



·高功率微波技术·

毫米波回旋速调管放大器的自洽非线性数值模拟

张 点, 安晨翔, 张 军, 张建德, 钟辉煌

(国防科技大学 高功率微波技术研究所, 长沙 410073)

摘 要: 为了实现回旋速调管放大器的快速设计, 基于经典回旋管的稳态单模非线性理论方法, 开展了回旋速调管放大器的束波作用效率的理论模拟研究。由于单模理论无法匹配回旋速调管放大器的输入腔、中间腔两端的突变边界条件, 所以输入腔与中间腔都只能采用给定场法进行求解。回旋速调管的输出腔的功率输出端通常采用缓变结构, 这种腔体可以采用单模自洽理论进行求解。对两腔毫米波回旋速调管放大器进行了理论模拟, 并与商业粒子模拟软件的结果进行对比, 验证了该数值理论模拟方法的有效性。

关键词: 回旋速调管放大器; 数值模拟; 毫米波; 粒子模拟; 自洽非线性理论

中图分类号: TM832

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202133.210129

Self-consistent nonlinear numerical simulation of millimeter wave gyro-klystron amplifiers

Zhang Dian, An Chengxiang, Zhang Jun, Zhang Jiande, Zhong Huihuang

(High Power Microwave Technology Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: To realize quick design of the gyro-klystron amplifiers, a kind of numerical simulation method based on the single mode self-consistent nonlinear theory of gyrotrons was investigated. The single mode theory can't be used to match the disrupt boundary conditions of the input and the middle cavities of the gyro-klystrons, thus the input and the middle cavities can only be processed through single mode theory based on given field distributions. As for the output cavities with smooth boundaries at the power output ends, the single mode nonlinear simulation could be self-consistent. A millimeter wave two cavity gyro-klystron amplifier with reported detailed parameters was simulated using the developed single mode theory. The effectiveness of the numerical simulation was verified by comparing the simulation results with those obtained in a commercial particle in cell (PIC) simulation tool.

Key words: gyro-klystron amplifier; numerical analysis; millimeter wave; particle in cell simulation; self-consistent nonlinear theory

回旋速调管放大器是一种功率大、效率和增益高、性能比较稳定的微波、毫米波功率放大器, 在雷达、电子战系统及下一代高梯度加速器中都具有重要的应用前景^[1-3]。自 1966 年苏联和美国科学家提出回旋速调管以来, 其设计方法和理论(包括线性和非线性理论)均已发展得比较成熟^[4-5], 并基于非线性理论开发出了专门设计回旋速调管放大器的专业模拟软件 MAGYKL^[6-7]。

相比于商业的粒子模拟软件如 VSIM, MAGIC, CHIPIC, 基于非线性理论的专业模拟软件具有计算量小、计算速度快的优势, 在设计毫米波、太赫兹波段的谐波工作的回旋速调管时该优势将更加明显。相比于稳态、单模的非线性理论软件, 瞬态、多模非线性理论软件 MAGYKL 能够更好地体现模式竞争的干扰, 仿真精度更高。但是, 开发时域多模非线性理论模拟软件过程本身非常耗时, 目前, 国内电子科技大学的李斌教授等人已经在回旋速调管放大器的时域多模非线性理论模拟软件方面开展了大量工作^[8]。

为了实现毫米波回旋速调管放大器的快速设计, 本文选择用稳态、单模非线性理论方法来模拟回旋速调管放大器, 研究了两腔的回旋速调管放大器的输入腔、输出腔的束-波作用过程求解方法, 并利用商业粒子模拟软件对

* 收稿日期: 2021-04-05; 修订日期: 2021-09-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(61771482)

联系方式: 张 点, zhangdian206@163.com。

两腔回旋速调管放大器的求解精度进行了验证。

1 理论模型

本文依据的回旋管单模非线性理论为^[9]:取1个回旋圆上的 N 个特征电子代表所有电子,假设这 N 个电子初始情况下在角向平均分布,在忽略空间电荷场(注意,高压大电流的MW级别回旋速调管的空间电荷场难以忽略),忽略模式耦合效应,假设只有1个 TE_{mn} 模式参与相互作用并满足边界条件的情况下,自洽求解电子运动方程和波动方程,最终根据 N 个电子的总的能量得失情况来计算束波作用效率。

