

文章编号: 2095-4980(2025)09-0883-08

高功率太赫兹双电压模式行波管高频结构设计

吝瑞博^{1,2}, 刘文鑫^{*1,2}, 张志强^{1,2}, 夏公傲^{1,2}, 李洪静^{1,2}, 周东兴^{1,2}

(1. 中国科学院 空天信息创新研究院, 北京 101400; 2. 中国科学院大学 电子电气与通信工程学院, 北京 101400)

摘要: 针对太赫兹 G 波段的行波管高频结构, 设计了一种大功率双电压模式行波管高频结构。通过设置双工作电压, 驱动高频结构运行于高功率脉冲模式和低功率连续波模式, 实现行波管双模工作。将该设计结构与弧形弯曲边界折叠波导和相速渐变技术结合, 提高双电压模式行波管的输出功率, 实现高功率模式最大输出功率 130 W, 低功率模式最大输出功率 52 W, 且两种模式下的 3 dB 带宽均达到 11 GHz 的设计要求。通过对双电压模式行波管的设计, 满足了电子对抗通信等领域对双模行波管的实际需求。本文设计的 G 波段双电压模式行波管, 具有高功率与宽带特性, 在太赫兹波段辐射源领域有着潜在的应用前景。

关键词: G 波段; 双电压; 高功率; 行波管

中图分类号: TN124

文献标志码: A

DOI: 10.11805/TKYDA2025049

Design of the high-frequency structure for a high-power terahertz dual voltage-mode Traveling-Wave Tube

LIN Ruibo^{1,2}, LIU Wenxin^{*1,2}, ZHANG Zhiqiang^{1,2}, XIA Gong'ao^{1,2}, LI Hongjing^{1,2}, ZHOU Dongxing^{1,2}

(1. Aerospace Innovation Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 101400, China; 2. School of Electronic, Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101400, China)

Abstract: Aimed at the terahertz G-band, a high-power dual-voltage-mode Traveling-Wave Tube (TWT) high-frequency circuit is designed. By employing two selectable beam voltages, the structure can be driven either in a high-power pulsed mode or in a low-power continuous-wave mode, endowing the TWT with true dual-mode operation. When combined with arc-curved-boundary folded-waveguide sections and a phase-velocity tapering technique, this design markedly boosts the output power up to 130 W in the high-power mode and 52 W in the low-power mode, while both modes achieve a 3-dB bandwidth of 11 GHz. The developed dual-voltage-mode G-band TWT meets the practical requirements for dual-mode sources in electronic-warfare and communication systems, and its high power and broad bandwidth make it a promising radiation source for terahertz applications.

Keywords: G-band; dual-voltage; high power; Traveling Wave Tubes

太赫兹真空电子器件是一种典型的太赫兹辐射源, 在高频率、高功率、宽频带的应用场合保持着优势地位^[1-2]。太赫兹双模行波管(支持高功率脉冲波与低功率连续波工作模式)是微波真空电子器件领域的重要研究方向。双模行波管具有宽频带、高功率、多模式兼容性, 广泛用于卫星通信、雷达系统(如机载火控雷达、相控阵雷达)、电子对抗设备及太空探测等领域^[3]。当行波管工作于连续波状态时, 输出峰值功率较低, 多用于机载雷

收稿日期: 2025-02-27; 修回日期: 2025-05-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U22A2020; U2341209)

*通信作者: 刘文鑫 email:lwenxin@mail.ie.ac.cn.

引用格式: 吝瑞博, 刘文鑫, 张志强, 等. 高功率太赫兹双电压模式行波管高频结构设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2025, 23(9): 883-890. DOI: 10.11805/TKYDA2025049.

Citation format: LIN Ruibo, LIU Wenxin, ZHANG Zhiqiang, et al. Design of the high-frequency structure for a high-power terahertz dual voltage-mode Traveling-Wave Tube[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2025, 23(9): 883-890. DOI: 10.11805/TKYDA2025049.

达向下进行对地观测,以及在电子对抗中以连续波方式对敌方进行阻塞式干扰;当工作于脉冲波状态时,峰值功率较高,一般用于机载雷达向上和向前搜索远距离目标,以及在电子对抗中以脉冲波的方式对敌方进行欺骗式干扰。美国瓦里安联合公司研制的机载电子对抗双模行波管^[4],连续波输出功率为 500 W,脉冲输出功率为 700 W,频率范围 9.6~9.8 GHz,两种模式下的增益分别为 40.5 dB 和 30.5 dB。美国微波公司研制的 S 波段双模行波管^[5],脉冲模式和连续波模式下的增益分别为 32 dB 和 26 dB,2 种工作模式下的效率分别为 23%~29%、21%~27%。加州大学在 2017 年提出一种可提供不同电流的双模电子枪,设计出一种工作于 0.2 THz 的双模行波管。该管采用带状束工作,在低功率连续波模式下,电子枪输出电流为 0.086 6 A,在 190~210 GHz 频率范围内,输出功率超过 10 W;在高功率脉冲模式下,电子枪输出电流为 0.212 6 A,190~210 GHz 频率范围内,输出功率超过 100 W^[6]。国内,北京真空电子技术研究所研制出 X 波段大功率双模行波管^[7]。2021 年,北京真空电子技术研究所研制频段为 7.5~18 GHz 的诱饵用快启双模行波管^[8]。

