

文章编号: 1007-4627(2013)02-0141-06

强流 ECR 离子源引出系统设计研究

王云¹, 陈志¹, 赵红卫³, 赵阳^{2,3}, 孙良亭³, 杨尧^{2,3}, 钱程¹, 武启³,
马鸿义³, 张文慧³, 张子民³, 张雪珍³, 刘占稳³

(1. 中国科学技术大学核科学技术学院, 安徽 合肥 230027;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 为了提高强流 ECR 离子源的引出束流品质, 分别设计了 1# 和 2# 引出系统, 利用束流引出模拟软件 PBGUNS 对 1# 和 2# 引出系统进行了质子束流引出与传输的模拟计算, 结合实际测得的发射度数据分析引出系统, 发现 2# 引出系统比 1# 引出系统引出束流品质高。对 ECR 离子源引出系统的电势等位线分布等参数引起的球差进行了简单数学推导及 MATLAB 绘图, 并结合 1# 和 2# 引出系统束流相图模拟结果证明了球差会使引出束流品质有效发射度增长, 通过适当加大电极孔径可改善束流聚焦情况, 得到了束流光学聚焦较好的束流引出系统设计。

关键词: ECR; 束流引出系统; 电势等位线分布; 球差

中图分类号: O571 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.30.02.141

1 引言

ECR(Electron Cyclotron Resonance) 离子源是 20 世纪 60 年代末出现的一种正离子发生装置, 与传统离子源相比, ECR 离子源能提供更高电荷态、更高流强、稳定性和束流品质更高的束流。ECR 离子源采用微波加热等离子体产生离子, 离子源无阴极, 所以原理上 ECR 离子源无寿命限制。因此 ECR 离子源被广泛应用到原子物理、材料辐照和生物学等研究领域^[1]。

ECR 离子源目前主要朝高电荷态和高流强两个方向发展, 高流强 ECR 主要针对质量比较轻的元素, 如 H 元素及 D 元素等。国际上很多实验室已成功研制强流 ECR 质子源或氦离子源。长时间的稳定运行是强流 ECR 离子源最大的挑战, 而离子源引出系统是离子源的重要组成部分, 也是束流稳定引出的重要系统。对于强流 ECR 离子源, 束流自身的空间电荷效应及引出系统象差会影响引出束流的性能, 因此合理的 ECR 离子源引出系统设计是非常有必要的。

2 强流 ECR 离子源引出系统

离子源引出系统是指将离子源产生的等离子体中的离子引出的装置, 在引出系统的引出孔附近会形成等离子体发射面, 发射面上的电场强度为零, 离子源产生的离子从发射面上出射, 通过后面的引出电压将离子束流加速引出, 不同的发射面对离子的引出传输影响很大。离子发射面的形状由很多参数决定, 主要与等离子体密度、温度和引出区的电力线分布有关。

ECR 离子源常用的引出系统主要为三电极系统, 分别为等离子体电极、抑制电极和地电极。等离子体电极与等离子体同电位(几十 kV), 抑制电极上加载负偏压(负几 kV), 地电极接地。这样的电极系统又称为加减速结构, 离子束流是经引出电场先加速, 然后传输到抑制电极再减速的过程。文中所述的引出电极系统一般用于强流单电荷态离子源加速器系统, 引出离子束流为低能强流束, 图 1 给出了 1# 和 2# 引出电极系统的结构图。

收稿日期: 2012-10-17; 修改日期: 2012-12-17

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助(WK2140000001)

作者简介: 王云(1989-), 男, 安徽南陵人, 硕士研究生, 从事核能与核技术工程研究; E-mail: wyhfut@mail.ustc.edu.cn.

