

波纹波导加载等离子体后注波相互作用的线性理论

陈 希², 谢文楷¹, 刘盛纲¹

(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: 本文综合考虑了系统存在的离子通道和电子束传输的脉动性能, 导得了小信号下等离子体加载波纹波导的色散方程, 并具体讨论了高频系统的色散特性, 研究了电磁波增长率与等离子体密度间的关系. 由于考虑了电子束注入后系统的变化, 这种处理方法将更加符合微波器件的实际情况.

关键词: 波纹波导; 色散; 线性理论; 电子束; 等离子体

中图分类号: TN136; TN128 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2000) 09-0142-03

Linear Theory of Beam-wave Interaction in Corrugated Waveguide Filled with Plasma

CHEN Xi², XIE Wen-kai¹, LIU Sheng-gang¹

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

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

Abstract: The dispersion equation of corrugated waveguide filled with plasma under small signal condition is obtained with the ion channel and the beam pulsation taken into account in this paper. The dispersion properties are discussed in detail. The relation between the wave growth rate and plasma density is studied. Because of its consideration on the changes of the system after the beam injection, this method should be more reasonable.

Key words: corrugated waveguide; dispersion; linear theory; electron beam; plasma

1 引言

在现代高功率微波技术的研究中, 为获得更高的功率和效率, 等离子体被引入微波器件. 当相对论电子束进入相互作用区后, 一方面它与电磁慢波作用更加强烈, 相互作用过程也更复杂, 另一方面引入等离子体可以去掉外磁场, 使系统体积和重量减小, 并导致了一类新型高功率微波器件 PASOTRON^[1]的发明. 近年来, 这方面的研究报道颇多, 并发展了多种线性理论, 比较有代表性的有 K. MINAMI 等人的工作^[2,3], 但这些工作几乎均在有一强磁场的条件下完成, 且将等离子体的影响归结在介电常数中, 从而使问题简化. 然而由于离子通道^[4,5]的存在, 这种处理是不完善的. 本文将在无外磁场条件下, 充分考虑离子通道和电子束注入后等离子体电子重新分布以及电子束具有横向脉动等因素, 研究系统的电磁波色散特性, 为 PASOTRON 及其他高效高功率等离子体微波器件的研究和开发提供基础.

2 色散方程

考虑等离子体加载波纹波导结构如图 1 所示, 轴对称波纹波导壁呈余弦分布. 相对论电子束进入该系统后的物理过程可描述为: 电子束的前端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, 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

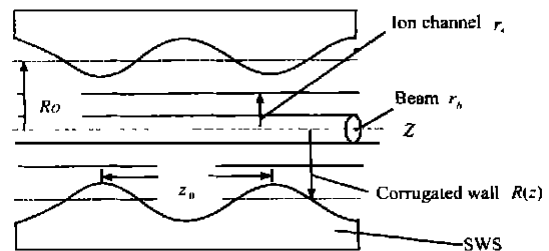


图 1 等离子体加载波纹波导系统

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, 高频系统沿径向形成三个区域: 电子束区 (半径 r_b)、离子通道区 (半径 r_c) 和准中性等离子体区, 电子束则在离子通道中传输. 在圆柱坐标系 (r, z) 中, 对波纹式周期系统, 由 Maxwell 方程、连续性方程和运动方程, 只考虑 TM 模, 在小信号条件下可解得:

$$\nabla^2 E_z + T_i^2 E_z = 0 \quad (2)$$

$$\text{对电子束区有: } T_i^2 = T_1^2 = (k^2 - \frac{2}{n}) (1 - \frac{2}{3(\frac{r_b}{n\nu_0})^2}) \quad (3)$$

$$\text{对离子通道区有: } T_1^2 = T_2^2 = (k^2 - \beta_n^2) \quad (4)$$

$$\text{对准中性等离子体区: } T_1^2 = T_3^2 = (k^2 - \beta_n^2) (1 - \beta_p^2 / \beta_n^2) \quad (5)$$

其中 $\beta = \sqrt{\epsilon | \beta | / (m_0)}$ 为束电子的等离子体频率, $\beta_p = \sqrt{\epsilon_p / (m_0)}$ 为等离子体电子的等离子体频率, ω 为圆频率, $n = z + n_0$, z 为轴向波数, n_0 为波纹波数, v_0 为电子束的直流速度, γ 为相对论因子, k 为自由空间波数.

由上述波动方程结合系统电磁场边界条件可得色散方程为: $\det(D) = 0$ (6)

其中 D_{mn} 为由下式积分确定的矩阵元素:

$$D_{mn} = \int_0^a \exp(j(m-n)z) (1 - \frac{j n}{k^2 - \beta_n^2} \frac{d}{dz}) (TP_n J_0(T_3 R) + TQ_n N_0(T_3 R)) dz = 0 \quad (7)$$

TP_n, TQ_n 为与 T_i 及 n_b, n_c 有关的常数.

