

文章编号: 1001-4322(2002)06-0882-05

幅相一致行波管高频电路 CAD 研究*

李 斌, 杨中海, 张 勇, 莫元龙

(电子科技大学 物理电子学院, 四川 成都 610054)

摘 要: 在行波管的设计和装配过程中,各部件的尺寸必须严格控制,高频电路参数的离散对行波管色散特性有极大的影响。使用螺旋导电面模型,模拟计算了高频结构各主要参数离散对色散特性和轴向相互作用耦合阻抗的影响。分析计算了夹持杆宽度、翼片高度、螺旋线平均半径、螺距、夹持杆介电常数等离散时对色散特性和轴向相互作用耦合阻抗的影响,为新型幅相一致行波管的设计和生提供了很有价值的参考建议。

关键词: 行波管; 幅相一致性; 色散特性; 耦合阻抗; 计算机模拟

中图分类号: TN124.2 **文献标识码:** A

目前对于新型行波管的设计和装配,主要建立在已有行波管(TWT)的经验上。然而新型行波管设计不可避免地将因为与已有行波管有所区别,导致设计过程的多次反复。幅相一致行波管由于其很高的技术指标要求(相位不一致性优于 $\pm 20^\circ$,增益不一致性优于 $\pm 1.5\text{dB}$),在设计中需要试制大量不同电路结构参数样管,以期获得满意的电路尺寸,这极大地增加了设计成本。理论和大量的实验表明,高频电路参数的离散是导致行波管幅相不一致的重要原因。本文使用计算机模拟的方法精确地分析了高频电路各主要参数离散对色散特性和轴向相互作用耦合阻抗的影响,可以使用计算机模拟的方式代替大量的实验过程,从而优化高频电路参数,节约设计成本,缩短新管的研制周期。

在宽带大功率器件中,螺旋线行波管应用最为广泛。其高频电路一般由一根螺旋线型金属丝或金属带组成,螺旋线由 3 根或更多的介质杆夹持,部分器件为了使高频色散曲线更为平缓增加了金属翼片。本文模拟了一包含螺带、介质夹持杆、管壳和金属翼片加载的高频电路(图 1),精确分析了夹持杆宽度、翼片高度、螺旋线平均半径、螺距、夹持杆介电常数等离散时对色散特性和轴向相互作用耦合阻抗的影响,对每组离散进行了比较。

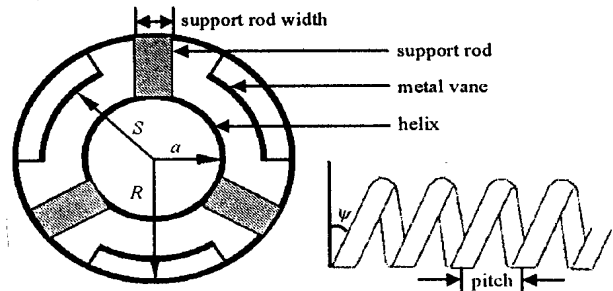


Fig. 1 TWT helical slow-wave circuit

图 1 模拟的螺旋线慢波电路

1 理论建模与分析

螺旋线作为行波管最常用的高频电路,国内外很多学者对其进行了深入的研究。通常考虑了金属外壳、介质杆夹持、异形夹持杆等,但对金属翼片加载螺旋线研究较少。由于加载金属翼片能有效改善色散特性,故实际行波管高频电路通常为介质杆夹持、金属翼片加载的螺旋线电路。文献[4]对此类螺旋线慢波电路作了较深入的分析。文献[3]使用 MAFIA(Maxwell's equations by the Finite Integration Algorithm)电磁 CAD 软件模拟试验方法,采用谐振法模拟了金属翼片加载螺旋线的色散特性和轴向相互作用耦合阻抗。我们采用螺旋导电面模型,把螺旋线看作一个半径为真实螺旋线平均半径的螺旋导电圆筒,此圆筒无限薄,在与圆周成螺距角的螺旋方向理想导电,而在与螺旋垂直方向完全不导电,将金属翼片看成无限薄、无限多个分布于屏蔽筒的内壁中,这样利用场匹配的方法得到了一般情况下的场分布表达式、色散方程、轴向相互作用耦合阻抗。同时对影响色散特性和轴向相互作用耦合阻抗的主要因素进行了较全面的分析和计算机模拟,确定了各因素影响的大小。

