

离子源引出系统研究

陈立华¹⁾ 崔保群 蒋渭生 李爱玲

(中国原子能科学研究院 北京 102413)

摘要 扩展Pierce理论的应用范围,通过解析求解泊松方程和拉氏方程,在固定发射面的情况下,得到了在给定束流强度密度下带状平行束外空间电位分布的一般方法,可为引出系统的设计提供一定的参考.

关键词 离子源 引出系统 平行束

1 引言

离子源引出系统是决定引出束流性能的关键部分.在不同的使用场合,对引出束流性能有着不同的要求.在许多离子束及加速器设备中,平行引出束以其在后续设备元件中的便于处理性,一直以来备受人们的关注.考虑到空间电荷效应,离子束会发散,必须用一定结构的磁场或电场对束流进行会聚,才能保证束流性能满足要求^[1].Pierce提出可以通过在束流周围加上适当结构的电极,使它产生的电场可以补偿离子束的空间电荷效应^[2, 3].Pierce提出这种原理,并在空间电荷限制流^[3]下,得到了平行带状束的解析解^[4],之后Daykin给出了轴对称柱状平行束的解析解^[5],在1957年,Radley在数学上对这些解的可靠性进行了分析^[6].值得注意的是,这些计算都在空间电荷限制流下进行求解的,而实际中由于其他因素的限制,离子源一般不是工作在空间电荷限制流.随着束流强度的变化,引出平行束附近的电位分布会随之变化.为了设计出结构合理的引出电极系统,需要了解不同束流强度引出平行束周围的空间电位变化情况.

2 理论分析

为了得到不同束流强度平行束附近电位的变化情况,我们可以采用这样的物理图象:根据空间电荷流的一般特性^[3],对于电子枪,发射面表面的电场强度主要取决于两个因素:1)接近发射电极的空间电位分布;2)发射电流所体现出的空间电荷所产生的电位分布;二者相互作用,最终决定发射面上的电场强度.

发射电流的逐渐增加,将会使接近发射电极的电位逐步降低.当整个发射电极表面上的场强减小到零,这时的发射电流即为空间电荷限制流.而在实际使用中,往往由于源的发射能力的限制,即使达到最大的发射能力,发射电流也不能达到空间电荷限制流,这时就不能使发射电极表面的电场强度为零,发射面上将存在“剩余电场强度” E_0 .易知,随着电流从零增加到空间电荷限制流, E_0 从最大值逐渐降低到零.

在离子源中,发射面的形成和形状往往比较复杂.由于我们关心的是不同引出束流强度对周围电位分布的影响,并不是发射面的形成及形状,为了简单起见,可以采用与电子枪类似的假设,假定离子源存在一个假想的“固定”发射面,其上场强为 E_0 .

为了方便,在下文的阐述中,将不区分离子和电子,统称为“离子”.

3 主要计算过程

3.1 束流轴上的电位分布

根据以上分析,可以假定离子发射面的坐标为 $z=0$,离子收集面的坐标为 z_0 ,两个平面都无限大.按这样给定的几何排列,电场的特性只与垂直于这两个平面的坐标 z 有关.同时假定离子发射面所处的电位为 $V=0$,其上的剩余电场强度为 E_0 ,离子收集面的电位为 V_a .引出离子的荷质比用 η 表示, ϵ_0 为真空下介电常数.

于是,由空间电位分布的泊松方程,可以得到无限大平面间,束流密度为 J 所满足的方程:

$$\frac{d^2V}{dz^2} = -\frac{J}{\epsilon_0\sqrt{2\eta}V^{\frac{1}{2}}}. \quad (1)$$

2008 - 01 - 07 收稿

1) E-mail: lihuachen@ciae.ac.cn

需要满足的边界条件

$$\begin{cases} V|_{z=0} = 0, & \frac{dV}{dz}|_{z=0} = E_0 \\ V|_{z=z_0} = V_a \end{cases} \quad (2)$$

在边界条件(2)下求解(1)方程,可得到V满足的方程式如下:

$$\left(-\frac{\epsilon_0\sqrt{2\eta}}{3J}V^{\frac{1}{2}} - \frac{\eta\epsilon_0^2E_0^2}{3J^2} \right) \times \sqrt{-\frac{4J}{\epsilon_0\sqrt{2\eta}}V^{\frac{1}{2}} + E_0^2 - \frac{\eta\epsilon_0^2E_0^3}{3J^2}} = z. \quad (3)$$

当 $z = z_0$ 时,可以得到一定 J 时的 E_0 值.

对于束流密度一定的情况,即 J 和 E_0 一定,利用(4)式计算沿轴方向(z 方向) $V(z)$ 的值,并将 $V(z)$ 近似简化为

$$V(z) = Az^b, \quad (4)$$

这里 A, b 分别是与 J, E_0 有关的常数,且 $4/3 \geq b \geq 1$. $V(z)$ 即是引出束流束流轴上电位分布的表达式.

