

文章编号: 2095-4980(2015)01-0086-05

脊加载同轴径向线慢波结构设计

王 兵^a, 文光俊^a, 王文祥^b

(电子科技大学 a.通信与信息工程学院; b.物理电子学院, 四川 成都 610054)

摘要: 提出脊加载同轴径向线慢波结构, 并用高频结构仿真器(HFSS)电磁仿真软件对其色散特性和耦合阻抗进行研究, 分析了不同结构参数变化对其高频特性的影响。结果表明: 脊加载同轴径向线慢波结构的色散曲线平坦, 减小内径和周期长度可以明显降低慢波结构的相速, 从而减小工作电压; 加载脊的宽度对耦合阻抗的影响明显, 随着加载脊宽度的增加, 耦合阻抗得到提高, 相速减小; 加载脊的长度对结构的色散特性和耦合阻抗影响不明显; 这种脊加载方式有利于增加慢波结构的耦合阻抗, 提高行波管的增益和效率。脊加载同轴径向线慢波结构是一种全金属结构, 工作频带宽, 散热性能好, 在毫米波波段的行波管中有较好的应用前景。

关键词: 慢波结构; 同轴径向线; 色散特性; 耦合阻抗; 行波管

中图分类号: TN124

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201501.0086

Design of the ridge-loaded coaxial radial line slow wave structure

WANG Bing^a, WEN Guangjun^a, WANG Wenxiang^b

(a.School of Communication and Information Engineering; b.School of Physical Electronics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu Sichuan 610054, China)

Abstract: The ridge-loaded coaxial radial line slow wave structure is presented in this paper. The dispersion characteristic and coupling impedance of this slow wave structure are investigated by electromagnetic simulator High Frequency Structure Simulator(HFSS). It is analyzed that the change of structure parameter affects the high-frequency characteristics. The results show that the inner conductor radius and the period length have obvious effect on phase velocity. Along with the decrease of inner conductor radius and period length, the phase velocity and operating voltage can be favorably decreased. In addition, the width of the ridge makes the coupling impedance increase, when this structure is used as the slow wave structure, the gain and efficiency of the traveling wave tube can be improved. Meanwhile the length of ridge has no obvious effect on the high-frequency characteristics. Because the ridge-loaded coaxial radial line slow wave structure is a new all-metal structure with the advantage of broad bandwidth, high power capability and lower losses, it has a large potential of application in millimeter traveling-wave tubes.

Key words: slow wave structure; coaxial radial line; dispersion characteristic; coupling impedance; traveling-wave tube

行波管是一种宽频带、高功率的微波器件, 在电子对抗、卫星通信等领域有广泛的应用^[1-2], 如何提高行波管的输出功率和增加工作带宽, 一直是行波管科研工作者的目标。最普遍使用的螺旋线行波管^[3-4]和耦合腔行波管^[5-6]在这个问题上有着各自的优缺点。螺旋线行波管工作带宽大, 但其热耗散能力差; 耦合腔行波管散热能力强, 但其工作频带比螺旋线窄得多。为了获得更高的功率和更宽的工作频带, 越来越多的科研工作者将目光集中在全金属慢波结构上^[7], 比如折叠波导^[8-9]、螺旋槽波导等^[10]。同轴径向线也是一种全金属慢波结构, 它是在膜片加载圆波导的基础上发展起来的。膜片加载圆波导^[11]作为慢波结构在 20 世纪 50 年代就有人提出, 这种慢波结构功率容量大, 散热性能好, 但带宽较窄, 难以满足宽带器件的要求。由于同轴结构可以降低截止频率, 因而

收稿日期: 2014-01-14; 修回日期: 2014-03-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61271029,61371047)

