

文章编号: 1007-4627(2015)S1-0010-05

直接等离子体注入模式下激光离子源与RFQ匹配的模拟研究

金钱玉^{1,2}, 赵环昱¹, 张俊杰¹, 沙杉¹, 张周礼¹, 李章民^{1,2},
刘伟^{1,2}, 张雪珍¹, 孙良亭¹, 赵红卫¹

(1. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 基于直接等离子体注入 (Direct Plasma Injection Scheme, DPIS) 的方法, 设计并建造了一台低能段离子加速装置; 目前实验上利用该方法成功地加速了峰值流强为 11.28 mA, 能量为 593 keV/u 的 C⁶⁺ 脉冲束流。考虑到激光离子源产生的束流为脉冲束, 且具有能散大, 强度高特点, 给低能传输线 (LEBT) 的设计带来很大的困难, 而 DPIS 方法则简单易行, 可有效地提高注入效率; 因此该装置将激光离子源与 RFQ 直接连接在一起, 将离子源产生的等离子体直接注入到 RFQ, 并没有采用传统的 LEBT。并采用 IGUN 程序对该注入方法进行了模拟, 计算确定了离子源引出的强流脉冲束的参数以及注入效率, 模拟的结果与实验的测量值一致。

关键词: 激光离子源; RFQ; 直接等离子体注入; 引出模拟

中图分类号: TL503.3; TL53 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.32.S1.10

1 引言

激光离子源已经有几十年的研究历史, 它的一个主要特点就是可以提供百毫安、微秒量级的强流脉冲束。激光离子源的结构简单, 可以产生所有固体元素的强流脉冲束, 尤其是难熔重金属元素。由激光离子源产生的束流是一个束流强度随时间变化的脉冲束, 包含了多种电荷态的粒子, 能散大。在以前的设计中, 离子源和加速器之间通常有一段低能传输线 (LEBT), 包含引出系统和一系列的聚焦元件, 用来抑制空间电荷的影响; 但是考虑到离子源束流上述复杂的特点, LEBT 的设计比较困难, 并且传输效率并不高^[1-2]。为了避免 LEBT 带来的这些难题, 在 2000 年, Okamura 等^[3-5]提出了等离子体注入 (Direct Plasma Injection Scheme, DPIS) 的方案, 并验证了其可行性。在该方案中, 激光产生的等离子体以电中性的状态扩散, 直到进入 RFQ, 离子被引出, 随后被注入到 RFQ 后被俘获。由于在进入 RFQ 之前, 粒子以电中性的等离子体状态存在, 因此可以有效地减少空间电荷效应带来的束流损失; 同时由于没有采用 LEBT, 直接把离子源与 RFQ 连接起来, 使得整个装置更加紧凑。

基于我们目前实验上从离子源部分可以引出的束流强度分布, 为了深入地了解 DPIS 的注入机制, 采用 IGUN 程序^[6]对离子源引出的随时间变化的脉冲束进行模拟。

2 直接等离子体注入装置

2.1 激光离子源简介

图 1 所示为激光离子源示意图。激光离子源的结构相比较于其它类型的离子源, 要简单得多, 没有磁铁、微波、水冷等设备。目前的实验平台主要由 4 部分组成: 激光系统、靶室、等离子体漂移管道、及后续的诊断设备。为了产生高密度的激光等离子体, 采用了一台基于调 Q 的 Nd:YAG 激光, 激光波长 1064 nm, 脉宽 8~10 ns。激光经过几个反射镜的反射后, 进入靶室, 在靶前被一个焦距 100 mm 的透镜聚焦到靶面, 入射角度 45°, 到达靶面处的激光能量大约 2 J, 靶面聚焦后的激光功率密度估算值约为 10¹² W/cm²。激光产生的等离子体在一个 20° ~ 30° 的锥角内, 垂直于靶面方向喷射, 经过漂移管道, 进入诊断设备, 各电荷态粒子的相对束流强度分布可由静电离子分析器 (Electrostatic

收稿日期: 2014-10-20; 修改日期: 2015-03-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11275239, 11221064); 中国科学院百人计划项目(Y214160BR0)

作者简介: 金钱玉(1987-), 男, 山东临沂人, 博士研究生, 从事核技术及其应用研究; E-mail: jinqianyu@impcas.ac.cn

通信作者: 赵环昱, E-mail: zhaohy@impcas.ac.cn.

