

# 一种开敞式脊加载折叠波导慢波电路的高频特性

吕素叶<sup>1,2\*</sup>, 张长青<sup>1</sup>, 王勇<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院电子学研究所 高功率微波源与技术重点实验室, 北京 100190;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:**提出了一种开敞式脊加载折叠波导慢波结构. 通过除去直波导段周围的金属边界, 形成一种开敞式结构以减弱色散, 同时在直波导段加载脊以提高耦合阻抗. 研究表明, 和传统结构相比, 新型结构在不影响带宽的前提下, 有效提高了耦合阻抗, 尤其在大功率设计情况下, 耦合阻抗的提高接近 1 倍.

**关键词:**折叠波导; 行波管; 耦合阻抗; 高频特性

**中图分类号:** TN124 **文献标识码:** A

## The high-frequency characteristics of an open ridged loaded folded waveguide slow-wave circuit

LÜ Su-Ye<sup>1,2\*</sup>, ZHANG Chang-Qing<sup>1</sup>, WANG Yong<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of High Power Microwave Sources and Technologies, Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** An open ridged loaded folded waveguide slow-wave circuit has been proposed in this paper. By removing the metal boundary of the straight waveguide, an open structure has been formed to reduce the dispersion, while the ridge has been loaded to improve coupling impedance. Compared to the conventional structure the improved circuit structure not only increases the interaction impedance significantly but also keeps the dispersion characteristics well. Especially in the high-power design the coupling impedance is nearly doubled.

**Key words:** folded waveguide, traveling-wave tube (TWT), coupling impedance, high-frequency characteristics

**PACS:** 84.40.Dc, 84.40.Fe, 84.30.Ng, 41.75.-i

## 引言

在现代雷达和通讯等电子器件中, 行波管以其优越的综合性能(带宽、功率容量以及线性特性)成为一类不可替代的毫米波辐射源<sup>[1-5]</sup>. 慢波电路作为行波管的注波相互作用部件, 其性能直接决定着行波管的水平. 因此, 改进和发展新型慢波电路成为提高行波管性能的主要方向之一. 在毫米波以及亚毫米波段, 传统的螺旋线和耦合腔慢波电路及其衍生结

构在功率与带宽的兼顾上都遇到了严重障碍<sup>[6]</sup>. 为了解决毫米波行波管的宽频带、大功率问题, Northrop 公司<sup>[7]</sup>最先提出了采用 E 面弯曲矩形波导作为高频相互作用电路的曲折波导行波管, 并制造了实验样管. 1993 年他们在 40 ~ 50 GHz 频段上获得了 30 dB 的饱和增益、100 W 的输出功率和超过 25% 的带宽<sup>[8]</sup>. 相比于螺旋线慢波结构, 全金属的折叠波导电路结构牢固, 散热性能好, 具有较大的功率容量; 同时, 相对平坦的色散特性使其带宽远大于

收稿日期: 2016-10-27, 修回日期: 2016-12-13

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2013CB328901)

Foundation items: Supported by the Major State Research Development Program of China (2013CB328901)

作者简介 (Biography): 吕素叶 (1981-), 女, 河北邯郸人, 博士研究生. 主要研究领域为毫米波器件.

\* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: lvsuye@163.com

Received date: 2016-10-27, revised date: 2016-12-13

传统的耦合腔电路. 因此, 折叠波导行波管自提出以来就受到了普遍关注, 并且由于加工容易, 折叠波导已成为一类极具竞争力的亚毫米波乃至太赫兹行波管慢波电路<sup>[9-12]</sup>.

