

文章编号: 2095-4980(2025)09-0919-09

## G 波段空间行波管输出窗模拟及可靠性分析

刘湘鹏<sup>1</sup>, 夏公傲<sup>2</sup>, 靳职昊<sup>2</sup>, 杨韵斐<sup>3</sup>, 王金淑<sup>3</sup>

(1.北京工业大学 樊恭杰荣誉学院, 北京 100024; 2.中国科学院 空天信息创新研究院, 北京 100094;  
3.北京工业大学 材料与制造学院, 北京 100024)

**摘要:** G 波段行波管主要依靠系统的高频结构来实现高频率电磁波的放大和输出。输出窗是行波管高频系统的主要组成部分和关键结构之一, 其设计的好坏会影响高频电磁波的正常输出和辐射, 尤其是窗片尺寸、波导长度等。为了检验输出窗在实际运行时可能出现的失效问题, 需要对输出窗结构进行可靠性分析, 以检验结构的可靠性。通过在 CST 软件中的仿真, 模拟了用于 G 波段百瓦量级行波管的输出窗, 并给出了 S 参数的模拟和实验结果, 两者趋势基本一致。为了验证设计输出窗结构的可靠性, 进行了一系列的热分析和振动分析, 给出了相应的模态和随机振动分析结果。仿真结果表明其安全裕度(MS)符合要求。

**关键词:** 太赫兹; 行波管; 输出窗; 可靠性分析

中图分类号: TN124

文献标志码: A

DOI: 10.11805/TKYDA2025012

## Simulation and reliability analysis of G-band space Traveling Wave Tube output window

LIU Xiangpeng<sup>1</sup>, XIA Gong'ao<sup>2</sup>, JIN Zhihao<sup>2</sup>, YANG Yunfei<sup>3</sup>, WANG Jinshu<sup>3</sup>

(1.Fangongxiu Honors College, Beijing University of Technology, Beijing 100024, China;  
2.Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;  
3.Faculty of Materials and Manufacturing, Beijing University of Technology, Beijing 100024, China)

**Abstract:** G-band Traveling Wave Tube(TWT) mainly uses the high-frequency structure to amplify and radiate the high-frequency electromagnetic wave. The output window is one of the main components in the high-frequency system of a traveling-wave tube. The quality of its design affects the normal output and radiation of high-frequency waves, particularly in terms of critical parameters such as window dimensions or waveguide length. To detect potential failure during actual operation, reliability analysis of the output window structure must be conducted to validate its robustness. This paper presents the design of an output window for a G-band hundred-watt TWT, along with its simulation and experimental S-parameter results, and those results are in agreement with each other. To verify the structural reliability of the designed output window, comprehensive thermal analysis and vibration analysis were performed. Corresponding modal and random vibration analysis results are provided, demonstrating that its Margin of Safety(MS) meets specified requirements.

**Keywords:** THz; Traveling Wave Tube(TWT); output window; reliability analysis

太赫兹频段波(0.1~10 THz)具备安全性、穿透性、宽频带等特点, 在高分辨力成像以及无损检测等方面极具优势, 逐渐被应用于生物医学、医疗、通信、安全检测等领域<sup>[1-5]</sup>。由于太赫兹波频率高, 在介质中衰减幅度

收稿日期: 2025-01-10; 修回日期: 2025-06-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U22A2020,U2341209)

引用格式: 刘湘鹏, 夏公傲, 靳职昊, 等. G 波段空间行波管输出窗模拟及可靠性分析[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2025, 23(9): 919-927. DOI:10.11805/TKYDA2025012.

**Citation format:** LIU Xiangpeng, XIA Gong'ao, JIN Zhihao, et al. Simulation and reliability analysis of G-band space Traveling Wave Tube output window[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2025, 23(9): 919-927. DOI: 10.11805/TKYDA2025012.

大, 严重制约了太赫兹波的应用, 因此, 产生和放大太赫兹电磁波是太赫兹源的研究重点。基于真空电子学的太赫兹器件中, 行波管(TWT)具有频带宽、体积小、抗辐射能力强的特点, 在高速率空间通信及高分辨力成像领域具有独特优势, 是实现太赫兹频段高功率输出的主要器件之一。

TWT主要由电子枪、高频结构、输能窗、聚焦磁场、收集极5部分组成, 太赫兹输能窗是实现行波管小信号输入、大信号输出的关键部件, 行波管输能窗结构精密, 尺寸较小, 只有通过输出窗进入到工作环境中, 才可以实现终端输出。对于空间行波管而言, 通常应用于空间卫星通信高速数传、合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)卫星的高精确度探测等领域, 由于卫星上升及变轨过程中存在各种振动和加速现象, 使用环境并不像实验室中固定。此外, 行波管输出窗本身伴随着热损耗, 这就导致结构温度升高, 涉及到行波管结构两种主要失效形式: 1) 热失效, 2) 振动失效。这两种失效都会导致输出窗及其他结构的正常工作受到影响, 过度的形变还会导致行波管的辐射受阻, 使用寿命减少<sup>[6-8]</sup>。

本文基于G波段(中心频率220 GHz)百瓦量级行波管输出窗模型, 使用ANSYS有限元仿真软件, 对其结构进行了一系列可靠性分析(温度分析、静态结构分析、模态分析、随机振动分析), 结合有限元分析验证了该行波管输出窗的可靠性。

## 1 输出窗结构

本文设计的输能窗主要用于传输G波段太赫兹波, 该行波管的工作模式为脉冲工作状态, 工作比约为30%, 其主要应用于需要高功率辐射的空间探测以及遥感等领域。此类行波管的工作环境较为复杂, 内部热生成较高(如高功率电子枪的高温热子, 输出窗承载高功率辐射任务时导致的高热损耗密度等), 且可能受到外界激励的影响(如撞击、高频共振激励等)。主要采用结构简单、稳固可靠的盒型窗结构, 该输出窗建模后导入至ANSYS模块中的结构如图1所示。

