

微波离子枪离子束光学的数值模拟*

施立群** 彭士香 冯慧云 王绍虎 余增亮

(中国科学院等离子体物理研究所 合肥 230031)

摘要 用数值模拟方法研究了聚焦离子束系统中微波离子枪的束光学性能。将离子枪看作由源等离子体极和Orloff-Swanson透镜组成的双级加速系统,分析了各参量对束发散特性的影响。结果展示出引出束光学主要取决于引出导流系数和电势分布,在一定条件下可获得发散度小的离子束。

关键词 微波离子枪, 数值模拟, 离子束光学

随着低能离子生物学研究的深入,微米聚焦离子束(FIB)细胞注入及单离子注入技术正在兴起,并对这一学科的发展产生了重大影响。然而,发展离子束细胞加工的关键之一是离子束的微细化及离子注入定位技术。根据离子注入的生物效应对注入离子的要求(即 N^+ 、 H^+ 、 O^+ 、 C^+ 、 P^+ 等DNA组分离子),在最近研制的聚焦离子束系统中^[1],采用了微波等离子体源,它与Orloff-Swanson(O-S)透镜组成微波离子枪。选用O-S透镜,不仅因为它有很小的球差、色差,与场致发射源构成的离子枪可形成很好的亚微米离子束^[2];而且在微波源情况下,也能最终形成束斑小、靶电流相对大的微米离子束。

在设计FIB光学系统中,常要求离子枪在光阑孔处形成束流密度大、发散角小的平行离子束。而且,聚焦离子束的性能随着引出束的发散角减小而显著提高。因此,对离子枪光学系统的优化设计就显得十分必要,本文用数值模拟方法研究引出束的光学特性。

1 离子枪光学系统结构

图1为离子枪光学系统的结构,可将它看成是由有源电极和O-S透镜组成的双级-引出

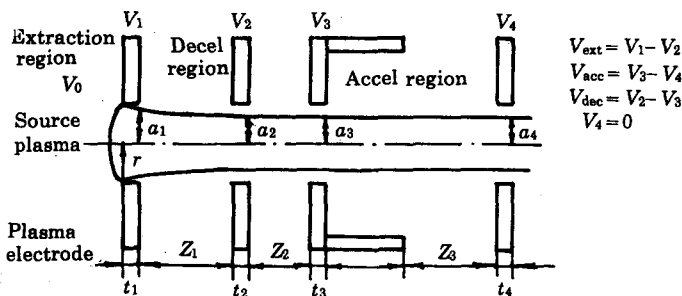


图1 离子枪光学系统结构示意图
Fig.1 Schematic of ion gun column

* 国家“八五”重点科技攻关资助项目

** 现在复旦大学现代物理研究所工作

收稿日期:1997-09-24, 修回日期:1997-12-01

加速系统。由1、2电极构成引出区,也称第一级加速区;2、3电极构成阻止区;3、4电极构成第二级加速区。与通常的双级-四电极引出系统不一样,阻止场加在2、3电极之间,只可阻挡掉部分飞向源内的电子。但由于引出束流小,对FIB系统工作影响不大。与双级加速系统分析类似,有许多参量影响束的光学性能,如:引出间隙导流系数($P = I/V_{\text{ext}}^{3/2}$)、电压比($\Gamma = V_{\text{acc}}/V_{\text{ext}}$)、间隙比($f = z_2/z_1$)、纵横比($S = r/z_1$)、阻止间隙比($g = z_3/z_1$)、阻止电压(V_{dec})、总能量 E 、源等离子体离子温度(T_i)、第三电极形状、孔形等。然而我们仅考察以下几方面问题:(1)在不同纵横比 S 下 Γ 对束光学的影响;(2)源电极孔形的影响;(3) f 的影响;(4) V_{dec} 的影响;(5)离子束能量 E 的影响。