本文所获得的结果和模拟方法对相同类型的器件亦有参考意义,在设计和制造新型行波管过程中,能优化高频电路结构参数,有效降低设计成本,节约时间。

* 收稿日期:2001-12-19; 修订日期:2002-04-18

基金项目:国家 863 激光技术领域资助课题(863-410-7)

作者简介:李 斌(1974-),男,博士生,主要从事宽带大功率行波管理论和 CAD 研究;E-mail:libin@uestc.edu.cn.

1.1 色散方程

对于螺旋导电面模型,在只考虑圆柱对称模式情况下,忽略公因子 $\exp\{j(\omega t - z)\}$,及自然边界条件和理想导体表面边界条件,经过较复杂的场匹配运算可以得到一般情况下的色散方程

$$\left(\frac{k_1 \cot \theta}{1} \right)^2 = \frac{I_0^2(\gamma_1 a) - \frac{2\mu_1}{\mu_2} I_0(\gamma_1 a) I_1(\gamma_1 a) [I_0(\gamma_2 a) + PK_0(\gamma_2 a)] / [I_1(\gamma_2 a) - PK_1(\gamma_2 a)]}{I_1^2(\gamma_1 a) - \frac{1}{2} \frac{I_0^2(\gamma_1 a) I_1(\gamma_1 a) [I_0(\gamma_2 a) + \frac{I_0(\gamma_2 s)}{K_0(\gamma_2 s)} K_1(\gamma_2 a)] / [I_0(\gamma_2 a) - \frac{I_0(\gamma_2 s)}{K_0(\gamma_2 s)} K_0(\gamma_2 a)]} \quad (1)$$

式中: I_n, K_n 分别为第 n 阶,第一、二类修正贝塞尔函数; $\gamma_i^2 = \omega^2 - k_i^2, k_i^2 = \omega^2 \mu_i$ ($i=1,2,3$); θ 为螺距角; a 为螺旋线平均半径; s 为翼片高度。

$$P = \frac{\mu_2}{\mu_3} I_1(\gamma_2 s) \left[I_0(\gamma_3 s) + \frac{I_1(\gamma_3 R)}{K_1(\gamma_3 R)} K_0(\gamma_3 s) \right] - \frac{2}{\gamma_3} I_0(\gamma_2 s) \left[I_1(\gamma_3 s) - \frac{I_1(\gamma_3 R)}{K_1(\gamma_3 R)} K_1(\gamma_3 s) \right] \quad (2)$$

$$+ \frac{\mu_2}{\mu_3} K_1(\gamma_2 s) \left[I_0(\gamma_3 s) + \frac{I_1(\gamma_3 R)}{K_1(\gamma_3 R)} K_0(\gamma_3 s) \right] + \frac{2}{\gamma_3} K_0(\gamma_2 s) \left[I_1(\gamma_3 s) - \frac{I_1(\gamma_3 R)}{K_1(\gamma_3 R)} K_1(\gamma_3 s) \right]$$

其中 R 为管壳半径。

1.2 轴向互作用耦合阻抗

根据耦合阻抗的一般定义,基波轴向互作用耦合阻抗为

$$K_0 = |E_0|^2 / 2 P_{RF}, \quad P_{RF} = \omega V_g \quad (3)$$

2 模拟结果讨论

首先我们分析了夹持杆宽度变化对色散特性和轴向互作用耦合阻抗的影响,结果如图 2 所示。当夹持杆宽度在加工公差 $\pm 0.02\text{mm}$ 范围内变化时,不会影响工作带宽,但在整个频带内归一化相速度会随宽度的增减而相应减小或增加,同时对轴向互作用耦合阻抗影响较小;当夹持杆宽度减小时,耦合阻抗有少许增加。