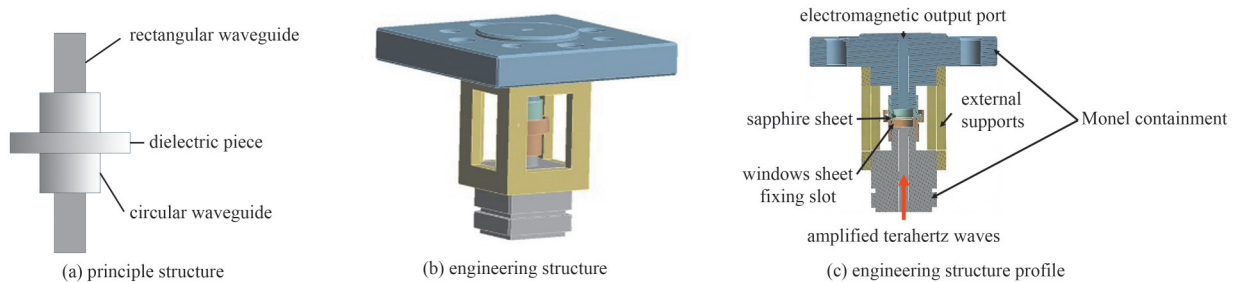


Fig.1 Output window

图1 输出窗

图1(a)为整个输出窗外侧的整体结构, 图1(b)是输出窗工程结构外形, 图1(c)为输出窗沿电磁波通道进行切割的截面图, 各个组成结构之间使用颜色进行区分。输出窗上端以及下端的真空外壳使用的材料为蒙乃尔。外部支架、窗片上下固定槽使用的材料是4J33, 宝石窗片使用的材料为蓝宝石。输出窗下面的端口与高频结构相互连接, 当高频结构产生放大后的太赫兹波后, 由下端的输入口输入(右图中红色箭头位置), 之后经过密封的窗片传输, 即可在输出端口进行辐射。对于输出窗而言, 进行有效辐射的关键是保证整个电磁传输通道的通畅性, 这片区域也因此成为整个输出窗可靠性分析的侧重点。模型中所使用的材料的部分参数如表1所示。

表1 所使用材料的关键参数

Table1 Key parameters of the materials used

component	material	density/(kg/m <sup>3</sup> )	thermal expansion coefficient/(K <sup>-1</sup> )	heat conductivity/(W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	Young's modulus/GPa	Poisson ratio
Monel containments	Monel	8.83×10 <sup>3</sup>	1.39×10 <sup>-5</sup>	21.8	179	0.32
window sheet	Sapphire	3.98×10 <sup>3</sup>	5.80×10 <sup>-6</sup>	40.0	500	0.33
window sheet fixing slot	Silver	10.50×10 <sup>3</sup>	1.89×10 <sup>-5</sup>	429.0	83	0.37
external supports	4J33	8.27×10 <sup>3</sup>	1.20×10 <sup>-6</sup>	10.1	146	0.30

## 2 输出窗模拟结果

### 2.1 输出窗电磁模拟结果

为了获得G波段输能窗的最佳传输特性, 本文采用CST电磁仿真软件对该输出窗进行电磁仿真模拟分析, 研究G波段输能窗结构参数对传输特性的影响, 并确定最佳参数以提高太赫兹波的传输效率。图2为输出窗的建

模以及参数标注。参数详细信息如表 2 所示,  $T_0$  表示窗片厚度,  $L_1$  是圆波导长度,  $R_1$  和  $R_2$  分别是窗片半径与圆波导半径差和圆波导直径长度。采用等效电路如图 3 所示, 其中,  $Z_1$ 、 $Z_2$  为波导特性阻抗。 $B_a$  为窗片归一化电纳,  $B_T$  为矩形波导与圆波导连接处引入的不连续归一化电纳。通过对理论及常规结构参数的代入, 结合设计损耗小于 3.16% 时带宽大于 10 GHz 进行计算, 获得的初步参数( $T_0=0.11$  mm、 $L_1=0.92$  mm、 $R_1=0.65$  mm、 $R_2=2.08$  mm)如表 2 所示, 通过建模仿真计算可以得到传输特性如图 4 所示, 其在工作频点附近的带宽约为 25 GHz, 完全满足工程指标带宽大于 10 GHz 的需求。图 5 显示了该输出窗的场分布情况, 矩形波导的主模  $TE_{10}$  场与圆波导中  $TE_{11}$  场具有很好的连续性, 能够有效传输太赫兹波。

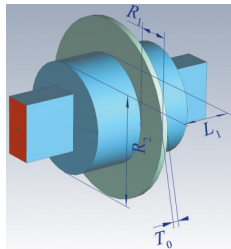


Fig.2 Output window structure and parameter annotation  
图 2 输出窗结构及参数标注

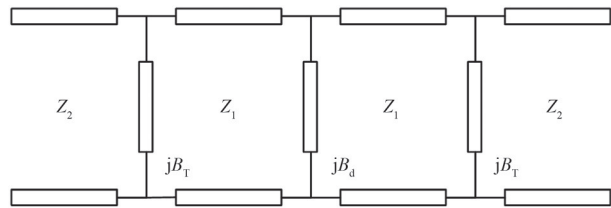


Fig.3 Equivalent circuit diagram of the window  
图 3 输出窗等效电路图

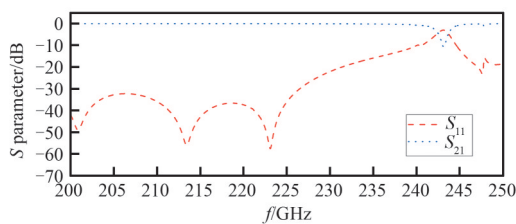


Fig.4 Simulation results of S parameters of the window near 220 GHz  
图 4 220 GHz 附近的 S 参数仿真结果

