 β 值。由表可见，镍可以较好地满足前面两点要求。而其他物理要求将在表面源结构和电参数调节等技术下予以保证。

我们研制的强流表面源的整体结构和核心部件如图 1 和 2 所示，主要元件如图 3 所示。

表 2 不同温度下铷原子在镍表面电离的 α 、 β 数值

T, K	900	1000	1100	1200	1500
α	37210	12130	4842	2254	419
$\beta, \%$	99.99	99.99	99.98	99.95	99.76

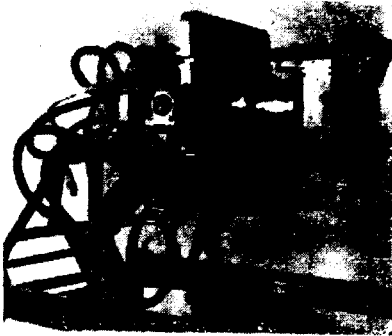


图 2 控流表面源整体实物照片

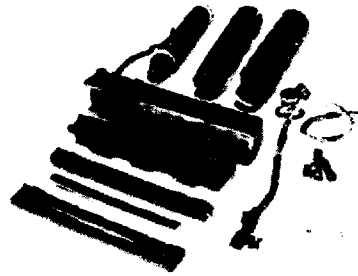


图 3 表面源主要元件图

强流表面源的工作原理可以概述如下：工作物质 $RbCl$ 装在坩埚 10 中，用石墨炉筒 11 加热它，产生的蒸汽流经燕尾槽 4 进入电离室 5 中。由于加速极内侧与电离器 1 表面间隙可在 $0.2-0.8mm$ 内调节，电极内侧角 $\sim 12^\circ$ ，这样蒸汽将以一定的通量和角度射到电离器表面上。因为燕尾槽两侧的蒸汽通道与加速极严格配合，从而减少了蒸汽的漏泄，提高了物质的利用率。用加热器 2 加热电离器，当功率为 $600W$ 时，可使电离器达到 $800^\circ C$ 左右，可以按需调节。当电离器达到和超过阈值温度后，蒸汽就在电离器表面上被有效而充分地进行电离。最后，我们采用一套可调节的三电极系统引出和聚焦铷离子束。

三、主要技术关键

在研制这台强流表面源中，我们主要解决了以下五个技术关键。

1. 电离器材料的选择与成型

电离器是表面源的重要部件之一。材料可选用表1所列的逸出功大又廉价易加工的金属。因此选用镍和钨是适宜的，其实验比较如表3所示。由表可见，两者都可以用，但以镍为好。通常用0.2—0.3mm厚的镍片加工成 $8 \times 10 \times 175 \text{mm}^3$ 的U型盒子。也采用过插片式的钨片和镍片。一般工作寿命在几十小时以上，与束流大小有关系。

表3 镍和钨两种电离器性能比较

出口缝		电离器与出口缝之间距, mm	分配器加热功率, W	加速电压, kV	聚焦电压, kV	引出离子流	
大, mm ²	小, mm ²					镍电离器	钨电离器
(6.5—8) × 160	4—5	0.5	500	19—22	0—10	36	32
8 × 100	3	1—2	500	25—30	16—17	59	52

电离器形状如同等离子体弯月面一样，对离子束聚焦影响很大。但是，表面源有一个优点，可以人为地选择合适的电离器表面形状，以保证较佳的束聚焦。在两台180°分离器上曾选用过三种形式：单曲面、双曲面和平面，其中以双曲面的效果较佳。

2. 电离器的加热问题

电离器所要求的电离器工作温度为750—850℃。我们采用过两种加热器(如图4所示)，加热功率在0—1200W之内，均可达到要求。经常采用单杆灯丝，下端以软线联结，寿命可达100多小时。

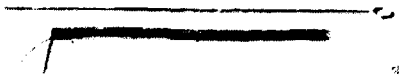


图4 两种加热器形状

上: 单杆灯丝
下: 螺旋灯丝

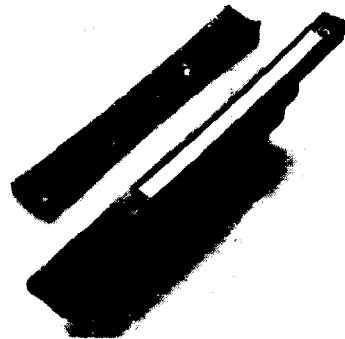


图5 燕尾槽及其与加速极装配图

3. 蒸汽的分配、流向及其控制

这也是表面源中关键问题之一，它直接关系到运行的成败和物质的利用率。在结构上要尽量做到：① 减少蒸汽的无用漏泄与冷凝；② 全部蒸汽能射到电离器灼热表面上，且使蒸汽沿表面高度有合适的分布；③ 能变动电离器与加速电极内侧表面的间隙大小，使蒸汽流

