

DOI:10.3969/j.issn.1674-7135.2025.01.013

螺旋线型 Q 波段高效率通信行波管研究

郑 丽, 郝保良, 王 娟, 张彦成, 李紫琳, 王光强,
陈 然, 耿伟楠, 徐 光, 张丽霞

(北京真空电子技术研究所, 北京 100015)

摘 要: 面向卫星通信、无线通信等毫米波应用的快速需求, 文章详细研究了螺旋线型 Q 波段行波管的大功率、高效率、高增益、非线性等物理特性和设计技术。通过尺寸共度效应理论分析, 研究了慢波结构的色散特性、耦合阻抗; 采用了一种双渐变技术, 在提高电子效率的同时兼顾高增益和良好的非线性指标; 采用了主衰减, 输入副衰减和切断的设计方法, 有效抑制了返波振荡, 以使行波管稳定工作; 在互作用后电子能谱分析基础上, 设计出一种五级降压收集极, 收集极效率达到 90%, 促进了行波管总效率的提高。采用以上设计方法研制了 2 种 Q 波段螺旋线通信行波管, 具体测试结果为, A 型大功率行波管, Q 波段(带宽 2 GHz), 输出功率达到 125 W, 饱和总效率达到 57%, 饱和增益 45 dB, 相移小于 49°, 重量 460 g; B 型小型化行波管, Q 波段(带宽 4.5 GHz), 饱和功率 65 W, 饱和总效率 55%, 饱和增益 46 dB, 相移小于 45°, 重量 350 g。两种螺旋线型 Q 波段行波管满足了通信的高效率、高线性度、高增益、小型化等综合指标要求, 测试参数超过公开报道的最新产品, 展现出极佳的综合性能。文章所提出的设计方法为 Q 波段及更高频段螺旋线通信行波管研究提供了一种参考。

关键词: 毫米波通信; 行波管; 大功率; 高效率; 小型化

中图分类号: V443; TN124

文献标志码: A

文章编号: 1674-7135(2025)01-0109-09

The research of high-efficiency Q band helix traveling wave tubes for communication

ZHENG Li, HAO Baoliang, WANG Juan, ZHANG Yancheng, LI Zilin, WANG Guangqiang,
CHEN Ran, GENG Weinan, XU Guang, ZHANG Lixia
(Beijing Vacuum Electronics Research Institute, Beijing 100015, China)

Abstract: In order to meet the rapid needs of millimeter-wave spectrum, such as satellite communication and wireless communication, the physical characteristics and design techniques of helix Q-band traveling wave tubes such as high power, high efficiency, high gain and nonlinearity are studied in detail. Through the theoretical analysis of the wavelength-size-matching effect, the dispersion characteristics and coupling impedance of the slow wave structure are studied, a double tape technique is adopted to improve the electronic efficiency while taking into account the high gain and good nonlinearity. The design method of main attenuation, input secondary attenuation and cut-off is adopted to effectively suppress the backward-wave oscillation to make the traveling wave tube work stably. And a five-stage collector is designed on the basis of the electronic spectrum analysis after interaction, and the efficiency of the collector reaches 90%, which promotes the improvement of the total efficiency of the traveling wave tube. Using the above

收稿日期: 2023-12-29; 修回日期: 2024-05-06

基金项目: 中国电子科技集团公司第十二研究所稳定支持科研经费资助项目(编号: K2403406)

引用格式: 郑丽, 郝保良, 王娟, 等. 螺旋线型 Q 波段高效率通信行波管研究 [J]. 空间电子技术, 2025, 22(1): 109-117. ZHENG L, HAO B L, WANG J, et al. The research of high-efficiency Q band helix traveling wave tubes for communication [J]. Space Electronic Technology, 2025, 22(1): 109-117.

design methods, two kinds of Q-band helix communication traveling-wave tubes were manufactured, and the test results are as follows: Type A high-power traveling-wave tube, Q-band (bandwidth 2 GHz), output power up to 125 W, total saturation efficiency up to 57%, saturation gain 45 dB, phase shift less than 49°, weight 460 g. Type B miniaturized traveling-wave tube, Q-band (bandwidth 4.5 GHz), saturated power 65 W, saturation total efficiency 55%, saturation gain 46 dB, phase shift less than 45°, weight 350 g. The two helix Q-band traveling wave tubes meet the requirements of high efficiency, high linearity, high gain, miniaturization and other comprehensive indicators of communication, and the test parameters exceed the latest public reported products, showing excellent comprehensive performance. The design method proposed in this paper provides an important reference for the research of Q band and higher frequency helix communication traveling-wave tubes.

