

托卡马克电场电子注入的漂移电子束研究^{*}

宁 成¹ 潘 垣² 汪茂泉² 刘保华²

(北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088)

(中国科学院等离子体物理研究所, 合肥 230031)

摘 要 研究了漂移电子束中电子的运动规律, 得到了电子在外加电场、纵磁场和电子束自场中的运动轨迹和漂移速度表达式, 并就它们的成束条件、成束形状和电压要求以及束的稳定性条件进行了比较和讨论, 认为阴极垂直于纵磁场放置更好一些。

关键词 漂移电子束, 电场漂移注入, 托卡马克

中图分类号 TL631.24

研究实现高约束模(H-mode)的有效方法对促进受控核聚变的研究有重要意义。目前, 实现 H-mode 方法大体上可分成三类: (1)纯欧姆加热; (2)辅助加热; (3)外加偏压。在等离子体进入 H-mode 放电时, 其边界均出现很强的径向电场, 因此, 只要在等离子体边界产生足够强的负径向电场, 就可以改善等离子体约束, 甚至实现 H-mode, 如果能将电子注入到等离子体的边界, 就可以在等离子体的边界产生负径向电场。

Oren 等人 (1982)^[2]采用内置热灯丝发射电子将电子注入到托卡马克等离子体中, 并研究了等离子体边界电势对托卡马克中杂质的形成和输运的影响, 结果发现当边界磁面被置足够高的负偏压后, 等离子体的约束得到改善, 杂质被很好地约束在等离子体中。Ono 和 Furth (1993)^[3]提出了利用纵磁场和外加磁体 (其产生的磁场相对于纵磁场很弱) 所产生的纹波磁场的梯度漂移、曲率漂移将电子注入到等离子体中, 其机理性实验的结果肯定了利用磁场梯度漂移、曲率梯度漂移注入电子的可能性。潘垣等人 1996 年^[4]提出: 利用电场漂移将电子注入到等离子体中, 使在托卡马克等离子体边界产生负径向电场, 改善等离子体约束^[4]。

1 单电子在正交电磁场中的运动

设一电子从热阴极上某点 (x_0, y_0, z_0) 以初速度 $v_0(v_{0x}e_x + v_{0y}e_y + v_{0z}e_z)$ 发射出来, 进入正交电场 $E = Ee_x$ 和磁场 $B = Be_z$ 中, 将受到力 $F = q(E + v \times B)$ 的作用, 其中 v 为电子运动速度。令电子运动的角频率为 $k = qB/m$, 可得在 xy 平面内的运动方程

$$\left[x - \left(\frac{qE}{m} + kv_{0y} + k^2x_0 \right) / k^2 \right]^2 + \left[y - \left(y_0 - \frac{v_{0x}}{k} - \frac{qE}{mk}t \right) \right]^2 = \left(\frac{qE}{mk} + v_{0y} \right)^2 / k^2 + \frac{v_{0x}^2}{k} \quad (1)$$

它是一个圆心坐标随时间变化的圆方程

因此, 单电子在磁场的方向上作匀速直线运动, 在垂直于磁场的平面上做圆周运动, 它实际上是一种螺旋式的漂移运动。由 (1) 的右边估算知, 电子作圆周运动的半径是很小的 (约 10^{-6} m), 从宏观上看, 电子导心的运动轨迹就可以表征电子的运动。很明显, 电子运动的

^{*} 国家自然科学基金重点资助课题

1998 年 1 月 10 日收到原稿, 1998 年 6 月 18 日收到修改稿。

宁成, 男, 1964 年 9 月出生, 副研究员, 博士。

导心运动坐标为 $[(qE/m + kv_0y + k^2x_0)/k, y_0 - v_0x/k - (qE/mk)t, v_0z]$, 从而得到导心运动速度为 $[0, -qE/mk, v_0z]$ 其中 y 方向的速度分量正是本电子注入所需要的电子漂移速度:

