

金属真空弧离子源引出强流离子束的数值模拟

向 伟¹ Spädtke P² Hollinger R² Galonska M² Heymach F²

1 (中国工程物理研究院电子工程研究所 绵阳 621900)

2 (Gesellschaft für Schwerionenforschung mbH-GSI, Darmstadt 64291, Germany)

摘要 为了引出更高强度、更高亮度的铀离子束,以满足重离子研究中心(Gesellschaft für Schwerionenforschung mbH, GSI)重离子同步加速器的需求,本文用三维的计算机程序 KOBRA3-INP 对金属真空弧离子源(Metal vapor vacuum arc ion source, MEVVA)引出强流铀离子束在引出系统和后加速系统中的动力学特性进行了研究,讨论了离子源发射束流密度对引出束性能的影响。结果表明,束流损失主要发生在引出系统和后加速系统之间的漂移区;在假设漂移区束流被空间电荷中和的情况下,模拟结果和实验结果符合;在发射束流密度为 180—230 mA/cm² 范围内,经后加速的束流强度变化不大。

关键词 金属真空弧离子源,强流铀离子束,后加速系统,数值模拟

中图分类号 TL50

为了获得强流金属离子束以满足重离子研究中心(Gesellschaft für Schwerionenforschung mbH, GSI)正在研制的反质子与离子研究装置(Facility for antiproton and ion research, FAIR)中的重离子同步加速器的需求^[1],GSI 对金属真空弧离子源(Metal vapor vacuum arc ion source, MEVVA)进行了大量的研究。主要的研究工作是增加束流亮度,增加²³⁸U⁴⁺的组分,减少束流噪声以及改善束流的稳定性和可靠性等^[2-4]。为了引出所需的强流铀离子束,采用了适合于小荷质比离子的三电极多孔引出系统。由于通常的三电极引出系统电极功率负载和耐压能力的限制,引出束流的能量只有几万电子伏特。为了满足设计的 RFQ 入口的原子质量单位能量 2.2 keV/u 的要求,采用了后加速系统^[1,5]。也就是说,对 U⁴⁺而言,总的加速电压 130.9 kV 被分成引出电压和后加速电压,其优点是仅通过改变后加速电压来满足对离子能量的要求,而不需要改变已优化的离子源引出参数。但是实验发现,这种离子源引出与后加速组合设计对束流的品质有很大的影响^[6]。

为了对现有的引出系统和后加速系统进行评估和改进,从 MEVVA 离子源中引出更高强度、更高亮度的铀离子束,本文用三维的计算机程序 KOBRA3-INP 对 MEVVA 离子源引出强流铀离子束在引出系统和后加速系统中的特性进行了模拟研究。研究了离子源发射束流密度对引出束性能的影响,并与实验结果进行了对比。

1 模拟方法

数值模拟采用 GSI 开发的三维交互式程序 KOBRA3-INP,该程序采用有限差分方法求解 Laplace 和 Poisson 方程。采用连续超松弛因子方法得到节点上的解值。通过精确积分求得离子束轨迹。通过反复迭代求解 Poisson 方程、求解离子束轨迹和计算空间电荷分布等,直至取得自洽解。程序自动考虑了空间电荷的影响。另外,该程序已成功地用于电子枪、环会切场离子源、潘宁离子源、电子回旋共振离子源、真空弧离子源以及负 H 离子源等的模拟^[7]。

图 1 给出了由离子源、引出系统、后加速系统和相连接的漂移管道组成的束流线。束流线的计算

图 1 离子束线布局图
I. 引出区, II. 第一漂移区, III. 后加速区, IV. 第二漂移区
Fig.1 Layout of the beam line
I. Extraction, II. First drift, III. DC post-acceleration, IV. Second drift

分为四段，即引出区、第一漂移区、后加速区和第二漂移区。图 2 给出了处于后加速电位上(98.9 kV)的离子源引出系统的详细结构图。图 3 为在引出系统约 900 mm 处的可变的后加速系统结构图。图 1—图 3 中所有的尺寸的单位都是 mm。对 U^{4+} 而言，高压电极电压和抑制极电位分别为 98.9 kV 和 -4.3kV。计算采用表 1 给出的实验得到的数据，并且前一段末计算得到的数据作为下一段的初始条件。

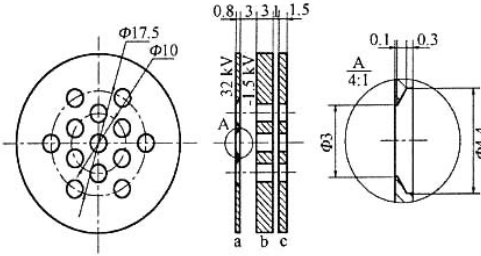


图 2 离子源引出系统结构图

a. 等离子体电极, b. 抑制极, c. 接地极

Fig.2 Schematic of the extraction system for the ion source

a. Plasma electrode, b. Screening electrode, c. Ground electrode

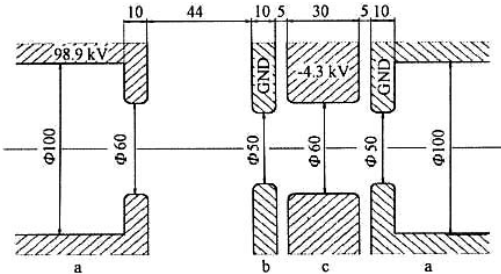


图 3 后加速系统结构示意图

a. 高压电极, b. 接地极, c. 抑制极

Fig.3 Schematic of DC post-acceleration system and potentials applied to the electrodes

a. HV, b. GND, c. Screening electrode

表 1 MEVVA 离子源引出束流的实验数据^[8,9]

