

2.45 GHz 强流脉冲质子源*

武 启, 张子民, 马鸿义, 张文慧, 杨 尧, 赵红卫

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

摘 要: 介绍了一台用于强流质子直线加速器注入的 2.45 GHz 电子回旋共振强流脉冲质子源。采用 2.45 GHz 的微波馈入实现以氢气为载气的氢等离子体,在三电极引出系统下获得能量 50 keV, 50 mA 的强流脉冲离子束。其中三电极分别为等离子体电极、抑制电极及地电极。用 CST 仿真软件和 PBGUNS 分别模拟计算了匹配波导能量的传输效率与引出束流传输轨迹,得出信号输入端口反射系数 S_{11} 约为 0.119,整个匹配波导内正向传输系数 S_{21} 为 0.993,引出束流在 $Z=26$ cm 处,束流包络约为 2 cm。研究了离子源轴向磁场变化对引出束流强度的影响,结果得出,当螺线管电流从 0 A 增加至 50 A 时,引出混合束流强度从 20 mA 上升至 50 mA。

关键词: 氢等离子体;引出系统;强流脉冲束;离子源

中图分类号: TL503.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9289(2013)03-0091-06

2.45 GHz Intense Pulsed Proton Source

WU Qi, ZHANG Zi-ming, MA Hong-yi, ZHANG Wen-hui, YANG Yao, ZHAO Hong-wei
(Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Science, Lanzhou 730000)

Abstract: A 2.45 GHz high current pulsed proton source for proton linear accelerator injector was introduced. Hydrogen plasma was obtained using a microwave feeding at the frequency of 2.45 GHz. A 50 keV, 50 mA pulsed beam was extracted by a 3-electrode system consisting of the plasma electrode, suppression electrode and grounded electrode. The characteristics of extracted beam and impedance matching of the transitional waveguide were studied by by CST and PBGUNS codes. The effect of the axial magnetic field distribution on extraction beam was studied by 2D-Poisson code. The transmission and reflection coefficients were 0.993 and 0.119, respectively, when the frequency varied from 1.8 to 3.2 GHz. The results show that the total ion current reaches from 0 to 50 A, and the current of the extraction beam reaches from 20 to 50 mA.

Key words: hydrogen plasma; extraction system; intense pulsed ion beam; ion source

0 引 言

电子回旋共振(ECR)可以在波导中以横电波方式传播,能实现无内电极放电,其能量转换效率高(95%以上的微波能量可转化为等离子体能量),等离子体由于具有密度高等优点,被很好应用于离子源技术^[1-4]。2.45 GHz 微波放电能产生局部热平衡态低温等离子体,并能稳定提供种类繁多的活性粒子,被广泛应用于薄膜沉积、离子注入、刻蚀、消毒及有害废弃物处理^[5]。材料表面处理主要是利用活性粒子对材料表面吸附的几个单

原子或分子层进行反应,改变材料几个单层的物理或化学状态。目前,离子源作为直线加速器的重要部件之一,其主要性能直接影响整个加速器的束流指标。为了满足强流质子直线加速器的需求,高能量、高流强的 2.45 GHz ECR 质子源成为直线加速器的首选之一^[6]。但是 ECR 放电需要磁场,结构相对复杂,对等离子体放电控制技术难度较高,而且磁场是微波 ECR 等离子体产生的基本物理因素之一,离子源的磁场场型不仅直接影响微波耦合及等离子体产生,且影响引出束

收稿日期: 2013-01-07; **修回日期:** 2013-04-26; **基金项目:** * 国家自然科学基金(10921504); 强流质子源基金委项目(91126004)
作者简介: 武启(1983-),男(汉),山西朔州人,助理工程师,硕士; **研究方向:** 2.45 GHz ECR 离子源及低能传输线

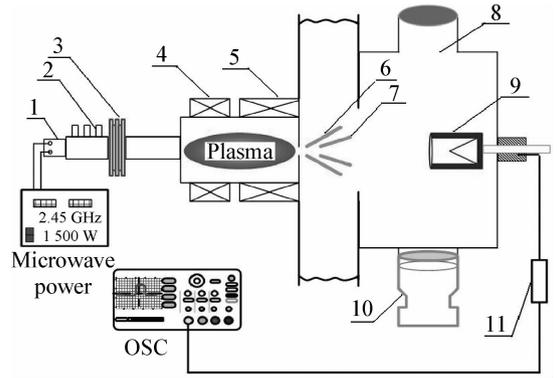
网络出版日期: 2013-05-17 10:36; **网络出版地址:** <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20130517.1036.007.html>
引文格式: 武启,张子民,马鸿义,等. 2.45 GHz 强流脉冲质子源[J]. 中国表面工程, 2013, 26(3): 91-96.

