

Ka波段耦合腔行波管的粒子模拟研究

刘洋, 徐进, 刘漾, 赖剑强, 许雄, 沈飞,
黄民智, 唐涛, 魏彦玉, 宫玉彬

(电子科技大学物理电子学院微波电真空器件国家级重点实验室 成都 610054)

【摘要】利用粒子模拟技术对Ka波段耦合腔行波管的非线性相互作用现象进行了研究。相互作用电路采用的是重入式双交错梯形线耦合腔慢波结构, 设计了匹配良好的高频耦合系统, 并建立了一个基于CPI的Ka波段耦合腔行波管的三维电路模型。粒子模拟结果表明, 当采用和CPI管子相同的电气参数和色散特性时, 该管能在28.3~30 GHz的频率范围内有大于550 W的饱和平均输出功率, 瞬时带宽大于600 MHz, 相应的饱和增益和电子效率分别大于33 dB和8.39%。上述结果与CPI的测试结果吻合良好, 证明了设计方案的可行性以及粒子模拟能较准确地对耦合腔行波管的工作性能进行估计。

关键词 耦合腔行波管; Ka波段; 粒子模拟; 重入式双交错梯形线; 慢波结构

中图分类号 TN124.2

文献标志码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2013.05.009

Particle-In-Cell Simulations of a Ka-Band Coupled-Cavity Traveling-Wave Tube

LIU Yang, XU Jin, LIU Yang, LAI Jian-qiang, XU Xiong, SHEN Fei, HUANG Min-zhi,
TANG Tao, WEI Yan-yu, and GONG Yu-bin

(National Key Laboratory of Science and Technology on Vacuum Electronics, School of Physical Electronics,

University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054)

Abstract The particle-in-cell simulations of a Ka-band coupled-cavity traveling-wave tube (CCTWT) were performed to investigate the nonlinear interaction of the tube. The interaction circuit employs the double staggered ladder line coupled-cavity slow-wave structure. Combined with the design of well-matched high frequency coupling system, a 3-D circuit model based on CPI's Ka-band CCTWT was constructed. The particle-in-cell simulation results show that the tube can produce saturated average output power over 550 watts with greater than 600 MHz instantaneous bandwidth ranging from 28.3 GHz to 30 GHz when we adopt the similar parameters as CPI's Ka-band CCTWT, such as beam voltage, beam current and the slow-wave structure dispersion characteristics. The corresponding saturated gain and beam efficiency can reach over 33 dB and 8.39%, respectively. These results are in good agreement with the experimentally measured ones of the CPI's Ka-band CCTWT, which suggest that our design scheme is feasible and the CST PIC solver can accurately predict the performance of the CCTWT.

Key words coupled-cavity traveling-wave tube; Ka-band; particle-in-cell; reentrant double staggered ladder; slow-wave structure

Ka波段作为毫米波段重要的频段之一, 主要应用于军用雷达、卫星通信等领域^[1-3]。放大器作为其核心器件, 直接决定着整个系统的工作性能。由于在带宽和功率方面拥有其他器件无法比拟的优越性, 行波管是最重要的毫米波放大器之一^[4-6]。而耦合腔行波管由于功率容量大而受到了广泛的关注^[1-3]。2005年CPI报道了一只用于卫星通信的Ka波段双交错梯形线耦合腔行波管^[2], 它能在28.3~30 GHz

的频率范围内有大于500 W的饱和输出功率, 其瞬时带宽和增益分别大于500 MHz和33 dB。同时, 粒子模拟技术是近年来随着计算机性能不断提高而快速发展起来的时域电磁场分析方法, 它通过直接追踪大量宏粒子, 联立求解Maxwell方程和Lorentz方程, 直观地模拟电磁场与粒子的相互作用过程。该方法极为适合分析行波管的非线性性能, 能大大缩短行波管的设计和开发周期, 因而越来越多的研究者倾向

收稿日期: 2011-12-22; 修回日期: 2012-07-02

基金项目: 国家杰出青年科学基金(61125103); 国防科技重点实验室基金(9140C050101110C0501); 中央高校基本科研业务费专项基金(ZYGX2009Z003, ZYGX2010J054)

