

文章编号: 2095-4980(2023)07-0895-06

G 波段行波管电子枪设计与实验

李 莹, 边兴旺, 张 琳, 宋博文, 潘 攀, 蔡 军

(中国电子科技集团公司第十二研究所 微波电真空器件国家级重点实验室, 北京 100015)

摘 要: 设计了用于 G 波段行波管的聚焦极调制皮尔斯电子枪, 电子注电压 20 kV, 电流 50.9 mA, 注腰半径 0.056 mm, 射程 10.3 mm。利用热-结构耦合分析和电子注轨迹仿真方法, 分析了热形变对电子枪性能造成的显著影响。为了消除电子枪热形变的影响, 设计了装配模具进行补偿, 并得到了实验验证。该电子枪已用于多种 G 波段行波管, 解决了关键部件技术问题。

关键词: G 波段行波管; 电子枪; 热形变

中图分类号: TN124

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2021433

Design and experiment research on electron gun of G band traveling wave tube

LI Ying, BIAN Xingwang, ZHANG Lin, SONG Bowen, PAN Pan, CAI Jun

(National Key Laboratory of Science and Technology on Vacuum Electronics, The 12th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Beijing 100015, China)

Abstract: A focus electrode modulation Pierce gun for G band traveling wave tube is designed, with a beam voltage of 20 kV, current of 50 mA, waist radius of 0.056 mm, and a waist position of 10.3 mm. The impact of thermal deformation on the performance of the electron gun is analyzed by using thermal-structure coupling analysis and electron beam trajectory simulation method. In order to eliminate the influence of thermal deformation, an assembly fixer for compensation is designed and verified by experiments. The electron gun has been applied in a variety of G band traveling wave tube, and has solved technical problems of the key component.

Keywords: G band traveling wave tube; electron gun; thermal deformation

太赫兹(0.1~10 THz)频谱资源丰富, 在高分辨力实时成像、抗干扰保密通信以及高速高数据率传输等方面具有重要的应用前景^[1-2]。太赫兹行波管由于具备功率容量和带宽优势, 已成为国内外真空电子器件领域研究的热点。目前国内外研制的太赫兹行波管主要工作在 220 GHz、233 GHz、337 GHz、670 GHz、850 GHz、1.03 THz 等频段^[3-11]。电子枪作为行波管的主要部件之一, 其性能直接影响太赫兹行波管的功率、增益、工作比、效率等指标^[12]。随着频率的升高, 太赫兹行波管的电子注和电子枪的电极等尺寸减小至亚毫米甚至更低量级^[13], 微细传输通道与高电流密度电子注之间的矛盾为电子枪的设计带来挑战, 并且电子枪性能受电极尺寸变化的影响更加敏感, 关键尺寸误差需要控制在微米量级, 对电子枪的加工和组装提出了更严苛的要求。

此外, 太赫兹行波管电子枪的热形变量会直接影响电子枪性能。文献[14]在行波管电子枪热分析中发现热形变对注腰半径和面积压缩比影响较大; 文献[15]研究了 220 GHz 行波管电子枪的各结构参数在热形变前后的对应关系, 发现热形变后电极间距最大变化量为 0.08 mm。

本文针对 G 波段(140~220 GHz)太赫兹行波管的电子枪进行了设计与实验研究, 分析了电子枪的热形变问题, 设计了电子枪装配模具对热形变量进行补偿, 通过实验证实了补偿效果, 实现了电子枪的设计指标。

1 电子枪设计

根据文献[16]研制的 G 波段行波管, 电子枪的设计目标为: 阴极电压 20 kV, 电子注电流 50 mA, 注腰半径约 0.06 mm, 射程大于 10 mm。设计采用图 1 所示的聚焦极调制的皮尔斯电子枪, 采用 M 型热扩散阴极^[17], 设计发射电流密度约 5 A/cm², 阴极半径 r_k 为 0.58 mm。通过 Vaughan 理论^[17]计算方法迭代得到阴极面收敛角 $\theta=3.75^\circ$,

收稿日期: 2021-12-25; 修回日期: 2022-02-26

采用高导磁的铁镍钴磁封合金作为枪壳材料, 既可实现阴极区的磁屏蔽, 又保证了枪壳与陶瓷结构的可靠封接, 图 4 为太赫兹行波管轴线上的磁场强度分布模拟结果, 其中周期永磁聚焦系统磁场峰值为 0.6 T, 阴极表面磁场强度低于 0.000 1 T, 表明电子枪起到了磁屏蔽的效果。聚焦极和阳极选用高熔点、高强度、低蒸汽压的