流强度大小。因此,场型设计是研制离子源首要考虑因素。然而在国际上 2.45 GHz ECR 源磁场形状各有特色,均不相同。国际上研制成功的代表的是法国 Saclay 实验室设计的全永磁 D+ 离子源^[7],永磁源是用三个外径较大(115 mm)的永磁环激励通过调节磁环间距改变磁场形状。美国 Los Alamo 国家实验室研制的 2.45 GHz 离子源由两个线圈产生磁场^[8]。法国离子源永磁环较大,由于产生的磁力较大引起装配困难。美国 Los Alamo 实验室研制的线圈源需要大功率电源,不仅提高了离子源制造成本,而且增加了离子源体积。介于以上原因,采用永磁与线圈相结合的方式产生磁场,可以精确调节磁场强度,还减小研制成本并使注入器结构更加紧凑。

文中研制了一套 2.45 GHz 强流脉冲质子源,采用三电极系统引出 50 keV, 50 mA 的强流脉冲束,用 CST 仿真软件和 PBGUNS 分别研究了过渡波导阻抗匹配和束流的引出特性;用 2D-Poisson 软件计算并分析了放电室内 ECR 面分布状况,且研究了轴向磁场的变化对引出束流强度的影响。

1 试验装置

2.45 GHz ECR 质子源结构的示意图和源体照片如图 1 和图 2 所示。该实验装置主要由四部分组成:微波馈入系统、质子源、三电极引出系统及诊断系统。微波馈入系统包括脉冲微波电源(脉宽 0.2~1.5 ms,重复频率 40~120 Hz 可调)、2M167B-M11 型磁控管(输出功率 900 W,频率 2.45 GHz)、矩形激励器、环行器、电动三销钉调谐器、高压隔离器(DC Break)、矩形波导(BJ-26-BJ-32)、双脊型匹配波导和微波窗。质子源为永磁与螺线管相结合的方式来激励磁场,目的是精确调节磁场,使微波耦合达到最佳效率,提高等离子体密度。三电极引出系统包括不锈钢等离子体电极、抑制电极、地电极、Spellman 高压电源(70 kV、86 mA)和抑制电极电源。诊断系统由真空室和法拉第筒组成。束流信号通过法拉第筒引出,用示波器监测电压信号,这样就可以估算出束流强度。微波通过微波窗进入弧腔,自由电子在轴向磁场作用下被加热,与氢气分子不断碰撞,产生等离子体。经三电极系统引出 50 keV 的脉冲束。



1- Magnetron; 2- Tuners; 3- DC-break; 4,5- Solenoid coils; 6- Suppression electrode; 7- Grounded electrode; 8- Diagnostic chamber; 9- Faraday cup; 10- Molecular pump; 11- Measuring resistance

图 1 源体结构示意图

Fig. 1 Schematic of the ECR ion source

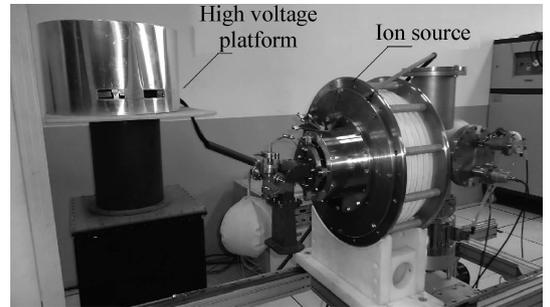


图 2 源体照片

Fig. 2 Image of the ECR ion source

2 结果与分析

2.1 匹配波导计算

2.45 GHz ECR 离子源实验装置采用形过渡波导主要起着两方面的作用:一是使矩形传输波导和结构相对较小的放电室进行连接,实现阻抗匹配;二是提高电场场度密度,增加电子回旋共振。文中设计的匹配波导为三阶脊型波导,其中宽边为 a ,窄边为 b ,脊宽为 s ,两脊之间的距离为 d ;这里 b 为 34.04 mm, s 为定值 10 mm,三段脊长 148 mm,宽边 a 为变化值。图 3 给出了匹配波导从 BJ-32 端口到输出端口的各段的相对特性阻抗值大小,阻抗值用 Z_x 表示,这里 $X=1,2,3$,

