

文章编号: 2095-4980(2024)01-0028-07

太赫兹回旋管蓝宝石输能窗的设计及实验

张亦弛, 高东硕, 曾旭, 李鹏, 郝文腾, 李博阳, 冯进军*

(北京真空电子技术研究所 微波电真空器件国家级重点实验室, 北京 100015)

摘要: 针对 170 GHz 兆瓦级回旋管短脉冲实验对蓝宝石输能窗的实际要求, 分析了蓝宝石窗传输高斯波束的反射和吸收特性, 优化设计了低反射、低损耗蓝宝石输能窗的工程方案。对研制的蓝宝石窗部件进行微波冷测, 驻波比(VSWR)小于 1.1, 验证了蓝宝石窗的低反射特性; 计算结果表明该结构的最大输出平均功率阈值为 590 W。对该蓝宝石窗研制的 170 GHz 回旋管进行测试, 验证了理论计算的功率阈值, 为大功率回旋管蓝宝石输能窗的实际应用提供了依据。

关键词: 170 GHz; 回旋管; 蓝宝石; 输能窗; 高斯波束

中图分类号: TN128

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2023280

Design and experimental research of a terahertz-gyrotron output window with sapphire disc

ZHANG Yichi, GAO Dongshuo, ZENG Xu, LI Kun, HAO Wenteng, LI Boyang, FENG Jinjun*

(National Key Laboratory of Science and Technology on Vacuum Electronics, Beijing Vacuum Electronics Research Institute, Beijing 100015, China)

Abstract: To satisfy the application requirements of sapphire output window for the 170 GHz megawatt-class gyrotron short-pulsed experiment, by calculating the characteristic of reflection and absorbing of Gaussian beam transmitted through sapphire window, a sapphire window unit is designed with low reflection and low loss power. The low reflectance is verified by vector network analyzer that the Voltage Standing Wave Ratio(VSWR)<1.1. The maximum output average power threshold of the sapphire window has been calculated approximately to be 590 W by analyzing the damage mechanism. The 170 GHz gyrotron employing sapphire window is fabricated, and the power threshold calculated theoretically is verified, providing a reliable theoretical basis for the application of sapphire output window used in high power gyrotron.

Keywords: 170 GHz; gyrotron; sapphire; output window; Gaussian beam

回旋管是一种利用回旋电子注与高频电场相互作用产生高功率输出的真空电子器件, 因其能长时间在高频率产生高功率微波, 因此在等离子体加热、微波定向能武器和工业加热等方面具有重要的应用。其中 170 GHz、1 MW 回旋管目前主要用于电子回旋共振加热系统, 是目前为国际热核聚变反应堆(International Thermonuclear Energy Reactor, ITER)、中国全超导托卡马克核聚变实验装置(Experimental Advanced Super-conducting Tokamak, EAST)、中国聚变工程实验堆(China Fusion Engineering Test Reactor, CFETR)等聚变反应堆等离子加热的重要微波元器件^[1-4]。

输能窗是 170 GHz 大功率回旋管的关键部件之一, 作用是在保持管内高真空度的前提下, 尽可能多地使微波能量辐射出回旋管。对于大功率回旋管, 输能窗的透射性能和稳定性尤为重要。输能窗的反射会导致功率返回高频系统, 引起寄生模式自激振荡, 从而降低主模输出功率, 甚至导致工作状态不稳定。为便于回旋管的能量高效馈入到等离子体加热系统中, 通常采用大尺寸($\phi \geq 80$ mm)窗片传输高斯波束。当能量集中分布在中心区域的高斯波束通过介质窗时, 损耗能量不可忽略, 介质损耗的能量转化为热能, 使窗片不同区域的温度梯度上升。当由此导致的热应力超出窗片应力极限时, 会引起窗片损坏。因此在大功率输能窗设计中的 2 个重点目标是: 降

收稿日期: 2023-09-26; 修回日期: 2023-11-01

*通信作者: 冯进军 email:fengjinjun@tsinghua.org.cn

低输能窗损耗功率；保证高斯波束能量集中加载状态下输能窗无破损。

在回旋管发展历程中，输能窗采用过多种不同的材料，主要有蓝宝石(Al_2O_3)、氮化硼(BN)、氮化硅(Si_3N_4)、氧化铍(BeO)、金刚石等^[3]。其中化学气象沉积法制备的金刚石具有非常高的热导率和非常低的损耗角正切，是目前国际公认的最适宜作为大功率连续波回旋管输能窗的材料，但大尺寸金刚石的制备成本非常高，且制备周期长，故现阶段多采用传输性能满足低工作比测试要求、工艺成熟可靠的蓝宝石材料作为回旋管的窗片。为保证蓝宝石窗高气密性稳定工作，需计算其可承受的功率阈值，为确定实验测试时可承受的最大工作比提供理论依据。