通信作者: 陈志, E-mail: zchen@ustc.edu.cn

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

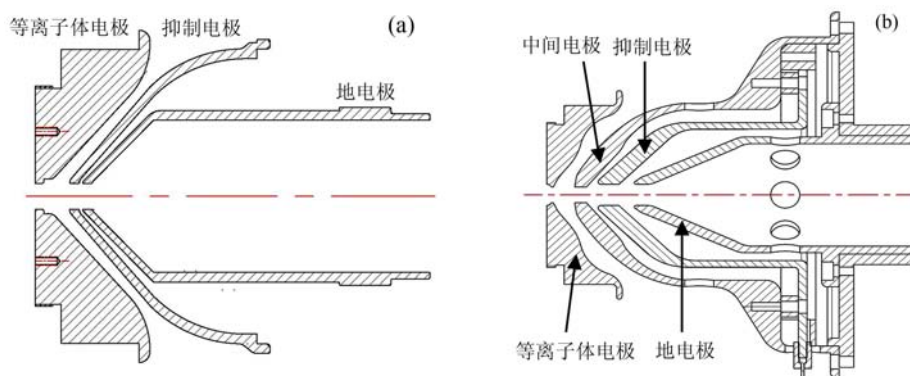


图 1 (在线彩图) 强流 ECR 离子源引出电极系统结构图[(a) 1#, (b) 2#]

2.1 引出系统的理论基础

从离子源引出的束流流强大小遵循 C-L(Child-Langmuir) 定律^[2]。对于空间电荷限制流, 可根据 C-L 定律计算出最大流强的大小。这里假设离子发射面为平面且无限大, 即平面二极管, 离子无纵向初速度出射的束流强度可用下式表示^[2]

$$j_{C-L} = \frac{4}{9} \epsilon_0 \sqrt{\frac{2e\zeta}{m}} \frac{1}{d^2} U^{3/2}, \quad (1)$$

其中: ϵ_0 为真空介电常数; e 为单元电荷量; ζ 为粒子电荷态数; m 为粒子质量; d 为加速间隙; U 为电极之间电压降。

对于同轴的球面二极管引出系统, 引出的总离子束流可表示为^[3]

$$I_{C-L} = \frac{4}{9} \epsilon_0 \sqrt{\frac{2e\zeta}{m}} S^2 U^{3/2}, \quad (2)$$

其中: $S = r/d$ 为第一横纵比; r 为等离子体电极孔径; d 为加速间隙。

离子的发射面面积, 引出的束流强度 I_{C-L} 正比于 $U^{3/2}$, 比例系数称之为引出系统的导流系数:

$$P = \frac{4}{9} \epsilon_0 \sqrt{\frac{2e\zeta}{m}} \frac{1}{d^2}. \quad (3)$$

如果等离子体密度比较理想, 形成的发射面近似平面, 出射的离子束流聚焦好, 束流品质好^[3]。在保证实验条件相同的情况下, 若等离子体密度高, 形成的发射面为凸面, 反之等离子体密度低, 则形成的发射面为凹面。对于 2.45 GHz 质子源, 放电室形成的等离子体温度为约几个 eV。实际实验中, 引出离子的能量已被确定, 即引出高压不变, 通常改变电极之间的间距或抑制电压大小(对于三电极系统)来改变引出的电力线分布, 从而达到改变离子光学的目的。

2.2 多电极引出系统的模拟比较

国际上对离子源的引出系统模拟计算的软件有 PBGUNS, Simion, Lorentz-3D 等, 美国橡树岭国家实验室(ORNL)的韩宝喜对 PBGUNS, Simion, Lorentz-3D 软件进行了模拟比较, 3 种程序模拟的束流引出与传输结果相互吻合^[4]。本节采用 PBGUNS 软件对 1# 及 2# 引出系统进行模拟比较, 模拟参数均为离子源加载高压 50 kV, 引出束流强度 75 mA。在此条件下, 通过模拟计算比较不同电极系统对束流相空间发射度的影响。图 2 给出了 1# 和 2# 电极系统引出后 15 cm 位置模拟发射度相图。