尽管折叠波导行波管在兼顾带宽和功率方面具有较多优势, 然而实现大功率以及宽频带输出仍不是一件容易的事. 最重要的一个原因就是折叠波导慢波电路的耦合阻抗很低, 而且色散和耦合阻抗之间的矛盾仍很突出, 这使得宽频带折叠波导行波管的电子效率往往较低<sup>[13]</sup>. 除此之外, 在设计大功率折叠波导行波管时, 耦合阻抗较低也导致了一系列其它的问题: 一方面, 由于电子效率较低, 为了提高输出功率需要提高直流电子注功率, 但是较大的电流密度给 PPM 聚焦系统带来困难, 而且工作电压的大幅升高, 导致设备体积庞大; 另一方面为了提高耦合阻抗, 系统的色散往往较强, 这使得放大器很难获得平坦的增益特性. 因此, 综合多方面考虑, 人们在折叠波导的研究中提出了一些变形结构以满足不同的应用需求, 如整体极靴结构<sup>[14]</sup>、双脊折叠波导电路<sup>[15-16]</sup>、脊加载<sup>[17]</sup>和槽加载<sup>[18]</sup>结构等. 其中, 整体极靴折叠波导电路采用的片状极靴不仅是 PPM 聚焦系统的一部分, 而且直接深入慢波结构中作为波导壁成为电子注通道的一部分, 使其可以实现低电压、大电流电子注的聚焦. 但这种改进也极大的增加了结构的复杂性, 且磁场设计与高频设计必须同时考虑, 在带宽性能上不得不出让.

脊加载是改善慢波结构性能的一种常用手段, 然而不同的加脊方式获得的效果也不相同. 例如, 双脊折叠波导电路可视为一种在整个电磁传输路径上加脊的结构, 且由于脊波导色散特性弱于矩形波导, 因而该结构被认为可以改善带宽. 这一点在线性理论中得到初步证实<sup>[16]</sup>. 这种双脊折叠波导电路的主要问题在于明显降低了波导的功率容量、增加了电路传输损耗以及破坏了结构的平面特征. 另外一种加载方式是仅在直波导段加脊, 理论研究表明, 这种结构可以获得耦合阻抗的提高, 但却带来色散的增强. 此外, 这种加脊方式相当于在电磁波传输路径上又额外引入了一个周期性的电容, 增加了结构内部反射, 因而其带边特性较差.

由此可以看出, 新型结构在增强传统结构某一特性的同时往往会损害其他性能. 考虑到折叠波导慢波电路最显著的优点在于结构简单以及色散相对平坦, 因此, 要求新型折叠波导慢波结构应该满足以下条件: 1) 提高耦合阻抗的同时尽可能保持色散特

性的平坦; 2) 不增加机械复杂性, 易于加工; 3) 缩小横向尺寸以利于改善 PPM 的聚焦性能. 基于上述三方面的综合考虑, 本文提出了一种开敞式脊加载结构的折叠波导电路, 能够在显著提高耦合阻抗的同时, 最大限度的保留传统折叠波导结构的优点. 本文对这种开敞式脊加载折叠波导电路的色散特性以及耦合阻抗进行了分析, 并与传统结构进行了比较, 分析了其优势所在.

## 1 理论与计算方法

在折叠波导慢波电路中电磁波沿着曲折的路径传输, 在每一个直波导段的间隙处与轴向通过的电子注发生相互作用, 因此电子注感受到的是电磁波在轴向上的等效相速. 为了能够有效的交换能量, 两者必须满足同步条件. 在不考虑电子注的情况下, 折叠波导慢波电路的等效轴向速度随频率的变化就是系统的冷色散特性, 通常表示为频率-相移特性. 折叠波导电路每周期的(半几何周期)相移可以表示为

$$\beta_{z,n}p = \beta p + \pi + 2n\pi \quad , \quad (1)$$

其中  $\beta p$  表示波沿曲折的路径传输一个周期时轴向上的有效相移,  $\pi$  是由于结构弯曲在电子注看来导致的相位反转,  $2n\pi$  是考虑了所有的空间谐波. 可以看出, 折叠波导电路属于基波为返波的慢波结构, 其第一个前向波分量每周期的轴向相移落在  $\pi \sim 2\pi$  之间. 对于传统结构而言, 可以采用解析方法<sup>[19-20]</sup>得到  $\beta p$ , 从而求出其色散特性. 然而实际上往往对色散特性的计算精度要求较高, 例如为了准确预测小信号增益, 轴向相速的误差要小于 0.5%, 因此多采用电磁模拟软件如 MAFIA、HFSS 和 CST 等来研究电路的色散特性. 本文采用了高频电磁模拟软件 HFSS 来计算传统结构和开敞式脊加载结构的冷腔性能并进行比较. 在仿真中通过设置周期性边界条件, 对每一个指定的轴向相移  $\Delta\varphi$  得到一个相应的“本征频率  $f_{en}$ ”. 由以上讨论可知, 对于前向波相互作用情况,  $\Delta\varphi$  的取值范围是  $\pi \sim 2\pi$ . 由此得到轴向上的等效相速为

$$v_{p,axis} = \frac{\omega}{\beta_z} = \frac{2\pi f_{en}}{\Delta\varphi/p} \quad . \quad (2)$$