作者简介: 刘洋(1983-), 男, 博士生, 主要从事毫米波行波管技术及CAD方面的研究。

于利用粒子模拟的方法估计行波管的工作性能^[7-10], 从而指导试验加工制管。

本文建立了一个基于CPI的Ka波段耦合腔行波管的三维电路模型, 利用CST粒子工作室对其非线性相互作用现象进行了研究, 并估计了其工作性能。

1 色散特性分析

文献[11]提出了双交错梯形线耦合腔, 其结构示意图如图1所示。相比传统的休斯结构, 它除了具有功率容量大的特点之外, 还具有宽带宽、加工简单等优点, 是一种很有潜力的微波毫米波行波管慢波结构^[12]。

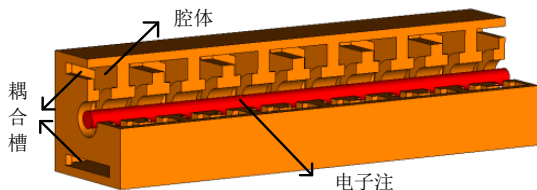
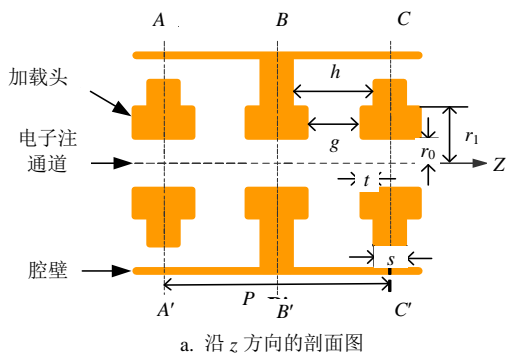
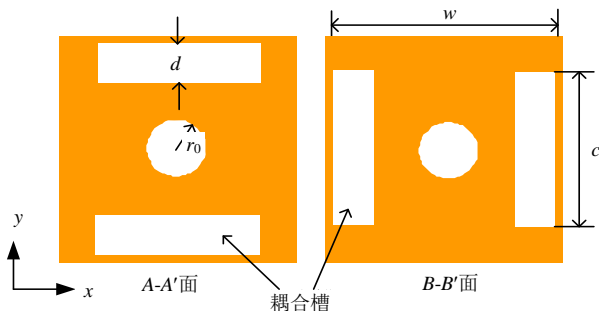


