

E 波段方形环对角双杆行波管研究

王 亮¹ 魏望和¹ 林昆义¹ 傅伟鹏¹ 吴欣颖¹ 周鑫慧¹
WANG Liang WEI Wanghe LIN Kunyi FU Weipeng WU Xinhao ZHOU Xinhui

摘 要

针对 E 波段行波管在毫米波通信与雷达应用中的高功率、宽带宽需求,文章对方形环对角双杆慢波结构进行研究。通过电磁仿真(HFSS)与粒子仿真(CST)相结合的方法,系统分析了该结构的色散特性、耦合阻抗及注-波互作用性能。研究表明:优化后的方形环对角双杆结构在 78 GHz 处实现 722.3 W 最大输出功率,41.6 dB 增益及 11.55% 电子效率,3-dB 带宽扩展至 21 GHz (63~84 GHz),微分增益为 1.04 dB/mm。其周期性加载效应与对角双杆的电容耦合设计有效提升了耦合阻抗并抑制色散畸变,同时平面化布局适配微加工工艺,为 E 波段行波管的高功率宽带性能优化提供了理论依据与技术路径。

关键词

慢波结构; 方形环对角双杆; 行波管; 注-波互作用

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.11.023

0 引言

行波管放大器作为毫米波通信、雷达探测、电子对抗等领域的核心器件,提升其性能始终是真空电子学领域的一个研究热点^[1-3]。在毫米波频段,电磁波具有高分辨率、大带宽和强抗干扰能力等显著优势,但同时也面临着信号衰减严重、功率传输效率低等技术难题^[4]。E 波段在高速无线通信和大气遥感中具有独特的应用价值,近年来备受关注^[5-6]。作为行波管的核心部件,慢波结构的性能直接决定了行波管器件的工作带宽、输出功率和效率等,若想实现毫米波行波管技术突破,则需对慢波结构的设计进行优化和创新。

传统行波管中广泛采用的慢波结构主要包括耦合腔和螺旋线两种类型^[7-9]。耦合腔结构采用全金属设计,具有较高的功率容量和机械稳定性,但其周期性谐振特性导致工作带宽较窄,难以满足宽带通信系统的需求。螺旋线慢波结构凭借其准行波传输特性,能够实现较宽的瞬时带宽,在卫星通信等领域得到广泛应用。然而,随着工作频率向 E 波段及以上延伸,螺旋线结构的尺寸急剧缩小,导致电子注通道截面积减小,这会造成电流密度上升。高电流密度引发的空间电荷效应不仅会降低电子注的群聚效率,还会导致注-波互作用稳定性下降,严重制约行波管的功率提升。研究表明,当电子注电流密度超过某一特定值的时候,空间电荷效应将使电子注产生显著的发散畸变,导致器件效率下降严重^[10-11]。因此,

需优化和开发新型慢波结构从而实现高电流电子注与电磁波的注-波互作用,实现行波管的性能提升。

江西理工大学的魏望和团队^[12-13]基于螺旋线慢波结构进行改进,在毫米波行波管领域取得突破性进展。其研发的矩形环对角双杆慢波结构通过创新性设计实现了高功率、宽带宽与高效率的共同优化,使行波管的功率与电子效率进一步提高。同时,该结构还能有效减少热损耗,提高系统的运行稳定性。相较于传统螺旋线结构,矩形环单元形成的周期性加载效应可有效扩展互作用区域,在提高耦合阻抗的同时降低电磁波的相速,有利于增强电子注与慢波的同步匹配。对角双杆不仅为结构提供了机械支撑,其平面化布局适配微加工工艺,特殊的几何构型还带来了额外的电容耦合效应,有助于改善结构的色散特性,拓宽工作带宽。

圆形电子注在行波管器件中展现出独特的优势:其轴对称特性与螺旋线或方形环杆慢波结构的几何适配性显著提升了电子注传输稳定性,尤其在毫米波频段可实现更均匀的场分布。相较于带状电子注,圆形注的空间电荷效应虽较强,但其聚焦磁场设计成熟度高,能有效维持电子注长距离传输的完整性。同时,参考工信部最新定义的 E 波段卫星通信频段(上行 71~76 GHz,下行 81~86 GHz),为了更深入地研究对角双杆慢波结构,本文主要研究构建适配圆形电子注的方形环对角双杆慢波结构在 E 波段 70~75 GHz 频段的性能表现。