描述慢波系统的另一个重要物理量是耦合阻抗, 它表征慢波结构与电子注相互作用的强弱. 轴向上耦合阻抗的定义为<sup>[21]</sup>

$$K_{axis,m} = \frac{|E_{z,m}|^2}{2\beta_{z,m}^2 P_{wg}} \quad , \quad (3)$$

其中  $E_{z,m}$  是第  $m$  次空间谐波的轴向电场幅值,  $P_{wg}$  是

慢波结构中传输的功率流. 利用 HFSS 计算慢波结构色散特性时,可以得到电磁场的各个分量,通过对轴向电场进行空间傅里叶变换,则可得到空间谐波分量的大小,即

$$E_{z,m} = \frac{1}{p} \int_0^p E_z e^{j\beta_m z} dz \quad (4)$$

## 2 开敞式脊加载折叠波导慢波电路

### 2.1 结构特征

在传统结构的基础上发展了更适用于大功率行波管的开敞式脊加载折叠波导慢波电路,如图 1 所示. 其中 A 为传统结构,由 E 面弯曲的矩形波导形成的,在直波导段的中心开有电子注通道,相对于传输模式而言电子注通道是截止的. 在折叠波导电路中色散和耦合阻抗相互制约,提高耦合阻抗会导致色散增强,因此为了保持传统结构的优点,在提高耦合阻抗的同时,必须对色散进行补偿. 为了减弱色散、增加带宽,一般要求电路结构在一定尺寸范围增加开敞性,因此,可以将传统结构直波导段的金属壁去掉,形成一个开敞的互作用区,如图 B 所示;与此同时,为了使轴向的电场更有效地集中在互作用区,采用了脊加载的方法,最后改进后的折叠波导慢波电路如图 C 所示. 脊加载除了可以使电场更为集中从而有利于互作用外,还可以减小电路的横向尺寸,从而使 PPM 聚焦系统更为紧凑,有利于实现大电流电子注的聚焦.

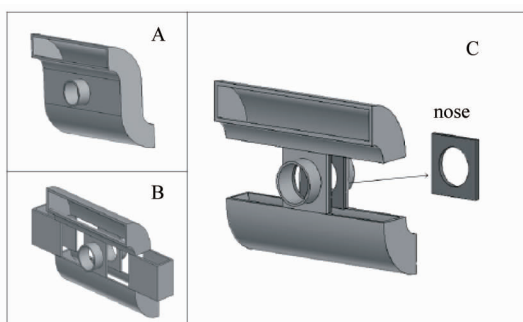


图 1 开敞式脊加载折叠波导慢波电路的结构特点  
Fig. 1 Structure characteristics of the open ridged loaded folded waveguide slow-wave circuit

图 2 给出了采用高频电磁软件 HFSS 模拟得到的传统结构与开敞式脊加载结构的纵向电场分布,图中箭头的大小代表电场强弱. 可以看出,开敞式脊加载结构互作用间隙的电场更为集中,从而有利于互作用的增强.

### 2.2 性能分析

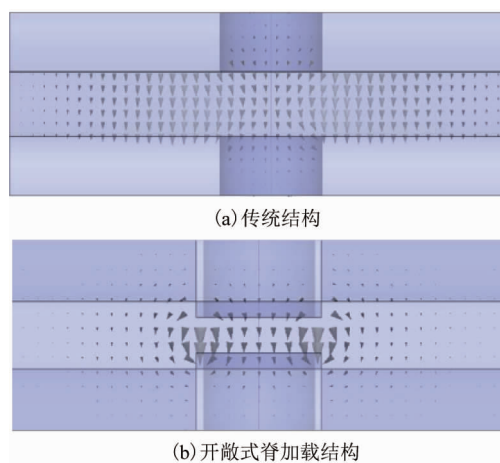


图 2 HFSS 模拟得到的传统结构与开敞式脊加载结构的纵向电场分布 (a) 传统结构, (b) 开敞式脊加载结构

Fig. 2 The longitudinal electric field distribution of (a) the traditional structure, and (b) the open ridged loaded structure by HFSS simulation

图 3 给出了开敞式脊加载折叠波导慢波电路的截面示意图以及结构参数,其中参数  $a, b, p, h, R$  的物理含义和传统结构相同. 这些参数对色散特性和耦合阻抗的影响已有较多研究. 值得注意的是,开敞式脊加载结构新增的两个参数  $w$  和  $d$  分别代表互作用段的宽度(也就是脊的宽度)和脊的厚度. 由于脊加载对耦合阻抗的影响是最为关注的问题,因此需要对这两个参数进行详细的讨论.