图1 双交错梯形线耦合腔结构示意图



a. 沿z方向的剖面图

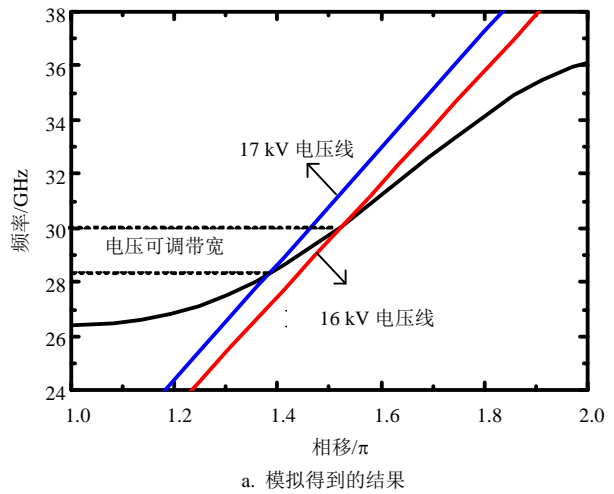


b. A-A'面和 B-B'面上的截面图

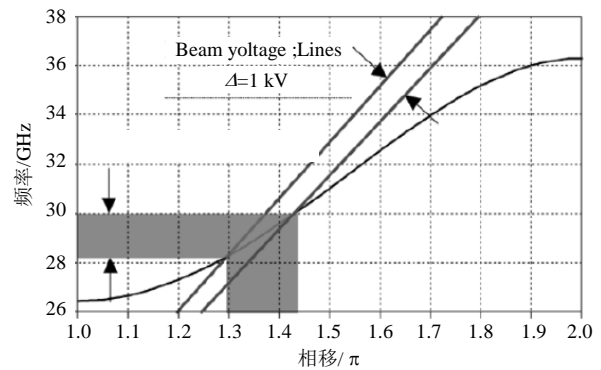
图2 双交错梯形线耦合腔结构的参数尺寸图

图2给出了该结构对应的参数尺寸, 本文采用直角坐标系(x,y,z), +z方向代表电子注通道轴向方向。腔体的截面是正方形的(w×w), 在每个腔壁的上下或左右开两个耦合槽, 相邻腔壁上的耦合槽之间相差90°, 然后再沿着z方向在腔壁中心开圆形的电子注通道, 从而形成双交错慢波结构。加载头的作用主要是使纵向电场更多地集中在电子注通道周围, 从而能增加耦合阻抗, 提高电子效率。

利用三维电磁仿真软件HFSS^[13]对该慢波结构的色散特性进行研究。由于该结构是轴向周期性的, 可以通过对图2a中的A-A'和B-B'之间的结构设置主从边界条件^[14]来计算其色散特性。通过对结构参数尺寸进行优化(其结构尺寸参数如表1所示), 模拟得到了色散特性曲线, 其结果如图3a所示。图3b给出了由CPI得到的色散特性曲线^[2]通过对比分析发现, 本文模拟得到的色散特性曲线与CPI得到的基本相同。同时也可以看出, 由于色散比较强, 为了获得更宽的工作带宽, 可以通过改变电子注电压, 从17 kV到16 kV, 使电子注和电磁波能在较宽的带宽范围内(28.3~30 GHz)保持良好的同步。



a. 模拟得到的结果



b. CPI得到的结果

图3 带电压线的色散曲线

表1 双交错梯形线耦合腔的结构参数尺寸

结构参数	尺寸
腔体(w×w) /mm ²	4.59×4.59
耦合槽(c×d) /mm ²	3.6×0.5
腔高度(h) /mm	1.174
腔间隙(g) /mm	0.574
槽高度(s) /mm	0.6
加载头高度(t) /mm	0.3
加载头半径(r ₁) /mm	1.3
电子注通道半径(r ₀) /mm	0.8
周期长度(p) /mm	3.548

2 耦合系统的设计

耦合腔行波管在慢波结构的色散特性确定之后,还必须解决慢波电路与外部电路的能量耦合问题,即设计行波管的高频耦合系统,这对提高耦合腔行波管的效率、增益、稳定性等方面有重要的作用。到目前为止,关于耦合腔行波管高频耦合系统的文献比较少,而且基本上都是针对对休斯型结构^[15-16]。CPI虽然已经造出了双交错梯形线耦合腔行波管^[2],但并没有对高频耦合系统进行介绍。因此,设计出适用于该结构匹配良好的高频耦合系统,对进行工程化制管有重要的意义。

