

E 波段矩形环对角弯曲杆行波管研究

吴欣颖¹ 林馄义¹ 魏望和^{1*}
WU Xinhao LIN kunyi WEI Wanghe

摘要

行波管具有高功率、高效率、高增益和低噪声等优秀特性，因而在雷达、电子对抗和通信等领域获得广泛应用。大功率、高频率和小型化是当前行波管的主要发展方向。随着行波管工作频率的提升，慢波结构的尺寸不断减小，这限制了行波管输出功率的提升。文章设计了 E 波段矩形环对角弯曲杆行波管，并对其开展研究。设计匹配的输入输出结构，使矩形环对角弯曲杆行波管在 60~90 GHz 范围内 S_{11} 小于 -23 dB。基于 CST 粒子工作室仿真结果表明：在工作电压 23 900 V、工作电流 0.0921 A 的条件下，矩形环对角弯曲杆行波管可提供 212.19 W 的峰值输出功率，对应的电子效率与增益为 9.64% 和 35.49 dB，3 dB 带宽达到 15 GHz（66~81 GHz）。

关键词

矩形环对角弯曲杆；慢波结构；行波管；输入输出结构

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.10.032

0 引言

真空电子器件通过调节电子速度使电子与电磁波进行能量交换从而使信号放大，其包含行波管^[1-3]、磁控管^[4-5]、速调管^[6-7]、返波管^[8-9]和充气微波开关管^[10]等。其中，行波管作为一种用于放大高频微波信号的真空电子器件，广泛应用于卫星通信、雷达和电子对抗等领域。行波管具有宽频带、高效率和高增益的特点，其工作原理^[11]基于电子束与电磁波的相互作用，核心过程为：电子枪发射的电子束进入慢波结构，慢波结构降低电磁波相速以匹配电子速度；输入微波的电场调制电子束速度，使其群聚，随后群聚电子在减速场中将动能持续转移给电磁波，逐级放大信号，最终由收集极回收残余电子并输出放大后的微波。通过电子束与电磁波的同步相互作用，行波管能够实现信号的高效放大。行波管核心性能与慢波结构密切关联，慢波结构的优劣决定了行波管性能好坏。慢波结构高频特性一定程度决定了行波管性能，其色散曲线越平坦（即相速度下降越缓慢）则行波管的工作带宽越宽，更高的慢波结构耦合阻抗可以增加电子束在行波管内与电磁波进行相互作用的时间，从而显著提高行波管输出功率。

E 波段的频带范围为 60~90 GHz，包含两个子频带：71~76 GHz 与 81~86 GHz，作为未来主要研究的新兴频带，E

波段应用前景广阔^[12-13]。因此本文设计了 E 波段矩形环对角弯曲杆行波管，并对其开展研究。

1 高频特性

以矩形环对角双杆慢波结构为基础，本文通过将双杆优化为对角弯曲杆提出了矩形环对角弯曲杆慢波结构，矩形环对角弯曲杆模型如图 1 所示。

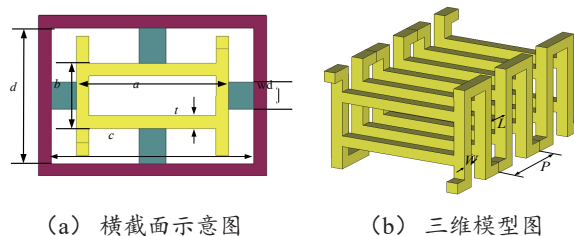


图 1 矩形环对角弯曲杆单周期慢波结构

目前对慢波结构的高频特性进行理论分析的方法主要有场理论分析法、等效电路法、实验测试法和模拟仿真法。其中理论分析法基于物理方程推导，可快速验证原理但难以处理复杂非线性效应；实验测试法虽能获取真实数据，却成本高昂且周期漫长。相比之下，模拟仿真法通过数值建模（如粒子-场耦合仿真）兼顾精度与灵活性，可动态模拟电子束与电磁波的相互作用、分析热效应及结构参数影响，显著降低试错成本，成为现代行波管高效研发的核心手段。本文使用模拟仿真法对矩形环对角弯曲杆慢波结构进行研究，并通过 HFSS 软件实现。通过 HFSS 本征模拟仿真分析慢波结构高频特性时，需先参数化构建矩形环对角弯曲杆慢波结构模型，设定材料参数（慢波结构为 PEC、屏蔽腔为真空、BeO 夹持