Ion Analyzer, EIA) 和电子倍增管 (Electron Multiplier Tube, EMT) 测得, 如图 2 所示, 具体的测量方法见参考文献[7-8]。

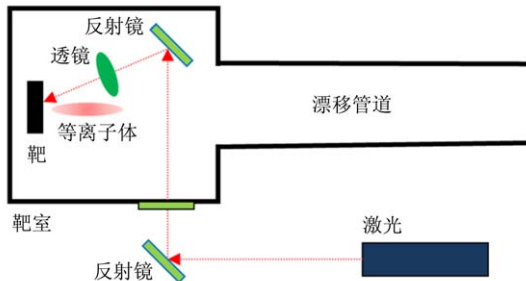


图 1 (在线彩图) 激光离子源示意图

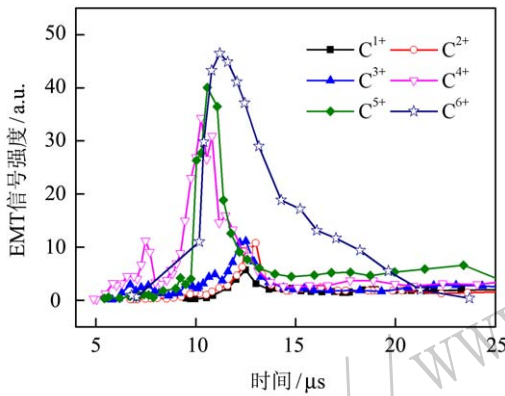


图 2 (在线彩图) 碳束各电荷态离子的相对束流强度分布

2.2 直接等离子体注入

DPIS 的示意图如图 3 所示。在离子源部分, 整个靶室处于 60 kV 的高压端, 靶室内的石墨靶宽 50 mm, 高 100 mm, 厚度 5 mm, 每次打靶后移动 1 mm。靶面处产生的等离子体, 经过靶室前端的一段 77 cm 的漂移管道, 一直到 RFQ 电极的入口处, 随后在此被引出。整个内靶室, 漂移管道和喷嘴是电导通的, 处于 60 kV 高压电位, 对应于 RFQ 加速 C^{6+} 离子的注入能量 30 keV/u。在引出区, 强电场主要集中在喷嘴附近, 离子在此处从等离子体中被引出; 同时在这个区域, 外加高压产生的静电场和微波的射频场都对离子的引出产生作用, 这两部分场对束流传输的影响, 在一些常用的 RFQ 束流动力学设计程序中是无法同时考虑进去的。在这种方案中, 激光产生的离子束以电中性的等离子体状态膨胀扩散, 直到进入 RFQ 的电极被引出、俘获, 因此可以有效地消除强脉冲束流情况下空间电荷效应带来的束流损失; 同时, 采用该方案, 可以使整个装置更加紧凑。

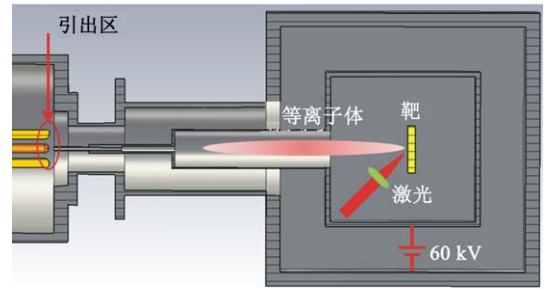


图 3 (在线彩图) 直接等离子体注入示意图

3 激光等离子体引出模拟

引出电极的结构如图 3 中引出区所示, 离子源靶面产生的等离子体在经过 77 cm 的漂移后, 在喷嘴的出口被引出, 随后被注入 RFQ, 喷嘴加高压 60 kV 使 C^{6+} 离子引出后的能量与 RFQ 的注入能量相匹配, RFQ 的电极作为地电极。喷嘴的内径 6 mm, 与 RFQ 电极间的水平距离为 14 mm。