Key words: millimeter-wave communication; traveling wave tubes; high power; high efficiency; miniaturized

0 引言

随着通信频谱资源的紧张及大带宽、高速率、窄波束覆盖等强烈需求,毫米波成为卫星通信和无线通信的热点^[1-2]。毫米波段可以轻松分配 1GHz 以上的带宽资源,基于如此充沛的频率带宽资源,毫米波通信可以实现高速率传输,同时毫米波的大带宽还带来更低的空口时延,有利于高可靠、低时延业务的部署。毫米波在同样孔径天线增益更高,波束更窄,对于低轨卫星频轨协调、保密通信,无线通信的通感一体化等应用具有先天性优势,是通信应用的重点,频率应用从 Ka 波段快速扩展到 Q 波段及以上^[3],是各强国争相研发的前沿技术^[4]。

在高频段机载和星载系统中,对功率放大器的体积有着极为苛刻的要求,迫切需要研制大功率、高效率、小型化的功率放大器。目前固态 Q 波段芯片为瓦量级,如 Qorvo 公司 TGA4046 频率 41 GHz~46 GHz 功率 2 W, QPA4446D 频率 37 GHz~42.5 GHz 功率 4 W,最大效率 25%,2 W 时小信号增益为 18 dB。相较于固态器件,行波管避免了固态材料的电子碰撞损耗,分离的能量互作用结构和电子回收装置,在毫米波段可获得大功率输出,同时多级降压收集极的引入大幅提升了整管效率。在 Q 波段,行波管连续波输出功率可达 120 W 以上,工作频率带宽最大可达 10 GHz。高效率行波管在 Q 波段效率可达 55%,饱和增益可达 45 dB、小信号增益大于 50 dB,是毫米波放大器的优选功率源。

受到毫米波传播高损耗的限制,射频前端需要足够大的发射功率,对系统的供电、散热、体积等提出了更高的要求^[5-6]。毫米波行波管大功率、小

型化高增益的研究可适配小体积应用系统,而高效率的研究可促进绿色节能,降本增效,降低对应用系统的散热、体积等要求,有利于提高应用系统的适配性。

1 慢波结构理论分析和仿真

螺旋线平均半径 a 符合尺寸共度效应^[7-8],

$$a(\text{mm}) \approx 0.1\gamma_a \frac{\left[\frac{P_{out}}{\eta\kappa}\right]^{\frac{1}{3}}}{f(\text{GHz})} \approx 0.1\gamma_a \frac{[U]^{1/2}}{f(\text{GHz})} \quad (1)$$

式中,螺旋线平均半径 a 与工作频率 f 成反比,与工作电压 U 、慢波结构横向传播常数 γ_a 成正比。Q 波段频率高,螺旋线半径 a 较小, a 与 γ_a 和 U 相互影响,需根据模型库进行综合分析计算来选取。

螺旋线慢波系统^[9]结构选用 T 型氧化铍夹持杆,矩形钨带结构,如图 1 所示,通过螺旋线镀膜降低高频损耗^[10],三维有限元软件进行慢波系统结构的冷参数仿真,结果如图 2 所示。

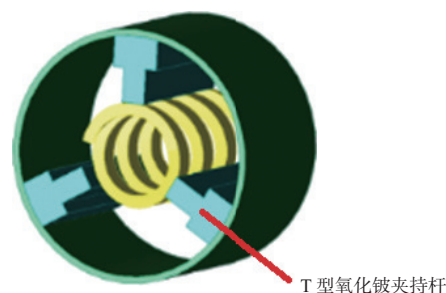


图 1 毫米波行波管典型慢波系统结构

Fig. 1 Slow wave system structure of millimeter wave TWTs

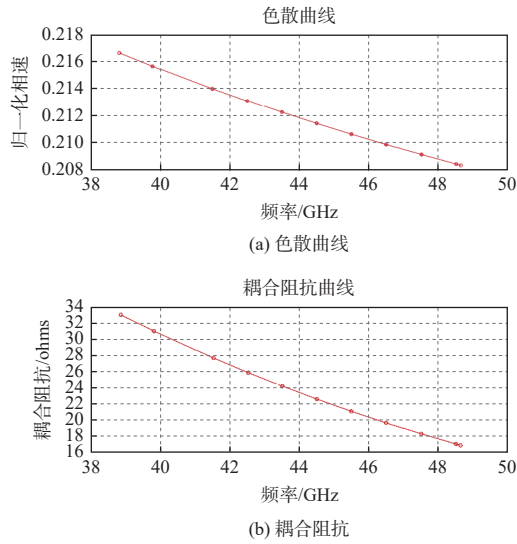


图 2 慢波系统结构冷参数仿真结果

Fig. 2 Simulation results of cold parameters of slow wave system structure

仿真结果显示, 色散变化率小于 3%, 耦合阻抗大于 16 ohms, 可在 Q 波段获得平坦的增益特性和高电子效率。

2 非线性相互作用的计算

互作用效率的提高一直是行波管研制的核心问题, 设计到复杂的能量交换过程, 本文采用了通信行波管的一种螺距的双渐变技术^[11], 如图 3 所示, 高频系统由两段组成, 第一段为小信号增益段, 主要为获得足够的小信号增益, 使得电子束整体处于减速区; 第二段分为上跳变段和下渐变段, 上跳变段为相移补偿区, 使得整管具备“平衡”的非线性特性, 下渐变段为再同步区, 充分获得足够的电子效率。

