

W 波段宽带直边连接平面螺旋线行波管研究

傅伟鹏¹ 魏望和¹ 王 亮¹ 林馄义¹ 周鑫慧¹ 吴欣颖¹

FU Weipeng WEI Wanghe WANG Liang LIN Kunyi ZHOU Xinhui WU Xinhao

摘 要

高频工作和大输出功率是当前行波管发展的两个主要方向。由于平坦色散和适中的互作用阻抗,传统的圆螺旋线慢波结构在宽带中等功率行波管领域获得广泛应用。然而,当工作频率进入短毫米波段,圆螺旋线慢波结构的精确加工日趋困难。直边连接平面螺旋线具有与微加工技术相兼容的特点,容易实现短毫米波段的精确加工。为适应行波管大功率和小型化的发展需求,文章拟开展 W 波段直边连接平面螺旋线行波管研究。PIC 仿真结果表明,在 7 750 V 和 0.03 A 的圆形电子注工作条件下,方形环直边连接平面螺旋线行波管的最大输出功率为 19.71 W,对应的微分增益为 1.34 dB/mm,最大电子效率为 8.48%,其 3-dB 带宽范围覆盖 60~106 GHz,可达到 46 GHz 的宽频带。

关键词

W 波段;直边连接平面螺旋线;慢波结构;行波管;圆形电子注

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.11.020

0 引言

毫米波频率范围介于 30~300 GHz 之间,相应的波长范围则为 1~10 mm 之间^[1-3]。W 波段(75~110 GHz)的毫米波大气衰减程度较低,借助大气中衰减较小的 94 GHz“大气窗口”,能够达成地面-空间以及远距离的保密通信^[4-6]。作为毫米波源的主要器件,真空电子器件在提供大功率输出方面发挥了重要作用,带电粒子在特定的真空条件中与电磁波之间发生能量交换从而实现信号放大。行波管作为一种重要的电真空辐射源,具有宽频带、输出功率大、高效率、高增益、体积小的综合优势,在雷达、电子对抗和毫米波通信领域具有广阔的应用前景^[7]。慢波结构是电子与电磁波能量转换的关键场所,直接影响着行波管的各项性能。根据慢波结构类型,行波管可分为:螺旋线行波管^[8]、曲折波导行波管^[9]、耦合腔行波管^[10]、交错双栅行波管^[11]等。

直边连接平面螺旋线^[12-13](planar helix with straight-edge connections, PHSEC)行波管(TWT)是一种在毫米波频段广泛应用的电真空器件。相关研究表明,相较于传统的圆螺旋线(Helix)^[14],矩形螺旋线(rectangular helix, RH)^[15]与 PHSEC 在保留其宽带特性的同时,耦合阻抗得到显著提升^[16]。圆形电子注凭借其优异的轴对称特性,在轴向传播过程中更容易通过电磁场实现聚焦。因此,本文主要研究一种适用于圆形电子注的方形环直边连接平面螺旋线行波管,研究其在 W 波段下的注-波互作用特性。

1 慢波结构的高频特性

慢波结构的高频性能优劣对行波管的工作频带、输出功率以及电子效率有着直接的影响。其中色散特性决定了行波管的工作带宽与工作电压,是设计行波管关键的参量,而耦合阻抗则反映了电子注与电磁波之间相互作用的强度,其数值大小与行波管的输出功率密切相关,通常耦合阻抗越大,行波管的性能表现越优异。选用 HFSS 软件对方形环直边连接平面螺旋线慢波结构的高频特性进行计算与分析。凭借其高效的自适应网格划分和高精度计算结果,能够为慢波结构的设计和优化提供可靠的实验依据。准周期法具备较强的灵活性,仅需建立一个周期模型就能算出指定相移的谐振频率,进而获取色散曲线。与此同时,还可算出任意谐振频率下场分布、耦合阻抗与导体损耗。

图 1 展示了方形环直边连接平面螺旋线慢波结构的单周期尺寸模型(SR-PHSEC),慢波结构被置于金属屏蔽腔内,氮化硼(BN)介质衬底分布于慢波结构的上下层,有效起到散热作用。