$$Z_x = \frac{Z_{PV}}{\sqrt{(1-122.45/\lambda c)^2}} \quad (1)$$

算出 Z_1, Z_2, Z_3 分别为: 580、337 和 204 Ω 。在匹配情况下可以估算出负载阻抗值约为 219 Ω , 这对研究微波和等离子体耦合提供很好的参考数据。当 a, b, s, d 已知时, 无限频率处的功率电压阻抗 $Z_{PV}(\infty)$ 匹配波导的特性阻抗由下式计算:

$$Z_{PV}(\infty) = \left[\frac{120\pi^2 d}{\lambda_c} \cos^2 \theta_2 \operatorname{Incosec} \left(\frac{\pi d}{2b} \right) + \frac{\theta_2}{2} + \frac{\sin 2\theta_2}{4} + \frac{d}{b} \left(\frac{\cos \theta_2}{\sin \theta_1} \right)^2 \left(\frac{\theta_1}{2} - \frac{\sin 2\theta_1}{4} \right) \right]^{-1} \quad (2)$$

$$\lambda_c = 2(a - s) \left[1 + \frac{4}{\pi} \left(1 + 0.2 \sqrt{\frac{b}{a - s}} \right) \left(\frac{b}{a - s} \right) + \operatorname{Incosec} \left(\frac{\pi d}{2b} \right) + \left(2.45 + 0.2 \frac{s}{a} \right) \left(\frac{sb}{d(a - s)} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

式中, $\theta_1 = \pi \frac{a - s}{\lambda_c}$, $\theta_2 = \pi \frac{s}{\lambda_c}$

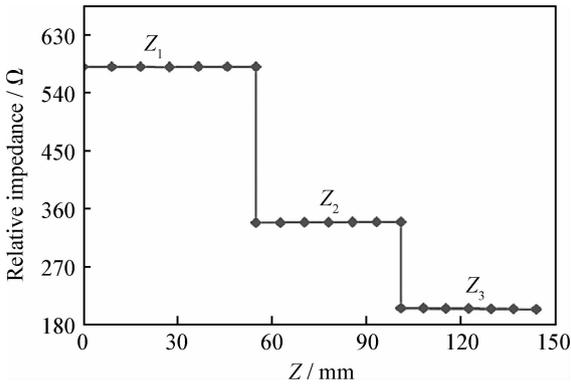


图 3 匹配波导分段的相对特性阻抗值
Fig. 3 Relative impedance of matching waveguide

用 CST MICROWAVE STUDIO 仿真软件对匹配波导内能量的传输进行模拟计算, 结果如图 4 所示。在 2.45 GHz 处, 信号输入端口反射系数 S_{11} 约为 0.119, 整个匹配波导内正向传输系数 S_{21} 为 0.993, 可以看出矩形匹配波导具有较小的反射系数和较高的正向传输系数, 波导内能量传输效率很好, 这更有利于微波的传输。

2.2 磁场结构设计

一般来说, 离子源磁场的激励方式有两种, 即采用双螺线管与全永磁。美国 Los Alamo 国家实验室研制的 2.45 GHz 质子源由两个线圈产生磁场^[9], 而北京大学重离子研究所采用全永磁激

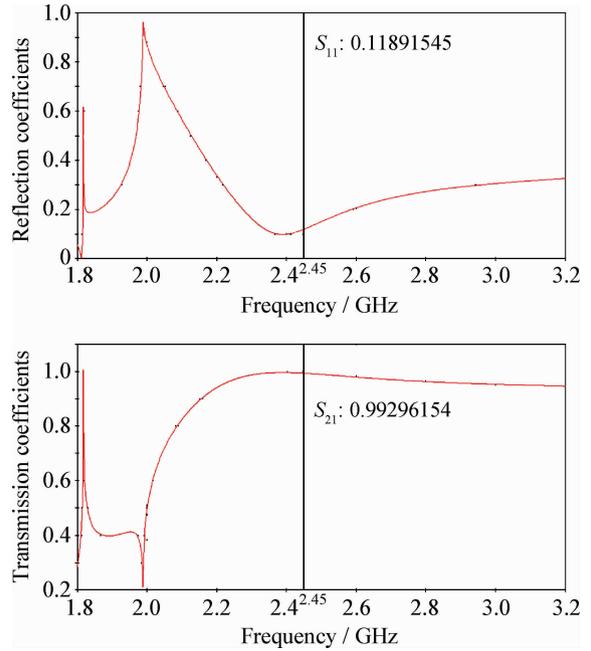


图 4 在 1.8~3.2 GHz 间 TE_{10} 模反射系数 S_{11} 和传输系数 S_{21} 分布图
Fig. 4 Plot of reflection and transmission coefficients vs the frequency varied from 1.8 to 3.2 GHz

