

Ka 波段翼片加载矩形环对角杆行波管研究

林馄义¹ 魏望和¹ 吴欣颖¹ 傅伟鹏¹ 王亮¹ 周鑫慧¹

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

摘要

为进一步提升矩形环对角杆行波管的工作带宽,文章采用翼片加载的方式对其慢波结构进行优化。经优化后矩形环对角杆慢波结构色散曲线平坦度提升了 22.42%。传输特性结果显示,在 Ka 波段范围内翼片加载矩形环对角杆行波管 S11 均低于 -15 dB,同时 S21 均高于 -5 dB,表明信号在行波管中传输稳定且反射较小。在 11 000 V 电压和 0.244 A 电流的电气参数条件下,T 形翼片加载矩形环对角杆行波管的 3 dB 带宽可达 12 GHz (28.5 GHz~40.5 GHz),峰值输出功率为 452.1 W,电子效率为 16.84%,增益达 36.55 dB。

关键词

慢波结构;翼片加载矩形环对角杆;行波管;注-波互作用

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.09.021

0 引言

行波管的研发历程可追溯至上世纪 40 年代。1947 年,美国学者 J.R. Pierce 系统阐述了行波管理论框架,其小信号理论^[1]首次完整揭示了电子注与电磁波的能量交换机制,为现代行波管理论体系构建了重要基石。进入 21 世纪,随着 5G 通信、太空探索和军事应用的快速发展,行波管研究转向更高频率、更小尺寸和更稳定性能,以满足现代技术需求。行波管的发明是微波真空电子器件的重大突破,因其宽带宽、高增益和高效率,在通信、国防等领域广泛应用^[2-5]。

行波管可以根据多种标准进行分类,主要包括工作频段、功率等级、应用领域、冷却方式、电子注类型和慢波结构等^[6-9]。作为行波管中实现电子注与电磁波同步互作用的核心功能单元,慢波结构的高频特性直接决定了行波管的工作带宽、增益和电子效率,其设计优化是提升行波管综合性能的技术关。螺旋线和耦合腔是常用的两种慢波结构^[10-13]。作为一种全金属结构,耦合腔慢波结构具有良好的散热性能和高功率容量,同时能够实现高增益和高效的能量转换。相比之下,螺旋线慢波结构则因其色散曲线较为平坦,展现出超宽的工作频段特性,适合宽频带应用场景。

近年来,Ka 波段行波管技术取得了显著进展^[14-15]。矩形环对角杆慢波结构于 2023 年首次提出^[16],该结构具有易加工、大功率和高效率等特点。2021 年,法国 Thales 公司推出了两款 Ka 波段行波管,分别采用 THL20250C (传导冷却)

和 THL20250R 辐射冷却方式,二者均具备宽带工作能力和高输出功率^[17]。2023 年,Colin^[18]团队设计了一种低压多注紧凑型行波管,其四注版本在低电压下表现出高功率输出和优异的信号质量,而 16 注版本预计可实现更高功率输出。这些进展推动了 Ka 波段行波管在高效能、小型化方向的发展。

1 慢波结构高频特性仿真分析

慢波结构的高频特性是评估其性能的关键,主要包括色散特性和耦合阻抗两个指标^[19-20]。色散曲线越平坦,表明电磁波在不同频率下的相速度变化越小,行波管在宽频带内的相位一致性越好,从而支持更宽的工作带宽;耦合阻抗则反映了电子束与电磁波之间的能量交换效率,耦合阻抗越高,行波管的电子效率越高。如图 1 所示,将翼片宽度设置为 $w_v=0.06$ mm,翼片高度 $h_v=0.171$ mm,翼片与夹持杆的间距 $w_g=0.222$ 75 mm。

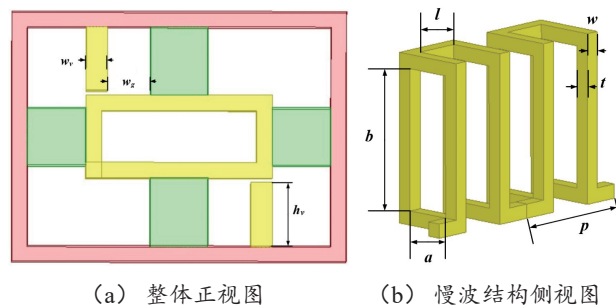


图 1 翼片加载矩形环对角杆慢波结构示意图

为研究翼片不同摆放方式对矩形环对角杆慢波结构高频特性的影响,在保证翼片宽度 w_v 一致的情况下,通过改变翼片的摆放方式,系统分析了其对慢波结构高频特性的影响。

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“短毫米波新型矩形环对角双杆类慢波结构高效率行波管研究”(62361031)

