

耦合腔行波管大信号注波相互作用研究与设计

李文君^{①②} 许州^② 林郁正^① 金晓^② 黎明^② 杨兴繁^② 周霖^②

^①(清华大学工程物理系 北京 100084)

^②(中国工程物理研究院应用电子学研究所 绵阳 621900)

摘要: 行波管中注波相互作用的特点是电子的速度调制、群聚及其与高频场的能量转换等过程沿整个慢波结构连续且同时进行, 这是行波管可以在很宽频带内得到大输出功率的原因。在研究冷腔特性的基础上, 使用三维 PIC 粒子模拟软件定量分析了耦合腔行波管的大信号注波相互作用过程, 完成了 X 波段连续波行波管的设计。设计参数: 工作频率 7.1–8.5GHz, 带宽 18%, 最大输出功率 3kW。

关键词: 耦合腔行波管; 大信号注波相互作用; PIC 粒子模拟; X 波段; 连续波; 冷腔特性

中图分类号: TN124

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)07-1769-03

Design and Large-Signal Beam-Wave Interaction Research of Coupled-Cavity Traveling-Wave Tube

Li Wen-jun^{①②} Xu Zhou^② Lin Yu-zheng^① Jin Xiao^②

Li Ming^② Yang Xing-fan^② Zhou Lin^②

^①(Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

^②(Institute of Applied Electronics, Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: An important characteristic of the beam-wave interaction in traveling-wave tube is that the velocity modulation and bunching of electron beam, also its energy exchange with the RF field, happen continuously and simultaneously along the whole slow-wave structure. This is why traveling wave tube can offer large output power in a very broad band. On the basis of cold cavity characteristic research, quantitative analysis of the large signal beam-wave interaction of coupled-cavity traveling-wave tube is performed using three-dimensional PIC simulation code. In addition, an X-band CW coupled-cavity traveling-wave tube is designed with the design parameters as follows: operating frequency from 7.1GHz to 8.5GHz, bandwidth 18%, the highest output power of 3kW.

Key words: Coupled-cavity travelling-wave tube; Large-signal beam-wave interaction; PIC simulation; X-band; CW; Cold cavity characteristic

1 引言

宽带大功率连续波微波器件广泛应用于卫星通信、雷达、遥感遥测等领域。在各种微波器件中, 行波管^[1,2]是将宽频带和大功率结合得最好的器件, 也是用途非常广泛的一种。

目前, 国际上在连续波行波管方面的研究已具有相当水平, 不少公司有系列管型(覆盖广阔的频率、功率范围)出售, 如美国的CPI公司、法国的Thales公司等。在研制行波管时, 普遍采用计算机仿真指导设计^[3-5], 这种设计方式可以避免实验方式研制周期长、耗费资金大等缺点, 可以大大加速制管进程, 提高研制速度。

国内对于连续波行波管的研究相对落后, 目前报道的最大连续波功率仅为 1kW, 其原因主要有以下两点: 管型普遍采用螺旋线慢波结构, 由于其自身结构的原因, 大功率情况

下散热困难^[6], 限制了功率水平的进一步提高; 计算机仿真设计开展较晚, 用PIC软件模拟行波管大信号注波相互作用过程的相关报道较少^[7,8]。

本文使用三维 PIC 粒子模拟软件设计了一只 X 波段连续波耦合腔行波管。首先, 给出了行波管腔通带色散曲线及相速特性等冷腔参数的模拟结果。然后, 定量分析了行波管中电子的速度调制、群聚及其与高频场的相互作用和能量转换过程。最后, 给出了该管的大信号设计结果。

2 行波管冷腔参数模拟结果

图 1, 图 2 分别给出了使用 PIC 软件模拟得到的行波管腔通带的色散曲线及相速特性。图 1 曲线显示该管腔通带在 6.8–9.7GHz 之间, 通带带宽达到 35%。由图 2 可知, 腔通带中除上下两个截止频率附近各模式的相速相差较大外, 通带内的相速特性较为平坦, 其中 7.1–9.3GHz 相对带宽近 27% 的频率范围内归一化相速差小于 0.04。可见, 冷腔参数模拟中得到了较大的行波管腔通带带宽和平坦的相速特性, 为后

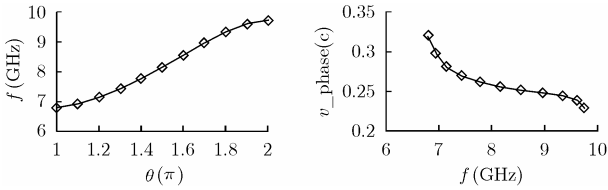


图 1 行波管色散曲线 图 2 行波管腔通带的相速特性

续的大信号注波相互作用设计奠定了基础。

3 行波管大信号注波相互作用研究

3.1 计算模型

行波管大信号计算模型见图 3，该模型包括了行波管的微波输入输出耦合装置，与实际的管子结构相符合，是一个较为完整的模型。设计中输入输出装置采用波导耦合，这种设计结构简单，有利于调试，可以大大加快实验的调试进程。