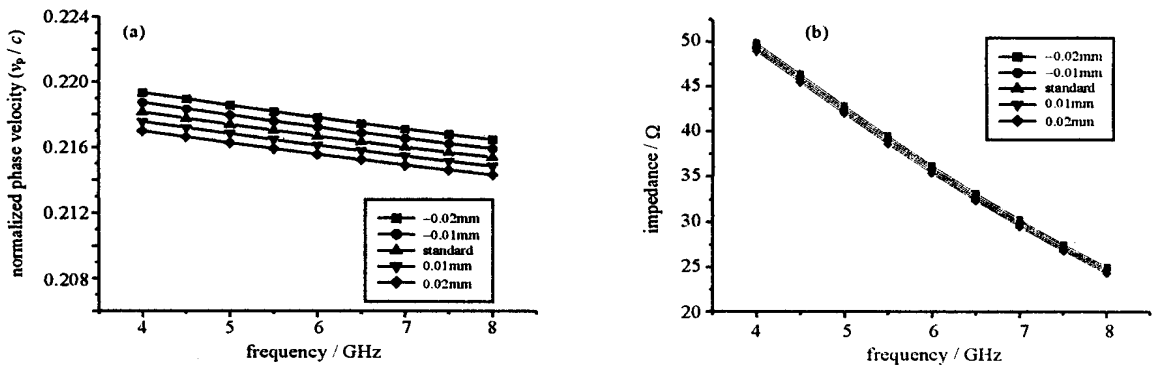


Fig.2 Simulated dispersion (a) and on-axis interaction impedance (b) for variations of support rod width

图 2 夹持杆宽度变化对色散特性曲线(a)和耦合阻抗曲线(b)的影响

图 3 是当螺距加工公差在 $\pm 0.02\text{mm}$ 范围内变化时,对色散特性和轴向互作用耦合阻抗的影响。当螺距变化时,工作带宽没有变化,但在整个频带内归一化相速度会随螺距的增减而增减,这和理论计算是一致的。当螺距减小时,耦合阻抗在频率低端有少许增加,在频率高端有少许减小;而螺距增加时,耦合阻抗在频率高端有少许增加,在频率低端有少许减小。

在加工公差 $\pm 0.02\text{mm}$ 范围内改变金属翼片的高度,将对色散特性和轴向互作用耦合阻抗有较大影响。图 4 表明当翼片高度变小时(翼片更加靠近螺旋线),色散曲线更为平缓,具有展宽频带的作用,但付出的代价是轴向互作用耦合阻抗略微有所下降。

对于螺旋线平均半径的变化,色散特性和轴向互作用耦合阻抗的反应最大。当增加螺旋线平均半径时,相对翼片高度减小,翼片更加靠近螺旋线,螺旋线内区域体积相对增加,从而使色散曲线趋于平缓,但由于螺旋线平均半径与电子注半径之比增大,即电子注远离螺旋线,从而导致轴向耦合阻抗呈下降的趋势。结果如图 5 所示。

最后我们研究了夹持杆介电常数变化的影响。对于制造夹持杆的常用材料 BeO,即使同一批次的夹持杆的介电常数也可能在 6 到 7.5 之间变化,故程序模拟了这种变化的影响,发现夹持杆介电常数对色散特性及轴