2 计算机模拟方法

模拟的数学模型都是基于Poisson-Vlasov方程的自治解和等离子体鞘理论。现已发展了许多模拟程序^[3-6],我们应用了Fu等^[7]基于著名的EGUN程序^[8]发展起来的离子束引出程序IGUN,并加以改进,成为IGUN-PC^[1]。它特别适合于强空间电荷和强磁场离子源。与另一些离子引出程序相比,它可以按问题需要进行分段计算,并将前一段的最终轨迹用在后段的初始发射条件上;它也可用在轴对称和矩形坐标上,包括轴对称和横向磁场。

在IGUN程序中,将发射面推到距等离子体极约100个德拜长度(λ_D)处,由于这儿的等位面已基本上接近平面,并不因等离子体参数而改变,故可假设发射面为一平面。鞘层边界(即等效发射面)可较准确地从等离子体-鞘层方程确定,而发射面的电势等于源电极势。初始离子漂移能 eU_i ($eU_i = (Mv_0^2)/2$,其中, M 是离子质量, v_0 是离子初始漂移速度)要满足Bothm条件,即 $U_i > U_e/2$, $eU_e (= kT_e, k$ 是Boltzmann常数)为电子形成一静电屏蔽的特征能量。

离子温度 T_i 决定了初始发射离子的运动方向,为了数值模拟这一影响,假定 T_i 所表征的离子初始无规热运动速度服从具有定向漂移速度的Maxwell分布。

为了避免高密度下可能产生的不收敛或加速它的收敛性,可适当提高离子定向漂移能和电子温度。模拟结果表明收敛后的光学特性与其关系不大,因此这一方法是可靠的。在模拟中,取 $kT_i = 1\text{eV}$, $U_e = 10\text{V}$, $U_i = 10\text{V}$,网格单位Unit=0.3333mm。

3 计算机模拟结果

3.1 不同纵横比 S 下电压比对束光学的影响

两种小纵横比 S 下,离子束方均根半散角 ω 与相对引出导流系数 P/P_0 和 Γ 的关系如图2所示,束能为30keV。为方便起见,这里用 P/P_0 描述束引出的发散性,其中 P_0 是一维平面二极管Child-Langmuir空间电荷限制导流系数

$$P_0 = (4/9) \pi (r^2/d^2) \epsilon_0 (2e/M)^{1/2}$$

式中, ϵ_0 为真空介电常数。图3为两种 Γ 下最佳导流系数附近的离子轨迹。从图2、3可看出:(1)随着 Γ 的增大,最佳导流系数(P/P_0)_{optimum}下的发散角 ω_{min} 减小。当 Γ 较大,即 V_{ext} 小、 V_{dec} 较大(V_{total} 固定)时,源等离子电极的聚焦效果相对较弱,因此初次聚焦的束角较小,经阻止场后开始发散,但在第二级加速场(O-S透镜的加速离子段)作用下,形成了很好的平行束;相反,若 Γ 小,即 V_{ext} 大而 V_{acc} 小,离子束在源电极形成强聚焦后在阻止场开始发散,第二级加速场聚焦作用也相对较弱,不能把它聚成平行束;(2) Γ 增大,最小发散角

$\omega_{\min}$ 的 $(P/P_0)_{\text{optimum}}$ 也增大。这是因为 V_{acc} 大就能允许离子到达阻止场时有相对大的发散,等离子体密度就可相对高些,等离子体鞘层进一步扩展到引出区,这时空间电荷效果也大,可抵消部分在等离子体电极产生的象差;(3) Γ 增大, ω 与 P/P_0 的关系较弱,且束质量较高。等离子体密度的波动对束质量的影响甚小,这是由于第二级加速聚焦场的缘故。

图4为较大 S 时,两种 Γ 下的离子轨迹。与小 S 的情形相比,主要是当 Γ 相对小时, $(P/P_0)_{\text{optimum}}$ 下的 $\omega_{\min}$ 较小 S 时小,尤其是 $\Gamma=3.2$ 时,最佳导流系数也相对很大,可在高导流系数下获得好的束光学。这对高密度等离子体源是很重要的,因为通常强流离子源都要求高密度的等离子体,且引出孔要大(S 大),希望工作在相对低的 Γ 下,以获得高质量的强流离子束。另外 ω 与 P/P_0 的关系在最佳导流系数下与小 S 情况相比,峰显得较尖锐。