该理论得到的自洽电子运动方程和场波动方程表示为

$$\frac{d\bar{P}}{d\bar{z}} = -j\left(\frac{\gamma}{\bar{u}_{z0}}\right)\left(\frac{\bar{\omega}}{s} - \frac{\bar{\Omega}_0}{\gamma}\right)\bar{P} - \frac{1}{2^s(s-1)!} \frac{\gamma}{\bar{u}_{z0}} \frac{\eta_0 \chi_{mn}^2 C_{mn}}{c^2 \bar{r}_w^2 \bar{\Omega}_0} J_{m-s}\left(\frac{\chi_{mn}}{\bar{r}_w} \bar{R}_0\right) \bar{f} (\bar{P}^{s-1})^* \quad (1)$$

$$\left[\frac{d^2}{d\bar{z}^2} + \left(\bar{\omega}^2 - \frac{\chi_{mn}^2}{\bar{r}_w^2}\right)\right] \bar{f} = \frac{-j\mu_0 \bar{\omega} c}{2^{s-1}(s-1)!} \frac{I_0}{N \bar{u}_{z0}} \left(\frac{\chi_{mn}}{\bar{r}_w \bar{\Omega}_0}\right)^{s-1} \frac{\chi_{mn} C_{mn}}{\bar{r}_w} J_{m-s}\left(\frac{\chi_{mn}}{\bar{r}_w} \bar{R}_0\right) \sum \bar{P}^s \quad (2)$$

式中: $\bar{P} = \gamma v_T/c$ 为电子的归一化横向动量; \bar{f} 为场幅值轴向分布; s 为谐波次数; γ 和 η_0 分别为电子的相对论因子和荷质比; \bar{R}_0 和 \bar{r}_w 分别为归一化的引导中心半径和作用腔体半径; \bar{u}_{z0} 为归一化轴向动量; $\bar{\omega}$ 和 $\bar{\Omega}_0$ 分别为归一化的 TE_{mn} 模式角频率和电子初始时刻的Lamor回旋角频率; χ_{mn} 为 TE_{mn} 模式的本征贝塞尔函数的特征根; C_{mn} 为 TE_{mn} 模式的横向特征场分布函数的归一化系数。几何尺度项对谐振腔体的主半径 R_{cav} 进行了归一化,速度和动量项对真空中的光速 c 进行了归一化,频率项对 c/R_{cav} 进行了归一化。

自洽求解式(1)、式(2)构成的方程组,判断场分布是否满足边界条件的依据为

$$\left.\frac{d\bar{f}}{d\bar{z}}\right|_{\bar{z}=\bar{z}_n} = \sqrt{\chi_{mn}^2/\bar{r}_w^2 - \bar{\omega}^2} \bar{f} \quad (3)$$

$$\left.\frac{d\bar{f}}{d\bar{z}}\right|_{\bar{z}=\bar{z}_m} = -\sqrt{\chi_{mn}^2/\bar{r}_w^2 - \bar{\omega}^2} \bar{f} \quad (4)$$

当 $\sqrt{-1}$ 的值只取 $+j$ 时,式(3)和式(4)既包含了渐消场条件也包括了行波传输条件。然后,根据 N 个电子的总动能,计算功率效率 η

$$\eta = \frac{\gamma_0 - \left(\sum_N \gamma_i\right)/N}{\gamma_0 - 1} \quad (5)$$

2 各腔体的数值求解方法

在得到式(1)和式(2)的过程中,只考虑了单个TE模式且未考虑模式耦合效应,这对于半径变化比较舒缓的腔体是适用的。但是在处理回旋速调管的输入腔和中间腔时,由于其上、下游都是突变的截止边界条件,必然激起多个TE模式才能够满足边界条件。因此,单模理论的情况下,输入腔和中间腔里无法得到满足边界条件式(3)、式(4)的自洽的非线性数值解。即使采用单模理论进行输入腔和中间腔冷腔场的求解,也无法同时获得正确的 Q 值和场分布。例如,单模理论求解中间腔冷腔场时会出现场分布正确而 Q 值差好几个量级的情况。

作为放大器,分析回旋速调管的输入腔时必须计算输入功率产生的微波场对电子束的调制作用。功率注入效果以及输入腔的 Q 值不仅取决于腔体本身,还取决于注入入口的设计,但是注入结构并未体现到单模自洽相互作用方程式(1)和式(2)中。故采用单模非线性理论分析输入腔时,只能给定轴向场分布(由于两端的漂移段截止^[10],TE模式的轴向场分布近似为简单的正弦分布)和场幅值,进行电子运动方程求解,再根据式(6)中 Q 值的定义来判断求解结果是否满足能量守恒。

$$\eta P_{\text{beam}} + P_{\text{in}} = \omega W_{\text{em}}/Q \quad (6)$$

式中: η 为电子将能量交给场的效率,当取的 N 个特征电子总体上得到能量时 η 为负数; P_{in} 为输入腔的注入功率; P_{beam} 为电子束流的功率; W_{em} 为输入腔的储能,在给定的场分布下储能正比于场幅值的平方; Q 为给定的输入腔的 Q 值,在实际设计过程中受功率注入结构的影响显著。当式(6)满足时,即认为给定的场幅值合理,否则继续优化场幅值的大小。

