

周期永磁聚焦行波管离子噪声的粒子模拟

巩华荣¹, 宫玉彬¹, 唐昌建², 王文祥¹, 魏彦玉¹, 段兆云¹, 黄民智¹

(1. 电子科技大学物理电子学院 成都 610054; 2. 四川大学应用物理学院 成都 610051)

【摘要】采用混合模型研究了周期永磁聚焦行波管中的离子噪声,编写了一维粒子模拟程序,并对行波管的离子噪声特性进行了分析;计算表明相同气压下,周期永磁聚焦离子噪声的频率比均匀聚焦要低,且频谱有所展宽;提出改善电子束匹配条件是降低离子噪声的有效方法。

关键词 离子噪声; 行波管; 静电势阱; 粒子模拟

中图分类号 O441.4 文献标识码 A

Simulation of Ion Noise in PPM Focused TWT by Particle-in-Cell Method

Gong Huarong¹, Gong Yubing¹, Tang Changjian², Wang Wenxiang¹, Wei Yanyu¹, Duan Zhaoyun¹, Huang Minzhi¹

(1. School of Physical Electronics, UEST of China Chengdu 610054; 2. College of Applied Physics Sichuan University Chengdu 610051)

Abstract Characteristics of ion noise in a traveling wave tube (TWT) focused by periodic permanent magnets (PPM) have been discussed by means of a hybrid model. One dimension Particle-in-Cell method (PIC) simulation code is developed. Compare to uniform magnetic field focus system the noise frequency is lower and the spectrum is wider by the PPM focus system. From the analysis results we find decreasing the axial electrostatic potential well would reduce this noise.

Key words ion noise; traveling wave tube; electrostatic potential well; particle-in-cell

微波器件中,残余气体的电离会使输出信号相位产生周期性或随机性波动,通常称作离子噪声或相位噪声^[1-3]。电子枪与聚焦系统的不完全匹配会使电子束包络产生脉动,受空间电荷效应影响,电子束包络的脉动产生了沿轴向分布的静电势阱,离子噪声产生的原因被认为与离子势阱俘获,逸出,再俘获的过程密切相关。离子噪声的频率很低,一般在几十Hz到几十kHz,近来随着雷达在高度杂乱环境中探测微小目标的要求及通讯系统高速数据传输要求的提高,离子噪声的影响已成为行波管关注的焦点。文献[1]对均匀聚焦行波管的离子噪声作了详细分析。但是为了缩小行波管体积,降低功耗,大量的行波管采用了周期永磁聚焦系统,这种聚焦方式产生的电子束脉动与均匀磁场聚焦方式所产生的脉动有很大的不同,使得离子噪声的产生机理及消除与均匀聚焦相比也有所不同,而这方面的研究工作,目前并没有深入的报道,本文对此做了进一步的研究。

1 研究方法

本文采用粒子模拟的方法来研究离子噪声,并结合诊断,以其对周期永磁聚焦行波管离子噪声的产生机理及消除方法有所了解。假如要模拟电子的运动,根据粒子模拟的原理,其时间步长在皮秒量级,而离子振荡周期通常在毫秒量级,时间步长与离子振荡间相差9个数量级左右,因此对离子噪声过程做全电磁的

收稿日期:2003-09-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60271001;10276011);霍英东基金资助项目(81007)

作者简介:巩华荣(1977-),男,博士生,主要从事物理电子学方面的研究。

粒子模拟, 其计算量将非常巨大以致不可实现^[2]。

为了简化模型, 压缩计算量, 使问题可解, 本文将采用文献[1]提出的混合模型: 电子束由包络方程描述, 离子看成是宏粒子, 在一维方向(轴向)运动。二次电子被忽略, 模拟过程如下: 1) 初始沿轴向分布电位由电子束包络方程(无离子)的解确定, 然后根据残余气体的种类(氧)和气压及电离率引入离子, 离子自身产生的电位由泊松方程解得; 2) 离子运动由总电位产生的场决定, 然后再次求解含离子的电子束包络方程, 求得新的沿轴向分布电位; 3) 再计算上次及此次产生的离子分布及其电位...依次类推, 这个模型就可以模拟离子振荡。电子束包络产生的势阱远远小于管壁到轴向上的电势, 而离子能量与势阱相当, 保证了离子不会飞到管壁。