由于粒子在空间中自由漂移, 飞行时间与飞行距离成正比, 因此 EMT 位置处的束流强度的相对分布 (图 2), 结合飞行距离换算到引出区位置的束流相对分布, 再结合测量得到的引出后的总束流, 就可以得到引出区真实的各电荷态束流分布。引出区的总束流和 C^{6+} 分布如图 4 所示。

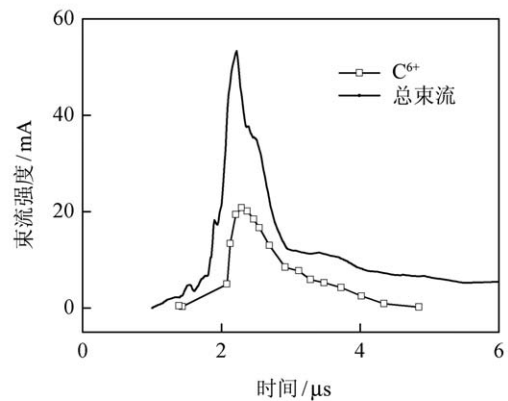


图 4 (在线彩图) 离子源引出的束流分布

如图 4 所示引出后 C^{6+} 束流的分布中, 由于引出的束流为脉冲束, 所以每一个数据点都作为一个单独的束流剖面, 该剖面的束流参数作为输入参数用于 IGUN 模拟^[6]。那么对于图中 C^{6+} 束流来说, 前后共有 18 个剖面的参数可以作为模拟的输入条件。

图 5 和图 6 所示分别为 C^{6+} 束流被引出后的束流轨迹和部分剖面处束流被引出后的发射度椭圆。由于实际引出的总束流只有几十毫安, 在喷嘴边缘场的作用下,

束流是被聚焦注入到 RFQ 电极中去的。激光离子源产生的束流为脉冲束，每一个数据点的剖面当作直流处理，作为模拟的输入条件，则每一个剖面的流强和粒子初始能量都不相同，那么这些剖面的束流被引出后发射度相图就会如图 6 所示各不相同。所有剖面的束流引出后，在进入 RFQ 电极前，都是聚焦的，但是由于经过聚焦的原因，剖面 11 ~ 18 进入 RFQ 电极后是散焦的。 C^{6+} 束流引出后的详细参数见表 1 所列。

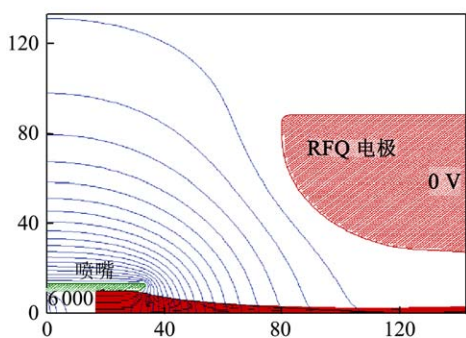


图 5 (在线彩图) C^{6+} 峰值流强时引出后的束流轨迹

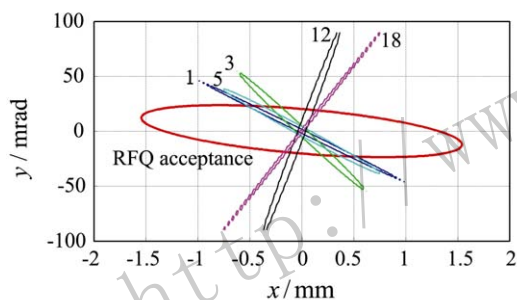


图 6 (在线彩图) 在 RFQ 电极入口，剖面 1, 3, 5, 12, 18 处束流被引出后的发射度相图

表 1 引出后的束流 Twiss 参数和发射度

剖面	α	$\beta/(\text{mm/mrad})$	均方根发射度 $/(\pi \text{ mm}\cdot\text{mrad})$
1	23.572	0.506	1.992
2	22.475	0.426	2.135
3	10.351	0.118	3.302
4	9.559	0.148	3.386
5	8.645	0.171	3.435
6	8.118	0.100	3.715
7	7.030	0.061	3.888
8	6.238	0.045	4.035
9	5.065	0.029	4.169
10	2.438	0.005	4.191
11	-8.326	0.030	4.264
12	-10.329	0.041	4.429