Table 1 Experimental data of the ion beam extracted from MEVVA ion sources

离子电荷态(束流比)	U^{3+} (20%),
Ion charge state (current fraction)	U^{4+} (68%),
	U^{5+} (12%)
纵向离子初始能量	188
Longitudinal ion energy /eV	
横向离子初始能量	100
Transverse ion energy /eV	
电子温度	11
Electron temperature /eV	
束流发射密度	170
Emission current density / mA·cm ⁻²	
离子源引出束流强度	135–140mA@32
Full beam ion beam current /mA	kV
后加速束流强度	45–50mA@32kV
Post-accelerated ion beam current /mA	+98.9 kV

2 理论假设

2.1 束流引出区

计算中假设离子源内部等离子体均匀分布，离子初始能量由等离子体参数确定。此外，离子源内等离子体保持电中性。电子密度按 Boltzman 分布计算^[10]。实际上，加速-减速结构的主要优点之一就是其中的抑制极抑制反向加速至源内的电子，这样不仅减少了引出电源的功率消耗，有利于源的稳定运行，而且有助于实现漂移空间内的空间电荷中和。图 4 给出了引出系统典型的空空间电荷分布和相应的等离子体边界图。很明显，在抑制极后面空间电荷已经不存在，也就是说，引出束流已被完全中和。

图 4 典型的引出系统中空间电荷分布图(a)和等离子体边界图(b)

Fig.4 Typical space charge map (a) and corresponding plasma boundary (b) for the extraction system

2.2 第一漂移区

由于从 MEVVA 离子源引出的是强流重离子束，并且由于在第一漂移区中束流损失非常严重，因此在这个区间需考虑空间电荷的影响和空间电荷的中和问题。实际上，由于离子束在此区间漂移过程中，离子束与残余气体原子碰撞电离，电离产生的电子，或管壁材料溅射产生的电子被捕获在离子束中，使束离子的空间电荷得到中和^[7]。模拟计算基于 Self 的空间电荷中和模型^[10]。该模型假定电子存在一个能量分布，在束流内部电位相同，在束流外围电位下降。图 5 给出了 100%空间电荷中和度

情况下该漂移区中束流的轨迹及相应的发射度图。

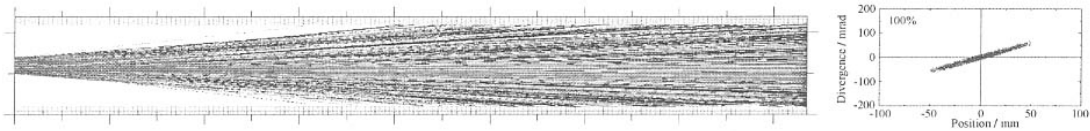


图 5 100%空间电荷中和度情况下第一漂移区中束流的轨迹及相应的发射度图
Fig.5 Trajectory plot and corresponding emittance diagram for the 100% space charge compensation

2.3 后加速区

后加速系统中的抑制电极相对于接地极处于负电位，其作用是抑制极后的空间电荷被中和。假设中和的离子束飞行到后加速系统，而在后加速系统空间电荷没有被中和。图 6 给出了在后加速系统中空间电荷的分布。

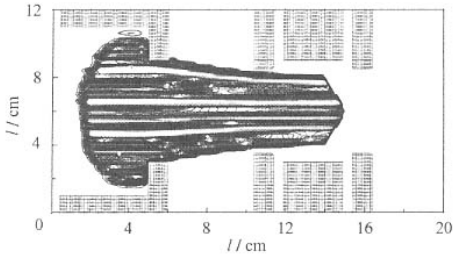


图 6 后加速系统中空间电荷分布图
Fig.6 Space charge map in the post-acceleration system

2.4 第二漂移区

同样假定这个区域中空间电荷被完全中和。

3 结果与讨论

图 7 给出了等离子体的初始纵向能量为 160eV、横向能量为 100 eV、束流发射密度为 110—270 mA/cm² 情况下引出系统中束流的轨迹。图 8 给出了不同束流发射密度情况下束流线前三段末尾处的束流强度和横向发射度。从图 8 可以看出，随着束流发射密度的增加，引出束流的强度也增加；引出束流的损失主要发生在第一漂移区；在发射束流密度为 180—230 mA/cm² 范围内，引出束流随着发射束流密度的增加而增加，但是经后加速的束流强度变化不大。在发射束流密度为 190 mA/cm² 附近，引出束流的发散角最小。其对应导流系数匹配情况见图 8。图 9 给出了等离子体的初始纵向能量为 188 eV、横向能量为 100 eV、束流发射密度为 165 mA/cm² 情况下束流在束流线中的轨迹，以及沿束流线束流的空间分布和相空间分布图。与表 1 比较可以看出，在假设在漂移区束流被空间电荷中和的情况下，模拟结果和实验结果符合得很好。