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）

杆电导率 $6.5 \times 10^7 \text{ S/m}$ 、损耗角正切 0.000 4，背景为 PEC），并在结构中心建立积分线计算耦合阻抗；其次设置主从边界条件（Master/Slave），基于基模工作特性赋予 0~180 deg 相移范围；最后通过本征模求解器扫描不同相移下的电磁场分布，整合数据生成完整的高频特性（如色散曲线、耦合阻抗）图谱。HFSS 内矩形环对角弯曲杆慢波结构三维建模如图 2 所示。

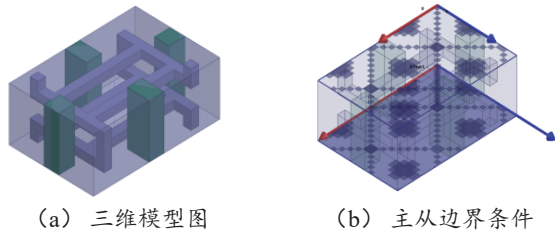


图 2 HFSS 建模示意图

通过 HFSS 对矩形环对角弯曲杆各个参数进行优化以得到最佳参数，最终确定矩形环对角弯曲杆慢波结构的最佳参数如表 1 所示。

表 1 矩形环对角弯曲杆慢波结构参数

Parameter	Value/mm
<i>a</i>	0.45
<i>b</i>	0.192
<i>c</i>	1.014
<i>d</i>	0.4
<i>p</i>	0.24
<i>w</i>	0.037
<i>l</i>	0.083
<i>t</i>	0.037
wd	0.08

由表 1 确定矩形环对角弯曲杆慢波结构具体参数，并通过 HFSS 软件对其进行模拟仿真，可得到矩形环对角弯曲杆的高频特性，矩形环对角弯曲杆慢波结构的高频特性曲线如图 3 所示。结果表明，在 E 波段中心频点 75 GHz 处，矩形环对角弯曲杆耦合阻抗为 25.22Ω ，归一化相速度为 0.286 5。

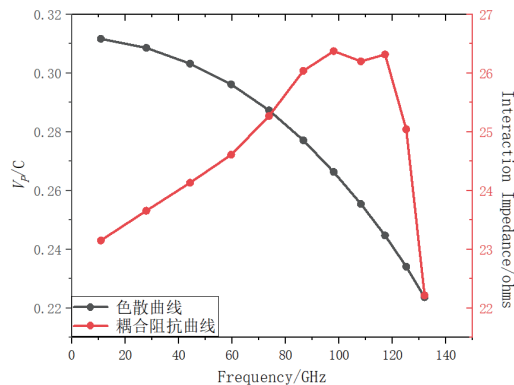


图 3 矩形环对角弯曲杆慢波结构高频特性

2 行波管研究

2.1 传输特性研究

行波管工作过程中，高频信号反射与损耗会影响行波管中电子束与电磁波的相互作用过程，进而使行波管性能受到影响。优秀的输入输出结构能显著减少高频信号的反射以及损耗，使行波管呈现良好的传输特性^[14-16]。通过微波网络分析法（如二端口模型）可简化复杂场理论计算：二端口网络通过 *S* 参数量化反射与传输特性，其中 S_{11}/S_{22} 反映输入 / 输出端口反射系数， S_{21}/S_{12} 表征正向 / 逆向传输系数。通过 *S* 参数，归一化输出电压 b_1 、 b_2 可以由归一化输入电压 a_1 、 a_2 表示为：

$$b_1 = S_{11}a_1 + S_{12}a_2 \quad (1)$$

$$b_2 = S_{21}a_1 + S_{22}a_2 \quad (2)$$

当端口二处于负载匹配情况时，负载进入端口二时不反射，此时 $a_2=0$ ， b_1 、 b_2 为：

$$b_1 = S_{11}a_1 \Rightarrow S_{11} = \left. \frac{b_1}{a_1} \right|_{a_2=0} = 0 \quad (3)$$

$$b_2 = S_{21}a_1 \Rightarrow S_{21} = \left. \frac{b_2}{a_1} \right|_{a_2=0} = 0 \quad (4)$$