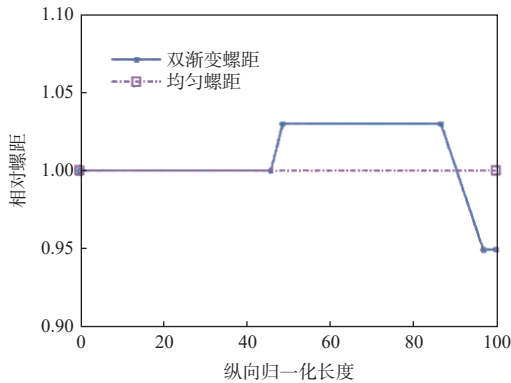


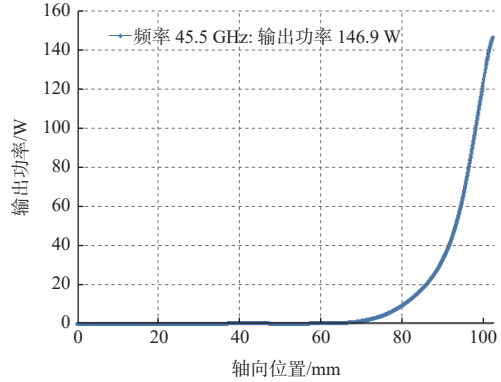
图 3 螺距分布

Fig. 3 Pitch distribution

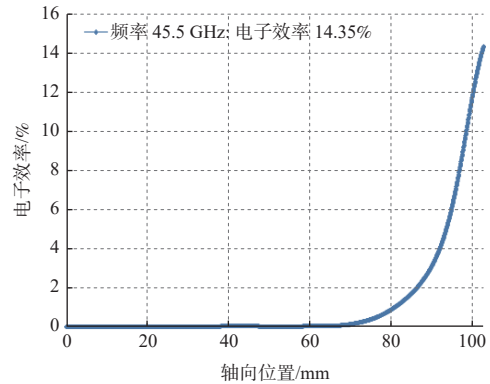
通过仿真优化设计, 在提高电子效率的同时兼顾了通信的高线性度、高增益等综合指标, 仿真设计

结果如图 4 所示。

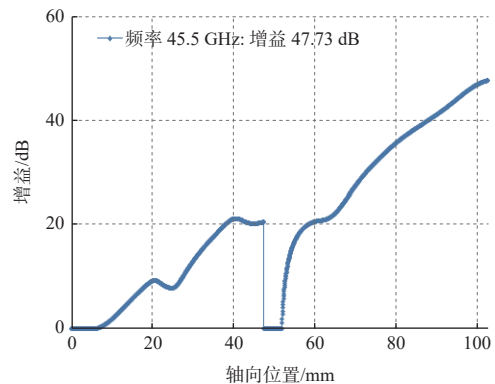
通过优化设计, 在 Q 波段(带宽 2 GHz), A 型行波管饱和工作时, 仿真输出功率大于 146 W, 电子效率大于 14.3%, 增益大于 47 dB, 相移(输入回退 20 dB)小于 45°, 饱和点(AM/PM)小于 3°/dB。



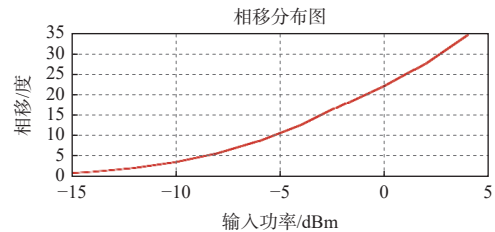
(a) 饱和输出功率仿真结果



(b) 饱和相互作用效率仿真结果



(c) 饱和增益仿真结果



(d) 相移(输入回退 20 dB) 仿真结果

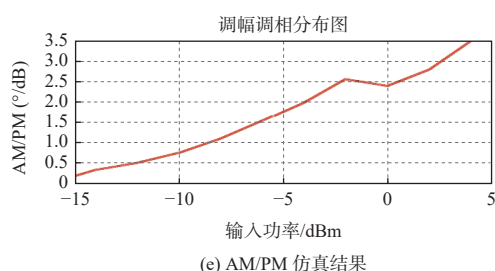


图 4 A 型行波管相互作用系统仿真结果

Fig. 4 Simulation results of type A TWT interaction system

行波管的慢电磁行波类似于一种表面波,其横向电场分布,前向相互作用基波符合 0 阶贝塞尔函数分布,返波符合 1 阶贝塞尔函数分布,相比较厘米波,毫米波更容易引起返波振荡,增益越高振荡风险越大,返波振荡限制了毫米波行波的功率输出,是毫米波行波管研究中的难点之一。

没有切断的行波管,当

$$G - L - \rho_0 - \rho_i > 0 \quad (2)$$

时就会出现振荡。式(2)中, G 为行波管增益; L 为线路损耗,通常不大于 6 dB; ρ_0 和 ρ_i 分别为输出端与输入端反射系数,很难大于 10 dB(10% 反射);所以行波管增益被限制在 26 dB 以下。为了获得足够高的增益(45 dB),需要在行波管中使用衰减和切断,衰减器不仅对反射波起衰减作用,同时也衰减前向波,通过增加相互作用区的长度,可以部分补偿前向波的增益损失;切断可以防止反射波传到输入端,虽然螺旋线输入段的前向增益波在切断处被丧失,但电子注中存在的电流调制和速度调制仍然可以携带着信号越过切断区,在输出端作进一步的放大^[12]。