图 7 不同发射束流密度情况下引出系统中离子的轨迹
Fig.7 Trajectory plots for different emission current densities
(a) 110 mA/cm², (b) 150 mA/cm², (c) 190 mA/cm², (d) 230 mA/cm², (e) 270 mA/cm²

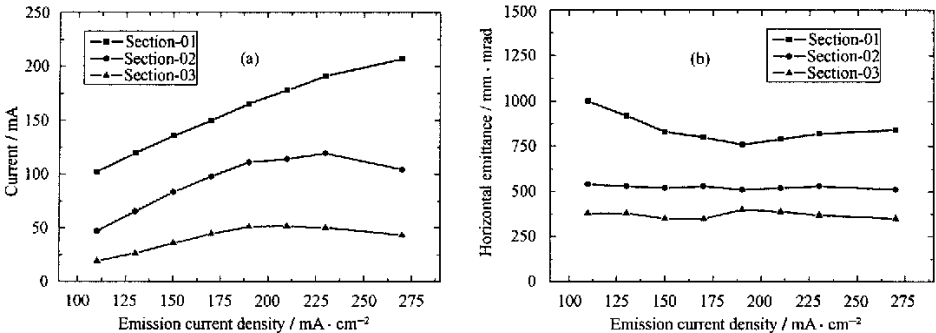


图 8 不同束流发射密度情况下束流线不同末尾处的束流强度(a)和横向发射度(b)
Fig.8 Intensity (a) and emittance (b) of the ion beam at the end of different sections as functions of emission current density

图 9 离子在束流中的轨迹以及沿束流束流的空间分布和相空间分布

Fig.9 Trajectory plot in the beam line as well as the space profiles and the emittance diagrams of the ion beam along the beam line

4 结论

用 KOBRA3-INP 程序模拟研究了 GSI 强流 MEVVA 离子源引出束流的特性。结果表明,束流损失主要发生在引出系统和后加速系统之间的漂移区;在假设漂移区束流空间电荷中和的情况下,模拟结果和实验结果符合;在发射束流密度为 $180\text{--}230\text{ mA/cm}^2$ 范围内,引出束流随着发射束流密度的增加而增加,但是经后加速的束流强度变化不大。在发射束流密度为 190 mA/cm^2 附近,引出束流的发散角最小。

参考文献

- 1 Ratzinger U. Nucl Instrum Meth in Phys Res, 2001, A464: 636—641
- 2 Reich H, Spädtke P, Oks E M. Rev Sci Instrum, 2000, 71(2): 707—709
- 3 Hollinger R, Heymach F, Spädtke P. Rev Sci Instrum, 2002, 73(2): 1024—1026
- 4 Anders A, Hollinger R. Rev Sci Instrum, 2002, 73(2): 732—734
- 5 张华顺编著. 离子源和大功率中性束源. 北京: 原子能出版社, 1987. 108—110
ZHANG Huashun. Ion sources and high-power neutral beam sources. Beijing: Atomic Energy Press, 1987. 108—110
- 6 Reich H, Heymach F, Spädtke P. Proc 20th Inter Linac Conf Monterey, CA, 2000, 238—240
- 7 Spädtke P, Mühle. Rev Sci Instrum, 2000, 71(2): 820—825
- 8 Hollinger R, Galonska M, Spädtke P. Rev Sci Instrum, 2004, 75(5): 1595—1597
- 9 Galonska M, Hollinger R, Spädtke P. Rev Sci Instrum, 2004, 75(5): 1592—1594
- 10 Self S A. Phys Fluids, 1963, 6: 1762—1769

Numerical simulation of high current ion beams extracted from a MEVVA ion source

XIANG Wei¹ Spädtke P² Hollinger R² Galonska M² Heymach F²

1 (Institute of Electronic Engineering, CAEP, Mianyang 621900)

2 (Gesellschaft für Schwerionenforschung mbH, GSI, Darmstadt 64291, Germany)

Abstract To generate uranium ion beam with high current and high brightness to meet the requirement of the heavy ion synchrotron at GSI, KOBRA3-INP code has been used to simulate the behavior of the uranium ion beam in the extraction system and the post-acceleration system for a metal vapor vacuum arc ion source. The influence of the emission current density on the characteristics of the extracted ion beam is discussed. The results show that the losses of the extracted ion beam propagating through the beam line mainly occur in the drift space between the extraction system and the post-acceleration system. Simulation quantitatively supports the experimental results under the assumption that the ion beam has to be space charge compensated along the drift sections. Intensity of the ion beam behind the post-acceleration system is not sensitive to the emission current density in the range from 180 to 230 mA/cm².

Key words MEVVA ion source, High current uranium beam, Post-acceleration system, Numerical simulation

CLC TL50