

# 离子通道的暂态特性及其粒子模拟

陈 希<sup>1,2</sup>, 刘盛钢<sup>1</sup>, 谢文楷<sup>1</sup>

(1. 电子科技大学高能电子学研究所, 成都 610054; 2. 中国电科院通讯所, 北京 100085)

**摘 要:** 本文对各种条件下离子通道的建立及其暂态变化特征进行了研究, 对影响其特性的因素进行了讨论, 并用著名的粒子模拟软件 MAGIC 对其进行了动态模拟, 所得结论对高功率微波电子器件及离子通道激光的开发与研究均有指导作用。

**关键词:** 离子通道; 电子注; 等离子体; 暂态; 模拟

**中图分类号:** TN128 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2000) 03-0061-03

## The Transient Performance of Ion Channel and Its Modelling

CHEN Xi<sup>1,2</sup>, LIU Sheng-gang<sup>1</sup>, XIE Wen-kai<sup>1</sup>

(1. Inst. of High Energy Electronics, UEST of China, Chengdu 610054, China;

2. Telecommunication Department, EPRI of China, Beijing 100085, China)

**Abstract:** The setting up of ion channel and its transient properties were studied and modelled by MAGIC code in this paper, and the factors affecting its performance were also discussed. The results are valuable for the development of plasma microwave devices and ion channel lasers.

**Key words:** ion channel; electron beam; plasma; transient; model

### 1 引言

九十年代初, 在高功率微波的研究中, 为进一步提高器件的功率和效率, 等离子体被大量地引入电子器件, 通过相对论电子注与系统结构波和等离子体波的相互作用, 产生高功率强微波输出。电子注与等离子体的作用过程相当复杂, 大量的研究表明, 首先会产生离子通道<sup>[1~5]</sup>, 以提供一稳定的电子传输通道, 该通道不仅是高功率微波器件所必需, 而且由此产生了离子通道激光器<sup>[1~3]</sup>的研究和开发。多年来, 对离子通道中的电子注传输和电磁波特性研究颇多, 然而, 对离子通道本身的研究却很少, 几乎都是假定其为一稳定规则的通道, 这与实际情况相差较大。鉴于此情况, 本文研究离子通道的建立及暂态过程, 为高功率等离子体微波电子器件及离子通道激光器的开发奠定基础。

### 2 离子通道

在微波器件或离子通道自由电子激光器件中, 相对论电子束 (REB) 进入填充等离子体系统后的物理过程可描述为: 电子束的前端将排除或部分排除等离子体中的电子, 形成一适于后续电子束通过的离子通道, 后续电子则在正离子背景下被聚束并顺利通过互作用空间, 根据束尺寸和系统尺寸的比较, 通道外还可能存在电子。一般考虑中和因子  $n_p/n_b$  小于 1, 则通道内无等离子体电子, 是纯的离子通道, 且通道半径在圆柱坐标系下近似满足:

$$r_c = r_b \sqrt{n_b/n_p} \quad (1)$$

式中:  $r_b$  为电子束半径,  $n_b$  为束密度,  $n_p$  为等离子体密度。可见, 系统沿径向形成三个区域, 如图 1 所示。其中 I 区为电子束, II 区为离子通道, III 区为准中性等离子体区。