当端口一处于负载匹配情况时，负载进入端口一时不反射，此时 $a_1=0$ ， b_1 、 b_2 为：

$$b_1 = S_{12}a_2 \Rightarrow S_{12} = \left. \frac{b_1}{a_2} \right|_{a_1=0} = 0 \quad (5)$$

$$b_2 = S_{22}a_2 \Rightarrow S_{22} = \left. \frac{b_2}{a_2} \right|_{a_1=0} = 0 \quad (6)$$

二端口网络可分为：对称网络（ $S_{11}=S_{22}$ ），互易网络（ $S_{12}=S_{21}$ ）以及无损网络（ $S_{11} \times S_{11} + S_{21} \times S_{21} = 1$ ），仿真中默认为无损网络。在 CST 仿真中，若工作频带为 $S_{11} < -15 \text{ dB}$ 、 $S_{21} > -5 \text{ dB}$ ，则表明输入输出结构设计有效，能够显著抑制反射损耗并提升行波管传输性能。为降低矩形环对角弯曲杆行波管的高频信号的反射以及损耗，需设计相匹配的输入输出结构，如图 4 所示。

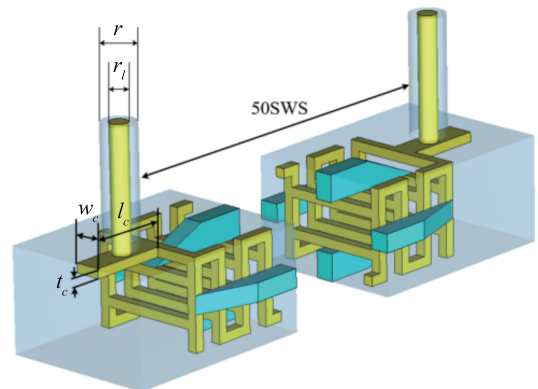


图 4 矩形环对角弯曲行波管传输模型

在 CST 仿真中对矩形环对角弯曲杆行波管进行建模研究时,输入输出结构的设计直接影响传输性能:由于直接在矩形环处设置耦合面难以满足 S 参数要求,故选择在弯曲杆处增设同轴线耦合面,并通过夹持杆渐变优化(渐变周期数为 2)改善阻抗匹配,其余关键几何参数包括延长板宽度 W_c 、厚度 t_c 、长度 l_c 以及同轴线半径 r 与屏蔽腔半径 r_1 。模型主体由 50 个慢波结构周期单元串联构成,两端分别配置输入输出结构。目前在行波管的设计中,输入输出结构通常采用同轴线或是波导结构,在工作带宽上同轴线结构相比于波导结构更宽,但其输出功率有限,由于本文矩形环对角弯曲杆行波管的研究方向是宽频带,因此选用同轴线作为输入输出结构。材料设置为无氧铜慢波结构(电导率 $2.9 \times 10^7 \text{ S/m}$)、BeO 夹持杆(电导率 $6.5 \times 10^7 \text{ S/m}$ 、损耗角正切 0.000 4)、真空屏蔽腔及 PEC 背景材料。仿真边界条件设为 X 、 Y 、 Z 三向电场 $E_i=0$,端口 1/2 分别置于输入/输出端,通过参数迭代优化最终确定结构设计,确保高频信号高效传输,如表 2 所示。

表 2 输入输出结构参数

Parameter	Value/mm
W_c	0.1
t_c	0.037
l_c	0.3
r	0.037
r_1	0.07

通过 CST 模拟仿真最终得到矩形环对角弯曲杆行波管的传输特性曲线图如图 5 所示,在 E 波段(60~90 GHz)全频带矩形环对角弯曲杆 S_{11} 参数都小于 -23 dB, S_{21} 参数都大于 -3 dB,在 E 波段全频带范围内 S_{11} 参数均小于 -23 dB,同时 S_{21} 参数都大于 -3 dB,说明本文设计的输入输出结构与矩形环对角弯曲杆行波管基本实现阻抗匹配,行波管具有良好的传输特性,能够有效减少高频信号的损耗与反射,提高行波管的整体性能。

