

# 4MV 静电加速器用高频离子源的研制

孙振武<sup>1</sup>, 李 涛<sup>1</sup>, 郑世全<sup>1</sup>, 李玉晓<sup>1</sup>, 姜胜男<sup>1</sup>, 王建勇<sup>2</sup>, 霍裕平<sup>1</sup>

(1 郑州大学 物理工程学院, 河南 郑州 450052)

2 北京大学 重离子研究所, 北京 100871)

[摘要] 设计和调试了一台 4MV 静电加速器用高频离子源, 研究了诸因素对离子源起弧的影响, 发现保持放电管内壁的清洁、先加载横向磁场、缩短铜辫的长度并进行镀银处理可明显降低最低起弧板压; 测试了束流强度与振荡器板压、离子源气压和引出电压的关系, 发现流强随板压的升高而升高, 随气压的变化有一极大值, 而随引出电压的变化呈二极管的伏安特性; 上机试验表明引出电压的加卸载方式对离子源的起弧状况也将产生明显影响; 分析了上述各现象出现的原因; 经综合调试, 在 580V 板压、 $8 \times 10^{-4}$  Pa 气压、1.65 kV 引出电压和 21 kV 聚焦电压的状态下, 得到了束流为 178  $\mu$ A 的稳定离子束。

[关键词] 静电加速器, 离子源, 离子束, 振荡器

[中图分类号] TL503.4 [文献标识码] A [文章编号] 1672-1292(2005)03-0008-04

## Developing a RF Ion Source for 4MV Electrostatic Accelerator

SUN Zhenwu<sup>1</sup>, LI Tao<sup>1</sup>, ZHENG Shiquan<sup>1</sup>, LI Yuxiao<sup>1</sup>, JIANG Shengnan<sup>1</sup>  
WANG Jianyong<sup>2</sup>, HUO Yuping<sup>1</sup>

(1 School of Physics Engineering Zhengzhou University Henan Zhengzhou 450052 China)

2 Institute of Heavy Ion Physics Peking University Beijing 100871 China)

**Abstract** A RF ion source for 4MV electrostatic accelerator is designed and debugged. The influence of various factors on the RF ion source discharging is studied. It is found that keeping the inner wall of discharge bottle clean, loading horizontal magnet firstly, shortening the length of copper rope and electroplating it with silver can evidently reduce the lowest discharge voltage. Relationships between ion beam intensity and some parameters including plate voltage of the oscillator, gas pressure and extraction voltage are determined. It is found that ion beam intensity increases along with discharge voltage increasing, has a culmination with gas pressure changing and presents the property of diode with extraction voltage changing. The experiment on electrostatic accelerator makes known that the way of loading and unloading extraction voltage influences on ion source discharging. The reasons of the phenomena above are analyzed. By comprehensive debugging, a stable ion beam with 178  $\mu$ A is obtained under the condition of the plate voltage of 580 V, the gas pressure of  $8 \times 10^{-4}$  Pa, the extraction voltage of 1.65 kV and the focusing voltage of 21 kV.

**Key words** electrostatic accelerator; ion source; ion beam; oscillator

## 0 引言

根据细胞生物学的需要, 作者最近研制了一台 Van de Graaff 静电加速器用的高频离子源。由于特殊的工作环境, 静电加速器对离子源有特殊的要求<sup>[1, 2]</sup>: 功率消耗小, 结构紧凑; 工作稳定, 气耗小; 离子束能量集中, 束流强度大, 质子比高。而高频离子源的特点<sup>[2~4]</sup> (总功率消耗一般在 500W 以下, 气体流量小于 5 ml/hour, 质子比为 70% ~