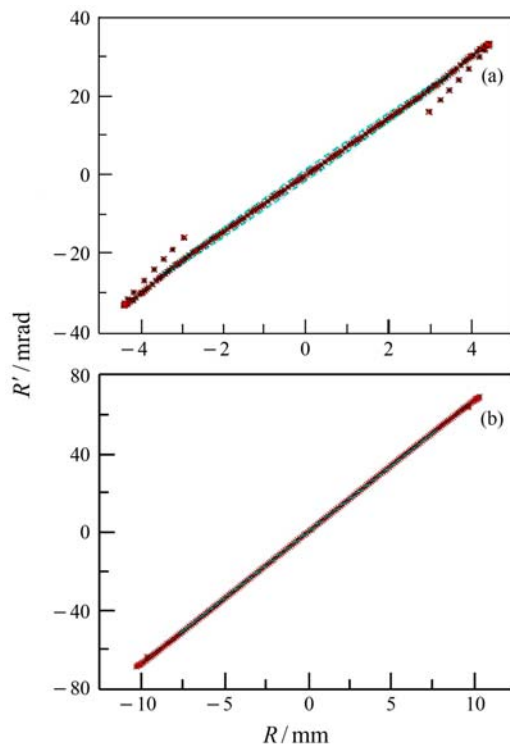


图 2 (在线彩图) 1# 及 2# 引出系统束流引出模拟相图 [(a) 1#, (b) 2#]

实验中测得 1# 和 2# 电极系统束流相图如图 3 所示。图中 1# 及 2# 电极系统的束流相图坐标尺度不同, 1# 电极系统束流相空间分布较 2# 电极系统差一些, 实际测得 1# 电极系统的束流均方根归一化发射度值为 $0.275 \pi \text{ mm}\cdot\text{mrad}$, 不满足 RFQ 入口处束流参数要求 ($< 0.2 \pi \text{ mm}\cdot\text{mrad}$)。2# 电极系统模拟情况及实验所测数据都表明束流相空间分布较均匀, 实验中测得束流均方根归一化发射度值为 $0.1778 \pi \text{ mm}\cdot\text{mrad}$ (满足 RFQ 入口参数要求)。实验中发现 1# 电极系统聚焦点强, 引出的束流包络较小, 传输效率高, 有几次获得过很细的束流, 但调试过程表明 1# 电极系统对离子源的各项参数较敏感, 不易调到最佳状态。2# 电极系统引出束流包络较 1# 电极系统大一些, 但综合束流品质考虑 2# 电极系统引出束流品质更高, 满足 RFQ 入口参数要求且易调节; 模拟计算时, 无论发射面为凸面或凹面, 引出束流均较快稳定收敛, 束流密度分布近似均匀分布。1# 电极系统获得的束流相图不均匀是由于电极系统的象差导致, 将在下节详细分析。

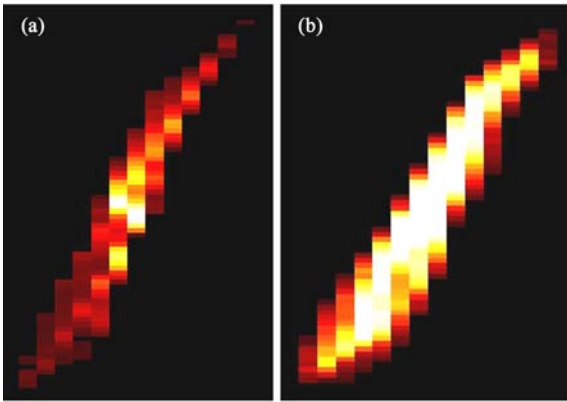


图 3 (在线彩图) 1# 及 2# 引出系统实验所测束流发射度相图 [(a) 1#, (b) 2#]

3 引出系统的球差及分析

3.1 引出系统的球差理论

离子源引出系统电极之间形成电势等位线横截面径向不同位置的聚焦力不同, 若束流横截面不同径向位置离子受到的聚焦力为非线性力, 将会引起球差^[5]。

束流在经过电极引出口前后的轨迹的倾斜角变化

与焦距 f 和球差系数 C_s 有关, 可表示为^[6]

$$\Delta \left(\frac{dx}{dz} \right) = -\frac{x}{f} \left[1 + \frac{C_s}{f} \left(\frac{r}{f} \right)^2 \right], \quad (4)$$

其中: f 为电透镜焦距; C_s 为球差系数; r 为束流半径。假设入口处的束流相空间椭圆数学表达式为

$$\frac{x_0^2}{R^2} \varepsilon + \frac{x_0'^2}{\varepsilon} R^2 = \varepsilon. \quad (5)$$