2 理论模型

在以上提及的混合模型中, 离子被看成是一维的宏粒子, 沿径向均匀分布在电子束分布区域, 忽略其径向运动, 离子产生速率为^[5]

$$\frac{dn_i}{dt} = \frac{s_i}{e} J_b N_g \quad (1)$$

式中 e 是电子电荷, s_i 是电离截面, J_b 是电子束流密度, N_g 是中性气体密度。离子与电子束是通过包络方程耦合的, 对于周期永磁聚焦, 包络方程为^[5]

$$\frac{d^2 r}{dz^2} + \frac{hB^2}{8V} \left(1 - \frac{B_k^2 r_k^4}{B^2 r^4} \right) r - \frac{I_b}{4\pi e_0 \sqrt{2hV}^{3/2} r} + \frac{e\Lambda_i}{4\pi m_e hV} = 0 \quad (2)$$

$$B = B_0 \cos\left(\frac{2\pi}{L} z\right) \quad (3)$$

式中 h 为电子荷质比, B 为周期磁场的表达式, V 为电子束电压, e_0 为真空介电常数, B_k 为阴极区磁场, r_k 为阴极工作半径, m_e 为电子质量, L_i 为离子电荷线密度, B_0 为磁场的峰值, L 为磁场周期, 沿轴向电位分布由以下公式求得

$$V_0(z) = V_{wall} - \left(1 + 2 \ln\left(\frac{R_{wall}}{r(z)}\right) \right) \frac{I_b}{4\pi e_0 \sqrt{2hV}} \quad (4)$$

式中 V_{wall} 为壁电压。

粒子的运动方程为

$$\frac{d}{dt} p_z = q \frac{d}{dz} [V_0(z) + j_i(z)] \quad (5)$$

式中 p_z 为离子沿轴向运动的动量, q 为离子电荷, $j_i(z)$ 为离子空间电荷位, 求解离子空间电荷位的泊松方程为

$$\frac{d^2}{dz^2} j(z) = - \frac{r_i(z, t)}{e_0} \quad (6)$$

式中 r_i 为沿轴离子电荷密度。

在本文的模型中不含高频场, 为得到相位信息, 可根据微波管小信号模型, 得到相位波动^[2]

$$\frac{dq}{q} \approx - \frac{\Delta z}{8LV^{1/2}} \sum_j \left(\frac{dV_j}{V_j^{1/2}} + \frac{dV_{j+1}}{V_{j+1}^{1/2}} \right) \quad (7)$$

式中 q 为出口与入口的相位差, dq 为相位差的波动, L 为相互作用区长度, $\Delta z = z_{j+1} - z_j$ 为轴向离散点的间距, $V_j \equiv V(z_j)$ 为沿轴向各点电位, $dV = V(z) - V$ 为沿轴向各点与加速电压的电位差。

3 数值实验与结果分析

计算采用的耦合腔行波管主要参数如下: 电压为20.5 kV, 电流为2.86 A, 平均束半径为0.14 cm, 电子注与行波相互作用区长度为12 cm, 阳极半径为0.254 cm, 电子束入口半径0.15 cm。周期永磁聚焦系统代替原来

的线包聚焦系统,选取磁场峰值为 $0.263T$,周期为 1 cm ,此时 $a = 0.06$,电子注处于第一稳定区,保证电子束能稳定的聚焦^[5],不考虑离子的影响,求解束包络方程,可得无离子时电子束包络与沿轴电位的分布,如图1所示。

由图1可知,电子束平衡半径在 0.145 cm 左右,电子束在漂移区存在脉动,相对脉动约3%,由空间电荷效应的影响,导致沿轴向电位分布产生一系列静电势阱。电子束脉动形状及沿轴静电势阱形状不规则,与均匀磁场聚焦情况下的光滑正弦函数形式的包络形状相差很大^[1],这是因为采用周期永磁聚焦带来的波动和电子枪与聚焦系统设计不匹配而引起的电子束脉动相叠加的结果,后者通过仔细调整,使电子枪与聚焦系统匹配后,即可消除,前者却是周期永磁聚焦系统的固有特性,是不可消除的。