钼材料，提高真空间隙耐压^[19]。阴极组件采用双层薄壁热屏蔽筒结构支撑，可降低阴极组件与外部零件之间的导热率，提高热丝加热效率。

除了电子枪的电性能设计外，还需要重点关注阴极的温度和电子枪的热形变，以下针对这 2 点展开探讨。

2 电子枪温度分析

图 5 为热阴极温度与阴极发射电流的关系曲线(Miram 曲线)图^[20]。随温度增加，热阴极发射特性分为温度限制区和空间电荷限制区。太赫兹行波管电子枪的阴极工作在空间电荷限制区，设计工作温度约为 1 050 ℃，位于“拐点”后。由于阴极温度显著影响其发射电流的大小，因此采用有限元数值模拟和实验方法进行验证。

采用 Ansys^[21]稳态热模块模拟电子枪的温度分布。依据传热学基本原理，热量传递方式包括热对流、热传导、热辐射 3 种，相应的有限元控制方程为^[22]：

$$[M]\{x\} + [C]\{x\} + [R]\{x\} = \{b\}$$

(1)

式中： M 为热对流矩阵； C 为导热矩阵； R 为热辐射矩阵； x 为法向温度矢量； b 为热载荷矢量。

对于实际工况下的电子枪，以上 3 种传热方式均存在，据此设置相应的换热边界条件：枪壳外表面设置与空气的自然对流换热；零件焊接区域通过设置绑定接触和热阻实现热传导；电子枪内部为高真空环境，热辐射作用显著，内部零件间设置辐射换热。相应参数设置如表 2 所示。

表 2 热边界条件设置
Table2 Thermal boundary conditions

parameter	value
convection coefficient/(W·m ⁻² ·K ⁻¹)	10.0
contact conductance(metal-metal)/(10 ⁴ W·m ⁻² ·K ⁻¹)	8.0
contact conductance(metal-ceramic)/(10 ⁴ W·m ⁻² ·K ⁻¹)	3.0
radiation emissivity(metal)	0.2
radiation emissivity(cathod)	0.8

由于电子枪的热屏蔽筒厚度仅为 0.02 mm，对其采用壳单元进行划分保证网格质量，其余零件采用实体单元四面体网格划分，网格最大尺寸 0.6 mm，最小为 0.1 mm，保证最小尺寸方向至少包含 2 层网格单元。模型整体网格单元质量为 0.85。模拟了不同热丝功率下的阴极温度，结果如图 6 所示。

装配电子枪样品并进行阴极温度实验。实验中对电子枪组件单独排气，保持内部高真空环境；调整热丝电压和电流，使阴极工作在不同温度。采用红外测温仪对阴极表面温度进行监测，得到热丝功率与阴极表面温度之间的对应关系如图 6 所示。实验结果显示，当热丝功率为 3.8 W 时，电子枪阴极表面温度达到了工作点 1 050 ℃，相应的模拟温度为 1 055 ℃，模拟值在实验误差线范围内，验证了模拟结果的准确性。曲线两端最大误差为 6.7%，产生的主要原因是模拟中设置的导热系数以及热辐射系数等参考温度均为 1 000 ℃，忽略了参数随温度的非线性变化影响。

图 7 为工况下电子枪的模拟温度分布云图，可以看到，阴极表面温度为 1 055 ℃时，聚焦极表面温度为 53 ℃，阳极表面温度 44 ℃，枪壳外表面最低温度仅 40 ℃，双层热屏结构热阻作用显著，有效抑制了热量散失。

3 电子枪热形变分析

零件在热载荷作用下会产生形变，由于温度场的不均匀性以及各零件材料热膨胀系数不同，工况下电子枪内部电极尺寸和极间距变化难以解析^[23]，因此采用有限元模拟分析。将热仿真结果作为载荷传递给 Ansys 结构模