1 蓝宝石输能窗传输性能的设计

为保证高斯波束高效辐射出回旋管，通常要求输能窗的电压驻波比小于 1.1，对应反射系数低于 0.05。由于回旋管为单频点工作的振荡器，输能窗频率范围要求在 169.5~170.5 GHz，故采用单层蓝宝石窗片结构。综合考虑传输性能和工艺实现难易度，基于微波传输理论计算单层蓝宝石窗片的理想厚度。

高斯波束可近似分解为功率占比为 84% 的 TE_{11} 模和功率占比为 16% 的 TM_{11} 模^[5-6]。回旋管输出电磁波的辐射方向垂直于输能窗窗片，可使用 Fresnel 折射与反射定律进行计算。对介电常数和磁导率分别为 ε_1 、 ε_2 和 μ_1 、 μ_2 的两种介质，根据 Fresnel 公式^[7]，可计算出垂直入射的反射和透射系数分别为：

$$R = \left(\sqrt{\varepsilon_1 \mu_2} - \sqrt{\varepsilon_2 \mu_1} \right) / \left(\sqrt{\varepsilon_1 \mu_2} + \sqrt{\varepsilon_2 \mu_1} \right) \quad (1)$$

$$T = 2 \sqrt{\varepsilon_1 \mu_2} / \left(\sqrt{\varepsilon_1 \mu_2} + \sqrt{\varepsilon_2 \mu_1} \right) \quad (2)$$

对于蓝宝石输出窗，在 170 GHz 频点，相对介电常数 $\varepsilon_1 \approx 9.4$ ，相对磁导率 $\mu_1 = 1$ ，输能窗两侧介电常数及磁导率分别为 ε_0 和 μ_0 。由式(1)~(2)可以得到从真空入射到介质窗的反射系数 $R = -0.5081$ ，透射系数 $T = 0.4919$ 。根据反射波和入射波的公式推导，当输能窗片厚度满足式(3)时，反射波可以完全消除^[8]：

$$d = \frac{p\pi}{\sqrt{\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 \varepsilon_r - \left(\frac{\chi_{mn}}{R_w}\right)^2}} \quad (3)$$

式中： p 为自然数 1,2,3...； ε_r 为介质的相对介电常数； χ_{mn} 为穿过介质微波模式的特征根； R_w 为窗的半径。在不考虑介电损耗的情况下，可以推导出输能窗反射系数与厚度的关系^[8]：

$$R_c = \frac{2R^2 \left\{ 1 - \cos \left[2d \sqrt{\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 \varepsilon_r - \left(\frac{\chi_{mn}}{R_w}\right)^2} \right] \right\}}{1 + R^4 - 2R^2 \cos \left[2d \sqrt{\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 \varepsilon_r - \left(\frac{\chi_{mn}}{R_w}\right)^2} \right]} \quad (4)$$

由于式中 $\left(\frac{\chi_{mn}}{R_w}\right)^2$ 相比 $\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2$ 可忽略，且 TM_{11} 模式占比小，

故 χ_{mn} 使用 TE_{11} 模式的特征根 1.841。蓝宝石输能窗的晶轴与窗片同轴，在 170 GHz 频率的相对介电常数约为 9.4，蓝宝石输能窗的半径为 50 mm，由此可绘制出蓝宝石输能窗的反射系数与窗片厚度关系，如图 1 所示。

由式(3)~(4)可以计算出无反射时 170 GHz 蓝宝石窗的厚度 $d = 0.2888p$ 。窗片厚度增加，会减小低损耗带宽，增加微波损耗功率；窗片厚度减小，会降低窗封接气密可靠性。综合考虑蓝宝石窗工艺可靠性和带宽性能，选择蓝宝石窗的厚度为 1.444 mm。通过分析数据，反射系数小于 0.05 时对应的窗片厚度误差为 $\pm 1.1\%$ ，因此实际加工应保证窗片厚度满足 $d = (1.444 \pm 0.015) \text{ mm}$ ，并在加工允许范围内尽可能小。通过式(4)可以得出蓝宝石窗厚度为 1.444 mm 时反射系数与频率的关系，如图 2 所示。蓝宝石窗在 1.5 GHz 频率范围内的反射系数小于 0.01，满足 170 GHz 回旋管对输能窗带宽的性能要求。

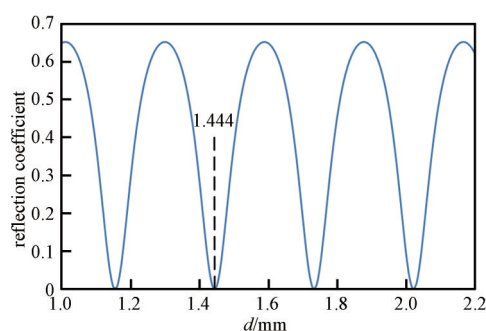


Fig.1 The relationship between reflection coefficient R_c and thickness d of sapphire