从图 2 (a) 可以看出, 翼片置于中心处摆放与翼片置于直杆异侧对角处摆放, 二者的色散曲线平坦度近乎一致, 且优于其余摆放方式。由图 2 (b) 可知, 当翼片置于中心位置时, 耦合阻抗值最低, 其余摆放方式耦合阻抗值近乎一致。因此, 综合上述分析可知, 当翼片置于直杆异侧对角摆放时, 矩形环对角杆慢波结构能够在不过多损失耦合阻抗的条件下, 最大程度地提升色散曲线的平坦度。

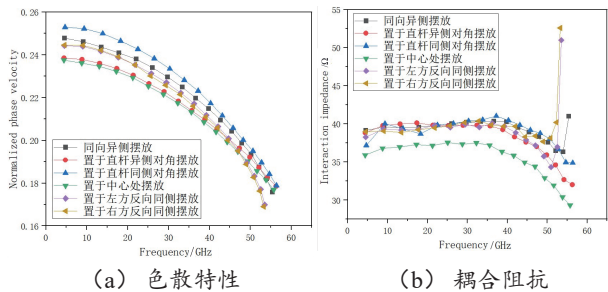


图 2 翼片摆放方式对高频特性的影响

在翼片置于直杆一侧对角摆放且翼片完全置于慢波结构上方的条件下, 进一步探究翼片高度、宽度以对慢波结构高频特性的影响。首先, 研究翼片高度 h_v 对色散特性曲线以及耦合阻抗的影响。由图 3 (a) 可知当翼片高度由 $h_v=0.13$ mm 增加到 $h_v=0.17$ mm 时, 慢波结构的相速度逐渐减小, 色散特性曲线逐渐趋于平缓。根据图 3 (b) 可知慢波结构的耦合阻抗随着翼片高度 h_v 的增加而逐渐降低。

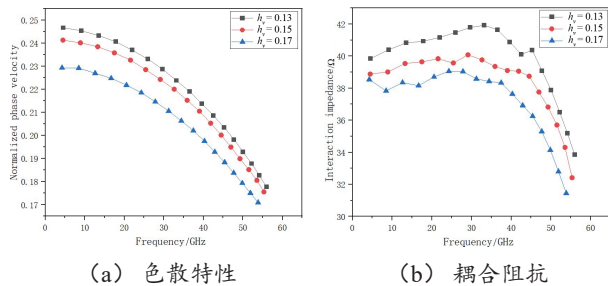


图 3 翼片高度 h_v 对高频特性的影响

由图 4 可知随着翼片宽度 w_v 的增加, 慢波结构色散特性曲线逐渐趋于平缓, 相速度值与耦合阻抗逐渐降低。

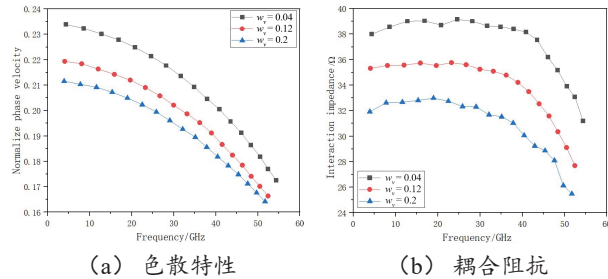


图 4 翼片宽度 w_v 对高频特性的影响

结合图 3~4 观察可发现, 翼片越贴近慢波结构, 宽度越宽慢波结构相速度越低, 色散曲线的平坦度越好, 耦合阻抗值越低。

氧化铍散热能力强介电损耗低, 能保证器件在高功率工作环境下的稳定运行。因此, 本文选用相对介电常数为 6.5 损耗角正切为 0.000 2 的氧化铍作为夹持杆的材料。经过大量仿真优化, 最终确定慢波结构及翼片的详细建模参数如表 1 所示。

表 1 建模参数

结构尺寸	参数值/mm
a	0.192 5
b	0.577 5
w	0.062 4
t	0.052 0
l	0.162 4
p	0.449 6
w_d	0.151 2
c	0.671 4
d	1.166 4
h_v	0.171 0
w_v	0.185 0