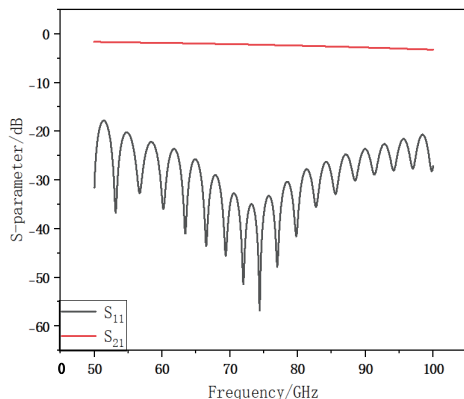


图 5 矩形环对角弯曲杆行波管传输特性曲线图

2.2 注-波相互作用研究

在上一节中通过研究矩形环对角弯曲杆行波管的传输特性确定输入输出结构后,为进一步研究行波管的其余性能,通过 CST 软件建立矩形环对角弯曲杆行波管工作在 E 波段的三维模型。

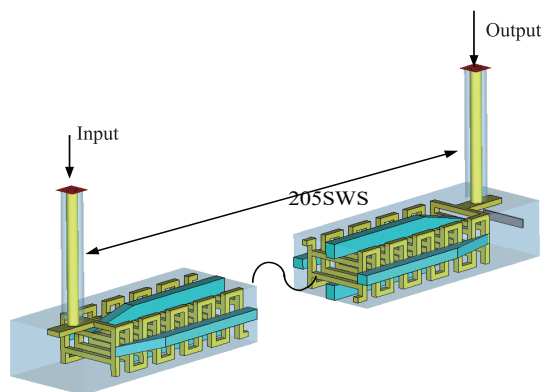
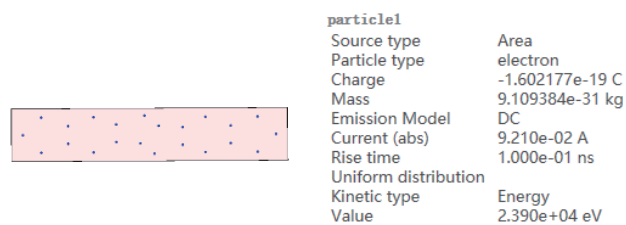


图 6 矩形环对角弯曲杆行波管三维模型图

图 6 所示为矩形环对角弯曲杆行波管三维模型,行波管两端为与研究传输特性时相同的输入输出结构,居中的慢波结构部分是由多个周期慢波结构堆叠而成,由于周期慢波结构个数也会对行波管的性能造成影响,在将其不断优化后,最终确定周期慢波结构个数为 205,有效平衡行波管的增益与稳定性。在 CST 粒子仿真中,为实现电子注的定向传输与有效吸收,将电子注及背景材料均设置为 PEC 材质,此方案不仅简化了收集极配置,还可消除残余电子对系统工作的干扰。电子注设置遵循严格的匹配原则:在输入端屏蔽腔设置矩形电子注,其中心轴线与慢波结构通道严格对齐。电子注的形状为矩形,相比于圆形电子注,矩形电子注在与矩形结构匹配时,能够提供更高的空间利用效率、更好的束流分布控制和简化的集成过程并且更适合高功率应用,使其更加符合行波管的发展方向。在粒子模拟仿真中,电子注面积一般为慢波结构电子注通道横截面积的 40%~50%,本文中设置的电子注占空比为 42.5%,为防止电子束在工作时与慢波结构发生接触,电子注在符合面积要求前提下,需设置合适的长宽比,通过优化相关参数,矩形电子注长宽比例设置为 3.5:1。图 7 为电子注设置具体参数。



(a) 带状电子注

(b) 电子注参数

图 7 CST 内带状电子注示意图

行波管工作时，电子束内部相互作用力易引发束流发散，需沿轴向（Z方向）施加聚焦磁场以维持束流稳定性。该磁场具备双重核心功能：一是约束电子束在慢波结构中心轴线附近运动，确保其与高频场强区域精确重叠，优化能量交换效率；二是抑制电子束横向偏移，避免撞击管壁造成功率损耗、热效应及结构损伤。