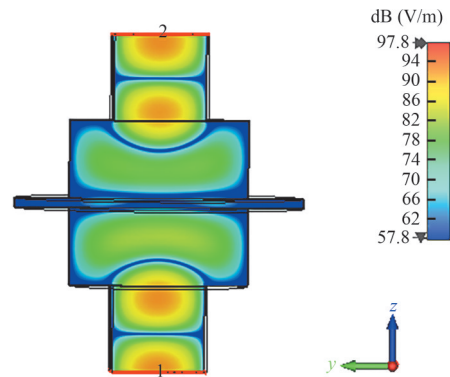


Fig.5 Electric field distribution of output window  
图 5 输出窗电场分布

表 2 参数含义及设计数值

Table 2 Meaning of the parameters and the designed values

parameter	meaning of the parameter	designed value/mm	sweep step/mm
$T_0$	thickness of the sapphire window	0.11	0.01
$L_1$	length of the circular waveguide	0.92	0.01
$R_1$	the difference between the radius of the window plate and the radius of the circular waveguide	0.65	0.01
$R_2$		diameter of the circular waveguide	2.08

2.2 输能窗传输特性分析

为了获得优化的输能窗参数, 为输能窗机械加工与制作获得有效公差, 通过对输出窗结构敏感性进行分析, 得到了不同参数产生影响的结果, 如图 6 所示, 分别展示了不同结构参数对  $S_{11}$  参数和  $S_{21}$  参数的分析结果。表 2 显示了敏感性分析中不同参数的含义以及设计结果中的数值, 其中红色虚线为设计数值, 黑色实线为向下扫描参数数值, 蓝色点线为向上扫描参数数值。

从图 6 的结果可以看出, 对于  $S_{11}$  参数结果, 在设计参数中心频点 220 GHz 处, 反射最低, 约为 -55 dB。对于  $S_{21}$  参数, 在设计参数上几乎全频段为 0, 仅在 240~242.5 GHz 附近小于 0, 说明输出窗良好地实现了对于电磁波的传输, 且在工作频点 220 GHz 附近  $S_{21}$  参数结果受参数变化影响极小。然而, 对于  $S_{11}$  参数来说, 通过观察以上的部分输出窗敏感性分析曲线可知, 其在参数发生细微变化时在电磁反射层面所受到的影响较为明显。当窗片厚度  $T_0$  出现变化时, 输出窗的  $S_{11}$  参数在增大和减小时分别出现了低反射频段向两侧移动的情况, 在  $T_0$  减小时, 工作频段向 220 GHz 两侧移动且带宽下降;  $T_0$  增大时, 工作频段向高频段移动。当波导长度发生变化时, 对  $S_{11}$  参数的主要影响为工作频点处  $S_{11}$  参数下降, 不论  $T_0$  如何变化, 在 220 GHz 处均出现了反射情况增强。对于窗的外侧环尺寸差异  $R_1$  参数来说, 其发生变化对  $S_{11}$  参数的影响主要体现为带宽的缩小以及低反射频段的变化, 当  $R_1$  参数减小时, 工作频点附近的  $S_{11}$  参数出现了大幅度衰减, 电磁反射量上升。当  $R_1$  参数增大时,  $S_{11}$  参数在工作频

点处的带宽出现大幅度缩小。对于波导外径尺寸  $R_2$  来说, 其变化对输出窗的影响与  $R_1$  参数类似, 对频点附近的反射情况以及带宽造成了明显的影响。从以上的参数敏感性分析结果可以看出, 对于输出窗这样对于参数敏感的结构, 其受到形变的影响比较明显, 因此, 对于其进行可靠性分析是十分有必要的。需保证其可靠性满足相关的要求以保证结构的工作效果以及使用寿命。