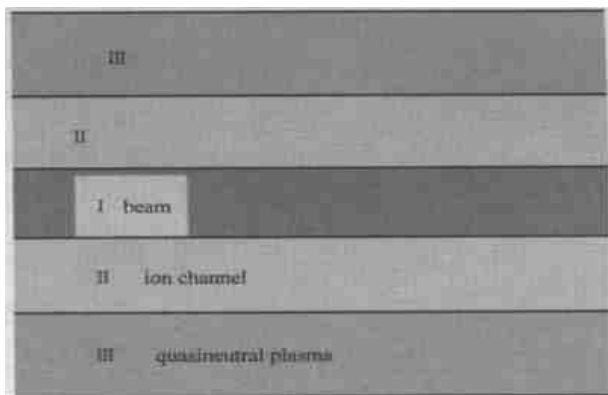


图 1 束、等离子体及离子通道径向结构

若中和因子  $n_p/n_b$  大于 1, 一般文献很少讨论该情况。此时电子束无法完全排除等离子体电子, 通道中的过量等离子体电子要引起束的腊肠不稳定。

### 3 离子通道的动态特性

通常在处理微波管中的注波相互作用问题时, 离子通道要

么被忽略,要么被当作一规则稳定的介质处理,从而使问题简化.考虑离子通道包络上的电子,由于电子束的排斥及进入时的动能,会被排向远处,当电子到达  $r_c$  处时,尽管受力平衡,仍不会停止,在进入大于  $r_c$  区域后,由于受正离子的力而减速并最终在到达某点后掉头向内运动,再次到达  $r_c$  处时仍不会停止,在进入  $r_c$  后由于电子束的斥力而减速并最终在某点掉头向外,如此反复,可见束外电子会在一定范围内以一定频率振荡,振荡频率与束密度和等离子体密度有关.

考虑通道包络上的电子,引入电子束后在电子束力、正离子力及等离子体自身振荡的共同作用下运动,可近似求得电子振荡满足的方程:

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{r_b}{2(x+r_c)} - \frac{3x+r_c}{2} \frac{2}{p} \quad (2)$$

式中:  $b = \sqrt{e^2 n_b / (m_0)}$  为电子束等离子体频率,  $p = \sqrt{e^2 n_p / (m_0)}$  为等离子体电子的等离子体频率,  $x$  为振荡位移.

考虑式(1)可将式(2)化为:

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = - \left( \frac{r_c}{2(x+r_c)} + \frac{3}{2} \right) \frac{2}{p} x \quad (3)$$

可见这种振荡比等离子体自身振荡要快,当  $x$  较小时频率近为等离子体振荡频率的 1.4 倍.

令  $y = x/r_c$  代入式(2)积分并整理得:

$$\left( \frac{dy}{dt} \right)^2 = \left( -\frac{3}{2} y^2 - y + \ln(y+1) \right) \frac{2}{p} + y_0^2 \quad (4)$$

其中:  $y_0 = x_0/r_c$  为初始归一化速度.

若  $y$  很小,则有:

$$-\sqrt{2} \frac{|y_0|}{p} \leq y \leq \sqrt{2} \frac{|y_0|}{p} \quad (5)$$

若  $y$  较大,则:

$$-\frac{1 + \sqrt{1 + 6y_0^2/p^2}}{3} \leq y \leq \frac{-1 + \sqrt{1 + 6y_0^2/p^2}}{3} \quad (6)$$

取

$$y_{\min} = \min \left\{ -\sqrt{2} \frac{|y_0|}{p}, -\frac{1 + \sqrt{1 + 6y_0^2/p^2}}{3} \right\} \quad (7)$$

$$y_{\max} = \max \left\{ \sqrt{2} \frac{|y_0|}{p}, \frac{-1 + \sqrt{1 + 6y_0^2/p^2}}{3} \right\} \quad (8)$$

$$\text{则有 } y_{\min} \leq y \leq y_{\max} \quad (9)$$

即  $y$  为一上下有界变量,也表明了束外电子的振荡特点.实际上,可直接由式(4)等于 0 通过迭代求出  $y$  的最大最小值.

为了解  $y$  的具体变化规律,采用数值方法求解式(4).如图 2 所示为  $p = 10^8 \text{ Hz}$  条件下方程(4)的数值解.由图可见束外电子的运动确实具有振荡特征,但并非规则的正弦波.在一个周期内,前后两个半波的波长不等,正负振幅也有差异.在  $y > 0$  的区域波长和振幅均较大,这可解释为:在  $y < 0$  的区域,正负电荷作用抵消后电子主要受束电子的力,而在  $y > 0$  的区域电子主要受正离子的吸力,由于束密度比正离子密度大,故电子在  $y > 0$  区受力相对较小,从而波长和振幅相对较

大.

此外,振幅和频率与电子束和填充等离子体密度有关,增加等离子体密度会使振荡频率上升,相对振幅  $y$  基本不变而绝对振幅  $x$  下降;增加电子束密度会使振荡频率略为上升,相对振幅  $y$  下降而  $x$  只有微小变化,  $y < 0$  区振幅  $x$  略上升而  $y > 0$  区振幅  $x$  略下降.如图 3 所示为改变束和等离子体密度时振荡曲线的变化,曲线(1)为等离子体密度增加到 4 倍(即  $p$  为 2 倍)时的情况,曲线(3)为电子束密度增加到 4 倍时的情况,注意图中的振幅为相对振幅  $y$  而非绝对振幅  $x$ .