在研究方法上,采用电磁仿真方法对方形环对角双杆慢波结构进行系统分析。利用 HFSS 软件建立精确的三维电磁模型,通过有限元法求解麦克斯韦方程组,重点研究结构参

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)

数对色散特性和耦合阻抗的影响规律。借助 CST 粒子工作室开展注-波互作用仿真,建立包含电子枪、慢波电路和输入输出耦合器的器件模型,系统分析行波管输出功率、电子效率以及增益在 E 波段的表现。通过电磁仿真与粒子仿真的有机结合,深入揭示新型慢波结构的工作机理,为实验制备提供理论指导。研究表明,方形环对角 U 型杆结构在保持毫米波器件宽带宽优势的同时,可以实现高功率输出。这为开发高性能 E 波段行波管放大器提供了新的技术路径。

1 慢波结构高频特性仿真分析

在行波管设计过程中,慢波结构的性能可通过色散特性和耦合阻抗进行评估。若要提高行波管的性能,需考虑色散平坦度的同时也得试图提高耦合阻抗,从而达到更高效的能量转换。

图 1 为方形环对角双杆慢波结构的截面和自由单周期方形环对角双杆慢波金属线三维图。其中, a 为方形环的内边长; t 为金属慢波线的厚度和宽度; p 为周期长度; h 为介质基底厚度; c 、 d 分别为金属屏蔽腔的宽度和高度。

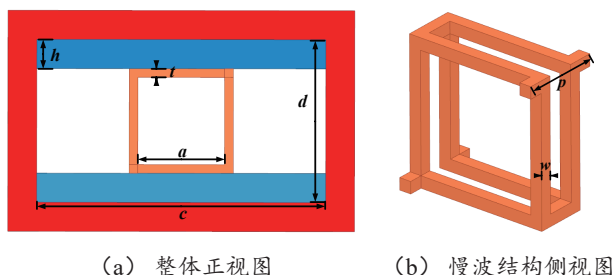


图 1 方形环对角双杆慢波结构示意图

在 HFSS 软件中建立方形环对角双杆慢波结构的单周期模型,根据具体设计要求进行参数化建模,调整结构以及衬底材料的参数,以便对慢波结构进行高频特性仿真计算。模型中慢波结构的金属慢波线部分采用理想导体 (PEC) 材料,基底材料采用氮化硼,氮化硼的介电常数为 4,损耗角正切为 0.000 25,同时将金属屏蔽腔内部环境设置为真空。为准确描述慢波结构的周期性特征,沿纵向 (Z 轴) 周期传播方向设置相位周期边界条件,具体实施采用 HFSS 本征模求解器中的主从面 (master and slave) 边界配置,如图 2 所示。

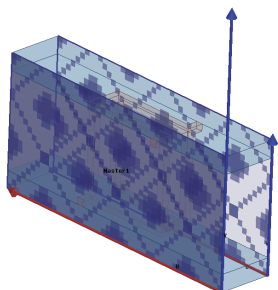


图 2 方形环对角双杆慢波结构主从边界面

在 HFSS 在本征模求解器下,设置相移参数 k 值,将相移步长设置为 10° ,在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 范围内进行采样,通过采样过程获得频率与相移之间的关系,计算出布里渊图,如图 3 所示。其中 Beam Line 是慢波结构的工作电压线,通过调整工作电压线,确定当工作电压为 17 000 V 时,电子注和电磁波在较宽的频率范围内能够保持良好同步,同时 Beam Line 与模式 2 相交于前向波,说明其具有优异的抑制振荡能力。

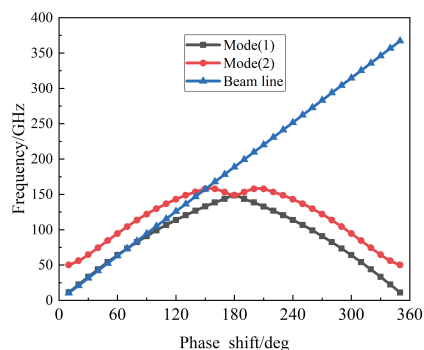


图 3 方形环对角双杆慢波结构布里渊图

仿真计算后,可在结果输出界面生成一条反映相速度与频率关系的色散特性曲线。利用色散曲线的平坦性可以大致确定其 3-dB 带宽的大小,也能确定工作电压和带宽范围。同时也能生成一条相互作用阻抗与频率关系的曲线图,耦合阻抗的值决定了电子束与慢波结构之间的能量转换效率,纵向电场强度对耦合阻抗值的大小有较大的影响。通过对参数的不断优化和仿真计算,并对色散曲线图以及耦合阻抗图进行比较和分析,得到一组最佳尺寸参数如表 1 所示,并得到其高频特性结果如图 4 所示。