图1 蓝宝石输能窗反射系数 R_c 与窗片厚度 d 的关系

2 高斯波束在蓝宝石窗片上的功率损耗

为满足回旋管短脉冲性能验证的测试需求,需计算出蓝宝石窗片可传输微波的功率阈值,以实现 170 GHz 回旋管高斯波束稳定传输的工作状态。首先分析高斯波束在蓝宝石窗片上的电磁场分布,使用坡印廷定理计算出窗片损耗功率与传输功率的关系。

在柱坐标系 (r, ϕ, z) 下,圆波导中工作的 TE_{11} 模式行波场可表示为以下 6 个分量^[7]:

$$\begin{cases} H_z = k_c^2 A J_1(k_c r) \cos \phi \times e^{j(\omega t - \beta z)} \\ H_r = -j\beta k_c A J_1'(k_c r) \cos \phi \times e^{j(\omega t - \beta z)} \\ H_\phi = j\beta \frac{A}{r} J_1(k_c r) \sin \phi \times e^{j(\omega t - \beta z)} \\ E_r = j\omega \mu \frac{A}{r} J_1(k_c r) \sin \phi \times e^{j(\omega t - \beta z)} \\ E_\phi = j\omega \mu k_c A J_1'(k_c r) \cos \phi \times e^{j(\omega t - \beta z)} \\ E_z = 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: J_1 为第一阶贝塞尔函数; J_1' 为第一阶贝塞尔函数的导函数; A 为幅值; μ 为介质的磁导率; $k_c = \chi_{11}/R_w$; $\beta_{TE}^2 = k^2 - k_c^2 = \omega^2 \epsilon \mu - \frac{\chi_{11}^2}{R_w^2}$ 。通过坡印廷定理可计算出介质窗 TE 模式和 TM 模式损耗功率和输出功率的关系为^[9-10]:

$$P_{\text{loss, TE}} = \frac{\mu \epsilon_0 \epsilon_r'' d \omega^2}{\beta_{TE}} \left[\left(\frac{1-R}{1+R} \right)^2 + 4 \left(\frac{R}{1+R} \right)^2 + \frac{4R(1-R)}{(1+R)^2} \right] P_{\text{out}} \quad (6)$$

$$P_{\text{loss, TM}} = \frac{\epsilon_0^2 \epsilon_r'' d \omega^2}{\beta_{TM}} \left[\left(\frac{1-R}{1+R} \right)^2 + 4 \left(\frac{R}{1+R} \right)^2 + \frac{4R(1-R)}{(1+R)^2} \right] P_{\text{out}} \quad (7)$$

式中 $\epsilon_r'' = \epsilon_r' \tan \delta$ 为介质窗片的复介质常数的虚部, $\tan \delta$ 为介质的损耗角正切。 TM_{11} 模式的相位传播常数 $\beta_{TM} = \sqrt{\omega^2 \epsilon \mu - \frac{\chi_{11}^2}{R_w^2}}$, χ_{11}' 为 TM_{11} 模式的特征根。由此可以计算出高斯波束在输能窗的介质损耗和输出功率的关系为:

$$P_{\text{loss}} = 0.84 P_{\text{loss, TE}} + 0.16 P_{\text{loss, TM}} \quad (8)$$

蓝宝石输能窗在 170 GHz 的 $\tan \delta$ 约为 20×10^{-7} , 当窗片厚度为 1.444 mm, 窗半径 $R_w = 50$ mm 时, 170 GHz 回旋管用蓝宝石窗的损耗功率约为输出功率的 0.44%。图 3 为输能窗传输微波功率与窗损耗功率的关系曲线。

170 GHz 回旋管的微波以高斯波束输出, 因此需分析高斯波束在输能窗上的损耗功率分布。高斯波束的方程表达式为^[7]:

$$u = A_0 \frac{1}{w(z)} \exp \left\{ -\frac{r^2}{w^2(z)} - j \left[k \left(z + \frac{r^2}{2R(z)} \right) - \phi \right] \right\} \quad (9)$$

式中: $w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left[\frac{\lambda_0(z - z_0)}{\pi w_0^2} \right]^2}$, w_0 为束腰半径; r 为高斯

束斑半径, $r = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}$; A_0 为场的幅值; $R(z) = \frac{(z - z_0)^2 + \left(\frac{\pi w_0^2}{\lambda} \right)^2}{z - z_0}$ 。为便于计算, 选择束腰半径位置, $w(z) = w_0$, 不考虑相位的影响, 输能窗上场幅值分布和功率分布分别为:

