

用于离子注入机的Freeman型离子源的研制

姜苏蔚 李 钧 杜建敏 桑和康 刘来凤 蒋新元

(中国科学院上海冶金研究所)

本文介绍了一台适用于离子注入机的Freeman型离子源,该源结构简单、操作方便、功耗低、造价便宜。通过对离子源放电室结构、引出系统的改进,可获得接近旁轴条件、品质优良的离子束,束流在0.5—1mA之间。用常规的双缝法对束流发射度进行测量,能量归一化发射度在 $2-4 \times 10^{-8} \text{ mm} \cdot \text{rad} \cdot \text{MeV}^{1/2}$ 之间,归一化亮度 $\geq 7.6 \times 10^{10} \text{ A/m}^2 \cdot \text{rad}^2$,有一定的应用价值。

关键词: 离子源 放电室 引出系统 发射度 归一化亮度

一、前 言

离子源是离子注入机的关键部件之一,优良的离子源,希望流强大、稳定度高、寿命长、品质优良,并可引出大多数元素离子束。Freeman型离子源的优点是束流引出容易、流强大、稳定可靠,并能引出多种元素的离子,是典型的重离子源之一,它的放电室引出缝和引出系统都为窄长矩形结构,长度在30mm以上,可引出较强的长条型束流。尽管束流纵向散角很小,但束流的横向散角较大,如要应用在离子注入机上并配以较长的光路传输系统时,必须对离子源结构加以改进。已广泛应用于离子注入机的Freeman型离子源一般都已根据不同需要作了改进。我们参考了国内外有关资料^[1-4],研制了一台简易Freeman型离子源。通过对离子源的引出缝、引出结构的不断改进,获得了接近旁轴条件、束流品质优良的离子束,附加上自制的固体蒸发器还可以引出多种重离子束。我们用常规的双缝法对束流品质进行测量,束流在几百 μA —1mA之间,它的能量归一化发射度在 $2-4 \times 10^{-8} \text{ mm} \cdot \text{rad} \cdot \text{MeV}^{1/2}$,归一化亮度大于 $7.6 \times 10^{10} \text{ A/m}^2 \cdot \text{rad}^2$ 。

二、离子源的设计和结构特点

离子源结构见图1,整体结构除绝缘材料外,均采用无磁不锈钢,阴极灯丝穿过整个放电室,并用氮化硼加以绝缘,灯丝两端加有电子反射片(钽和钼),作为反射电子的屏障。整个弧室置于弱磁场中($\leq 10^{-2} \text{ T}$),磁场方向与灯丝平行,灯丝紧靠并平行弧室引出狭缝,相距5mm,引出狭缝为 $(0.8-1.2 \text{ mm}) \times (12-17 \text{ mm})$ 。弧室体积为 $50 \times 18 \times 12 \text{ mm}^3$,阳极(引出狭缝)采用插板式与弧室联成一体,其优点是更换灯丝和改变阳极孔的几何形状比较方便。引出系统采用与引出缝相似的狭缝形状的膜片结构,狭缝的夹角与间距直接影响束流品质,其最佳结构见图2。为了提高束流品质和光路的轴对称,将引出狭缝和引出系统改为圆形孔,虽然束流受到损失,但品质提高了,使束流在整个传输系统中满足旁轴条件,输运更为安全可靠。放电室置在高电位的圆柱体屏蔽罩内,引出系统的负电极和接地极通过陶瓷绝缘柱相互连成一体,置于另一地电位的圆柱体支架上,可以拆卸调换。高低电位的两个圆柱体同轴安装在底座的绝缘法兰上(采用聚酰亚胺工程塑料),这样有利机械中心对准和高压绝缘。灯丝采用钨丝或钼丝($\phi 1 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$),钨丝刚性强,不易变形和弯曲,但事先要进行退火整形;