3 考虑横向脉动时的色散关系

在等离子体约束下, 电子束始终存在脉动. 引入等效电子束概念^[6], 将脉动电子束等效为具有表面电荷分布的无半径起伏的电子束, 如图 2 所示. 等效电子束的半径为电子束在等

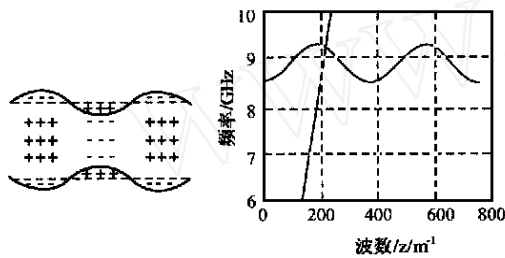


图 2 等效电子束模型 图 3 等离子体波纹波导冷色散曲线
离子体中运动的平衡半径 r_e ^[7], 在小脉动条件下, r_e 近为脉动的对称位置, 导得表面电流为:

$$J_s = \frac{j n_0 v_0}{(\beta_d^2 - F_p^2) (k^2 - \beta_n^2)} \cdot \frac{\partial E}{\partial r} \quad (8)$$

考虑小脉动条件下, 系统结构仍为图 1 所示. 则对电子束区有:

$$T_1^2 = \frac{(k^2 - \beta_n^2) (1 - \beta_p^2 / (\beta_d^2 - F_p^2))}{[1 - \frac{\beta_p^2}{3(\beta_d^2 - F_p^2)} (\frac{1 - kv_0}{nc})]} \quad (9)$$

式中: $F_p^2 = - (1 - f - v_0^2 / c^2) \beta_n^2 / 2$. 对离子通道和准中性等离子体区, T_2 和 T_3 形式不变. 可见电子束的横向脉动通过 T_1 进而通过 TP_n 和 TQ_n 来影响色散关系.

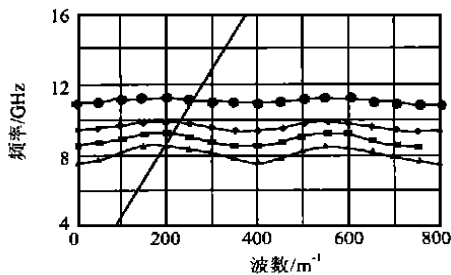


图 4 各种填充密度色散曲线比较

4 数值计算结果及讨论

导得的色散方程极为复杂, 需要对其进行数值计算以求出具体的色散曲线. 首先, 对不加电子束的等离子体波导的所谓“冷”色散关系进行了计算, 数值结果如图 3 所示. 为了便于比较, 所取计算条件与文献[3]相同, 即: 相对论因子 $\gamma = 2.23$, 波纹波导的平均半径 $R_0 = 1.445\text{cm}$, 波纹的轴向波长 $\lambda_0 = 1.67\text{cm}$, 波纹深度 $h = 0.445\text{cm}$, 等离子体填充密度 $n_p = 2 \times 10^{11}\text{cm}^{-3}$, 直线为 $v = 0.9c$ 的电子束线, 该线与色散曲线的交点对应于该系统 TM_{01} 模的特征频率. 计算曲线与文献的比较符合很好. 另外, 系统同样存在 A、B 等高频模, 由于主要对 TM_{01} 模感兴趣, 故图中未画出.

调节等离子体填充密度可得到一系列色散曲线如图 4 所示, 为 $n_p = 0$ 即空波导情况, 为 $n_p = 2 \times 10^{11}\text{cm}^{-3}$ 情况, 为 $n_p = 4 \times 10^{11}\text{cm}^{-3}$ 情况, 为 $n_p = 8 \times 10^{11}\text{cm}^{-3}$ 情况. 可见, 等离子体的存在使 TM_{01} 模的色散曲线抬高, 但曲线本身变得平坦, 即降低了波的群速. 该模式的特征频率随等离子体密度在一定范围内近为线性变化. 其结果与有关文献给出结论一致.

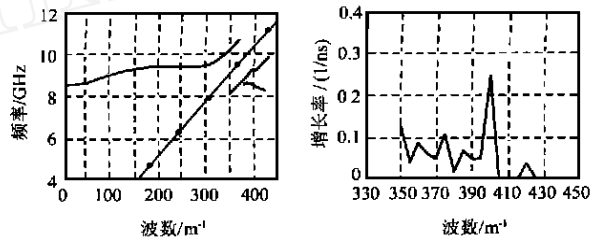


图 5 SWS 的热色散特性 图 6 SWS 的热色散特性

利用上述方程计算了考虑所有等离子体电子被排向波导壁条件下的热色散曲线如图 5 所示. 计算中取等离子体填充因子 f 为 0.75, 电压 100kV, 电流 240A. 图中 ω 为电子束线, 可见与冷状态相比, 系统色散曲线发生了变化. 由于注等离子体之间强烈的相互作用, 曲线在工作点附近变化很大, 结构波与空间电荷波相互交织, 可能存在电磁慢波与空间电荷波的相互转化. 图 6 画出了电磁波增长速率随波数的变化, 在工作点附近, 结构波与慢空间电荷波相互交叉后又分开, 导致色散方程有复数解. 其物理意义就是两者发生相互作用, 产生了不稳定增长. 而等离子体的作用就体现在分别使空间电荷慢波和结构波发生了变化, 因此这一过程实际上也就是线性条件下的三体相互作用, 其中电子束是以空间电荷波的形式加入互作用的.