观察图 5 可知, 在频率为 33 GHz 处, 矩形环对角慢波结构耦合阻抗值为 36.09 Ω , 翼片加载矩形环对角杆慢波结构的耦合阻抗值为 31.61 Ω 。虽翼片加载矩形环对角杆慢波结构的耦合阻抗值降低 10.42%, 但通过加载翼片的方式, 矩形环对角杆慢波结构色散曲线的平坦度提升 22.42%。可以预见翼片加载矩形环对角杆行波管将具有更宽的工作带宽。

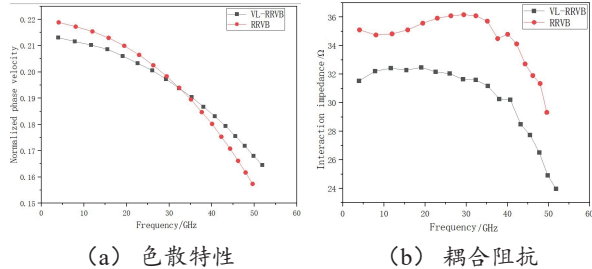


图 5 高频特性对比图

2 传输性能仿真分析

输入输出结构是电磁波进入和离开慢波结构的通道, 其设计合理性直接影响高频信号的传输损耗和反射损耗。输入输出结构与慢波结构的匹配程度通常通过参数评估^[21-22], 翼片加载矩形环对角杆传输模型如图 6 所示。对于二端口网络的参数, 其物理特性与网络结构特性密切相关。依据互易定理, 互易网络的散射矩阵需满足对称性, 即 $S_{12}=S_{21}$ 。若网络同时具有结构对称性, 则进一步满足 $S_{11}=S_{22}$ 。在研究行波管的 S 参数时, 通常只需重点关注 S_{11} 和 S_{21} 。 S_{11} 表示输入端口的反射特性, 其值越小, 反射损耗越低, 匹配效果越好。 S_{21} 表示信号传输特性, 其值越大, 传输损耗越小, 效率越高。选取电导率为 2.9×10^7 S/m 的无氧铜作为慢波结构基体材料, 其优异的导电特性可有效降低高频趋肤效应引起的欧姆损耗。

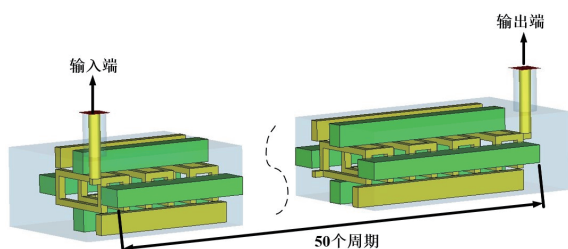


图6 翼片加载矩形环对角杆传输模型示意图

根据图7可知，在Ka波段频率范围内 S_{11} 均低于-15 dB，表现出较低的信号反射特性。同时 S_{21} 均高于-5 dB，表明信号在传输损耗较小，行波管具备良好的传输性能。

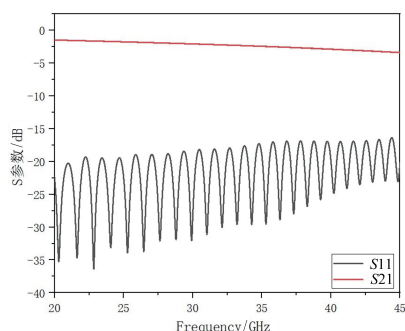


图7 传输特性

3 注-波互作用仿真分析

衡量行波管工作性能的关键指标主要包括带宽、输出功率、电子效率和增益等。带宽决定了行波管的频率覆盖能力；功率是行波管的核心性能指标，可进一步细分为瞬时功率和平均功率，分别反映瞬时输出能力和长时间或宽频带下的功率表现；增益体现信号放大效果，增益越高，说明行波管对输入信号的放大效果越显著；电子效率表示电子束能量转换为电磁波的比例，效率越高，能量转换越充分。

在完成模型输入输出结构设计后，为分析翼片加载矩形环对角杆行波管的注-波互作用能力，本节利用CST粒子工作室构建了翼片加载矩形环对角杆行波管的PIC仿真模型，如图8所示^[23]。该模型由三部分组成：周期性慢波结构，用于引导电子注与微波信号的相互作用，实现能量高效转换；其次是由金属直杆和同轴线组成的输入输出结构，确保微波信号能够高效地进入和离开慢波结构；最后是发射电子的带状电子注。