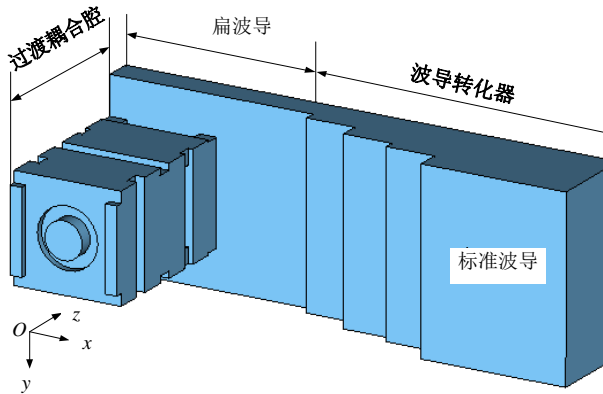


图4 高频耦合系统结构示意图

本文利用仿真软件对双交错梯形线耦合腔的高频耦合系统进行了设计,其结构如图4所示。整个高频耦合系统由扁波导、过渡耦合腔和波导变换器3个部分组成。外部电路与耦合腔慢波系统的高频能量耦合一般分两步实施:1) 解决扁波导的 TE_{10} 与耦合谐振腔 TM_{110} 模式之间的转换;2) 通过波导变换器实现标准波导与扁波导之间的转换。具体方法如下:1) 为了实现主耦合腔到扁波导($1.174\text{ mm} \times 7.12\text{ mm}$)的过渡,在之间设置了两个周期长度的过渡耦合腔。对于过渡耦合腔,由于其腔体的尺寸主要决定着管子的工作电压和频率,本文只对耦合槽的尺寸进行调节。通过逐渐增加槽的长度和宽度(c 和 d),使其阻抗产生渐变,实现主耦合腔与扁波导之间的过渡;2) 根据阻抗变换原理^[17],设计了一个四阶波导变换器实现扁波导与标准波导($3.556\text{ mm} \times 7.12\text{ mm}$)之间的匹配。

图5为带高频耦合系统的双交错梯形线耦合腔电路的传输模型。本文利用CST的微波工作室^[18],通过参数扫描得到了结构优化的耦合系统,边界设置有效电导率为 $5.8 \times 10^7\text{ S/m}$ 的铜,其整个电路的传输特性如图6所示。由图可以看出,反射系数 S_{11} 在 $28.3 \sim 30\text{ GHz}$ 的频率范围内基本小于 -20 dB ,这说

明设计的高频耦合系统能在较宽的频率范围内与慢波电路匹配良好。

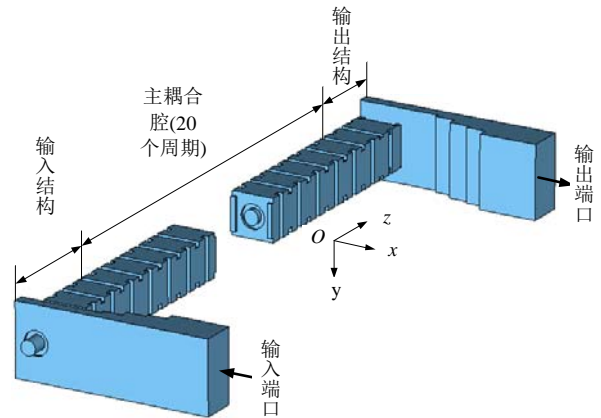


图5 双交错梯形线耦合腔电路传输模型

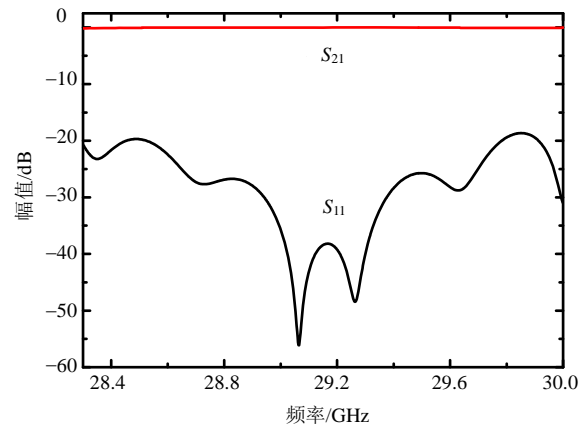


图6 传输特性示意图

3 粒子模拟分析

根据上述得到的结构尺寸参数以及高频耦合系统的设计,本文建立了一个基于CPI的Ka波段耦合腔行波管的三维电路模型,如图7所示。由于慢波线与输入输出结构之间的不完全匹配会引起反射,为了抑制反射振荡和满足增益稳定性条件,采用集中衰减器^[19]把慢波电路切断为两段,第一段的长度为22个周期,第二段为30个周期。在仿真时,集中衰减器的材料采用衰减陶瓷($80\% \text{ BeO}$ 和 $20\% \text{ SiC}$),其相对介电常数和损耗角正切分别为 11.5 和 0.3 ^[20]。