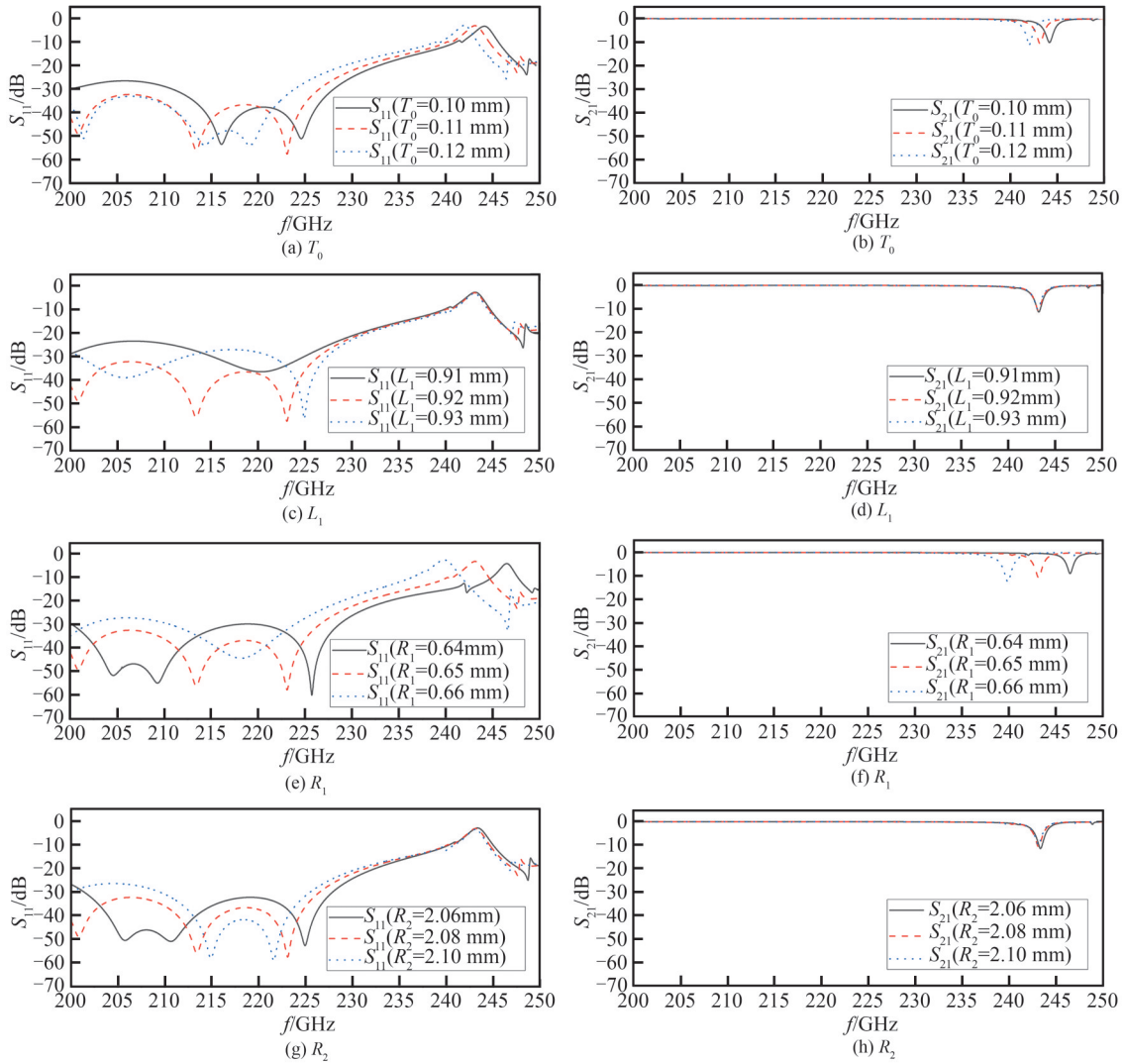


Fig 6 Results of the window's sensitivity analysis

图6 输出窗参数敏感性分析结果

### 3 输出窗可靠性分析

#### 3.1 可靠性分析流程及原理

为提高输能窗的可靠性, 进行了可靠性特性分析, 主要包括热分析和振动分析。图 7 给出了具体的可靠性分析流程。

输出窗中热量的主要来源是由于电磁波在经过输出窗时经过介质而导致的热损耗。输出窗的热损耗也是导致行波管效率下降的一个重要因素。输出窗的热损耗主要集中于窗中间部分的窗片处, 因此在仿真中一般将热源放置在这个位置。行波管效率很大程度上取决于最终的辐射功率。而电子注经过注波相互作用后并不能直接输出, 而是要由输出窗负

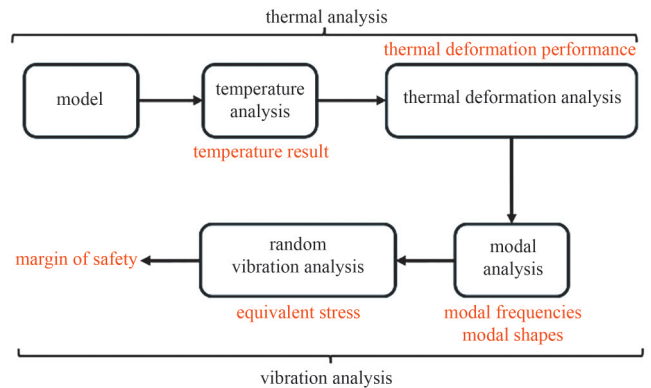


Fig.7 Diagram of the reliability analysis of the structure

图7 结构可靠性分析流程

责发射。输出窗的实际发射功率为输出窗热损耗与输入进输出窗的电磁波的和。故而,一旦热损耗增加,行波管的最终辐射功率就会下降,行波管效率可以使用式(1)表示:

$$\eta_{all} = \frac{P_{out}}{P_{ca} - P_{rec}} \times 100\% \quad (1)$$

式中:  $P_{out}$  为输出窗输出的最终功率;  $P_{ca}$  为电子枪输入的电子注功率;  $P_{rec}$  为收集极回收的功率。而  $P_{rec}$  主要受到收集极设计的影响,不对其余结构产生影响。故而当输出窗输出的功率  $P_{out}$  下降时,整管效率就会受到影响。输出窗的热损耗主要集中于窗中间部分的窗片处<sup>[9]</sup>,在模拟仿真中,借助 ANSYS 对应模块可以统计,本文中的输出窗的热损耗约为 1.5 dB,与输出窗相连接的慢波结构的输出功率为 132.7 W,热损耗约为 38.75 W。在非极端环境下(-40~55°C),行波管中输出窗所涉及的传热方式主要为热传导以及对流散热。

热传导热量的计算公式如下:

$$\begin{aligned} \Phi &= -\lambda A \frac{dt}{dx} \\ q &= -\lambda \frac{dt}{dx} \end{aligned} \quad (2)$$

热对流的计算公式如下:

$$\begin{aligned} q &= h(T_s - T_A) \\ \Phi &= hA(T_s - T_B) \end{aligned} \quad (3)$$

