

W 波段回旋管准光模式变换器的研究

赵国慧^{①②} 薛谦忠^{*①②} 王勇^{①②} 王虎^③ 耿志辉^① 张珊^{①②} 王雪微^{①②}

^①(中国科学院电子学研究所 北京 101407)

^②(中国科学院大学 北京 101408)

^③(山东省科学院海洋仪器仪表研究所 青岛 266061)

摘要: 该文对 W 波段 TE₆₂ 模回旋管准光模式变换器的辐射器和镜面系统进行了设计与实验验证。基于耦合模理论,采用两级微扰对辐射器进行了设计,获得了圆波导内壁上的类高斯束斑的场分布;基于惠更斯原理的矢量衍射积分理论,对准光模式变换器的镜面系统进行了优化设计,模拟与计算结果表明准光模式变换器的模式变换效率为 92.3%。最后,通过热测实验,验证了输出模式为 W 波段类高斯模式。

关键词: 回旋管; 准光模式变换器; 数值模拟

中图分类号: TN811; TN814

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2018)07-1767-07

DOI: 10.11999/JEIT170998

Investigation of Quasi-optical Mode Converter for W Band Gyrotron

ZHAO Guohui^{①②} XUE Qianzhong^{①②} WANG Yong^{①②} WANG Hu^③
GENG Zhihui^① ZHANG Shan^{①②} WANG Xuewei^{①②}

^①(Institute of Electronics, Chinese Academy of Science, Beijing 101407, China)

^②(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China)

^③(Institute of Marine Instrumentation, Shandong Academy of Sciences, Qingdao 266061, China)

Abstract: The design and experimental verification of the launcher and mirror system of W band TE₆₂ mode gyrotron quasi optical mode converter are presented. Based on the coupled mode theory, two order perturbation is used to design the launcher. The field distribution of the Gauss beam spot on the inner wall of the circular waveguide is obtained. The vector diffraction integral theory based on Huygens's principle is used to optimize the mirror system of the optical mode converter. Simulation and calculation results show that the mode conversion efficiency of quasi optical mode the converter is 92.3%. Finally, a thermal measurement experiment is carried out to verify that the output mode is W band Gauss like mode.

Key words: Gyrotron; Quasi-optical mode converter; Numerical simulation

1 引言

回旋管振荡器在毫米波与亚毫米波段是一种具有效率高和高功率的真空器件,被广泛应用于军事、民用各个领域,特别是在受控核聚变、等离子体加热、微波定向武器等方面具有良好发展前景^[1-3]。随着回旋管向高功率,高频率,高效率方向发展,其工作模式一般采用圆波导中的高阶模式,圆电模 TE_{0n} 或腔模 (TE_{mn}, $m \gg 1, n \gg 1$) 或边廊模 (TE_{mn}, $m \gg n, n \geq 2$) 工作。然而,这种模式在自由空间传

播时会产生严重的极化和衍射损耗,不适合直接利用和空间传输,需要采用模式变换器将此类模式转换成线极化低阶模式或者高斯模式^[4,5]。采用传统的波导模式变换器,其转换模式纯度依赖于变换器的长度,应用时受到空间尺寸的限制。准光模式变换器作为内置的回旋管模式变换器,能将沿轴向传输的高阶电磁波变换到横向以类高斯波束的形式输出,具有突出的优点:直接用于低耗传输和天线馈入;电子束和波束分离,易采用降压收集极,提高整管效率;降低输出窗反射对相互作用影响;高次模式工作,功率容量更高;整体结构更加紧凑。因此,内置式的准光模式变换器不论是对提高回旋管本身的性能还是方便于应用都是至关重要。

目前国际上受控核聚变选用的回旋管的工作频

收稿日期: 2017-10-25; 改回日期: 2018-04-03; 网络出版: 2018-05-11

*通信作者: 薛谦忠 qianzhong_xue@mail.ie.ac.cn

基金项目: 国家自然科学基金(11475182)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (11475182)

率为 110~170 GHz, 所选模式为高阶非对称体模。文献[6-13]给出了近几年国外对该频段回旋管准光模式变换器的研究报道。最新研究表明, 一种采用 Hybrid-Type 辐射器^[13]的准光模式变换器已经完成测试并应用在 ITER 计划的 1 MW, 170 GHz, 工作模式为 $TE_{32,9}$ 的回旋管中。国内文献对准光模式变换器的报道相对较少, 并且仅限于数值模拟和局部分析。文献[14~20]给出了近几年国内对于准光模式变换器的研究报道。其中文献[14~16]报道了 W 波段 Vlasov 型准光模式变换器, 这种模式变换器的功率传输效率较低, 大约为 85%, 损耗较大, 辐射器切口处的功率损耗高达 10%, 转换得到波束的高斯含量较低, 只有 75%左右。文献[17]深入研究了 140 GHz Denisov 辐射器的设计, 但是并未对镜面系统进行设计。文献[18,19]分别对 110 GHz 和 140 GHz 的 Denisov 型准光模式变换器进行了设计, 然而, 作为造成传输效率降低原因之一的辐射器口径杂散波束, 文章中并未对其进行详细场分析, 也没有报导实验测试结果。