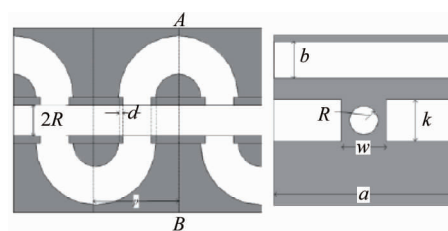


图 3 开敞式脊加载折叠波导慢波电路的截面视图与结构参数  
Fig. 3 The cross-sectional view and structural parameters of the open ridged loaded folded waveguide slow-wave structure

图 4 给出了脊的厚度  $d$  的变化对开敞式脊加载折叠波导慢波电路的色散和耦合阻抗的影响. 从图 4(a)中可以看出,脊的厚度增大,频带整体向低频移动,但是色散的强弱几乎没有变化. 另外,注意到随着脊的厚度增大,上截止频率下降的幅度大于下截止频率( $\pi$ ),因此在止带( $2\pi$ )附近色散略有增强,而且冷带宽会有所减小. 但是,此时电路依然具

有将近 20 GHz 的冷带宽,而且放大器的工作频率远离止带,因此不会明显影响放大器的性能.从图 4 (b)可以看到,在靠近截止频率的一端,耦合阻抗有所下降.随着频率升高,耦合阻抗有增大的趋势,在中间频段耦合阻抗几乎没有变化.这说明高频端耦合阻抗的下降主要是由于频带的移动造成的,如果适当调整结构参数,使其在同一个频段上,可以预期耦合阻抗会有明显的增大,这也正是所期望的.

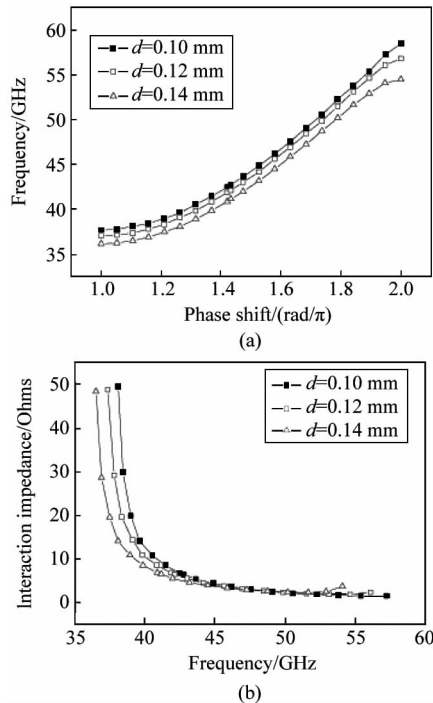


图 4 开敞式脊加载折叠波导慢波结构的冷腔性能随脊厚度  $d$  的变化 (a) 频相色散特性 (b) 轴向耦合阻抗  
Fig. 4 The variation of cold cavity performance of the open ridged loaded folded waveguide slow-wave structure with the ridge thickness  $d$ , (a) frequency-phase dispersion characteristics, (b) axial coupled impedance

图 5 给出了相互作用段的宽度  $w$  增加时开敞式脊加载折叠波导慢波电路的色散和耦合阻抗的变化,从图中可以看出变化规律与图 4 是一致的,只是参数  $w$  的影响要略弱于参数  $d$ .

从上面的分析中可以看到,改进后的折叠波导慢波电路仍然具有较好的色散特性,保持了传统结构宽频带的优点,并且由于脊加载使得频带向低频段移动,那么在同样的电子注参数下,调整结构参数后的开敞式脊加载折叠波导慢波电路具有缩小的横向尺寸,因此结构更为紧凑,这种变化也有利于耦合阻抗的提高.