图 5(a)显示了输入段无副衰减时,出现返波振荡,返波振荡频率为 67.1 GHz 左右,通过在输入段引入合适的副衰减,即在输入段末端的主衰减前面间隔合适的位置处,通过在夹持杆上涂上损耗材料碳膜,碳膜的厚度在衰减区的两端逐渐降为零,以便在很宽的频率范围获得优良的阻抗匹配^{[12]255-257}。衰减器通过损耗材料切断反射波的反馈途径,在它的长度范围内对反射波起衰减作用^[13],从而有效降低了返波增益,抑制了返波振荡,如图 5(b)所示。

为了提高行波管的工作稳定性,充分发挥行波管高增益的优点,必须设置足够的衰减量或隔离度,但衰减器的引入,由于衰减器区域相速降低破坏了同步条件,而且波的幅值很快减小,使电子注与波的相互作用减弱,会使行波管的功率、增益和效率下降。

在衰减器设计时,需要在抑制返波振荡和行波管工作性能上找到最佳的平衡值。衰减器的衰减量是和衰减材料所占长度成正比的^[13],为了找到输出段衰减器的最佳长度,对输出段衰减器做了仿真设计,输出段衰减器长度设置在 10 mm ~ 20 mm,间隔 1 mm 分别进行仿真对比分析,对应的增益仿真结果如图 6(a)所示,输出段衰减器长度为 10 mm ~ 16 mm 时,衰减量不够,在 40 mm ~ 50 mm 处出现增益凹坑,即行波管出现返波振荡风险;输出段衰减器长度为 17 mm ~ 20 mm 时,抑制了返波振荡,消除了增益风险。但随着输出段衰减器长度的增加,行波管饱和输出功率和增益有所下降,如图 6(b)所示,为了兼顾抑制返波振荡,同时获得较高的输出功率、增益和效率,折中选取了输出段衰减器长度为 18 mm,如图 6(c)所示,离返波振荡条件(输出衰减器长度 16 mm)有一定的安全距离,同时输出功率、增益下降满足要求。实测 Q 波段行波管无振荡,稳定工作。

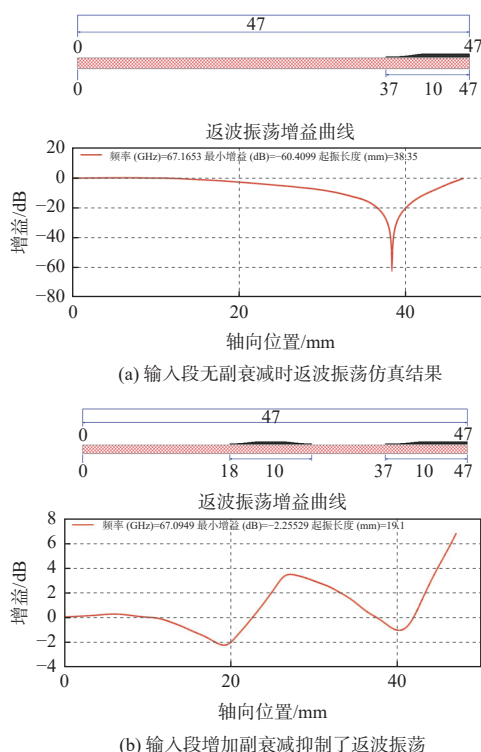


图 5 输入段返波振荡仿真设计结果

Fig. 5 Simulation results of backward wave oscillation in input segment

3 五级降压收集极的设计

在行波管中,“相互作用后的电子注”由于交出了部分动能,平均速度减慢,电子注携带有较大能量,

如果不采取措施, 行波管的电子效率不高, 本例子中电子效率最高为 15%。幸运的是通过能量回收装置——收集极, 可以回收相互作用后的大部分能量, 大幅提升行波管的总效率^[14-15]。