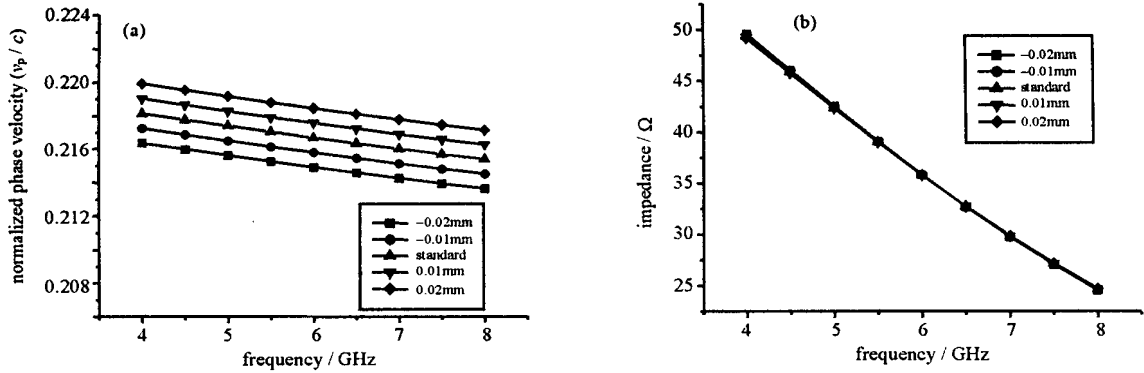


Fig. 3 Simulated dispersion (a) and on-axis interaction impedance (b) for variations of pitch

图3 螺距变化对色散特性曲线(a)和耦合阻抗曲线(b)的影响

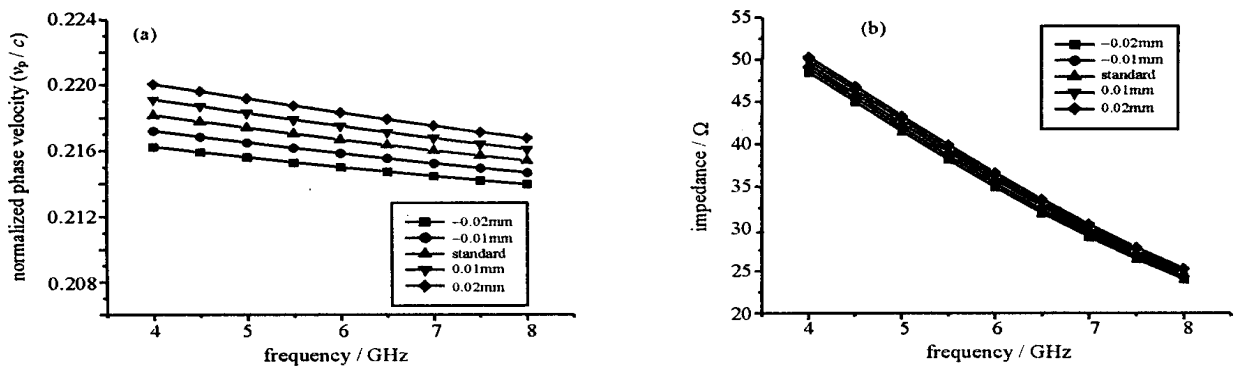


Fig. 4 Simulated dispersion (a) and on-axis interaction impedance (b) for variations of vane height

图4 翼片高度变化对色散特性曲线(a)和耦合阻抗曲线(b)的影响

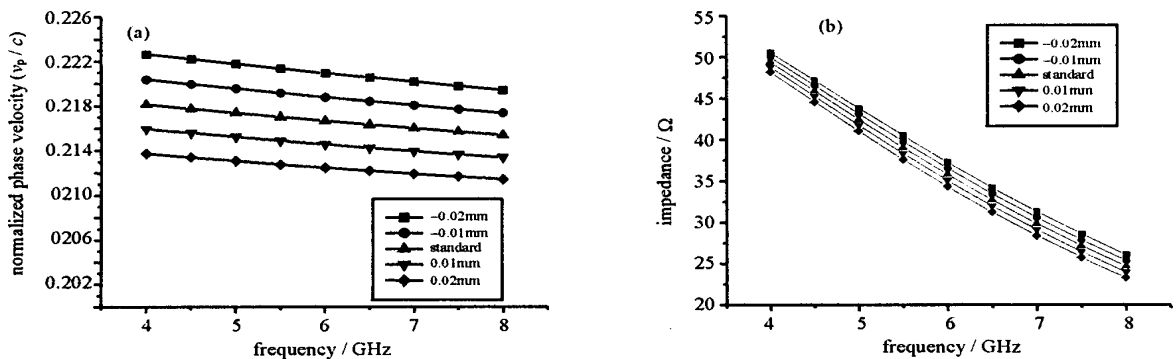


Fig. 5 Simulated dispersion (a) and on-axis interaction impedance (b) for variations of helix average radius

