

高频离子源引出结构最佳 尺寸的光学计算*

戚 謙

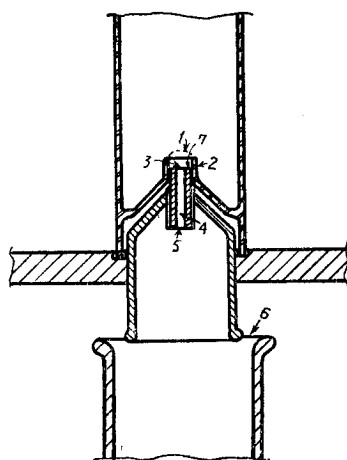
提 要

本文对离子流的引出机构作了简化模型,导出了引出结构最佳尺寸比的计算公式和曲线。

一、引 言

高频离子源是目前静电加速器和高压倍加器的最好离子源形式,它的优点是高效率,低功率消耗,高的质子比,离子能量均匀,低气耗等^[1]。为了发挥其优点,选取合适的引出结构形状与尺寸是很重要的。在这方面已有不少实验结果,典型的当推欧板克(Eubank, H. P.)^[4]和谢皮诺夫(Сербинов, А. Н.)^[5],他们都从实验得到了离子源引出结构的最佳尺寸;作为用理论分析寻求最佳尺寸的一个尝试,本文应用了一般的电子光学公式,对引出结构进行了计算。

在计算之前,应对离子流引出的光学机构有一整体的了解。为此,现将已有的实验结论摘要如下:



1. 发射面; 2. 绝缘套筒; 3. 吸极通道入口; 4. 吸极通道; 5. 吸极通道出口; 6. 离子源后的聚焦透镜; 7. 吸极顶部

图1 高频离子源的引出结构
(引用[2])

论摘要如下:

1. 离子的发射面是曲面,其曲率随吸极电压的增高而加大,而随高频功率和放电室中气体的压力(下简称气压)的增高而减小^[4]。绝缘套筒起着固定等离子区边界的作用^[2,6](如图1)。