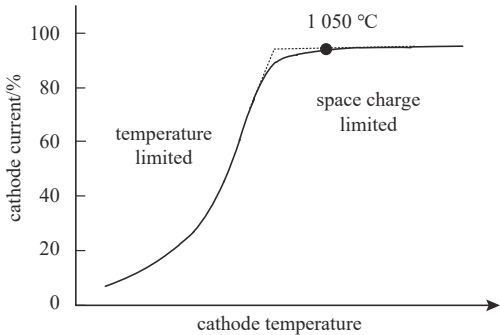


Fig.5 Emitted current curve of thermal cathode
图 5 热阴极发射电流曲线

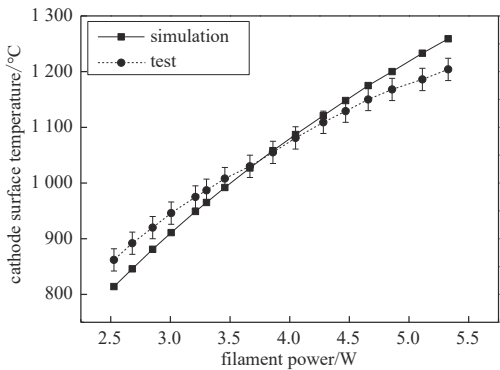


Fig.6 Comparison of cathode surface temperatures between simulation and test
图 6 阴极表面温度模拟值与实验值对比

块进行耦合, 将枪壳端面设置为无摩擦支撑约束边界条件。

当阴极表面温度在工作点 $1\ 050\ ^\circ\text{C}$ 时, 热形变矢量云图如图 8 所示。可以看出, 热形变主要发生在温度较高的屏蔽筒以内区域, 阴极表面形变量最大, 约为 $0.07\ \text{mm}$ 。

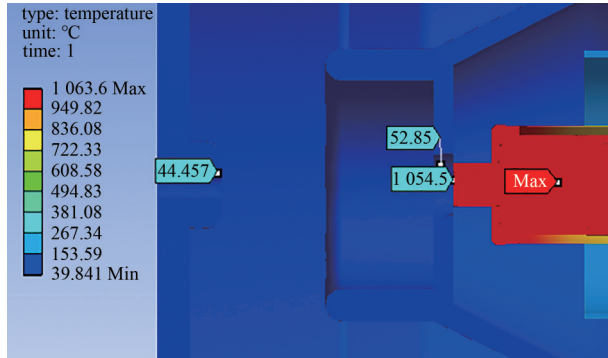


Fig.7 Temperature distribution of electron gun
图7 工况下电子枪的温度分布云图

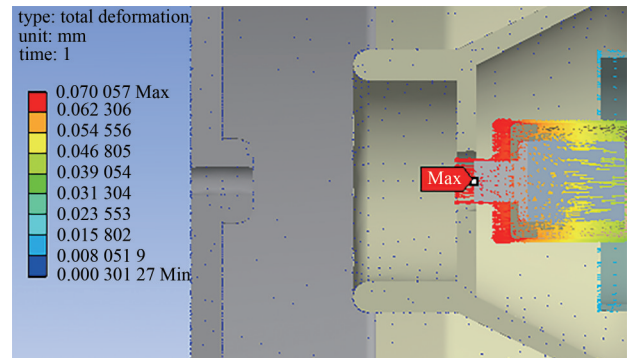


Fig.8 Vector graph of thermal deformation of electron gun
图8 工况下电子枪的热形变矢量云图

图 9 为电子枪径向热形变云图, 从图中可以看出, 热载荷下阴极半径 r_c 增大了 $3.4\ \mu\text{m}$, 聚集极孔半径 r_g 和阳极孔半径 r_a 分别增大了 $1.4\ \mu\text{m}$ 和 $1.3\ \mu\text{m}$ 。与设计方案相比, 电极尺寸变化均在表 1 公差允许范围内。图 10 为电子枪轴向热形变云图, 从图中可以看出, 工况下阴极表面的轴向热形变量为 $0.07\ \text{mm}$, 阳极和聚焦极则分别为 $2.9\ \mu\text{m}$ 和 $1.4\ \mu\text{m}$ 。与设计方案相比, 阳极相对阴极的距离 Z_{ak} 变化量在表 1 公差允许范围内, 而聚焦极相对于阴极距离 Z_{gk} (图 11 所示) 的变化量 ($|\Delta Z_{gk}|=0.07\ \text{mm}$) 则超出了表 1 公差范围。

