

E 波段带状注直边连接平面螺旋线行波管研究

傅伟鹏¹ 魏望和¹ 林锬义¹ 吴欣颖¹ 王亮¹ 周鑫慧¹

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

摘要

为满足毫米波行波管宽频带和高频工作的需求,文章设计了一种适用于带状电子注的直边连接平面螺旋线行波管。采用 HFSS 软件研究慢波结构的高频特性,确定其最佳尺寸参数,利用 CST 完成 E 波段行波管的传输结构的设计,在 55~100 GHz 频率范围内,反射系数 S_{11} 均小于 -20 dB,传输系数 S_{21} 大于 -5 dB。粒子模拟 (PIC) 计算结果显示,在 6 100 V 的工作电压和 0.05 A 的直流电流下,直边连接平面螺旋线行波管在 60~90 GHz 的频率范围内可提供超过 23.1 W 的输出功率,在 75 GHz 实现 32.85 W 的峰值输出功率,对应的微分增益为 1.57 dB/mm,电子效率为 10.77%。

关键词

直边连接平面螺旋线;慢波结构;行波管;带状电子注;E 波段

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.11.022

0 引言

E 波段 (60~90 GHz) 作为毫米波频谱的重要窗口,因其高带宽特性成为下一代高速通信、卫星链路及高分辨率成像等领域的关键载体。传统固态器件受限于功率输出和热损耗瓶颈,难以满足部分高功率应用场景的需求。在此背景下,行波管 (traveling wave tube, TWT) 作为真空电子器件的代表,具有高增益、宽频带的特性,成为大功率放大技术的核心解决手段^[1-2]。

近年来,国内外关于 E 波段行波管已取得一些研究成果。Hwu 等人^[3]提出一种基于固态真空器件 (SSVDTM) 的 E 波段行波管,覆盖 81~86 GHz 的带宽,饱和功率约为 90 W。2022 年,微波电真空器件国家重点实验室提出了一种 E 波段连续波行波管放大器,具有低电压特性,在 81~86 GHz 的工作频带范围内,饱和输出功率大于 80 W,小信号增益大于 38 dB,电子效率大于 22%^[4]。2023 年,Zheng 等人^[5]设计了一种用于高数据速率通信的紧凑型 E 波段 (71~76 GHz) 片状波束 (SB) 折叠波导 (FWG) 行波管 (TWT) 在 1 W 信号的驱动下,30 周期电路估计可产生超过 100 W 的功率,并在 71~76 GHz 范围内实现 21 dB 的增益。

带状电子注器件通过显著抑制空间电荷效应,突破传统的高功率微波器件性能瓶颈^[6-7]。相较于圆电子注,电流在更大截面积内可以实现更密集的电荷分布,显著提升了功率能量,实现更高的输出功率;在同等电流下,带状注截面内发射电流密度降低,从而提高阴极的使用寿命。本文主要开展

E 波段直边连接平面螺旋线行波管研究^[8-9],从慢波结构的高频特性、传输特性和注-波相互作用特性等方面研究其性能。

1 慢波结构的高频特性

图 1 展示了直边连接平面螺旋线 (planar helix with straight-edge connections, PHSEC) 慢波结构 (SWS) 的三维真空模型,包含金属屏蔽腔和起到散热作用的氮化硼 (BN) 介质衬底。沿电子注传播方向上,慢波结构由一排周期性的直边连接平面螺旋线组成。其横截面呈现矩形形状,用 a 和 b 表示内矩形的高度和长度; c 和 d 表示金属屏蔽腔的高度和长度; t 和 w 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。