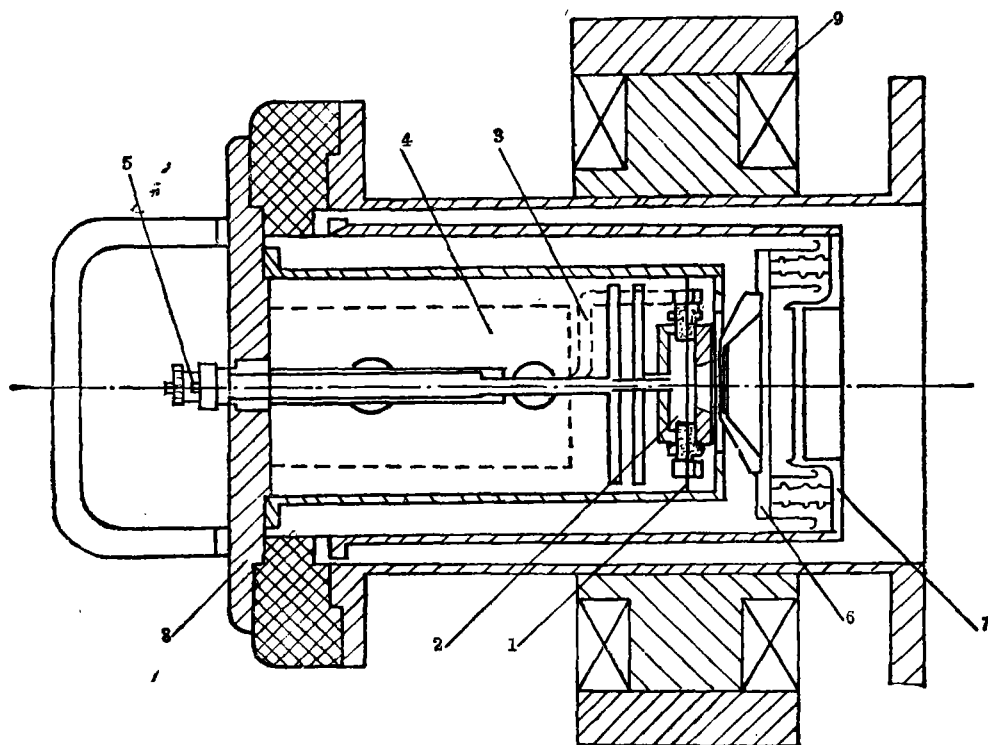


图1 离子源总体图

1. 灯丝 2. 放电室 3. 灯丝接线杆 4. 固体蒸发器 5. 进气嘴 6. 引出电极(-10kV) 7. 接地电极 8. 放电室底座法兰(+30kV) 9. 外加磁场

Fig. 1 Ion source

1. Filament 2. Arc chamber 3. Filament support 4. Solid vaporiser 5. Gas inlet 6. Extraction electrode 7. Earthed electrode 8. Flange plate 9. Source field

钨丝易加工, 发射电子效率高, 使用寿命长, 但易变形弯曲。离子源工作寿命取决于灯丝寿命, 一般在30小时左右。灯丝夹具最初采用紫铜编织线过渡联接, 但易短路, 后来改用 $\phi 6\text{mm}$ 不锈钢丝杆联接, 刚性强, 不易短路, 效果很高。鉴于蒸发温度高于 800°C 的离子源的设计, 要求高, 条件苛刻, 还要必不可少的水冷却系统, 为了简化, 就不考虑大于 800°C 的蒸发温度的元素离子化。这样选材容易, 可采用无磁不锈钢, 在中等温度中, 它的耐蚀性能良好, 并可减少热膨胀引起的热变形, 离子源的精细结构和密封就不易受到影响。整个离子源腔体结构较大, 蒸发炉和放电室周围又采用了多层热辐射屏蔽, 有较好的绝热性能。降低了热膨胀所带来的影响, 因此可以不采用水冷却系统, 只对离子源壳体进行风冷即可, (采用两只 $\phi 150\text{mm}$ 微型风扇散热)。在室温 30°C 时, 离子源连续工作30小时(实际功耗 $\leq 1\text{kW}$)。壳体表面温度热平衡点为 55°C , 接装了固体蒸发器后, 炉胆温度为 750°C 时, 壳体温度升高到 72°C , 已趋于热平衡。聚酰亚胺高压绝缘法兰可耐 250°C 高温, 其真空性能、机械强度、绝缘性能均较好, 使用较长时间后(约半年左右), 如有沾污, 只要对表面进行清洁去垢处理即可继续使用。在上述温度下工作, 未见有放气现象产生, 经过几年使用, 情况良好。离子源在实际使用中会产生偏离, 为此在离子源与真空系统的三通管道联接处, 接装可调波纹软管, 便于束流中心对准。在离子源的长期运转中, 有时出现束流畸变而偏离中心, 后来又将引出系统改进, 负电