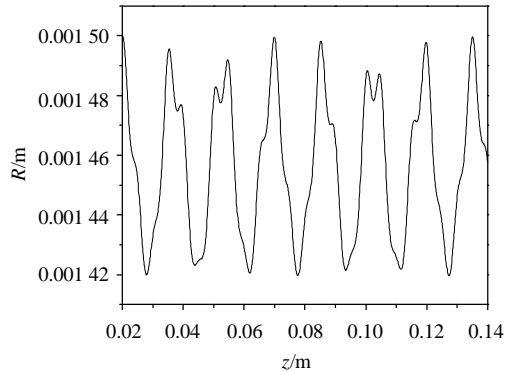


图1 电子束初始平衡半径

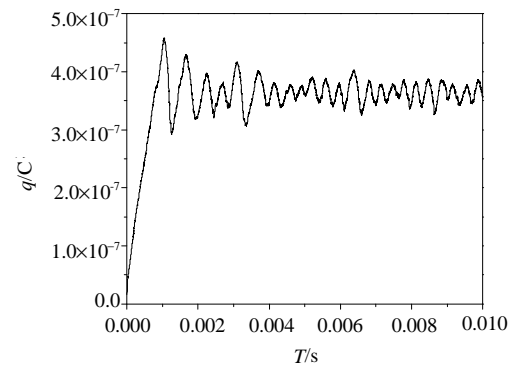


图2 离子总电量随时间的变化

3.1 离子噪声的产生与相位变化

图2、3所示是漂移管区离子总电量随时间的变化和相位变化图(残余气体气压为 10^{-2} Pa)。

从图2、3中可以看出离子总电量与相位振荡模拟过程中产生了离子总数与相位的准周期性波动,相位波动趋势与宏粒子总数波动趋势密切相关,两者变化周期相同,且宏粒子总数变化越大,相位变化幅度也越大,离子存在状态的改变(俘获,逃逸,再俘获)是产生相位噪声的重要直接因素。

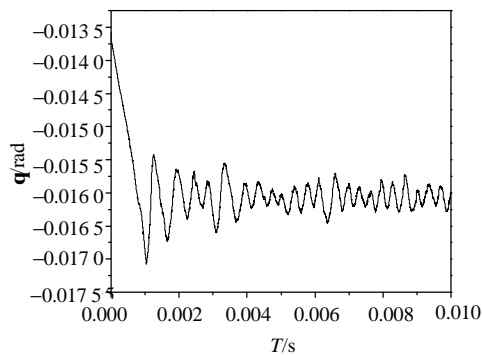


图3 输出信号相位随时间的变化

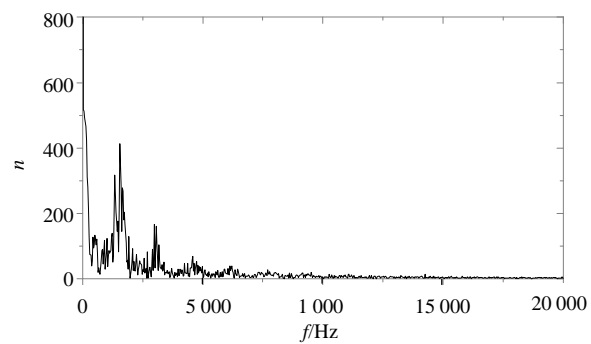


图4 宏粒子总数随时间变化的傅里叶分析

3.2 离子噪声的傅里叶频谱分析

宏粒子总数随时间变化的傅里叶变换曲线如图4所示,图中振荡的主频率在 1 kHz 左右,频率在音频附近,属离子噪声范围,除主频外还有各次谐波,幅值随频率的升高逐渐降低。与文献[1]中的均匀线包聚焦磁场相比,振荡频率相近,但工作气压要高一个数量级,且频谱有所展宽,说明周期永磁聚焦的离子运动似乎更加复杂,这和周期永磁聚焦时的沿轴静电势阱的不规则分布有关。实验结果表明,离子噪声会调制到管子的工作频率,使载波附近出现噪声^[2],影响信号的处理,周期永磁聚焦行波管离子噪声的频谱展宽,加剧了对信号的噪声干扰。