模型中设置一端盖板为阴极发射电子束，另一端盖板为收集极收集电子。电子束同步电压可由行波管的相速特性曲线求得。但实际上由于电子束与微波在管中发生的复杂的相互作用，最佳工作电压并非同步电压，一般情况下要比同步电压高，模拟中需要对此进行优化设计。



图 3 行波管大信号计算模型

3.2 大信号注波相互作用研究

以 7.5GHz 微波输入功率 40W、直流电子束参数 17kV0.8A、磁场 0.2T 的输入条件为例研究了行波管的注波相互作用过程。模拟中一些设置如下：运行时间 35ns，采用宏粒子模型，发射宏电子总数约 550000 个。

图 4 给出了 33.442ns 时间步长时行波管的电子相空间图，其中图 4(a)为 $y-z$ 相空间图，图 4 (b)为 E (能量)- z 相图。由图 4(a)可以定性看到电子良好的群聚，且无电子截获；图 4(b)显示电子的速度调制沿整个慢波结构连续进行，而且电子束与微波产生了强烈的能量交换，大部分电子(非全部)损失能量交给微波，部分电子交出的能量达到初始能量的约 30%。

图 5 给出了行波管各腔鼻锥间隙中点处的 E_z 场，其中图 5(a)-图 5 (d)分别为首腔、第 10 腔、第 20 腔及末腔的情况。由图可见，该处的 E_z 场幅值由首腔的 50kV/m 持续增长至末腔的 450kV/m。

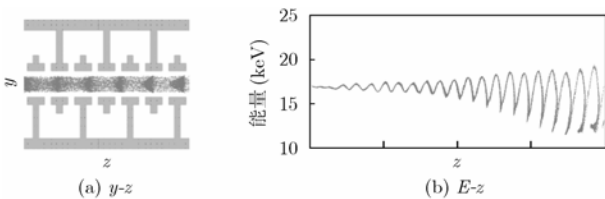


图 4 行波管电子相空间图

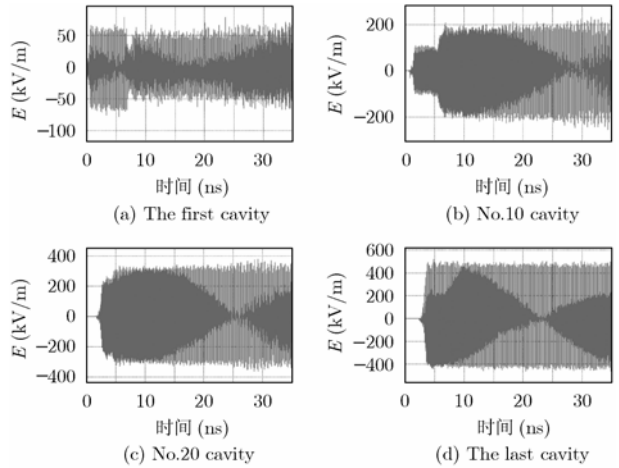


图 5 行波管各腔鼻锥间隙中点处的 E_z 场

图 6 为通过行波管各个腔的电子流波形。由于电子的群聚，图 6 中的电流都已不再是直流电流；但是，各腔的电子群聚程度并不一样，因此各腔电流的波动范围大小不一。首腔的群聚程度很小，对应电流波动范围仅为 0.79-0.81A；随着电子束往前运动，群聚程度加大；最后，末腔电流的波动范围增大到 0.08-2.2A，电子获得了良好的群聚。

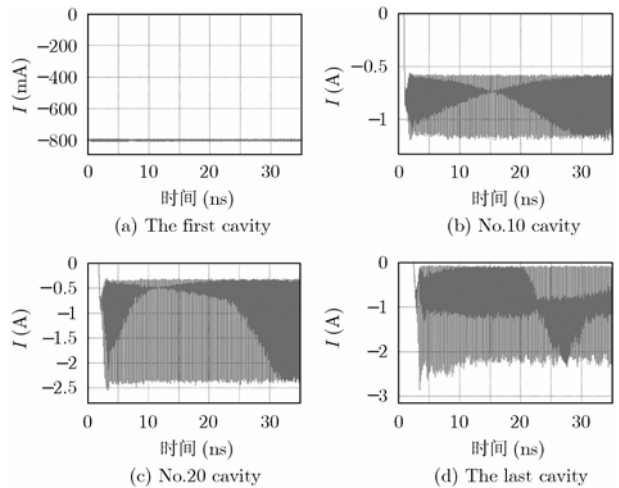


图 6 通过行波管各腔的电子流

图 4-图 6 定量显示了行波管中注波相互作用的特点：电子的速度调制、群聚及其与高频场的能量交换在整个慢波结构区连续且同时进行。

最后，给出行波管收集极收集的电子流波形及输出波导处经过放大的微波波形见图 7，图 8。图 7 显示收集极收集到的平均电子流为 0.8A，证实电子无截获，动态通过率为 100%；图 8 展示了 7.5GHz 频率 2.82kW 的连续波输出，增益达 18.5dB，效率接近 21%。