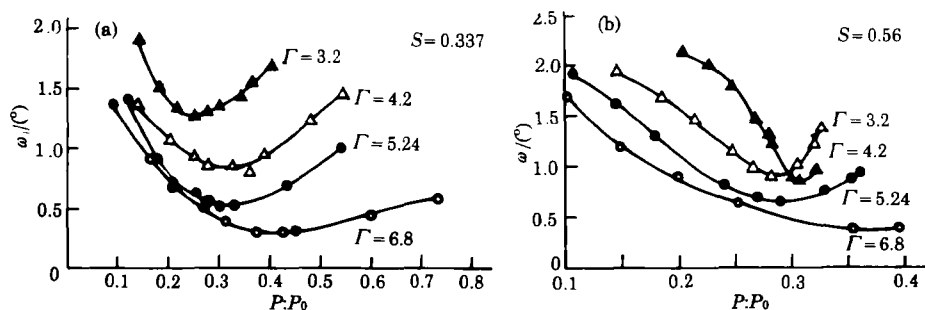


图2 不同电压比下的束发散与导流系数的关系
 $f=1.67, g=0.44$

Fig.2 Dependence of beam divergence on extraction perveance for different voltage ratio

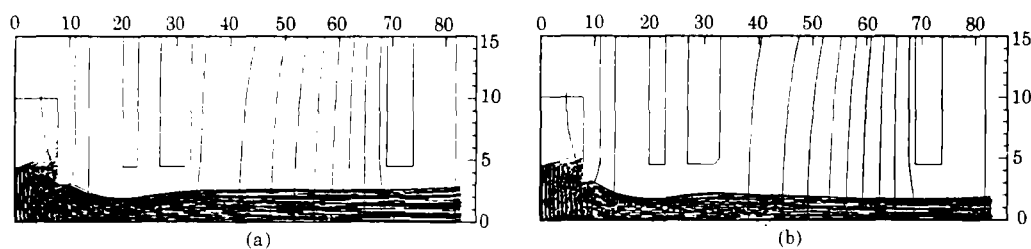


图3 小纵横比下的离子束轨迹和势分布

(a) $\Gamma=3.2, S=0.337$, (b) $\Gamma=5.24, S=0.337$

Fig.3 Ion trajectories and potential distribution in two cases with smaller S

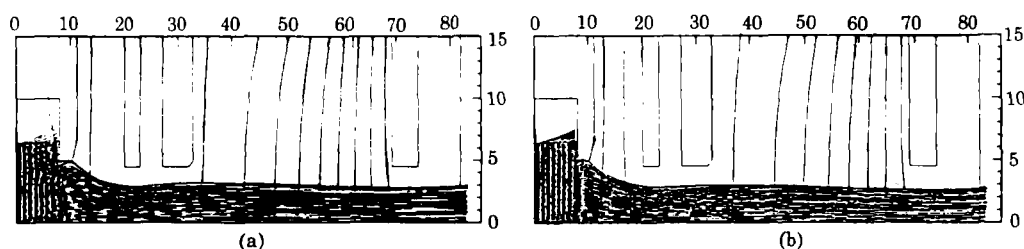


图4 较大纵横比下的离子束轨迹和势分布

(a) $\Gamma=3.2, S=0.56$, (b) $\Gamma=5.24, S=0.56$

Fig.4 Ion trajectories and potential distribution in two cases with larger S

3.2 相对间隙比和孔形的影响

3.2.1 相对间隙比。图5为不同的 f 下 ω 与 P/P_0 的关系。从图5可见,随着 f 的减小,相对场强 Γ/f 增大。因此在引出场强和总势能恒定的情况下,加速场必增大。由于引出孔的聚焦长度是恒定的,而加速结构的聚焦长度是不同的,在空间电荷的共同作用下,就会得出上述结果。

3.2.2 孔形。源电极孔的形状对引出离子束的性能有较大的影响。最简单的孔是圆柱孔,但由于这种孔形的边缘处电场畸变大,离子受到非线性力作用,造成离子发射度图形的扭曲并使 $\omega_{\min}$ 较大。为了减小 $\omega_{\min}$,通常采用外斜孔,且 $\omega_{\min}$ 随孔边缘的倒角加深而减小^[9]。但若倒角过深,使 $\omega_{\min}$ 对应的导流系数减小过多。

