

文章编号: 1007-4627(2015)S1-0025-04

1 ~ 50 keV 低能质子束注入装置

陈立华, 崔保群, 马鹰俊, 马瑞刚, 唐兵, 黄青华

(中国原子能科学研究院, 北京 102413)

摘要: 为了开展空间环境中低能粒子对航天电子器件作用规律的研究, 根据研究项目需要, 研制一台 1 ~ 50 keV 的低能质子束装置。该装置具有无需机械调节即可对质子能量、注入面积、注量率等参数进行大范围调节的特点。装置设计紧凑、所占空间小、成本低。介绍了质子束装置的基本构成以及聚焦透镜、速度选择器、扫描器等主要元件的结构特点及优化措施。调试结果表明, 装置的性能达到了预期的技术指标, 在有效注入面积内可达 90% 以上的均匀度, 并能够长期稳定运行, 满足了研究的需要。

关键词: 空间环境; 质子束; 均匀度; 低能粒子

中图分类号: TL52 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.32.S1.25

1 引言

航天器所处的空间环境存在着包括质子、电子、中子等多种辐射粒子。复杂的粒子辐射环境对航天器的电子器件的高效、可靠工作构成严重威胁。而航天电子器件的可靠性直接关系到航天器的性能。空间环境是诱发航天器故障的重要因素之一^[1]。为了研究低能质子对航天电子器件材料的作用规律, 发展试验评估方法和技术, 填补国内空白, 需要研制一台束流能量和束斑均大范围可调的低能质子辐照源。由于大部分离子注入机的能量一般较高, 多集中在几十 keV 到几百 keV 之间^[2-6], 结构也较复杂, 所占空间大, 能量调节不方便。对于几个 keV 到几十 keV 能量区间的小型注入机的研究较少。

根据物理用户的要求, 研制了一台能量束斑均可大范围调节的质子束装置。该装置具有以下特点: 只需调整设备电源即可实现质子能量、注入面积和注量率等参数的调节, 无需对装置进行机械调整, 方便了运行人员的操作。装置采用冷阴极潘宁源作为离子源, 用永磁型速度选择器进行束流纯化, 使得设备紧凑、所占空间小、性能稳定、寿命长、无需维护, 可连续工作长时间工作。装置的主要性能指标列于表 1 中。

表 1 质子束注入装置主要技术指标

性能名称	设计指标
能量范围	1~50 keV
注入面积	20 mm×20 mm ~100 mm×100 mm

续表 1

性能名称	设计指标
注量率	$10^8 \sim 10^{13}$ p/(cm ² ·s)
均匀度	> 90%
纯度	> 98%
装置总长	< 2.5 m
稳定运行	> 100 h

2 质子束注入装置的基本构成

该装置的主体由离子源、前透镜、速度选择器、可调光阑、后透镜、电偏转器、电扫描器和真空系统等组成, 其基本布局如图 1 所示。冷阴极潘宁离子源产生的束流有 H₂⁺, H₃⁺ 和其他杂质离子^[7], 为了保证靶上束流纯度, 需要纯化设备对束流进行纯化。考虑速度选择器的直线传输的特性, 无需更多的匹配单元, 占有空间较小, 故采用速度选择器对束流进行纯化。为了适应质子束的能量变化范围较大的情况, 保证速度选择器的分辨率并在靶上得到合适的束斑, 使用聚焦透镜对束流包络进行约束。为了满足靶上束斑尺寸的要求, 同时保证靶上注入质子的均匀性, 采用电扫描系统对束流进行扫描。离子束会与真空室内的残余气体碰撞而引起部分粒子的中性化^[8], 为了减少中性束对注入情况的影响, 束线上安装静电偏转装置使束流在水平方向偏开原有光轴 10°。限束光阑位于速度选择器之后, 孔径可变, 通过步进电机控制, 可远程调节。通过调节离子源的进气量、可变光阑、靶上束斑尺寸等可以方便地调节靶上质子注量率。

收稿日期: 2015-08-18; 修改日期: 2015-09-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11227804)

作者简介: 陈立华(1981-), 男, 河南南阳人, 工程师, 在读博士, 从事加速器技术研究, E-mail: lihuachen@ciae.ac.cn.