中间腔体的数值处理方法与输入腔相同,不同之处在于式(6)中的输入功率 P_{in} 为0。输出腔的上游边界虽然

也是截止的突变结构,但其下游的功率提取段通常并不是突变结构^[11]。数值计算结果表明,只有上游一个突变边界的输出腔可以用式(1)和式(2)进行单模的非线性自治理论分析,按照式(3)给出的输出腔左端边界条件,再看计算得到的右边界场是否满足式(4)中的边界条件,不满足则继续优化左端边界的初始条件。

综上,整个数值求解流程如图1所示。

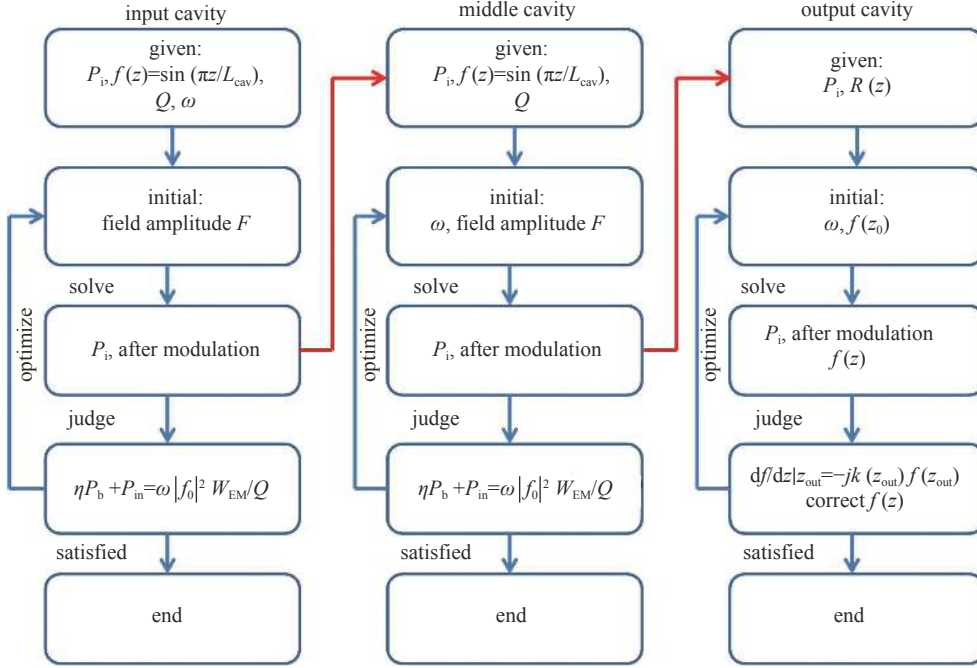


Fig. 1 Numerical simulation code diagram of gyro-klystron
图1 回旋速调管数值模拟程序流程图

图1中 $P_i (\propto e^{j\psi_i})$ 为各个电子的动量。求解中假设漂移管中没有束波作用(实际的管子中可以通过涂覆衰减材料来避免漂移管中激励起微波场),仅考虑电子在漂移管中的相位漂移过程。输入腔、中间腔右边界处的电子动量 P_i 经过式(7)所示的相位漂移后,成为下游腔体的输入条件。

$$\Delta\psi = \left(\frac{\omega}{s} - \frac{\Omega_0}{\gamma} \right) \frac{L}{v_z} \quad (7)$$

式中: L 为漂移段的长度; v_z 为进入漂移段前的轴向速度。在均匀磁场和 TE 模式下,各个电子的轴向动量 γv_{z0} 守恒且相等,但由于 γ 的变化,轴向速度 v_z 并不守恒。

3 数值求解结果验证

为了验证本文的单模非线性理论数值程序的求解结果,模拟了文献中的两腔 Ka 波段二次谐波回旋速调管放大器^[12],并与商业粒子模拟 (particle in cell simulation, PIC simulation) 软件^[13]的结果进行了对比。该回旋速调管的腔体结构如图2所示,具体的腔体参数如表1所示。电参数为:电压 70 kV,束电流 15 A,输入微波功率 1 kW,外加磁场 0.685 T,引导中心半径 4.2 mm,横纵速度比 1.5,谐波次数为 2,工作模式 TE₀₂₁。