式中:  $\Phi$  为热流量(单位: W);  $q$  表示热流密度(单位: W/m<sup>2</sup>);  $\lambda$  是导热系数(单位: W/(m·K));  $dt/dx$  表示温度梯度(沿热流方向),温度的方向由低温向高温为正;  $A$  是导热面积;  $h$  为对流换热系数;  $T_A$ 、 $T_B$  分别为结构与环境的温度。为了充分模拟结构之间由于焊接、拼接不理想等导致的误差,本文还引入了接触热阻<sup>[10]</sup>。在 ANSYS 中,软件在利用有限元模型进行计算的同时,对于热可靠性分析的部分还会利用以上的公式进行计算,以获取结构的温度结果,从而模拟在结构之间的不理想对接,辅助减轻了热分析中不同结构中理想对接导致的热量传递错误。

对于振动分析,主要分为模态分析以及随机振动分析两部分。结构的模态主要与结构的质量  $m$  以及结构的刚度  $K$  有关<sup>[11]</sup>。一个基本的模态频率公式可以表示为:

$$f_{mod} = \sum_{i=1}^N C_i \sqrt{K_i/m_i} \quad (4)$$

式中:  $m_i$  为第  $i$  个有限元的质量;  $K_i$  为其刚度;  $f_{mod}$  为所有有限元综合线性作用下的模态频率结果;  $C_i$  即为该有限元对于整体模态结果的贡献度,一般通过有限元分析之后进行反推得到。部分可靠性分析的边界条件已经在表 3 中给出。其中,对于一般的加工手段,接触面间热阻普遍位于 200 W/(mm<sup>2</sup>·K) 以下,本文在范围内选取了较为居中端的数值以模拟正常加工下的传热受阻情况。若将传热简化为简单的两侧温度变化及热流量,则接触热阻的计算公式如式(5)所示:

$$\phi = \frac{\Delta t}{R_{contact}} \quad (5)$$

式中:  $\phi$  为两个接触面间传递的热量;  $\Delta t$  为两侧的温度之差;  $R_{contact}$  为接触热阻。

### 3.2 有限元模型

有限元分析(Finite Element Analysis, FEA)的基础是实现对于结构进行有效的有限元分割。本文在分析中所使用的有限元模型是四面体以及六面体有限元,它们的基础模型如图 8 所示。在 ANSYS 中,软件会自动根据模型的具体结构以及分布情况进行有限元的配置。

在可靠性分析领域中,如何针对连续体结构进行有效且准确的可靠性分析是十分关键的问题。连续体结构由于其具有无限的自由度,因此无法直接对其进行整体可靠性分析计算。但是,以上两种有限元,其内部看作不可继续分割,在只考虑平移以及旋转的情况下,这些有限元可以看作只存在 6 个自由度。虽然最终的结构自由度仍然需要将这些有限元的自由度叠加,但是其具备了有限性以及可计算性。在 ANSYS 中将模型进行有限元

表 3 部分可靠性分析边界条件

boundary condition	value
environment temperature/°C	22
heat flux density of the window sheet/(W/mm <sup>2</sup> )	0.5
convective heat transfer coefficient/(W/mm <sup>2</sup> )	2×10 <sup>-5</sup>
contact thermal resistance/(W·mm <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup> )	100
position of the fixing support	bottom of the window
number of the studied model stages	first 6 stages

分割之后，获得的有限元模型如图 9 所示。

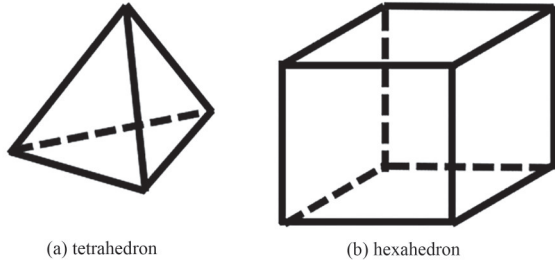


Fig.8 Model of the finite elements of the analysis  
图 8 有限元分析中有限元模型

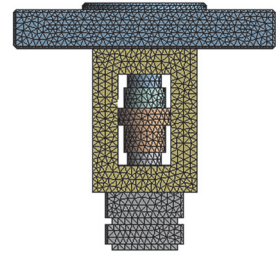


Fig.9 Finite element model of the window  
图 9 输出窗的有限元模型

### 3.3 可靠性分析结果

经过在 ANSYS 仿真软件中进行上述的一系列可靠性分析，最终得到了包含温度、热形变、模态振型以及频率、随机振动等效应力这众多关键结果。首先涉及的是温度结果，结构的温度结果是之后的一系列热形变分析以及振动可靠性分析的基础。结构的温度分析结果如图 10 所示。由图可以看出，最高温度集中于蓝宝石窗片的中间处，而外侧形成了一道较低温度的圆环。最高温度约为 309°C，位于窗片中央。蓝宝石的熔点非常高，超过 2 000°C，该输出窗的温度完全处于合理范围内。窗片周围金属温度达到 260°C 左右，远低于焊料融化温度，可靠性较高。