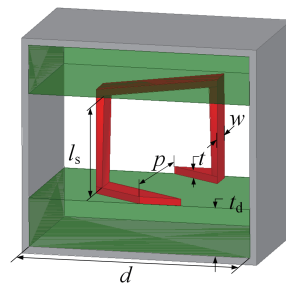


图 1 单周期方形环直边连接平面螺旋线慢波结构

图 1 中, l_s 表示方形环的内边长; d 表示金属屏蔽腔的

1. 江西理工大学理学院 江西赣州 341000

[基金项目] 国家自然科学基金项目(62361031)

边长; t 和 w 分别表示螺旋线的厚度和宽度; t_d 表示介质衬底的厚度; p 表示慢波结构的螺距。

运用平均耦合阻抗来衡量整个电子束与电磁波之间的相互作用能力, 能够收获更为精确的结果。针对方形环通道慢波结构的特点, 采用一种适用于圆形电子注的平均耦合阻抗计算方法: 首先将圆形电子注截面沿径向离散化为若干等间距的同心圆环, 然后在每个同心圆环上均匀布置多条积分路径。计算过程中, 通过增加同心圆环的数量和提升积分路径的分布密度, 可以显著提高计算结果的精度。当同心圆环数量足够多时, 该方法能够准确反映电子注与慢波结构之间的相互作用特性。接下来的平均耦合阻抗计算, 除了圆心处的积分线之外, 由内至外的 8 个圆环依次选取 4 条、8 条、12 条、...、32 条积分线, 对 145 条积分线进行计算, 最后取其平均值即可^[17], 如图 2 所示。

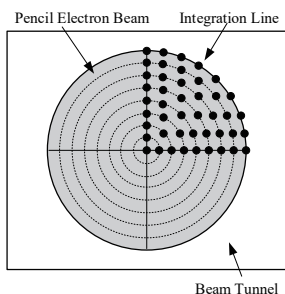


图 2 圆形电子注平均相互作用阻抗计算方法

基于表 1 的慢波结构优化尺寸参数, 可得到图 3 所示的高频特性结果。由图可知, 方形环直边连接平面螺旋线慢波结构具有较为平坦的色散特性。在中心频点 94 GHz 处的平均相互作用阻抗值为 32.45 Ω , 说明该结构具有较宽的 3 dB 工作带宽, 满足宽带、中等功率行波管的需求。

表 1 慢波结构尺寸参数

单位: mm						
参数	l_s	d	w	t	t_d	p
尺寸	0.13	0.32	0.02	0.01	0.06	0.12

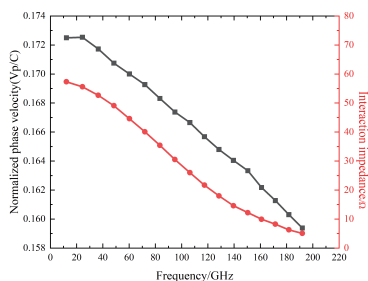


图 3 色散曲线和平均相互作用阻抗

2 传输特性研究

行波管传输特性研究, 需要考虑到不同传输线之间存在阻抗匹配的问题。通过对传输耦合装置的形状、尺寸以及材

料选型等诸多因素进行优化, 让信号以更低的损耗进行传输是研究传输装置的关键所在。同时, 高频信号在管壳内部的真空环境下进行传输, 这就要求必须维护良好的真空状态, 以确保信号的稳定传输。

在 CST 的 Microwave Studio 中建立 50 个周期的方形环直边连接平面螺旋线传输模型, 如图 4 所示。具有逐渐变化的内部导体的同轴线经过适当设计, 以减少输入输出端口和慢波结构之间的失配。为提升仿真精度, 特别考虑了实际材料表面粗糙度的影响, W 波段的传输模型选用电导率为 2.25×10^7 S/m 的无氧铜作为慢波结构和同轴线内芯的材料, 衬底材料为氮化硼 (BN), 其介电常数为 4, 损耗角正切为 3×10^{-4} ^[18]。图 4 中, 用 d_{in1} 和 r_{12} 表示同轴线渐变段的直径和长度, d_{in2} 和 r_{13} 表示同轴线均匀段的直径和长度, d_{ou} 表示同轴线外导体直径; r_{11} 表示同轴线与慢波结构的连接部分的长度; l 表示衬底渐变的长度, 这种渐变处理方法能够有效优化传输特性。优化后的参数值为: $d_{in1} = 0.02$ mm, $d_{in2} = 0.029$ mm, $d_{ou} = 0.052$ mm, $r_{11} = 0.02$ mm, $r_{12} = 1$ mm, $r_{13} = 0.2$ mm, $l = 0.15$ mm。