表 1 建模参数

结构尺寸	参数值/mm
a	0.3
d	0.56
t	0.03
h	0.1
c	1
w	0.03
p	0.2

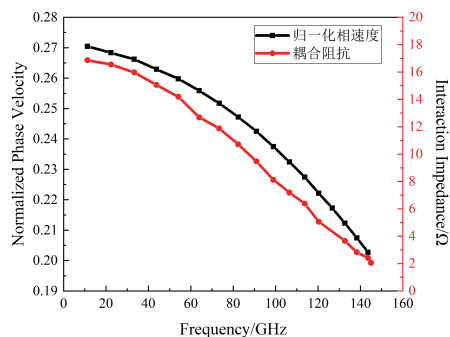


图 4 方形环对角双杆慢波结构高频特性

由图 4 可知方形环对角双杆慢波结构能够保持较好的色散平坦性同时,具有较高的耦合阻抗,说明其模型具有较宽的 3-dB 带宽以及高输出功率潜力。

2 传输性能仿真分析

在 CST 软件中创建 E 波段方形环对角双杆行波管传输仿真模型。模型包含输入和输出端口、40 个周期的方形环对角双杆慢波结构和同轴线。由于同轴线和方形环对角双杆慢波结构之间直接匹配进行仿真得到 S 参数结果并不理想,信号反射增加,同时会影响传输性能。故利用了一种平面耦合器来改善匹配和减少反射,方形环对角双杆行波管的 S 参数仿真模型如图 5 所示。在材料选择方面,方形环对角双杆慢波结构的金属部分选择无氧铜材料,导电率设置为 $2.9 \times 10^7 \text{ S/m}$ 。衬底材料选用氮化硼,其介电常数为 4,损耗正切为 0.000 25。



图 5 方形环对角双杆传输模型示意图

输入和输出耦合器的匹配影响着信号传输的效率和质量。耦合器不匹配会导致信号反射、损耗和失真,严重影响行波管的增益、功率和带宽等。为了保证耦合器设计对传输不会造成过大的影响,需要利用 CST 软件对行波管的输入输出耦合器进行额外设置,通过观察结果中的 S 参数,判断其耦合器性能的好坏。通过对输入输出耦合器进行优化,方形环对角双杆行波管的 S 参数曲线如图 6 所示。在 E 波段 70~75 GHz 频率范围内,反射参数 S_{11} 始终保持在 -15 dB 以下,说明方形环对角双杆行波管结构利用此输入输出耦合器在 E 波段的反射损耗比较低,可有效减少信号反射。同时,传输参数 S_{21} 始终大于 -2.5 dB,说明该输入输出耦合器具有较强的信号传输能力,能够符合传输结构的设计要求。

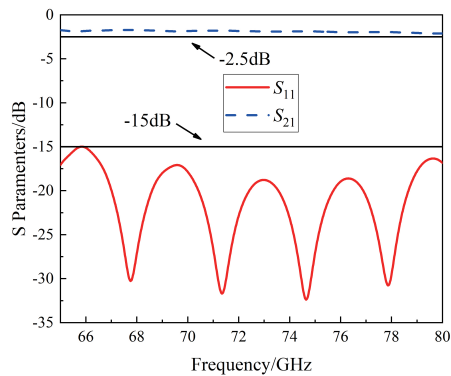


图 6 传输特性

3 注 - 波相互作用仿真分析

CST 的粒子 - 单元 (particle-in-cell, PIC) 模拟方法结合

麦克斯韦方程组和运动方程进行求解。在 CST 软件中建立 E 波段方形环对角双杆的注波相互作用仿真模型,如图 7 所示。



图 7 PIC 仿真模型示意图

同时对慢波结构的尺寸参数、输入输出耦合结构参数和材料等进行设置。根据方形环对角双杆慢波结构的色散曲线,中心频率在 73 GHz 时,归一化相位速度为 0.251 9。计算得到电子注的同步电压为 17 000 V。在之后的优化过程中发现,最佳的电子注电压为 18 400 V,高于同步电压,这属于正常现象。同时圆形电子注的直径为 0.11 mm,填充比达到 42%,电流设置为 0.34 A,如图 8 所示。