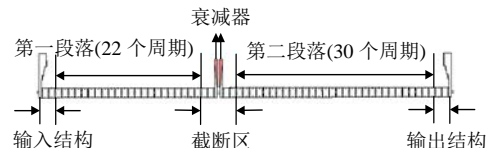


图7 Ka波段耦合腔行波管的电路模型

本文利用CST粒子工作室的PIC求解器^[21],对该行波管进行了粒子模拟研究。工作参数如下:电子注的半径为 0.4 mm (填充比为 50%),电子注电流为

390 mA (电流密度为77.6 A/cm²), PPM磁场的周期和峰值分别为11 mm和0.25 T, 边界设置有效电导率为5.8×10⁷ S/m的铜。

以28.3 GHz频点为例, 工作电压为16.8 kV, 其粒子模拟结果如图8和图9所示。由图8给出的输入-输出幅值特性曲线可以看出, 当输入功率较小时, 输出功率随着输入功率线性变化, 其增益基本保持不变; 随着输入功率的继续增加, 输出功率开始偏离线性增长规律, 行波管工作在非线性区。当输入功率增加到50 mW(17 dBm)时, 行波管达到饱和, 其饱和平均输出功率为550 W(57.4 dBm), 对应的饱和增益和电子效率分别为40.4 dB和8.39%。

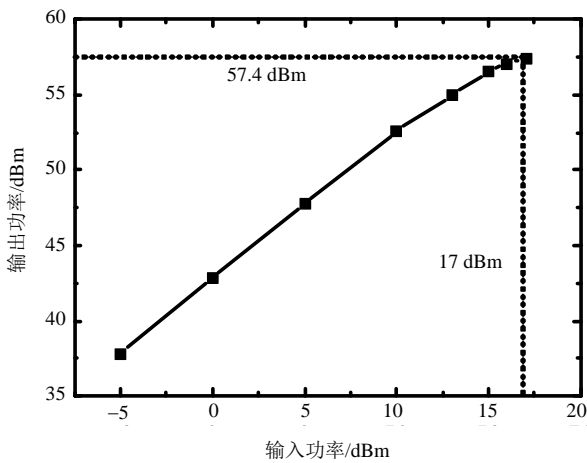
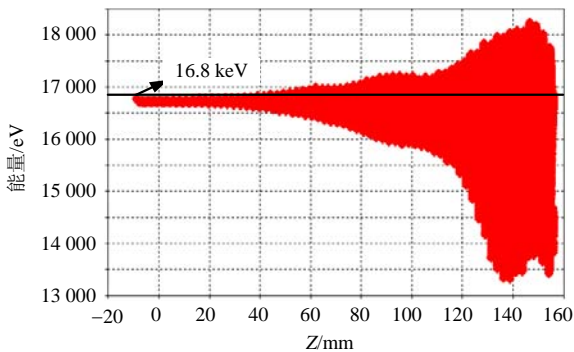
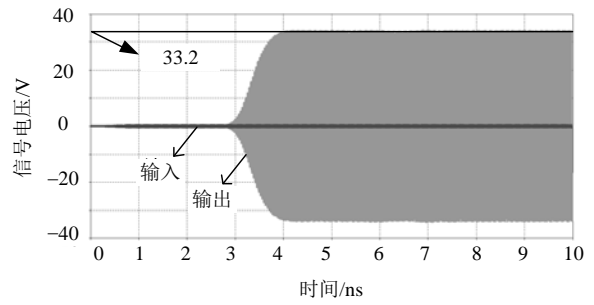


图8 在28.3 GHz的输入-输出幅值特性

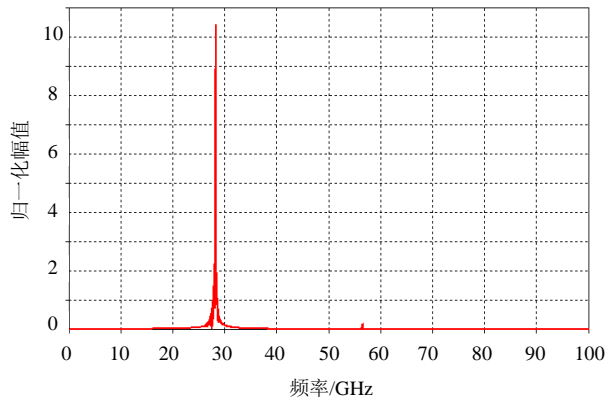
图9所示为输入功率为50 mW时, 电子的相空间图、输入/输出信号的电压图以及输出信号的频谱图。图9a所示的电子相空间图可以看出, 电子注沿着慢波电路行进, 不断地与电磁波进行能量交换, 在靠近输出端口附近时, 大部分电子交出能量给电磁波而处在减速区, 从而在输出端观察到了电磁波信号的放大, 如图9b和图9c所示。输出信号电压在4 ns后稳定在33.2 V, 对应的饱和平均输出功率为550 W, 且频谱纯净, 没有发生振荡现象。