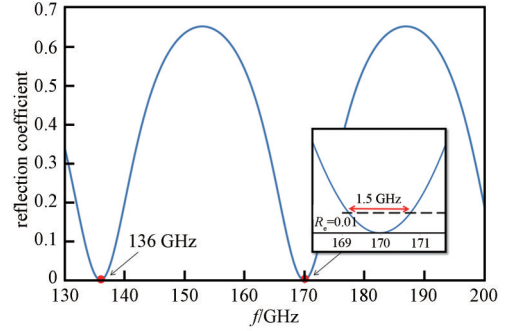


Fig.2 The relationship between reflection coefficient R_c and frequency f of sapphire

图2 蓝宝石输能窗反射系数 R_c 与频率 f 的关系

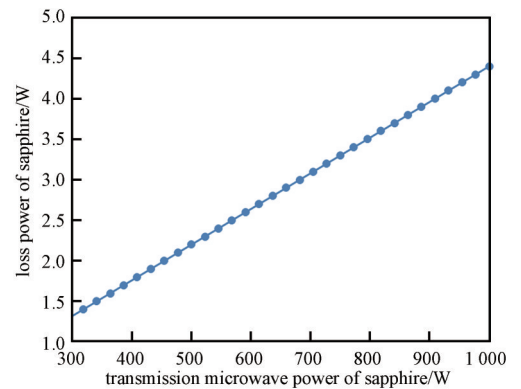


Fig.3 The relationship between transmission microwave power and loss power of sapphire

图3 蓝宝石窗传输微波功率与损耗功率关系

$$u = A_0 \frac{1}{w_0} \exp \left[-\frac{r^2}{w_0^2} \right] \quad (10)$$

$$P = A_0^2 \frac{1}{w_0^2} \exp \left[-\frac{2r^2}{w_0^2} \right] \quad (11)$$

由此可以绘制出窗表面场幅值分布和功率分布，如图4所示。通过计算得到各区域的功率占比 η ，如式(12)所示，在束腰半径以内区域的功率约占总功率的86.5%。

$$\eta = \frac{\int_0^{2\pi} d\theta \int_{-r}^r A_0^2 \frac{1}{w_0^2} \exp \left(-\frac{2r^2}{w_0^2} \right) r dr}{\int_0^{2\pi} d\theta \int_{-R_w}^{R_w} A_0^2 \frac{1}{w_0^2} \exp \left(-\frac{2r^2}{w_0^2} \right) r dr} \quad (12)$$

蓝宝石窗损耗功率约占传输功率的0.44%，同时基于高斯波束方程表达式计算出场幅值和功率的分布曲线，作为计算分析蓝宝石窗传输功率阈值的热源功率和能量分布数据依据。

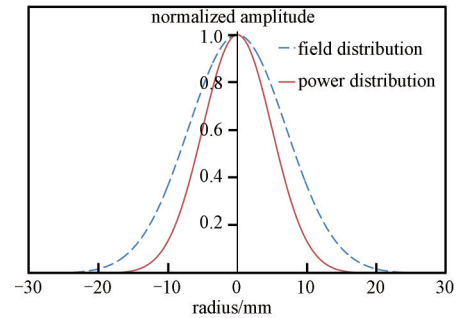


Fig.4 Field and power distribution on the window
图4 输能窗上场幅值分布和功率分布

3 蓝宝石窗的传输功率阈值

大功率回旋管普遍采用金属-陶瓷结构，输能窗部件同时包括了金属和介质材料，介质两边分别为空气和真空，对热应力更为敏感。通常造成大功率回旋管输能窗损坏的最主要因素为高功率微波穿过输能窗区域，介质损耗产生热量，造成窗片温度分布不均匀，热应力超出了窗片可承受极限，窗片损坏。基于上节计算的损耗功率和能量分布，使用ANSYS软件分析蓝宝石窗片温度分布，对比理论计算得到的窗片可承受最大温差，确定蓝宝石输出窗部件可传输高斯波束的功率阈值，作为170 GHz回旋管最大工作比的判据。

介质窗在正常工作时吸收高频微波能量使温度上升，根据微波场强的分布形成窗表面温度分布。介质窗在未被破坏前所能承受的最大温差 ΔT_0 ，由材料自身的物理性质决定^[11]：

$$\Delta T_0 = \delta_f \times \frac{1-\nu}{E\alpha} \quad (13)$$

式中： δ_f 为抗弯强度； E 为弹性模量； ν 为泊松比； α 为热膨胀系数。将表1中的蓝宝石参数^[12]代入式(13)，可以得到蓝宝石窗上中心温度和边缘温度的临界梯度差 $\Delta T_0 \approx 73.8^\circ\text{C}$ 。