本文基于 Denisov 方法, 对 W 波段 TE_{62} 模准光模式变换器的辐射器开展了设计研究。给出辐射器以及由 3 个光滑、曲面组成的镜面系统设计, 详细地分析了衍射损耗, 杂散波束损耗, 并对准光模式变换器的输出模式进行了测试验证。

2 螺旋波纹扰动辐射器的设计和数值计算

准光模式变换器由辐射器和多级聚焦反射镜面系统组成。辐射器为一段半径不规则变化的螺旋波纹波导并在其末端以螺旋状切开, 它能够将在波导内传播的电磁波预聚束成能量集中的类高斯波束, 并在切口处将波导传输的能量转化为有方向性的空间辐射。降低开口处的衍射损耗是辐射器设计旨在解决的问题。多级聚焦反射镜面系统, 通过调整曲面镜的曲率和倾斜角度, 改变波束传播方向, 并进一步实现波束聚束, 提高模式纯度。

2.1 辐射器的理论分析

分析辐射器内电磁波的传播和辐射可以用几何光学法, 几何光学模型如图1所示。图中各参量分别为: R_0 为圆波导半径, θ 为波导壁上射线与反射点处切线的夹角, R_c 为焦散半径, θ_B 为波矢量与纵轴的夹角, L_B 为射线连续两次反射在轴向传播的距离。为了在辐射口径上得到模式纯度较高的高斯束斑, 螺旋波纹波导壁通常采取多级扰动的形式, 使圆波导内传播的电磁波在轴向和角向预聚束, 本文半径的表达式为

$$R(\phi, z) = R_w + \sum_i \delta_i \cos(\Delta\beta_i z - l_i \phi) \quad (1)$$

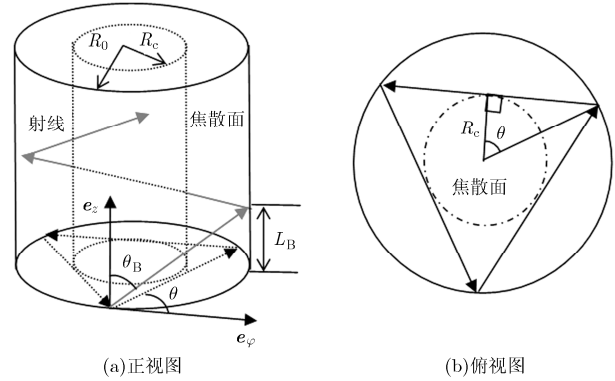


图1 圆波导中能量射线传播的几何光学模型

其中, $R_w = R_0 + \alpha z$, R_0 为圆波导初始半径, α 为锥度, δ 为扰动幅度, $\Delta\beta_i$ 为工作模式与耦合模式纵向传播的常数差, l_i 为角向扰动的周期数, 取整数。 $\Delta\beta_i$ 和 l_i 的取值不同, 则波导中耦合出的模式不同。在设计中, 为使场在轴向和角向都具有良好的聚束, 扰动结构选取两级扰动, 即式(1)中的 $i = 1, 2$ 。

合成高斯波束的角向和轴向模式选择条件分别为

$$\Delta m = \pm 3, \quad \Delta n = \mp 1 \quad (2a)$$

$$\Delta\beta = \beta_{m,n} - \beta_{m\pm 1, n} = 2\pi/L \quad (2b)$$

由此可获得工作模式和其他耦合模式及其幅度分布, 见表1。

工作模式为 TE_{62} 模, 按合成高斯波束模式选择条件, 且仅考虑前向波 TE 模之间的耦合, 应耦合出 $TE_{33}, TE_{01}, TE_{52}, TE_{72}$ 4 个模式, 这 4 个模式进而弱耦合出 $TE_{43}, TE_{23}, TE_{81}, TE_{10,1}$ 模, 从而在波纹波导内得到包括 TE_{62} 模在内的 9 个混合的模式。这 9 个模式具有不同的幅值和相位, 沿 z 轴方向可在角向和轴向聚束形成高斯束斑。