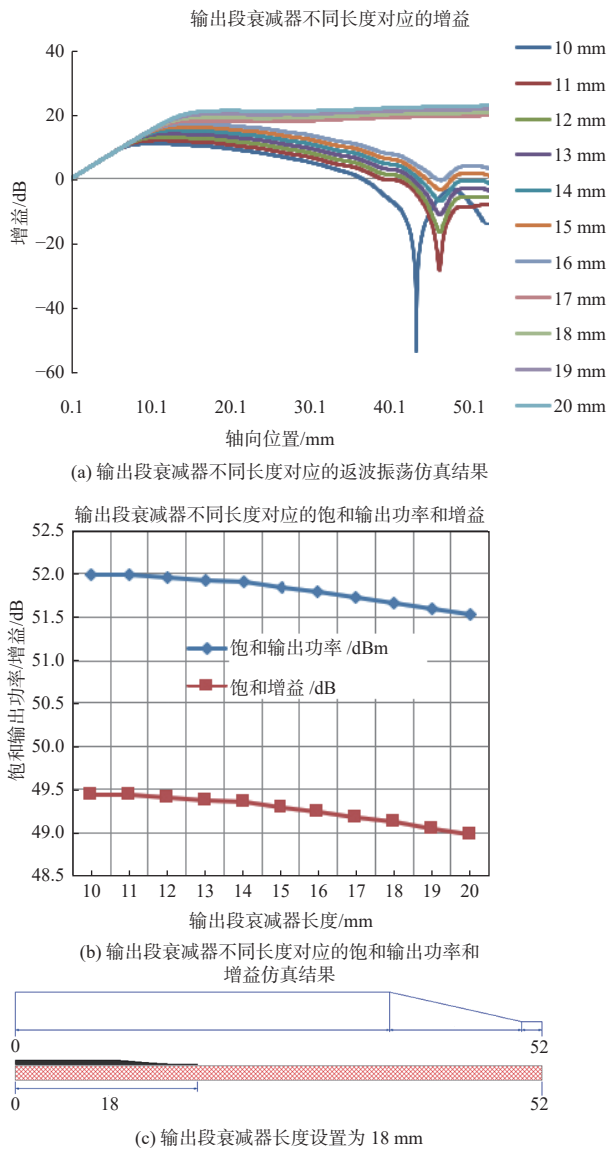


图 6 输出段返波仿真设计结果

Fig. 6 Simulation results of backward wave oscillation in output segment

当收集极电位与管体电位相同时, 电子将以较高的速度撞击收集极, 电子能量转化为热能, 耗散在收集极上; 通过降低收集极电压, 使其低于管体电压, 如图 7 所示, 则轰击收集极的电子速度降低, 产生的热量减小, 收集极就回收了剩余电子注中的部分功率, 将回收的能量返回给电源, 通过减小了直流输入功率, 从而提高了将直流输入功率转化为高频输出功率的总效率。

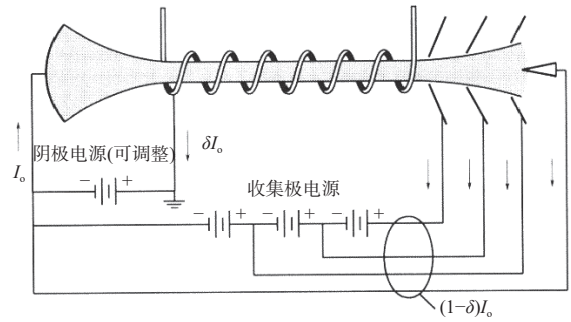


图 7 多级降压收集极的电源配置

Fig. 7 Power configuration for multiple-level-voltage collector

如图 8 所示, 曲线下方的面积表示经过相互作用后的剩余电子注中能被收集极回收的功率, 按不同能量等级进行分类, 由不同电位的电极收集, 如电压降至 V_2 的电极可收集电流 I_2 , 但不能收集电流 I_3 , 因为 I_2 流向电位为 V_3 的电极。图 8 中的阴影面积即表示收集极能回收的总功率, 如式(3)所列。

$$P_c = V_1 I_1 + V_2 I_2 + V_3 I_3 + V_4 I_4 \quad (3)$$

式中, P_c 代表收集极回收的总功率; V_1, V_2, V_3, V_4 分别是多级降压收集极的第 1 级, 第 2 级, 第 3 级, 第 4 级的电压; I_1, I_2, I_3, I_4 分别是多级降压收集极的第 1 级, 第 2 级, 第 3 级, 第 4 级的电流。

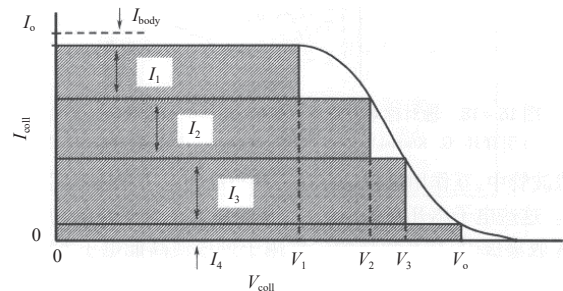


图 8 多级降压收集极功率回收示意图

Fig. 8 Power recovery diagram of multiple-level-voltage collector

随着收集极电极数量的增加, 行波管收集极效率会增加, 但降压级数增加到 4 级后, 效率提高很小。高效率空间行波管多采用四级降压收集极, 在毫米波段, 电子效率低于厘米波段, 为了进一步提升总效率, 本文设计了一种深度降压的高效率五级降压收集极。图 9 为 Q 波段 125 W 行波管相互作用后饱和输出的电子能谱分布曲线, 能量分级明显, 具有“台阶”状, 有利于收集极各电极电压的分级设计, 电子能谱的电压分布在 $-14000 \text{ V} \sim -9500 \text{ V}$ 之间。

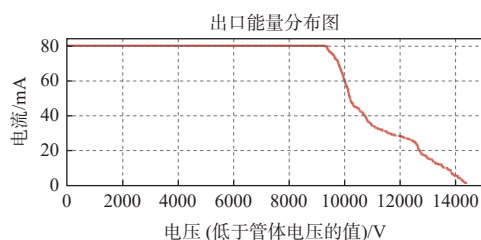


图 9 Q 波段 125 W 行波管相互作用后饱和输出的电子能谱分布

Fig. 9 Electron energy spectrum distribution of saturation output after the interaction of Q-band 125 W TWT