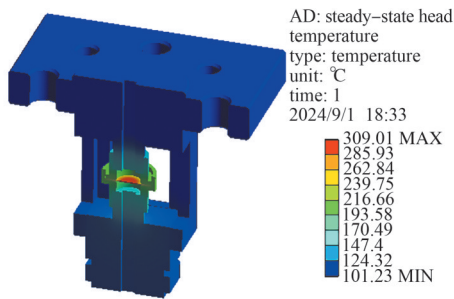


Fig.10 Temperature analysis result  
图 10 温度分析结果

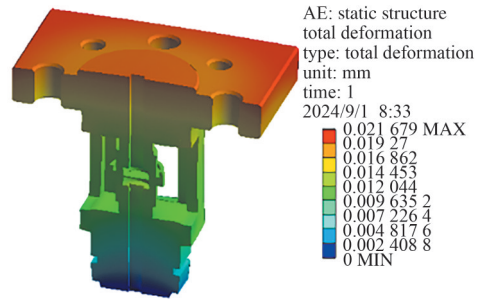


Fig.11 Thermal deformation of the window  
图 11 热形变分析结果

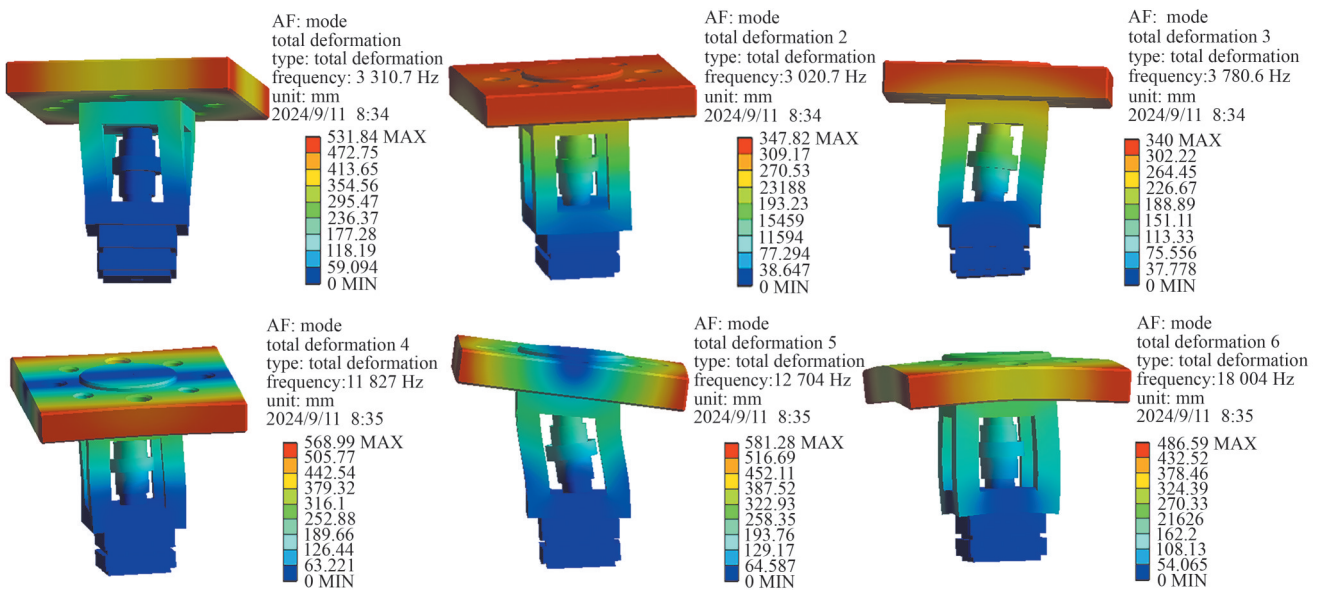


Fig.12 Modal shapes and frequencies of the first 6 stages  
图 12 模态分析的前六阶振型以及频率结果

基于以上的温度分析结果，得到的热形变分析结果如图 11 所示。从热形变的结果可以看出，整个输出窗由

于温度升高导致的形变是十分微小的。由于输出窗的底部被固定, 整个输出窗膨胀主要集中在窗的顶部。最大值为 0.021 mm, 微波通道受到的影响较小, 主要集中在出口处。

由于过高阶的模态, 其达到的要求过高, 因此一般只研究前几个模态结果。图 12 中给出了前六阶的模态振型分析及其频率。根据仿真得到的模态结果, 一阶模态频率为 3 310.7 Hz, 因为自然界中的振动激励频率一般不会超过 2 000 Hz, 因此, 该输出窗的结构在模态频率方面满足可靠性的要求。此外, 由图 12 可知, 前六阶模态振型主要包括: 1) 中心轴向扭曲; 2) 侧向弯曲; 3) 结构顶部弯曲 3 种情况。分析可得, 该结构的主要薄弱点主要分布在外侧的支撑以及银质封装与 4J33 封装的交界处。

图 13 是不同方向上的随机振动分析结果, 随机振动分析结果反映了结构在受到随机的外界干扰以及激励下受到的干扰, 一般以等效应力显示<sup>[12]</sup>。本文选取了可以满足空间环境的鉴定级测试条件, 其在 20~100 Hz, 100~600 Hz, 600~2 000 Hz 频率范围内的激励功率谱密度分别为 3 dB/oct, 0.3 G<sup>2</sup>/Hz 以及 -9 dB/oct。最终挑选了最大等效应力用于计算结构的安全裕度(MS)。只有当 MS 大于 0 时, 结构的安全性才符合标准。由图 13 中可知, 该结构的最大等效应力为随机振动边界条件施加于 Y 轴时(Y 轴为沿), 大小为 17.348 MPa。结构 MS 可以用于衡量结构抵抗外界随机激励的能力, 如式(6)所示:

$$MS = [P] / (P_{max} \cdot f) - 1 \geq 0 \tag{6}$$

式中:  $P_{max}$  为最大等效应力;  $[P]$  为材料需用应力;  $f$  为准静态载荷安全系数。当此数值大于 0 时, 即证明符合安全要求。

在结果中, 最大应力位于窗片, 最大应力为 350 MPa, 振动载荷的安全系数可取 1.2, 计算得到的 MS 值为 13.94, 其为正值, 符合安全性裕度的标准。