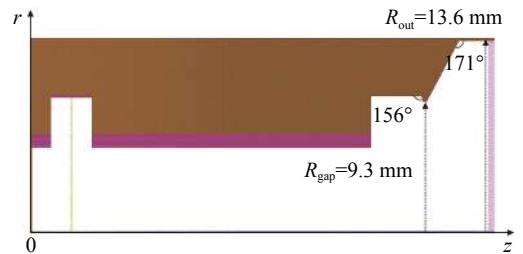


Fig. 2 PIC model of a Ka band two cavity second harmonic gyro-klystron amplifier

图2 Ka 波段两腔二次谐波回旋速调管放大器 PIC 模型

表1 Ka 波段两腔二次谐波回旋速调管放大器参数

Table 1 Parameters of a Ka band two cavity second harmonic gyro-klystron amplifier

stage	radius/mm	length/mm	Q	frequency/GHz
input	9.77	20.6	300	35.0
output	9.66	25.3	610	34.96
drift	7.0	122		

数值程序计算得到的输入腔内电子效率如图3所示,输入腔内电子得到能量,电子效率约为-0.02%。输出腔入口和输出腔出口处的电子相空间图如图4所示。从图中可以看出,二次谐波工作所以回旋圆上有2个群聚中心;经过输出腔后小半径的电子即失去能量的电子数量显著多于得到能量的电子数量。注意,该计算选择了41个特征电子。特征电子的个数 N 不要选为谐波次数 s 的整数倍,避免 s 个群聚中心周围的电子的动能取平均时损失计算精度^[14-15]。

数值程序计算的回旋速调管的效率为21.5%、增益为23.8 dB,而商业PIC软件模拟的效率为19.4%、增益为23.4 dB,数值模拟结果略高于PIC模拟结果,表明该数值程序对回旋速调管放大器的设计具有指导意义。在模拟耗时方面,该商业PIC软件为串行运行,在0.05 mm的网格精度下耗时2 h 40 min,而本文的数值计算在相同算力下的耗时不到商业PIC软件的2%。

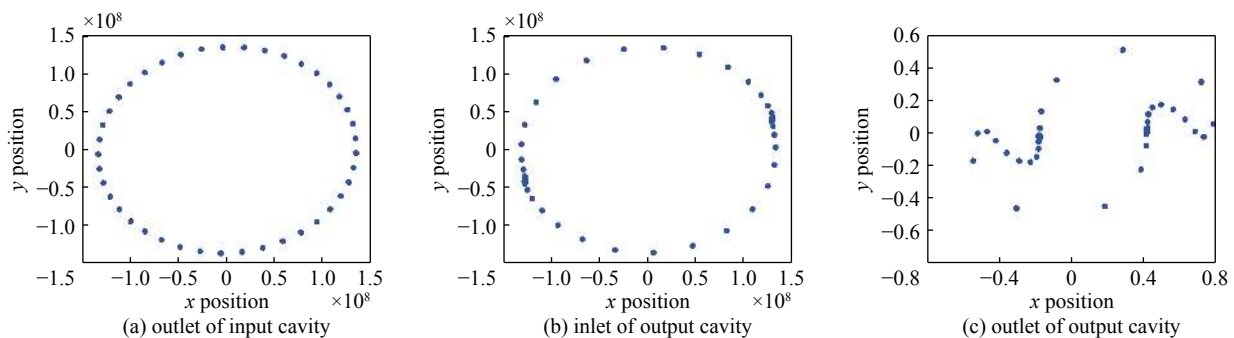


Fig. 4 Electron phase space at different stage of the Ka band two cavity second harmonic gyro-klystron amplifier

图4 Ka波段两腔二次谐波回旋速调管放大器不同位置处的电子相空间图

4 结论

本文采用单模非线性理论数值模拟了回旋速调管放大器。由于输入腔和中间腔的两端都是半径突变结构,会激励起高阶模式,用单模的自洽理论无法得到正确的数值解,只能采用非自洽的非线性理论求解电子运动方程,并根据 Q 值的定义来判断能量守恒;输出腔虽然上游边界是半径突变结构,但下游边界依然是缓变结构,使用自洽的单模非线性理论计算也能够得到准确的数值解。采用公开报道的Ka波段2次谐波回旋速调管放大器的参数,将本文的单模非线性理论模拟结果与商业PIC模拟软件的结果进行了对比,验证了该数值模拟方法的有效性。

参考文献:

- [1] Danly B G, Blank M, Calame J P, et al. Development and testing of a high-average power, 94-GHz gyrokystron[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2000, 28(3): 713-726.
- [2] 罗勇. 回旋速调管高频系统及注-波相互作用研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2003 (Luo Yong. High frequency system and beam-wave interaction study of gyro-klystron amplifiers[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2003)
- [3] 罗勇, 李宏福. 回旋速调管放大器注-波相互作用分析[J]. *强激光与粒子束*, 2005, 17(5): 724-728. (Luo Yong, Li Hongfu. Study on the interaction between electron beam and waves in gyrokystron amplifiers[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, 17(5): 724-728)
- [4] Chu K R. The electron cyclotron maser[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2004, 76(2): 489-540.
- [5] Levush B, Blank M, Calame J, et al. Modeling and design of millimeter wave gyrokystrons[J]. *Physics of Plasmas*, 1999, 6(5): 2233-2240.
- [6] Latham P E, Lawson W, Irwin V. The design of a 100 mw, Ku band second harmonic gyrokystron experiment[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 1994, 22(5): 804-817.
- [7] Vlasov A N, Antonsen T M, Jr Chernin D P, et al. Simulation of microwave devices with external cavities using MAGY[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2002, 30(3): 1277-1291.
- [8] 马俊建, 朱小芳, 金晓林, 等. 回旋速调管放大器时域非线性理论与模拟[J]. *物理学报*, 2012, 61: 208402. (Ma Junjian, Zhu Xiaofang, Jin Xiaolin, et al. A time-dependent nonlinear theory and simulation for gyrokystron amplifier[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61: 208402)

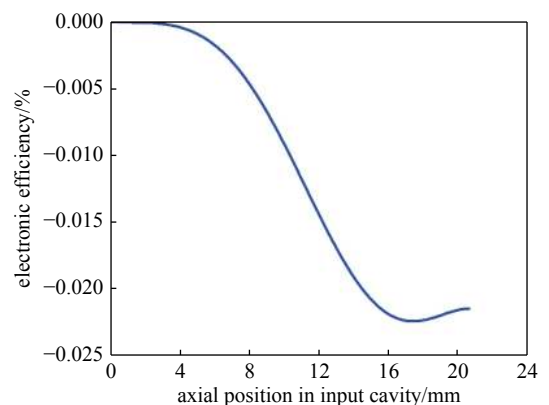


Fig. 3 Electronic efficiency in input cavity of the Ka band two cavity second harmonic gyro-klystron amplifier

图3 Ka波段两腔二次谐波回旋速调管放大器输入腔内的电子效率

- [9] Fliflet A W, Read M E, Chu K R, et al. A self-consistent field theory for gyrotron oscillators: application to a low Q gyromonotron[J]. [International Journal of Electronics](#), 1982, 53(6): 505-521.
- [10] 刘迎辉, 李宏福, 雷朝军, 等. 输入腔高频场的矩阵分析[J]. *强激光与粒子束*, 2007, 19(6): 931-933. (Liu Yinghui, Li Hongfu, Lei Chaojun, et al. Analysis of RF field in an input cavity by parameter matrix[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, 19(6): 931-933)
- [11] 耿志辉, 刘濮鲲. 回旋速调管放大器输出腔的特性研究[J]. *强激光与粒子束*, 2004, 16(11): 1445-1448. (Geng Zhihui, Liu Pukun. Characteristic study of output cavity in gyrokystron amplifier[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, 16(11): 1445-1448)
- [12] Geng Zhihui, Liu Pukun. Design of a Ka-band second harmonic gyrokystron amplifier by using a self-consistent nonlinear simulation[J]. [IEEE Transactions on Plasma Science](#), 2006, 34(3): 534-540.
- [13] Zhou Jun, Liu Dagang, Liao Chen, et al. CHIPIC: an efficient code for electromagnetic PIC modeling and simulation[J]. [IEEE Transactions on Plasma Science](#), 2009, 37(10): 2002-2011.
- [14] 耿志辉. 毫米波回旋速调管放大器的自洽非线性理论与模拟[D]. 北京: 中国科学院研究生院(电子学研究所), 2005 (Geng Zhihui. Self-consistent nonlinear theory and simulation of millimeter wave gyro-klystron amplifier[D]. Beijing: Institute of Electronic, Chinese Academy of Sciences, 2005)
- [15] 孙迪敏. W波段三次谐波回旋管理论与实验研究[D]. 北京: 清华大学, 2014 (Sun Dimin. Theoretical and experimental study of W-band third harmonic gyrotrons[D]. Beijing: Tsinghua University, 2014)