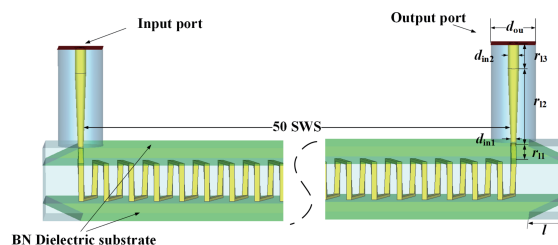


图 4 传输模型

图 5 为时域求解器计算后的传输特性曲线, 包括反射系数 S_{11} 和传输系数 S_{21} 。反射系数反映了行波管的反射损耗, 其值越低, 表明反射损耗越小; 传输系数则表征了行波管的传输性能, 其值越高, 表明传输效率越高。由图可观察到, 方形环直边连接平面螺旋线在 70~120 GHz 范围内的反射系数 S_{11} 低于 -20 dB, 传输系数 S_{21} 高于 -3.9 dB。

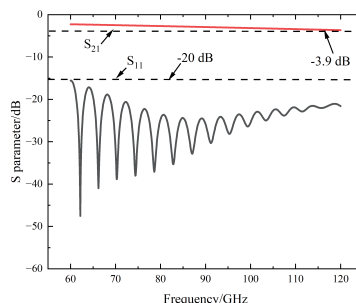


图 5 传输特性曲线

3 注 - 波相互作用研究

行波管的性能主要通过输出功率、增益、带宽和电子效率等参数来衡量。在 CST 的粒子工作室中构建 W 波段方形环直边连接平面螺旋线行波管的注 - 波相互作用仿真模型, 如

图 6 所示。行波管主要包含三个部分：提供理想发射源的圆形电子注，注 - 波相互作用的主要场所——慢波结构，以及稳定引入和输出高频信号的传输耦合结构。慢波结构、衬底以及传输耦合结构的几何参数与材料属性同上一节传输仿真中一致。

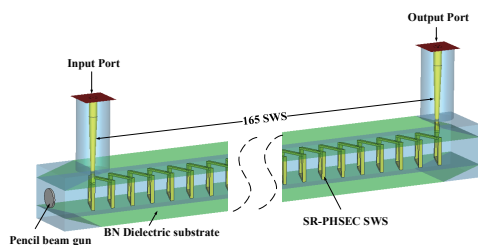


图 6 三维注 - 波相互作用模型

W 波段 SR-PHSEC TWT 的方形横截面边长为 0.13 mm，而单个圆形电子注的实际半径为 0.050 8 mm，因此圆形电子注占电子注通道的填充比约为 48%。为模拟实际工作条件，在 PIC 仿真中，单个圆形电子注的电流设置为 0.03 A。根据图 3 所示的色散特性曲线分析结果，在工作频率 94 GHz 处，慢波结构归一化相速度为 0.167 3，通过式（1）给出的电压 - 相速度关系，计算得到理论同步电压值为 7 300 V，该值被设定为电子注的初始电压。然而，实际注 - 波相互作用有效工作所需的电压通常高于理论同步电压。为维持电子注的稳定传输，系统采用了 1.5 T 的纵向均匀磁场用于圆形电子注聚焦，以确保电子注与在波结构有效传输。通过波端口 1 向慢波结构注入中心频率为 94 GHz、平均功率 0.05 W 的正弦电磁信号作为激励源，以确保仿真条件与实际工作环境的一致性。

$$\frac{v_p}{c} \approx \sqrt{1 - \frac{1}{(1 + \eta v_0 / c^2)^2}} \quad (1)$$

优化后的行波管电气参数如表 2 所示，在 7 750 V 的工作电压和 0.05 W 的输入功率下，94 GHz 处 SR-PHSEC TWT 达到饱和输出时的相互作用长度为 19.404 mm。