2.2 辐射器的数值计算和模拟结果

为了获得高斯波束合成要求的混合模式及其幅度分布, 本文中选取的辐射器波导结构参数为圆波导初始半径 $R_0 = 6.85$ mm, 工作频率 $f = 94$ GHz, 圆波导锥度 $\alpha = 0.002$, 1 级扰动幅度 $\delta_1 = 0.08$ mm, 2 级扰动幅度 $\delta_2 = 0.09$ mm, 轴向扰动周期数 $l_1 = 1$, 角向扰动周期数 $l_2 = 3$ 。其中扰动的幅度沿 z 轴的变化如图 2 所示。式(1)中工作模式与耦合模式纵向传播的常数差:

$$\Delta\beta_1 = \frac{1}{2} \left[\sqrt{k_0^2 - \left(\frac{\chi_{5,2}}{R_w + \alpha z} \right)^2} - \sqrt{k_0^2 - \left(\frac{\chi_{7,2}}{R_w + \alpha z} \right)^2} \right] \quad (3)$$

$$\Delta\beta_2 = \frac{1}{2} \left[\sqrt{k_0^2 - \left(\frac{\chi_{3,3}}{R_w + \alpha z} \right)^2} - \sqrt{k_0^2 - \left(\frac{\chi_{9,1}}{R_w + \alpha z} \right)^2} \right] \quad (4)$$

表1 叠加生成高斯分布的工作模式 TE_{m,n}与耦合模式及其功率分布

		角向耦合		
轴向耦合	TE _{m-2,n+1}	TE _{m+1,n}	TE _{m+4,n-1}	
	3%	11%	3%	
	TE _{m-3,n+1}	TE _{m,n}	TE _{m+3,n-1}	
	11%	44%	11%	
	TE _{m-4,n+1}	TE _{m-1,n}	TE _{m+2,n-1}	
	3%	11%	3%	

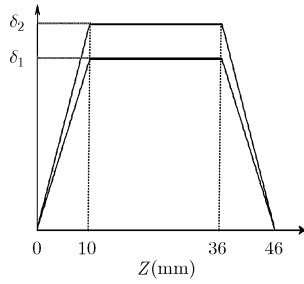


图2 扰动幅度沿辐射器纵向的变化

由波导结构参数结合式(3),式(4),可获得波纹波导的3维结构图,如图3所示。求出耦合系数,将耦合系数与各耦合模式代入耦合波方程中,求解耦合波方程,可得到各模式在Z轴不同位置处的幅值。图4为波纹波导内各模式相对功率沿纵向的分布。图5为波纹波导内壁上由9个混合模式叠加形成的场分布。从图中可以看出,在辐射器的剪裁口径,

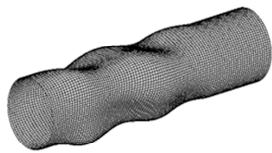


图3 螺旋波纹波导3维结构图

类高斯光斑的场分布有明显边界,且边界的场强远低于光斑的中心,约-12 dB。沿图5所示的剪裁线,形成辐射器口径,将会大大地降低衍射损耗。

为了评估混合模式叠加后所达到高斯波束的模式纯度,需要分别求出标量相关系数 η_s 和矢量相关系数 η_v , 它们分别定义为

$$\eta_s = \frac{\int_s |\mathbf{u}_i| \cdot |\mathbf{u}_g| ds \cdot \int_s |\mathbf{u}_i| \cdot |\mathbf{u}_g| ds}{\int_s |\mathbf{u}_i|^2 ds \cdot \int_s |\mathbf{u}_g|^2 ds} \quad (5)$$

$$\eta_v = \frac{\left[\int_s |\mathbf{u}_i| \cdot |\mathbf{u}_g| \exp(j(\phi_i - \phi_g)) ds \cdot \int_s |\mathbf{u}_i| \cdot |\mathbf{u}_g| \exp(j(\phi_i - \phi_g)) ds \right]}{\left[\int_s |\mathbf{u}_i|^2 ds \int_s |\mathbf{u}_g|^2 ds \right]} \quad (6)$$

\mathbf{u}_i 为辐射口径上的场, \mathbf{u}_g 为标准高斯场。图5(b)及图5(c)分别为放大后的辐射口径上的类高斯场分布(图5(a)中菱形区域)和辐射口径上的标准高斯场分布。将图5(b)及图5(c)的场分布代入式(5)和式(6),得到辐射口径上场的标量相关系数和矢量相关系数分别为98.30%和96.63%。