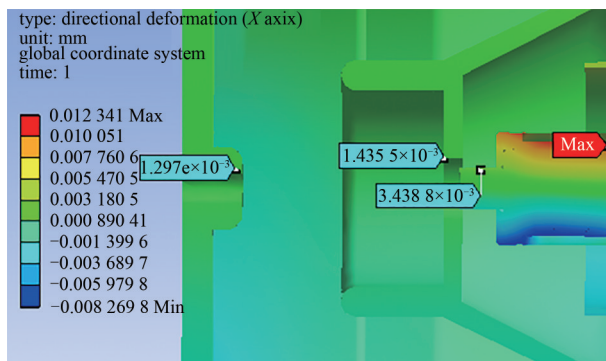


Fig.9 Radial thermal deformation of electron gun
图9 工况下电子枪的径向热形变

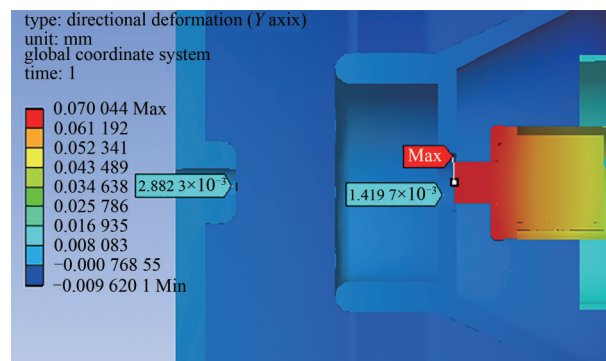
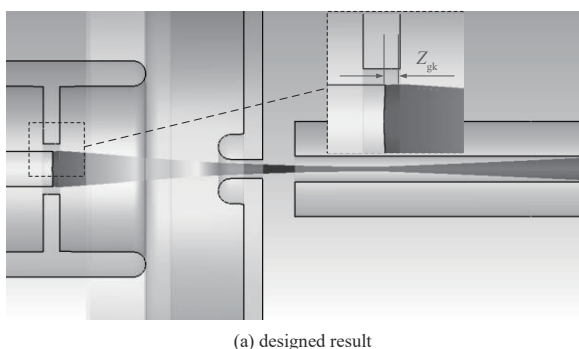
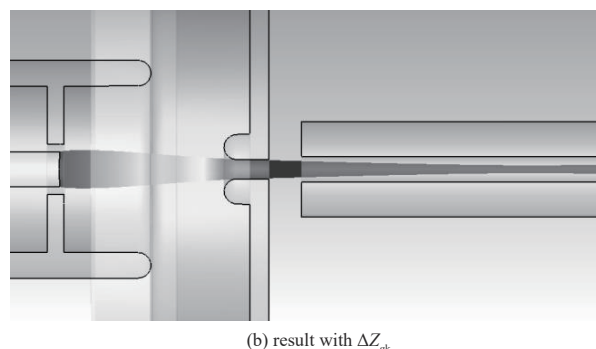


Fig.10 Axial thermal deformation of electron gun
图10 工况下电子枪的轴向热形变



(a) designed result



(b) result with ΔZ_{gk}

Fig.11 Contrast of the electron gun emission performance
图11 电子枪发射情况对比

采用 CST 粒子追踪求解器模拟, 表 3、图 11 为不考虑热形变与考虑热形变 2 种情况下的电子枪性能对比。可以看出, 考虑热形变后, 电流设计值由 $50.9\ \text{mA}$ 增大到 $70\ \text{mA}$, 注腰半径设计值由 $0.056\ \text{mm}$ 增大到 $0.098\ \text{mm}$, 射程设计值由

表3 电子枪发射结果

Table3 Emission results of the electron gun

Z_{gk}	I/mA	r_w/mm	Z_w/mm
designed value	50.9	0.056	10.3
with ΔZ_{gk}	70.0	0.098	14.8

10.3 mm 增大到 14.8 mm, 偏差分别高达 38%、75%、44%。

为消除电子枪热形变的影响, 设计了电子枪装配模具, 将阴极和聚焦极的装配距离设计为 2.93 mm, 从而对 ΔZ_{ek} 进行补偿。图 12 为采用该模具装配的电子枪。图 13 为不同聚焦极偏压和阳极电压下的发射电流的模拟结果与实验结果。由图 13(a) 可以看到, 随着聚焦极负偏压增大, 电子枪发射电流逐步降低, 测试值与设计值符合良好, 最大误差为 2.7%。在聚焦极工作偏压 -25 V 下, 误差为 1.4%。由图 13(b) 可以看到, 随着阳极电压的增大, 电子枪发射电流逐步增大, 测试值与设计值符合良好, 最大误差为 5%。在阳极工作电压 20 kV 下, 误差为 1.3%。