a. 电子的相空间图



b. 信号电压图



c. 输出信号频谱图

图9 输入功率为50 mW时的粒子模拟结果

为了得到该管在整个工作频带内的性能表现, 在电压可调的频率范围内(28.3~30 GHz), 本文给出了3个典型频点的输入-输出幅值特性, 如图10所示。在每个频点, 通过调整输入功率的大小, 行波管能有大于550 W (57.4 dBm)的饱和平均输出功率, 相应的增益和电子效率分别大于33 dB和8.39%。通过改变电子注电压, 可以使电子注和电磁波在不同的频段内保持良好的同步, 将电压可调频率范围内的各个频点都推到饱和, 得到了其饱和平均输出功率情况, 如图11a所示。在28.3~30 GHz的频率范围内, 通过调节电子注电压(16.8~16.3 kV), 行波管的饱和平均输出功率在550~630 W之间(57.4~58.1 dBm), 当在固定电压下工作时, 其瞬时工作带宽大于600 MHz。

图11b所示为CPI的测试结果^[2], 在28.3~30 GHz的带宽范围内, 电压可调情况下(16.8~16.3 kV), 测试得到的饱和平均输出功率基本大于500 W (57 dBm), 只在频点28.7 GHz和29.9 GHz附近低于500 W, 瞬时带宽大于500 MHz。

表2给出了通过粒子模拟得到的该行波管典型的工作参数。由表可以看出, 在色散特性和电气参数相同的情况下, 本文的模拟结果与CPI测试结果吻

合良好。差别(模拟结果比测试结果好)可能是由于模拟时没有考虑材料的实际情况(如粗糙度等)以及加工、装配、测试误差等因素造成。

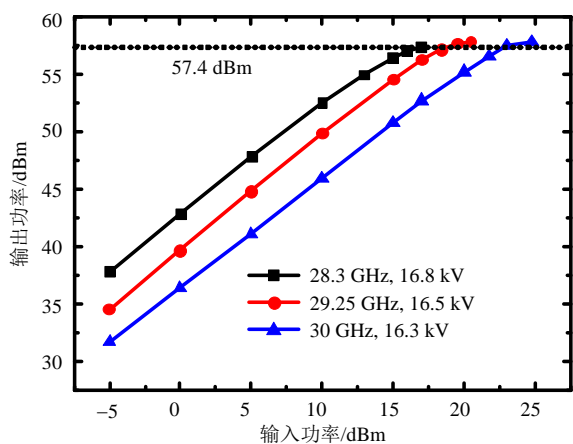
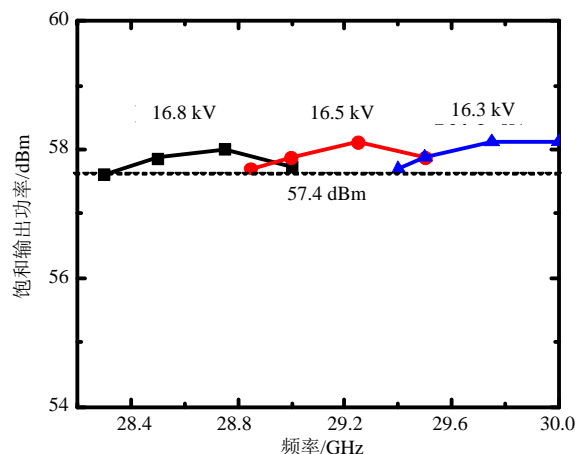
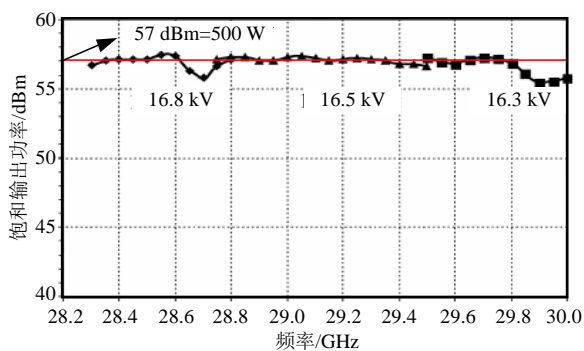