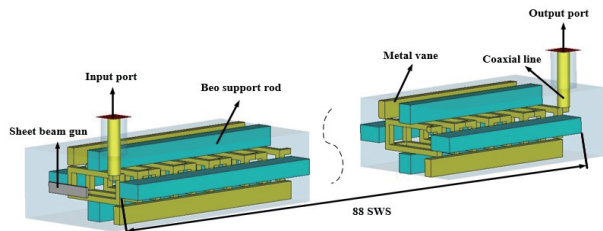


图8 PIC仿真模型示意图

在完成PIC模型的构建后，还需分别要对带状电子注的工作电压和电流，输入激励信号的频率和功率，聚焦磁场进行设置。行波管工作电压的计算公式为：

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

式中： η 表示电子质核比； v_0 表示电子注同步电压； c 表示光速； v_p 表示相速度。

为确保电子注与电磁波之间能够产生有效的相互作用，实际设置的电子注电压通常会略高于同步电压。对翼片加载矩形环对角杆行波管在33 GHz处工作电压、工作电流、输入功率和慢波结构周期数进行细致的参数扫描分析，最终确立行波管工作的最佳电气参数和互作用周期数，如表2所示。

表2 行波管电气参数

参数	参数值
电压/V	11 000
电流/A	0.244
输入功率/W	0.1
磁场/T	1.5
电子注填充比/%	44%
周期数	88

由图9可知，输出信号在0.77 ns时开始放大，并在4 ns内保持稳定的工作状态，此时输出信号的功率达到452.1 W。输出信号的频谱图能够直观展示行波管输出信号中各频率成分的分布情况。通过分析频谱图，可以检测输出信号中是否存在谐波、杂散分量或其他异常频率成分，从而评估行波管的非线性特性和信号纯净度。

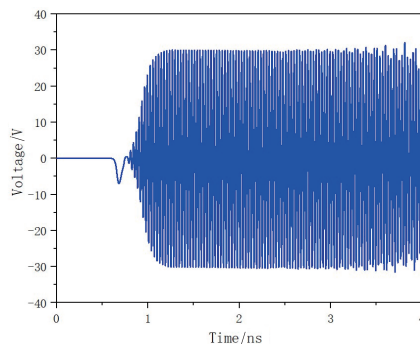


图9 输出电压幅值

观察图10可知，输出信号的能量主要集中在33 GHz处，频谱图整体表现出较高的纯净度，未出现显著的高次谐波或其他异常频率成分。由图11可知在行波管末端，电子的能量分布出现了显著差异，大部分电子的能量明显低于带状电子注的初始发射能量。这一现象表明，电子与电磁场之间发生了能量交换，且大部分电子将能量传递给了电磁信号。图中深色的电子群聚区域表明，低能量电子与高能量电子在空间上发生了重叠，这意味着注-波互作用已接近饱和状态。

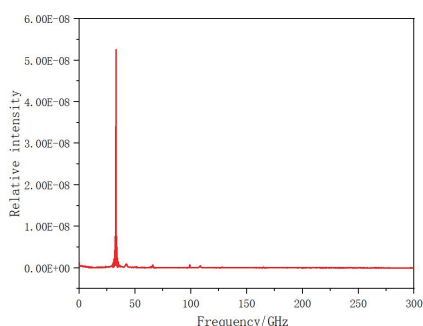


图 10 输出信号频谱图

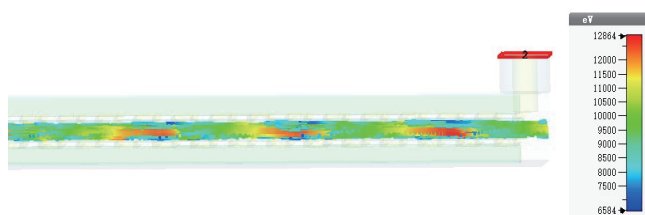


图 11 行波管末端电子群聚图

为全面评估翼片加载矩形环对角杆行波管在 Ka 波段内不同频点处的注 - 波相互作用能力, 在保持结构参数与电气参数不变的情况下, 对行波管在 Ka 波段内的各个频率点进行详细的扫频分析, 用以获得其在不同频点上的输出功率、电子效率和增益。观察图 12~13 可知, 翼片加载矩形环对角杆行波管 3 dB 带宽为 12 GHz (28.5 GHz~39.5 GHz), 3 dB 带宽范围内平均输出功率高于 226.05 W。此外, 在 33 GHz 处输出功率最大值为 452.1 W, 对应的电子效率和增益分别为 16.84% 以及 36.55 dB。