该电子枪已用于 G 波段 20 W 连续波行波管中, 在 20 kV 工作电压下的发射电流为 50 mA, 电子注流通率达到 95%^[16]。该电子枪还用于 G 波段 50 W 脉冲行波管中, 在 24.25 kV 电压下的发射电流为 59 mA, 达到该行波管的指标要求^[24]。



Fig.12 Electron gun
图 12 电子枪

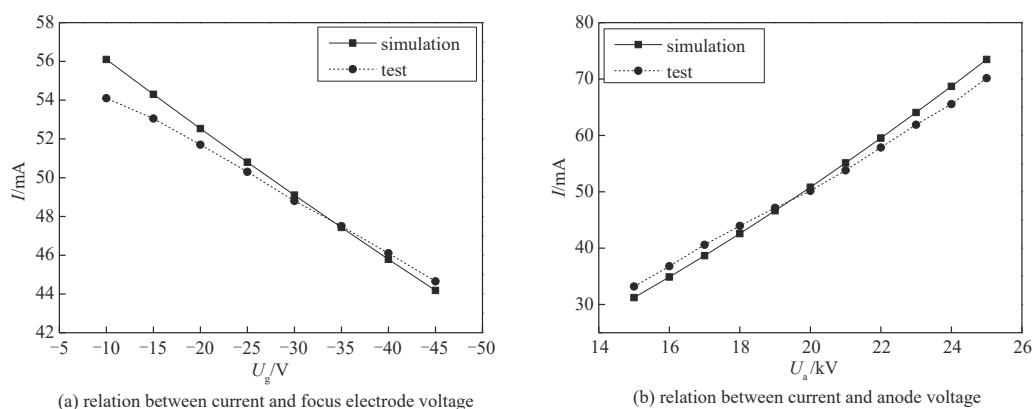


Fig.13 Emission performance of the electron gun
图 13 电子枪发射性能

4 结论

本文设计了用于 G 波段行波管的电子枪, 电子注电压 20 kV, 电流 50.9 mA, 注腰半径 0.056 mm, 射程 10.3 mm。仿真结果表明, 电子枪的热形变造成阴极和聚焦极轴向间距减小 0.07 mm, 造成总电流、注腰半径、射程值分别增大了 38%、75%、44%, 偏离了设计目标。为了消除电子枪热形变的影响, 设计了装配模具进行补偿, 并得到了实验验证。该电子枪已用于 G 波段 20 W 连续波行波管、G 波段 50 W 脉冲行波管中, 解决了 G 波段行波管的关键部件技术问题。

参考文献:

- [1] STEPHENSET G L, VANE D G, RBOAIN O J, et al. The CloudSat mission and the A-train: a new dimension of space-based observations of clouds and precipitation[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2002, 83(12): 1771-1790.
- [2] NANNI E A, BARNES A B, GRIFFIN R G, et al. THz dynamic nuclear polarization NMR[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2011, 1(1): 145-163.
- [3] BASTEN M A, TUCEK J C, GALLAGHER D A, et al. 233 GHz high power amplifier development at Northrop Grumman[C]// 2016 IEEE International Vacuum Electronics Conference(IVEC). Monterey, CA, USA: IEEE, 2016: 1-2.
- [4] TUCEK J C, BASTEN M A, GALLAGHER D A, et al. A 100 mW, 0.670 THz power module[C]// IEEE International Vacuum Electronics Conference. Monterey, CA, USA: IEEE, 2012: 31-32.
- [5] TUCEK J C, BASTEN M A, GALLAGHER D A, et al. 0.850 THz vacuum electronic power amplifier[C]// IEEE International Vacuum Electronics Conference. Monterey, CA, USA: IEEE, 2014: 153-154.
- [6] TUCEK J C, BASTEN M A, GALLAGHER D A, et al. Operation of a compact 1.03 THz power amplifier[C]// 2016 IEEE International Vacuum Electronics Conference(IVEC). Monterey, CA, USA: IEEE, 2016: 37-38.
- [7] JOYE C D, COOK A M, CALAME J P, et al. Demonstration of a high power, wideband 220 GHz traveling wave amplifier fabricated by UV-LIGA[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2014, 61(6): 1672-1678.