量和流向较有利于表面电离；④ 能由坩埚加热器单独而唯一地调节蒸汽量，减少其他热源（如分配器等）的影响。

我们对燕尾槽和加速极的配置试验过五种方案，其中以图5所示的为最好，采取两侧壁与加速极内侧紧密配合，使蒸汽较好地射向电离器上，减少了蒸汽漏泄。加速极具有合适的内切角（如 12° ），有利于蒸汽射向灼热的电离器表面。

电离器表面和加速极内表面之间隙大小是一个重要参数，对表面源的要求不同应有所不同。我们选用 $0.3-0.5\text{mm}$ 。

为了防止工作物质熔化后流出，我们还采用半封口不锈钢坩埚，以及用热阻式接头与电离室相连，以达到上述要求④。

4. 非所需电离表面的冷却

表面源中非所需电离表面主要是加速电极和外罩9。为了防止漏出的蒸汽在它们表面电离，两者温度不可过高（如 $>600^\circ\text{C}$ ），不然会导致打火频繁，高压迴路暗电流激增，破坏束形。但是它们表面的温度也不宜过低，否则蒸汽会在表面冷凝。为了避免上述两种情形，国外采用过气冷方法^[3]，其结构较复杂。我们采用图1所示的两块正面带有曲率的紫铜板8，固定在有水冷的方法兰7两侧，再装上厚约 2mm 的紫铜外罩9，使它紧贴加速电极上，从而用水冷方法较好地解决了这个问题（温度在 $500-600^\circ\text{C}$ 内）。

5. 离子光学系统

离子光学系统对离子束聚焦影响较大。我们采用狭缝式可调节的三电极静电透镜系统。加速极用石墨制作，处在 $20-35\text{kV}$ ，狭缝尺寸为 $(2-8)\text{mm} \times (120-180)\text{mm}$ ，壁厚约 1.8mm ，只要机械强度足够，壁厚薄些为好，那有利于提高电离器表面上的场强，从而提高束流。

聚焦极和接地极用不锈钢制成，安装在单臂可移动的轴上，极间距离在运行时可以随时调节，以寻求较好的聚焦特性。聚焦极处在 $0-25\text{kV}$ 负高压上，狭缝尺寸为 $12 \times 185\text{mm}^2$ ，接地极缝口宽度为 24mm ，加速极与聚焦极间的距离为 $11-12.5\text{mm}$ ，接地极与聚焦极之间距为 $22-23\text{mm}$ 。

四、主要工作性能

本节主要总结实验和运行结果，给出表面源工作性能与各种电参数及几何参数的关系。

1. 电离器温度与灯丝加热功率的关系

如图6实线所示，采用直杆灯丝，加热功率在 $600-1200\text{W}$ 时，电离器温度可达 $700-850^\circ\text{C}$ 以上，相应对电离室加热功率为 $400-600\text{W}$ 。图中虚线为外罩表面相应温度，其温度被控制在低于 600°C ，能够基本抑制非所需表面电离。

2. 拉出束流与电离器温度的关系

如图7所示，对于铷，存在一个表面电离温度阈值，约为 $600-650^\circ\text{C}$ 。当温度低于阈值时，表面电离度很小，所以束流弱；而当温度达到阈值和超过阈值时，电离度大大提高，所以束流上升较快，再提高温度电离度增加不明显，束流逐渐趋向饱和（在一定蒸汽量下）。