根据能谱分布及进入收集极的电子注的减速和发散情况,优化设计降压收集极的电极形状,如图 10 所示,等位面设计成凹向电子注进入收集极的孔径,迫使电子径向向外运动。收集极的电极形状设计成与等位面形状一致。电子孔径选择合适的尺寸,使电子刚好在具有相应电位的电极上着陆。顶部的尖锥用于形成使高能电子发散的电场,同时使暴露给高能电子的电子表面积最小,从而使产生的发射电子最少^{[12]302-318}。大多数电子打在电极背面,二次电子将向负电位区发射,也将会返回到电极表面。

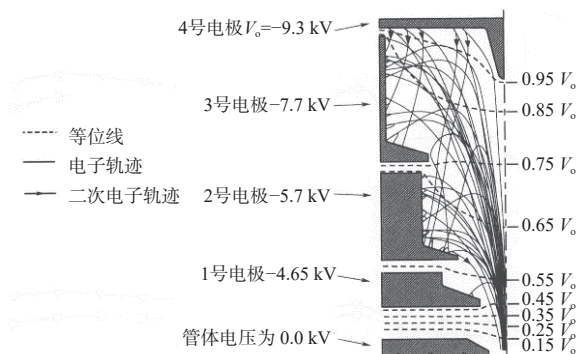


图 10 收集极中的等位面和电子轨迹

Fig. 10 Equipotential surfaces and electron trajectories in the collector

优化设计后,仿真结果如图 11 所示,优化设计后收集极^[16]回收效率达到 90%,实测收集极回收效率达到 85%。

4 Q 波段通信行波管测试结果

4.1 A 型大功率行波管测试结果

通过螺旋线慢波系统高效率良好非线性特性综合优化设计、五级降压收集极设计等技术,研制出的 A 型 Q 波段 125 W 高效率高增益行波管,如图 12 所示。

迭代计算次数: 9
总电流: 80.00 mA
回流电流: 0.63 mA
收集极效率: 90.01%
回流率: 0.78%
电极: 6个即: 按电压计算, 相同电压的两极按一极统计
电极: 0---电压 0 V 电流 0 mA 功耗 6.84 W
电极: 1---电压 -7 910 V 电流 3.75 mA 功耗 10.94 W
电极: 2---电压 -8 710 V 电流 28.75 mA 功耗 19.92 W
电极: 3---电压 -9 590 V 电流 17.19 mA 功耗 9.91 W
电极: 4---电压 -10 800 V 电流 9.69 mA 功耗 7 W
电极: 5---电压 -12 000 V 电流 20 mA 功耗 16.07 W

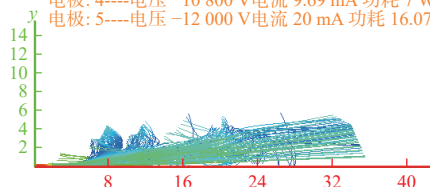


图 11 Q 波段 125 W 行波管收集极仿真结果

Fig. 11 Simulation results of Q-band 125 W TWT collector

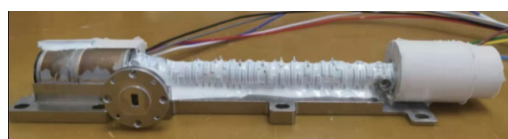


图 12 A 型通信行波管

Fig. 12 Type A communication TWT

A 型行波管实测在 Q 波段(带宽 2 GHz),饱和时输出功率大于 125 W,电子效率达到 14%,总效率达到 57% 以上,增益达到 45 dB,图 13 是该行波管的主特性测试结果,同时还具有良好的非线性特性,图中 f_0 就是工作频带的中间频点,主要参数如表 1 所列,实测与设计值基本符合。

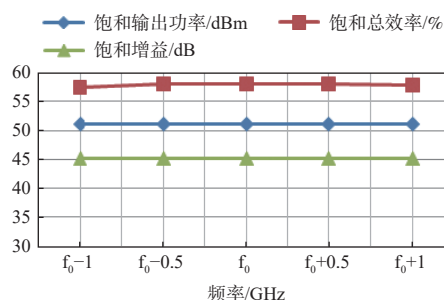


图 13 A 型通信行波管主特性测试结果

Fig. 13 Test results of main characteristics of type A communication TWT

使用矢量网络分析仪对 A 型行波管副特性参数进行测量,副特性是指在行波管工作过程中,除了其主要电性能(如增益、带宽、噪声等)之外的一些次要特性。主要包括相移、调幅调相转换(AM/PM)、二次谐波、三阶交调、小信号增益波动和小信号群时延波动等。这些副特性在行波管的工作过程中会对性能产生不良影响,需要进行改进和优化。测试结果如图 14,图 15 所示。

表 1 A 型行波管典型工作参数

Tab. 1 Typical operating parameters of type A TWT

参数	数值
频率	Q波段(带宽2 GHz)
输出饱和功率	≥125 W
饱和总效率	≥57%
输出功率回退效率	≥33%(OBO4.5 dB)
饱和增益	≥45 dB
P_{-1} (1 dB压缩点功率)	56 W
相移(饱和输入回退20 dB)	≤49°
AM/PM(饱和点)	≤4°/dB
三阶交调	≤-25 dB(OBO6 dB)
群时延波动	≤0.6 ns
尺寸	227 mm×51 mm×35 mm
重量	460 g