- [8] ARMSTRONG C M, KOWALCZYK R, ZUBYK A, et al. A compact extremely high frequency MPM power amplifier[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2018, 65(6): 2183–2188.
- [9] LEI Wenqiang, JIANG Yi, SONG Rui, et al. Progress of G-band CW transformed folded waveguide TWT[C]// 2021 IEEE International Vacuum Electronics Conference(IVEC). Rotterdam, Netherlands: IEEE, 2021: 1–3.
- [10] HU Peng, LEI Wenqiang, JIANG Yi, et al. Demonstration of a Watt-level traveling wave tube amplifier operating above 0.3 THz[J]. IEEE Electron Devices Letters, 2019, 40(6): 973–976.
- [11] LEI Wenqiang, HUANG Yinhu, HU Peng, et al. Progress of G-band folded waveguide traveling wave tube[C]// 2018 IEEE International Vacuum Electronics Conference(IVEC). Monterey, CA, USA: IEEE, 2018: 257–258.
- [12] 王文祥. 微波工程技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009. (WANG Wenxiang. Microwave Engineering Technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009.)
- [13] 张芳, 董志伟, 周泉丰, 等. 0.345 THz 微电真空 FWG-TWT 的电子光学系统[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2015, 13(6): 864–869. (ZHANG Fang, DONG Zhiwei, ZHOU Quanfeng, et al. Optics system of 0.345 THz micro-electronic vacuum FWG-TWT[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2015, 13(6): 864–869.)
- [14] 姚列明. 微波管的热分析[D]. 成都: 电子科技大学, 2006. (YAO Lieming. Thermal analysis of microwave tube[D]. Chengdu, China: University of Electronic Science and Technology of China, 2006.)
- [15] OU Yue, LIU Wenxin, ZHAO Kedong, et al. Optimum design of electron gun for 0.22 THz traveling wave tubes[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory Techniques, 2021, 70(1): 307–314.
- [16] PAN Pan, TANG Ye, BIAN Xingwang, et al. A G-band traveling wave tube with 20 W continuous wave output power[J]. IEEE Electron Device Letters, 2020, 41(12): 1833–1836.
- [17] GILMOUR A S. Principles of traveling wave tubes[M]. Boston: Artech House, 1994.
- [18] 张敏. CST 微波工作室用户全书[M]. 成都: 电子科技大学出版社, 2004. (ZHANG Min. CST microwave studio suite[M]. Chengdu, China: University of Electronic Science and Technology of China Press, 2004.)
- [19] 丁耀根. 大功率速调管的设计制造和应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010. (DING Yaogen. Design, manufacture and application of high power klystron[M]. Beijing, China: National Defense Industry Press, 2010.)
- [20] GILMOUR A S, KLYSTRONG J R. Traveling wave tubes, magnetrons, crossed-field amplifiers, and gyrotrons[M]. Beijing, China: National Defense Industry Press, 2012.
- [21] ZIENKIEWICZ O C, TAYLOR R L, ZHU J Z. The finite element method: its basis and fundamentals[M]. London, UK: Butterworth-Heinemann, 2005.
- [22] XU Li, XIE Peng, YANG Siyi, et al. Accurate and fast thermal analysis of multistage depressed collectors for traveling wave tubes using finite-element method[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2020, 67(2): 690–696.
- [23] 张勇, 何小琦, 宋芳芳. 行波管可靠性研究探讨[J]. 电子质量, 2008(6): 65–69. (ZHANG Yong, He Xiaoqi, SONG Fangfang. The research of Traveling Wave Tube[J]. Electronics Quality, 2008(6): 65–69.)
- [24] BIAN Xingwang, PAN Pan, TANG Ye, et al. Demonstration of a pulsed G band 50 W traveling wave tube[J]. IEEE Electron Device Letters, 2021, 42(2): 248–251.

作者简介:

李莹(1992–), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为太赫兹行波管. email: ly18046510463@sina.com.

边兴旺(1990–), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为太赫兹行波管.

张琳(1990–), 女, 在读博士研究生, 高级工程师, 主要研究方向为太赫兹行波管.

宋博文(1995–), 男, 本科, 助理工程师, 主要研究方向为太赫兹行波管.

潘攀(1986–), 男, 在读博士研究生, 高级工程师, 主要研究方向为太赫兹行波管.

蔡军(1978–), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为短毫米波及太赫兹行波管.