3.2 束流附近的电位分布

根据Pierce理论,从无限大平板间取出一定形状的束流,可以通过选取适当形状和电位所产生的电场来取代所取束流外部离子的影响^[3].从无限大平板间取带状平行束,在束流外部可以建立拉普拉斯方程:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 0, \quad (5)$$

其边界条件为

$$\begin{cases} V(0, z) = V(z) = Az^b \\ \frac{\partial V}{\partial y}|_{y=0} = 0 \end{cases}, \quad (6)$$

利用复变函数性质,计算 $y > 0$ 时(5)式的解为

$$V(y, z) = A(z^2 + y^2)^{\frac{b}{2}} \cos(b \arctan \frac{y}{z}). \quad (7)$$

令 $V = \text{常数}$, 就可以得到等位面的形状.取不同的电位值,同时考虑到带状束的对称性,便可以得到平行带状束外空间的电位分布.

例如,对于质量数 $A=2$, 电荷数 $Z=1$ 的离子,当 $V_a=40\text{kV}$, $z_0=10\text{mm}$ 时,束流密度 $|J| \approx 215\text{mA/cm}^2$ 时,利用上述方法可以得到周围的电位分布如图1(等位线上的数字代表引出电压 V_a 的倍数)所示.下面考虑零电位电极的形状.当 $V=0$ 时,由(7)式可得角度

$$\beta = \frac{\pi}{2b}(2k+1), \quad (8)$$

其中 $k=0$ 时,就可以得到零电位电极在 (y, z) 平面的

平面,它与 z 轴成张角

$$\alpha = \frac{\pi}{2b}, \quad (9)$$

当 $k=1$ 时, $\alpha = \frac{3\pi}{2b}$, 等外线延伸到第三象限.当 $k \geq 2$ 时,式(8)无效.

随着束流密度 J 在 $0 \sim J_{\text{max}}$ (空间电荷限制流)之间变化时, α (零电位等位面与束流边界所成的角度)将在 90° 到 67.5° 之间变化,见表1.

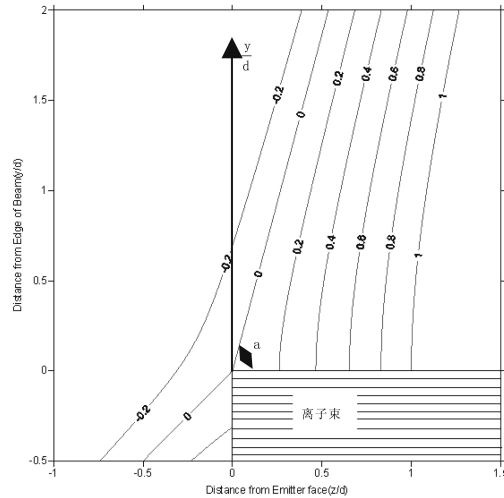


图 1 带状离子束附近的电位分布

表 1 束流密度 $|J|$ 与 α 的关系

$J/(\text{mA/cm}^2)$	$\alpha/(\text{°})$
307.756	67.5
285.816	69.528
270.537	70.871
252.015	72.348
214.704	75.236
170.185	78.508
119.202	82.122
62.323	85.961
0	90.0

4 结论

本文探讨了一种在固定平面发射面的理想情况下,解析计算给定束流密度的平行带状束外空间电位分布的方法.此方法不仅使用于空间电荷流,而且适用于流强小于空间电荷限制流的情况.利用该方法可以了解理想情况下平行束周围电位分布随束流强度的变化情况,从而为离子源及电子枪的设计提供一定的帮助.实际工作中,而离子源的发射面情况往往比较复杂,另外由于束流引出的孔径效应、空间电荷中和以及热初速等其他因素的影响,尚需要进一步进行数值计算才能得到合适的引出电极结构.

参考文献(References)

- 1 ZHANG Yi-Chen. The Technique of Electron Gun and Ion Beam. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2004. 49—57 (in Chinese)
(张以忱. 电子枪与离子束技术. 北京: 冶金工业出版社, 2004. 49—57)
- 2 YU Qing-Chang. The Theory of High Current Ion Optics. Beijing: Atomic Energy Press, 1982. 75 (in Chinese)
- 3 (郁庆长. 强流离子光学原理. 北京: 原子能出版社, 1982. 75)
- 3 Nagy G A, Szilagy M (1974). Introduction to the Theory of Space-Charge Optics. Mo Yun-long et al. Beijing: Science Press, 1983. 118—127 (in Chinese)
(G. A. 纳吉, M. 西拉支(1974). 空间电荷光学导论. 莫云龙等. 北京: 科学出版社, 1983. 84—85 & 118—127)
- 4 Pierce J R. J. Appl. Phys., 1940, **11**: 548—554
- 5 Daykin P N. Brit. J. Appl. Phys., 1954, **6**(7): 248—250
- 6 Radley D E. J. Electron. Control, 1958, **4**(2): 125—148

Calculation of Extraction System of Ion Sources

CHEN Li-Hua¹⁾ CUI Bao-Qun JIANG Wei-Sheng LI Ai-Ling

(Department of Nuclear Physics, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract In order to extract parallel beam from ion sources, it's necessary to design suitable electrode configurations in extraction zone. Taking the effect of the space-charge into account, the electrode configurations should vary with beam current density. A means of calculating extraction configuration of parallel beam with certain current density has been evolved from the space-charge limited current. By solving Poisson equation and Laplace equation, the potential distribution close to the strip beam has been gotten.

Key words ion source, extraction, parallel beam