以蓝宝石窗片的临界温度梯度差 $\Delta T_0 \approx 73.8^\circ\text{C}$ 作为设计标准，进行热仿真分析，由此确定蓝宝石窗可承受的最大损耗功率，进而计算出使用蓝宝石窗的170 GHz回旋管最大输出平均功率。

根据水冷结构，使用对流换热系数计算公式，可以估算出水冷部分的对流换热系数约为 $674 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ^[13-14]，其他部分对流换热系数取值为自然状态经验值 $200 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。根据上述散热边界条件进行稳态热力学仿真计算，得到蓝宝石窗在传播高斯波束时蓝宝石输能窗微波功率与温度对应关系，如图5所示。介质损耗平均功率为2.6 W时，输能窗最大温差约为 74.4°C 。接近蓝宝石窗可承受最大温差，此时对应的170 GHz回旋管最大输出平均功率为590 W。

输能窗部件达到稳定状态后，温度分布和径向形变量分布如图6~图7所示。图6(a)为窗组件温度分布云图，可以看出，蓝宝石输能窗的最高温度为 99.4°C ，分布在窗

表1 蓝宝石输能窗的材料性质参数

Table1 Parameters of sapphire window

parameter	value
permittivity ϵ_r (170 GHz)	9.4
loss tangent $\tan \delta$ (170 GHz)	20×10^{-5}
thermal expansion coefficient α (20~500 $^\circ\text{C}$)/K	8.3×10^{-6}
thermal conductivity k_T (100 $^\circ\text{C}$)/(W·cm ⁻¹ ·K ⁻¹)	0.25
specific heat capacity c_p (25 $^\circ\text{C}$)/(kJ·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	7.54
ultimate bending strength δ_f (N·mm ⁻²)	410
Young's modulus E /GPa	462.6
Poisson's number ν	0.309

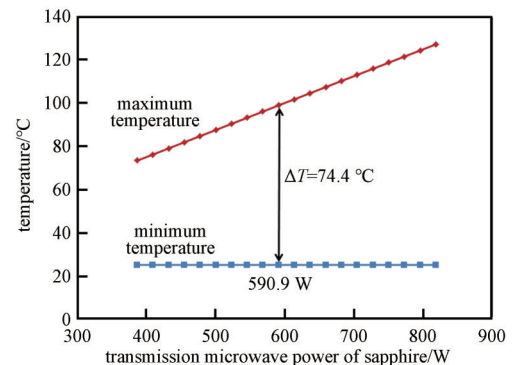


Fig.5 The relationship between transmission microwave power and temperature difference

图5 输能窗传输微波功率与损耗功率及温差的关系

片中心位置,最低温度接近室温,分布在窗片边缘。说明高斯波束能量集中在窗片中心,导致该区域温度高,而蓝宝石窗的导热率较低,导热性能相对较差,故窗片中心的热量难以迅速传导至窗片边缘。图 6(b)为窗片温度沿径向分布图,可以看出边缘温度与中心温度差 $\Delta T_0 \approx 74.4^\circ\text{C}$ 。