图6为圆柱直孔等离子体极的离子束轨迹。圆柱孔形和一定倒角深度的外斜孔形的离子发射度图形如图7所示,它们都是 $\omega_{\min}$ 附近的情况。很显然,外斜孔形的束光学性能远好于直孔形,但此时引出离子仍受较小的非线性力作用,不能完全消除。

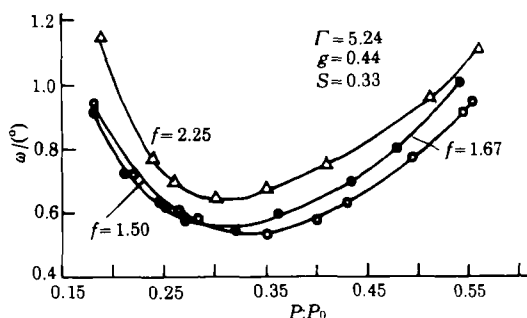


图5 不同间隙比 f 下的 ω 与 P/P_0 的关系

Fig.5 Dependence of beam divergence on extraction perveance for different gap ratio

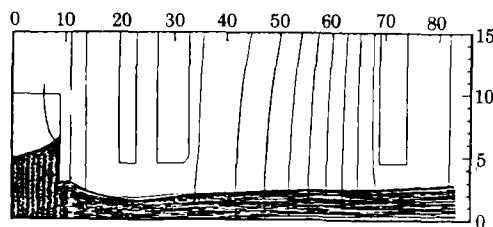


图6 圆柱直孔等离子体极的离子束轨迹

Fig.6 Ion trajectories for plasma electrode with a straight bore aperture

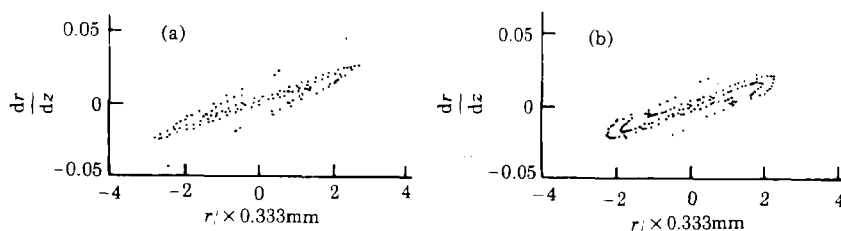


图7 圆柱孔(a)和外斜孔(b)的离子发射度图形

Fig.7 Emittance diagrams of ions in the cases straight bore aperture (a) and aperture with chamfered edge (b)

3.3 阻止场的效果

从空间电荷效应对离子源的保护和运行稳定来讲,增加 V_{dec} 有利于防止空间电子向源电极运动,并中和离子的空间电荷以减小束的发散。而从离子束光学效果看,在一定的阻止电压下也能减小束的发散,但存在着一最大阻止电压,此后再增加 V_{dec} 将使束光学变坏,但束径减小。