可以展宽频带,将同轴结构引入膜片加载圆波导,并在内外导体上都加载上膜片,而且膜片相互交错,构成同轴径向线,俄罗斯学者最早对它进行了研究,并作为宽带大功率行波管慢波结构的可用方案之一提出^[12],但是这种结构的耦合阻抗偏低,不利于注-波互作用电子效率的提高。因此,为了提高同轴径向线的耦合阻抗,提出了脊加载同轴径向线慢波结构。本文对脊加载同轴径向线慢波结构的高频特性进行了研究,分析了脊加载对器件慢波特性的影响。

1 模拟仿真实论

脊加载同轴径向线慢波结构是在同轴径向线慢波结构(见图 1)的基础上提出的,在交错膜片的中部加上脊,加载脊的中心为两相邻交错膜片重叠部分的中心,其结构如图 2 所示。内导体的半径为 r_a ,在内导体加载膜片的半径为 r_c ,外导体的半径为 r_d ,其加载膜片的内半径为 r_b 。外导体加载膜片的厚度均为 w ,结构的单位周期长度为 L ,加载膜片均匀分布,膜片中部加载脊的宽度为 S ,长度为 k 。由于电磁场边界条件复杂,系统中传输的电磁场模式用传统的场理论分析会遇到困难,因此采用数值模拟的方法对其色散特性和耦合阻抗进行研究。

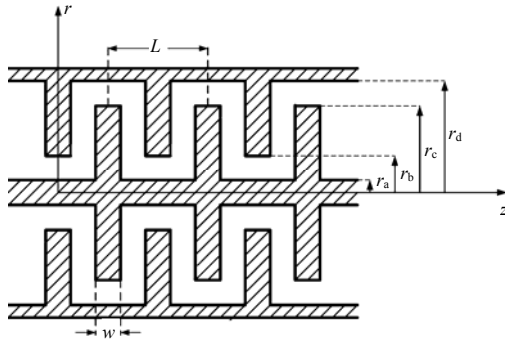


Fig.1 Coaxial radial line slow wave structure
图 1 同轴径向线慢波结构

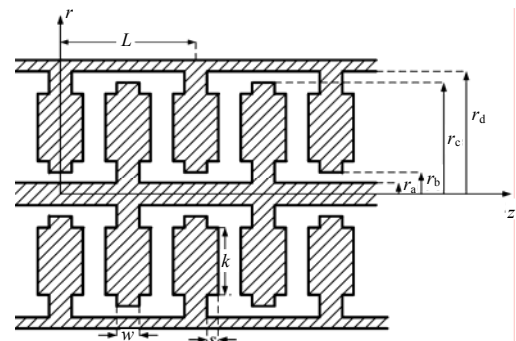


Fig.2 Ridge-loaded coaxial radial line slow wave structure
图 2 脊加载同轴径向线慢波结构

1.1 色散特性

慢波结构中行波纵向传播的相速 v_p 和频率 f 的关系称为色散特性。利用电磁仿真软件 HFSS 提供的周期边界条件,指定一个周期内的基波相移 φ ,通过本征模求解器计算出谐振频率,取最小本征值 f 对应于最低传播模式:

$$\beta_0 = \varphi/L \quad (1)$$

$$v_p = \omega/\beta_0 = 2\pi f/\beta_0 = 2\pi Lf/\varphi \quad (2)$$

$$\beta_n = \beta_0 + 2n\pi/L \quad (3)$$

式中: β_0 是最低传播模式的第零次空间谐波(即基波)的相位传播常数; β_n 是最低传播模式第 n 次空间谐波的相位传播常数; v_p 是最低模式的第零次空间谐波的相速; φ 是相移常数; ω 是角频率; L 是慢波结构单位周期长度。改变指定的相移 φ 数值,就可以得到一组对应的 v_p 与 f 的色散关系曲线。