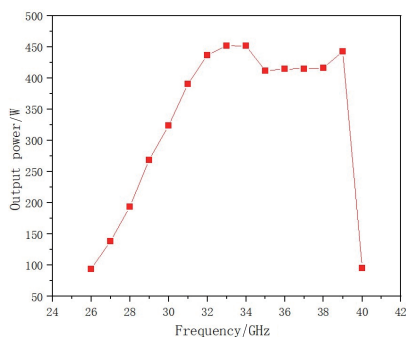


图 12 输出功率

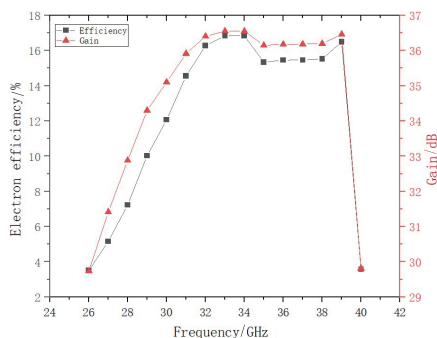


图 13 电子效率与增益

4 结语

本文提出一种 T 形翼片加载矩形环对角杆慢波结构, 通过翼片构型优化在保持高耦合阻抗基础上显著改善了色散特性, 为宽频带高功率行波管设计提供了新型解决方案。首先通过 HFSS, 对翼片摆放方式、高度和宽度 3 个方面详细介绍, 探究了翼片对矩形环对角杆慢波结构高频特性的影响, 并选定最佳的翼片加载方式以及翼片参数。其次, 设计了适用于该结构的输入输出结构, S 参数仿真结果表明, 信号在行波管中传输具有较好的稳定性和较低反射损耗。最后, T 形翼片加载矩形环对角杆行波管 PIC 仿真结果显示, 其 3 dB 带宽可达 12 GHz, 同时其 3 dB 带宽范围内最大输出功率达 452.1 W, 电子效率为 16.84%, 增益为 36.55 dB。上述结果表明, T 形翼片加载矩形环对角杆行波管具有高效率 and 宽频带等优势。

参考文献:

- [1] ERTAY A O, ŞİMŞEK S. On the assessment study of small signal gain analysis of helix type traveling wave tube with pierce parameters [C/OL]//2017 IV International Electromagnetic Compatibility Conference (EMC Turkiye). Piscataway:IEEE,2017[2025-02-12].<https://ieeexplore.ieee.org/document/8090367>.DOI: 10.1109/EMCT.2017.809036.
- [2] FUTATSUMORI S, YONEMOTO N, SHIBAGAKI N, et al. Foreign object debris detection performance improvement evaluation of a 90 GHz band millimeter-wave radar system in airport environments [C/OL]//2021 46th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz).Piscataway:IEEE,2021[2025-01-29].<https://ieeexplore.ieee.org/document/9567036>.DOI: 10.1109/IRMMW-THz50926.2021.9567036.
- [3] 叶齐钺. 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] DYAB W, SAKR A A, WU K. Millimeter-wave polarization-inclusive remote sensing system based on dually-polarized six-port junction [C/OL]// 2018 11th Global Symposium on Millimeter Waves (GSMM).Piscataway: IEEE, 2018[2025-04-11].<https://ieeexplore.ieee.org/document/8439393>. DOI: 10.1109/GSMM.2018.8439393.
- [5] WANG J, HAO B L, LI W, et al. Latest development of a ka-band 500 W helix TWT for satellite communications[C]// 2021 22nd International Vacuum Electronics Conference (IVEC). Piscataway: IEEE,2021[2025-03-22].<https://>