国内外已对工作在单频段的双模行波管进行研究,在 0.2 THz 双电压模式的双模行波管鲜有研究。本文提出工作在 G 波段的双电压模式行波管高频结构,并且工作电流相比于其他 G 波段的行波管小,具备平均功率、电子效率高等优势。

1 G 波段折叠波导慢波结构

1.1 折叠波导高频结构

折叠波导可用波导的宽边 a 、直波导高度 h 、折叠波导的窄边 b 和半周期长度 p 来描述。 r 为电子注通道半径。在该结构中,电子注和电磁波分别沿圆柱通道与矩形波导前进。图 1 为折叠波导结构示意图,基于文献与设计经验,G 波段的折叠波导慢波结构参数如表 1 所示。折叠波导组成的高频结构是注-波互作用的关键部件,其行波管的输出性能由电子注与电磁波的相互作用强弱决定。

注-波相互作用通常从两个方面描述:

1) 用色散特性表征电子注与电磁波相速的同步程度。在分析色散特性时,假设在慢波结构中传播的电磁波的波长、截止波长分别为 λ 、 λ_c ,实际传输距离为 L , w 为电磁波在传播过程中的波长, β_n 为相位常数, p 为半周期长度, c 为光速,则得到 n 次空间谐波表达式为^[9]:

$$v_{pn} = \frac{w}{\beta_n} = \frac{c}{\frac{L}{p} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_c}\right)^2} + \frac{(2n+1)\lambda}{2p}} \quad (1)$$

将通过 Matlab 实现的等效电路法计算得到的色散曲线与 CST 求解的色散曲线对比,结果如图 2 所示。色散曲线是关于 π 对称的以 2π 为周期的函数。在 CST 中只能以一整个周期计算色散曲线,得到的工作区间为 $2\pi \sim 3\pi$;通过 Matlab 实现的等效电路法计算得到的色散曲线,工作区间为 $\pi \sim 2\pi$ 。为了与 CST 一致,通过相移 π 得到工作区间为 $2\pi \sim 3\pi$ 。

2) 用耦合阻抗表征电子注与电磁波纵向电场分量交换能量的能力。耦合阻抗是表征电子注与微波场之间相互作用强弱的重要参量,是注-波相互作用过程中单位电流密度所对应的功率传输能力的量度:

$$K_n = \frac{\eta}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_c}\right)^2}} \times \frac{2b}{a} \left(\frac{1}{\beta_n p} \times \frac{\sin\left(\frac{\beta_n b}{2}\right)}{\frac{\beta_n b}{2}} \right)^2 \quad (2)$$

式中: β_n 为 n 次空间谐波的相位常数; η 为传输介质的阻抗。

通过使用 Matlab 数学仿真软件得到折叠波导耦合阻抗图,如图 3 所示。

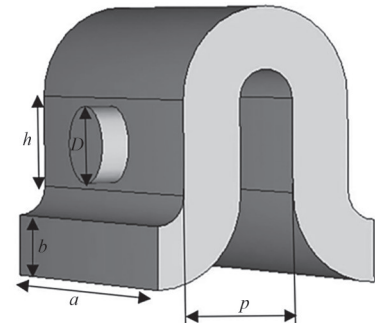


Fig.1 Structure model of folded waveguide
图 1 折叠波导结构模型

表 1 折叠波导结构参数(单位:mm)

Table 1 Construction parameters of folded waveguide(unit:mm)

parameter	dimension
waveguide wide side a	0.83
waveguide narrow side b	0.16
straight waveguide height h	0.26
half-period length p	0.31