90%, 可稳定工作数百小时以上, 离子束能量集中) 很好地满足了这些要求, 因此采用高频离子源作为静电加速器的离子源是合适的。

## 1 结构

高频离子源包括离子产生部分 (高频振荡器、放电管、横向磁场磁铁、气体系统)、离子引出部分 (引出电极和聚集电极) 以及相关电源 (如图 1 所示)。

收稿日期: 2005-04-12

作者简介: 孙振武 (1967-), 副教授, 主要从事核物理方面的研究. E-mail: sunzw@zzu.edu.cn

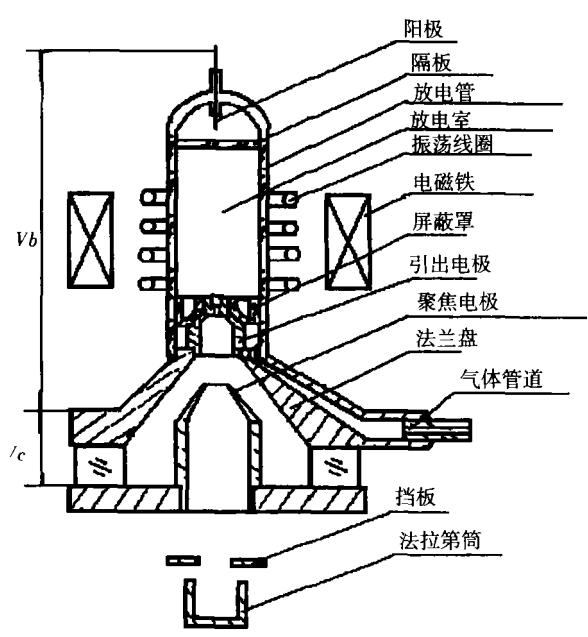


图1 高频离子源结构示意图

高频振荡器与放电管耦合的方式有电容耦合和电感耦合两种<sup>[2]</sup>。前者的振荡频率一般为 70~150MHz 后者一般为 10~60MHz 由于该静电加速器绝缘支柱顶端相对加速管顶端位置较高,使放电管位置偏下,增加了振荡器到放电管的距离,为了减少线路的辐射损失,采用了电感耦合的方式,使用较低的耦合频率。

高频振荡器采用电子管推挽式电路(如图 2 所示),其中振荡器的板压直接决定振荡器输出功率的大小,电容 C2 C3对两个电子管的对称性、振荡频率等有重要的影响,直接关系到离子源的工作状态,这些是调试中重点注意的参数。

为了减少离子在金属表面复合,提高质子比,放电管采用复合系数较小的派热克斯玻璃,阳极做成丝状,并用派热克斯玻璃把其与放电室隔开。放电管的引出电极及底座在放电管内暴露的部分也

