

60kV 离子源引出与加速系统的数值模拟

王惠三, 简广德, 周才品, 雷光玖, 姜韶风, 卢大伦, 江 涛

(核工业西南物理研究院, 成都 610041)

摘 要:对 60kV、70A、2s 离子源的四电极引出-加速系统进行了数值模拟。利用数值计算结果对系统进行了优化。在离子流密度为 0.24A cm^{-2} (束中 $\text{H}_1^+ \text{H}_2^+ \text{H}_3^+ = 0.7 \ 0.2 \ 0.1$) 和离子源等离子体离子温度为 1eV 时,由系统栅缝出射的束最大散角小于 1° 。

关键词: 离子引出与加速系统; 数值模拟

中图分类号: TL62⁺9.1; O523⁺.26

文献标识码: A

1 引言

因数值模拟方法可较快速地对不同的离子束系统的性能进行比较和优化,该方法已较普遍地应用于对离子源引出、加速系统的辅助设计。

我们的数值模拟物理模型和计算程序考虑了离子源等离子体相关参数(等离子体密度、电子温度和离子温度、离子种类比例等)对束初始发射条件的影响,等离子体电子弥散和离子束自身空间电荷效应对束光学特性的影响以及离子束在由系统的几何参数和电位分布所决定的电场位形中的运动行为。利用该程序对 60kV 四电极离子引出、加速系统进行了数值模拟研究并以此为基础对该系统进行了优化。当四电极系统中的等离子体栅、梯度栅、抑制栅、接地栅的电位分别为 $U_1 = 60\text{kV}$ 、 $U_2 = 46\text{kV}$ 、 $U_3 = -2\text{kV}$ 和 $U_4 = 0\text{kV}$,束流密度为 0.24A cm^{-2} (束中 $\text{H}_1^+ \text{H}_2^+ \text{H}_3^+ = 0.7 \ 0.2 \ 0.1$),初始离子温度为 1eV 时,由系统栅缝出射的各小束均方根散角、85%束散角和最大束散角分别为 0.492° 、 0.720° 和 0.915° 。

为获得大的束流强度,利用了多缝大面积引出系统。总引出面积为 $45 \times 16\text{cm}^2$,每个电极有 54 条栅缝,按等离子体栅缝尺寸 $0.35\text{cm} \times 16\text{cm}$ 计,其有效引出面积为 302.4cm^2 (透明度 42%),在 0.24A cm^{-2} 的束流密度下可得到 72.6A 氢离子束。

各电极均由面积相同的三个组件构成。为实现各小束的大面积几何聚焦,将各电极旁边的两个组件向系统轴线倾斜 0.96° 。尽管利用了这种宏观几何聚焦手段,由每个栅缝出射的各个小束的束光学特性仍至关重要。

收稿日期:2000-08-30;修订日期:2001-02-24

基金项目:国家 863 高技术课题(863-614-03-05)

作者简介:王惠三(1940-),男,山东蓬莱人,研究员,1965年毕业于清华大学工程物理系,主要从事离子源、离子束-中性束物理与技术的研究及相关电物理装置的研究和应用工作。

本文介绍了与数值模拟有关的物理和数学问题,包括基本计算方程和程序以及离子束初始发射条件的确定,并给出了数值计算的主要结果,最后进行了相关的讨论。

2 数值模拟的相关物理和数学问题

2.1 基本方程和计算程序

为求得计算域内电势及离子束轨迹以研究系统的束光学特性,需联立求解方程:

$$\nabla^2 \phi = - (n_i + n_e) / \epsilon_0 = - \{ n_i + n_e \exp [e (\phi - \phi_0) / k T_e] \} / \epsilon_0 \quad (1)$$

$$m_i (v \cdot \nabla) v = q_i (v \times B - \nabla \phi) \quad (2)$$

$$\nabla \cdot (n_i v) = 0 \quad (3)$$

这里,设电子密度为 Boltzman 分布; ϕ 和 ϕ_0 分别为空间电势与发射面处电势; n_i 、 n_e 、 n_0 分别为离子、电子和发射面处电子电荷密度; m_i 、 q_i 和 v 分别为离子质量、电荷量和其速度矢量; ϵ_0 为介电常数; B 为系统磁场,在我们采用的桶式离子源中 $B = 0$; T_e 为等离子体电子温度。

计算域由离子发射面、出射面、引出缝轴线和两缝间的对称轴线及各电极栅组成。在系统末端的出射面电位为 0,其位置对束光学特性的影响不大。

在我们的 2D 程序中,模拟的是离子在与引出缝垂直的方向和束流方向组成的二维平面上的运动行为。计算程序包括:计算网络的形成;离子束初始条件的计算;计算空间电势分布;求解离子束轨迹;空间电荷分布计算。