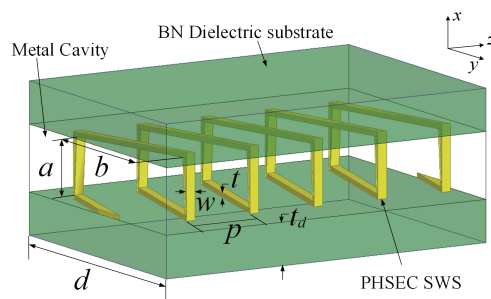


图 1 直边连接平面螺旋线慢波结构三维示意图

目前对慢波结构的高频特性研究的主流研究方法为仿真分析法。本文利用三维电磁仿真软件 HFSS 构建尺寸参数化的直边连接平面螺旋线的单周期模型,同时设定主从边界条件作为电磁波的传播方向,采用本征模求解器对慢波结构进行高频特性计算,完成相速度曲线和耦合阻抗的绘制。考虑到行波管需要满足功率、带宽和增益的需求,通过不断优化

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)

慢波结构的尺寸，能够使其在冷工作频带下保持较为平坦的色散性，同时带来相互作用阻抗的提升。

基于表 1 的慢波结构优化尺寸参数，可得到图 2 所示的高频特性结果。可知，直边连接平面螺旋线具有较为平坦的色散特性，意味着该结构具有较宽的工作带宽，同时在 E 波段（60~90 GHz）内展现出较大的相互作用阻抗性。

表 1 慢波结构尺寸参数

单位: mm							
参考	a	b	d	w	t	t_d	p
尺寸	0.12	0.3	0.54	0.02	0.01	0.09	0.15

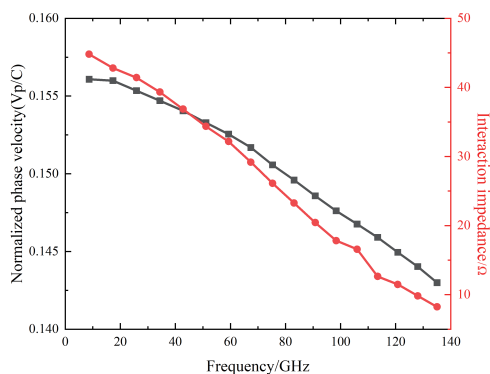


图 2 高频特性

2 传输特性仿真

利用 CST Microwave Studio 中的时域求解器研究了直边连接平面螺旋线行波管的反射和传输损耗。如图 3 所示，为确保电磁性能，慢波结构被置于真空金属屏蔽腔内，并通过上下介质衬底实现有效支撑。同轴线凭借其优异的宽带传输特性，可有效适配行波管在宽频域范围内的信号传输要求，因此，经过改良的二次渐变同轴线^[10]作为行波管的输入/输出耦合结构，以实现宽带匹配并减少反射损耗。慢波结构的周期数为 50，考虑到电路的分布损耗和表面粗糙度，金属部分选用有效电导率为 2.9×10^7 S/m 的无氧铜^[5]。衬底材料选用氮化硼（BN），其介电常数和损耗角正切分别为 4 和 3×10^{-4} 。图 4 结果表明，在 55~100 GHz 频率范围内，反射参数 S_{11} 均小于 -20 dB，传输参数 S_{21} 大于 -5 dB。

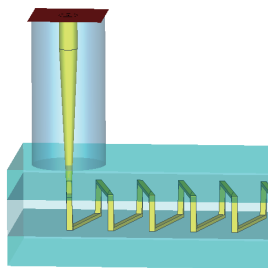


图 3 渐变同轴线示意图

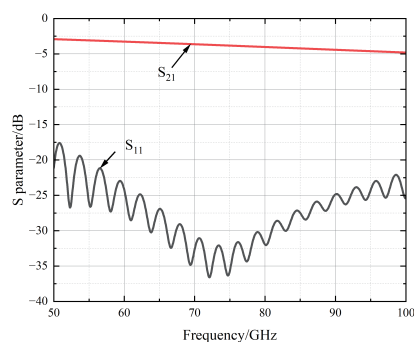


图 4 50 个周期的优化 S 参数

3 注-波相互作用研究

在分析完直边连接平面螺旋线行波管的传输特性后，使用 CST 软件中的粒子工作室（PIC）求解器研究行波管的注-波相互作用特性。仿真模型如图 5 所示，主体包含：120 个周期数的 PHSE C SWS，它负责减慢电磁波相速度与电子注相互作用，输入/输出端口能够有效引入/输出高频信号，两个形状一致的带状电子注充当电子发射体。