3.3 改善电子束匹配条件对离子噪声的影响

图5、6是电子束入口半径为 0.131 cm 时的粒子总数变化与相位变化图(残余气体气压为 10^{-2} Pa)。

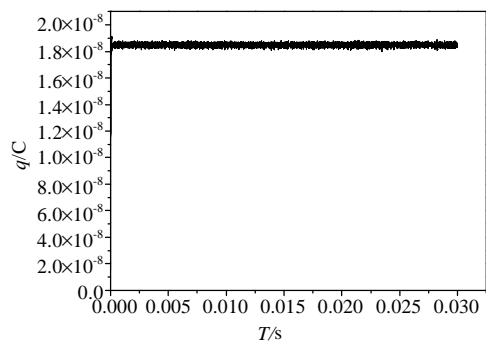


图5 改善电子束匹配条件后, 离子总电量随时间的变化

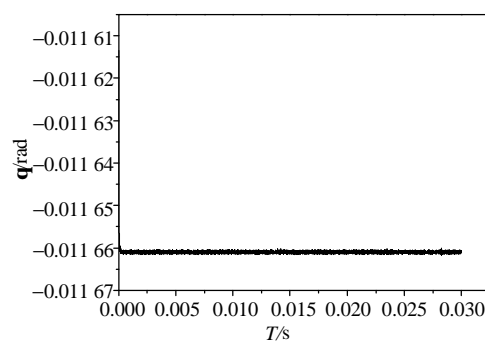


图6 改善电子束匹配条件后, 输出信号相位随时间的变化

电子束入口半径改变后, 离子总数波动和相位振荡变得非常微弱, 这是因为电子束匹配条件得到改善, 电子束包络中的脉动被消除, 只剩下周期永磁聚焦系统固有的波动, 而波动幅值很小, 沿轴向静电势阱也很弱, 离子被俘获、积累的数量很少, 沿轴向的电位波动也就很小, 离子噪声自然随之变小。从原理上讲, 精心设计电子光学系统并调整磁场, 减小乃至彻底消除电子束包络脉动, 是控制离子噪声的关键和有效方法, 但是对于实际的周期永磁聚焦系统要考虑到管子工作的其他要求, 通常使磁场峰值相对于布里渊聚焦(电子束完全匹配, 无脉动)磁场增加20%~30%, 且周期永磁体各个单元的磁场峰值有相当大的离散(3%~10%), 此时彻底消除电子束脉动是很困难的, 只能综合考虑各种因素, 尽量减小电子束脉动, 降低沿轴静电势阱, 从而减弱离子噪声的幅度。

4 结束语

离子噪声是行波管中一个复杂的问题, 特别是对于周期永磁聚焦行波管, 本文基于离子弛豫振荡理论对周期永磁聚焦行波管进行粒子模拟分析, 得到了周期永磁聚焦行波管离子噪声的一些特性, 同时指出改善电子束匹配条件是降低离子噪声的有效方法, 为行波管的设计、制造提供了参考, 对行波管的工作机理深入研究也有一定的意义。

参 考 文 献

- [1] Manheimer W M. Theory and simulation of ion noise in microwave tubes[J]. *Physics of Plasmas*, 2001, 8(1): 297-320
- [2] Charles K B. Simulation of low frequency noise in a CCTWT[R]. California: EE Department of Berkeley, 1999
- [3] Manheimer W M. On the theory of ion noise in microwave tubes[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 1999, 27(4): 1 146-1 163
- [4] Hockney R W, Eastwood J W. Computer simulation using particles[M]. New York: McGraw-Hill, 1981
- [5] 赵国骏, 凌宝京, 薛坤兴. 电子离子光学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1994

编 辑 孙晓丹