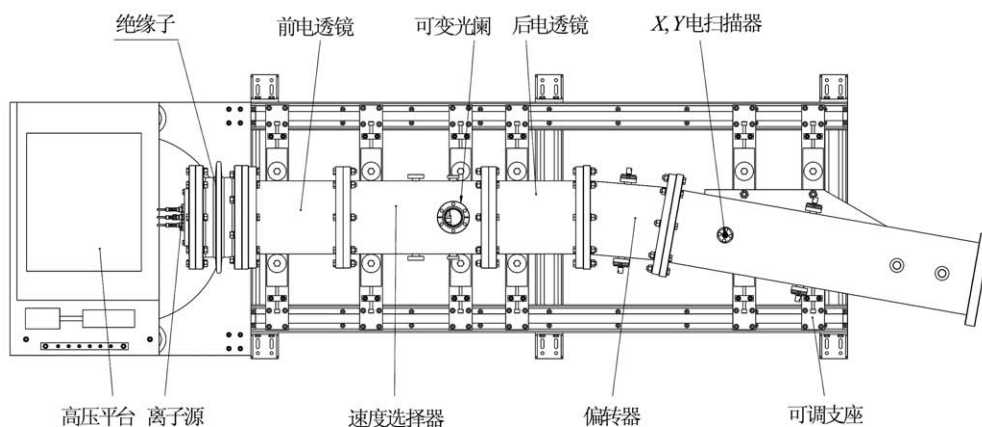


图 1 质子束装置的总体布局

3 关键部件的结构特点及优化设计

3.1 大孔径自屏蔽式聚焦透镜

静电三单元单透镜结构简单、调节方便，一般需要很高的加速电压。通常透镜的高压电极裸露在空气中，易引起打火和人员触电，高压馈入方式不当也常导致打火情况发生。对于包络比较大的束流，透镜孔径过小会引起像差的增大。根据离子源的实验结果和空间布局的要求，选择透镜的孔径 $\Phi 80\text{ mm}$ ，间隙 10 mm ，透镜总长度 200 mm 。通过分析计算，采用插入式的高压馈入结构，并将高压电极的绝缘支撑放在真空室内，具体结构见图 2。这种结构避免了透镜高压电极的外露，使得

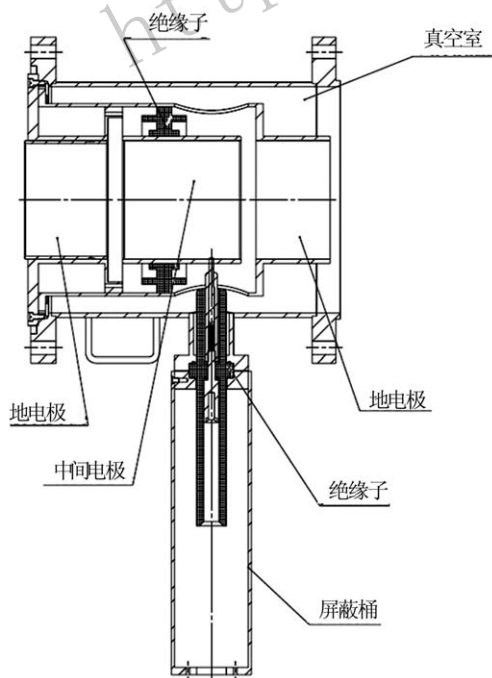


图 2 聚焦透镜

维护更为安全方便。调试结构表明，该结构性能稳定，极少出现打火现象。

3.2 永磁型速度选择器

速度选择器需要产生一定范围的均匀正交电磁场。磁场一般利用电磁产生，为了获得一定的分辨率和传输效率，往往体积较大。为节省空间和使用方便，磁场使用永磁体产生。其基本结构见图 3。磁场由 5 组永磁体组成，每组由 4 块 $20\text{ mm} \times 20\text{ mm} \times 40\text{ mm}$ 的方形钕铁硼永磁体组成。永磁体的磁场不能根据束流能量进行调节，在出口和入口处磁场的弥散将会使低能离子发生偏转，从而影响分辨率。速度选择器的前后分别加上磁屏蔽抑制磁场在束流方向的弥散以减少对束流的影响。该结构可整体装在 $\Phi 150\text{ mm}$ 的真空室内，实现了设备的小型化。