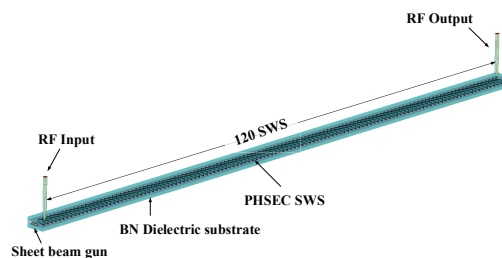


图 5 PIC 仿真模型示意图

行波管的详细电气参数如表 2 所示，带状电子注截面尺寸为 $0.054 \text{ mm} \times 0.216 \text{ mm}$ ，填充系数为 48%，电子注电压设置为 6 100 V，电流为 0.05 A，束电流密度为 429 A/cm^2 。在轴向施加 1.5 T 的均匀聚焦磁场，以实现稳定的电子束传输。

表 2 行波管的电气参数

Parameter	Value
Beam cross-section	$0.054 \text{ mm} \times 0.216 \text{ mm}$
Beam voltage	6 100 V
Beam current	0.05 A
Input power	0.05 W
Filling factor	0.48
Focus magnetic field	1.5 T
TWT length	120 periods

在 0.05 W 的正弦激励功率下，行波管在 75 GHz 实现充分相互作用，此时相互作用电路为 18 mm。由图 6 可以观察到，电子枪发射携带 6 100 eV 初始能量的电子束，在注-波互作的初始阶段，受到纵向电场的调制作用相对较弱，电子束能量部分较为集中。随着相互作用距离的增加，电子能量逐渐发生分化，大部分电子进入减速场，其能量显著低于初始值；

同时,少量电子被加速,能量高于初始水平,电子损失的总动能转化为电磁场能量,从而实现信号放大。在行波管末端,高能电子和低能电子在空间位置上呈现叠加状态,输出信号达到饱和。

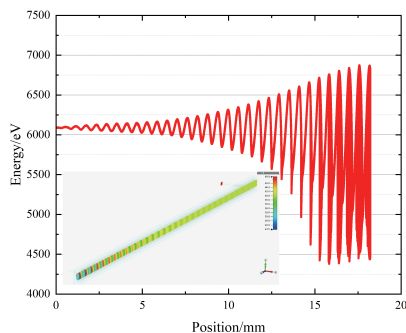


图6 电子的相空间分布和群聚图(插图)

图7展示了5 ns内输出端信号幅值变化情况,可以观察到,行波管所产生的8.07 V的输出信号在2 ns之后发生幅值衰减现象,对该信号做傅里叶变换,得到图8所示的输出信号频谱图,可知,输出信号主要集中在75 GHz处,在150 GHz附近存在幅值较小的谐波分量。

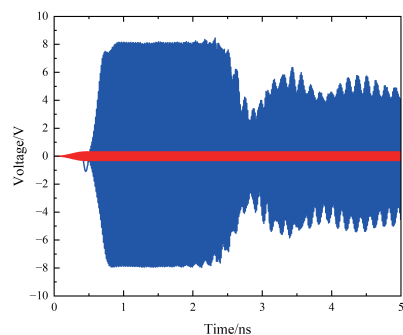


图7 75 GHz处输入、输出信号电压幅值

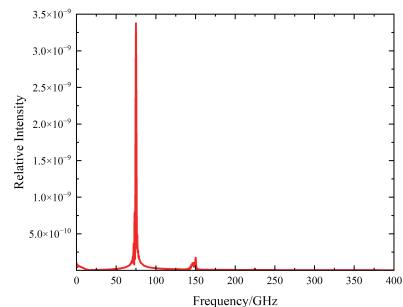


图8 输出信号频谱图

为评估行波管在E波段的信号放大能力,保持相同的电气参数,对每5 GHz频率点进行注-波互作用计算,得到图9、图10的输出功率、增益和电子效率随频率的变化情况。直边连接平面螺旋线行波管在60~90 GHz的频率范围内产生超过23.1 W的输出功率,微分增益大于1.54 dB/mm,最大峰值输出功率为32.85 W,出现在75 GHz这一频点处,最大的微分增益为1.57 dB/mm,最大电子效率为10.77%。