出口处的 x, x' 为

$$x_0 = x, \quad (6)$$

$$x_0' = x' + \frac{x}{f} \left[1 + \frac{C_s}{f} \left(\frac{r}{f} \right)^2 \right]. \quad (7)$$

将式 (6) 和式 (7) 带入式 (5), 得到出口处的束流相空间数学表达式为

$$\frac{x^2}{R^2} \varepsilon + \frac{R^2}{\varepsilon} \left(x' + \frac{x}{f} + \frac{C_s x^3}{f^4} \right)^2 = \varepsilon. \quad (8)$$

令

$$\frac{x}{R} \sqrt{\varepsilon} = \sqrt{2J} \cos \psi, \quad (9)$$

$$\left(x' + \frac{x}{f} \right) \frac{R}{\sqrt{\varepsilon}} = \sqrt{2J} \sin \psi, \quad (10)$$

则式 (8) 可写为

$$T + T^2 2\nu \sin \psi \cos^3 \psi + T^3 \nu^2 \cos^6 \psi = 1, \quad (11)$$

$$\frac{\varepsilon_{\text{eff}}}{\varepsilon} = \sqrt{1 + K\nu^2}, \quad (12)$$

$$\varepsilon_{\text{eff}} = \sqrt{\varepsilon^2 + K \left(\frac{C_s R^4}{f^4} \right)^2}, \quad (13)$$

其中:

$$T = \frac{2J}{\varepsilon}, \quad \nu = \frac{C_s R^4}{\varepsilon f^4}, \quad K \approx 0.4.$$

若无非线性力作用, $\nu = 0$, 束流相空间为以半径为 1 的圆, 如图 4(a) 所示; 若束流在传输过程中有非线性力的作用, 束流相空间发生畸变, 发射度增长, 如图 4(b) 所示, $\nu = 1.8$, 其中横轴 $x = \sqrt{T} \sin \psi$, 纵轴 $y = \sqrt{T} \cos \psi$; 束流经过透镜时随着不同 ν 参数, 束流发射度增长, 如图 4(c) 所示, 其中横轴 $x = \nu$, 纵轴 $y = \varepsilon_{\text{eff}}/\varepsilon$ 。

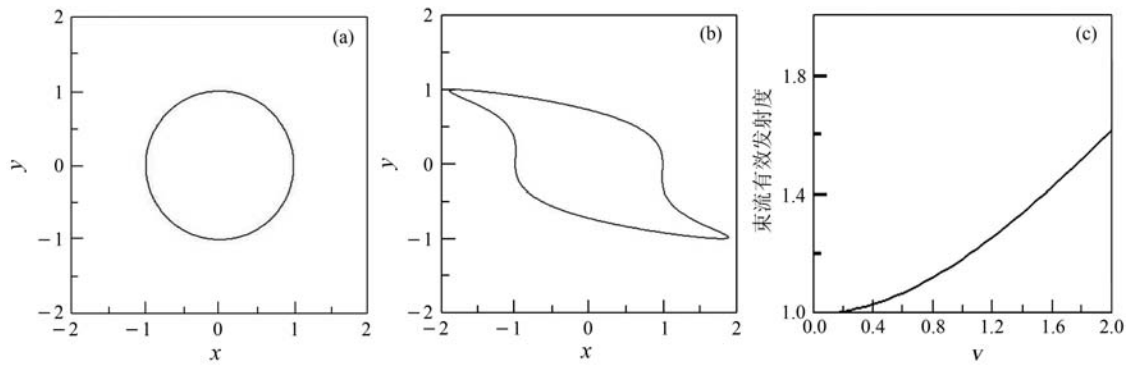


图 4 束流相空间和束流发射度随 v 值变化
 (a) $v = 0$ 时束流相空间, (b) $v = 1.8$ 时束流相空间, (c) 束流发射度随 v 值变化。