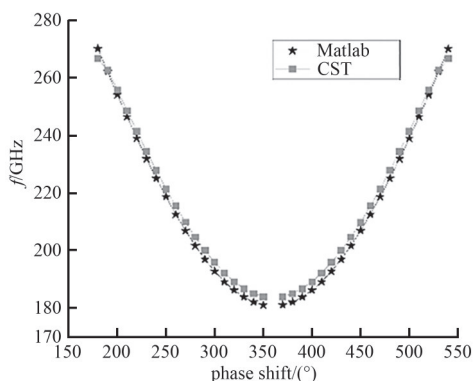


Fig.2 Dispersion curves
图2 色散曲线

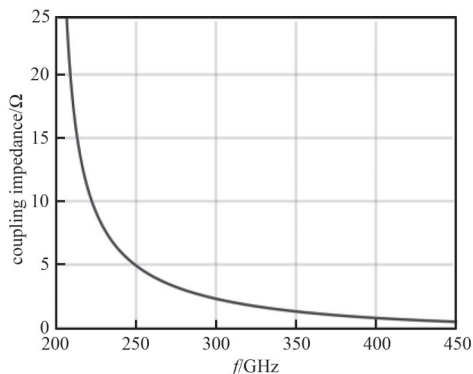


Fig.3 Coupling impedance
图3 耦合阻抗

1.2 弧形弯曲边界折叠波导

北京真空技术研究所提出的弧形弯曲边界慢波结构可提高电子注效率和输出功率^[10], 使高模脉冲波状态达到百瓦量级。该结构相比于普通折叠波导慢波结构, 具有更高的耦合阻抗和更优秀的色散曲线特性。该结构示意图如图4所示, 相比于普通结构, 外圆圆心向外移动 $d_{out}=0.04$ mm, 内圆圆心向内移动 $d_{in}=0.03$ mm。设计一段周期数为80的高频结构, 对比弧形弯曲的折叠波导与普通折叠波导在相同工作电压、电流和激励信号下, 输出功率与频率的关系。如图5所示, 在中心频率213 GHz处, 弧形弯曲折叠波导输出功率较普通折叠波导输出功率提升36%, 证实采用弧形弯曲边界结构可有效提升中心频率的输出功率。

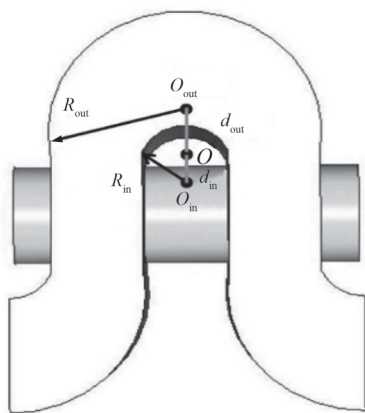


Fig.4 Curved folded waveguide
图4 弧形弯曲边界折叠波导

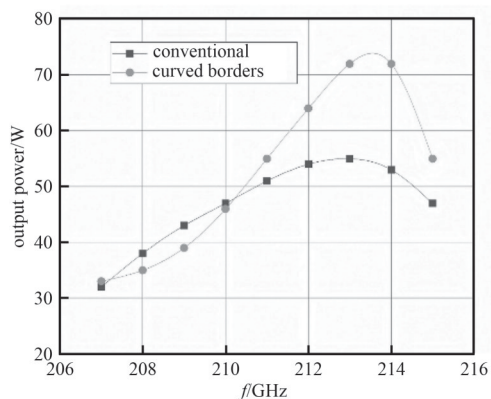


Fig.5 Comparison of the output power of the two structures
图5 两种结构输出功率对比图

2 双电压模式行波管设计

电子科技大学巩华荣教授团队通过在折叠波导中引入负色散技术^[11], 在不改变电压的情况下优化Q波段折叠波导的结构参数, 设计出三段式折叠波导实现带宽与效率的提升。由于本文设计的频段较高, 在设计负色散时结构尺寸难于把握, 因此采用变电压法。在方便加工的前提下, 设计2条电子注电压与折叠波导色散曲线匹配, 使同一高频结构可有2种输出模式: 在低频段匹配高电压, 输出更高的功率, 称为高模; 在高频段匹配较低的电压, 输出较低的功率, 即低模。2种模式工作在不同的频率范围内, 根据折叠波导的色散特性将2种模式的工作频带错开设计, 从而实现不同输出功率的双模工作模式。如图6所示, 工作电压越低, 折叠波导的匹配频率越高。分析中同时考虑电子注与场相互作用, 见式(3), 输出功率与工作电压的大小正相关, 因此设计高模工作电压高于低模工作电