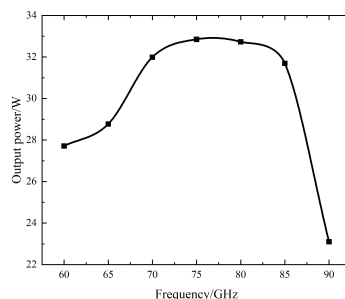


图9 输出功率

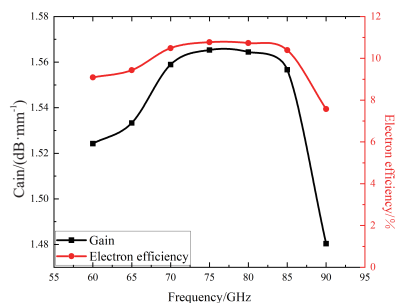


图10 增益和电子效率

直边连接平面螺旋线行波管在2.4 ns后出现了明显的输出信号幅值衰减现象,此时行波管发生了严重的自激振荡,主要包括:返波振荡、反射振荡以及带边振荡^[11-14]。反射振荡:由于慢波线本质属于一种双向信号传输线,当行波管中的慢波结构存在不均匀性或其他因素影响,高频电磁信号的传输特性可能发生改变,会在内部的两处或多处位置产生来回反射现象,如果该信号的来回传输能够稳定持续,最终引起反射振荡;返波振荡:电子与前向波同步相互作用,完成信号放大过程;也可以与返波实现达成同步条件,两者发生能量交换,导致返波被放大,干扰前向波的正常放大过程,从而导致行波管输出信号出现不稳定现象;带边振荡:主要出现在耦合腔行波管,通带边缘匹配性较差激发振荡。

为研究行波管的自激振荡特性类型,保持相同的电气参数,将行波管的输入功率均设置为零,注-波互作用后得到输入端口处的反射信号幅值情况,同时对该信号进行傅里叶变换,在频谱特性图中准确找出产生反射的频率点。由图11可知,在3 ns左右反射信号电压幅值约达到4.5 V,由图12可知,行波管在143 GHz附近出现一个明显的反射信号。

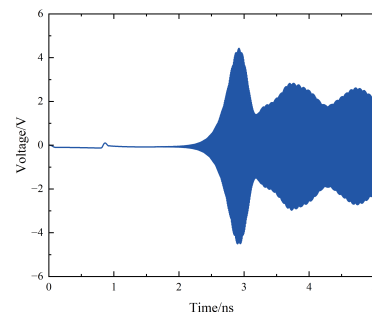


图11 零功率驱动下输入端反射信号幅值图

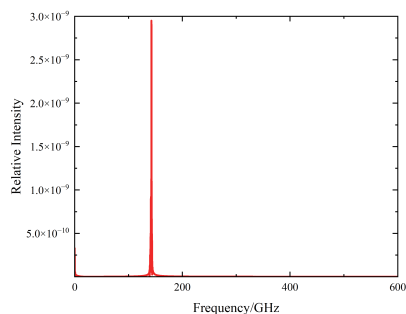


图 12 零功率驱动下输入端反射信号频谱图

图 13 为直边连接平面螺旋线的高次模布里渊图, 基模的零次空间谐波表现为前向波。经计算, 6 100 V 的电压线与 mode(1) 的前向波交点的平均互作用阻抗为 23Ω , 与 mode(2) 的返波区交点约为 143 GHz, 该点的平均返波阻抗约为 5.5Ω 。因此可推测返波振荡是引起行波管输出信号不稳定的主要因素。