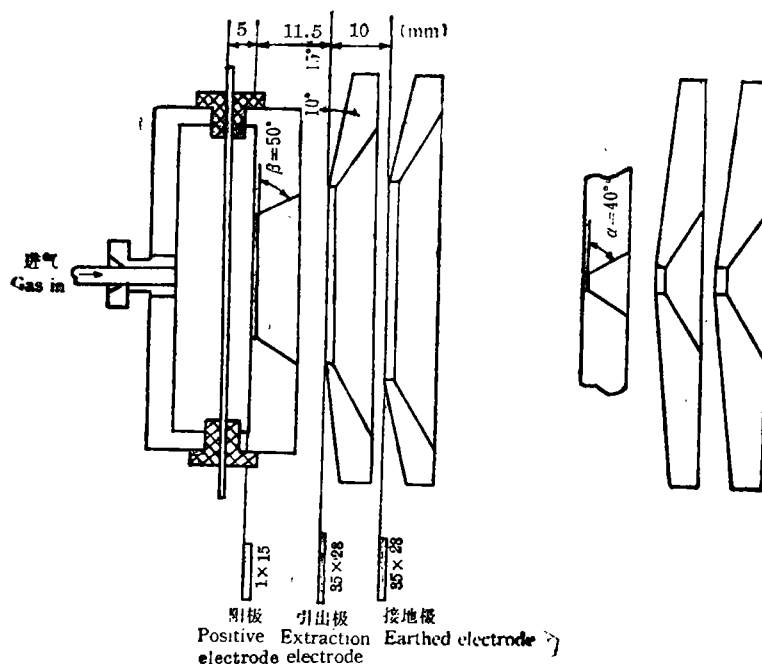


图2 束引出系统结构

Fig. 2 Beam extraction geometry

极与接地极安装在同一支架上, 通过连杆加接在三通管的另一法兰洞口上。当灯丝消耗接近寿终时, 将发生弯曲变形引起束流偏离, 此时可操作连杆进行调整, 使引出系统相对于阳极作平移和偏转的二维运动, 重新对准。这在实际调试中方便不少。固体蒸发器由蒸发坩埚、加热炉和测温热电偶组成, 石墨坩埚容积为 $\phi 6 \times 20 \text{ mm}^3$, 炉胆用氮化硼做成, 加热丝用 $\phi 1 \text{ mm}$ 钼丝绕制, 外面用不锈钢罩做热屏蔽, 热电偶直接插入坩埚顶盖芯测量工作温度(可达 750°C)。真空机组由 450 l/s 分子泵和 8 l/s 的直联泵组成, 开机一、二小时后, 系统真空度就达到 1.33 mPa 。

三、实验结果和讨论

1. 离子源正常情况下的参数为: 灯丝(I_e/V_e): $35\text{--}60 \text{ A}/5 \text{ V}$ (钨丝), $20\text{--}40 \text{ A}/5 \text{ V}$ (钼丝); 弧压/弧流(V_a/I_a): $50\text{--}100 \text{ V}/1\text{--}5 \text{ A}$; 磁场(V_B/I_B): $2\text{--}4 \text{ V}/1\text{--}3.5 \text{ A}$, 以获得 $6\text{--}10 \times 10^{-3} \text{ T}$ 的附加磁场; 进气量适度, 以控制系统真空在 $3\text{--}7 \text{ mPa}$, 在引出固体元素离子时为 $2\text{--}4 \text{ mPa}$; 减速电压(V_L): $-0.2\text{--}-2 \text{ kV}$ 之间; 引出电压(V_{ex}): $18\text{--}30 \text{ kV}$ 之间。随着灯丝的溅射变细, 调节灯丝电压, 使电子发射有一个最佳值, 改变进气量、外加磁场和减速电压的大小可使束流达到最佳值。该源在弱磁场下工作得很好, 比较稳定, 避免了强磁场下会使束流引起不稳定的问题。离子源放电参数, 引出参数和束流之间关系的实验结果见图3。这些结果与Freeman早期工作所报道的情况相符^[1,2]。当我们在法拉第筒前靶位放置厚度为 $4 \mu\text{m}$ 的钛片薄膜时, 从观察窗口可以明显看到束斑($5\text{--}12 \text{ mm}$)随参数调节而变化, 钛片薄膜可在一、二分钟内, 由红色致白炽化直到熔化。