励磁场, 源体结构简单且体积小^[10]。对于离子源场型的设计, 不同的实验室采用不同的场型, 大部分场型的设计为注入端与引出端各形成 ECR 面, 这样可以提高等离子体密度。为了避免高压打火, 高压区内杂散磁场强度要弱, 一般为几十高斯。文中质子源的激励磁场主要由 N53 型号 NdFeB 永磁产生, 弧腔引出端与注入端分别装有螺线管, 这样可以精确调节离子源轴向磁场, 使微波和等离子体耦合效率更佳。优化后的离子源轴向磁场实测结果分布如图 5 所示。从图中可以看出, 在微波注入面与引出面各形成 ECR(875 G), 引出端轴向磁场约为 850 G, 在 Z 为 -2cm 到 -6 cm 之间, 磁场强度几乎线性减小, 从 850 G 降至 200 G, 放电室尺寸约为 $\Phi 62 \text{ mm} \times 70 \text{ mm}$ 。为了更好的研究微波和等离子体之间耦合, 提高等离子体密度, 使用二维 Poisson 软件计算出整个离子源内放电室磁场分布, 然后分析 ECR 面分布状况, 结果如图 6 所示。其中在靠近 $Z = -1 \text{ cm}$ 处为等离子体电极引出孔位置, 在 5 cm 处为注入端位置。由图 6 可知, 整个放电室内 ECR 面较多, 这样更利于氢气放电, 进而提高等离子体密度。虽然理论上讲, 在 2.45 GHz ECR 离子源中, $B = B_{ECR}$, $B > B_{ECR}$, $B < B_{ECR}$ 三种不同强度的

磁场均可以产生等离子体^[11]。但是设计人员更倾向于在放电室内出现较多的 875 G, 由于电子在磁场中发生共振条件为电子回旋运动频率 ω_{ce} 等于馈入微波的频率 ω_{rf} , 即:

$$\omega_{ce} = eB/m_e \quad (4)$$

$$\omega_{rf} = f/2\pi \quad (5)$$

其中 B 为磁场强度, e 与 m 分别为电子的电荷与质量, f 为微波的频率。

根据公式(4)与(5)可得 $B=f/2.8$ (kG/GHz)。所以对于 2.45 GHz ECR 放电来说, 回旋共振所需磁场为 875 G。

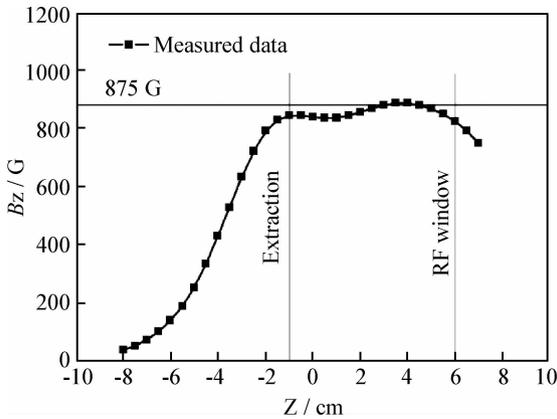


图5 ECR 质子源轴向磁场分布图

Fig. 5 Axial magnetic field distribution in the plasma chamber

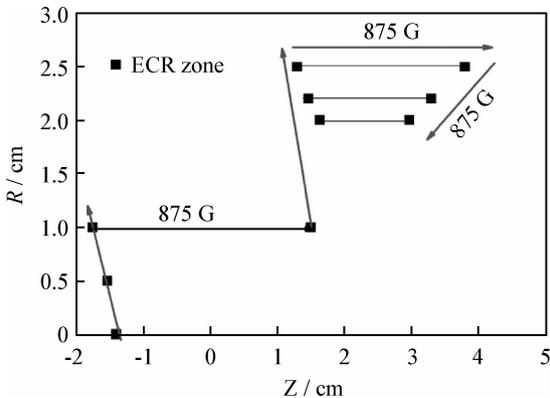


图6 放电室内 ECR 面分布

Fig. 6 ECR zone profiles in the discharge chamber

2.3 三电极引出系统

离子源放电室内离子经高压引出, 在引出电极形成的电场作用下加速聚焦进入传输段, 因此掌握束流在引出系统下的传输情况, 对于改善束

流品质有着明确的指导意义。目前, 国际上常用的引出束流的模拟软件有 PBGUNS、IGun、Simion、Lorentz-3D^[12-13]等。PBGUNS 软件对束流的传输进行模拟, 可以研究不同电极结构下的电场分布对束流的会聚作用, 获得束流传输中任一位置的发射度相图、束斑大小。因此, 我们使用 PBGUNS 模拟软件对引出束流的传输进行模拟, 来设计束流品质较好的电极结构。

图 7 给出了在引出束流为 50 keV, 67 mA 条件下, 用 PBGUNS 模拟计算的引出束流传输轨迹及电场线分布图。设置模拟参数如下: 空间电荷中和率 90%, 束流中离子比例为 85% 的 H^+ , H^{2+} 占 10%, H^{3+} 占 5%, 引出高压 50 kV, 加速间隙 13 mm, 减速间隙 4 mm, 发射孔径 Φ 6 mm, 孔厚度 2 mm, 抑制电极口径 Φ 8 mm, 抑制电压 -3 kV, 等离子体电极倾角为 42° , 引出区轴向磁场分布。模拟结果发现, 束流引出后, 受到加速区电场力的聚焦作用, 迅速在抑制电极孔前会聚, 经抑制电极后由于空间电荷作用很快发散进入漂移空间。漂移段 $Z = 26$ cm 处, 形成束流包络约 2 cm, 束流半张角 2.87° , 发射度 4.14×10^{-2} 。

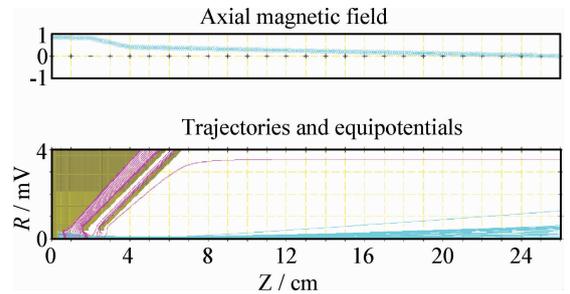


图7 引出束流传输示意图

Fig. 7 PBGUNS simulation of the beam extraction

当等离子体电极倾角设置为 84° 引出混合束流 70 mA, 图 8 给出了等离子体电极发射面分布。模拟发现引出孔附近等离子体发射面向外凸出, 在引出孔 $0 < R < 3$ mm 处, 电力线与 Z 轴平行, 在 $R > 3$ mm 时, 电力线与 Z 轴形成一定角度, 对束流聚焦作用较小, 这说明在束流边缘杂散离子难于聚焦, 主要是磁刚度较大的 H^{2+} , H^{3+} 。