3.2 引出系统的球差分析

对于实际的离子源引出系统, 引出系统电力线的非线性分布都会产生球差。

图 5 给出了 1# 电极系统和 2# 电极系统电势等位线分布, 采用 PBGUNS 模拟软件得到 1# 和 2# 电极系统束流传输相图, 如图 6 所示。

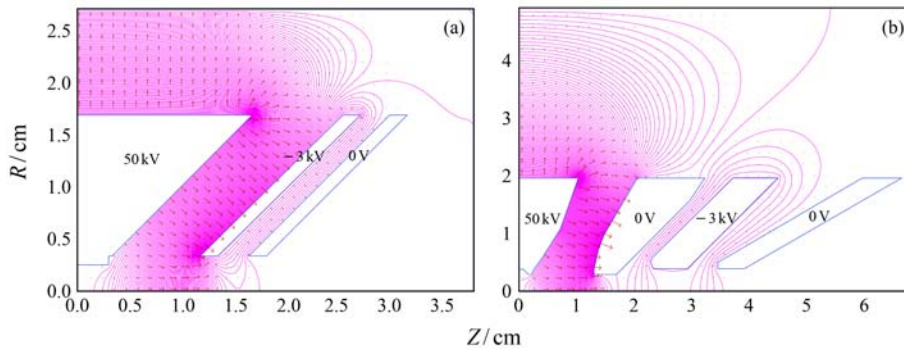


图 5 (在线彩图) 1# 及 2# 电极系统电势等位线分布[(a) 1#, (b) 2#]