1.2 耦合阻抗

耦合阻抗反映的是电子注和电磁波相互作用的能力,耦合阻抗越高,慢波系统与电子注之间的能量交换越有效,因此,行波管的增益就更高,效率就更大。根据皮尔斯的理论,慢波结构中第 n 次空间谐波的耦合阻抗可定义为:

$$K_{cn} = \frac{|E_{zn}|^2}{2\beta_n^2 P} \quad (4)$$

式中: E_{zn} 是第 n 次空间谐波的纵向电场幅值; P 为波导系统中电磁波的总功率。对于脊加载同轴径向线慢波结构而言,一般是基波成分与电子注速度同步并发生有效能量交换,所以通常只考虑基波的耦合阻抗 K_0 ,利用 HFSS 软件中的场计算器,通过上述定义式可以计算出慢波结构的耦合阻抗。

2 模拟与分析

电磁场仿真软件 HFSS 提供了准周期边界条件设置的方法, 因此只需要对一个周期进行建模分析, 利用软件提供的本征模求解器, 能方便地求出慢波结构的色散特性和耦合阻抗。

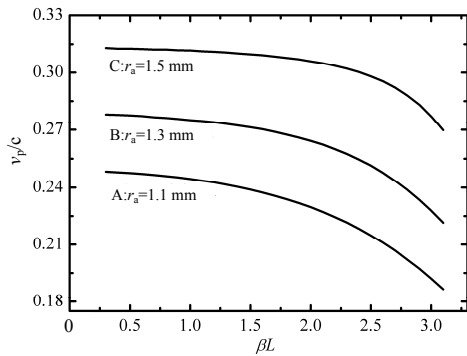


Fig.3 Dispersion curves for variant r_a
图3 不同内径 r_a 的色散曲线

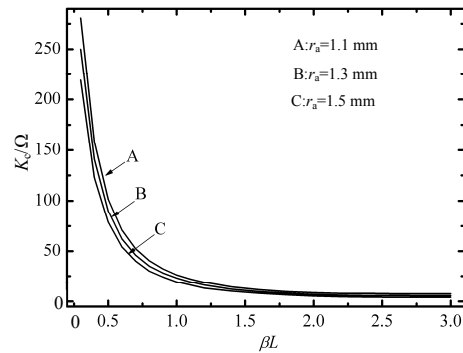


Fig.4 Coupling impedance curves for variant r_a
图4 不同内径 r_a 的耦合阻抗曲线

图3和图4分别给出了不同内径 r_a 对色散特性和耦合阻抗的影响, 结构参数 $r_b=1.8$ mm, $r_c=2.5$ mm, $r_d=2.7$ mm, $L=0.8$ mm, $w=0.1$ mm, $S=0.02$ mm, $k=0.6$ mm。可以看出随着半径的增加, 色散曲线变得平坦, 器件带宽增加, 相速也增加。在图3中可以看到当 r_a 为 1.1 mm 时, 结构的归一化相速 v_p/c 在 0.25 附近, 而当 r_a 增大到 1.5 mm 时, 归一化相速在 0.315 附近, 所以减小内径的大小有助于降低慢波结构的相速, 用作行波管时可以降低工作电压。从图4可以看出耦合阻抗随着内导体半径的减小而增大, 这说明耦合阻抗的提高是以增加系统的色散为代价的, 因此在设计慢波结构时应当选择合适的尺寸使得器件既有较好的色散曲线, 又有较大的耦合阻抗。

图5和图6分别给出了不同周期长度 L 对色散特性和耦合阻抗的影响, 结构参数除取 $r_a=1.5$ mm 外, 其余参数与图3和图4相同。可以看出随着周期 L 的增加, 相速增加, 色散曲线平行上升, 另外随着周期 L 的增加, 耦合阻抗也得到了提高。减小单位周期长度可以在保持色散曲线平坦的情况下有效地降低相速, 因此带宽允许的情况下可以适当地调整慢波结构单位周期的长度, 从而提高电子注与电场的互作用效率。