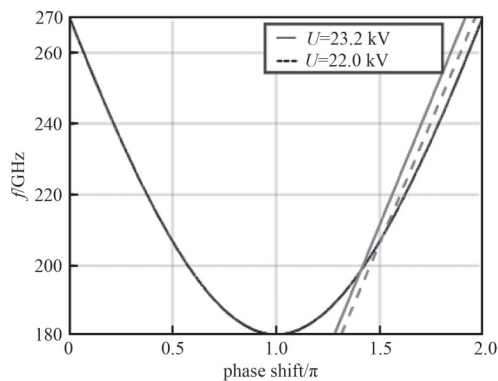


Fig.6 Dual-voltage dispersion curves
图6 双电压色散曲线图

压。根据皮尔斯小信号理论，在同一高频结构中完成 2 种不同电子注电压与微波同步，如式(4)所示，当工作电压靠近饱和电压时，输出功率增大，因此在设计双电压模式行波管时，将饱和电压设置为高功率模式的工作电压，并将低电压作为低功率模式工作电压。

$$P_{out} \approx kU^n \tag{3}$$

式中： P_{out} 为行波管的输出功率； U 为工作电压； k 为与行波管结构、电子注参数等相关的系数； n 为一个大于 1 的指数，通常在 1.5~3 之间。

$$P_{out} = P_{sat} \left(1 - \exp\left(-\frac{U}{U_{sat}}\right) \right)^2 \tag{4}$$

式中： P_{sat} 为饱和功率； U_{sat} 为饱和电压。

根据表 1 中给出的参数，采用弧形弯曲边界折叠波导设计两段式双模行波管，中间加载衰减器将高频结构分为 2 段，第一段的增益通常控制在 10~20 dB 范围。这样既可提供足够大的初始放大，以支持后续相互作用区的增益积累，又可避免过高的增益导致的自激振荡^[12]。中间的衰减器表面涂有吸波材料氧化铍，可很好地吸收反射信号，以及降低自激振荡的风险^[13]。建模如图 7 所示。

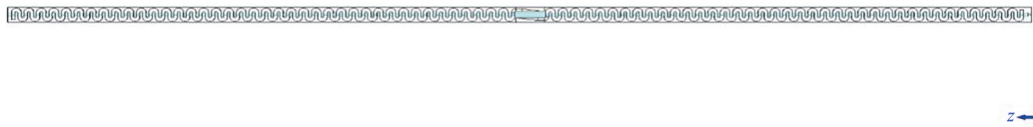


Fig.7 A traveling wave tube loaded with an attenuator
图 7 加载衰减器的行波管

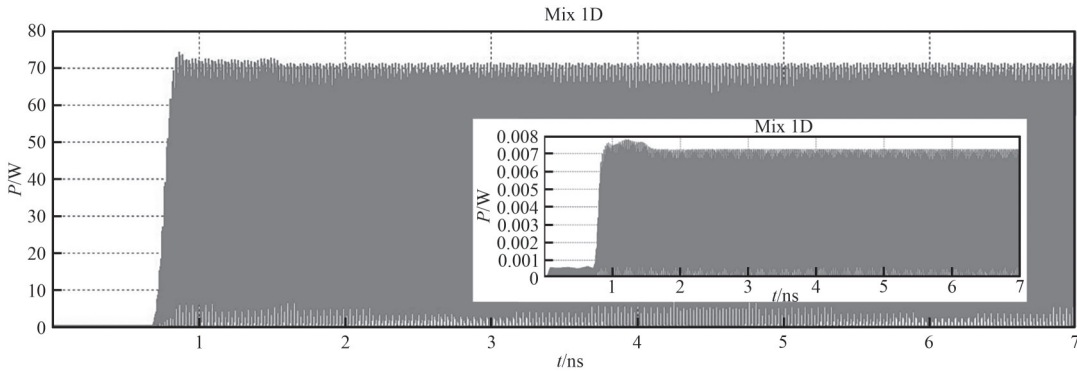


Fig.8 Comparison of the output signal with the reflected signal
图 8 输出信号与反射信号对比

设置电子注电压为 23 kV，电流为 70 mA，输入功率为 30 mW，相互作用模拟仿真的边界材料采用等效电导率为 2.4×10^7 S/m 的无氧铜。212 GHz 下的输出信号和反射信号对比如图 8 所示，经过 7 ns 的仿真得到稳定输出功率 71 W。反射信号用图中的小窗口表示，相比于输出信号，其大小可忽略不计。图 9 为输出功率与频率关系图，从图中可以看出，峰值输出功率为 71 W，3 dB 带宽为 11 GHz。

为进一步提高折叠波导行波管的输出功率，采用相速渐变技术对结构参数进行优化。改变第二段的周期数和结构参数，使电子注速度与电磁波相速再同步，延长相互作用时间，实现能量交换效率的提升。电磁波的归一化相速度为：

$$\frac{v_p}{c} = \frac{1}{h + \frac{\pi p}{2} \sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2} + \frac{c}{2pf}} \tag{5}$$