$$v_{DE} = -qE/mk \quad (2)$$

2 阴极发射面平行于纵磁场

2.1 形成漂移电子束条件、成束形状及电压要求

如图1中所示, 阴极平面2垂直于 y 轴(也可以与 y 轴成某一角度)平行于该区域的纵磁场 B (沿 z 轴正方向)放置。注入器腔体壁1与托卡马克真空室壁的窗口密封相连接, 上下平行电极板3加上高电压后, 在极板间产生垂直向下(沿 x 轴正方向)的外加电场 E 。由单电子在正交电磁场中的运动可知, 从阴极发射出的单电子将沿 y 轴负方向作漂移运动, 其漂移速度由(2)式决定, 同时它以初速 v_0z 沿 z 轴作匀速直线运动。由于热阴极要同时发射出大量的电子, 因此, 在两平行电极板之间可以形成沿 y 轴负方向的电子束——漂移电子束。又由于阴极热电子发射的初速度可以从零到无穷, 因此, 漂移电子束没有绝对的边界, 而是一团沿 y 轴负方向延伸的电子云, 但电子主要分布在束的中心区域, 边缘的电子密度很低。形成漂移电子束的条件就是电子沿 y 方向的漂移速度远大于它沿 z 方向的均方根速度 $\overline{v_z^2}$, 即 $|v_{DE}| \gg \overline{v_z^2}$ 。它的形状如图1中所示, 右端面2就是阴极的发射面, 圆 $A'B'C'D$ 为阴极表面的投影, 椭圆 $ABCD$ 为圆 $A'B'C'D$ 沿 z 轴正、负方向拉长而成。电子沿 z 轴方向的速度对漂移电子束形状有很大的影响, 该方向的速度愈大, 则电子束外形愈往 z 轴方向拉长, 甚至可能拉长到腔体壁上。电子的漂移速度 v_{DE} 愈大, 则漂移电子束沿 z 轴方向的拉长愈长, 甚至可能形成沿 y 负方向的圆柱束。

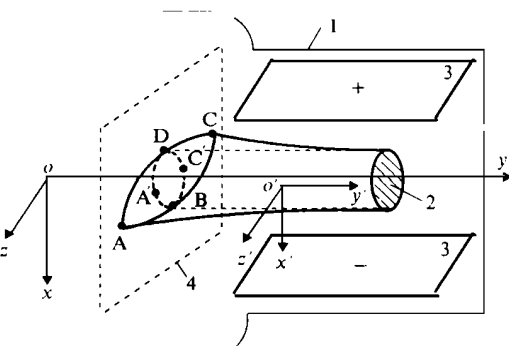


Fig. 1 Diagram of electron injector and shape of drifting electron beam. 1. injector chamber; 2. cathode parallel the toroidal magnetic field; 3. electrode plates; 4. projecting plane

图1 电子注入器及漂移电子束形状示意图

设逃逸电子的逸出点距所要注入电子的闭合磁面的距离为 S_y , 距注入器腔体壁的距离为 S_z , 则要保证电子能有效地注入到等离子体中, 必须 $(S_y / |v_{DE}|) \overline{v_z^2} < S_z$ 。这里为了能简单地给出对加在两平行电极板上的电压的要求, 利用(2)式, 且将 $\overline{v_z^2}$ 取为电子逸出时平行于阴极表面的均方根速度^[5], 从而得到 $U = (BdS_y / S_z) \sqrt{KT/m}$, 其中 U 为加到两极板间的电压, d 为两极板间的距离, K 为玻尔兹曼常数, T 为阴极热力学温度, m 为电子质量。

在我们的实验中, $S_y = 4.7 \sim 9.0$ cm (阴极和电极板可以一起沿 y 轴前后移动), $S_z = 7.5 \sim 12.5$ cm, $d = 5.0$ cm, $B = 0.5 \sim 1.5$ T。若 $T = 1273$ K, 则得到对电压的要求 $U = 2.19 \sim 7.56$ kV, 而实验中是按照电压25 kV进行设计的, 满足了要求。