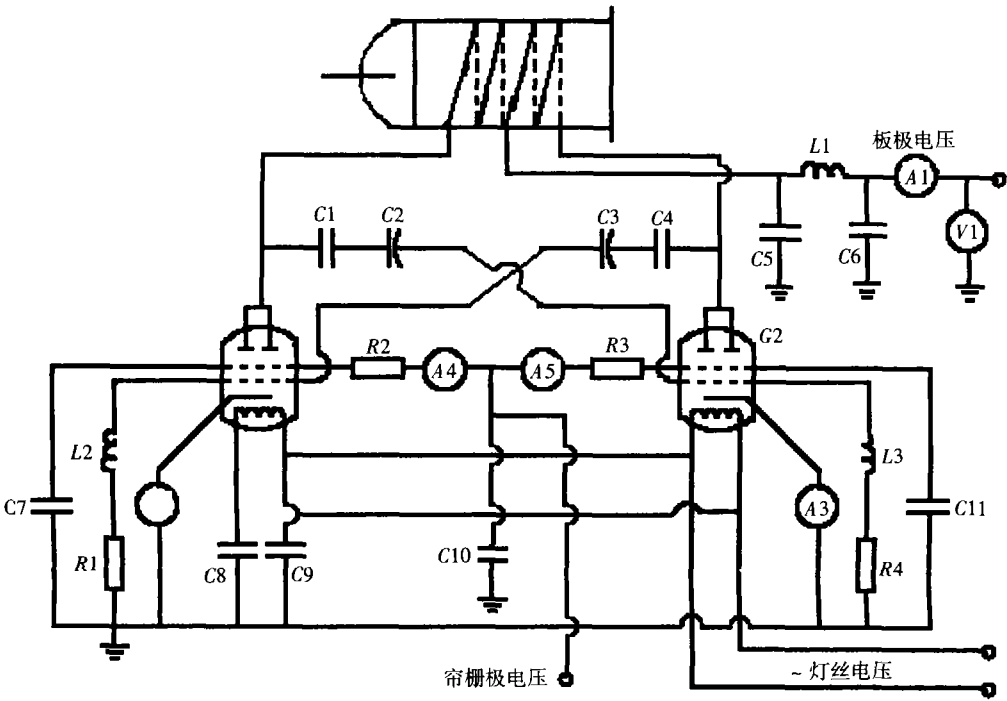


图2 高频振荡器线路图

用派热克斯玻璃屏蔽罩屏蔽起来。在耦合线圈外有一对电磁铁,用于给等离子体提供横向磁场,提高离子的密度。由于离子源处于加速器的高压端,使用传统的机械控制方式极为不便,因此离子源各参数的调节采用光纤传输、PLC 控制技术。聚集电极采用圆筒静电透镜,使引出的离子束得到聚集和初步加速。

电源部分包括高频振荡器电源、磁铁电源、阳极电源和聚焦电源。其参数分别为: 800 V DC、200 W; 10 V DC、50 W; 3 kV DC、100W; 30kV DC、200

W。其电路为一般全波整流电路。

## 2 台上试验

离子源加工完成后,只有先在实验台上进行调试和性能研究,等其性能稳定后再装到加速器上进行上机试验。实验台是由离子源、真空室、法拉第筒、真空机组等组成,从离子源出来的离子束经过聚焦、加速后,由法拉第筒测量流强的大小。

### 2.1 起弧试验

因为静电加速器在工作时,离子源被高 6 m、

$\phi 2\text{ m}$  的高压钢罐罩着, 其工作状态很难直接观测, 也不可能频繁地开罐检查、维修, 因此要求其工作状态必须非常稳定, 特别是每次开机时能准确起弧, 这就要求振荡器所使用的板压  $V_a$  与起弧要求的板压  $V_a^*$  相比有一较大的富裕量. 由于没有其他更好的选择, 振荡器选用的是北京电子管厂生产的 FU-19 最大板压为  $650\text{ V}$ . 初步试验表明, 此电压不足以保证放电管准确起弧, 因此首先要对离子源进行起弧试验, 提高其起弧的可靠性. 由于这方面的工作鲜有报道, 经过全面分析后尝试了 5 种试验措施.

措施: (1) 用 5% 的氢氟酸浸泡放电管 3 h, 用蒸馏水在超声波中清洗, 然后干燥; (2) 对耦合线圈进行镀银处理; (3) 对连接耦合线圈和板极的铜辫进行镀银处理, 其长度从  $34\text{ cm}$  缩短为  $21\text{ cm}$ ; (4) 增大电容  $C_2$  和  $C_3$ ; (5) 加板压之前, 先加横向磁场 (由于没有文献报道离子源的起弧与磁场有关, 因此最初开机是按照设备的常规开机程序进行的. 即振荡器电源、磁场电源、引出电源和加速电源). 表 1 为最高起弧板压 (不起弧时按  $650\text{ V}$  计算) 和平均起弧板压的变化情况, 每种情况试验 10 次.

表 1 不同情况下起弧板压的变化

措施序号	平均起弧板压 /V	最高起弧板压 /V
没有采取措施	635	650
1	578	609
2	576	604
3	542	561
4	536	558
5	458	460

从表 1 可知, 通过这些措施, 振荡器的平均起弧板压和最高起弧板压都有大幅度的降低, 在  $500\text{ V}$  以上放电管能准确起弧. 其中用氢氟酸清洗放电管以及先加横向磁场的措施效果明显. 前者可能因为放电管起弧靠存在于气体中的少量自由电子在高频电场的作用下, 在放电管内往复运动, 不断与管壁和气体分子发生碰撞, 在碰撞过程中激发出更多的电子, 并使气体分子电离. 由于放电管工作一段时间后, 气体中的杂质以及引出电极的溅射物沉积到管壁上, 如果不及时清洗, 会增加管壁与电子的复合几率, 从而使电子增殖的可能性降低, 而一旦这少量的电子被管壁俘获后, 便增加了起弧的难度. 先加横向磁场, 可能因为电子在磁场的作用下沿螺旋线运动, 增加了其在碰到管壁之前与气体分子碰撞的几率, 从而降低起弧的板压. 铜辫镀银并缩短, 可减少线路的辐射损失, 增大有效功率, 因