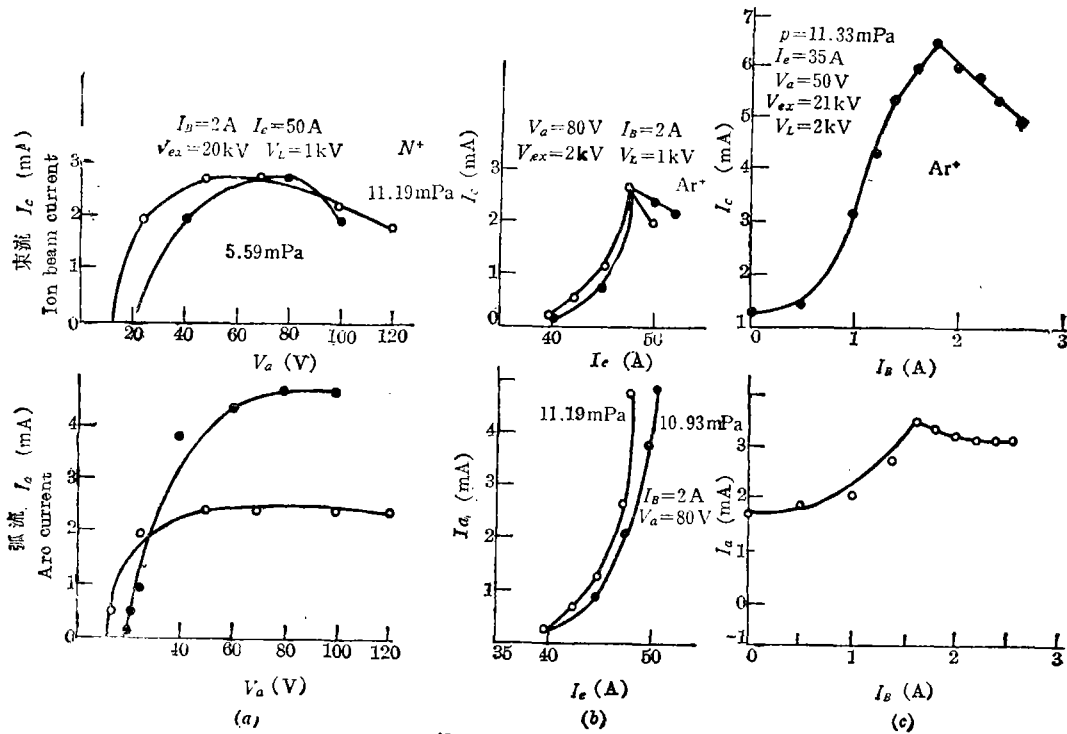


图3 离子源参数

(a) $V_a \sim I_b, I_a$ 关系曲线 (b) $I_b \sim I_f, I_a$ 关系曲线 (c) $I_b \sim I_m, I_a$ 关系曲线

Fig. 3 Parameters of ion source

(a) Variation of beam and arc current with arc voltage (b) Variation of ion beam and arc current with filament current (c) Variation of ion beam and arc current with magnetic field

2. 离子源引出系统采用加速—减速的三电极结构。离子束在无外场的空间传输时,离子束粒子的热速度和空间电荷效应引起束流发散。为此,空间电荷的中和十分必要,加速—减速三电极结构对抑制束流发散、空间电荷的中和能起很好作用。为了提高束流品质,要控制弧室等离子体发射面,使离子束发散角最小。通过大量实验,确定相匹配的参数如下:等离子体发射面到引出系统负电极的距离 $D=10.5\sim12.5mm$;长缝孔出口电极的半宽度 $b=0.4\sim0.6mm$;圆形出口电极孔半径 $r_0=1\sim1.5mm$;出口电极的倾角在实验中获得 β 角为 50° , α 角为 40° ,此时,引出束流品质为最佳,对圆形出口电极的倾角为 45° 时,束流品质为最佳,见图2。引出结构圆孔为 $\phi 6\sim 8mm$ 都可,其它结构尺寸不变。用常规的双缝法对引出束流品质进行测量,直管总束流在距引出系统接地极 $770mm$ 处测量,引出固体离子束时在 $1000mm$ 处测量。结果见表1。测量结果表明,该源的数据符合我们的要求,能满足束流的旁轴条件。圆孔引出结构束流品质略为好些。

3. 试验台接上分析磁铁后,对引出束流的离子比和质谱做了实验,采用圆孔引出结构、小束流进行,获得靶流及离子比结果见表2,质谱见图4,靶流用距分析磁铁出口处 $1200mm$ 的法拉第筒测量。