续表 1

剖面	α	$\beta/(\text{mm/mrad})$	均方根发射度 $/(\pi \text{ mm}\cdot\text{mrad})$
13	-12.972	0.059	4.578
14	-16.981	0.093	4.715
15	-21.288	0.130	4.312
16	-28.502	0.203	3.717
17	-38.027	0.300	3.288
18	-45.873	0.384	2.823

在用 IGUN 模拟引出的过程中，每个剖面引出后的发射度椭圆被 RFQ 的接受度包含在内的比例定义为束流的“注入效率”，如图 7 所示。对于剖面 5，即峰值流强附近，引出后的束流发射度椭圆与 RFQ 的接受度匹配较好，这意味着峰值附近的束流大部分都可以被 RFQ 俘获，束流的损失较小。但是对于脉冲前端以及尾端的束流来说，特别是尾端的束流，例如剖面 11 ~ 18，束流的发射度与 RFQ 的接受度匹配较差，被 RFQ 电极俘获的束流就相对较少，大部分的束流将在注入后损失掉。从引出后的束流发射度的变化来看，脉冲峰值附近注入效率高，而两端低，因此上述模拟的结果可以预测，经过 RFQ 的传输、加速后，束流的脉宽与引出时相比会变窄。

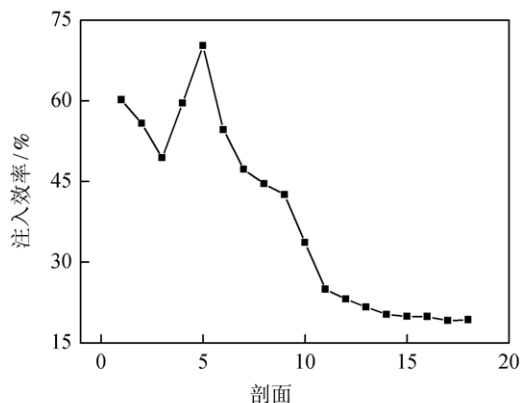


图 7 (在线彩图) C^{6+} 束流引出后的注入效率

4 RFQ加速结果

基于直接等离子体注入方案的考虑，设计并建造了一台用于 C^{6+} 离子加速的 RFQ，注入粒子的设计参数为：均方根发射度 $31.25 \pi \text{ mm}\cdot\text{mrad}$ ， $\alpha = 0.6$ ， $\beta = 0.076 \text{ mm/mrad}$ 。该 RFQ 的束流动力学计算由程序 LINACSRfq 完成^[9]，在上述设计参数下的传输效率为 94.84%，其它主要的设计参数见表 2 所列。

表 2 RFQ的主要设计参数

参数	设计值
离子	$^{12}\text{C}^{6+}$
频率	100 MHz
输入/输出能量	0.36/7.12 MeV
流强	20 mA
极间电压	0.12 MV
电极长度	2.0 m
单元数	100
最小孔径	0.707 cm
调制系数	1~2.1
同步相位	-90~-20

在 RFQ 的出口, 安装了一个 Current Transformer (CT) 用于测量被加速后的束流, 在馈入微波功率 190 kW 时, 测得的加速后束流强度最大, 其平均峰值流强 11.28 mA, 如图 8 所示。从图 8 实验结果可以看到, 和引出后的束流相比, 加速后的束流脉宽变窄了, 实验和模拟的结果是一致的。由于激光离子源引出的束流为束流强度随时间变化的脉冲束, 并含有多种电荷态粒子, 都对束流的传输产生影响, 这些因素在模拟中是无法同时考虑的, 因此模拟值中的加速流强偏大。