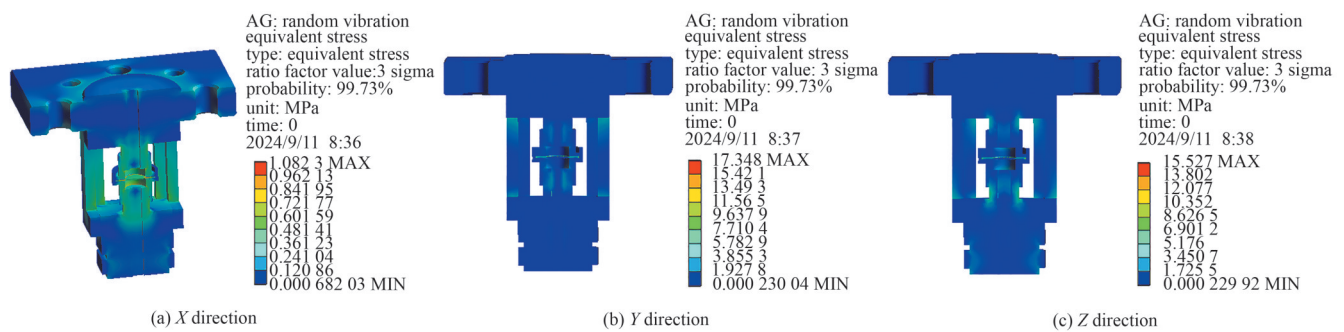


Fig.13 Equivalent stress results of the output window random vibration analysis  
图 13 输出窗的随机振动等效应力结果

### 4 实验测试

为了准确获知该输出窗的传输特性, 加工焊接了输能窗。本文对该行波管输出辐射波的性能进行了测试, 得到了在 210~230 GHz 频段的输出 S 参数结果, 图 14 显示了其中的一次结果。其中图 14(a)为输能窗物理结构, 图 14(b)为测试用矢量网络分析仪, 图 14(c)~(d)为 210~230 GHz 范围内输能窗实测数据与仿真模拟数据的对比。

由实验数据分析可得表 4 内容, 在带宽和传输特性等方面存在差异。这些差异性可能是加工误差、焊接工艺、测量接头插损等方面造成, 加工误差可能导致零件的尺寸、形状等与设计要求存在偏差, 从而影响整体性能; 焊接误差可能会影响焊接部位的结构尺寸精确度, 导致尺寸不一致, 测量接头插损带来的误差可能使得实际测量的数据出现偏差, 这些因素都可能导致实测结果与仿真结果有差异。

表 4 仿真与测试结果对比

Table4 Comparison of simulation results and test results

parameters	simulation		experiment	
	bandwidth(>-15 dB)/GHz	minimum/dB	bandwidth(>-15 dB)/GHz	minimum/dB
$S_{11}$ (220 GHz)	19.7	-54.48	10	-49.65
$S_{21}$ (220 GHz)	20.0	-0.15	20	-1.98

### 5 结论

本文针对一个工作于 220 GHz 频率的行波管输出窗进行了可靠性分析, 获取了包括温度、热形变、模态振

型、模态频率、随机振动等效应力等一系列的关键结构可靠性分析结果。针对各个方面的结果进行了分析，剖析了结构的薄弱处。通过模态分析验证了结构在自然激励的情况下不易产生共振形变，在随机外界激励的情况下可以满足安全性的要求。