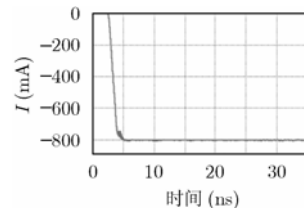


图 7 收集极收集的平均电子流

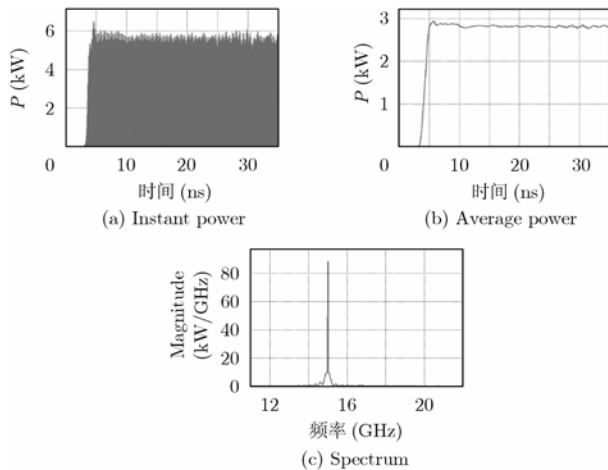


图8 7.5GHz微波输出波形及频谱

4 X波段连续波行波管的设计结果

图9给出了行波管输出功率与频率(计算间隔0.2GHz)的关系曲线及最大输出功率点的-1dB功率线,图中曲线为电子束电压17kV、电流0.8A、磁场为0.2T时的计算结果。可见,7.7、8.3GHz两个频率处的输出功率最大,达到3kW;7.1~8.5GHz频带内各点的输出功率基本上都在-1dB线之上,设计管型-1dB带宽达到18%。

目前,该管模型腔正在加工中。

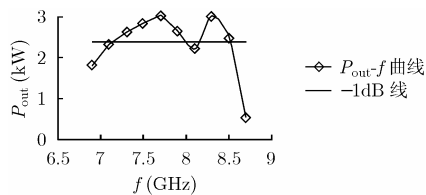


图9 行波管输出功率与频率的关系

5 结束语

采用数值仿真的方法,利用三维PIC软件定量分析了耦合腔行波管的大信号注波相互作用过程,模拟结果显示了该相互作用过程的特点:电子的速度调制、群聚及其与高频场的相互作用和能量交换在整个慢波结构区连续且同时进行。在此基础上,设计了一只X波段连续波耦合腔行波管。该管中心频率7.8GHz,-1dB带宽达到18%,工作频段内最大输出功率3kW,电子效率大于17%。本管设计中所用仿真模型结构完整,符合实际管子结构,对实际制管具有较大的指导意义,可大大加速制管进程,提高研制速度。

参考文献

- [1] 邮电五零六厂《行波管》编写组. 行波管. 北京: 人民邮电出版社, 1979: 1-58.
- [2] 杨祥林, 张兆镛, 张祖舜. 微波器件原理. 北京: 电子工业出版社, 1994: 167-224.
- [3] Stockwell B, Doniger B, and Friedlander F. Advanced software coldtest of electron devices with uSOS[A]. Proceeding International Electron Devices Meeting[C]. Washington, 1989: 207-210.
- [4] Kantrowitz F and Tammaru I. Three-dimensional simulations of frequency-phase measurements of arbitrary coupled-cavity RF circuits[J]. *IEEE Trans. on Electron Devices*, 1988, 35(11): 2018-2026.
- [5] Wilson J D and Kory C L. Simulation of cold-test parameters and RF output power for a coupled-cavity traveling-wave tube[J]. *IEEE Trans. on Electron Devices*, 1995, 42(11): 2015-2020.
- [6] 赖宇晴, 杨中海. 螺旋线行波管热分析的计算机模拟[A]. 第一届高能电子学学术交流会会议论文集[C]. 绵阳, 1999: 169-172.
- [7] 李文君, 许州, 林郁正, 等. S波段宽带大功率连续波耦合腔行波管三维模拟设计[J]. *强激光与粒子束*, 2006, 18(6): 965-968.
- Li Wen-jun, Xu Zhou, and Lin Yu-zheng, *et al.* Three-dimensional simulation of a broadband high-power CW S-band coupled-cavity traveling-wave tube. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, 18(6): 965-968.
- [8] 雷文强, 杨中海, 廖平. 耦合腔慢波特性及其注-波相互作用的三维软件模拟[J]. *强激光与粒子束*, 2003, 15(7): 673-676.
- Lei Wen-qiang, Yang Zhong-hai, and Liao Ping. Three dimension software simulation for slow-wave characteristic and beam-wave interaction of coupled cavity circuit. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, 15(7): 673-676.

李文君: 男, 1980年生, 博士生, 从事微波器件研究。

许州: 男, 1965年生, 研究员, 博士生导师, 主要从事加速器物理技术、高功率微波技术与应用等方面的研究。

林郁正: 男, 1937年生, 教授, 博士生导师, 主要从事加速器物理等方面的研究。