2. 大部分从发射面发出的离子通过一粗略地为球形等位面电场后得到会聚,进入吸极通道入口^[1]。

3. 在进入吸极通道以后,离子束具有一最小截面。并且,由吸极电压、高频功率、气压变化所引起的发射面曲率的变化会导致最小截面位置和最小截面大小的变动^[3,7]。

4. 由于上述发射面曲率的变化所引起最小截面的大小和位置的变化又引起了吸极截获离子流的变化,就有所谓“欠聚焦”,“最佳”,“过聚焦”三种情况^[4]。

根据这些结果,作者设想了一幅离子源光学机构可能的图象(图2)。其中,横坐标的正方向对应于吸极电

* 1962年7月28日收到,1963年3月25日收到修改稿。

压 V_x 的增加; 纵坐标的正方向对应于等离子区离子密度 n_i 的增大 (即对应于气压、高频功率、电离几率的增大); 竖坐标的高度表示离子流的强弱。

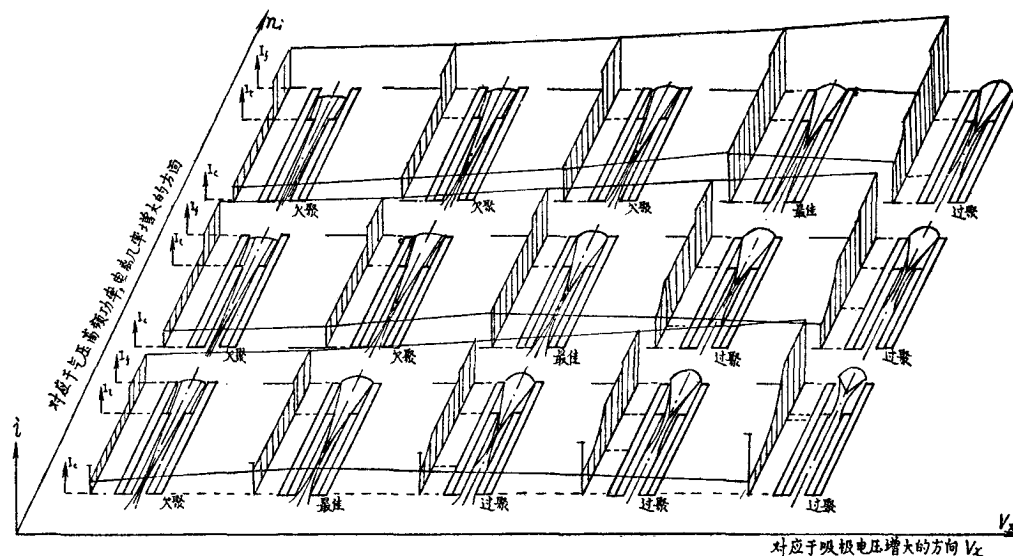


图2 高频离子源的引出机构

图中清楚地表明了:

1. 若 n_i 保持一定 (气压及高频功率和电离几率保持不变), 则吸极电压 V_x 由低到高的变化使引出情况由“欠聚焦”向“最佳”, 继而向“过聚焦”变化。
2. 若 V_x 保持一定, 则 n_i 的增加 (气压或高频功率或电离几率增加) 将导致引出情况由“过聚焦”向“最佳”继而向“欠聚焦”变化。
3. 从离子流流线及电流指标 (竖坐标) 的高低可看到: 在“欠聚焦”的情况下, 有较多的离子流损失在吸极通道的顶部, 加之由于这时发射的离子流较小, 因此引出流较小。在“过聚焦”时则有较多的离子损失在吸极通道的内壁上。虽然此时发射的离子流很大, 但引出流仍较小。
4. 在“最佳”情况时, 离子束的边缘 (略去弥散的离子) 擦过吸极顶部入口, 进入通道, 并擦通道末端出口而引出。最小截面在吸极通道的正中间。这种情况下, 引出的效率最高。
5. 当吸极电压稍高于“最佳”情况所要求的吸极电压时, 有可能得到比最佳情况所得到的引出离子流稍大的引出流, 因为这时虽然被吸极通道所截获的离子流比最佳时有所增加, 但由于发射的离子流随吸极电压的增加而增加, 总的效应, 可能有最大的引出流。显然这时的引出效率并不是最高。

本文指的最佳情况是: 在引出效率为最高的前提下, 给出较大的引出流的情况。

二、最佳情况下引出机构的简化模型

作为导出公式的前提的简化模型是 (见图 3):

(1) 发射面近似于球面, 其边缘与套筒口接壤¹⁾. 依靠调整吸极电压、气压和高频功率, 可以使它的曲率达到最佳情况的要求。

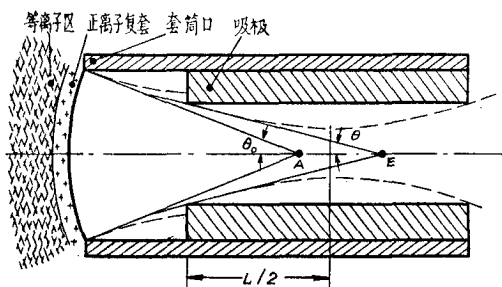


图3 最佳情况下的简化模型

道出口而流出。

(4) 由于离子束不可避免地存在着弥散（例如吸极通道口引起的电力线变形会使离子弥散并被吸极顶部截获），导致进入吸极通道口的离子流不大于发射离子流的60%—80%²⁾。本文用弥散系数 η 来描述此现象。

(5) 离子发射的初速度可忽略；吸极通道出口的等效透镜作用及接在离子源后的聚焦系统对引出的影响也被略去。

本文所采用的符号：电极尺寸（图4）： r = 绝缘套筒内半径； D = 吸极通道内直径； d = 套筒口到通道口的深度； L = 吸极通道的长度。

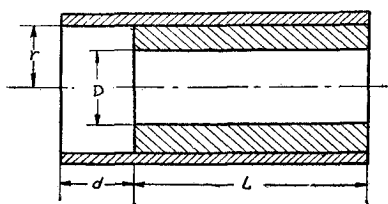


图4 电极尺寸

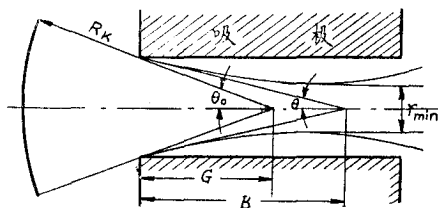


图5 离子束尺寸

离子束尺寸（见图5）： G = 与初会聚角对应的吸极通道口等效透镜的物距； B = 吸极通道口等效透镜的象距； θ_0 = 初会聚角； θ = 有效会聚角； $r_{\min}$ = 束的最小截面半径； R_k = 发射面的曲率半径。