此效果明显. 而耦合线圈中的电磁能量主要是被放电管吸收, 向外的辐射不多, 因此 (2) 的效果不大. 增加耦合电容  $C_2$  和  $C_3$  是因为考虑到, 根据电磁辐射理论, 频率越高向外辐射越多, 为了降低频率, 只有增大谐振电容, 但从试验结果看没有明显变化.

2.2 板压、气压、引出电压和磁场电压对束流的影响

离子源稳定起弧后, 用氢气作气源, 分别测试了板压  $V_a$ 、气压  $P$  以及引出电压  $V_b$  与束流  $I$  的关系. 从图 3 可以看到随着板压  $V_a$  和气压  $P$  的升

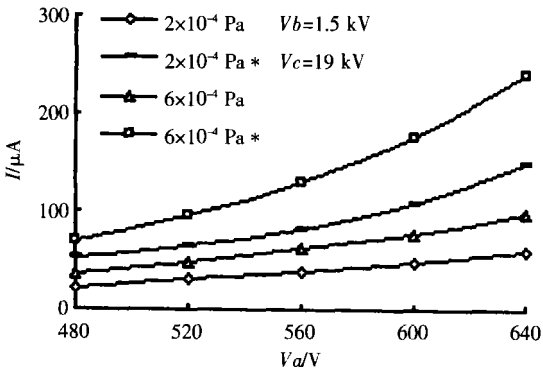


图 3 束流  $I$  与板压  $V_a$  的关系 (\* 表示加横向磁场)

高, 束流  $I$  增加. 这是因为, 随着板压的增加, 振荡器输出功率也跟着增加, 从而使放电管内离子密度升高. 而在气压不太高的情况下, 升高气压同增加振荡器的输出功率起到等效的作用<sup>[2]</sup>. 横向磁场不但可增加电子和离子的路径, 也会对离子体起到约束的作用<sup>[5,6]</sup>, 从而使引出束流明显增加. 但从图 4 看到当气压升高到一定值时, 束流反而降低.

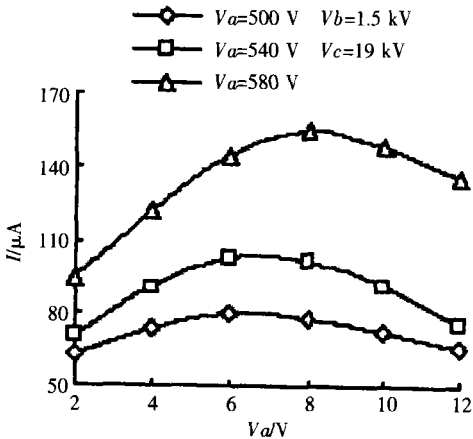


图 4 束流  $I$  与气压  $P$  的关系

造成此现象有两个原因<sup>[2]</sup>: 一是因为放电管内气压过大时, 等离子体的负载电阻、电子温度等特性都会发生变化, 产生第二类放电, 从而影响到对高频功率的耦合吸收, 在高频功率不变的情况下, 电离率下降; 二是因为随着引出电极孔道中的气压升高, 快速离子与气体分子碰撞而转换成为快速中性

粒子的电荷交换过程几率增加,从而影响离子的引出.图 5是在不同的放电气压下束流与引出电压的关系.可以看出,在引出电压较低时,曲线呈二极管的伏安特性,表明此时离子源处于最佳工作状态<sup>[4]</sup>.当引出电压足够大时,束流却迅速下降,理论上认为<sup>[2]</sup>,此时发射面的曲率变大,呈“过聚焦”状态,离子打到引出电极管道内,使引出束流迅速下降.