聚焦磁场大小对行波管性能存在影响：当磁感强度过低时，可能使电子束发散加剧，无法与高频场良好作用，从而使输出功率和效率下降，甚至导致慢波结构损坏；当磁感强度过高时，电子轨迹可能呈现过度螺旋性，既降低能量传递效率，又增加系统能耗与结构复杂性。经对磁感强度不断优化，本文最终选取 1.0 T 作为最佳平衡点，在实现束流稳定控制的同时，兼顾系统能效与工程可行性。

通过研究矩形环对角弯曲杆慢波结构高频特性可知其在 75 GHz 处相速度大小为 0.286 5，根据式（7）可计算出行波管工作电压大小，计算结果为 22 400 V。由于计算结果只是行波管理论工作电压，在实际工作时电压可能产生漂移，因此需要对电压大小进行参数扫描以达到最佳电压，通过不断优化得到最佳工作电压 23 900 V。

$$\frac{v_p}{c} \approx \sqrt{1 - \frac{1}{(1 + \eta V_0 / c^2)^2}}$$

(7)

图 8 所示为激励信号设置原理示意图。为实现矩形环对角弯曲杆行波管的信号放大功能表征，在 CST 仿真中需配置激励信号作为初始条件。初始信号的核心作用在于精确模拟行波管内高频电磁场与电子注的互作用过程，通过数值计算再现实际器件中能量交换的动态特性，从而为行波管工作参数评估及性能优化提供关键依据。本设计选取正弦波作为激励信号源，主要基于以下考量：一是正弦信号具有数学形式简明、频谱单一的特点，可显著提升计算效率并缩短仿真周期；二是该波形在微波器件中具有普适性应用基础，其突出的能量聚焦特性可有效增强目标频段内电子注与高频场的能量传递效率。具体参数设置中，激励信号平均功率

设定为 0.06 W，其时域持续时间与仿真时间严格同步，确保动态过程模拟的完整性。通过对矩形环对角弯曲杆行波管各项相关参数进行不断优化，最终确定行波管相关电气参数如表 3 所示。

表 3 矩形环对角弯曲杆行波管电气参数

Parameters	Value
电子注电压 /voltage	23 900
电子注电流 /current	0.092 1
聚焦磁场 /tb	1.0
输入功率 /W	0.06
电子注横截面积 /mm ²	0.319×0.06
填充比 /%	42.5%
行波管周期个数	205

同步求解电子束与慢波结构中电磁场的相互作用可动态计算高频信号在慢波结构中的增长情况。在仿真中，电子束通过慢波结构时，其能量一部分被高频场提取，表现为射频信号的放大，通过计算慢波结构终端射频场的能量流密度可得到行波管的输出功率。通过 CST 进行粒子模拟仿真后得到的输出信号幅值如图 9 所示，从中可以看出输出信号在 0.63 ns 处开始放大，并且在 0.75 ns 处趋于稳定，其输出功率可达到 209.11 W。