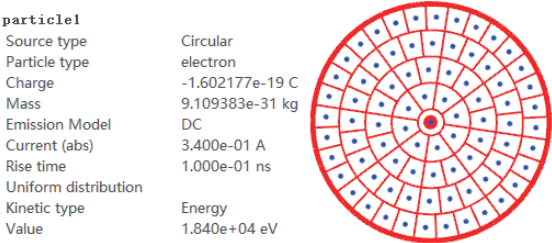


图 8 圆形电子注设置

为防止电子注射的粒子束与慢波结构发生碰撞,聚焦磁场设置为 1 T,E 波段方形环对角双杆行波管采用均匀轴向磁场。同时,激励信号设定为正弦波形信号,如图 9 所示。

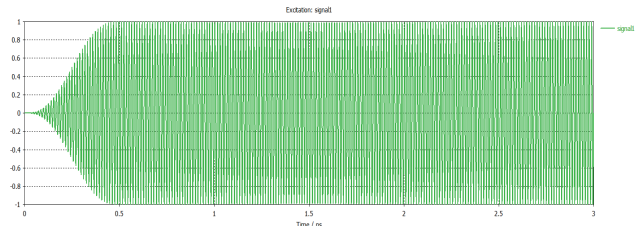


图 9 激励信号设置

进行注 - 波相互作用时,对慢波周期数和工作电压进行优化,也需确定好输入功率等其他电气参数。通过在选取各自最佳的电气参数后再经过多轮反复的仿真进行扫描,最终确定了最佳的电气参数组合。E 波段圆形电子注方形环对角双杆行波管优化后的电气参数如表 2 所示。

表 2 行波管电气参数

参数	参数值
电压 /V	18 400
电流 /A	0.34
输入功率 /W	0.05
磁场 /T	1
电子注填充比 /%	42%
周期数	200

经过一系列参数优化后,对 E 波段圆形电子注方形环对角双杆行波管在中心频点 73 GHz 处进行仿真,设定其在表 2 最佳电气参数下连续工作 5 ns,通过计算,在端口获得输出信号波形。如图 10 所示,从仿真结果的分析中可以看出,输入信号在约 0.63 ns 后开始逐步放大,在 1.1 ns 时,信号的幅值达到了最大值 37,说明行波管能在较短的时间内有效放大信号。在约 5 ns 的注 - 波相互作用过程中,输出波形稳定,并没有出现振荡现象。可实现 679 W 的输出功率,而输入功率仅为 50 mW,增益达到 41.33 dB,电子效率为 10.85%。

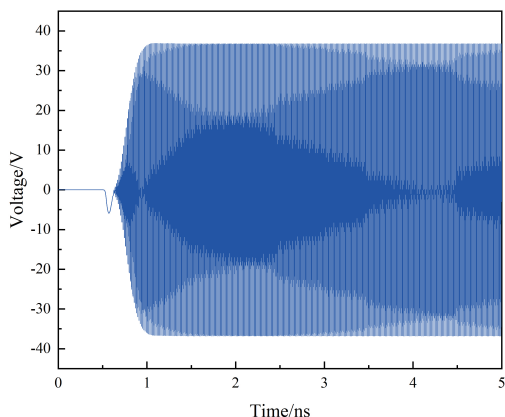


图 10 方形环对角双杆 5 ns 注 - 波相互作用

通过对输出信号进行傅里叶变换分析,输出信号的频谱如图 11 显示,此时 E 波段圆形电子注方形环对角双杆行波管工作频率为 73 GHz,结果表明,该器件在 73 GHz 工作频率下表现出优异的频谱纯度且频谱非常纯净。说明有较好的谐波抑制能力,能够有效地减少谐波污染,提供清晰、干净的信号,从而减少不必要的干扰。