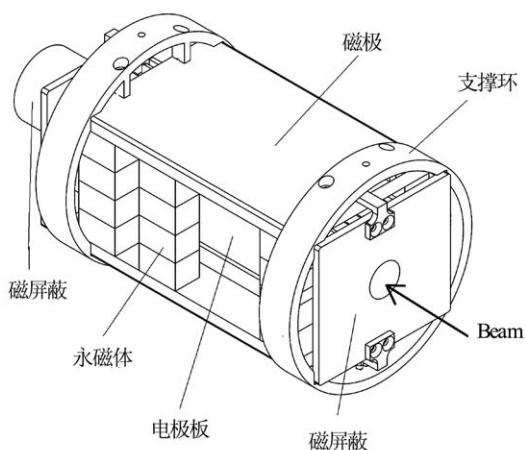


图 3 速度选择器

3.3 扫描器

一般来说，离子束横截面的束流密度分布是不均匀的，在注入样品之前，必须对离子束进行扫描。扫描方

式可采用静电扫描、机械扫描等方式。机械扫描通常用于强流注入机, 需要靶室具有相应的旋转系统, 机械结构较为复杂。本装置采用 X 和 Y 静电扫描的方式对束流进行扫描。扫描器采用平板电极结构, 极面间距 45 mm。扫描电压由一个信号发生器与两个高压放大器组合提供。信号发生器产生两路幅值和频率各自调节的三角波信号, 幅值在 ±5 V 之间。放大器将信号放大 500 倍, 即可输出两路幅值在 ±2 500 V 的三角波扫描电压。这种结构的扫描电源具有便于调节扫描频率的特点, 同时可以通过设置极板偏压对靶上束斑位置进行微调。

4 质子束注入装置的调试结果

4.1 质子的纯度

靶上质子的纯度主要由速度选择器的分辨能力决定。改变速度选择器电极板间电压可以控制通过速度选择器的离子种类, 图 4 给出了通过速度选择器所测得的质谱(质子能量 50 keV)。可以看出, H_1^+ 束流峰和 H_2^+ 束流峰之间具有明显的 0 值, 这表明靶上不存在 H_1^+ 和 H_2^+ 同时存在的情况, 即 H_1^+ 和 H_2^+ 已完全被分辨开, 保证了靶上质子的纯度。

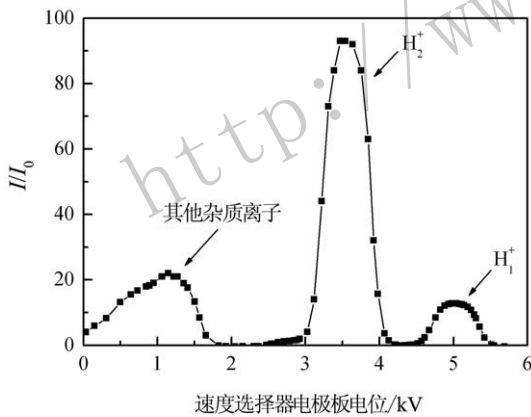


图 4 (在线彩图) 装置质谱图

4.2 靶上束流的均匀性测量

为了测量靶上束斑的均匀性, 在靶上有效扫描范围内任意选择了 3 个测量点, 点间距 100 mm, 每个点分别放置一个法拉第桶。通过束流积分仪测量每个点的注量率, 通过比较确定有效扫描面积内的均匀性。在扫描频率为 $F_X = 1531.1 \text{ Hz}$, $F_Y = 5.1233 \text{ Hz}$ 时, 分别测量 50, 15 和 1 keV 下靶上 3 个测量点的质子, 见图 5。可以看出, 测量得到的靶上有效扫描面积内的均匀度分别是 94%, 93%, 93%, 好于设计指标。