3 反射镜面的设计与数值模拟

3.1 反射镜面的结构分析和设计

相互作用后的电磁波从辐射器辐射出去后,经镜面系统的聚焦和反射到达横向放置的输出窗处,并且在输出窗上形成准高斯场分布。本文设计采用了

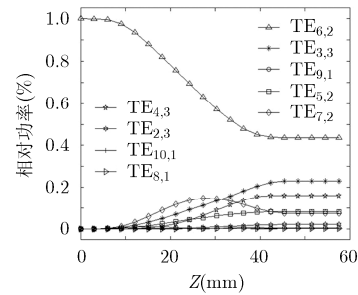


图4 各模式相对功率沿纵向的分布

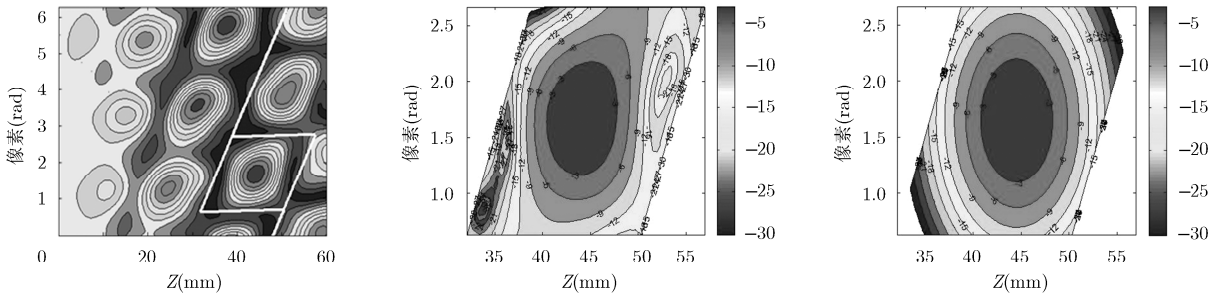


图5 波导壁上的场幅分布

三反射镜结构。镜1为抛物柱面，主要使波束在横向聚束；镜2为双焦点抛物镜面，使波束在纵向聚束，并且进一步在横向聚束；镜3为双焦点抛物镜面，除了使波束在横向和纵向聚束外，并调整波束方向，使其垂直于轴向，沿横向传播，确保波束传播方向垂直于输出窗面。在设计镜面结构尺寸时需要根据镜面以及输出窗上的场分布来调整镜面参数。

在直角坐标系下，镜面方程可写为

$$Y = \frac{X^2}{4F_X} + \frac{Z^2}{4F_Z} \quad (7)$$

其中， F_X 和 F_Z 为曲线在 x 和 z 方向的焦距。经优化设计得到的一组镜面参数如表2所示。

表2 反射镜面系统的设计参数

反射镜	中心位置 (mm)	镜面尺寸 (mm)	焦距(mm)
M1	(0, 30, 20)	120×80	$F_X = 40, F_Z = +\infty$
M2	(0, -30, 47)	120×100	$F_X = 120, F_Z = 100$
M3	(0, 70, 145)	80×100	$F_X = 900, F_Z = 245$
输出窗	(0, -100, 145)	$\phi = 50$	

设计中发现镜面的尺寸、中心位置、焦距以及倾斜度对结果影响较大。镜面的中心位置和尺寸决定着它能从上级镜面或者辐射器辐射出的波束中截获多少能量，而它的焦距又决定着将波束聚束的程度。如果聚束效果不好(焦距太小或太大)，则会有一部分能量发散到空间中，不被下级镜面截获。倾斜度主要调整波束的传播方向。设计时还应当考虑回旋管输出结构的尺寸大小，合理地设计镜面的尺寸结构与镜面中心位置，使之形成类高斯波束的束腰位置在输出窗附近，使其能量高效地通过输出窗并向外辐射。

3.2 反射镜面的数值模拟结果

反射镜面上场的计算采用矢量衍射积分方程即Stratton-Chu方程(8)和表面电流积分方程(9):

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{E}(\mathbf{r}) &= \oint_S \left[-j\omega\mu(\mathbf{e}_n \times \mathbf{H}_S) + (\mathbf{e}_n \times \mathbf{E}_S) \times \nabla' \right. \\ &\quad \left. + (\mathbf{e}_n \cdot \mathbf{E}_S) \nabla' \right] \mathbf{G}_0(\mathbf{r}, \mathbf{r}') dS' \\ \mathbf{H}(\mathbf{r}) &= \oint_S \left[j\omega\epsilon(\mathbf{e}_n \times \mathbf{E}_S) + (\mathbf{e}_n \times \mathbf{H}_S) \times \nabla' \right. \\ &\quad \left. + (\mathbf{e}_n \cdot \mathbf{H}_S) \nabla' \right] \mathbf{G}_0(\mathbf{r}, \mathbf{r}') dS' \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{E}(\mathbf{r}) &= -\frac{j}{\omega\epsilon} \iint_S (k^2 \mathbf{J}_S + (\mathbf{J}_S \cdot \nabla') \nabla') \mathbf{G}_0(\mathbf{r}, \mathbf{r}') dS' \\ \mathbf{H}(\mathbf{r}) &= -\iint_S (\mathbf{J}_S \times (\nabla' \mathbf{G}_0(\mathbf{r}, \mathbf{r}')) dS' \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