表 2 行波管的电气参数

Parameter	Value
Beam cross-section	0.050 8 mm
Beam voltage	7 750 V
Beam current	0.03 A
Input power	0.05 W
Filling factor	0.48
Focus magnetic field	1.5 T
TWT length	165 periods

图 7 给出了行波管在 94 GHz 处的端口电压幅值。可知，初始幅值为 0.31 V 的输入信号在 0.8 ns 后被放大至 6.4 V，此时行波管可产生 19.22 W 的平均输出功率。由图 8 可知，在 187 GHz 处存在幅值较小的二次谐波分量。

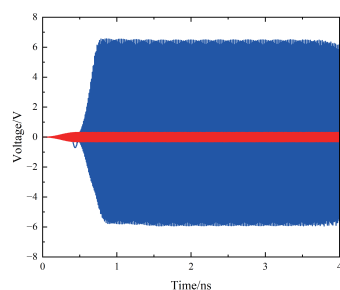


图 7 94 GHz 处输入、输出信号电压幅值

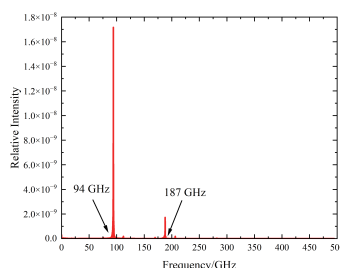


图 8 输出信号频谱特性

图 9 展示了带状注发射电子的相空间分布和聚束情况。从图中可以观察到，在慢波电路的输出端，处于减速场的电子数量显著多于加速场中的电子，这一分布特征表明了电子注与电磁波之间发生了有效的能量交换。电子注通过减速场时损失动能，将直流能量转换为高频电磁场能量，从而实现了有效的注 - 波相互作用过程。同时加速电子与减速电子沿传输方向呈现周期性交替分布，并在慢波电路末端出现高、低能电子的空间位置重叠，即典型的“超越现象”。这一现象标志着电子注与电磁波的相互作用已达到饱和状态，此时能量交换效率趋于稳定。

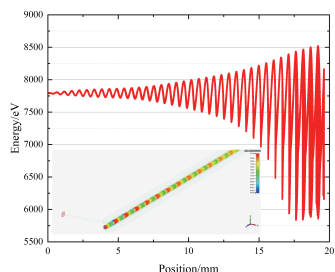


图 9 电子的相空间分布和群聚图（插图）

在分析完 94 GHz 处的注 - 波相互作用结果后，接下来探究行波管在整个频带范围内的注 - 波相互作用情况。考虑到宽带行波管特性，选取 5 GHz 作为频率扫描间隔点，对 60~120 GHz 进行逐一计算，得出行波管的输出功率、增益以及电子效率结果。

图 10 展示行波管的输出功率随频率变换曲线。可以看出，方形环直边连接平面螺旋线行波管的最大输出功率为 19.71 W，其平均 3-dB 带宽为 46 GHz，覆盖 60~106 GHz。图 11 展示了行波管的微分增益和电子效率随频率变化曲线。方形环直边连接平面螺旋线行波管的最大微分增益为 1.34 dB/mm，最大电子效率为 8.48%。在 3-dB 带宽内的微分