电参量： n_i = 等离子区的平均正离子密度（个/厘米³）； I_f = 发射离子流，即“发射”面发出的离子流（下标 f 系拼音字 f_a 的第一字母）； I_t = 进入通道的离子流（下标 t 系拼音字 $tong$ 的第一字母）； I_c = 引出离子流，即通过吸极通道的出口而引出的离子流（下标 c 系拼音字 chu 的第一字母）； V_x = 吸极电压（下标 x 系拼音字 x_i 之第一字母）； P_f^3 = 发射导流系数 = $I_f/V_x^{3/2}$ ； P_t = 通道导流系数 = $I_t/V_x^{3/2}$ ； P_c = 引出导流系数 = $I_c/V_x^{3/2}$ ；

- 1) 实际上发射面的边缘靠近套筒口，虽随各因素的变动，发射面边缘离套筒口的距离也有变动，但这种变动是较小的，而发射面曲率的变动起主要作用。
- 2) 随结构的尺寸以及发射面曲率等因素的变化，这一弥散损失的离子数目是变化的。例如吸极通道内径的减小，吸极通道入口到发射面距离的加大将使弥散损失减小。
- 3) 一般电子光学常用的参量。

$F^{(1)} = \text{聚焦度} = I_c/I_f = P_c/P_f$; $\eta = \text{弥散系数}$, 即 $I_t = \eta \cdot I_f$ (一般 $\eta = 0.60-0.80$; 最佳情况时, $I_t = I_c$, $\eta = F$); $\sigma^{(2)} = \text{束散系数} = 2\pi\epsilon_0 \sqrt{\frac{2e}{m}} \tan^2 \theta / P$; $\alpha^{(2)} = \text{球修正系数} = \ln \frac{R_a}{R_k} - 0.3 \left(\ln \frac{R_a}{R_k} \right)^2 + 0.075 \left(\ln \frac{R_a}{R_k} \right)^3 + \dots$; $f^{(2)} = \text{吸极通道入口的等效透镜焦距}$.

单位: 长度: cm (厘米); 角度: ° (度); 电流: A (安培); 电压: V (伏特); 导流系数: $P \cdot (\text{朴}) = A/V^{3/2}$.

三、最佳尺寸比的计算

1. 最佳条件下的 θ 与 $\frac{L}{D}$ 的关系:

在等电位空间中, 以 θ 方向入射的圆形截面电子束的发散计算早已提出 (参阅 [8]).

最小截面半径为 (见图 6)

$$r_{\min} = r_0 e^{-\sigma}.$$

最小截面位置可由下式算出:

$$\frac{z_{\min} - z_0}{z_b - z_0} = \int_1^{\frac{r_{\min}}{r_0}} \frac{d\left(\frac{r}{r_0}\right)}{\sqrt{1 + \frac{1}{\sigma} \ln \frac{r}{r_0}}} = F(\sigma). \quad (2)$$

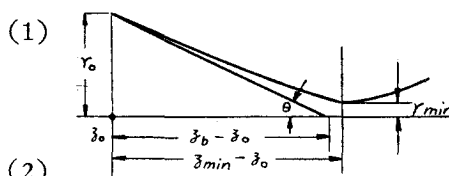


图 6 带电粒子束的发散

在上二式中, $\sigma = 2\pi\epsilon_0 \sqrt{\frac{2e}{m}} \tan^2 \theta / P$ 称束散系数; $f(\sigma) =$ 由式(2)中数值积分得出的 σ 的函数.