计算时，各反射镜面均认为是理想导体镜面。其中镜面1上的场采用式(8)计算，式中 \mathbf{E}_S 和 \mathbf{H}_S 为辐射口径上的场分布，即图5(b)， \mathbf{E}_S 和 \mathbf{H}_S 由解耦合模方程得到。 \mathbf{e}_n 为辐射口径的单位外法向矢量， \mathbf{G}_0 为自由空间格林函数， dS' 为辐射口径的积分面元， $\mathbf{E}(\mathbf{r})$ 和 $\mathbf{H}(\mathbf{r})$ 为计算得到的镜面1上的场。镜面2，镜面3以及输出窗上的场由式(9)计算，式中 $\mathbf{J}_S = 2(\mathbf{e}'_n \times \mathbf{H})$ 为上级镜面上的表面感应电流， \mathbf{e}'_n 为上级镜面的单位外法向矢量， \mathbf{H} 为上级镜面上的磁场分布， dS' 为上级镜面的积分面元， $\mathbf{E}(\mathbf{r})$ 和 $\mathbf{H}(\mathbf{r})$ 为计算得到的镜面2，镜面3以及输出窗上的场。

图6为设计的整个镜面系统图。从 $z=0$ 开始，沿 z 轴正向依次为反射镜M1, M2, M3，最后一面镜为输出窗。图7(a)-图7(d)分别为反射镜M1, M2, M3以及输出窗上的场幅(dB)分布。由图7可以看出从辐射器中辐射出的波束被多面反射镜聚焦和反射后逐渐变换为能量集中的准高斯波束。

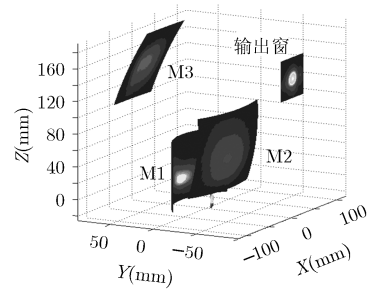


图6 准光模式变换器整体仿真图

为了确定输出窗的位置，在镜面3之后的波束传播方向上应在图6中的 $-Y$ 方向，其路径在 $Y = 50 \sim -190$ mm范围内，每隔10 mm放置一个输出窗口，由此可以观察M3辐射波束的束腰位置大致为 $Y = -100$ mm处，如图8所示。计算了每一个输出窗口上波束的矢量相关系数和标量相关系数，所得数据结果绘制在图9中。由图9可以看出在 $-40 \sim -190$ mm的传播距离上，标量相关度均大于95%，并且在 $-70 \sim -180$ mm的传播距离上，标量相关度均大于97%。因为矢量相关系数与场的相位有关，所以随着距离的变化呈现出一定的波动性。在 $Y = -100$ mm处，如图9中虚线所示，矢量相关系数和标量相关系数都达到最大值，分别为98.0404%和94.2730%。结合图8中的束腰位置，确定输出窗的 Y 坐标为 $Y = -100$ mm。准光模式变换器的模式变换效率为输出的场中高斯模式携带的功率占辐射器输入端输入总功率的百分比，本文用输出窗处的标量相关系数结合表3中输出窗上的归一