增益大于 1.21 dB/mm, 电子效率大于 4.7%。

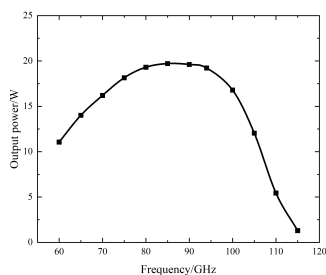


图 10 输出功率

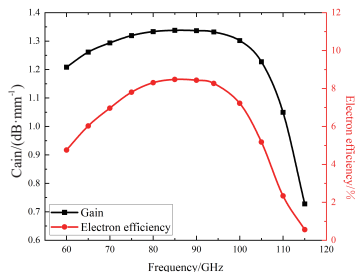


图 11 增益和电子效率

4 结语

本文提出了一种适用于圆形电子注的方形环直边连接平面螺旋线。采用 HFSS 软件计算出慢波结构在全频带内的归一化相速度值和平均互作用阻抗值, 具有宽频带和较高阻抗性。传输特性仿真结果显示, 70~120 GHz 范围内的反射系数 S_{11} 低于 -20 dB, 传输系数 S_{21} 高于 -3.9 dB。PIC 仿真结果表明, 当圆形电子注的电压为 7 750 V, 电流为 0.03 A 时, 方形环直边连接平面螺旋线行波管的最大输出功率为 19.71 W, 对应的微分增益为 1.34 dB/mm, 最大电子效率为 8.48%, 其 3-dB 带宽范围从 60~106 GHz, 可达到 46 GHz 的宽频带。上述结果说明该行波管满足宽频带、小型化和高功率行波管器件需求。

参考文献:

- [1] 王文祥. 微波工程技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
- [2] 洪伟, 余超, 陈继新, 等. 毫米波与太赫兹技术 [J]. 中国科学: 信息科学, 2016, 46(8): 1086-1107.
- [3] 沈文安. 新型宽带大功率毫米波带状注行波管关键部件的设计 [D]. 成都: 电子科技大学, 2017.
- [4] 王文正. 毫米波无线通信系统中物理层关键技术研究 [D]. 南京: 东南大学, 2018.
- [5] 董燕平. 矩形环对角椭圆双弯曲杆行波管的研究 [D]. 江西: 江西理工大学, 2023.
- [6] 常少杰, 吴振华, 黄杰, 等. 真空电子太赫兹器件研究进展 [J]. 红外与毫米波学报, 2022, 41(1): 85-102.
- [7] DING Y G, LIU P K, ZHANG Z C, et al. An overview of advances in vacuum electronics in China[C]//2011 IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC). Piscataway: IEEE, 2011: 525-528.
- [8] 鲁德鹏. 超宽带螺旋线行波管设计 [D]. 成都: 电子科技大学, 2014.
- [9] LIU Y, XU J, WEI Y Y, et al. Design of a V-band high-power sheet-beam coupled-cavity traveling-wave tube [J]. Progress in electromagnetics research, 2012: 12331-12345.
- [10] SHARMA R K, GREDE A, CHAUDHARY S, et al. Design of folded waveguide slow-wave structure for W-band TWT [J]. IEEE transactions on plasma science, 2014, 42(10): 3430-3436.
- [11] SHU G X, ZHANG G T, HE W. Design and measurement of a terahertz double staggered grating waveguide with an arc-shaped beam tunnel[J]. IEEE transactions on electron devices, 2019, 66(11): 4932-4937.
- [12] CHUA C, ADITYA S, SHEN Z X. Effective dielectric constant method for a planar helix with straight-edge connections[J]. IEEE electron device letters, 2009, 30 (11): 1215-1217.
- [13] ZHAO C, ADITYA S, CHUA C. et al. Connected pair of planar helices with straight-edge connections for application in TWTs [J]. IEEE transactions on electron devices, 2014, 61 (6): 1692-1698.
- [14] WEI W H, WEI Y Y, WANG Y Y, et al. A study of the effects of helix misalignment on the cold parameters of a sheath helix slow-wave structure [J]. IEEE transactions on electron devices, 2015, 62 (4): 1334-1341.
- [15] FU C F, WEI Y Y, YANG Y D, et al. Simulation of rectangular helix slow-wave structure for 140 GHz traveling-wave tube [J]. IEEE transactions on plasma science, 2016, 44 (7): 1069-1074.
- [16] WEI W H, ZHONG H, WEI Y Y, et al. Investigation of half rectangular-ring helix slow wave structure for W-band wide bandwidth high-efficiency TWTs[J]. IEEE transactions on plasma science, 2022, 50(11): 4576-4581.
- [17] 刘漾. 新型角向周期加载圆波导行波管的研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2012.
- [18] ZHANG C, STEVENS G C. Dielectric properties of boron nitride filled epoxy composites[C]//2006 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Piscataway: IEEE, 2006: 19-22.

【作者简介】

傅伟鹏 (2000—), 男, 福建南安人, 硕士研究生, 研究方向: 行波管放大器。

魏望和 (1978—), 男, 江西赣州人, 博士, 副教授、硕士生导师, 研究方向: 行波管放大器。

(收稿日期: 2025-04-13 修回日期: 2025-11-04)