对于质子,

$$\sigma = 76.5 \times 10^{-8} \tan^2 \theta / P. \quad (3)$$

根据已拟定的最佳情况的模型, 应有几何关系:

$$z_{\min} - z_0 = \frac{L}{2}, \quad z_b - z_0 = B = \frac{D}{2} \tan \theta.$$

再联合式(2)和式(3), 使得

$$\frac{L}{D} \tan \theta = F(76.5 \times 10^{-8} \tan^2 \theta / P_t). \quad (4)$$

以 $\frac{L}{D}$ 和 P_t 为参变量, 根据式(4) 绘得 θ 对 σ 的函数曲线如图 7. 对于各种不同的 $\frac{L}{D}$ 和 P_t 值, 相应曲线的交点之横坐标即为所求之 θ 值, 纵坐标是对应的 σ 值. 曲线的参变量变化范围已满足一般需要.

该曲线簇表明: 对于一般的 P_c 值 (最佳情况下因吸极通道内壁不截获离子流, $P_c = P_t$), 即 $P_c = 8 \times 10^{-9} \sim 2 \times 10^{-8}$, 选择 $\frac{L}{D} = 4 \sim 5.5$ 是适中的; 这一数值也能符合气

1) 离子源文献中常用的参量.

2) 一般电子光学常用的参量.

耗小的要求^[5]。曲线还表明：随着所要求的 P_c 的增大， $\frac{L}{D}$ 应减小。

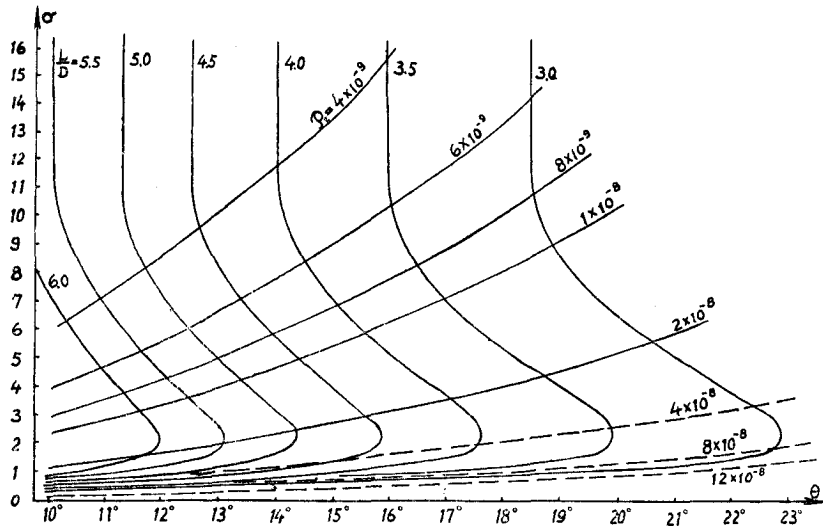


图7 在最佳情况下, θ 与 P_c 及 $\frac{L}{D}$ 的关系曲线

2. d/D 的决定

距离 d 与发射电流的大小有关。考虑到离子的发射处于空间电荷限制之下, 服从二分之三次定律, 所以引用朗缪 (Langmuir) 的球面二极管公式^[9]:

$$I = \frac{16\pi\epsilon_0}{9} \sqrt{\frac{2e}{m}} \left(\frac{1 - \cos\theta}{2} \right) V_x^{3/2} / \alpha^2.$$

对于质子,

$$I = 68 \times 10^{-8} \left(\frac{1 - \cos\theta}{2} \right) V_x^{3/2} / \alpha^2, \quad (5)$$

其中

$$\begin{aligned} \alpha &= \ln \frac{R_a}{R_k} - 0.3 \left(\ln \frac{R_a}{R_k} \right)^2 + \dots, \\ &= -\ln \frac{R_k}{R_a} - 0.3 \left(\ln \frac{R_k}{R_a} \right)^2 + \dots. \end{aligned} \quad (6)$$