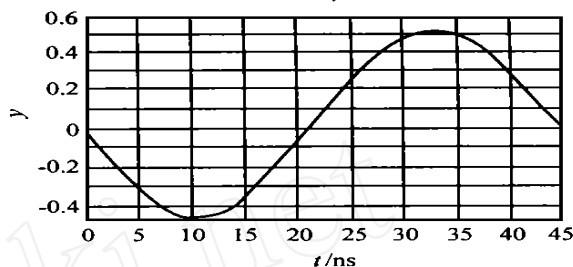


图 2 离子通道包络上的电子振荡曲线

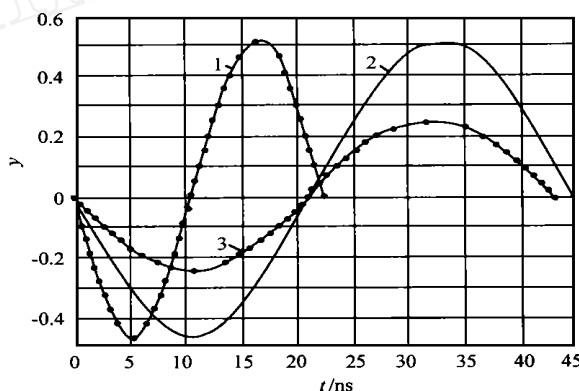


图 3 束与等离子体密度对振荡的影响

当电子束及离子通道直径比系统直径小很多时,将建立一振荡的离子通道,对等离子体微波器件而言,要获得高质量的传输电子束,要求振荡尽可能要小,由上述分析可知,在给定电子束条件下,这可通过选择等离子体密度实现.

当电子束及离子通道直径与系统直径可比拟时,  $(r_c + x)$  可能超过系统直径,此时,等离子体电子会全被排除,从而束内外均形成稳定的离子通道,不存在通道的振荡.

#### 4 离子通道特性的电磁粒子模拟

近年来,粒子模拟作为一种先进的数值模拟(仿真)方法,由于其能跟踪大量粒子的运动,并动态地模拟各种物理量变化,尤其是极短时间内的暂态过程,能实现具体实验往往难于观察的过程和现象(如 ns 级过程),可部分代替实验(有人称其为数值实验或计算机实验)而成为现代科学与工程中的主要研究方法之一,已广泛地应用于微波电子学、等离子体电子学等领域.

本文采用美国 MISSION 公司著名的 MAGIC 软件模拟电子束进入填充等离子体漂移区后的暂态过程. MAGIC 是一个

二维半、时域有限差分电磁粒子模拟软件,主要用于模拟空间带电粒子与电磁场的相互作用。根据给定的初始及边界条件,自治求解 MAXWELL 方程组、LORENTZ 方程及连续性方程,从而模拟出整个系统的时间演化过程。

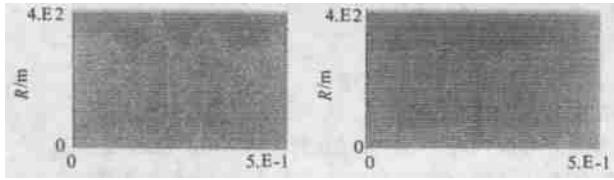


图 4 小直径电子束及其离子通道

图 5 大直径电子束及其离子通道

图 4 所示为一小直径电子束入射填充等离子体漂移管后经过 30ns 的相空间分布,横轴为  $z$ ,纵轴为半径  $R$ ,明显可见存在一振荡的离子通道,通道半径略大于束半径;图 5 为一大直径电子束入射填充等离子体漂移管后经过 10ns 的相空间分布,此时等离子体电子已被排向管壁,管内为纯粹的离子通道,无振荡,通过适当选择等离子体的中和因子,实现了电子束的小(或无)脉动传输。