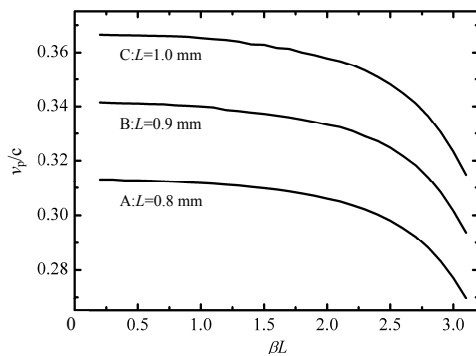


Fig.5 Dispersion curves for variant L
图5 不同周期长度 L 的色散曲线

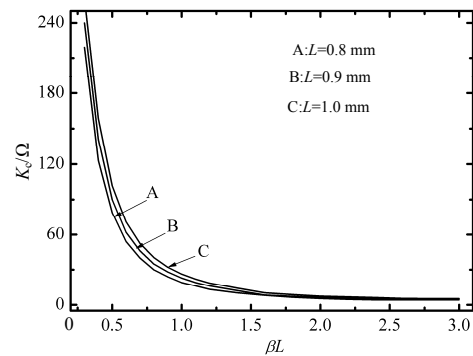


Fig.6 Coupling impedance curves for variant L
图6 不同周期长度 L 的耦合阻抗曲线

图7和图8分别给出了不同加载脊棱宽度 S 对色散特性和耦合阻抗的影响, 结构参数 $r_a=1.5$ mm, $r_b=1.8$ mm, $r_c=2.5$ mm, $r_d=2.7$ mm, $L=0.8$ mm, $w=0.1$ mm, $k=0.6$ mm。可以看出随着加载脊棱宽度 S 的增加, 器件的相速得到了降低, 但是降低的幅度不明显。耦合阻抗随着加载脊棱宽度的增加得到了显著的提高。当 $S=0$ 时, 脊加载同轴径向线慢波结构就退化成了同轴径向线, 其耦合阻抗如图7中的曲线A所示, 当 $S=0.04$ 时, 其耦合阻抗如图7中的曲线C所示。可以看出: 在交错圆盘的中心加载上脊棱后, 慢波结构的耦合阻抗得到了提高, 并且耦合阻抗随着脊棱的宽度 S 的增加而增加。因此, 在同轴径向线上加载上脊棱后, 慢波结构的色散特性没有明显的变化, 而耦合阻抗却得到了提高, 这可以在保证行波管工作带宽的情况下提高整管的增益。

图9和图10分别给出了不同加载脊棱长度 k 对色散特性和耦合阻抗的影响, 结构参数除取 $S=0.02$ mm 外, 其余参数与图7和图8所取的值相同。从图中可以看出, 当 k 减小时, 慢波结构相速有所提高, 耦合阻抗也有所增加, 但是相速和耦合阻抗的变化都不明显, 所以脊棱的长度 k 对慢波结构的高频特性的影响不明显, 在对慢波