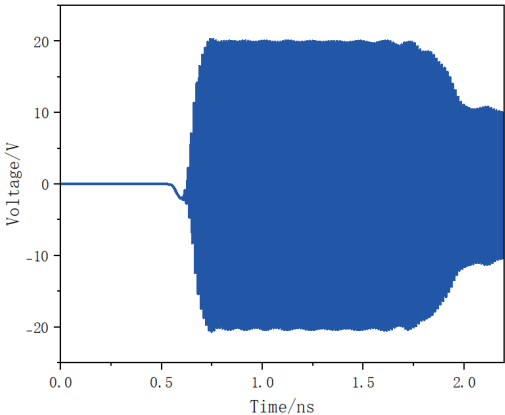


图 9 矩形环对角弯曲杆行波管输出信号

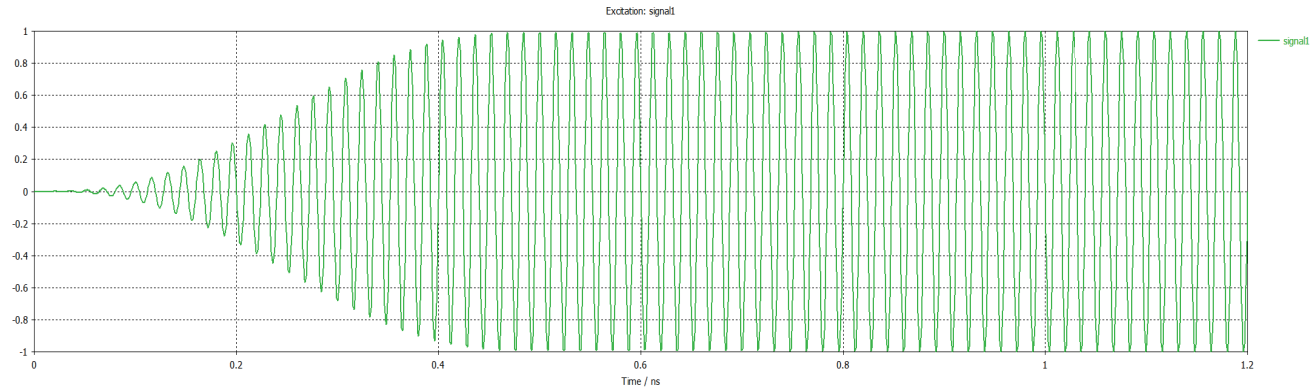


图 8 激励信号示意图

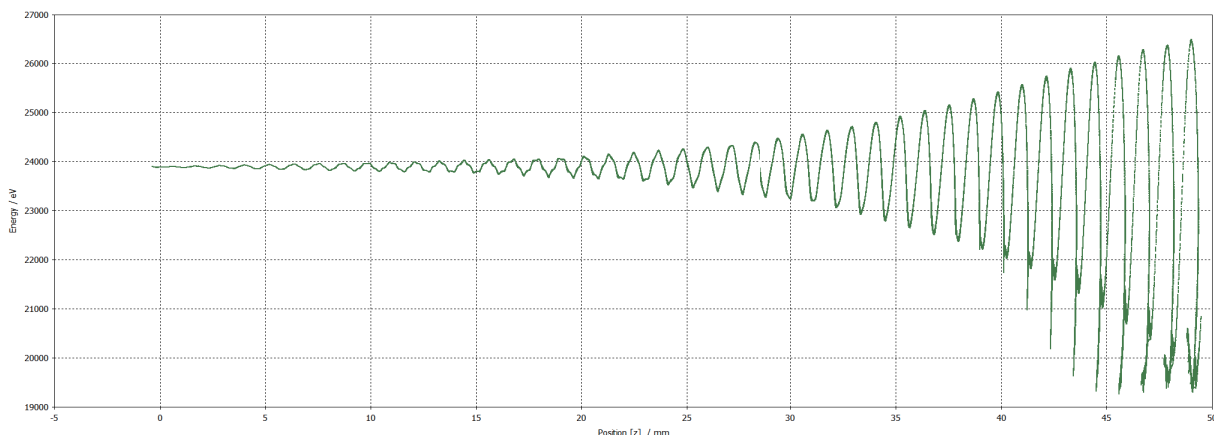


图 10 相位空间图

在行波管仿真过程中,通过设置监测器可动态追踪电子束与电磁场的能量交换过程,从而得到以电子束轴向位置和动量为坐标的相位空间分布图^[17],相位空间图完整刻画电子束从初始均匀态到受高频场调制的周期性条带分布,最终形成高密度电子团簇的动态演化,如图 10 所示。

由图 10 可知,初始阶段电子束能量为 23 900 eV,此时能量集中且相位均匀;进入慢波结构后,高频场使电子相位同步,部分电子能量出现增减分化,形成波峰/波谷条带结构;在最终的群聚阶段,多数电子能量显著降低,呈现高密度的电子团,表明高频场成功从电子束提取能量。监测数据通过相位同步度和群聚因子量化验证能量转移效率,确认行波管实现信号放大功能。