图8为阻止电压对束方均根半散角 ω 和束方均根半径 r 的影响。增加气体压力可提高离子空间电荷的中和程度,但不能太大,以影响离子传输。

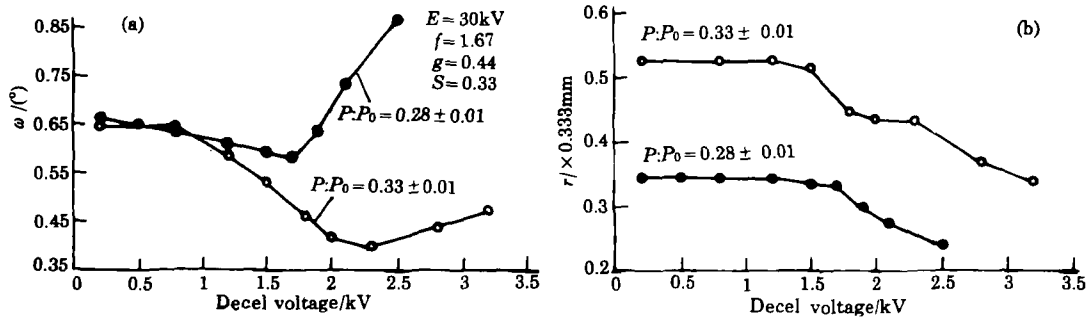


图8 阻止电压与离子束发散角和半径的关系

Fig.8 Decel voltage versus ion beam divergence angle and radius

3.4 离子束能量的影响

图9为不同能量 E 下束方均根半散角 ω 与相对导流系数 P/P_0 的关系。增加 E 可使 ω 明显减小,且使最佳导流系数也增加。 E 的增加,使离子运动速度 v 提高,不仅可减小束粒子发射度,而且可减少非线性力造成的发射度图形的扭曲。这可从发射度的关系式得到解释

$$\varepsilon = (2R/v)(kT_i/M)^{1/2}$$

式中, R 为束半径。

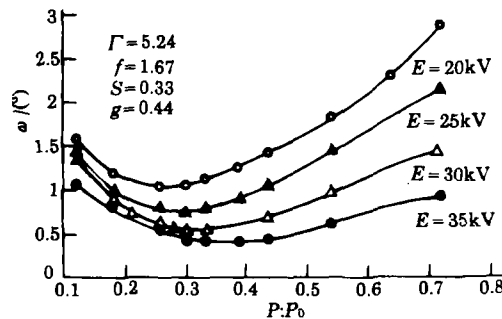


图9 束能量对离子束发散性的影响

Fig.9 Influence of beam energy on beam divergence

4 结论

用数值模拟方法研究了微波离子枪光学系统的主要参数对引出束光学的影响,为聚焦离子束光学系统设计提供了重要依据。将这一光学系统看成由微波等离子体源和O-S透镜组成的双级加速系统,模拟得出:

(1) 引出导流系数 P 和电压比 Γ 是影响离子束光学性能的主要参数, P 和 Γ 的最佳匹配能获得束发散很小的平行离子束,可满足FIB系统的要求。

(2) 离子枪在提高束能的同时,束的发散性大为减小。这是空间电荷效应、离子温度效应减小等共同作用的结果。

(3) 为了使离子源在高等离子体密度下运行,该双级加速系统在大纵横比 S 和低电压比 Γ 下,可取得很好的束光学特性。

参 考 文 献

- 1 施立群. 聚焦离子束装置及束传输特性的研究. 中国科学院等离子体物理研究所博士论文, 1997
- 2 Narum D H, Pease R F W. J Vac Sci Technol, 1988, **B6**(3):366-973
- 3 Spadike P. AXCEL-GSI, GSI internal report 1983, 83-9
- 4 Becker R, Herrmannsfelt W B. Rev Sci Instr, 1992, **3**:2756-2758
- 5 Spadike P. Rev Sci Instr, 1994, **65**:1419-1422
- 6 Becker R. Rev Sci Instr, 1996, **67**:1132-1134
- 7 Fu S, Kitagawa A, Yamada S. Simulation study on ion extraction from ECR ion source. NIRS-M-96, Japan
- 8 Herrmannsfelt W B. EGUN—An electron optics and gun design program, SLAC-Report-331, 1988
- 9 Yoshihiro Ohara. J Appl Phys, 1978, **49**(9):4711-4717

Numerical simulation for ion beam optics of a microwave ion gun

SHI Liqun PENG Shixiang FENG Huiyun WANG Shaohu YU Zengliang

(Institute of Plasma Physics, the Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031)

Abstract

The ion beam optics of a microwave ion gun for a focused ion beam (FIB) system is investigated numerically in this article. Considering the ion beam optics of the gun as a two-stage acceleration system consisting of plasma electrode and Orloff-Swason lens, effects of some primary parameters on the beam divergence are examined. The results show that beam divergence of the system depends mainly on the extraction perveance and voltage ratio, and a minimum beam divergence can be obtained under optimum conditions.

Key words Microwave ion gun, Numerical simulation, Ion beam optics