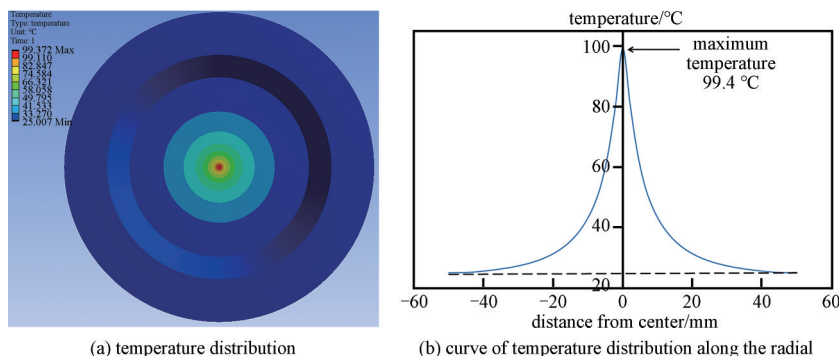


Fig.6 Temperature distribution of 170 GHz sapphire window

图 6 170 GHz 回旋管蓝宝石窗温度分布

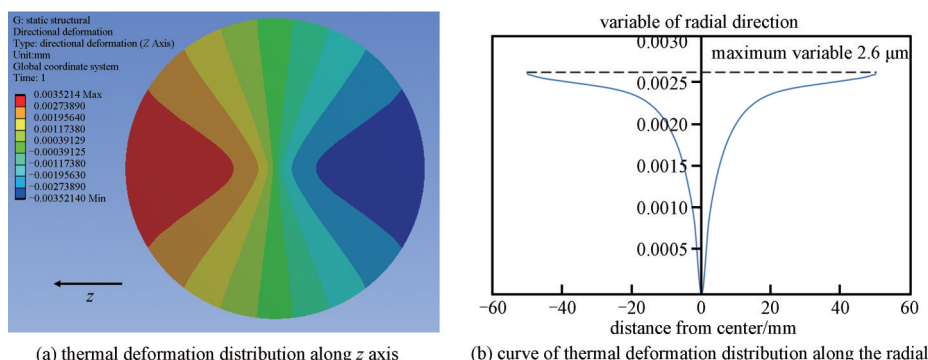


Fig.7 Thermal deformation distribution of 170 GHz sapphire window

图 7 170 GHz 回旋管蓝宝石窗热形变分布

图 7(a)为沿 z 轴(径向)热形变量分布云图,左侧膨胀量与 z 轴方向同向,右侧与 z 轴方向反向,可以看出形变量方向均从圆心向外。图 7(b)为热形变量沿径向分布曲线,可以看出,窗中心形变量较小,边缘径向热形变量最大,约为 $0.26\ \mu\text{m}$ 。由此可以分析出,当高斯波束穿过蓝宝石窗,介质损耗导致中心温度高,蓝宝石窗向四周膨胀,由于金属化层经过焊接,位置相对固定,故在边缘处产生较大的应力,导致蓝宝石金属化结构强度薄弱处损坏。

4 实验测试

基于上述设计,研制了蓝宝石输能窗。采用平封结构将蓝宝石窗片与金属焊边高气密性焊接,在窗片两侧使用去应力瓷环结构减小封接处应力,确保输能窗在测试复杂物理场环境下的工作可靠性。

为验证输能窗组件的微波传输特性,采用自由空间法测量,利用喇叭天线发射 TEM 波照射待测介质,通过反射和透射信号的幅度信息反演出被测材料的介电常数。矢量网络分析仪产生的矩形 TE_{10} 模式通过喇叭天线,转换为束腰半径约为 $3.6\ \text{mm}$ 的准高斯波束,经过反射镜反射,传输至系统中间被测样品处的束腰半径扩展至约 $14\ \text{mm}$ 。另一个喇叭天线接收透射的微波信号进行数据处理。测试得到蓝宝石窗片的 S 参数,经过数据处理,170 GHz 回旋管蓝宝石窗反射系数与频率曲线如图 8 所示。可以看出,蓝宝石窗在 135 GHz 和 170 GHz 处存在明显峰值(蓝色曲线), S_{11} 约为 $-23\ \text{dB}$,与理论计算值(红色曲线)一致性较高。

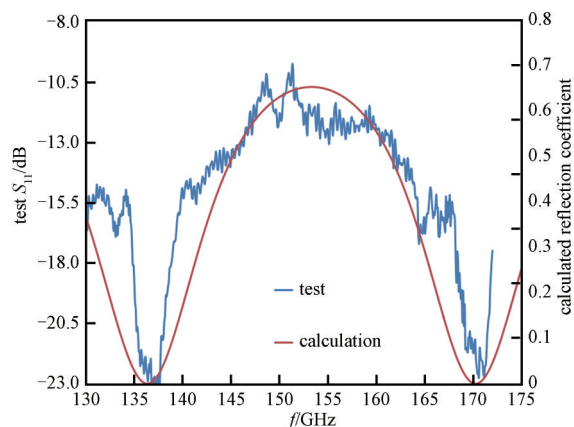


Fig.8 The relationship between reflection coefficient and frequency of sapphire by test and calculation

图 8 170 GHz 回旋管蓝宝石窗反射与频率关系

对使用蓝宝石窗的 170 GHz 回旋管开展实验测试。当脉冲宽度为 0.3 ms 时，得到回旋管的平均输出功率约为 60 W，对应脉冲输出功率约为 200 kW，此时使用红外热成像仪观测得到的输出束斑如图 9 所示，使用热敏纸观测到的输出束斑如图 10 所示。可以看出，束腰半径以内区域能量更集中。将热敏纸加热至焦黄色，测试得到的高斯束斑向 xy 轴正方向偏离输出窗几何中心约 15 mm。采用该蓝宝石窗，170 GHz 回旋管在短脉冲状态下可稳定工作，验证了输能窗部件设计方案的合理性。