令

$$x = \frac{d}{B} = \frac{R_k}{R_a} - 1. \quad (7)$$

在一般情况下, $x = \frac{d}{B} < 1$, 故采取近似公式

$$\ln(1+x) \simeq x - \frac{x^2}{2} \quad (x < 1).$$

式(6)成为

$$\alpha \simeq -x + 0.2x^2 \quad (\text{略去了高次项}).$$

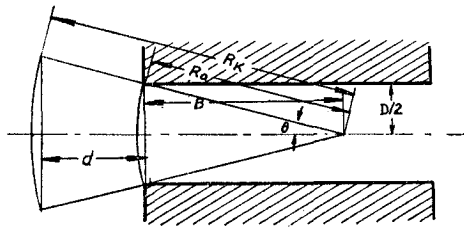


图8 d 的决定

因 $x < 1$, 故 $0.2x$ 为三阶小量, 也可略去。于是

$$\alpha^2 \simeq \left(\frac{d}{B}\right)^2. \quad (8)$$

由式(8)和式(5), 得

$$\frac{d}{B} \simeq \sqrt{68 \times 10^{-8} \left(\frac{1 - \cos \theta}{2}\right) / P_f}. \quad (9)$$

按理, d 应由初会聚角 θ_0 和 G 来计算, 但 θ_0 和 G 都是待求的量, 故这里用 θ 和 B 分别代替 θ_0 和 G 作这一计算, 由于这二个代换对 d 值的影响有部分抵偿作用, 所以对 d 的计算结果来说, 不会造成显著的误差。

再由几何关系 $B = \frac{D}{2} / \tan \theta$, 就得到

$$\frac{d}{D} = \frac{\sqrt{68 \times 10^{-8} \left(\frac{1 - \cos \theta}{2}\right) / P_f}}{2 \tan \theta}; \quad (10a)$$

或写为

$$\frac{d}{D} = 2.1 \times 10^{-4} \cos \theta / \sqrt{P_f \cos \frac{\theta}{2}}. \quad (10b)$$

将式(10)与图 7 联合, 可解出以 P_c 为参变量的 $\frac{d}{D}$ 与 $\frac{L}{D}$ 的关系曲线(如图 9)。此曲线表明:

(1) P_c 增加要求 $\frac{d}{D}$ 减小。通常 d 的减小受耐压的要求的限制, 所以 $\frac{d}{D}$ 的减小主要体现为 D 的增大。

(2) 在一般的导流系数下, $\frac{d}{D}$ 在 1.2 到 1.6 之间。

(3) $\frac{d}{D}$ 几乎单独地取决于 P_c , 而与 $\frac{L}{D}$ 无关。

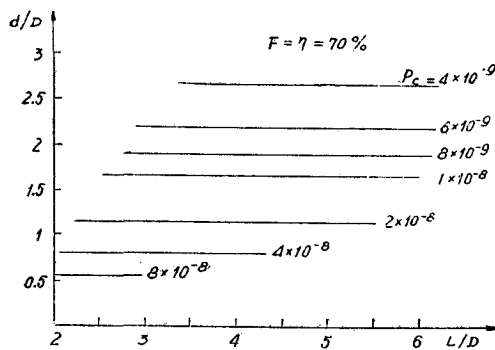


图 9 $\frac{d}{D}$ 与 $\frac{L}{D}$ 的关系曲线¹⁾

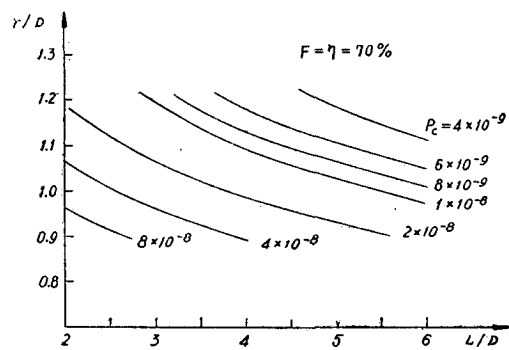


图 10 $\frac{r}{D}$ 与 $\frac{L}{D}$ 的关系曲线¹⁾

1) 此二曲线是按由 $\frac{d}{B} < 1$ 条件下导出的公式绘出的。虽然, 曲线的某些小段上, $\frac{d}{B} < 1$ 的条件已不成立或接近不成立, 但定性地, 仍有曲线所示的变化关系。

3. $\frac{r}{D}$ 的决定

引用单孔膜片透镜的焦距公式和成像公式来计算吸极通道口等效透镜的发散作用。把发射面到吸极通道入口的空间的电场看作均匀场,则通道入口的等效透镜的焦距为

$$f = \frac{4V_0}{V'_0(z_2) - V'_0(z_1)} \simeq \frac{4V_x}{-\frac{V_x}{d}} = -4d; \quad (11)$$