2.2 漂移电子束中电子的运动

为了讨论问题的方便, 当电子沿 y 轴负方向的漂移速度远大于电子沿 z 轴方向的均方根速度时, 则认为漂移电子束为平行于 y 轴的圆柱电子束, 且有均匀的束电子密度 n_b 。由高斯定理近似地求出该电子束所产生的电场:

$$\begin{aligned} E_b &= \frac{qn_b}{2\chi} r' = \frac{qn_b}{2\chi} (x' e_x + z' e_z) \quad (0 \leq r' \leq n_b) \\ E_b &= \frac{qn_b r_b^2}{2r'^2 \chi} r' = \frac{qn_b r_b^2}{2\chi (x'^2 + z'^2)} (x' e_x + z' e_z) \quad (r' > n_b) \end{aligned} \quad (3)$$

其中 χ 为真空介电常数, 电荷 $q = -1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$, n_b 为漂移电子束半径, 带撇坐标原点 o' 取在电子束对称轴上 (见图 1), $r'^2 = x'^2 + z'^2$, n_b 为电子束的电子密度。实验中, 外加电场 E 的数量级为 10^5 V/m , HT-6M 托卡马克的纵磁场约 1 T 由估算知, 需要考虑电子束电场对电子运动的影响, 而不必考虑电子束自身磁场对电子运动的影响。

电子在 z' 轴方向上的运动是独立的, 做加速或减速运动。设 $t = 0$ 时, $x' = x'_0, y' = y'_0, z' = z'_0, v_{x'} = v_{x'_0}, v_{y'} = v_{y'_0}, v_{z'} = v_{z'_0}$, 通过求解该束内电子运动的三分量方程, 得到电子在 $x' y'$ 平面内的运动轨迹方程

$$\begin{aligned} & \left[\frac{qB}{m k^2} x' - \frac{qB}{m k^2} \left(\frac{qE}{m} + \frac{qB}{m} v_{y'_0} + \frac{q^2 B^2}{m^2} x'_0 \right) \right]^2 + \\ & \{ y' - [y'_0 - \frac{qBC_2}{m k^2} + (v_{y'_0} + \frac{qBC_1}{m}) t] \}^2 = \frac{q^2 B^2}{m^2 k^2} (C_1^2 + C_2^2) \end{aligned} \quad (4)$$

式中, $k^2 = q^2 B^2 / m^2 - q^2 n_b / 2m\chi$, $C_1 = x'_0 - (qE / m + qB v_{y'_0} / m + q^2 B^2 x'_0 / m^2) / k^2$, $C_2 = v_{x'_0} / k^2$ 。束中电子在 $x' y'$ 平面内也做圆周运动, 圆心的 x' 坐标不随时间变化, 而 y' 坐标随时间变化。容易求出电子运动导心沿 y' 轴方向的漂移速度:

$$v_{DEy'} = \left(\frac{qB}{m} x'_0 + v_{y'_0} \right) \left(1 - \frac{q^2 B^2}{m^2 k^2} \right) - \frac{q^2 B E}{m^2 k^2} \quad (5)$$

若 $n_b = 0$, 则 (5) 式变为 (2) 式。

2.3 漂移电子束的稳定性条件

要保证漂移电子束稳定且有效地注入, 则要求 $v_{DEy'} < 0$ 。由于 $|v_{y'_0}| \ll |qB x'_0 / m\chi|$, 则由 (5) 式得 $(qn_b x'_0 / 2\chi + E) > 0$, $q = -1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$, 当 $x'_0 < 0$ 时, 此要求显然满足; 但当 $x'_0 > 0$ 时, 需要

$$n_b < 2\chi E / |q| x'_0 \quad (6)$$

才能满足该要求。若 $E = 5 \times 10^5 \text{ V/cm}$, $x'_0 = 1.25 \text{ cm}$, 则要求 $n_b < 4.425 \times 10^{15} / \text{m}^3$ 。

3 阴极发射面垂直于纵磁场

3.1 形成漂移电子束条件、成束形状及电压要求

这里考虑阴极的另一种放置方式, 阴极发射面逆向纵磁场 B , 并与 B 垂直放置, 如图 2 所示。此时电极板采用长条形, 阴极固定在下极板的一端, 垂直向上, 且紧靠腔体壁。由单电子在磁场和正交电磁场中的运动可知, 大量电子从热阴极发射出来后, 不需要外加电压而自然形成沿 z 轴负方向的圆柱电子束。为使电子注入到托卡马克等离子体中, 只要在电极板上加一电压, 产生沿 x 轴向下的电场, 形成电场漂移, 使电子束稍稍地偏向于等离子体一侧即可, 此时的漂移电子束形状如图 2 中的实线束所示, 虚线束表示 $E = 0$ 时的电子束形状。