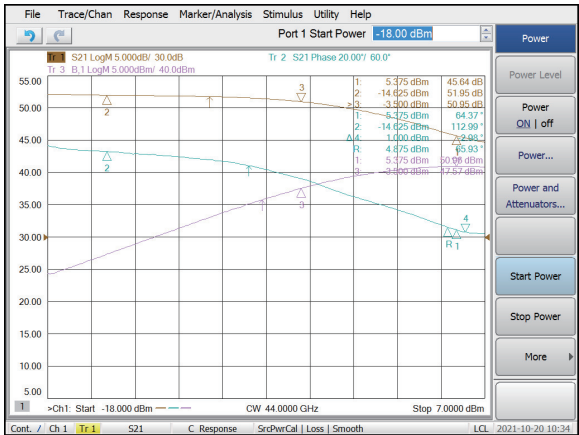


图 14 A 型行波管输出功率、增益、 P_{-1} 、相移、AM/PM 测试结果

Fig. 14 Test results of output power , gain, P_{-1} , phase shift, AM/PM of type A TWT

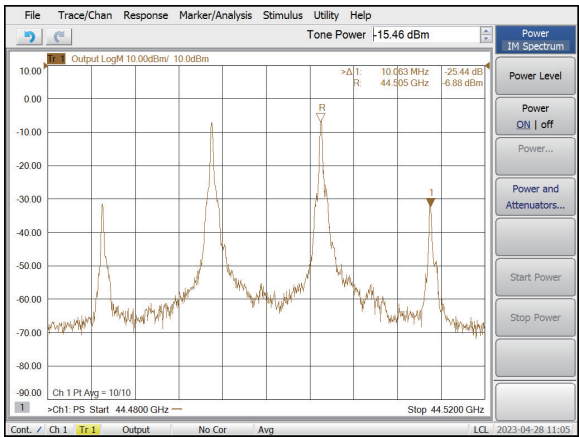


图 15 A 型行波管三阶交调 (OBO6 dB) 测试结果

Fig. 15 Test results of the third intermodulation (OBO6 dB) of type A TWT

4.2 B 型小型化行波管测试结果

行波管高频相互作用系统在饱和输出和回退状态输出时的电子能谱分布有差异,以 A 型行波管为例,图 16 为回退 4.5 dB 时相互作用后电子能谱分布曲线。为了提高回退效率,优化设计高频相互作用系统,使回退时电子能谱分布符合最大回收能量公式(3)的要求,以便于收集极各电极形状和电压进行兼顾饱和及回退两种状态进行折中平衡设计,在保障饱和时收集极回流电流尽量小的条件下,尽量提高回退时收集极效率,从而提高行波管回退时总效率。

实测 A 型行波管饱和输出功率回退 4.5 dB 时效率为 33%。

B 型行波管在 A 型行波管设计技术的基础上开展了小型化设计,同时为了提高回退效率,对高频系统和收集极系统进行兼顾饱和及回退状态做了相互作用后电子能谱、收集极电极形状、收集极各级电压等方面做了优化设计后,将饱和电子效率由 14% 进一步提升到 20% 以上,同时收集极效率在饱和时达到 88%,回退时达到 90% 以上。

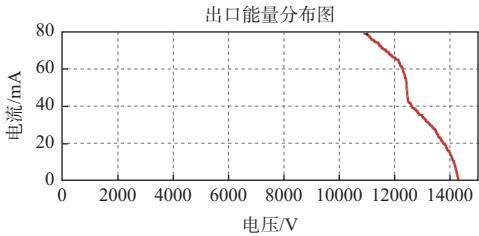


图 16 A 型行波管在回退 4.5 dB 时相互作用后电子能谱分布

Fig. 16 Electron energy spectrum distribution after the interaction when OBO 4.5 dB of type A TWT

研制出的 B 型行波管,行波管功率由 125 W 降额到 65 W,饱和效率 55%,OBO4.5 dB 时总效率 34%,重量由 460 g 进一步减轻到 350 g,重量是国外同类型产品^[17]的 1/3。B 型行波管可应用在要求工作在远离饱和点的回退点,同时又必须保持高效率的场合,其样管照片如图 17 所示,典型工作参数如表 2 所列。



图 17 B 型通信行波管

Fig. 17 Type B communication TWT

表 2 B 型行波管典型工作参数

Tab. 2 Typica operating parameters of type B TWT

参数	参数值
带宽	4.5 GHz
输出饱和功率	65 W
饱和总效率	55%
输出功率回退功率	23W(OBO4.5 dB)
输出功率回退效率	34%(OBO4.5 dB)
P ₁ (1 dB压缩点功率)	22 W
饱和增益	46 dB
小信号增益	53 dB(OBO4.5 dB)
相移(饱和输入回退20 dB)	≤45°
三阶交调	≤-25 dB(OBO6 dB)
群时延波动	≤0.6 ns
噪声系数	28 dB ~ 29 dB
尺寸	178 mm×51 mm×30 mm
重量	350 g