2.4 脉冲束流测量

图 9 为引出束流信号的波形图。其中通道 1 为磁控管激发的电流信号; 通道 2 为脉冲电源的触发信号, 重复频率 50 Hz, 脉宽 0.5 ms, 占空比

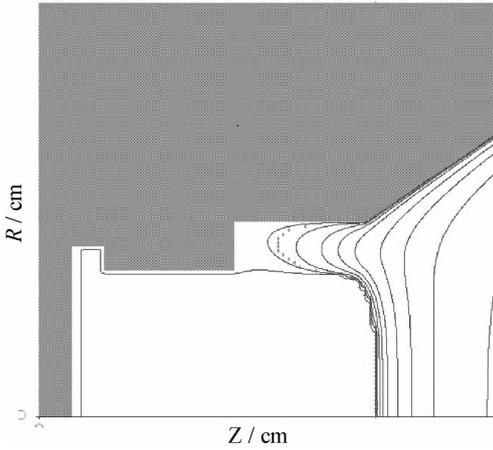


图 8 引出电极电场线分布

Fig. 8 Electric potential distribution of the extraction electrodes

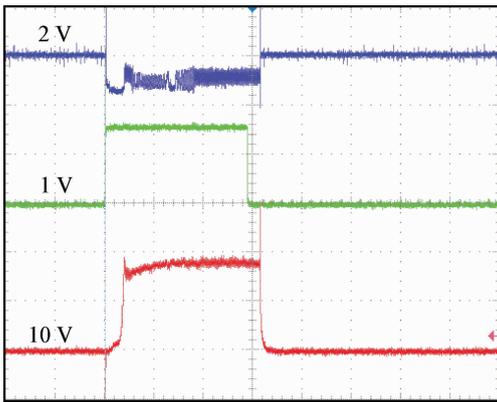
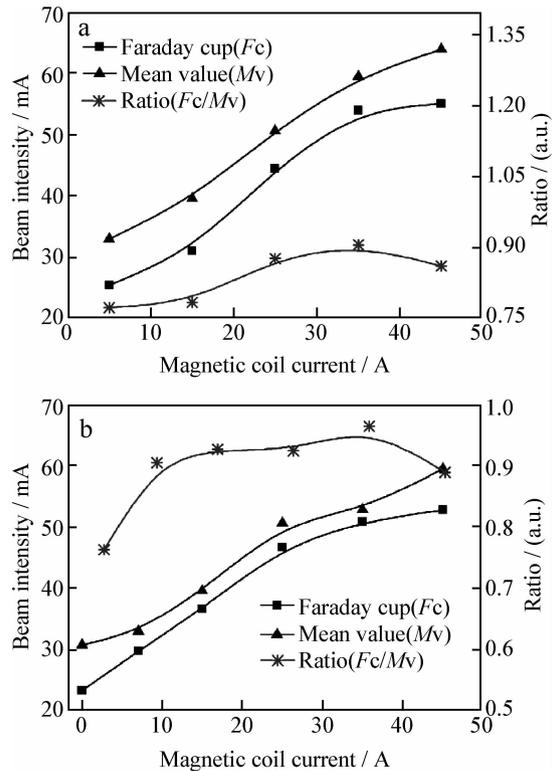


图 9 脉冲束流信号

Fig. 9 Pulsed beam waveforms recorded by Tektronix oscilloscope

2.5%, 上升沿与下降沿都为 $2 \mu\text{s}$; 通道 3 为法拉第筒测量的脉冲束流信号波形。试验条件如下: 脉冲电源功率 $4.3 \text{ kV} \times 10 \text{ mA}$, 引出高压 50 kV , 抑制电压 -1.6 kV , 进气 $8 \times 10^{-4} \text{ Pa}$, 采用三电极引出结构, 即等离子体电极、抑制电极和地电极。其材料均为无磁不锈钢。从图中可以看出, 在上升沿起始段磁控管没有起振, 导致监测的脉冲信号脉宽变窄。这主要是由于微波功率较小, 放电室内工作气体电离不充分引起。关于此现象, 北京大学物理学院的张萌^[14]认为当通过微波窗馈入微波功率比较低时, 放电室内功率密度小, 电子不能获得足够能量引起 ECR 放电, 放电会被延迟, 束流波形起始端有约 $200 \mu\text{s}$ 的延迟。由于文中设计的离子源场型为永磁与螺线管相结合激励模式, 因此研究了螺线管电流变化对引出束流的

影响, 即轴向磁场的变化对引出束流的影响。试验结果如图 10 所示。图中三角符号曲线表示平均引出束流强度, 方块曲线表示法拉第筒测量值, 红色曲线表示比值。图 10(a)(b) 分别为注入端和引出端线包电流值。可以看出, 不论是增加注入端磁场强度或是引出端磁场强度, 引出流强都会增大, 这说明轴向磁场大小不仅影响等离子体密度, 而且影响着引出区束流的大小及聚焦效果。



(a) Injector solenoid current (b) Extraction current

图 10 引出束流强度随轴向磁场的变化曲线

Fig. 10 Plots of extraction beam current vs magnetic coil current

3 结 论

研制了一套用于质子直线加速器注入的强流脉冲质子源, 初步调试可引出 50 keV , 50 mA 的脉冲混合束。分析了离子源放电室内 ECR 面分布状况, 发现在微波注入端和束流引出口都存在面积较大的 ECR 共振面, 使等离子体更容易吸收微波, 从而增加等离子体密度, 可以引出 50 mA 的离子束流。研究引出电极结构尺寸及形状, 得出加速间隙 13 mm , 减速间隙 4 mm , 发射孔径 $\Phi 6 \text{ mm}$, 孔厚度 2 mm , 抑制电极口径 $\Phi 8 \text{ mm}$, 抑制电压 -3 kV , 等离子体电极倾角为 42° 。