3. 束流与坩埚温度的关系

如图8(a)(b)所示，在阈值温度以上离子流随射到电离器表面上的蒸汽通量，即随坩

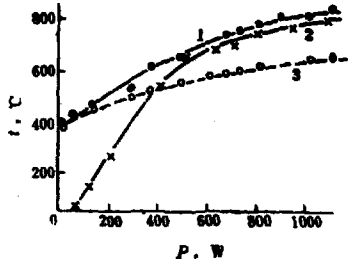


图6 电离器表面温度与灯丝功率的关系(实线)
虚线为相应外罩表面温度与灯丝功率的关系,
1. 2和3分别对应于分配器功率500W、0W和500W

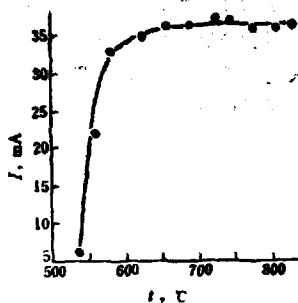


图7 拉出轴离子流与电离器表面温度的关系

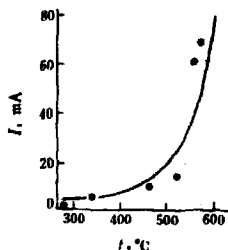


图8(a) 拉出束流与坩埚温度的关系
分配器功率500W; 灯丝功率676W;
加速电压22.5kV; 聚焦电压-15kV

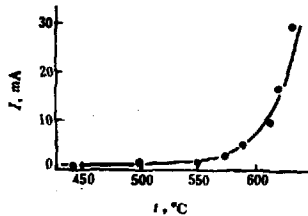


图8(b) 接收束流与坩埚温度的关系
分配器功率460W; 灯丝功率680W;
加速电压30kV; 聚焦电压-20kV

坩加热温度升高而增加。

4. 张角曲线、束流与加速电压的关系

如图9(a)(b)所示,接收束流随加速电压的提高而增加。不过,电压也不能太高。除电击穿限制外,随电压上升束流张角随之减少(参看图9(b))。

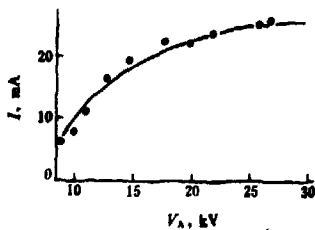


图9(a) 接受束流与加速电压的关系

灯丝功率664W; 分配器功率480W;
坩埚功率622W; 聚焦电压-15kV

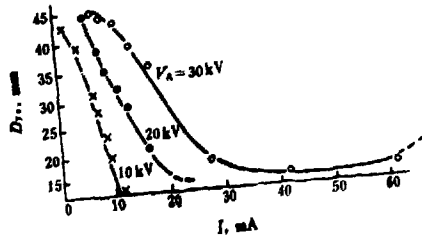


图9(b) 不同加速电压 V_A 下的离子束
张角曲线($D_{1r}-I$ 关系)

$V_f = -10kV, D_f = 12mm$

不同聚集电压下张角曲线, 及束流与聚集电压之关系, 与上述相类似^[10, 11]

5. 最大拉出束流、张角曲线与 D_1 关系

这里 D_1 指电离器表面与聚焦极出口缝之间距离。 $I_{\text{max}}-D_1$ 和 $D_{1/2}-D_1$ 之关系如图10(a)(b)所示。很显然, 随 D_1 的增加, 拉出最大束流越来越小, 而在小束流下张角相应地较小。

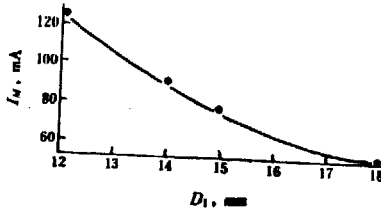


图10(a) 最大拉出束流 I_{max} 与 D_1 的关系

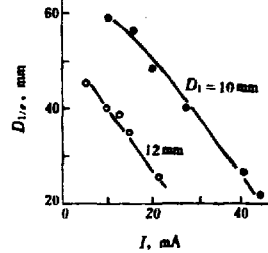


图10(b) 不同 D_1 值下 $D_{1/2}-I$ 关系
 $V_A = 30\text{kV}$; $V_F = -10\text{kV}$

我们希望 D_1 大小在不引起高压打火下应尽量小, 以便有利于提高电离器表面电场强度, 从而提高电离度和引出束流。

6. 表面源与弧放电离子源性能比较

表4列出表面源在下列较佳运行参数下, 其工作性能与弧放电离子源^[12]的比较。

表4 表面源与UA-22弧放电电源的比较

性能指标 离子源类型	接收器上接收的离子流, mA						分离后的最佳丰度耗料率			最长运行时间, h
	最大束流			平均束流			$\text{Rb}^{85}\%$	$\text{Rb}^{87}\%$	g/h	
	I_B	$I_{\text{Rb}^{85}}$	$I_{\text{Rb}^{87}}$	I_B	$I_{\text{Rb}^{85}}$	$I_{\text{Rb}^{87}}$				
间接式弧放电电源	30.7	20.1	7.6	19.6	12.7	4.4	99.7	98.9	0.42	59
直接式弧放电电源	19.8	12.6	4.4	12.1	8.4	3.2	99.8	99.8	0.48	90
表面源	≥ 38.1	≥ 20.3	7.8	24.5	11.2	4.4	99.8	98.2	0.71	> 41

直杠灯丝 $\phi 1.7\text{mm}$, 双曲面电离器, 加速缝大小 $8 \times 120\text{mm}^2$, 电离器表面与加速极内侧间隙为 $0.2-0.8\text{mm}$, $D_1 = 13.5-14.0\text{mm}$, $D_2 = 23\text{mm}$, 灯丝加电功率 664W , 分配器功率 460W , 坩锅功率 525W , 坩锅温度 610°C , $V_A = 30\text{kV}$, $V_F = -22.5\text{kV}$ 。由表可见, 表面源的性能是好的, 具有很大的应用潜力和发展前途。