束流与物料温度的关系见图5,由图5可见,如温度超过金属蒸发温度,束流下降,严重时会导致未电离蒸气物质沉积,还会沾污系统,引起绝缘元件的短路和击穿,故应严控物

表 1 束流发射度和归一化亮度测值

Table 1 Measurements of emittance and brightness

引出结构 Extraction geometry		引出电压 (kV) Extraction voltage	引出离子 Extracted ion	靶流(μm) Ion beam current	束流发射度 (mm·rad) ·MeV ^{1/2} Ion beam current emittance	能量归一化发射度 (mm·rad·MeV ^{1/2}) Energy normalized emittance	归一化亮度 (A/m ² ·rad ²) Normalized brightness
长缝 Long seam	横向(x) Horizontal	24	Ar ⁺	660	1.9×10 ⁻⁴	2.95×10 ⁻⁵	2×10 ¹¹
	纵向(y) Longitudinal				1.5×10 ⁻⁴	2.3×10 ⁻⁵	
圆孔 Circular hole	出口电极φ2mm Positive electrode 引出电极φ0—8mm Extraction electrode	30	Ar ⁺	500	16×10 ⁻⁴	2.8×10 ⁻⁵	1.3×10 ¹¹
同上 Same		26	Mg ⁺	800	1.3×10 ⁻⁴	2.1×10 ⁻⁵	3.7×10 ¹¹
同上 Same		24	Zn ⁺	600	1.7×10 ⁻⁴	2.6×10 ⁻⁵	1.8×10 ¹¹
同上 Same		30	Bi ⁺	600	2.3×10 ⁻⁴	4.03×10 ⁻⁵	7.6×10 ¹⁰

表2 测得靶流和离子比

Table 2 Measurements of ion beam current and ionic rate

工作物料 Material	物料温度(℃) Material temperature	弧压(V) Arc voltage	磁场电流(A) Magnetic field current	引出电压(kV) Extraction voltage	离子 Ion	束流(μA) Ion beam current	离子比(%) Ionic rate	质谱图(图4) Mass spectra chart (Fig. 4)
Ar		30	2.5	25	⁴⁰ Ar ⁺	100	95	a
BF ₃		50	3.5	25	¹¹ B ⁺	22	16	b
P	310	50	3	25	³¹ P ⁺	85	55	c
Zn	360	40	2.2	25	⁶⁵ Zn ⁺	90	45	d
Bi	750	40	2	27	²⁰⁹ Bi ⁺	100	85	e
Mg	510	40	2	30	²⁴ Mg ⁺	200		