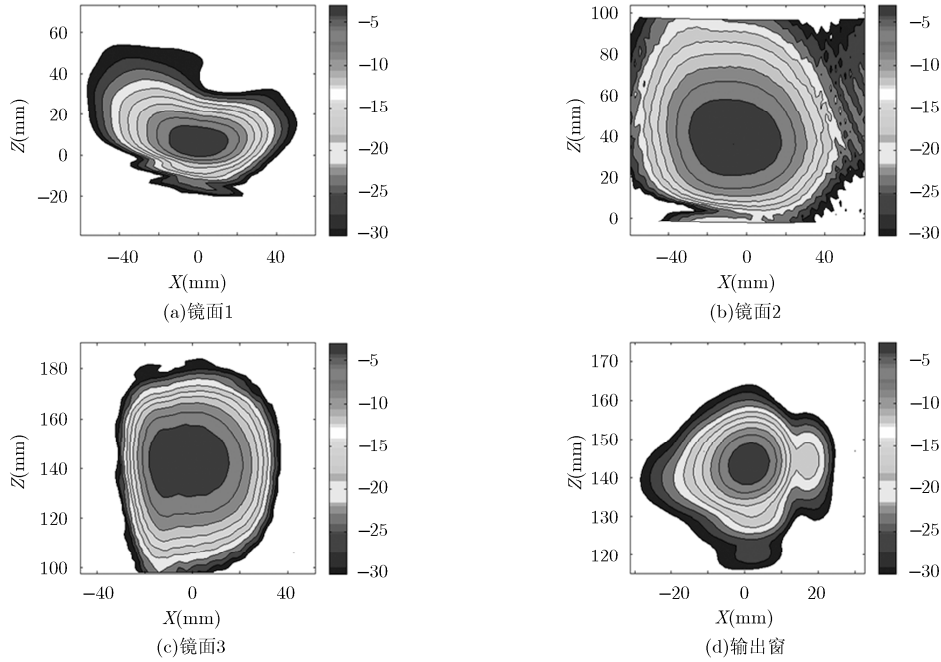


图7 各镜面上的场幅分布图

化能量, 计算该模式变换器的模式变换效率为92.3%。

3.3 数值结果分析

评价准光模式变换器性能的另一标准是模式变换器的功率传输效率和模式转换效率。在模式变换器中, 能量(或功率)的损耗有两种: 第1种为镜面表面的欧姆损耗, 这里假设镜面光滑, 欧姆损耗约等于零; 第2种为衍射和散射损耗。表3给出了反射镜面截获的能量以及功率传输效率。从表中可以看出, 整个模式变换器的能量传输效率为94.15%, 在传输和反射过程中能量的损耗为5.85%, 其中, 输入到辐射器中的功率约有2.9%的功率没有到达M1, 主要原因是辐射器向外辐射波束时在其切口边缘还有约0.5%的衍射损耗, 并且辐射口径上的场并不是标准的高斯波束, 其中包含了杂散波束, 这样辐射出的能量就不会完全被M1截获。图10给出了M1处包含

杂散波束的场幅图, 结合表3分析可知, 杂散波束携带的能量为2.4%。被M1截获的主波束在被M1聚焦反射并传播至M2时也会产生少量的杂散波束, 图11给出了M2处的杂散波束, 此处杂散波束携带的能量为2.11%。由此可知, 波束从辐射器和M1辐射出后, 由杂散波束而造成的损耗为4.51%, 占到总损耗的77.09%, 另外总损耗的22.91%由M2, M3的衍射损耗引起。减小辐射波束中杂散波束的方法主要有两种: 一是对辐射器的扰动结构进一步优化, 使辐射器辐射出方向性更强的波束, 减少杂散波束; 二是研究镜面之间波束的电磁传播特性, 对镜面的表面进行优化设计, 利用相位补偿的方法, 削弱或消除旁瓣波束。对于此两种方法今后将进一步开展研究。

为了验证设计与模拟结构, 对W波段准光模式变换器进行了热测实验。图12(a)为热像仪(型号: DL 700C)测得的输出窗($\phi = 50 \text{ mm}$)的温度分布,

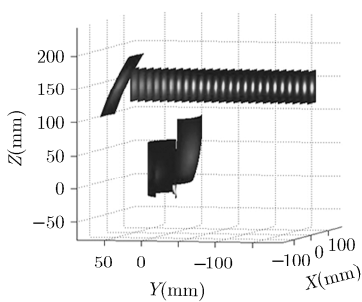


图8 准光模式变换器仿真结果图

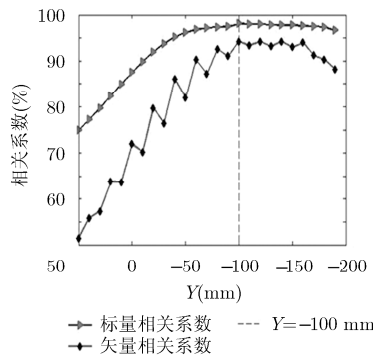


图9 相关系数沿传播方向的变化

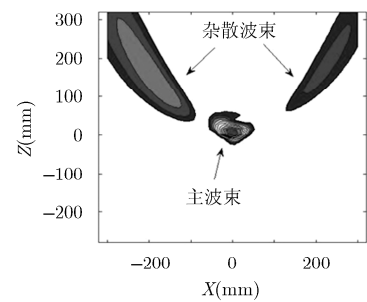


图10 镜面1处的杂散波束图

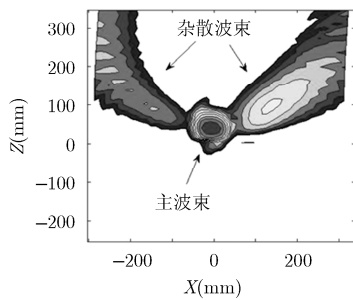


图 11 镜面2处的杂散波束图

表 3 反射镜面的传输效率

镜面	镜面截获的归一化能量	传输效率(%)
M1	0.97119	97.83
M2	0.95008	99.17
M3	0.94223	99.92
输出窗	0.94149	