对电流密度为  $28\text{A}/\text{cm}^2$ ,初始半径为  $0.015\text{m}$  电子束入射等离子体后的过程进行了模拟,中和因子取为  $0.7$ ,部分结果如图 6~8 所示。图 6 为 5ns 时的束外等离子体电子的分布,可见大约在  $0.016\text{m}$  内形成一离子通道,由于振荡,有部分束外电子进入通道;图 7 为沿  $z$  轴的径向速度分布,有明显的振荡;图 8 为电子束及等离子体粒子的综合分布,可见电子束本身也是振荡的。粒子模拟结果,离子通道的振荡频率约为  $9 \times 10^9\text{Hz}$ ,而由式(4)计算的频率为  $11.96 \times 10^9\text{Hz}$ ,差别源于:式(4)未考虑束外电子进入电子束后的作用力变化及电子束本身的振荡。

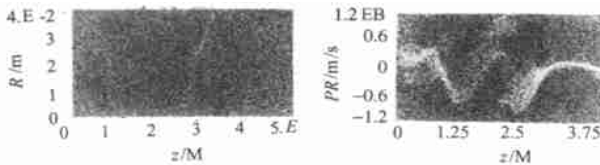


图 6 离子通道及束外的振荡电子

图 7 束外电子的径向速度分布

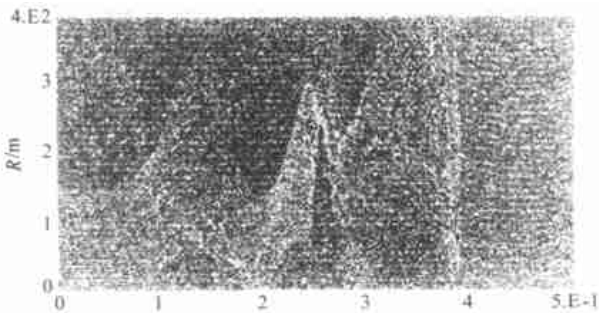


图 8 电子束及等离子体粒子的相空间分布

## 5 结论

相对论电子束进入气体或等离子体后将产生离子通道,该通道不是稳定规则的,而是振荡的,振荡频率和振幅与等离子体和电子束的密度有关,合理控制该通道的形态对高质量电子束的获得、注波互作用效率的提高有重要意义。

## 参考文献

- [1] David H. Whittum, Andrew M. Sessler and John M. Dawson. Ion-channel laser. Physical Review Letters, 1990, 64: 2511 ~ 2514
- [2] Kuarr-Ren Chen, Thomas C. Katsouleas and John M. Dawson. On the amplification of the ion-channel laser. IEEE Trans. on P. S., 1990, 18: 837 ~ 841
- [3] K. R. Chen and J. M. Dawson. Ion-ripple laser. Physical Review Letter, 1992, 68: 29 ~ 32
- [4] John R. Smith, Isaac R. Shokair, Kenneth W. Struve, Edl Schamiloglu, Paul W. Werner and Ronald J. Lipinski. Transverse oscillations of a long-pulse electron beam on a laser-formed channel, IEEE Trans. on P. S. 1991, 19: 850 ~ 854
- [5] Chang-jian Tang, Pu-kun Liu and Sheng-gang Liu. Electromagnetic instability in an ion-channel electron cyclotron maser. J. Phys. D: Appl. Phys, 1996, 29: 90 ~ 94



陈 希 分别于 1985 年和 1988 年获得西安交通大学电子工程系学士和硕士学位,1999 年获电子科技大学物理电子学与光电子学专业博士学位。目前感兴趣的研究领域为 SDH 光传输、微波及电磁技术。

刘盛纲 分别于 1955 年、1958 年获得东南大学和电子科技大学学士、博士学位,1980 年当选为中国科学院院士,1986 年起担任电子科技大学校长至今。目前的研究兴趣为微波等离子体及等离子体相关电磁辐射。

谢文楷 1968 年毕业于四川大学物理系,1983 年获电子科技大学工学硕士,现任电子科技大学高能电子学研究所副所长、教授。主要从事相对论电子学、新型特殊准光学谐振腔及其应用、强流相对论微波器件等方面的理论与实验研究。在国内外学术刊物、学术会议上发表学术论文 30 余篇。