式中： v_p 为电磁波的相速度； f 为电磁波的频率； f_c 为截止频率。

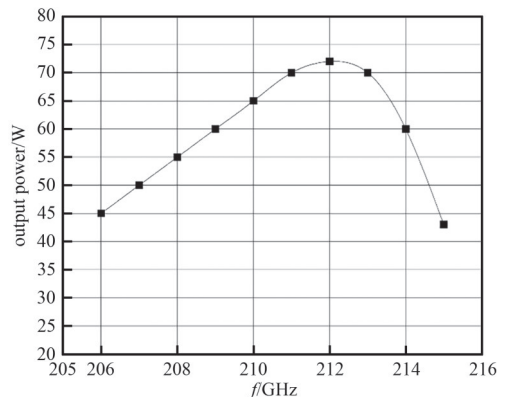


Fig.9 Output power vs. frequency
图 9 输出功率与频率关系图

通过调整 h 与 p 可降低电磁波相速度。经过仿真优化, 两段式慢波结构如图 10 所示。第一段周期数为 80, 第二段周期数为 15, 改变第二段的直波导高度为 0.29 mm, 半周期长度为 0.295 mm。采用图 7 中行波管相同的电压、电流和输入功率, 经过仿真计算得到饱和输出功率为 132 W, 增益达到 36.5 dB, 如图 11 所示, 峰值功率相比于未采用相速渐变提高 83%。图 12 为输出功率及增益随频率的变化关系, 在 204~214 GHz 范围内, 输出功率大于 70 W, 增益大于 34 dB。

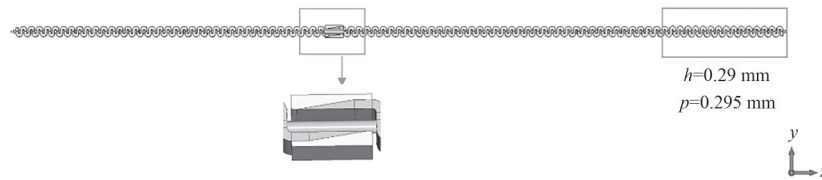


Fig.10 Folded waveguide slow-wave structure with phase velocity gradient
图 10 带相速渐变的折叠波导慢波结构