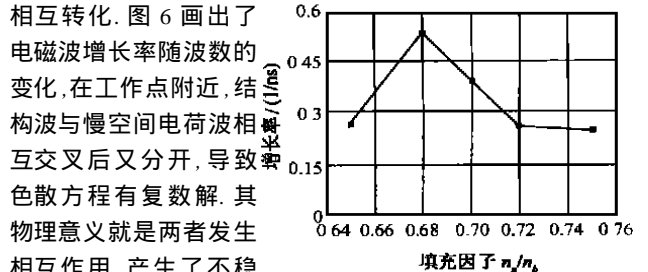


图 7 增长率与等离子体填充因子

5 相互作用增长率

对等离子体加载 SWS 结构, 我们计算了电磁波最大增长

率和等离子体密度的关系如图 7 所示. 从中可以看出: 等离子体填充密度变化时, 最大增长率不仅变化, 而且存在一最大值. 这是在外磁场、离子通道及电子束二维脉动条件下的新结果, 表明等离子体密度要适当选择, 以保证系统既有高的电子束质量, 又有大的增长率. 从图 7 看, 在填充因子为 0.68 时增长率最大, 根据有关研究可知, 这正好是电子束脉动为最小值的附近. 实际上, 该条件下最佳填充因子在 0.68 到 0.7 之间.

6 结论

无磁场等离子体加载波导, 在考虑了系统存在的离子通道和电子束传输的脉动性能后, 其色散特性会发生较大的变化, 并与等离子体密度密切相关. 其它条件不变时存在一最佳填充密度使系统电磁波增长率为最大, 这对应于电子束的小脉动传输状态.

参考文献:

- [1] R. W. Schumacher et al. [J]. IEEE Inter. Conf. of Plasma Sci. June 3, 1991.
- [2] Md. Murtuza ALI et al. [J]. Journal of The Physical Society of Japan, 1991, 60: 2655 - 2664.
- [3] K. MINAMI et al. [J]. IEEE Trans. on Plasma Science, 1990, 18(3): 537 - 544.

- [4] K. R. Chen J. M. Dawson. Ion-Ripple Laser [J]. Physical Review Letters, 1992, 68: 29 - 32.
- [5] John R. Smith et al. [J]. IEEE Trans. on P. S., 1991, 19: 850 - 854.
- [6] 刘盛纲. 微波电子学导论 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1985, 9.
- [7] 陈希, 谢文楷, 刘盛纲. 磁自聚焦电子注的空间轨迹及传输特性 [J]. 电子学报, 1999, 27(6): 16 - 18.
- [8] 陈希, 谢文楷, 刘盛纲. 电子束在等离子体微波器件中的脉动 [M]. 强激光与粒子束, 1999, 11(1).

作者简介:



陈 希 分别于 1985 年和 1988 年获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、网络、微波及电磁技术.

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学位, 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、学术会议上发表论文 30 余篇.

电子学报

2000 年第 9 期 Acta Electronica Sinica No. 9 2000

(总期 198 期) (Monthly) (Series No. 198)

主办单位 中国电子学会
 协办单位 中国计算机报社
 编辑 《电子学报》编辑委员会
 主编 王 守 觉
 总编辑 刘 力
 通信处 北京 165 信箱
 (邮政编码 100036)
 电 话 (010) 68285082
 传 真 (010) 68173796
 排版印刷 中国纺织印刷厂
 国内总发行 北京市报刊发行局
 国外总发行 中国国际图书贸易总公司
 国内订购处 全国各邮电局

Published by the Chinese Institute of Electronics, Beijing
 China Infoworld
 Edited by Editorial Board of Acta Electronica Sinica
 Chief Editor: Wang Shoujue
 Director: Liu Li
 Editorial Office of Acta Electronica Sinica (P. O. Box 165,
 Beijing 100036, China)
 Tel 86-10-68285082
 Fax 86-10-68173796
 Printed by Textile Printinghouse, China
 Distributed by
 Domestic: Beijing Baokan Faxingju, China
 Foreign: China International Book Trading Corporation
 Subscription Office — All Local Post Offices in China

刊号: ISSN 0372-2112
 CN11-2087/TN

邮发代号(国内/国外): 2-891/M436

国内定价 20.00