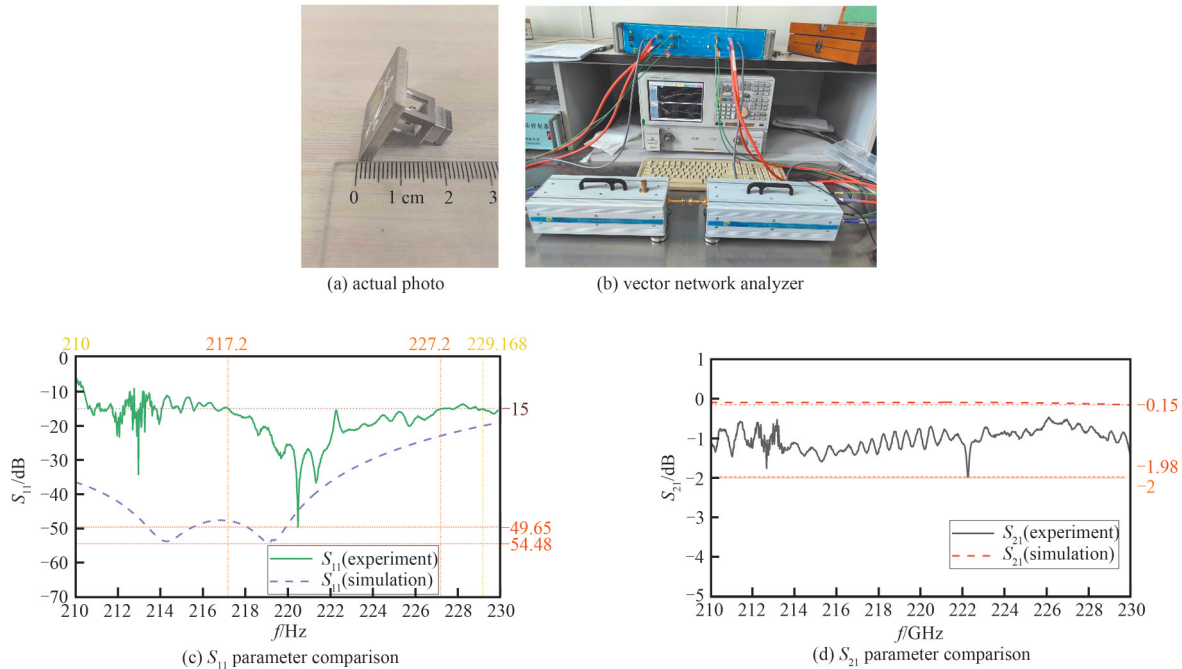


Fig.14 TWT test equipment and comparison of simulation and experiment

图 14 行波管测试设备及仿真、实测对比

#### 参考文献:

- [1] ZHANG Jianxiang, HE Yong, LIANG Shanshan, et al. Non-invasive, opsin-free mid-infrared modulation activates cortical neurons and accelerates associative learning[J]. Nature Communications, 2021,12(1):2730. DOI:10.1038/s41467-021-23025-y.
- [2] LI Yangmei, CHANG Chao, ZHU Zhi, et al. Terahertz wave enhances permeability of the voltage-gated calcium channel[J]. Journal of the American Chemical Society, 2021,143(11):4311-4318. DOI:10.1021/jacs.0c09401.
- [3] LIU Guozhi, CHANG Chao, QIAO Zhi, et al. Myelin sheath as a dielectric waveguide for signal propagation in the mid-infrared to terahertz spectral range[J]. Advanced Functional Materials, 2018,29(7):180. DOI:10.1002/adfm.201807862.
- [4] XIANG Zuoxian, TANG Chuanxiang, CHANG Chao, et al. A primary model of THz and far-infrared signal generation and conduction in neuron systems based on the hypothesis of the ordered phase of water molecules on the neuron surface I: signal characteristics[J]. Science Bulletin, 2020,65(4):308-317. DOI:10.1016/j.scib.2019.12.004.
- [5] WU Kaijie, QI Chonghai, ZHU Zhi, et al. Terahertz wave accelerates DNA unwinding: a molecular dynamics simulation study[J]. Journal of Physical Chemistry Letters, 2020(11):7002-7008.
- [6] 高畅, 陈辑, 杜英华. W波段连续波行波管热力学可靠性分析[J]. 真空电子技术, 2022(3):52-55, 68. (GAO Chang, CHEN Ji, DU Yinghua. Thermodynamic reliability analysis of a W-band CW traveling wave tube[J]. Vacuum Electronics, 2022(3):52-55, 68.) DOI:10.16540/j.cnki.cn11-2485/tn.2022.03.10.
- [7] 白国志. 行波管质量可靠性改进方法研究[D]. 北京:中国科学院大学, 2016. (BAI Guozhi. Research on the improvement method of quality reliability of traveling wave tube[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2016.)
- [8] 戴文骏. 行波管电子枪及收集极的热分析研究[D]. 成都:电子科技大学, 2016. (DAI Wenjun. Thermal analysis study of traveling wave tube electron gun and collector[D]. Chengdu, China: University of Electronic Science and Technology of China, 2016.) DOI:10.7666/d.D00990064.
- [9] DAI Shun, ZHU Fang. Thermal analysis of an S-band output RF vacuum window[C]// IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC 2012). Monterey, CA, USA: IEEE, 2012:77-78. DOI:10.1109/IVEC.2012.6262081.
- [10] 王妍. 具有接触热阻的界面传热问题的区域分解方法[D]. 吉林:东北师范大学, 2023. (WANG Yan. Regional decomposition method for interface heat transfer problem with contact thermal resistance[D]. Jilin, China: Northeast Normal University, 2023.)
- [11] 邱华荣. 行波管工作状态下的振动特性分析[D]. 广州:华南理工大学, 2016. (QIU Huarong. Vibration characteristics analysis

of traveling wave tube in working state[D]. Guangzhou, China: South China University of Technology, 2016.)

- [12] 陈智锋. 列车荷载作用下冻土路基随机振动分析方法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2022. (CHEN Zhifeng. Research on random vibration analysis method of frozen soil roadbed under train load[D]. Guangzhou, China: South China University of Technology, 2022. DOI: 10.27151/d.cnki.ghnlu.2022.004292.)

#### 作者简介:

刘湘鹏(2004-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为毫米波太赫兹领域成像及相关研究. email: 2596803097@qq.com.

杨韵斐(1991-), 男, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为热电子发射材料.

夏公傲(1998-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为太赫兹行波管.

王金淑(1968-), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为难熔金属材料.

靳职昊(1995-), 男, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为太赫兹行波管.

(上接第911页)

- [14] 瞿波, 郭晨, 胡明辉, 等. 一种行波管混合慢波系统及其设计方法: CN201911311316.1[P]. 2019-12-18. (QU Bo, GUO Chen, HU Minghui, et al. A hybrid slow wave system with traveling wave tube and its design method: CN201911311316.1[P]. 2019-12-18.)
- [15] 瞿波, 郭晨, 胡明辉, 等. 一种基于螺旋线的混合慢波结构及其设计方法: CN201911240974.6[P]. 2019-12-06. (QU Bo, GUO Chen, HU Minghui, et al. A hybrid slow wave structure based on spiral lines and its design method: CN201911240974.6[P]. 2019-12-06.)

#### 作者简介:

瞿波(1980-), 男, 硕士, 研究员, 主要研究方向为空间行波管. email: bjqubo2003@163.com.

常通(1997-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为毫米波空间行波管.

梁晓峰(1982-), 男, 硕士, 研究员, 主要研究方向为空间行波管.

李安(1988-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为空间行波管工艺.

梁潇(1994-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为毫米波空间行波管.

闫冠齐(1982-), 男, 硕士, 研究员, 主要研究方向为毫米波空间行波管.

李志良(1979-), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为短毫米波和太赫兹空间行波管.

冯进军(1966-), 男, 博士, 博士生导师, 研究员, 主要研究方向为毫米波空间行波管以及太赫兹真空电子器件.