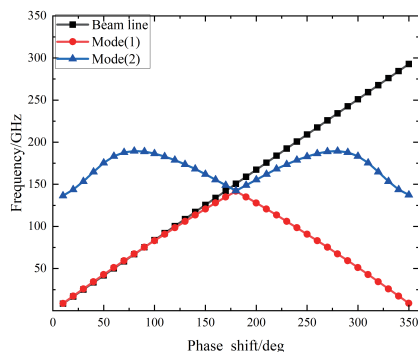


图 13 高次模布里渊图

4 结语

本文开展了 E 波段直边连接平面螺旋线行波管研究。利用电磁仿真软件对直边连接平面螺旋线慢波结构的高频特性进行模拟计算, 其具备较宽的工作带宽和较大的互作用阻抗。传输特性仿真结果显示, 行波管在 55~100 GHz 范围内始终保持传输系数低于 -20 dB, 反射系数大于 -5 dB 以上, 具备良好的信号传输性能。PIC 仿真结果表明, 在 6 Ω 、100 V 和 0.05 A 的带状注电压和电流下, 行波管在 60~90 GHz 的频率范围内可提供超过 23.1 W 的输出功率, 在 75 GHz 实现 32.85 W 的峰值输出功率, 对应的微分增益为 1.5 dB/mm, 电子效率为 10.77%, 其 3-dB 带宽已满足整个 E 波段的设计需求。因此该行波管在高频率、中等功率和宽带器件领域具有潜力。

参考文献:

- [1] CAI J, FENG J J, HU Y F, et al. 10 GHz bandwidth 100 watt W-band folded waveguide pulsed TWTs [J]. IEEE microwave and wireless components letters, 2014, 24 (9): 620-621.
- [2] EICHMEIER J A, THUMM M K. Vacuum electronics: components and devices[J/OL]. Vacuum electronics, 2008[2025-09-13].

<https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-540-71929-8>.

- [3] HWU R-J, KRESS D K, JUDD S V, et al. 81~86 GHz E-band 90 watts high power traveling wave tubes[C/OL]// 2016 IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC). Piscataway: IEEE, 2016[2025-09-14]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7561862>. DOI:10.1109/IVEC.2016.7561862.
- [4] 谢青梅, 刘世硕, 陈焰飞, 等. E 波段 81~86 GHz 行波管放大器研制 [J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2022, 20 (5): 419-423.
- [5] ZHENG Y, QIU S S, GRIFFIN B, et al. Compact E-band sheet beam folded waveguide traveling wave tube for high data rate communication[J]. IEEE transactions on electron devices, 2023, 70(5): 2508-2513.
- [6] 宫玉彬, 魏彦玉, 段兆云, 等. 毫米波 / 太赫兹真空器件中的带状电子注和新型慢波结构 [J]. 真空电子技术, 2013(1): 10-19.
- [7] CARLSTEN B E, RUSSELL S J, EARLEY L M, et al. Technology development for a mm-wave sheet-beam traveling-wave tube [J]. IEEE transactions on plasma science, 2005, 33 (1): 85-93.
- [8] 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.
- [9] ZHAO C, ADITYA S, CHUA C. Connected pair of planar helices with straight-edge connections for application in TWTs[J]. IEEE transactions on electron devices, 2014, 61(6): 1692-1698.
- [10] 钟辉, 魏望和, 于灿, 等. V 波段宽杆半矩形环螺旋线行波管的研究 [J]. 真空电子技术, 2021(6): 47-51.
- [11] 舒国响. 毫米波带状注行波管及扩展互作用振荡管高频系统研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2017.
- [12] 雷声媛. 行波管中返波振荡的非线性理论研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2007.
- [13] 张晓冉, 成红霞, 刘逸群, 等. S 波段空间行波管返波振荡抑制研究 [J]. 电子器件, 2020, 43(5): 959-962.
- [14] 刘兴帮. 带吸收小腔耦合腔行波管理论与技术研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2015.

【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: 2025-04-15 修回日期: 2025-11-02)