图10 输入-输出幅值特性



a. 模拟得到的结果



b. CPI的测试结果

图11 电压可调频率范围内饱和平均输出功率图

表2 耦合腔行波管的工作参数

工作参数	值
频率/GHz	28.3~30
电流/mA	390
电压/kV	16.8~16.3
慢波电路	2段
饱和输出功率/W	>550
饱和增益/dB	>33
瞬时带宽/MHz	>600

4 结论

本文用重入式双交错梯形线耦合腔慢波结构对Ka波段耦合腔行波管的相互作用电路进行了设计,并通过粒子模拟的方法研究了它的非线性相互作用现象,估计了其工作特性。研究表明,当采用和CPI的Ka波段耦合腔行波管相同的色散特性和电气参数时,粒子模拟结果和CPI的实验测试结果吻合良好,证明了本文方案的可行性,同时证明了利用粒子模拟能够较准确地估计耦合腔行波管的工作性能。因此,利用粒子模拟的方法对耦合腔行波管进行优化设计指导试验加工制管,能大大缩短研制周期并节约成本。同时,由于电磁波具有尺寸共渡特性,本文的设计方案包括高频耦合系统,为今后研制其他波段的耦合腔行波管提供重要的参考。下一步的工作计划是在设计电子光学系统的基础上,包括电子枪、聚焦磁场、降压收集极等,进行整管的实验研究。

参考文献

- [1] LEGARRA J R, KOLDA P E, FREUND H P, et al. Ka-band CCTWT amplifiers for military radar and commercial satellite communication[C]//2002 IEEE International MTT-S Microwave Symposium Digest. Seattle, USA: IEEE, 2002.
- [2] LEGARRA J R, CUSICK J, BEGUM R, et al. A 500 W coupled-cavity TWT for Ka-band communication[J]. IEEE Trans Electron Devices, 2005, 52(5): 665-668.
- [3] THEISS A J, LYON D B. High-power Ka-band TWTs for airborne radars[J]. IEEE Aerosp Electron Syst Mag, 1995, 10(11): 33-36.
- [4] 冯进军, 胡银富, 蔡军, 等. W波段行波管发展评述[J]. 真空电子技术, 2010, 2(2): 27-32.
FENG Jin-jun, HU Yin-fu, CAI Jun, et al. The development appraisal of W-band TWT[J]. Vacuum Electronics, 2010, 2(2): 27-32.
- [5] 廖平, 杨中海, 廖莉. 毫米波行波管电子光学系统计算机模拟[J]. 电子科技大学学报, 2005, 34(6): 794-797.
LIAO Ping, YANG Zhong-hai, LIAO Li. Electron beam optics system computer simulation for MMW TWTs[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2005, 34(6): 794-797.
- [6] QIU J X, LECUSH B, PASOUR J, et al. Vacuum tube amplifiers[J]. IEEE Microwave Magazine, 2009, 10(7): 38-51.
- [7] ZHENG R L, OHLCKERS P, CHEN X Y. Particle-in-cell simulation and optimization for a 220 GHz folded-waveguide traveling-wave tube[J]. IEEE Trans Electron Devices, 2011, 58(7): 2164-2171.
- [8] KORY C L, READ M, IVES L, et al. Design of overmoded interaction circuit for 1 kW 95 GHz TWT[J]. IEEE Trans Electron Devices, 2009, 56(5): 713-720.