在仿真结束后,通过对输出端口信号进行 Fourier 归一化^[18-19]生成的频谱图可分解信号的频率成分,验证系统工作频率与设计目标的一致性,同时检测非目标成分以评估频谱纯净度;归一化频谱图量化了主频能量占比和谐波强度,反映信号非线性效应,如图 11 所示,在中心频点 75 GHz 时,频谱的归一化幅值迅速从 0 开始攀升到最高值 3.4 并立刻回归到 0,并且除中心频点外其余频率幅值趋近于零,表明行波管输出信号频谱纯净且能量集中,符合设计要求。

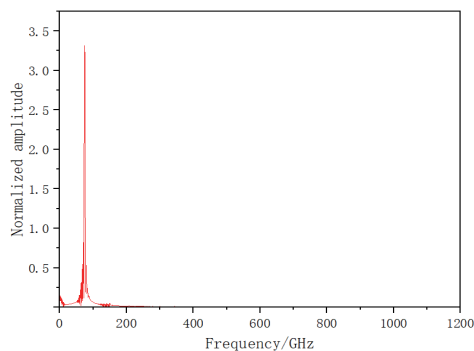
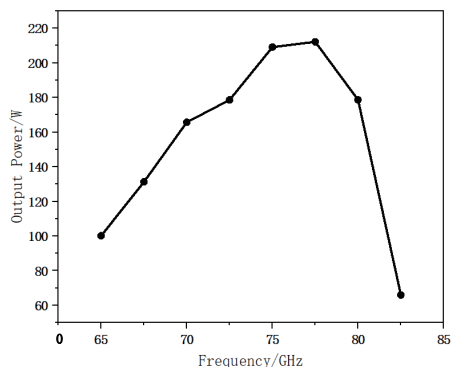
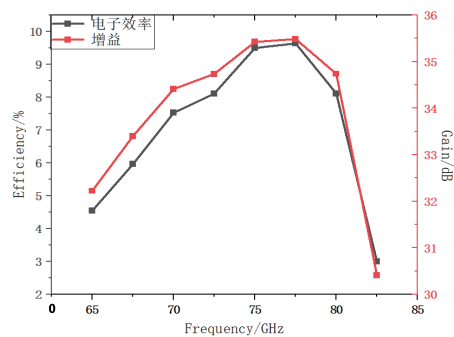


图 11 频谱图

对矩形环对角弯曲杆行波管以 0.06 W 为输入功率,在中心频点附近以 2.5 GHz 为步长不断改变频率进行粒子模拟仿真可得到行波管的在 E 波段整体输出功率,从而绘制矩形环对角弯曲杆行波管的输出功率随频率变化的曲线图。由图 12 可知,矩形环对角弯曲杆在 77.5 GHz 处达到最大输出功率 212.19 W,整个行波管在 3 dB 带宽范围 66~81 GHz 内输出功率均大于最大输出功率的一半,3 dB 带宽为 15 GHz。



(a) 输出功率图



(b) 电子效率和增益图

图 12 矩形环对角弯曲杆行波管注-波相互作用结果

根据式 (8) 与 (9) 可由输出功率计算出对应的电子效

率与增益。

$$G = 10 \lg \left(\frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} \right) \quad (8)$$

$$\eta_{\text{max}} = \frac{P_{\text{out}}}{V_0 I_0} \approx 2C \quad (9)$$

由图 12 可知, 通过对矩形环对角弯曲杆行波管进行研究, 结果表明: 行波管在 77.5 GHz 处达到峰值电子效率与增益, 分别为 9.64% 与 35.49 dB, 说明矩形环对角弯曲杆行波管拥有较好的信号放大效果, 符合行波管高功率宽频带的发展方向。

3 结语

本文构建了矩形环对角弯曲杆慢波结构, 并对其高频特性开展研究, 通过分析慢波结构参数对高频特性的作用规律, 确定慢波结构的最佳参数。通过 HFSS 进行模拟仿真, 结果表明: 矩形环对角弯曲杆耦合阻抗为 25.22 Ω , 归一化相速度为 0.286 5。通过设计匹配的输入输出结构, 使得矩形环对角弯曲杆行波管在 60~90 GHz 范围内 S_{11} 小于 -23 dB, S_{21} 大于 -3 dB。基于 CST 粒子工作室仿真结果表明: 在工作电压 23 900 工作电流 0.092 1 A 条件下, 双注方形环弯曲杆行波管可提供 595.12 W 的峰值输出功率, 对应的电子效率与单位长度增益为 9.64% 和 35.49 dB, 3 dB 带宽达到 15 GHz (66~81 GHz)。由此表明, 矩形环对角弯曲杆符合行波管高功率、高效率 and 宽频带的发展前景, 具有较为优秀的性能。