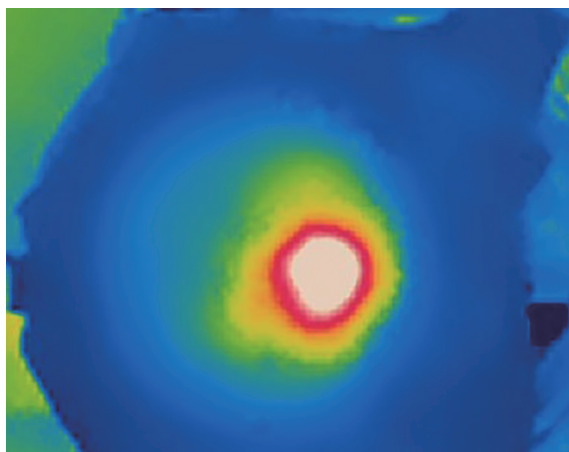


Fig.9 Observed beam spot by infrared thermal imager
图9 红外热成像仪观测得到的输出束斑

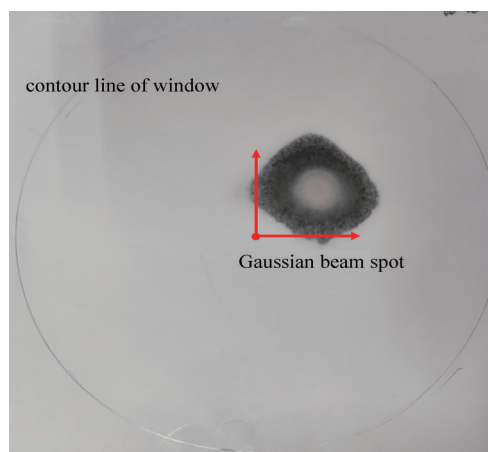


Fig.10 Observed beam spot by thermal paper
图10 热敏纸观测到的输出束斑

为探索 170 GHz 回旋管提高工作比对性能的影响，在 1 Hz 连续工作状态下，以 0.1 ms 步进，将脉冲宽度从 0.1 ms 提高至 2.5 ms，即平均功率提升至约 500 W，170 GHz 回旋管稳定工作一段时间后，出现输能窗碎裂损坏情况，损坏输能窗如图 11 所示。图中左下和右上为输能窗部件边缘散热结构冷却水路。

170 GHz 回旋管蓝宝石窗的裂纹主要在窗片中心至右上方边缘金属化层处，同时在实验过程中明显观测到，在脉冲工作时，窗中心温度急剧升高，而四周温度接近室温。由此推断造成该蓝宝石窗损坏的原因是中心与四周温度分布不均，温度梯度过大，导致沿半径方向存在较大应力，使窗片碎裂损坏。实测窗损坏时微波功率为 500 W，相比理论计算阈值 590 W，差 15%。通过对比图 10 和图 11 可得，造成差距的最主要原因是输出束斑偏离输能窗几何中心，导致束斑中心点与边缘的温度梯度进一步增加，该两点间的应力增加，造成损坏阈值提前到达，致使窗片破损。对此需要优化模式变换系统方案，矫正高斯波束传输路径，使实际功率阈值达到理论计算值。下一阶段将采用抗热震系数更高的输能窗材料，同时优化回旋管散热能力，提高 170 GHz 回旋管最大可承受工作比，以满足磁约束热核聚变系统的应用需求。

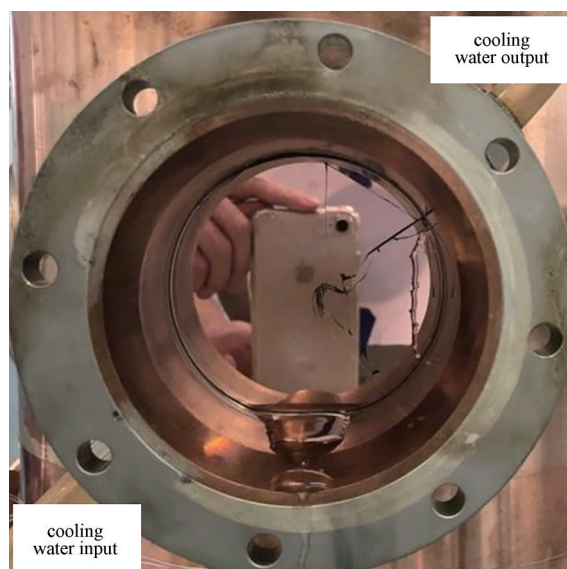


Fig.11 The broken sapphire window of 170 GHz gyrotron
图11 170 GHz回旋管损坏的蓝宝石窗

5 结论

针对 170 GHz 回旋管高斯波束低损耗、低反射馈入聚变装置的应用需求，选用蓝宝石材料开展了传输特性理论分析和设计。在 170 GHz 频点反射系数低于 0.01 的带宽为 1.5 GHz，传输高斯波束时窗片的介质功率损耗约为总输出功率的 0.44%。使用矢量网络分析仪测量蓝宝石窗组件，验证了蓝宝石窗在 170 GHz 的低反射特性。分析了输能窗的损坏机理，计算得到蓝宝石窗最大可承受 590 W 平均输出功率的阈值。在测试使用蓝宝石窗研制的 170 GHz 回旋管过程中，当输出功率达到 500 W 时，蓝宝石窗由于热应力过大而损坏。通过理论计算与实验对比，为大功率回旋管输能窗的设计和测试提供了可靠的依据。