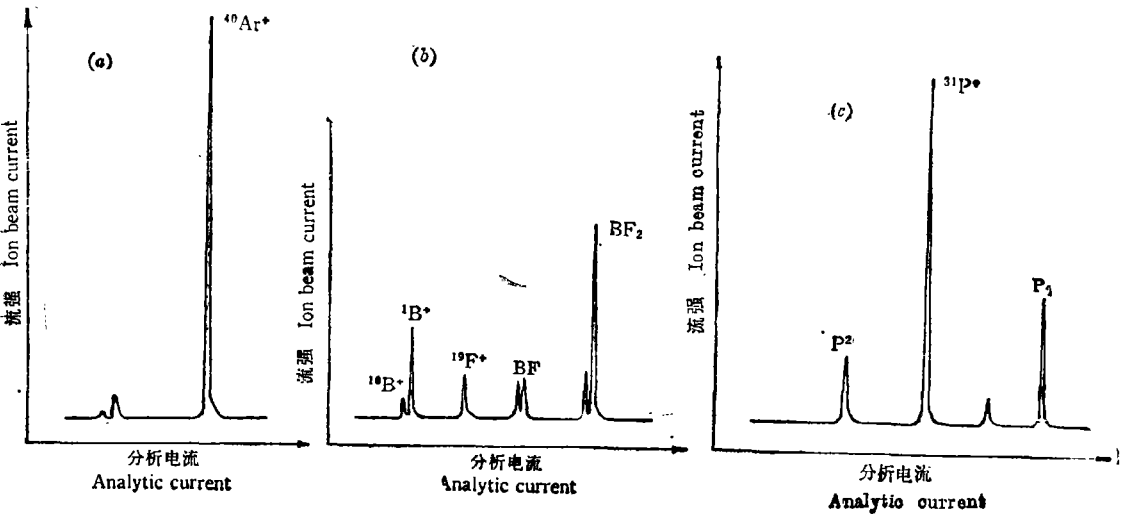


图4 质谱图
Fig. 4 Mass spectra chart

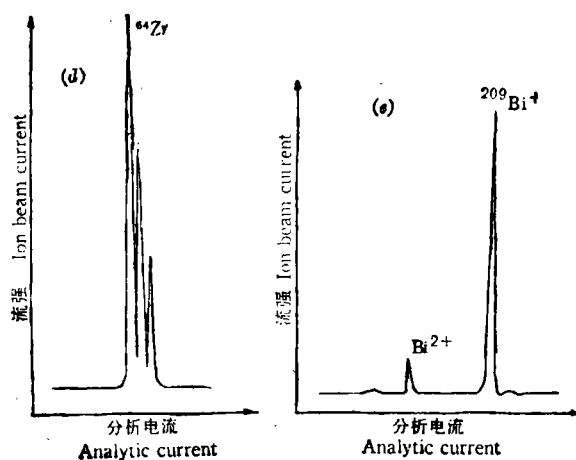


图4 质谱图

Fig. 4 Mass spectra chart

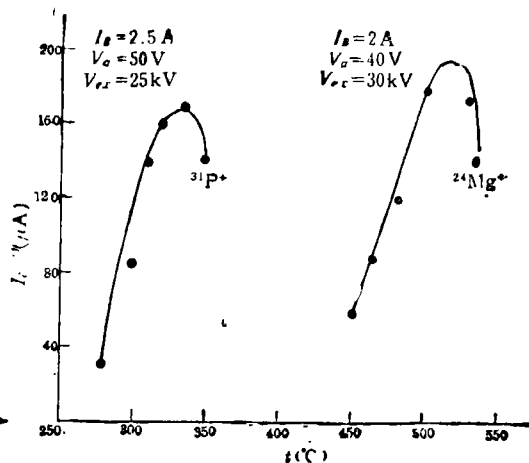


图5 束流与物料温度关系

Fig. 5 Variation of ion beam current
with material temperature

料蒸发温度。对蒸气压较高的物质宜用较小坩埚和降低坩埚温度,并改用细长的气体管道,以利控制放电室的蒸气压。对于蒸气压低的物质,可用Ar气体支持放电,以维持最低放电电压以提高电离效率。

4. 该离子源与欧洲高压工程公司作为商品的SO-55型离子源(空心阴极固体重离子源)相比,SO-55型离子源的能量归一化发射度为 $7 \times 10^{-3} \text{mm} \cdot \text{rad} \cdot \text{MeV}^{1/2}$,而该离子源为 $2 \sim 4 \times 10^{-5} \text{mm} \cdot \text{rad} \cdot \text{MeV}^{1/2}$,其结果比SO-55型离子源好。

改变Freeman型离子源的引出系统为圆孔结构,尚未见报道,我们这样做的原因是为了获得束流品质优良又便于与别的圆孔引出系统的离子源互换使用,其结果令人满意。这样简化改进的Freeman型离子源,尽管损失了一定的束流,但考虑到互换使用,是有一定的实用价值的。

参加过本工作的还有本所600keV离子注入机研制组和先锋电机厂夏晋治等同志。

参 考 文 献

- [1] J. H. Freeman, A new ion source for electromagnetic isotope separators, AERE-R4083, 1962.
- [2] J. H. Freeman, A high intensity isotope separator ion source, AERE-R6138, 1969.
- [3] Niwilliams, J. Vac. Sci. Tech., 15(1978), 3:1016.
- [4] 兰州近代物理研究所, 弗瑞曼型重离子源(资料), 1975年。

A Freeman type ion source designed for ion implanter

Jiang Suwei Li Jun Du Jianmin Sang Hekang

Liu Laifeng Jiang Xinyuan

(Shanghai Institute of Metallurgy, Academia Sinica)

Abstract

A Freeman type ion source designed for ion implanter is described. The ion source is simple, low consumption and cheap in price. After improving the structure of discharge chamber and extracting system, high quality para-axial ion beam of 0.5—1mA can be obtained. Conventional two slits method is used for measurements of beam emittance. The energy normalized emittance is $2-4 \times 10^{-6} \text{mm} \cdot \text{rad} \cdot \text{MeV}^{1/2}$ and normalized brightness $\geq 7.6 \times 10^{10} \text{A/m}^2 \cdot \text{rad}$. This ion source is suitable for practical uses.

Keywords: Ion source Discharge chamber Extracting system
Emittance Normalized brightness

(1987年7月15日收到)