成像公式为

$$-\frac{1}{G} + \frac{1}{B} = -\frac{1}{4d} \quad (12)$$

(式中 G, B, f 均取绝对值,因此另加负号)。注意到几何关系 $r = (d + G) \operatorname{tg} \theta_0$, $\operatorname{tg} \theta_0 = \frac{D}{2} / G$ 及式(9), 便得

$$\frac{r}{D} = 0.5 \left[1.25 + \sqrt{68 \times 10^{-8} \left(\frac{1 - \cos \theta}{2} \right) / P_f} \right], \quad (13a)$$

$$\frac{r}{D} = 0.5 \left[1.25 + 8.3 \times 10^{-4} \sin \frac{\theta}{2} / \sqrt{P_f} \right]. \quad (13b)$$

相似地可得 $\frac{r}{D}$ 与 $\frac{L}{D}$ 的关系曲线(图 10)。曲线表明:

- (1) P_c 的增大要求 $\frac{r}{D}$ 减小。这主要体现为吸极壁厚 $\left(r - \frac{D}{2}\right)$ 的减小。
- (2) 由于图 7 中与 P_c 对应的适当的 $\frac{L}{D}$ 有一定的范围, 因此 $\frac{r}{D}$ 也有一定的范围。一般 $\frac{r}{D} = 0.9 \sim 1.1$ 。
- (3) $\frac{L}{D}$ 增大时应使 $\frac{r}{D}$ 减小。

四、例 子

例 1. 要求引出导流系数 $P_c = 2 \times 10^{-8}$ 朴, 求最佳尺寸。取 $\frac{L}{D} = 4.8$, $\eta = 0.7$,

$$P_t = P_c, P_f = \frac{P_t}{\eta} = 2.86 \times 10^{-8} \text{ 朴}.$$

由图 7 曲线查得 $\theta = 14.5^\circ$,

由式(10)得

$$d/D = 1.19,$$

由式(13)得

$$r/D = 0.95.$$

将此例与欧板克的实验结果比较^[4]: 他的电极尺寸比为 $\frac{L}{D} = 4.8$, $\frac{d}{D} = 1.2$, $\frac{r}{D} = 1$. 在最佳情况下(可由 $F = \frac{I_c}{I_f}$ 达到 72% 说明), $P_f = 2.9 \times 10^{-8}$ 朴, $P_c = 2 \times 10^{-8}$ 朴(由 $I_f = 2.9 \times 10^{-3} A$, $I_c = 2.1 \times 10^{-3} A$, $V_x = 2.24 \times 10^3 V$ 算出)。可见二者是十分吻合

的。

例 2. 要求导流系数 $P_c = 1.4 \times 10^{-8}$ 朴, 求最佳尺寸. 取 $\frac{L}{D} = 5$, $\eta = 70\%$,
 $P_i = P_c$, $P_f = \frac{P_c}{\eta} = 2.0 \times 10^{-8}$ 朴.

由图 7 得

$$\theta = 13.9^\circ.$$

加上

$$P_f = 2.0 \times 10^{-8} \text{ 朴},$$

便可由式(10)得

$$\frac{d}{D} = 1.42,$$

由式(13)得

$$\frac{r}{D} = 0.98.$$

将此例和謝皮諾夫的實驗結果相比: 他的比較接近最佳情况 (由 $F = \frac{I_c}{I_f} = 44\%$ 說明) 的数据为 $\frac{L}{D} = 5$, $\frac{d}{D} = 1.3 \sim 1.4$, $\frac{r}{D} = 1$, $P_f = 2.1 \times 10^{-8}$ ($I_f = 2.0 \times 10^{-3} \text{A}$, $V_x = 2.1 \times 10^3 \text{V}$), $P_c = 9.2 \times 10^{-9}$ ($I_c = 0.88 \times 10^{-3} \text{A}$).