- ieeexplore.ieee.org/document/9722424. DOI:10.1109/IVEC51707.2021.9722424.
- [6] TIAN Y Y, YUE L N, WANG H X, et al. Investigation of ridge-loaded folded rectangular groove waveguide slow-wave structure for high-power terahertz TWT [J]. IEEE transactions on electron devices, 2018, 65(6): 2170-2176.
- [7] JIAO T P, CHEN P, LI H, et al. Space pulsed terahertz traveling wave tube amplifier[C/OL]//2023 24th International Vacuum Electronics Conference (IVEC). Piscataway:IEEE,2023[2025-04-25].https://ieeexplore.ieee.org/document/10157354. DOI: 10.1109/IVEC56627.2023.10157354.
- [8] 唐烨, 潘攀, 张琳, 等. G 波段大功率连续波行波管 [J]. 真空电子技术, 2021(3): 28-31.
- [9] 杜英华, 蔡军, 张小青, 等. 低电压高效率 W 波段脉冲行波管设计 [J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2019, 17(4): 726-729.
- [10] 朱美玲. V 波段大功率螺旋线行波管的研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2021.
- [11] LIPARI G, PATERNA G, TRAINA E, et al. Study of a V-band overmoded coupled cavity travelling wave tube [C]//2024 17th United Conference on Millimetre Waves and Terahertz Technologies (UCMMT). Piscataway:IEEE,2024: 244-247.
- [12] YUE L N, HUANG J B, WU G X, et al. Reentrant double-staggered ladder coupled-cavity structure for X-band traveling-wave tube [C/OL]//2017 Eighteenth International Vacuum Electronics Conference (IVEC).Piscataway :IEEE,2017[2025-03-26].https://ieeexplore.ieee.org/document/8289601.DOI: 10.1109/IVEC.2017.8289601.
- [13] PRAKASH D J, ARGUDO M M, WEIDE D W V D, et al. Design and fabrication of self-assembled metal helices for millimeter-through-THZ traveling wave tube amplifiers [C/OL]//2021 14th UK-Europe-China Workshop on Millimetre-Waves and Terahertz Technologies (UCMMT). Piscataway: IEEE, 2021[2025-02-22].https://ieeexplore.ieee.org/document/9569910.DOI: 10.1109/UCMMT53364.2021.9569910.
- [14] 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.
- [15] ZUBORAJ M, ROMERO W, FIERRO F, et al. Fabrication and cold-test of a wideband ka-band dielectric-loaded traveling-wave tube [C]// 2018 IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC). Piscataway: IEEE, 2018: 339-340.
- [16] WEI W H, WANG S H, WEI Y Y, et al. Square- and rectangular-ring vertex-bar slow wave structures for high-efficiency wide bandwidth TWTs [J]. IEEE transactions on electron devices, 2023, 70(1): 296-301.
- [17] KOHLER S, GASTAUD J, PUECH J, et al. Wideband highly efficient Ka-band 250 W space traveling-wave tube THL20250C & THL20250R [C/OL]//2021 22nd International Vacuum Electronics Conference (IVEC).Piscataway: IEEE, 2021[2025-05-15].https://ieeexplore.ieee.org/document/9722453.DOI: 10.1109/IVEC51707.2021.9722453.
- [18] JOYE C D, VLASOV A N, JAYNES R, et al. Ka-band low-voltage multiple-beam MiNi-TWT [J]. IEEE transactions on electron devices, 2023, 70(6): 2828-2833.
- [19] 朱兆君, 贾宝富, 罗正祥, 等. 微扰实验法测试螺旋线行波管耦合阻抗及模拟仿真 [J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(1): 118-122.
- [20] 姜宇. 脊加载对角双杆慢波结构行波管的研究 [D]. 赣州: 江西理工大学, 2023.
- [21] MA Y Y, LU F Y, ZHANG R, et al. Equivalent circuit analysis of the multi-sheet-beam folded waveguide slow-wave structure [C/OL]// 2024 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS).Piscataway:IEEE,2024[2025-06-19].https://ieeexplore.ieee.org/document/10618535.DOI: 10.1109/PIERS62282.2024.10618535.
- [22] MISTRY C, NAGARAJU A, GHOSH S K. Alternate design of the waveguide coaxial coupling system of ku band helix traveling wave tube [C/OL]// 2023 IEEE Microwaves, Antennas, and Propagation Conference (MAPCON). Piscataway: IEEE, 2023[2025-06-12].https://ieeexplore.ieee.org/document/10463814.DOI: 10.1109/MAPCON58678.2023.10463814.
- [23] 陈儒泰, 喻胜. 220 GHz 周期介质加载波导回旋行波管的理论设计与 PIC 仿真 [J]. 红外与毫米波学报, 2022, 41(6): 1042-1050.

【作者简介】

林锐义 (1999—), 男, 福建福安人, 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: 2025-03-24 修回日期: 2025-09-15)