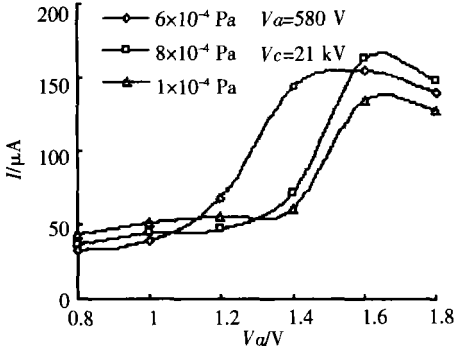


图 5 束流与引出电压的关系

根据上面试验的结果,考虑到振荡器的工作参数,我们选择 580V 板压,调整其他参数为最佳值,气压  $8 \times 10^{-4}$  Pa 引出电压 1.65 kV、聚焦电压 21 kV、得到 178  $\mu A$  的质子束,足以满足静电加速器从事辐射生物学试验工作的需要.

### 3 上机试验

上机试验表明,在台上调试稳定的离子源不能正常起弧.分析后认为这是由引出电压的加、卸载方式造成的.台上试验开机时,一般等起弧稳定后从小到大慢慢加上引出电压;关机时先由大到小关掉引出电压后,再关掉振荡器电源.由于在加速器上,离子源的电源都由加速器顶端的发电机供电,无法直接控制和观测,为了参数的一致性,在开关机时,所有参数都不做调整,直接开启和关掉加速器的主电机,这样其实等同于先加、后关引出电压.因为开机时在加速器底端的主电机转速是由低到高变化的,从而使在加速器顶端为离子源提供电源的发电机作为从动轮的转速也是由低到高变化的,其输出的电压自然是由零达到最大值,从而使振荡器的板压在刚开机后的一段时间达不到起弧要求的最低板压而不能使放电管起弧,然而此时引出电压已经加了上去(虽然还没有达到最大值);关机时,同理由发电机的输出电压不是直接降为零,

而有一个由高到低的过程,从而使放电管灭弧后,放电管两端仍有引出电压.由于灭弧后仍有一定的引出电压,使完全停机后放电管内的带电粒子密度减少,而开机时在起,弧前放电管两端已经加上引出电压,残存在放电管内的带电粒子进一步减少,而放电管起弧是靠管内的带电粒子在高频电磁场的作用下与气体分子发生碰撞形成的,因此这种开关机的方式自然增加了起弧的难度.变换工作流程,每次开机稳定后再把引出电压升到预定的值,关机前先把引出电压降为零,离子源不起弧的现象消失.现在,离子源在加速器上工作稳定,已引出 3 MeV、100  $\mu A$  以上的质子束.

### 4 结论

根据试验表明,放电管内壁的清洁程度、横向磁场和引出电压的加、卸载方式等会对离子源起弧造成重要影响.经过一些调整,设计的高频离子源在高于 500 V 的情况下能准确起弧;在 580 V 板压、 $8 \times 10^{-4}$  Pa 气压、1.65 kV 引出电压和 21 kV 聚焦电压的状态下,在实验台上得到 178  $\mu A$  束流的离子束.经上机试验,效果良好,能稳定工作.离子束的其他品质,如质子比、靶上的流强分布等,还有待进一步测试研究.

#### [参考文献]

- [1] 徐建铭. 加速器原理 [M]. 北京: 科学出版社, 1974 14-62
- [2] 叶铭汉, 陈监璞. 静电加速器 [M]. 北京: 科学出版社, 1965. 233-237.
- [3] Lee Y, Gough R A, Kunkel W B, et al. Ion energy spread and current measurements of the rf-driven multi-usp ion source [J]. Rev Sci Instr 1997, 68(3): 1398-1402
- [4] 张华顺, 万春侯, 王耿介. 等离子源和大功率中性束源 [M]. 北京: 原子能出版社, 1987 77-98
- [5] Yoshida Y, Takeiri Y. The use of magnetic fields in a partial-coaxial microwave cavity hole-plate ion source [J]. Rev Sci Instr 2000, 71(1): 66-69
- [6] 葛波维奇, 万春侯. 离子体离子源物理与技术 [M]. 北京: 科学出版社, 1976 140-150

[责任编辑: 刘健]