采用三角网络、有限元法解泊松方程。该方法的主要优点是可较方便地处理复杂的电极形状和边界。按有限元法的基本假定,在每个三角网络单元内电势呈线性变化,故可通过对常微分运动方程的直接积分求得离子束轨迹。按每个三角网络单元内角大小将在该网络内沉积的空间电荷分配到各顶点上。需反复迭代计算,直至电势、离子束轨迹、电子电荷和离子电荷之间取得自洽解^[1]。

2.2 离子束初始发射条件的确定

离子发射面的位置和电位及发射面处的离子密度 n_{is} , 电子密度 n_{es} 和离子定向漂移速度 v_{is} 由给定的等离子体参数根据等离子体-鞘层方程的数值求解得^[2]。

计算时可将发射面分成若干个单元,为模拟由离子温度 T_i 所表征的无规则热速度的影响,由每个发射面单元又引出若干条小束(通常为 3 条或 5 条)。由同一个发射面单元发出的各小束离子流强之和等于由该单元发射的离子总流强,每一条小束包含的离子数由该处离子速度分布函数对相应速度空间的积分求得,每条小束的初始速度为该小束内离子的平均速度。如令由同一个发射面单元发射的各小束包含的离子数相等,则可在分布函数的空间积分式中通过误差函数确定速度空间积分域,进而求出每条小束的离子平均速度矢量。

通常认为,等离子体离子无规则热速度服从有定向漂移速度的 Maxwell 分布^[3],即:

$$f_i(v) = n_{is} (m_i / 2 k T_i)^{3/2} \exp \{ - [v_y^2 + (v_x - v_{is})^2] m_i / 2 k T_i \} \quad (4)$$

这里,将 x 坐标取在发射面元的法线方向上, v_x 、 v_y 分别为在 x 和 y 方向上的速度分量, T_i 为离子温度。

当由每个发射面单元引出 3 条小束时,它们的速度大小分别为:

$$|v_1| = |v_3| = \{v_{is}^2 + [0.77(2kT_i/m_i)^{1/2}j]^2\}^{1/2} \quad |v_2| = v_{is}$$

各小束与发射面单元法线方向所成角度分别为：

$$\alpha_1 = -\text{tg}^{-1}[0.77(2kT_i/m_i)^{1/2}/v_{is}j], \quad \alpha_2 = 0, \quad \alpha_3 = \text{tg}^{-1}[0.77(2kT_i/m_i)^{1/2}/v_{is}j]$$

3 数值计算的主要结果

对加-加-减速四电极离子引出、加速系统进行数值模拟研究的主要结果反映了该系统的基本特性。

3.1 流密度与系统的“匹配”

对于一个确定的四电极引出、加速系统,仍然存在一个与之相匹配的束流密度。对于图 1 所示的四电极系统(图中上、下边界分别为两缝间对称轴线和引出缝轴线),当 $U_1 = 60\text{kV}$, $U_2 = 46\text{kV}$, $U_3 = -2\text{kV}$, $U_4 = 0\text{kV}$,流密度 $j = 0.24\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$ (束中 $H_1^+ \quad H_2^+ \quad H_3^+ = 0.7 \quad 0.2 \quad 0.1$),离子温度 $T_i = 1\text{eV}$ 时,由栅缝出射的各小束的均方根角度 $\alpha = 0.492^\circ$,85%束散角 $\alpha_{85} = 0.720^\circ$,最大束散角 $\alpha_{max} = 0.915^\circ$ 。图 1 也给出了此时的束轨迹。图 2 给出了当束流密度变化时由栅缝出射的各小束均方根散角 α 和 85%束散角 α_{85} 的变化,可明显地看到束流密度过小和过大时束的发散。数值模拟表明,与该系统匹配的氢离子束流密度约为 $j = 0.24\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。

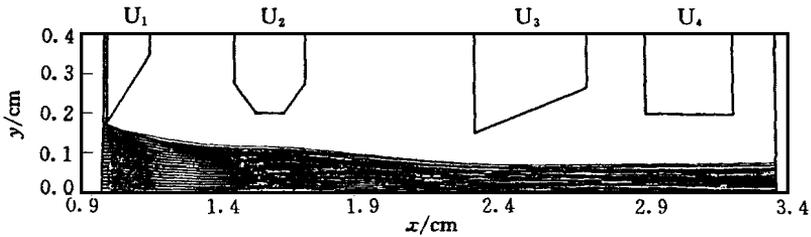


图 1 “匹配”流密度 $j = 0.24\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$ ($H_1^+ \quad H_2^+ \quad H_3^+ = 0.7 \quad 0.2 \quad 0.1$) 的离子束轨迹
 $U_1 = 60\text{kV}, U_2 = 46\text{kV}, U_3 = -2\text{kV}, U_4 = 0, T_i = 1\text{eV}$ 。