环境温度为 20°C 。将热像仪测得的温度数据,经过处理可得到输出窗处的归一化温度分布等势图如图12(b)。由图12(b)可知,输出窗处中心温度最高,等温线接近圆周,呈环状分布,阶梯递减,说明温度分布也是类高斯分布的。但由于输出窗上的温度分布与其温度平衡后的能量分布不是线性的,因此关于最大值归一化的高斯分布的分布参数是不同的,即模拟计算得到的场分布图7(d)与测量得到的归一化温度分布图12(b)的 -3 dB 圆半径也就不同。另一方面,由于材料的热传导性等其它属性,窗上温度分布很难区分很小的温度差,因此图7(d)最外的凸出的场分布图在温度分布图中无法显示。实验测量的温度分布图与输出窗处数值计算的场分布图的形状并不完全相同,但是这两个图的变化趋势是一致的。且图12(b)的归一化温度分布图可以证明从输出窗处输出的场分布是类高斯分布。

实验结果验证了准光变换器实现了W波段横向准高斯模式的输出,与设计预测结果完全一致。需要提出的是虽然设计的Denisov辐射器的衍射损耗低于3%,但是其对波束的预聚束需要进一步优化辐射器的结构参数,减小辐射器和M1上辐射出的杂散波束,提高整个模式变换器的能量传输效率。

4 结论

本文设计了W波段Denisov型3反射镜准光模式变换器,得到了辐射器和反射镜面的结构参数,数值模拟计算了辐射器以及镜面和输出窗上的场分布。输出窗处场的标量相关系数和矢量相关系数分

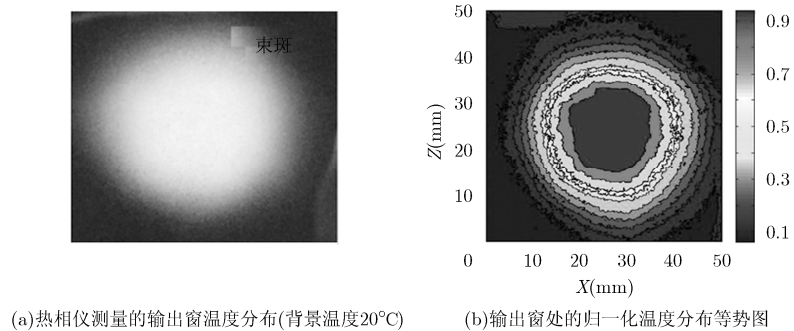


图 12 输出窗上温度分布

别达到了98.0404%和94.2730%,模式变换效率为92.3%;详细分析了波束在传播过程中的损耗;实验验证了输出模式为W波段类高斯模式。本文工作为W波段百千瓦级长脉冲回旋管Denisov型准光模式变换器提供系统的设计与分析方法,为高功率连续波回旋管的研制提供参考价值。

参考文献

- [1] THUMM M. Recent advances in the worldwide fusion gyrotron development[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2014, 42(3): 590-599. doi: 10.1109/TPS.2013.2284026.
- [2] WANG Wei, SONG Tao, LIU Diwei, et al. Quasi-optical mode converter for a 0.42-THz TE_{26} mode pulsed gyrotron oscillator[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2016, 44(10): 2406-2409. doi: 10.1109/TPS.2016.2603161.
- [3] LI Hao, WU Zewei, ZENG Jianfan, et al. Design of a broadband quasi-optical mode converter for W-Band gyro-TWTs[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques*, 2017, 65(1): 28-35. doi: 10.1109/TMTT.2016.2615610.
- [4] DU Chaohai, QI Xiangbo, and LIU Pukun. Theoretical study of a broadband quasi-optical mode converter for pulse gyrotron devices[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2016, 44(10): 2348-2355. doi: 10.1109/TPS.2016.2606497.
- [5] DU Chaohai, PAN Shi, and LIU Pukun. THz broadband quasi-optical mode converter antenna system[C]. *IEEE International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology*, Beijing, China, 2016: 14-16. doi: 10.1109/ICMMT.2016.7761662.
- [6] JIN Jianbo, THUMM M, PIOSZYK B, et al. Theoretical investigation of an advanced launcher for a 2-MW 170-GHz $\text{TE}_{34,19}$ coaxial cavity gyrotron[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2006, 54(3): 1139-1145. doi: 10.1109/TMTT.2005.864114.
- [7] NELSON J M. Optimal synthesis of quasi-optical launchers for high-power gyrotrons[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*