结构进行设计时,对加载脊棱的长度可以不用过多地考虑。

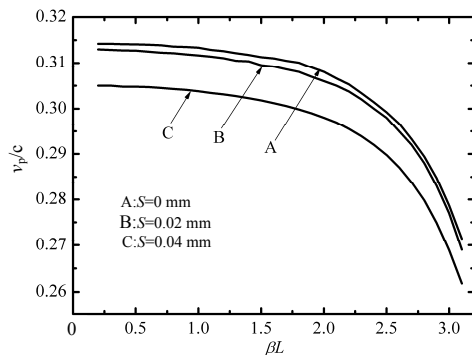


Fig. 7 Dispersion curves for variant S
图 7 不同脊宽度 S 的色散曲线

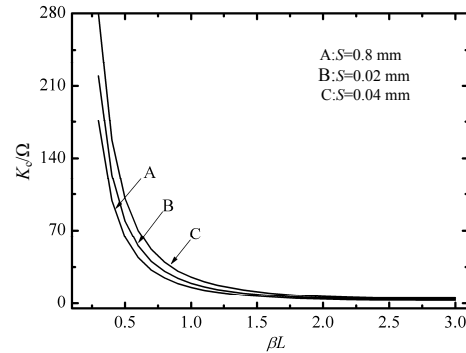


Fig. 8 Coupling impedance curves for variant S
图 8 不同脊宽度 S 的耦合阻抗曲线

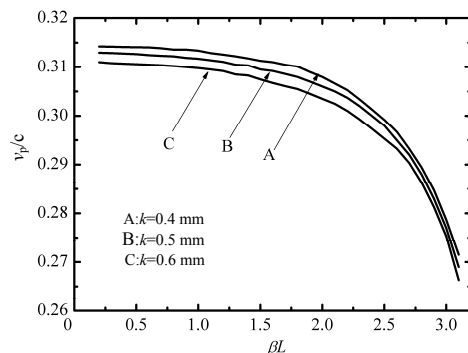


Fig. 9 Dispersion curves for variant k
图 9 不同脊长度 k 的色散曲线

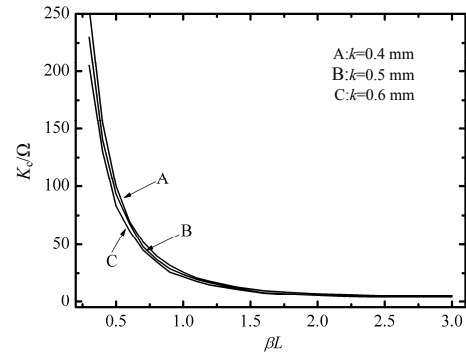


Fig. 10 Coupling impedance curves for variant k
图 10 不同脊长度 k 的耦合阻抗曲线

3 结论

本文提出了一种脊加载同轴径向线慢波结构,并对它的高频特性进行了研究,分析了不同内径、不同周期长度、不同脊加载宽度和长度对色散特性及耦合阻抗的影响。结果表明:改变内径大小和周期长度对结构的色散特性影响较大,随着内径的减小和周期长度的增加,结构的耦合阻抗得到提高;脊加载宽度的增加可以明显提高慢波结构的耦合阻抗,且色散特性变化较小;加脊的长度的变化对色散特性和耦合阻抗都没有明显的影响。由于这种结构的边界条件比较复杂,采用严格的电磁场理论分析会遇到困难,还需要进一步深入研究。

参考文献:

- [1] Komm D S,Benton R T,Limburg H C. Advances in space TWT efficiencies[J]. IEEE Trans. Electron Devices, 2001,48 (1):174-176.
- [2] Simons R N,Wintucky E G,Wilson J D,et al. Ultra-high power and efficiency space traveling-wave tube amplifier power combiner with reduced size and mass for NASA missions[J]. IEEE Trans. Microwave Theory Tech, 2009,57(3):582-588.
- [3] 张青春,付成芳,赵波. 螺旋线厚度对螺旋线慢波结构的高频特性的影响[J]. 强激光与粒子束, 2013,25(4):945-949. (ZHANG Qingchun,FU Chengfang,ZHAO Bo. Effect of helix thickness on high-frequency characteristics of helical slow-wave structure[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013,25(4):945-949.)
- [4] Alaria M K,Bera A,Sharma R K,et al. Design and development of helix slow-wave structure for Ku-band TWT[J]. IEEE Trans. Plasma Sci, 2011,39(1):550-554.
- [5] HE F M,LUO J R,ZHU M,et al. Theory, simulations,and experiments of the dispersion and interaction impedance for double-slot coupled-cavity slow wave structure in TWT[J]. IEEE Trans. Electron Devices, 2013,60(10):3576-3583.
- [6] Alexander N V,Thomas M A,Igor A C,et al. A computational efficiency two-dimensional model of beam-wave interaction in a coupled-cavity TWT[J]. IEEE Trans. Plasma Sci, 2012,40(6):1575-1589.
- [7] 王文祥,宫玉彬,魏彦玉,等. 大功率行波管新型慢波线技术的进展[J]. 真空电子技术, 2002(6):3-18. (WANG Wenxiang,GONG Yubin,WEI Yanyu,et al. The advance of new slow-wave structure for high-power TWT[J]. Vacuum Electronics, 2002(6):3-18.)