图5 螺旋线平均半径变化对色散特性曲线(a)和耦合阻抗曲线(b)的影响

向相互作用耦合阻抗有明显的影响(见图6)。在整个频带范围内,归一化相速度和耦合阻抗随着介电常数的增加一致地减小,这和理论分析的结果是一致的,和文献[1]的结果符合较好。

以往在分析螺旋线行波管的高频结构时,对于材料特性关注较少,这或许是造成同一批次的行波管的幅相一致性不理想的一个主要原因。通过模拟,我们发现夹持杆的材料特性是引起行波管的幅相不一致性的一个重要因素。

3 结论

采用螺旋导电面模型精确分析了高频电路结构参数变化对色散特性和轴向相互作用耦合阻抗的影响。使用的模拟程序为我国自主研发开发的“宽带大功率行波管CAD集成环境”微机版中高频电路计算子程序。通过理论分析和模拟计算,发现翼片高度、螺旋线平均半径这两个结构尺寸的变化对色散特性和轴向相互作用耦合阻抗有明显的影响,对于频带的展宽和轴向相互作用耦合阻抗的最佳匹配选择有明确的参考价值;而夹持杆的宽度

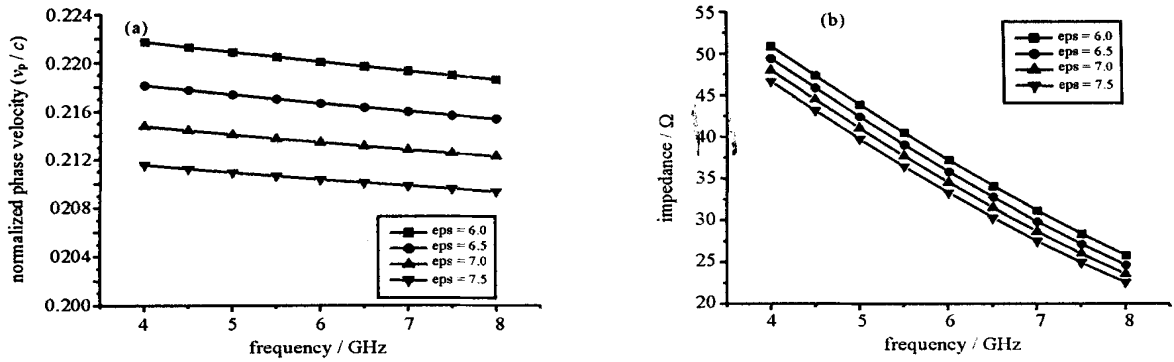


Fig. 6 Simulated dispersion (a) and on-axis interaction impedance (b) for variations of support rod effective dielectric constant

图6 夹持杆介电常数变化对色散特性曲线(a)和耦合阻抗曲线(b)的影响

和螺距变化对行波管工作频带没有影响,但能在整个频带内降低或增加归一化相速度,同时对轴向互作用耦合阻抗影响较小;夹持杆介电常数对色散特性和耦合阻抗有重要影响,为此在幅相一致行波管的设计和制造过程中对于材料特性应引起足够的重视。

致谢 研究工作中,与国光电子管厂陈君乐高级工程师、电子科技大学李建清博士作了有益的讨论,在此一并表示感谢。

参考文献:

- [1] Kory C L, Dayton J A Jr. Effect of helical slow-wave circuit variations on TWT cold-test characteristics[J]. *IEEE Trans on Electron Devices*, 1998, **45**(4): 972—976.
- [2] Handy R A, Puri M P. Control of phase and gain deviations in an octave bandwidth EHF TWT[A]. *IEEE[C]*. 1986, **19**(5): 508—511.
- [3] Kory C L, Dayton J A Jr. Accurate code - test model of helical TWT slow-wave circuits[J]. *IEEE Trans on Electron Devices*, 1998, **45**(4): 966—971.
- [4] Kartikeyan M V, Sinha A K, Bandyopadhyay H N, et al. Effective simulation of the radial thickness of helix for broad band, practical TWT s[J]. *IEEE Trans on Plasma Science*, 1999, **27**(4): 1115—1123.
- [5] 李斌, 杨中海. 行波管相位一致性的理论研究与计算机模拟[J]. *强激光与粒子束*, 2001, **13**(4): 479—484. (Li B, Yang Z H. Computational investigation of phase and gain matched operation for helix traveling-wave tube. *High Power Laser and Particle Beams*, 2001, **13**(4): 479—484)
- [6] Gilmour A S Jr. Principles of traveling wave tubes[M]. Boston, London: Artech House, 1994.
- [7] Sunil Kapoor, Raju R S, Gupta R K, et al. Analysis of an inhomogeneously loaded helical slow-wave structure for broad-band TWT 's[J]. *IEEE Trans on Electron Devices*, 1989, **36**(9): 2000—2004.
- [8] Jain P K, Basu B N. The effect of conductivity losses on propagation through the helical slow-wave structure of a traveling-wave tube[J]. *IEEE Trans on Electron Devices*, 1988, **35**(4): 549—558.
- [9] Agostino S D, Emma F, Paoloni C. Accurate analysis of helix slow-wave structure[J]. *IEEE Trans on Electron Devices*, 1998, **45**(7): 1605—1613.
- [10] Cain W N, Gow R W. The effects of dielectric and metal loading on the dispersion characteristics for contrawound helix circuits used in high-power traveling wave tubes[J]. *IEEE Trans on Electron Devices*, 1990, **37**(6): 1566—1578.
- [11] Thomas M Antosen Jr, Baruch Levush. Traveling-wave tube devices with nonlinear dielectric elements[J]. *IEEE Trans on Plasma Science*, 1998, **26**(3): 774—786.
- [12] Mishra G, Tripathi V K, Jain V K. Effect of plasma and dielectric loading on the slow-wave properties of a traveling-wave tube[J]. *IEEE Trans on Electron Devices*, 1990, **37**(6): 1561—1565.
- [13] Kory C L. Effect of geometric azimuthal asymmetries of PPM stack on electron beam characteristics[J]. *IEEE Trans on Electron Devices*, 2001, **48**(1): 38—44.
- [14] Xu L, Yang Z H, Mo Y L. Improved three-dimensional model for the nonlinear analysis of helix travelling-wave tubes[J]. *International Journal of Electronics*, 2000, **187**(3): 377—384.

Simulation of slow wave circuit in TWT for phase and gain matched operation

LI Bin, YANG Zhong-hai, ZHANG Yong, MO Yuan-long

(College of Physical Electronics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: Designing an octave bandwidth helical traveling wave tube for phase and gain matched operation in the EHF region presents many obstacles, the dimensional controls must be imposed in the design. In this paper, a code is programmed based on the sheath model. In the

sheath model the helix is approximated by a helically conducting cylindrical surface of negligible thickness. The code is used to determine the effect on dispersion and on-axis interaction impedance of several helical slow-wave circuit parameter variations, including thickness and relative dielectric constant of the support rods, pitch width, height of the metal vane and helix average radius. The specific results can serve as a general guide for similar devices, and the computational techniques are readily applicable to other TWTs.

Key words: traveling-wave tube (TWT); phase and gain matched operation; dispersion; helix; impedance; manufacturing tolerances;