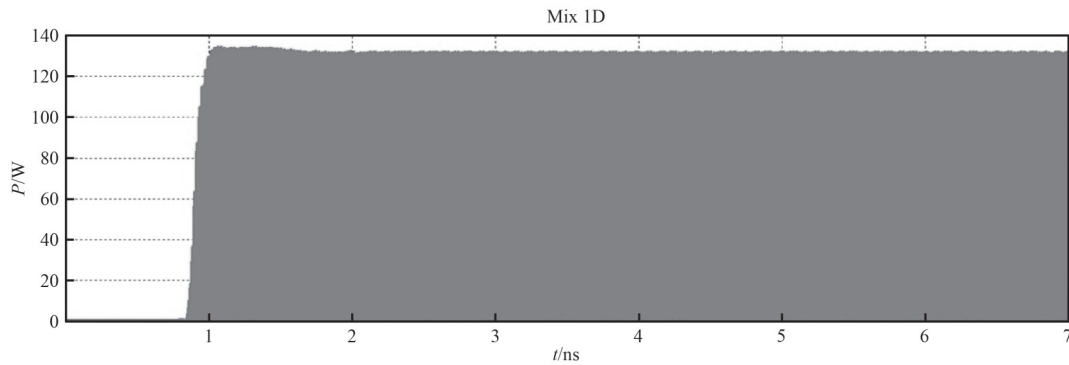


Fig.11 Peak power
图 11 峰值输出功率

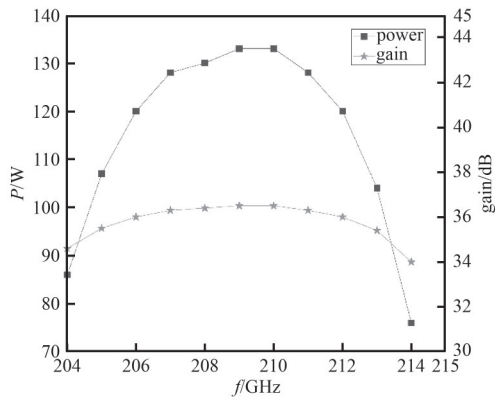


Fig.12 High-mode output power vs. gain
图 12 高模输出功率与增益图

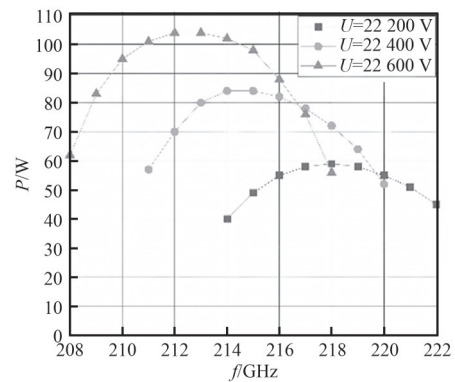


Fig.13 The effect of voltage on output power and bandwidth
图 13 电压对输出功率与带宽的影响

通过改变电子注电压确定低功率连续波模式的工作电压, 图 13 为同一慢波结构中不同电子注电压所对应的输出功率与频率的对应关系。从图中可以看出, 电压越低, 平均功率也越低, 且向高频段移动。当低模工作电压为 22.2 kV 时, 在 214~223 GHz 频率范围内, 平均输出功率为 50 W, 最高输出功率为 60 W, 增益为 32 dB, 3 dB 带宽为 11 GHz。但一般的电子枪通常会保持相同的导流系数, 即改变电子注的电压, 其电流大小也会发生变化, 如式(6)所示。假设高模电压为 23 kV, 电流大小为 70 mA; 当电压改为 22.2 kV, 则对应的电流大小为 66.4 mA。

$$P = \frac{I}{U^{3/2}} \tag{6}$$

图 14 表明在不同的频率范围内, 高电压模式下的峰值功率超过低电压模式功率 2 倍以上, 符合双电压模式

行波管高频结构的设计要求。

3 双电压模式行波管参数敏感性分析

由于实际制备的慢波结构的尺寸与理论优化的尺寸存在偏差，因此不可能保证加工过程中的各项参数都与理论设计完全一致，需分析结构参数变化对输出功率的影响。图 15~16 表明，行波管对主要结构参数的变化敏感，2 种模式下波导宽边 a 及半周期长度 p 对行波管的输出功率影响大，加工误差最好控制在 0.005 mm 内。而波导窄边以及直波导高度对行波管的输出功率影响较小，误差容许度可控制在 0.01 mm 内。

4 结论

本文提出一种 G 波段大功率双电压模式折叠波导行波管的设计方法，结合小信号理论和折叠波导色散特性，设计并实现了在同一慢波结构下，改变电压得到工作在两种不同频率范围的高功率输出模式和低功率输出模式。采用弧形弯曲边界折叠波导及相速渐变技术优化高频结构参数，进一步提高行波管的功率及增益：高功率模式输出功率为 132 W，增益为 36.5 dB；低功率模式输出功率为 52 W，增益为 32 dB。其带宽均为 11 GHz，电子效率分别为 8.07% 与 3.21%，有效提升了信号的输出功率以及电子效率。这一成果为太赫兹高频结构向高性能、小型化方向发展提供新范式。