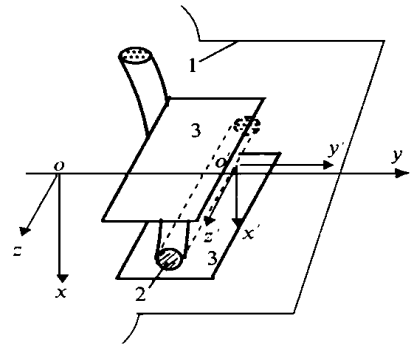


Fig. 2 Diagram of electron injector and shape of drifting electron beam. 1. injector chamber; 2. cathode vertical the omoidal magnetic field; 3. electrode plates

图 2 电子注入器及漂移电子束形状示意图

类似于前面的讨论, 设阴极表面距其正对面腔体壁的距离为 x_c , 阴极表面上某一发射点

距电子所要注入的闭合磁面的最短距离为 \dot{s}_y , 则要保证电子能有效地注入到等离子体中, 要求外加电压 $\dot{U} > B d \dot{s}_y / \dot{s}_z \sqrt{2KT/m}$, 其中 $\sqrt{2KT/m}$ 为热电子发射时垂直于阴极表面方向的均方根速度^[5]。

$$r_b = 20 \text{ cm}$$

设电子注入到最外层的闭合磁面上(对 HT-6M 托卡马克, $a = 20 \text{ cm}$), 阴极中心正好在真空室窗口的内端口侧面上(阴极和电极板可以一起沿 y 轴前向后移动), 则 $\dot{s}_y = 4.0 \text{ cm}$, $\dot{s}_z = 18.8 \text{ cm}$, 且 $d = 5.0 \text{ cm}$, $B = 0.5 \sim 1.5 \text{ T}$ 若阴极温度为 1273 K , 则得到所要求的电压为: $\dot{U} > 0.78 \sim 2.33 \text{ kV}$ 。

3.2 漂移电子束中电子的运动

在 \dot{U} 下, 电子的漂移速度远小于电子的热运动速度, 因此, 漂移电子束对圆柱束的偏移不大。严格计算实际漂移电子束产生的电场是相当复杂和困难的, 简单地将偏移电子束所产生的电场取为圆柱电子束所产生的电场, 即

$$E_b = \frac{q n_b}{2X} (x' e_x + y' e_y) \quad (0 \leq r' \leq r_b) \quad (7)$$

$$E_b = \frac{q n_b r_b^2}{2X (x'^2 + y'^2)} (x' e_x + y' e_y) \quad (r' > r_b) \quad (8)$$

束内电子在 $x' y'$ 平面内做复杂的回旋运动, 在 z' 轴方向上做匀速直线运动。电子在 x' 轴和 y' 轴方向上的运动耦合很强, 很难解析地求解出 x' 轴和 y' 轴方向的分量方程的解。Davison^[6]就外电场 $E = 0$ 的情况定性讨论了电子在 $x' y'$ 平面内的回旋运动。

由于电子运动的回旋半径很小, 电子运动导心的漂移运动就可以大致地表征电子的运动, 从而只要求出运动导心的漂移速度就可以知道漂移电子束中的电子运动情况。当总电场 E_t 随空间坐标变化时, 电子运动导心的漂移速度^[7]为:

$$v_{DE} = \left(1 + \frac{1}{4} r_c^2 \omega_c^2\right) \frac{E_t \times B_t}{B_t^2} \quad (9)$$

其中 B_t 为总磁场强度, 回旋半径 $r_c = |v_{\perp} / k_c|$, v_{\perp} 为垂直于 B_t 方向的电子速度, k_c 为电子回旋运动的角频率。这里 $E_t = E + E_b$, E_b 由 (7) 式给出, $B = B$ (不考虑漂移电子束自身的磁场)。由 (8) 式即可得到漂移电子束内电子运动导心的漂移速度:

$$v_{DEy'} = \frac{q n_b}{2BX} y' e_{x'} - \frac{1}{B} \left(E + \frac{q n_b}{2X} x'\right) e_{y'} \quad (0 \leq r' \leq r_b) \quad (10)$$