- [9] BALK M C, KORY C L, DAYTON J A Jr. Investigation of a 95 GHz helical TWT with CST STUDIO SUITE™[C]//2009 IEEE International Vacuum Electronics Conference. Rome, Italy: IEEE, 2009.
- [10] 王亚军, 陈樟, 程焰林, 等. 220 GHz折叠波导慢波结构[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(6): 1589-1592.
WANG Ya-jun, CHEN Zhang, CHENG Yan-lin, et al. 220 GHz folded waveguide slow-wave structure[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(6): 1589-1592.
- [11] JAMES B G, KOLDA P. A ladder circuit coupled-cavity TWT at 80~100 GHz[C]//1986 International Electron Devices Meeting. Los Angeles, USA: [s.n.], 1986.
- [12] GONG Yu-bin, MO Yuan-long, ZHOU Yong-dong, et al. Analysis for the double staggered ladder circuit[J]. Int J of IR/MM Waves, 1996, 17(4): 777-796.
- [13] Ansoft Corporation. Ansoft HFSS user's reference [EB/OL]. [2011-09-12]. <http://www.ansoft.com.cn/>.
- [14] BOOSKE J H, CONVERSE M C, KORY C L, et al. Accurate parametric modeling of folded waveguide circuits for millimeter wave traveling wave tubes[J]. IEEE Trans Electron Devices, 2005, 52(5): 685-693.
- [15] CHRISTIE V L, SUMATHY M, KUMAR L, et al. Optimization of waveguide coupler for coupled-cavity TWT using artificial neural network[C]//2010 IEEE International Vacuum Electronics Conference. California, USA: IEEE, 2010.
- [16] KAGEYAMA T. The design of the transition region in coupled-cavity TWT[C]//2002 IEEE International Vacuum Electronics Conference. Monterey, USA: IEEE, 2002.
- [17] YOUNG L. Stepped-impedance transformers and filter prototypes[J]. IRE Trans Microw Theory Tech, 1962, 10(5): 339-359.
- [18] CST Corporation. CST MWS tutorials[EB/OL]. [2011-09-12]. <http://www.cst-china.cn/>.
- [19] SRIVASTAVE V, CARTER R G. Determination of sever positions in a coupled-cavity TWTs[J]. IEE Proceedings-H, 1991, 138(1): 55-60.
- [20] CAI J, FENG J J, WU X P, et al. Analysis and test preparation of attenuator for W-band folded waveguide TWT[C]//2010 IEEE International Vacuum Electronics Conference. Kitakyushu, Japan: IEEE, 2007.
- [21] CST Corporation. CST PS tutorials[EB/OL]. [2011-09-12]. <http://www.cst-china.cn/>.

编辑 黄 莘

(上接第687页)

- [4] DYDYK M, MOORE B D. Shielded microstrip aids V-band receiver designs[J]. Microwaves, 1982, 21(3): 77-82.
- [5] PONCHAK G E, DOWNEY A N. A new model for broad-band waveguide-to-microstrip transition design[J]. Microwave Journal, 1988(5): 333-343.
- [6] VILLEGAS F J, STONES D I, HUNG H A. A novel wave guide-to-microstrip transition for millimeter-wave module applications[J]. IEEE MTT, 1999, 47(1): 48-55.
- [7] LEONG Y C, SANDER W. Full band waveguide-to-microstrip probe transitions[J]. IEEE MTT-S, 1999(4): 1435-1438.
- [8] 柯林. 导波场论[M]. 侯元庆, 译. 上海: 上海科学出版社, 1966.
- COLLIN R E. Guided wave field theory[M]. Translated by HOU Yuan-qing. Shanghai: Shanghai Science Press, 1966.
- [9] 格普塔, 加格, 查德哈. 微波电路的计算机辅助设计[M]. 冯忠华, 温俊鼎, 蒋叙仁. 译. 北京: 科学出版社, 1986.
- GUPTA K C, GARG R, CHADHA R. Computer-aided design of microwave circuits[M]. Translated by FENG Zhong-hua, WEN Jun-ding, JIANG Xu-ren. Beijing: Science Press, 1986.
- [10] MISRA D K. A quasi-static analysis of open-ended coaxial lines[J]. IEEE Trans on Microwaves Theory and Techniques, 1987, 35(10): 925-628.

编辑 黄 莘