3.2 引出间隙电场 E_1 与加速间隙电场 E_2 比例的变化对束特性的影响

对于图 1 所示系统,仅通过变化 U_2 电位而将引出间隙电场与加速间隙电场比例 E_1/E_2 由 0.58 变为 0.70 时引起的束特性的变化列于表 1。

表 1 不同 E_1/E_2 时的束射出参数

E_1/E_2	小束均方根散角 $/\circ$	85%束散角 $/\circ$	最大束散角 $/\circ$
0.58	0.492	0.720	0.915
0.70	0.754	0.934	2.711

因 E_1/E_2 的不同引起的束特性的变化体现了第二电极(梯度栅)缝的透镜作用,当 E_1/E_2 为 0.58 时可由图 3 明显看到梯度栅孔附近加速间隙等位线朝向引出区的弯曲,即形成聚焦作用。

3.3 抑制栅负电位的作用

抑制栅位形能有效抑制反流电子,同时保持良好的束光学特性为目标来确定。

在图 1 所示系统中,当抑制栅电位由 -1kV 到 -2kV 变化时对束散角的影响不大。但当负电位的绝对值降到一定程度时,在抑制栅缝附近正离子束流经区域的负电位可能降低到不能有效抑制反流电子的程度。图 3 所示的系统等位线分布已表明在抑制栅缝附近束中心区域的负电位绝对值远低于抑制栅所加的负电位绝对值。对于图 1 所示的 60kV 四电极系统, U_3 取在 -1.5kV 到 -2kV 较合理,这个参数的选取与系统能量、电场位形、抑制栅厚度及缝宽等几何尺寸相关。

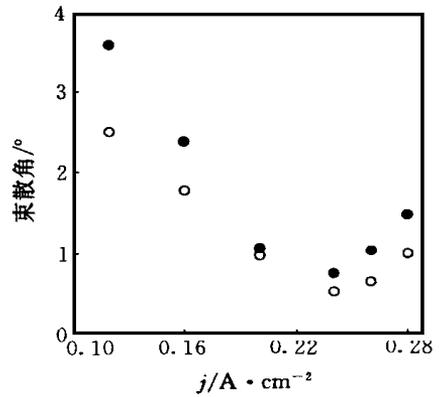


图 2 束流密度 j 的变化对束散角的影响
系统其他参数同图 1。——各小束均方根散角；——85%束散角。

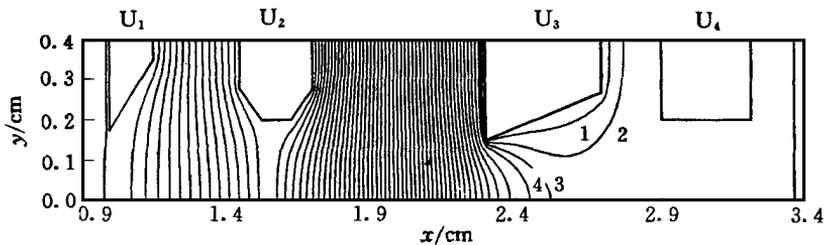


图 3 系统的电位分布

系统参数同图 1。1——1.7kV;2——1.2kV;3——0.7kV;4——0.2kV。

3.4 源放电等离子体离子温度 T_i 对束光学特性的影响

在 2.2 节中已阐明,在我们的数值模拟物理模型中包括了表征离子初始无规则热速度的离子温度 T_i 与离子初始发射条件的相关性。数值计算结果证实了 T_i 对系统出射束光学特性的影响。表 2 给出了对于图 1 所示系统, $U_1 = 60kV$, $U_2 = 46kV$, $U_3 = -2kV$, $U_4 = 0kV$, 流密度 $j = 0.24A \cdot cm^{-2}$ (束中 $H_1^+ H_2^+ H_3^+ = 0.7 0.2 0.1$) 时,出射束散角随离子温度 T_i 的变化。 T_i 较高时,散角也较大。当 $T_i = 0$ 时,即离子全部以与发射面垂直的方向发射的情况下,可以认为出射束的散角是由系统的象差所致。