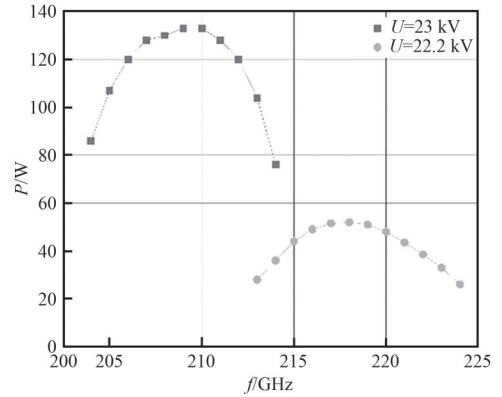


Fig.14 Comparison of output power and bandwidth in high and low modes

图 14 高低模式输出功率与带宽对比图

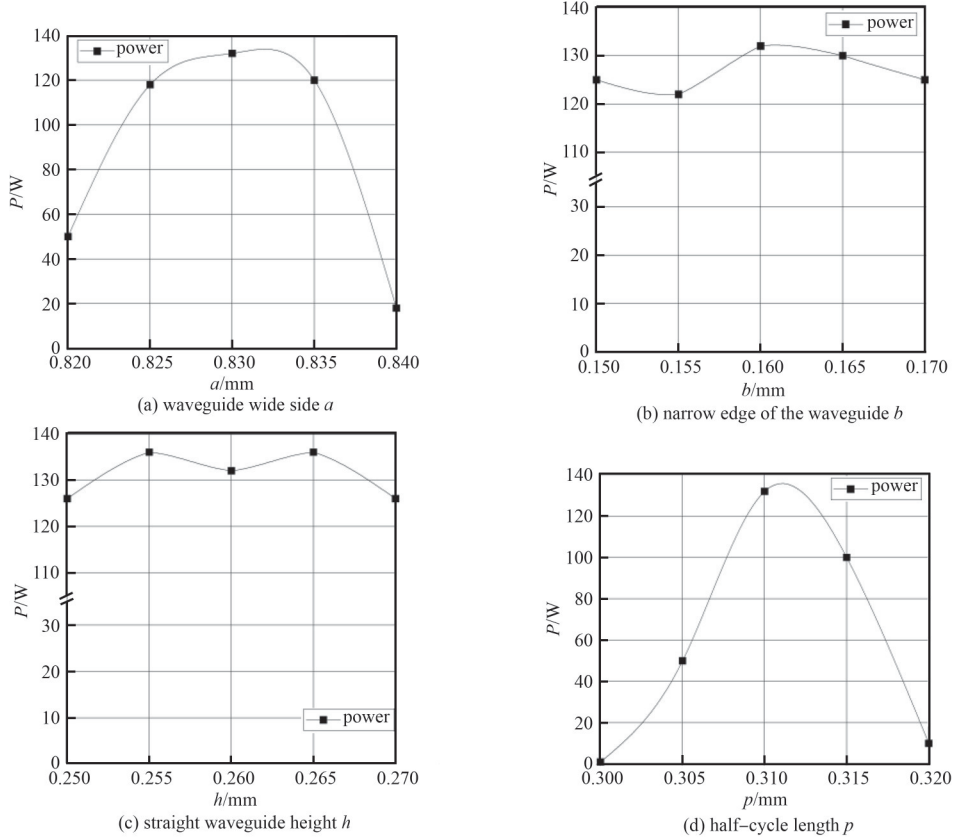


Fig.15 High-modulus state sensitivity analysis

图 15 高模输出敏感性分析

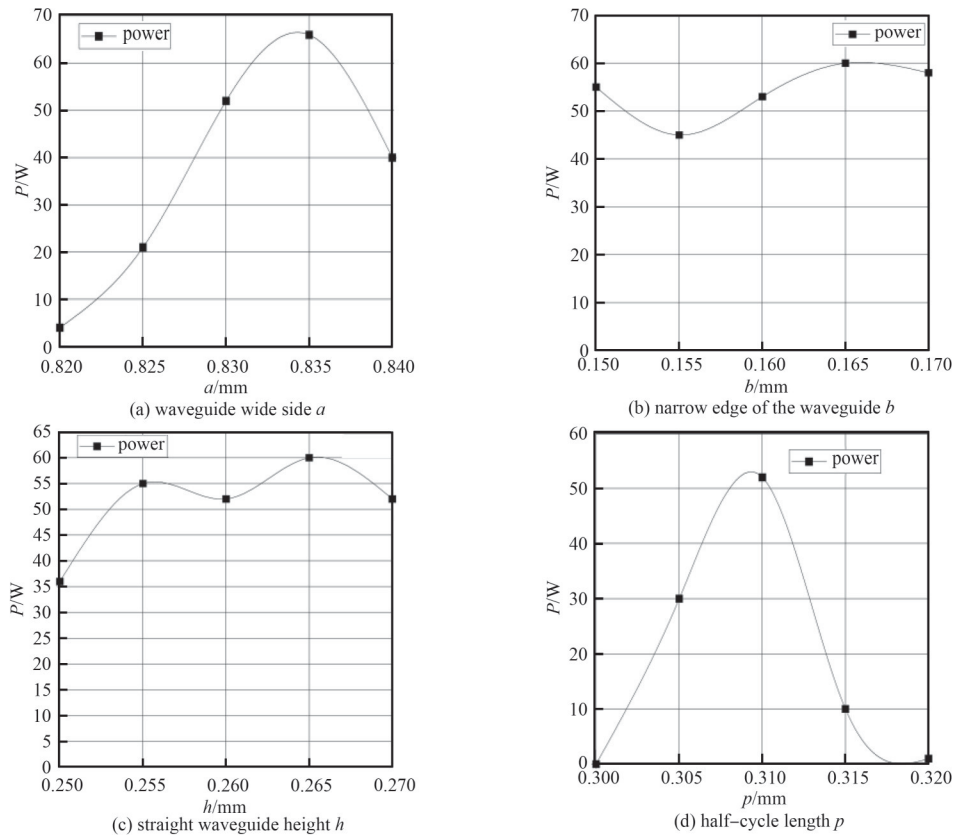


Fig.16 Low-modulus sensitivity analysis

图 16 低模输出敏感性分析

参考文献:

- [1] LIU Shenggang. The possible contributions of vacuum electronics to terahertz radiation sources[C]// IEEE International Conference on Vacuum Electronics. Seoul,Korea(South):IEEE, 2003:357. DOI:10.1109/IVEC.2003.1286388.
- [2] 刘盛纲,钟任斌. 太赫兹科学及其应用的新发展[J]. 电子科技大学学报, 2009,38(5):481-486. (LIU Shenggang,ZHONG Renbin. New development of terahertz science and its applications[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2009,38(5):481-486.) DOI:10.3969/j.issn.1001-0548.2009.05.001.
- [3] 韩家瑞. 双模行波管概述[J]. 电子管技术, 1979(4):4-7. (HAN Jiarui. Overview of dual-mode traveling wave tube[J]. Electron Tube Technology, 1979(4):4-7.)
- [4] AYERS W R,MIRAM G V,SCHRIEVER J,et al. High power dual mode coupled-cavity TWT[C]// 1976 International Electron Devices Meeting. Washington,DC,USA:IEEE, 1976:256-259. DOI:10.1109/IEDM.1976.189032.
- [5] COOKE J A,HAMILTON J J,RACZYNSKI A T. Development of a double-octave, grid-controlled, dual-mode TWT[C]// 1973 International Electron Devices Meeting. Washington,DC,USA:IEEE, 1973:175-178. DOI:10.1109/IEDM.1973.188677.
- [6] YUAN Z,GAMZINA D,LUHMANN N C. 0.2 THz dual mode sheet beam traveling wave tube[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2017,64(4):1767-1773. DOI:10.1109/TED.2017.2661753.
- [7] 杨定义. X波段大功率双模行波管[C]// 中国电子学会真空电子学会第十四届学术年会暨军用微波管研讨会. 丹东:中国电子学会, 2004:59-62. (YANG Dingyi. X-band high-power dual-mode traveling wave tube[C]// The 14th Annual Conference of the Vacuum Electronics Society of the Chinese Institute of Electronics and Symposium(on Military Microwave Tubes. Dandong,China:Chinese Institute of Electronics, 2004:59-62.)
- [8] 张磊,邱立,王严梅,等. 大功率快启双模行波管研制[J]. 真空电子技术, 2021(2):67-72. (ZHANG Lei,QIU Li,WANG Yanmei, et al. Development of high-power fast-start dual-mode traveling wave tube[J]. Vacuum Electronic Technology, 2021(2):67-72.) DOI:10.16540/j.cnki.cn11-2485/tn.2021.02.14.
- [9] 张长青. 大功率毫米波折叠波导行波管的研究[D]. 成都:电子科技大学, 2011. (ZHANG Changqing. Research on high-power millimeter-wave folded waveguide traveling wave tube[D]. Chengdu,China:University of Electronic Science and Technology of China, 2011.) DOI:10.7666/d.D763340.

- [10] 张小青,蔡军,杜英华,等. W波段行波管功率提升研究[J]. 真空电子技术, 2023(4):54-58,74. (ZHANG Xiaoqing,CAI Jun,DU Yinghua,et al. Research on power enhancement of W-band traveling-wave tube[J]. Vacuum Electronic Technology, 2023(4):54-58,74.) DOI:10.16540/j.cnki.cn11-2485/tn.2023.04.11.
- [11] 李梦真. 高波段行波管带宽拓展与效率提高的研究[D]. 成都:电子科技大学, 2021. (LI Mengzhen. Research on bandwidth expansion and efficiency improvement of high-band traveling-wave tube[D]. Chengdu,China:University of Electronic Science and Technology of China, 2021.) DOI:10.27005/d.cnki.gdzku.2021.003662.
- [12] LIMBURG H,ZAMORA D,DAVIS J,et al. 75 Watt,59 to 64 GHz space TWT[R]. NASA Contract or Report, 1995.
- [13] 郜健,郝保良,苏小刚,等. Ka波段1 kW螺旋线脉冲行波管的高频结构设计[J]. 真空电子技术, 2017(2):33-35. (GAO Jian,HAO Baoliang,SU Xiaogang,et al. Design of high-frequency structure of Ka-band 1 kW spiral pulsed traveling-wave tube[J]. Vacuum Electronic Technology, 2017(2):33-35.) DOI:10.16540/j.cnki.cn11-2485/tn.2017.02.010.

作者简介:

齐瑞博(1999-),男,在读硕士研究生,主要研究方向为太赫兹高频结构 .email:2439058893@qq.com.

刘文鑫(1976-),男,博士,研究员,主要研究方向为太赫兹功率源、高功率微波.

张志强(1975-),男,博士,研究员,主要研究方向为高功率微波毫米波器件理论与技术.

夏公傲(1999-),男,在读硕士研究生,主要研究方向为行波管收集级.

李洪静(1999-),女,在读硕士研究生,主要研究方向为行波管高频结构设计.

周东兴(1999-),男,在读博士研究生,主要研究方向为交错双栅行波管.