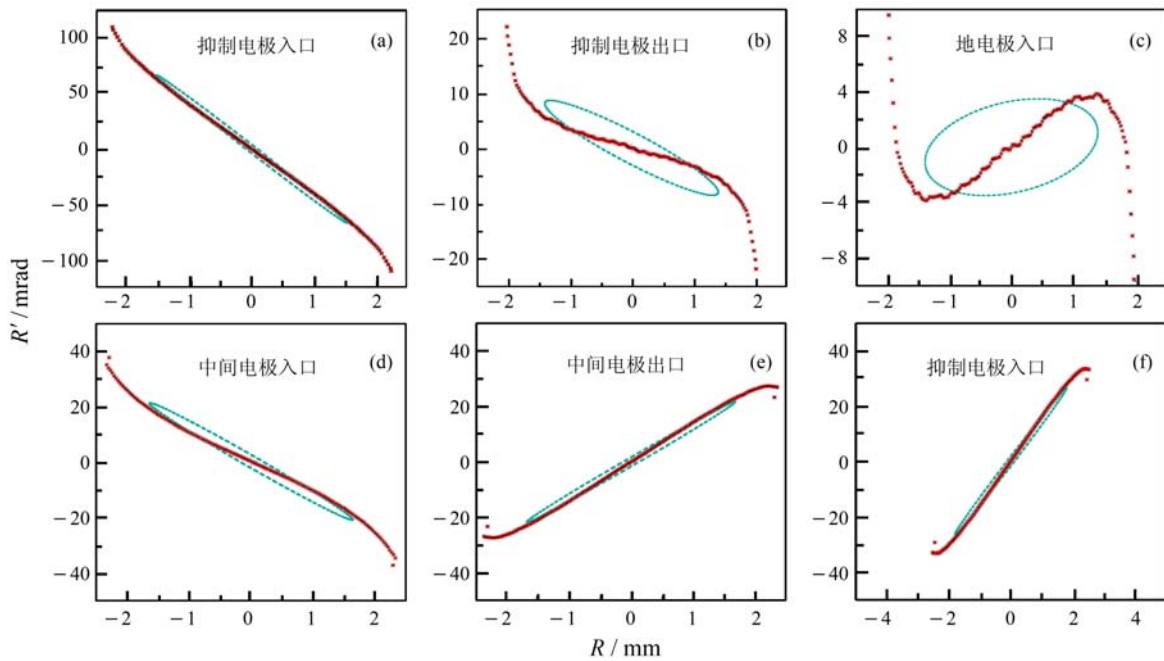


图 6 (在线彩图) 1# 及 2# 电极系统束流传输相图
 (a), (b), (c) 是 1# 电极系统; (d), (e), (f) 是 2# 电极系统。

从束流传输相图发现, 对于 1# 电极系统, 象差导致的束流相空间畸变出现在离子减速区, 即抑制电极与地电极之间; 而 2# 电极系统象差对束流传输影响较小, 束流相空间分布较均匀。从电极系统的电势等位线可看出, 1# 电极系统的抑制电极与地电极之间电力线非线性分布较严重, 虽然束流此时能量很高, 但此处的束流聚焦力中径向力分量也较强, 导致束流相图畸变, 从图 6 的地电极入口也可看出, 束流传输到地电极时, 束流相空间畸变没有改善且变得更严重。对于三电极系统的设计, 离子减速区的象差对束流影响很大, 应妥善考虑设计及优化。2# 电极系统束流从中间电极入口处往抑制电极传输过程中, 束流传输线上电力线分布均匀, 虽然电极口处电势等位线畸变会造成一定象差, 但对引出束流影响较小。从图 6 中的 (d)~(f) 图可看出, 传输中的束流相空间分布均匀, 相图中散点少, 束流引出效果好, 束流品质高, 说明 2# 电极系统象差小, 在此束流参数下的引出较合理。对于一般四电极系统, 若中间电极接地, 较一般三电极系统中间电极屏蔽了加速区的强聚焦力, 离子经过两次加速过程, 因而在减速区聚焦强度减弱, 象差也得到一定减小。

另外, 模拟中发现等离子体电极与传输线中心轴的夹角对束流聚焦性能有很大影响, 夹角越小, 束流聚焦强度越强, 所以 1# 电极系统比 2# 电极系统聚焦性能好, 引出束流包络小, 1# 电极系统聚焦好带来的坏处就是束流横截面中远轴离子易过聚焦。

1# 电极系统和 2# 电极系统模拟的引出 15 cm 位置束流横截面束流密度分布中大半径处束流密度峰值如图 7 所示。

束流传输过程中, 受到非线性电场力作用导致束流横截面大半径处出现的束流密度峰值。从图 7 可看出, 2# 电极系统的束流横截面密度分布优于 1# 电极系统。

对于 2# 电极系统引出束流横截面密度分布存在峰值的现象, 模拟中发现改变中间电极的口径可适当减小峰值大小, 将中间电极口径加大 2 mm, 束流密度分布如图 8 所示。从图中可看出, 2# 电极系统束流密度分布峰值明显减小。这是由于孔径加大, 使束流大半径处离子的过聚焦效果有所减弱, 所以束流密度分布线变的平坦了。随着传输距离的加大, 束流密度分布变得更平坦些, 见图上 $Z=20$ cm 位置的束流横截

面束流密度分布, 且近似为 K-V 分布。相比于其他束流密度分布, K-V 分布的束流在自身空间电荷力作用下, 束流发射度增长最慢^[7]。

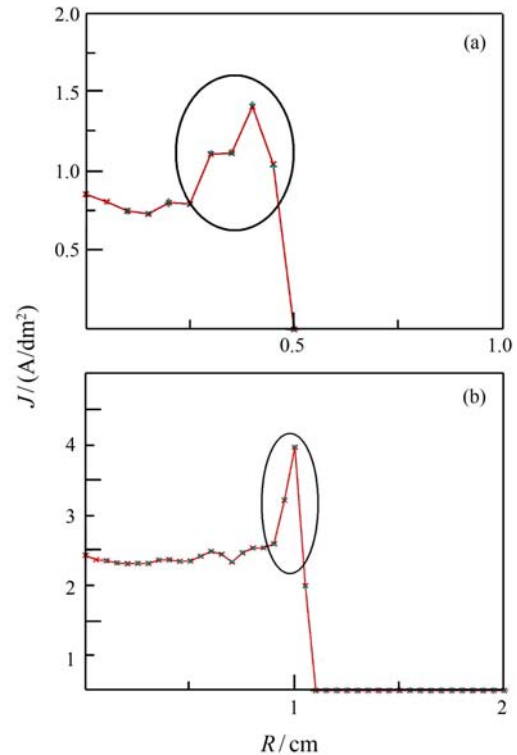


图 7 (在线彩图) 1#及2#电极系统模拟束流横截面密度分布 [(a) 1#, (b) 2#]