值得注意的是, 电子运动导心除以速度 $v_{DEy'}$ 运动外, 还在 z' 轴方向上作均匀速直线运动。

3.3 漂移电子束的稳定性条件

由 (9) 式知, 此时电子漂移速度在 $e_{x'}$ 方向的分量不影响漂移电子束的注入, 仅使漂移电子束产生一定程度的发散, 但 $e_{y'}$ 方向分量的正、负将影响到漂移电子束的运动方向, 因此, 要保证漂移电子束能稳定的注入, 要求: $E + \frac{q n_b}{2X} x' > 0$, 即

$$r_b < 2XE / q x' \quad (11)$$

4 讨论

阴极平行于纵磁场 B 放置时, 极化磁场将对热电子的发射产生影响, 但影响程度要通过实验才能确定。理论分析^[8]表明: 产生 L-H 模转变所要求的径向电场高, 而需要的漂移电子束密度是很低的, 数量级约 $10^{13} \sim 10^{14} \text{ m}^{-3}$ 。尽管热电子发射受到影响, 但仍然有可能满足实验的要求(实验中阴极的发射强度设计为 100 A)。同时它的漂移电子束与等离子体环的接触面积较大, 从而有利于电子的注入和等离子体环的平衡。阴极垂直于纵磁场放置时, 漂移电子束对

外加电压的要求较平时的低,并且此时漂移电子束的发散和电子的漏失都较小,这对实验是有利的,同时低电压要求有利于减弱外加电场对等离子体的作用和影响。阴极的两种放置下,都可能形成满足电子注入实验要求的稳定的漂移电子束,但阴极垂直于纵磁场放置更好一些。

两种情况下漂移电子束的稳定性条件 (6) 和 (10) 是很相似的,即漂移电子束中任一点的自场 E_b 必须要小于外加电场 E 。在电子束沿磁场方向的情况下,当 $E=0$ 时,束的稳定性分析^[6]表明,束电子密度必须要满足 $n \leq 4.86 \times 10^{18} \text{ B}^2 \text{ m}^{-3}$,束才能稳定。可见漂移电子束的稳定性条件要苛刻得多。

参考文献

- 1 Wangner F, et al. *Phys Rev Lett*, 1982, **49**(19): 1408
- 2 Oren L, et al. *J Nucl Mater*, 1982, **34**: 111~112
- 3 Ono M, and Furth H. United States Patent, Patent Number 5225146, 1993
- 4 Pan Yuan, et al. China Nuclear Science and Technology Report. CN IC-01054, ASIPP-0046, 1996
- 5 刘学惠. 阴极电子学. 北京: 科学出版社, 1980
- 6 Davidson R C. *Physics of Nonneutral Plasmas*. UAS Addison-Wesley Publishing Company, 1990: 47
- 7 马腾才等. 等离子体物理原理. 合肥: 中国科技大学出版社, 1988: 94
- 8 宁成. 博士后出站研究报告. 中国科学院等离子体物理研究所, 1997

RESEARCHES ON DRIFT ELECTRON BEAM IN ELECTRON INJECTION BY ELECTRIC DRIFT ON TOKAMAK

Ning Cheng¹, Pan Yuan², Wang Maoquan², Liu Baohua²

¹*Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, P. O. Box 8009, Beijing, 100088*

²*Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Science, P. O. Box 1126, Hefei 230031*

ABSTRACT The motion regularity of the electron in drift electron beam were studied. The expressions of the motion trajectory and the drift velocity of electron were obtained in added externally electric field, toroidal magnetic field and self-field. For two schemes of setting cathode, forming conditions, shapes, steady conditions, and required voltages of drift electron beam were discussed and compared, and it was better to set the cathode vertically to toroidal magnetic field.

KEY WORDS drift electron beam, electric drift injection, tokamak