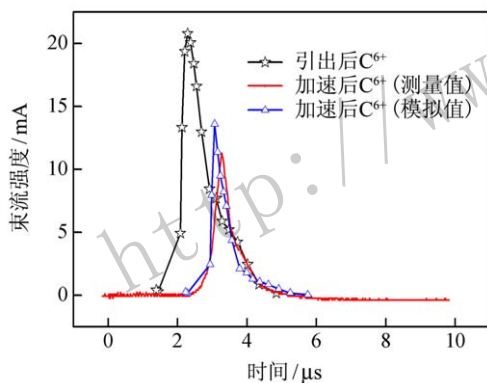


图 8 (在线彩图) 引出和加速后的 C^{6+} 束流强度分布: 微波功率 190 kW

5 总结

从上述模拟和实验的结果可以看出, 在离子源引出的总束流只有几十毫安的情况下, 束流注入到 RFQ 后与接受度匹配相对较好; 并且注入效率随着束流强度的变化而改变。束流在引出后, 在空间电荷的作用下会引起束流发射度的增长。在目前的束流强度下, 受喷嘴边缘场的影响, 束流被聚焦地注入 RFQ。目前的 DPIS 只是初步的研究, 并没有经过优化, 例如靶与引出区之间等离子体漂移距离的大小会直接影响引出的束流强度, 不同的喷嘴孔径以及喷嘴与 RFQ 电极之间的距离等因素, 都会对最终可以加速的束流强度产生直接的影响, 这些方面在下一步的工作中都是需要改进的。

参考文献:

- [1] HASEROTH H, KUGLER H, LANGNEIN K, *et al.* Review of Scientific Instruments, 1998, **69**: 1051.
- [2] FOURNIER P, GREGOIRE G, KUGLER H, *et al.* Review of Scientific Instruments, 2000, **71**: 924.
- [3] OKAMURA M, KATAYAMA T, JAMESON R A, *et al.* Nucl Instr Meth B, 2002, **188**: 216.
- [4] OKAMURA M, TAKEUCHI T, JAMESON R A, *et al.* Review of Scientific Instruments, 2008, **79**: 02B314.
- [5] KASHIWAGIH, OKAMURA M, JAMESON R A, *et al.* Review of Scientific Instruments, 2010, **81**: 02B724.
- [6] BECKER R, JAMESON R A. Nucl Instr Meth A, 2006, **558**: 205.
- [7] WORYNA E, PARYSP, WOLOWSKI J, *et al.* Laser and Particle Beams, 1996, **14**(3): 293.
- [8] JIN Q Y, ZHAO H Y, SHA S, *et al.* Review of Scientific Instruments, 2014, **85**: 033307.
- [9] ZHANG Z L, JAMESON R A, ZHAO H W, *et al.* Nucl Instr Meth A, 2008, **592**(3): 197.

Simulation Study on Matching of Laser Ion Source to RFQ Linac with Direct Plasma Injection Scheme

JIN Qianyu^{1,2}, ZHAO Huanyu¹, ZHANG Junjie¹, SHA Shan¹, ZHANG Zhouli¹, LI Zhangmin^{1,2},
LIU Wei^{1,2}, ZHANG Xuezhen¹, SUN Liangting¹, ZHAO Hongwei¹

(1. *Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: An accelerator with low injection energy has been designed and constructed based on direct plasma injection scheme (DPIS); a pulsed C^{6+} beam with peak current of 11.28 mA, energy of 593 keV/u has been successfully achieved after accelerated with DPIS method. It is because that the beam produced by laser ion source is a pulsed one with large energy spread, high intensity and the design of a low energy transport line (LEBT) is also complicated, while the DPIS method is simple to achieve and improve the injection efficiency effectively; so, the laser ion source is directly connected to the RFQ without a LEBT in this equipment and then the laser produced plasma will be injected into RFQ with DPIS. In addition, the DPIS method is simulated by IGUN code and the parameters of extracted beam and its injection efficiency are obtained from simulation, which is well agreed with the measured one in our experiment.

Key words: laser ion source; RFQ; direct plasma injection scheme; extraction simulation

<http://www.npr.ac.cn>

Received date: 20 Oct. 2014; **Revised date:** 6 Mar. 2015

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(11275239, 11221064); 100 Talents Program of Chinese Academy of Sciences (Y214160BR0)

Corresponding author: ZHAO Huanyu, E-mail: zhaohy@impcas.ac.cn.