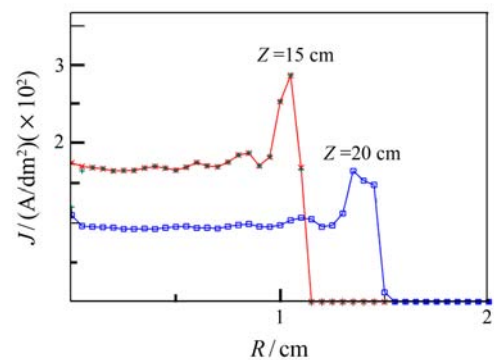


图 8 (在线彩图) 加大中间电极口径后束流密度分布

4 结论

引出系统对离子源引出束流的品质有重要影响, 1# 电极系统和 2# 电极系统模拟说明引出系统的象差对束流的传输非常关键, 而引出系统的象差主要决定于引出系统电极间电力线分布, 所以合理的电极形状和电极口径大小等参数形成比较理想的电势等位线分布对束流引出和传输至关重要。改变中间电极孔径无

法彻底消除束流过聚焦、束流横截面密度分布边缘峰值存在等现象。随着传输距离增大,束流包络增长很快,因此必须对束流在引出与传输系统中的传输进行优化设计以得到更高品质的束流。

参考文献(References):

- [1] HE Wei. Research on the Next Generation of Multiple Charge State Ion Source[D]. Lanzhou: Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Science, 2006: 1–2.(in Chinese)
(何伟. 新一代多电荷态离子源的研究[D]. 兰州: 中国科学院近代物理研究所, 2006: 1–2.)
- [2] BROWN I G. The Physics and Technology of Ion Source[M]. 2nd. Revised and Extended Edition. California: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2004: 61.
- [3] ZHANG Huashun. Ion Source and High Power Neutral Beam Source[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1987: 98–100.(in Chinese)
(张华顺. 离子源与大功率中性束源[M]. 北京: 原子能出版社, 1987: 98–100.)
- [4] ZHANG Meng. Research on Electron Cyclotron Resonance Ion Source and Low Energy Beam Transport System[D]. Beijing: Peking University, 2010: 33–34.(in Chinese)
(张萌. 强流 ECR 离子源与低能运输系统的研究[D]. 北京: 北京大学, 2010: 33–34.)
- [5] SCHNEIDER J D, ARMSTRONG D D. IEEE Trans, Nucl Sci, 1983, **30**: 2844.
- [6] YANG Yao, LIU Zhanwen, ZHANG Wenhui, *et al.* Nucl Sci Tech, 2012, **23**: 83.
- [7] HUANG Zhibin, CHEN Yinbao, FU Shinian. Nucl Sci Eng, 1997, **17**(3): 242.(in Chinese)
(黄志斌, 陈银宝, 傅世年. 核科学与工程, 1997, **17**(3): 242.)

Study on Extraction System for High Current ECR Ion Source

WANG Yun¹, CHEN Zhi¹, ZHAO Hongwei³, ZHAO Yangyang^{2, 3}, SUN Liangting³, YANG Yao^{2, 3}, QIAN Cheng¹,
WU Qi³, MA Hongyi³, ZHANG Wenhui³, ZHANG Zimin³, ZHANG Xuezheng³, LIU Zhanwen³

(1. School of Nuclear Science and Technology, University of Sciences and Technology of China, Hefei 230027, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: To improve the quality of extracted ion beam from a high current ECR ion source, 1# and 2# extraction systems were designed and tested. The PBGUNS code was used to simulate the 1# and 2# extraction systems of proton ion beam. The emittance measurement results with the two different extraction systems were compared and analyzed with the simulation, the conclusion that more high quality beam extracted from 2# system than 1# system was got. The formula derivation of ECR ion source extraction system spherical aberration and MATLAB drawing was done by the analyzing on the distribution of extraction field equipotentials, effective emittance increasing caused by spherical aberration was proved by 1# and 2# extraction systems beam phase space simulation result, beam focusing would be improved if electrode hole size increasing appropriately and a general concept on good optics focusing of ion beam extraction system was proposed finally.

Key words: ECR; ion beam extraction system; distribution of equipotential; spherical aberration

Received date: 17 Oct. 2012; Revised date: 17 Dec. 2012

Foundation item: Fundamental Research Funds for the Central Universities (WK2140000001)

Corresponding author: CHEN Zhi, E-mail: zchen@ustc.deu.cn

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