参考文献:

- [1] GANTENBEIN G, ERCKMANN V, ILLY S, et al. 140 GHz, 1 MW CW gyrotron development for fusion applications—progress and recent results[J]. Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, 2011, 32(3): 320–328. doi:10.1007/s10762-010-9749-2.
- [2] HENDERSON M A, SAIBENE G. Critical interface issues associated with the ITER EC system[J]. Nuclear Fusion, 2008, 48(5): 054017. doi:10.1088/0029-5515/48/5/054017.
- [3] THUMM M. Progress on gyrotrons for ITER and future thermonuclear fusion reactors[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2011, 39(4): 971–979. doi:10.1109/TPS.2010.2095042.
- [4] SAKAMOTO K, KASUGAI A, KAJIWARA K, et al. Progress of high power 170 GHz gyrotron in JAERI[J]. Nuclear Fusion, 2009, 49(9): 095019. doi:10.1088/0029-5515/49/9/095019.
- [5] LI Hongfu, THUMM M. Mode conversion due to curvature in corrugated waveguides[J]. International Journal of Electronics, 1991, 71(2): 333–347. doi:10.1080/00207219108925480.
- [6] DENISOV G G, ALEXANDROV N L, BOGDASHOV A A, et al. Experiments on HE_{11} mode excitation by paraxial wave beams[C]// The 21th Int Conf Infrared and Millimeter Waves. Germany: Berlin, 1996.
- [7] 张克潜, 李德杰. 微波与光电子学中的电磁理论[M]. 北京: 电子工业出版社, 1994. (ZHANG Keqian, LI Dejie. Electromagnetic theory in microwaves and optoelectronics[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 1994.)
- [8] 罗勇, 李宏福, 徐勇, 等. 低反射低吸收高平均功率输出窗的设计[J]. 强激光与粒子束, 2004, 16(11): 1425–1428. (LUO Yong, LI Hongfu, XU Yong, et al. RF windows of low reflectivity and absorption for high average power gyrokystrons[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2004, 16(11): 1425–1428.) doi:CNKI:SUN:QJGY.0.2004-11-016.
- [9] 李儒礼. 连续波回旋管高频系统热仿真分析[D]. 成都: 电子科技大学, 2014. (LI Ruli. Thermal analysis for high frequency system of CW gyrotron[D]. Chengdu, China: University of Electronic Science and Technology of China, 2014.) doi:10.7666/d.D499661.
- [10] 何晟, 邓艳波, 李儒礼. 高斯模式输出窗的热分析[J]. 真空电子技术, 2015(3): 12–16. (HE Sheng, DENG Yanbo, LI Ruli. The thermal analysis of output HE_{11} mode windows[J]. Vacuum Electronics, 2015(3): 12–16.) doi:10.3969/j.issn.1002-8935.2015.03.004.
- [11] 高陇桥. 氧化铍陶瓷[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006: 76–103. (GAO Longqiao. Beryllium oxide ceramics[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2006: 76–103.)
- [12] THUMM M. State-of-the-art of high power gyro-devices and free electron masers: KIT Scientific Reports 7735[R]. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, 2016. doi:10.5445/KSP/1000068193.
- [13] 杨世铭. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1998. (YANG Shiming. Heat transfer[M]. Beijing: Higher Education Press, 1998.)
- [14] 欧超健. 连续波回旋管的热特性研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2015. (OU Chaojian. Thermal analysis of CW gyrotron[D]. Chengdu, China: University of Electronic Science and Technology of China, 2015.) doi:10.7666/d.D664017.

作者简介:

张亦弛(1991–), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为太赫兹微波及大功率回旋器件, email: zyc913374137@sina.com.

高东硕(1992–), 女, 硕士, 工程师, 主要从事短毫米波及太赫兹大功率回旋器件的研制工作.

曾旭(1984–), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为短毫米波及太赫兹大功率回旋器件.

李鹏(1978–), 男, 大专, 工程师, 主要从事短毫米波及太赫兹大功率回旋器件的研制工作.

郝文腾(1997–), 女, 大专, 助理工程师, 主要从事短毫米波及太赫兹大功率回旋器件的研制工作.

李博阳(1999–), 男, 学士, 助理工程师, 主要从事短毫米波及太赫兹大功率回旋器件的研制工作.

冯进军(1966–), 男, 博士, 研究员, 中国电科首席科学家, 主要研究方向为短毫米波和太赫兹真空电子器件.