参考文献

- [1] Wei J, Bai Y J, Chen H B, et al. The compact pulsed hadron source construction status [C]. The 1st International Particle Accelerator Conference, MOPEC071, 2010; 663.
- [2] Feng Z, Guan X L, Wei J, et al. Design and fabrication status of proton source and LEBT for CPHS [J/OL]. Nuclear Instrument and Methods in Physics Research A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2012, [2010-12-15]. <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2010.12.026>.
- [3] Roychowdhury P, Chakravarthy D P. High intensity electron cyclotron resonance proton source for low energy high intensity proton accelerator [J]. Review of Science Instruments, 2009, 80(12): 123305-8.
- [4] Taylor T. High-current DC microwave ion sources [J]. Review of Scientific Instruments, 1992, 63(4): 2507-12.
- [5] Uhm H S, Hong Y C, Shin D H. A microwave plasma torch and its applications [J]. Plasma Sources Science and Technology, 2006, 15(2): 26-29.
- [6] Gammino S, Celona L, Ciavola G, et al. Review on high current 2.45 GHz electron cyclotron resonance sources [J]. Review of Scientific Instruments, 2010, 81(2): 313-318.
- [7] Gobin R, Charrau G, Delferrière O, et al. Development of a permanent magnet light ion source at CEA/Saclay [J]. Review of Scientific Instruments, 2006, 77(3): 502-504.
- [8] Joseph S, Andrew A, Lash H, et al. Status report on a DC 130 mA, 75 keV proton injector [J]. Review of Scientific Instruments, 1998, 69(2): 1003-8.
- [9] Joseph S, Terry L F, Lash H, et al. A 75 keV, 140 mA proton injector [J]. Review of Scientific Instruments, 2002, 73(2): 917-921.
- [10] Song Z Z, Peng S X, Yu J X, et al. Minipermanent magnet high-current microwave ion source [J]. Review of Scientific Instruments, 2006, 77(3): 305-307.
- [11] Geller R. Electron cyclotron resonance ion sources and ECR plasmas [J]. Institute of Physics Publishing, 1996, 39(6): 332-335.
- [12] Becker R, Hermannsfeldt H. IGUN-A program for the simulation of positive ion extraction including magnetic fields [J]. Review of Scientific Instruments, 1992, 63(4): 2756-8.
- [13] Dahl D A, Delmore J E, Appelans A D, et al. SIMION PC/PS2 electrostatic lens design program [J]. Review of Scientific Instruments, 1990, 61(1): 607-609.
- [14] 张萌. 强流 ECR 离子源与低能传输系统的研究 [D]. 北京: 北京大学, 2010.

作者地址: 甘肃省兰州市南昌路 509 号 730000
中国科学院近代物理研究所
Tel: (0931) 4969 543
E-mail: wuq@impcas.ac.cn

• 本刊理事单位介绍 •

潍柴动力(潍坊)再制造有限公司

潍柴动力(潍坊)再制造有限公司(简称“再制造公司”)是潍柴动力股份有限公司的全资子公司,从事发动机及其零部件的再制造业务。公司紧紧依托潍柴动力由 36 个服务中心和 2700 家维修站组成的完善的营销服务网络回收旧机和销售再制造发动机并提供三包服务。

2008 年 3 月 21 日,我国汽车零部件再制造试点工作正式启动,国家发改委确定了 14 家企业开展汽车零部件再制造的试点工作。潍柴动力作为 14 家再制造试点企业之一,于 2008 年 3 月成立了再制造有限公司。再制造有限公司从 2008 年 4 月启动运行,2009 年 1 月起开始再制造发动机的批量生产,同年通过质量管理(GB/T19001-2008)、环境管理(GB/T24001-2004)和职业健康安全管理体系(GB/T28001-2001)三体系认证。

再制造公司主要对七大类机型和产品进行再制造:①作为主营业务的正常再制造发动机;②市场上的“三包机”;③主机厂改制机型,主要是主机厂积压的机器,潍柴通过再制造,既盘活了主机厂资产,同时也为主机厂提供了服务;④潍柴过去的一些积压库存产品,可以通过再制造实现重新销售;⑤维修站的教学机,这可以使一些旧零件得到重新利用;⑥展机;⑦零部件的再制造业务。