为了评价开敞式脊加载结构的优劣,我们采用色散匹配的方法,即设计和调整开敞式脊加载结构

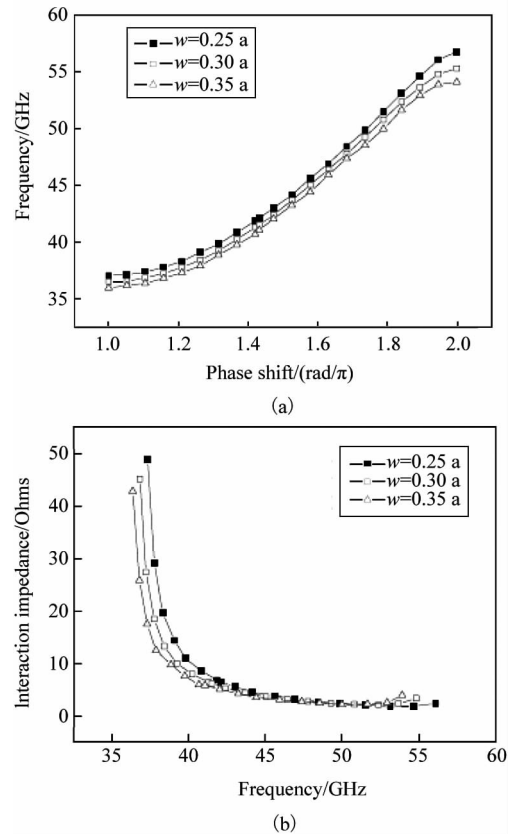


图 5 开敞式脊加载折叠波导慢波结构的冷腔性能随脊宽度  $w$  的变化 (a) 频相色散特性 (b) 轴向耦合阻抗  
Fig. 5 The variation of cold cavity performance of the open ridged loaded folded waveguide slow-wave structure with the width  $w$ , (a) frequency-phase dispersion characteristics, (b) axial coupled impedance

的参数使其色散特性与传统结构尽可能一致,然后研究新型结构的耦合阻抗如何提高.为此选择了两个不同设计考虑的传统结构折叠波导行波管作为原型,其中一个是大功率 Ka 波段折叠波导行波管<sup>[22]</sup>(称为“原型-1”),另一个是 Q 波段宽频带折叠波导行波管<sup>[11]</sup>(称为“原型-2”).图 6 和图 7 给出了开敞式脊加载折叠波导慢波结构与这两个原型的比较.从图 6 和图 7 中可以看出,开敞式脊加载结构的耦合阻抗均明显高于原型结构,而且从色散特性的比较中可以看出,开敞式脊加载结构对色散的影响很小,只在高频端(靠近止带)与传统结构不同,而在工作频带内两者的色散特性几乎一致.这意味着从色散特性上讲开敞式脊加载结构几乎不会影响放大器的热性能.在 Ka 波段的设计中,中心点 32 GHz 处耦合阻抗从 3.15 欧姆提高至 6 欧姆,提高了 90%,在频带 30 ~ 35 GHz 上耦合阻抗平均提高了 94%;在 Q 波段的设计中,中心点 45 GHz 处耦合阻抗从 2.46 欧姆提高至 4.07 欧姆,提高了 64.6%,在

频段 40 ~ 50 GHz 上耦合阻抗平均提高了 71.4%。由此可见,对于不同的设计要求,耦合阻抗的提高程度并不相同. 通过比较可以看到,对于大功率设计的情况耦合阻抗提高的相当明显(接近一倍). 因此开敞式脊加载结构更适合用于大功率、中等带宽的行波管,这正好可以弥补传统结构的缺点. 对于宽带设计的情况,在整个工作频带内耦合阻抗至少可以提高 50%. 因此可以得出结论,在几乎不损害色散特性即保持色散平坦性的前提下,开敞式脊加载折叠波导慢波电路可以有效提高耦合阻抗.