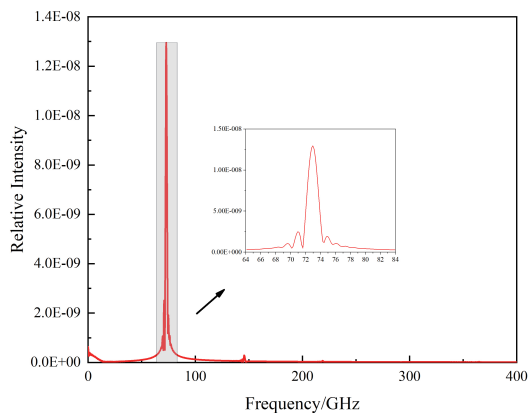


图 11 输出信号的频谱特性

图 12 展示了行波管在注波相互作用过程中的相位空间分布,初始阶段,电子注携带的能量为 18 400 eV。在与慢波结构中的电磁场相互作用过程中,其能量分布逐渐发生变化,图中能量值在 13 000 ~21 100 eV 之间波动,随着位置的变化表现出明显的周期性波动趋势,尤其在右侧部分波动

更加明显。

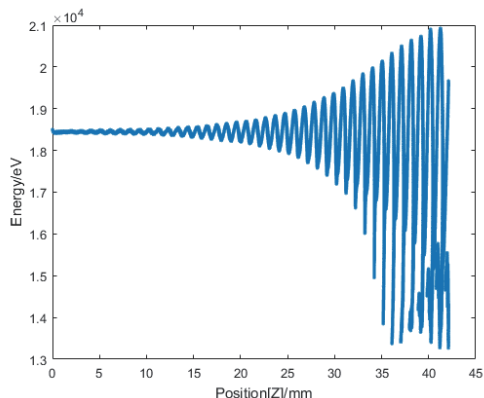


图 12 相位空间分布图

观测图 13 电子群聚图可以看出,行波管末端区域的电子能量分布发生了明显变化。与初始带状电子注的发射能量相比,多数电子的能量水平出现显著下降。这一能量变化证实了电子与电磁场之间存在明显的能量转移过程,其中大部分电子将自身能量传递给电磁信号。特别值得注意的是,图中蓝色标记的电子群聚区域显示出不同能量状态的电子在空间分布上产生重叠,这一特征表明电子注与电磁波的相互作用已达到接近饱和的状态。

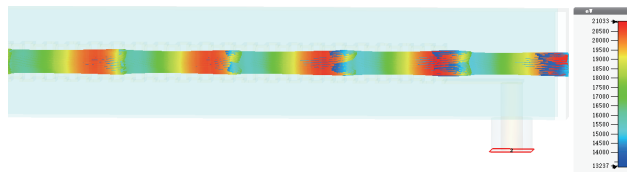


图 13 电子群聚图

E 波段(70~75 GHz)方形环对角双杆行波管中心频点 73 GHz 处的注 - 波相互作用进行仿真分析后,为进一步研究其在 E 频段的性能表现,使用相同的电气参数,对 3-dB 带宽内不同频点进行注 - 波相互作用仿真,图 14 以及图 15 展示了方形环对角双杆行波管在 60~90 GHz 频率范围内的性能特性。