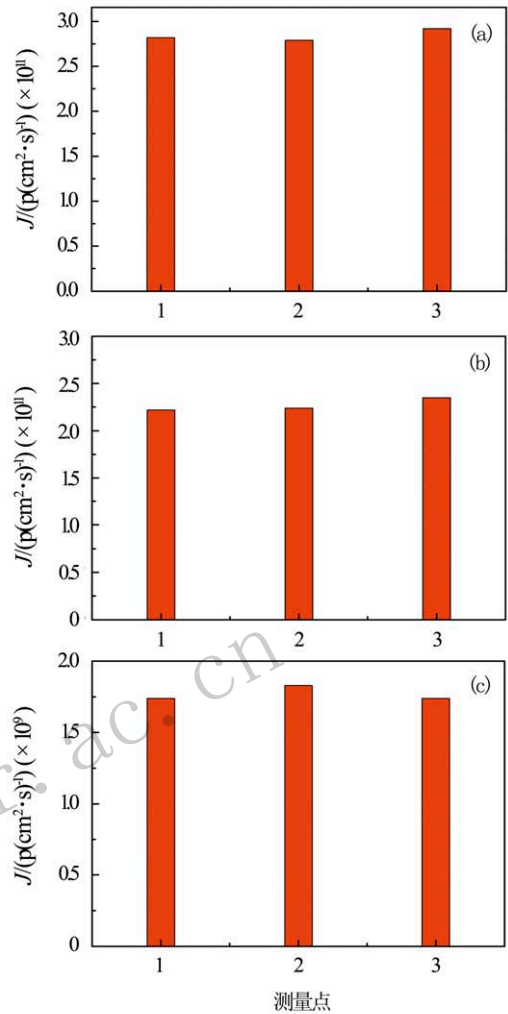


图 5 (在线彩图) 50 keV (a), 15 keV (b), 1 keV (c) 时, 靶上三个位置质子注量率的比较

4.3 质子束注入装置与靶室联机

质子束注入装置是根据物理用户的具体要求设计的, 经过调试, 注入装置的各项技术指标达到了预定的设计指标, 满足了物理用户的要求。该装置安装在中国科学院空间技术中心, 图 6 是装置与靶室联机的照片。

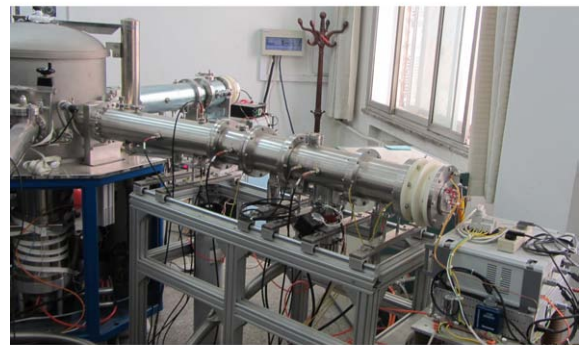


图 6 (在线彩图) 1~50 keV 质子束装置与靶室联机

5 结论

本工作研制了一台低能质子束装置, 无需机械调节即可实现对束流能量、注入面积和注量率等进行大范围调节。在有效的注入面积内, 均匀度可好于 90%。该装置采用小型紧凑化设计, 具有建造成本低, 运行维护简单的特点。该质子束装置所采用的技术和方法可为低能离子束装置的设计提供参考。

致谢 感谢中国科学院空间技术中心的蔡明辉和李宏伟老师对调试过程中提供的帮助和支持。

参考文献:

- [1] YE Zonghai. *Physics*, 2004, **33**(1): 40. (in Chinese)
(叶宗海. *物理*, 2004, **33**(1): 40.)
- [2] GUAN Anmin, LI Jun, SHI HuaJun, *et al.* *Microfabrication Technology*, 1993, **3**: 12. (in Chinese)
(关安民, 李钧, 石华君, 等. *微细加工技术*, 1993, **3**: 12.)
- [3] XU Daolin. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 1984, **5**(1): 108. (in Chinese)
(徐道林. *仪器仪表学报*, 1984, **5**(1): 108.)
- [4] YAN Hengdi. *Microfabrication Technology*, 1993, **3**: 1. (in Chinese)
(颜亨迪. *微细加工技术*, 1993, **3**: 1.)
- [5] PENG Yougui, YE Mingsheng, JIANG Changzhong. *Experimental technology and management*, 1992, **9**(3): 30. (in Chinese)
(彭友贵, 叶明生, 蒋昌忠. *实验技术与管理*, 1992, **9**(3): 30.)
- [6] SIGGEL-KING M R F, WELSCH C P, *et al.* *Proceeding of IPAC*, 2011, 2169.
- [7] CHEN L H, CUI B Q, Ma R G, *et al.* *Rev. Sci. Instrum.* 2014, **85**: 02c308.
- [8] WU Meng, ZHANG Huixing, MA Mingxiu, *et al.* *Science and Technology of Ion Implanter*, Beijing: Beijing Publishing House, 1980: 250. (in Chinese)
(吴猛, 张荟星, 马明修, 等. *离子注入机基础*, 北京: 北京出版社, 1980: 250.)

A 1~50 keV Low-Energy Proton Implanter

CHEN Lihua, CUI Baoqun, MA Yingjun, MA Ruigang, TANG Bing, HUANG Qinghua

(*China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China*)

Abstract: The particles in the space environment are an important factor for the abnormality of spacecraft. So, it's necessary to study on the effect of low-energy particles to spacecraft. In view of this, a 1~50 keV low-energy proton implanter has been developed in China Institute of Atomic Energy. The implanter has the characteristics of its injection area, flux density and energy that could be adjusted in a wide range according to the requirement, almost no need mechanical change. The uniformity of the injected proton in available area is better than 90%. And the implanter has the advantages of compact structure and low cost. In this paper, the principle of implanter and the design of its main transport elements, such as lens, Wien filter and scanner, have been described. The experimental results show that the performance of the implanter meets to the demand of study. And the implanter runs steadily and reliably.

Key words: space environment; proton beam; uniformity; low-energy particle