- Science*, 2006, 34(3): 635-641. doi: TPS.2006.875755.
- [8] 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.
- [9] JIN Jianbo, GANTENBEIN G, THUMM M, *et al.* A hybrid-type 170 GHz gyrotron launcher for the TE_{32,9} mode[C]. 2015 IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC), Beijing, China, 2015: 1-2. doi: 10.1109/IVEC.2015.7223802.
- [10] JIN Jianbo, GANTENBEIN G, JELONEK J, *et al.* A new method for synthesis of beam-shaping Mirrors for Off-Axis Incident Gaussian Beams[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2014, 42(5): 1380-1384. doi: 10.1109/TPS.2014.2310903.
- [11] DHAKAD R K, BAGHEL G S, KARTIKEYAN M V, *et al.* Output system for a 170 GHz/1.5 MW continuous wave gyrotron operating in the TE_{28,12} mode[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2015, 43(1): 391-397. doi: 10.1109/TPS.2014.2368254.
- [12] IOANNIDIS Z C, RZESNICKI T, ALBAJAR F, *et al.* CW experiments with the EU 1-MW, 170-GHz industrial prototype gyrotron for ITER at KIT[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2017, 64(9): 3885-3892. doi: 10.1109/TED.2017.2730242.
- [13] JIN Jianbo, THUMM M, GANTENBEIN G, *et al.* A numerical synthesis method for hybrid-type high-power gyrotron launchers[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2017, 65(3): 699-706. doi: 10.1109/TMTT.2016.2630060.
- [14] 王斌, 杜朝海, 刘濮鲲, 等. W波段边廊模回旋管准光模式变换器的研究与设计[J]. *物理学报*, 2010, 59(4): 2512-2518. doi: 10.7498/aps.59.2512.
- WANG Bin, DU Chaohai, LIU Pukun, *et al.* Study and design of a quasi-optical mode converter for W-band whispering-gallery mode gyrotron[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(4): 2512-2518. doi: 10.7498/aps.59.2512.
- [15] 刘建卫, 赵青, 李宏福. 94 GHz回旋管准光模式变换器设计[J]. *物理学报*, 2011, 60(10): 267-271. doi: 10.7498/aps.60.104201.
- LIU Jianwei, ZHAO Qing, and LI Hongfu. Design of a quasi-optical mode converter for 94 GHz gyrotron[J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(10): 267-271. doi: 10.7498/aps.60.104201.
- [16] 牛新建, 顾铃, 于新华, 等. 94 GHz TE_{6,2}模内置准光模式变换器[J]. *红外与毫米波学报*, 2011, 30(5): 429-432.
- NIU Xinjian, GU Ling, YU Xinhua, *et al.* A TE_{6,2} 94 GHz inner quasi-optical mode converter[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2011, 30(5): 429-432.
- [17] 王虎, 沈文渊, 耿志辉, 等. 高功率回旋振荡管Denisov型辐射器的研究[J]. *物理学报*, 2013, 62(23): 238401. doi: 10.7498/aps.62.238401.
- WANG Hu, SHEN Wenyuan, GENG Zhihui, *et al.* Study on a high efficient Denisov-type launcher for high power gyrotron oscillators[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(23): 238401. doi: 10.7498/aps.62.238401.
- [18] 王斌, 黄亮杰, 刘云龙, 等. 110 GHz回旋管Denisov型准光模式变换器的研究与设计[J]. *强激光与粒子束*, 2015, 27(7): 116-120. doi: 10.11884/HPLPB201527.073002.
- WANG Bin, HUANG Liangjie, LIU Yunlong, *et al.* Investigation and design of Denisov quasi-optical mode converter for 110 GHz gyrotron[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27(7): 116-120. doi: 10.11884/HPLPB201527.073002.
- [19] 王斌, 何红, 刘云龙, 等. 140 GHz回旋管准光模式变换器的设计[J]. *强激光与粒子束*, 2015, 27(11): 138-145. doi: 10.11884/HPLPB201527.113002.
- WANG Bin, HE Hong, LIU Yunlong, *et al.* Design of quasi-optical mode converter for 140 GHz gyrotron[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27(11): 138-145. doi: 10.11884/HPLPB201527.113002.
- [20] 张杰, 罗勇, 潘成胜. 94 GHz回旋管准光模式变换器的数值模拟[J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2014, 12(2): 180-182. doi: 10.11805/TKYDA201402.0180.
- ZHANG Jie, LUO Yong, and PAN Chengsheng. Numerical simulation of quasi-optical mode converter for 94 GHz gyrotron[J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information*, 2014, 12(2): 180-182. doi: 10.11805/TKYDA201402.0180.
- 赵国慧: 女, 1990年生, 博士生, 研究方向为毫米波及太赫兹回旋管.
- 薛谦忠: 男, 1962年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为新型毫米波与太赫兹器件及技术、天线理论及其应用.
- 王勇: 男, 1964年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为大功率速调管、计算电磁学.
- 王虎: 男, 1986年生, 博士, 研究方向为高功率回旋管.
- 耿志辉: 男, 1976年生, 副研究员, 研究方向为新型高功率微波源及回旋振荡管.
- 张珊: 女, 1991年生, 博士生, 研究方向为高功率回旋管.
- 王雪微: 女, 1990年生, 博士生, 研究方向为高功率回旋管.