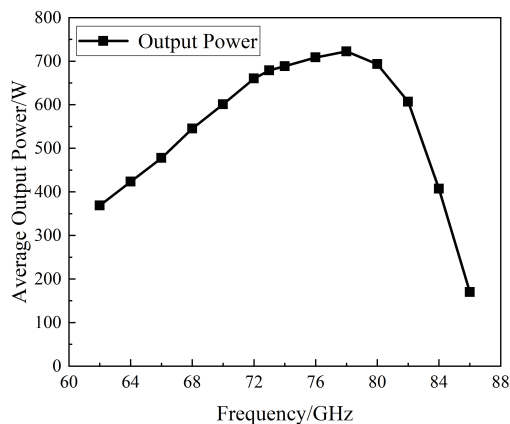


图 14 输出功率

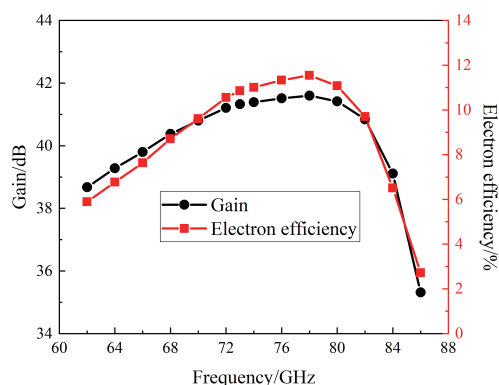


图 15 增益与电子效率

图 14 显示了方形环对角双杆行波管输出功率与频率的关系,输出功率在 64~78 GHz 之间逐渐增加,并在 78 GHz 处达到最大输出功率 722.3 W,随后功率逐渐下降。图 15 展示了增益和电子效率与频率的关系,3-dB 带宽为 21 GHz (63~84 GHz)。左侧纵坐标显示方形环对角双杆行波管的最大增益为 41.6 dB,在 3-dB 带宽内增益值均高于 38.67 dB/mm;由于管长长度为 40 mm (200×0.2 mm),故此时最大微分增益为 1.04 dB/mm,右侧纵坐标表明器件的电子效率,最大电子效率为 11.55%。

4 结语

本文针对 E 波段方形环对角双杆慢波结构进行研究,通过电磁与粒子仿真揭示了其高频特性与注-波作用机理。研究结果表明:该结构通过方形环周期性加载与对角双杆的电容耦合效应,显著改善了色散平坦度(3-dB 带宽达 21 GHz)和耦合阻抗,同时适配圆形电子注的高填充比(42%)设计,有效缓解了毫米波频段的空间电荷效应问题。在 18 400 V 工作电压下,器件输出功率突破 722.3 W,电子效率达 11.55%,验证了其在 E 波段高功率宽带通信系统中的潜力。

此外,平面化双杆设计为微加工工艺兼容性奠定了基础,为后续实验制备与工程化应用提供了理论支撑。未来研究将聚焦于热稳定性优化与多级电路集成,以进一步提升器件可靠性及综合性能。

参考文献:

[1]SOCUÉLLAMOS J M, LETIZIA R, DIONISIO R,et al. Analysis of the bottom metal/dielectric supporting plane in meander line slow wave structures for millimeter wave traveling wave tubes[C/OL]// 2021 14th UK-Europe-China Workshop on Millimetre-Waves and Terahertz Technologies (UCMMT).Piscataway:IEEE,2021[2025-05-25].<https://ieeexplore.ieee.org/document/9569892>.DOI: 10.1109/

UCMMT53364.2021.9569892.

- [2] 吕升阳. 用于行波管放大器的毫米波线性化驱动模块研究[D]. 成都:电子科技大学,2021.
- [3] 叶齐铨. 面向 5G 通信的毫米波天线关键技术研究[D]. 成都:电子科技大学,2022.
- [4] 许多. 高增益毫米波太赫兹行波管的研究[D]. 成都:电子科技大学,2023.
- [5]LIU S S, XIE Q M, CHEN Z F, et al.71-76GHz traveling wave tube amplifier for high-data-rate wireless communication[C]//2022 International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC). Piscataway:IEEE,2022:1189-1193.
- [6]LI F, XIAO L, HE J,et al.Development of E-Band continuous wave folded waveguide TWT[C/OL]// 2021 22nd International Vacuum Electronics Conference (IVEC).Piscataway:IEEE,2021[2025-06-26].<https://ieeexplore.ieee.org/document/9722528>.DOI: 10.1109/IVEC51707.2021.9722528.
- [7] 刘亚楠. Ka 波段纳米冷阴极耦合腔行波管仿真研究[D]. 成都:电子科技大学,2021.
- [8] 钟辉. 毫米波带状注变型半矩形环螺旋线行波管的研究[D]. 赣州:江西理工大学,2021.
- [9] 白春江. 耦合腔行波管注波互作用非线性理论与 CAD 技术研究[D]. 成都:电子科技大学,2013.
- [10] 李奕欣. 宽带螺旋线行波管输能系统及收集极研究[D]. 成都:电子科技大学,2020.
- [11] 范晓梅. 热电子注状态下螺旋线行波管的电磁特性[D]. 成都:电子科技大学,2017.
- [12] 于灿. 新型矩形环对角双杆慢波结构行波管研究[D]. 赣州:江西理工大学,2021.
- [13]WEI W H, YU C, WEI Y Y,et al.Novel rectangular-ring vertex double-bar slow wave structure for high-power high-efficiency traveling-wave tubes[J].IEEE transactions on electron devices, 2021,68(12):6512-6517.

【作者简介】

王亮(1999—),男,江西萍乡人,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)