我们的表面源与文献[2]相比水平基本相当。文[2]接收物平均束流为 30mA , 耗料率为 0.41g/h , 但分离丰度对 Rb^{85} 为 97.2% , 对 Rb^{87} 为 88.8% , 比我们产品丰度低。迄今国外尚无报道同类源的最新结果。

五、简单讨论

在表面源实验和运行中出现许多有趣现象尚需深入研究。这里, 我们仅讨论以下几点。

1. 表面源最适于产生碱金属元素的离子流, 也可用于产生诸如稀土元素的离子流。所以表面源不仅应用于电磁同位素分离器上, 而且有望推广应用于其他领域, 如国外已用于

离子静电推进器等。

2. 表面源对每种元素都存在一个电离温度阈值, 如对铷元素, 其阈值为600—650℃。因此电离器温度的控制是表面源中的一个重要问题, 温度太低, 束流很小, 温度太高, 功率消耗大, 束流并不明显增加, 反而相应提高了非所需电离表面的温度, 给冷却问题增加了困难。根据我们的经验一般运用在比阈值高200℃左右。

同时, 我们从实验上还观察到阈值温度的移动现象, 这与外电场的影响有关。

3. 外电场对表面源的电离度 α 和电离系数 β 有较大的影响, 从公式(4)、(5)可算得表5所列的结果。

表5 在工作温度为1100°K下, 有无电场时 α 、 β 值的比较

参 数	E=0		E≠0	
	$\psi=0V$	$\psi=0.05V$	$\psi=0.075V$	$\psi=0.1V$
α	4842	8210	10680	13910
$\beta, \%$	99.98	99.99	99.99	99.99

因此, 在表面源中应尽量提高作用在电离器表面上的电场强度。其措施主要是: 提高加速电压, 减少 D_1 和出口缝厚度。但是电场太强则造成严重打火影响稳定运行和产品质量。所以在一定的电压范围内有一较佳的 D_1 值。在分离铷同位素时, $D_1 = 13.5—15mm$ 。

4. 电离器弯月面形状就是表面源离子发射面, 相当于孤放电离子源中等离子体弯月面(鞘层边界), 这是直接影响束流聚焦特性的一个重要因素^[10, 11]。在孤放电源中弯月面是变化的, 而在表面源中电离器弯月面形状则可人为地选择, 这是一大优点。因此, 表面源中不存在孤放电源中鞘层特性对束形的影响(没有振荡等问题)^[12, 13]。我们可以通过实验或计算寻求较佳的电离器弯月面式状, 以获得最佳聚焦特性。我们的实验表明: 双曲面比单曲面好, 例如在分离器接收总离子流约为30mA时, 采用较合适的双曲面电离器后, 接收器面板电流明显比单曲面时小三、四倍, 束形分开清晰, 聚焦较佳, 运行较稳定, 产品丰度也高。

此外, 强流离子束空间电荷效应、离子光学系统对束特性的影响、对表面源中一些实验现象的理解, 将需要进一步研究和专题讨论。

徐冠琴等同志参加过有关实验工作, 在工作总结中曾与王朝驹等同志进行过有益的讨论, 在此一并致谢。

参 考 文 献

- [1] M. Д. 葛波维奇, 等离子体离子源物理与技术, 科学出版社, 1976; 方锡清, 北京科技报, 1981年 第160期。
- [2] В. И. Райко и др., ПТЭ, 1 29 (1960).
- [3] M. Truong, Nucl. Instrum. Methods, 38, 23 (1965).
- [4] G. J. Beyer et al., ibid 96, 437 (1971).
- [5] 方锡清等, 表面电离离子源, 内部资料。
- [6] 林治洲等, 内部资料, 4, 398 (1982).
- [7] Л. Н. 多布雷夫著, 电子和离子发射, 科学出版社, 1960年。

- [8] Э.Я.Замберг и др., УФН. 67. 689 (1959) ; 方锦清, 表面地质物理综述报告, 内部资料, 1971.
- [9] 原子能所九室离子源组, 粒子加速器及其应用, 科学技术文献出版社重庆分社, 1980年, 155页.
- [10] 方锦清, 原子核物理, 2. 175 (1980) .
- [11] 方锦清, 原子核物理, 3. 267 (1981) .
- [12] 方锦清, 科学通报, 26. 210 (1981) .
- [13] 方锦清, 科学通报, 27. 1167 (1982) .

CHINA NUCLEAR SCIENCE & TECHNOLOGY REPORT



China Nuclear Information Centre