表 2 离子温度对束特性的影响

T_i/eV	均方根散角 /°	85 % 束散角 /°	最大束散角 /°
2	0.631	0.927	1.119
1	0.492	0.720	0.915
0	0.283	0.333	0.691

该引出、加速系统各电极栅缝的几何尺寸对束光学特性亦有影响,与三电极引出系统一样,束光学特性对等离子体栅几何形状的变化最为敏感^[3]。

4 讨论

为引出较高能量、大束流密度离子束,通常采用低压引出、后加速到高能加-加-减速四电极或多电极系统。这种系统的优点在于既能引出较高束流密度并将束加速至较高能量,又能通过调整引出间隙和加速间隙电场的比来改善束光学特性。可低能引出较高束流密度的机理在于引出流密度 j_{ext} 的 $3/2$ 次方定律:

$$j_{\text{ext}} = AU^{3/2}/d^2 \quad (5)$$

式中, U 、 d 分别为引出电压和引出间隙; A 为与系统参数相关的常数,和间隙击穿电压 U_B 与间隙 d 的非线性关系:

$$U_B = Bd^{1/2} \quad (6)$$

式中, B 为与离子源工作状态相关的常数。

由式(6),当引出电压增高时,在保证不击穿的情况下,须将引出间隙以与电压增高倍数的平方量增加,由式(5)知这必然使引出束流密度降低。因此为提高引出束流密度,通常以低压引出。我们选择 14kV 的低压引出离子,再加速至所要求的 60keV 能量。同时,为获得满意的束光学特性,将引出间隙电场 E_1 与加速间隙电场 E_2 的比便调整为 $E_1/E_2 = 0.58$ 。

对于缝形引出系统,与缝平行方向的离子束的散焦主要受等离子体离子温度的影响,而离子束在与缝垂直方向的发散则是由离子温度和引出系统的象差两个因素造成的,故在该方向上离子束的发散较大^[4,5]。在我们的 2D 程序中,模拟了离子在引出、加速过程中与缝垂直方向上的运动行为。

利用在离子发射面附近的电位分布,验算了系统的引出流密度,表明其与等离子体发射流密度相符,均约为 $0.24A \cdot cm^{-2}$ 。这既表明发射面位形的可信性,也证实对于 $302.4cm^2$ 的有效引出面积,可得到约 72.6A 的氢离子束流。

因要求束脉冲宽度为 2s,必须对各电极进行强力水冷,为此在各电极的栅缝之间埋置 $\varnothing. 2cm$ 的蒸馏水冷却水道。

我们将离子发射面分别取在与壁同电位的等位面 and 等离子体的经典鞘层上,并根据等离子体-鞘层方程的数值解分别确定了在两种发射面上不同的离子初始发射条件和发射面形状,在设定上述两种发射面情况下所得到的系统的数值模拟结果相近,这也说明采用的简化等

离子体 - 鞘层模型是较为合理的。

参考文献

- [1] 王惠三,简广德. 由等离子体引出强流离子束的光学数值模拟 [J]. 核聚变与等离子体物理,1985,5(1):33.
- [2] Self A. Exact Solution of Collisionless Plasma-Sheath Equation [J]. Phys. Fluids,1963,6(12):1762.
- [3] 王惠三,简广德. HL-2 中性束注入器离子束系统的设计计算 [R]. 中国核科技报告, CNIC-01051 SIP-0089. 1996.
- [4] 张华顺. 离子源与大功率中性束源 [M]. 原子能出版社,1985.
- [5] Vella M C. Development Testing of the U. S. Common Long Pulse Source at 120kV [J]. Rev. Sci. Instrum.,1988,59(11):2357.

NUMERICAL SIMULATION OF THE EXTRACTION-ACCELERATION SYSTEM FOR A 60kV ION SOURCE

WANG Hui-san, JIAN Guang-de, ZHOU Cai-pin, LEI Guang-jiu,
JIANG Shao-feng, LU Da-lun, JIANG Tao
(Southwestern Institute of Physics, Chengdu 610041)

Abstract: Numerical simulation has been done on the tetrode extraction-acceleration system for an ion source with 60kV, 70A and 2s. The system was optimized according to the calculation results. The maximum divergence angle of the beam is less than 1° when the ion current density is 0.24A cm^{-2} ($H_1^+ H_2^+ H_3^+ = 0.7\ 0.2\ 0.1$ in the beam) and the ion temperature of the ion source plasma is 1eV.

Key words: Ion extraction-acceleration system; Numerical simulation