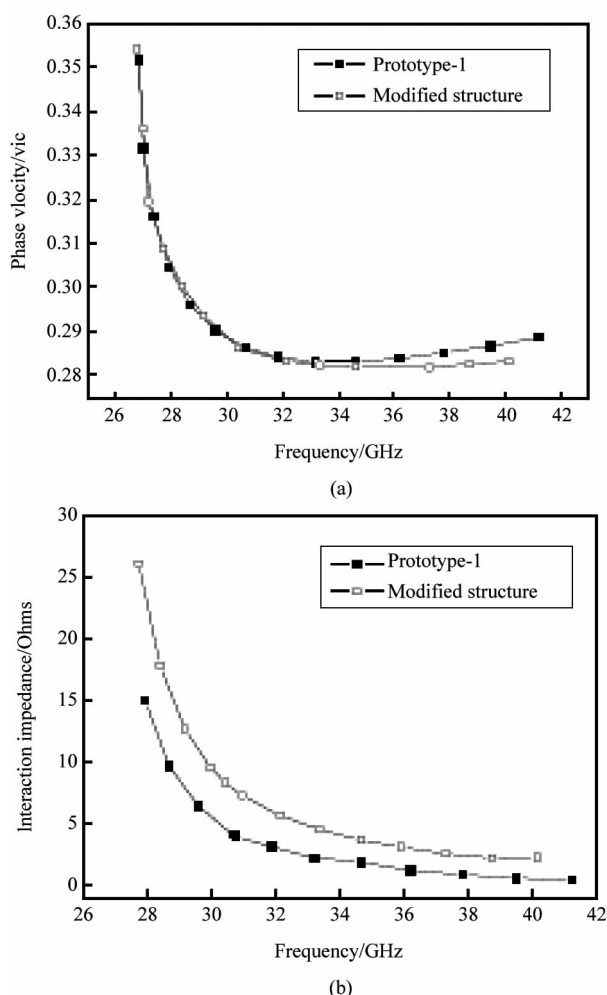


图6 大功率设计考虑下开敞式脊加载折叠波导慢波结构与传统结构性能的比较(a) 归一化相速,(b) 轴向耦合阻抗

Fig. 6 The comparison of the performance for the open ridged loaded folded waveguide slow-wave structure and the original one under the design of high power, (a) normalized phase velocity, (b) axial coupled impedance

### 3 结论

本文提出了一种开敞式脊加载折叠波导慢波电

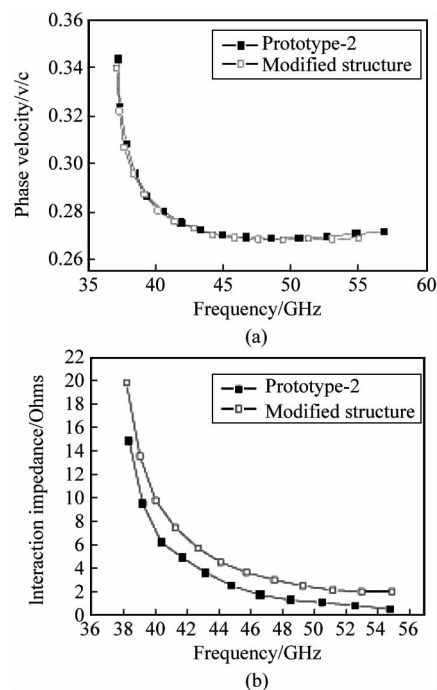


图7 宽频带设计考虑下开敞式脊加载折叠波导慢波结构与传统结构性能的比较,(a) 归一化相速,(b) 轴向耦合阻抗

Fig. 7 The comparison of the performance for the open ridged loaded folded waveguide slow-wave structure and the original one under the design of broadband, (a) normalized phase velocity, (b) axial coupled impedance

路,其结构特点在于采用了脊加载的相互作用区并去掉了直波导段周围的金属边界以补偿电路尺寸缩小对色散造成的影响. 与传统结构在场分布、色散和耦合阻抗方面的比较研究表明:无论是宽频带还是大功率设计,开敞式脊加载折叠波导慢波电路对耦合阻抗的提高都在 50% 以上(尤其在最大功率设计的情况下,对耦合阻抗的提高接近一倍),同时保持了传统结构良好的色散特性. 缩小的横向尺寸也使得 PPM 聚焦系统更为紧凑,有利于实现大电流电子注的聚焦,从而提高输出功率. 因此,相对于传统的耦合腔等大功率慢波结构,开敞式脊加载折叠波导慢波结构在色散特性、带宽以及加工等方面的明显优势,使其在宽频带、大功率毫米波行波管的研制上具有一定的应用潜力.

### References

- [1] LIAO Fu-Jiang. *Vacuum electronics* [M]. National Defence Industry Press (Second Edition) (廖复疆. 真空电子技术, 国防工业出版社(第二版)), 2008. 06.
- [2] GUO Kai-Zhou. *Development of traveling wave tube* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry (郭开周. 行波管研制技术, 北京: 电子工业出版社), 2008.