使用矢量网络分析仪对 B 型行波管的输出功率回退 6 dB 的三阶交调测试结果如图 18 所示。

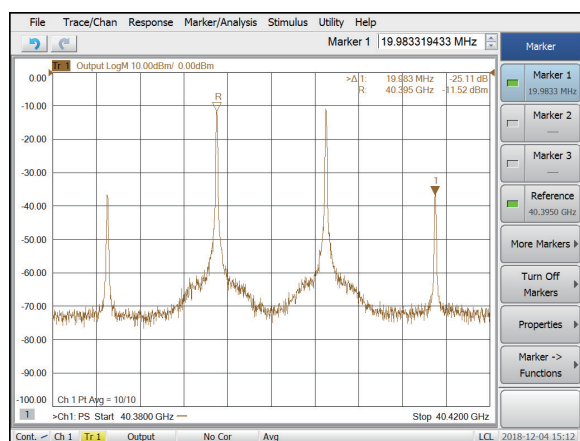


图 18 B 型行波管三阶交调 (OBO6 dB) 测试结果

Fig. 18 Test results of the third intermodulation (OBO6 dB) of type B TWT

5 结论

本文对 Q 波段通信行波管高频系统设计、返波振荡抑制和降压收集极开展技术研究,重点对高频相互作用系统进行优化电子效率、线性度和增益的综合设计,设计了深度降压的高回收效率五级降压收集极,研制出了两种 Q 波段通信行波管产品。其中, A 型通信行波管在 Q 波段(带宽 2 GHz)饱和功率达

到 125 W,总效率达到 57%,增益 45 dB,相移小于等于 49°,AM/PM(饱和点)小于等于 4°/dB; B 型通信行波管在 4.5 GHz 带宽内饱和功率 65 W 时总效率 55%,增益 46 dB,饱和功率回退 4.5 dB 时总效率 34%,增益 53 dB。后续还将在现有研制的基础上,继续对通信行波管进行提高频率、提升功率、效率、增益指标以及更小型化等方面持续研究,以适应多场景、多平台的毫米波行波管放大器应用需求。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 周颖,康丁文,楼大年,等.通信卫星灵活载荷技术综述[J].空间电子技术,2023,20(3):29-38.
- [3] KOSUGI N, MATSUMOTO D, MACHIDA T, et al. NEC network and sensor systems, ltd. Q/V-band helix TWT for future high throughput satellite uplink applications [C]/IEEE. 2020 IEEE 21st International Conference on Vacuum Electronics(IVEC).Monterey:IEEE,2020:125-126.
- [4] ARMSTRONG C M, SNIVELY E C, SHUMAIL M, et al. Frontiers in the application of RF vacuum electronics[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2023, 70(6): 2643-2655.
- [5] PI Z Y, KHAN F. An introduction to millimeter-wave mobile broadband systems[J]. IEEE Communications Magazine, 2011, 49(6): 101-107.
- [6] RAPPAPORT T S, SUN S, MAYZUS R, et al. Millimeter wave mobile communications for 5G cellular: it will work![J]. IEEE Access, 2013, 1: 335-349.
- [7] CHONG C K, MENNINGER W L. Latest advancements in high-power millimeter-wave helix TWTs[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2010, 38(6): 1227-1238.
- [8] HAO B L, ZHENG L, TIAN Y Y, et al. Millimeter wave helix TWTs' development for ECM and communication[J]. Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 2018, 32(5): 661-669.
- [9] BARKER R J, LUHMANN N C, BOOSKE J H, et al. Modern microwave and millimeter-wave power electronics[M]. Hoboken, New Jersey: IEEE, 2005: 825-827.
- [10] 郝保良,黄明光,刘濮鲲,等.理论分析毫米波螺旋线行波管慢波系统导体和介质损耗[J].电子与信息学报,2011,33(2):455-460.
- [11] 郑丽,郝保良,李紫琳,等.40~50 GHz 宽带螺旋线行波管高频系统研究[J].真空电子技术,2021,34(3):76-80.
- [12] GILMOUR A S JR. 速调管、行波管、磁控管、正交场放大器和回旋管[M].丁耀根,张兆传,译.北京:国防工业出版社,2012.
- [13] 电子管设计手册编辑委员会.中小功率行波管设计手册[M].北京:国防工业出版社,1976:104-113.

- [14] 王斌, 王风岩, 周旭, 等. 微波功率行波管及模块的应用发展趋势 [J]. 真空电子技术, 2019, 32(2): 1-7.
- [15] 郭开周. 行波管研制技术 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2008: 85-91.
- [16] 郝保良, 魏义学, 陈永利, 等. 微波功率行波管器件的发展和应用 [J]. 真空电子技术, 2018, 31(1): 10-18.
- [17] KUPIDURA D, VASSEUR F, LAURENT A, et al. Thales 45W and 100W Q-band conduction cooled travelling wave tubes[C]//IEEE. 2015 International Vacuum Electronics Conference (IVEC). Beijing: IEEE, 2015: 1-2.

作者简介: 郑丽 (1988—), 云南昭通人, 本科, 高级工程师。主要研究方向为毫米波行波管放大器。

E-mail: 13522852975@163.com