由此可知, 他的尺寸比接近計算結果, 但他所做的實驗接近但并非最佳情况。

五、几 点 說 明

1. 在应用式(10)和(13)作实际計算时, 可根据对离子源所要求的引出电流和电压, 求出 P_c , 并取

$$P_i = P_c, P_f = P_c/\eta, \eta = 0.6 \sim 0.8.$$

2. 在和实验值比較时, 理应估計实验中存在的次級电子发射作用, 电极上打出的次級电子流将包含在观察所得的电流值中. 但上二例中忽略了这一点。

3. 在設計时离子源尺寸可按最佳情况計算, 但运行时并不一定能調整在最佳情况. 特别是不少实验报道都不是正处于最佳情况, 故和实际比較时, 当用 F 值是否大于 60% 判明此点。

4. 本文沒有考虑外加纵向磁場对聚焦的作用, 有不少实验报道加有纵向磁場, 由于电离几率的增大和聚焦的改善, 引出离子流将增加^[10]. 在比較时也应注意。

六、結 論

(1) 在設想的模型基础上, 导出了最佳尺寸計算公式, 它可能是真实情况的一种近似解。

(2) 在一般的导流系数下, 最佳尺寸比稳定在: $\frac{L}{D} = 4 \sim 5.5$, $\frac{r}{D} = 0.9 \sim 1.1$, $\frac{d}{D} = 1.2 \sim 1.6$, 而与傳統的試驗結果吻合. 这意味着, 对于这种离子源引出結構, 一般最佳尺寸不可能有更大的变化。

(3) 随着所要求的导流系数的增加, 应有 $\frac{L}{D}$, $\frac{d}{D}$, $\frac{r}{D}$ 相应的减小. 这种减小分别体现为吸极长度的减小, 吸极通道内径的加大和吸极壁厚的减小.

(4) 由于 $\frac{L}{D}$ 的减小受气体消耗量增大的限制以及 $\frac{r}{D}$ 和 $\frac{d}{D}$ 的减小和吸极电压的增大受耐压等因素的限制, 故此种引出结构似乎不可能达到托纳门 (Thonemann)^[2] 给出的最大电流:

$$I_{1\max} + I_2 \sqrt{\frac{m_2}{m_1}} + I_3 \sqrt{\frac{m_3}{m_1}} = 28.4 V_x^{3/2} \left(\frac{D}{L} \right)^2,$$

即使要得到 $P_e = 8 \times 10^{-8}$ 朴, 也是十分困难的.

(5) 从纯电子光学的观点来看, 引出流的大小只与吸极电压、气压、振荡功率、电离几率以及引出结构的尺寸比有关, 而与引出结构尺寸的绝对大小无关. 引出结构的绝对大小应由其他实际因素如耐热、耐压等决定.

本文的写成应感谢提供文献资料的西安交通大学饒雨生等同志. 并应回忆予我知识的陆钟祚, 陈俊美, 朱培萍等老师.

参 考 文 献

- [1] Moak, C. D., etc., *Nucleonics*, **9** (1951), 18.
- [2] Thonemann, P. C., etc., *Proc. Phys. Soc.*, **61** (1948), 483; *Progr. Nucl. Phys.*, **3** (1953), 230.
- [3] Reifenschweiler, O., *Z. Naturforsch.*, **6a** (1951), 331; *Ann. Phys.*, **14** (1954), 33.
- [4] Eubank, H. P., *Rev. Sci. Instrum.*, **25**, No. 10 (1954), 989.
- [5] Сербинов, А. Н., *П. Т. Э.*, **3** (1958), 39.
- [6] Сербинов, А. Н., Петров, В. И., *П. Т. Э.*, **5** (1958), 3.
- [7] Blanc, D., etc., *J. Phys. et Radium*, **20**, 7 (1959), 55A.
- [8] Klemperer, O., *Electron Optics*, Cambridge at the University press (London), 1953.
- [9] Langmuir, I., etc., *Rev. Modern Phys.*, **13** (1931), 191.
- [10] 古 月, 物理学报, **16** (1960), 107.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ РАЗМЕРОВ ВЫТЯГИВАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ИОННОГО ИСТОЧНИКА

Шэн Цзянь

Резюме

Предложен упрощенный модель вытягивающего устройства ионного потока и выведены формулы и графики для определения оптимальных соотношений размеров.