参考文献:

- [1] LIU S H, XIE Q M, CHEN Z F, et al. High linear power E-band traveling-wave tube for communication applications[J]. IEEE transactions on electron devices, 2021, 68 (6): 2984-2989.
- [2] 冯进军, 胡银富, 蔡军, 等. W 波段行波管发展评述 [J]. 真空电子技术, 2010(2):27-32.
- [3] SALEH A A M. Frequency-independent and frequency-dependent nonlinear models of TWT amplifiers[J]. IEEE transactions on communications, 1981, 29 (11): 1715-1720.
- [4] KELLY P J, ARNELL R D. Magnetron sputtering: a review of recent developments and applications[J]. Vacuum, 2000, 56 (3): 159-172.
- [5] 吴群. 磁控管的研究现状与发展趋势 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2000(5):9-12.
- [6] 丁耀根, 刘濮鲲, 张兆传, 等. 大功率速调管的技术现状和研究进展 [J]. 真空电子技术, 2010(6):1-8.
- [7] XIAO R Z, ZHANG X W, ZHANG L J, et al. Efficient generation of multi-gigawatt power by a klystron-like relativistic

backward wave oscillator [J]. Laser and particle beams, 2010, 28 (3): 505-511.

- [8] 范菊平, 刘国治, 陈昌华, 等. 带有反射腔的相对论返波管初步实验研究 [J]. 强激光与粒子束, 2001(3):349-352.
- [9] GINZBURG N S, ROZENTAL R M, SERGEEV A S. On the synthesis of radiation spectrum in a sectioned relativistic backward wave tube[J]. Technical physics letters: letters to the russian journal of applied physics, 2003, 29:164-167.
- [10] 周小刚, 何擎, 段玉宏. Ku 波段宽频带充气微波开关管研制: 中国电子学会真空电子学分会第二十一届学术年会论文集 [C]. 北京: 中国电子学会真空电子学分会, 2018.
- [11] 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 [J]. 真空电子技术, 2002(6):15-20.
- [12] 杨东华. E 波段 LFM CW 雷达系统毫米波前端研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2015.
- [13] AMENDOLA G, BOCCIA L, CENTURELLI F, et al. Compact E-band I/Q receiver in SiGe BiCMOS for 5G backhauling applications[J]. IEEE transactions on circuits and systems II-express briefs, 2021, 68(9):3098-3102.
- [14] 曾爽. 毫米波行波管输入输出系统的设计研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2016.
- [15] 党博. 毫米波带状注行波管的初步研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2013.
- [16] 田艳艳, 岳玲娜, 徐进, 等. 折叠矩形槽波导行波管输入输出过渡波导 [J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(11):2693-2697.
- [17] SETAYESH A, FARHANG H, ABRISHAMIAN M S. A novel dispersive time-domain interaction code for helix TWT by collocated space and staggered time scheme pseudospectral analytical time-domain method [J]. IEEE transactions on microwave theory and techniques, 2018, 66 (12): 5176-5182.
- [18] 彭维峰. 行波管注波互作用时域理论与通用非线性模拟技术研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2013.
- [19] 朱玫, 王峨峰, 冯进军, 等. 慢同步波行波管特性研究 [J]. 强激光与粒子束, 2007(10):1671-1676.

【作者简介】

吴欣然 (2001—), 男, 江西抚州人, 硕士研究生, 研究方向: 行波管放大器。

林锐义 (1999—), 男, 福建宁德人, 硕士研究生, 研究方向: 行波管放大器。

魏望和 (1978—), 通信作者 (email: weiwanghe@126.com), 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: 2025-04-05 修回日期: 2025-10-16)