- [3] Chong C K, Davis J A, Le Brogne R H, *et al.* Development of high-power Ka-band and Q-band helix-TWTs [J], *IEEE Trans. Electron Devices*, 2005, **52**(5):653–659.
- [4] Menninger W L, Robbins N R, Dibb D E, *et al.* Power flexible Ka-band traveling wave tube amplifiers of up to 250-W RF for space communications [J], *IEEE Trans. Electron Devices*, 2007, **54**(2):181–187.
- [5] Legarra J R, Kolda P E, Freund H P, *et al.* Ka-band coupled-cavity TWT amplifiers for military radar and commercial satellite communication [C]. *IEEE MTT-s Digest*, 2002:625–628.
- [6] WANG Wen-Xiang, GONG Yu-Bin, WEI Yan-Yu, *et al.* The advance of new slow-wave structure for high-power TWT [J]. *Vacuum Electronics* (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. *真空电子技术*) 2002, **6**:13–18.
- [7] Dohler G, Gagne D, *et al.* Serpentine Waveguide TWT [J]. *IEEE Xplore: Electron Devices*, 1987, **33**:4852488.
- [8] Dohler G, Gallagher D, Richards J. Millimeter wave folded waveguide TWTs[C]. Proc. Vacuum Electron Annu. rev. crystal city VA, 1993:V215220.
- [9] Kory C, Ives R L, Read M, *et al.* Overview of W-band traveling wave tube programs [J]. *IEEE*, 2006, 1-4244-0108-9/06.
- [10] Bhattacharjee S, Booske J H, Kory C L, *et al.* Folded waveguide traveling-wave tube sources for terahertz radiation[J]. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 2004, **32**(3):1002–1014.
- [11] Gong H R, Xu J, Tang T, *et al.* A 1-kW 32~34 GHz folded waveguide traveling wave tube[J]. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 2014, **42**(1):8–12.
- [12] Feng J J, Cai J, Hu Y F, *et al.* Development of W-band folded waveguide pulsed TWTs [J]. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 2014, **61**(6):1721–1725.
- [13] Young H N, Sang W C, Jin J C. Analysis of a broadband Q band folded waveguide traveling-wave tube [J]. *IEEE Trans. on Plasma Sci.*, 2002, **30**(3):1017–1023.
- [14] Theiss A J, Lyon D B, Hiramatsu Y. An integral-polepiece folded-waveguide slow-wave circuit for high-power millimeter-wave TWTs[J]. *Proceedings of IEEE International Electron Devices Meeting*, 1993, **93**:149–151.
- [15] Gong Y B, Wei Y Y, Huang M Z, *et al.* Research activities on millimeter wave TWT in UESTC [C]. *IEEE GSMM*, Proceeding 2008.
- [16] He J, Wei Y Y, Gong Y B, *et al.* Linear analysis of folded double-ridged waveguide slow-wave structure for millimeter wave traveling wave tube [J]. *Chin. Phys. Lett.* 2009, **26**(11):114103.
- [17] Wei Y Y, Guo G, Gong Y B, *et al.* Novel W-band ridge-loaded folded waveguide traveling wave tube [J]. *IEEE Trans. Electron Devices Letters*, 2014, **35**(10):1058–1060.
- [18] Tian Y Y, Yue L N, Xu J, *et al.* A novel slow-wave structure-folded rectangular groove waveguide for millimeter-wave TWT [J]. *IEEE Trans. Electron Devices*, 2012, **59**(2):510–515.
- [19] 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**:685–693.
- [20] Sumathy M, Vinoy K J, Datta S K. Equivalent Circuit Analysis of Serpentine Folded-waveguide Slow-wave Structures for Millimeter-wave Traveling-wave Tubes [J]. *Int. J. Infrared Millim. Waves*. 2009, **30**:151–158.
- [21] Pierce J R. *Traveling Wave Tubes* [M]. Princeton, NJ: Van Nostrand, 1950: 231–259.
- [22] Gong H R, Gong Y B, Lu Z G, *et al.* The design of Ka-band high power folded waveguide traveling-wave tube [C]. *IEEE Global Symposium on Millimeter Waves Proceeding*, 2008.