

170 GHz 兆瓦级回旋管 TE_{25,10} 准光模式变换器设计

陈璞, 曾旭, 张亦弛, 高东硕, 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: 为满足聚变用 170 GHz 回旋管高功率输出和高效率传输的要求, 需将高阶工作模式 TE_{25,10} 转换为高斯波束; 针对这一技术需求, 完成了 170 GHz、TE_{25,10} 模式高效准光模式变换器的设计, 准光模式变换器由辐射器和镜面系统组成。基于几何光学和耦合波理论, 完成了 Denisov 型辐射器相关设计; 基于矢量衍射定理和相位校正算法, 设计了一个抛物面镜面、一个准椭圆镜面及一个相位校正镜面组成的镜面系统; 使用 Surf3D 软件对辐射器进行了优化和计算, 使用三维全波仿真软件 FEKO 对镜面系统进行了优化和计算, 主要对辐射器微扰幅值、位置分布及相位差进行了优化。所设计准光模式变换器系统的能量转换效率约为 95.2%, 波束在输出窗处的标量高斯含量约为 97.6%, 矢量高斯含量约为 91.8%, 达到了回旋管的应用要求。

关键词: 回旋管; 模式变换器; 准光; Denisov 型辐射器; 170 GHz

中图分类号: TN129

文献标识码: A

Design of 170 GHz TE_{25,10} mode quasi-optical mode converter for MW-level gyrotrons

CHEN Pu, ZENG Xu, ZHANG Yi-Chi, GAO Dong-Shuo, FENG Jin-Jun*

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

Abstract: In order to meet the requirements of high-power output and high-efficiency transmission of the 170 GHz gyrotron for fusion, it is necessary to convert the operating mode of TE_{25,10} to a Gaussian beam for output. In response to this technical requirement, based on the vector diffraction theory, geometric optics, coupled wave theory, and phase correction algorithm, a 170 GHz, TE_{25,10} mode high-efficiency quasi-optical mode converter was designed using a numerical calculation program. The mode converter consists of a Denisov launcher, a parabolic mirror, a quasi-elliptical mirror, and a phase correction mirror. Using Surf3D software and commercial simulation software FEKO for simulation calculation, the energy conversion efficiency of the designed quasi-optical mode converter is about 95.2%, the beam scalar Gaussian content is about 97.6%, and the vector Gaussian content is about 91.8%, reaching the application of gyrotron requirement.

Key words: gyrotron, mode converter, quasi-optical technology, Denisov launcher, 170 GHz

引言

当今世界能源短缺严重, 给民生和发展带来了极大挑战, 为了解决能源问题, 人们发展了许多新能源, 其中核聚变能因受控核聚变反应原料丰富、能量释放大、无污染等优点, 成为了研究的重点之一。但核聚变反应所需条件严苛, 需要温度达到约

1 亿摄氏度, 目前主流技术电子回旋共振加热处理 (Electron Cyclotron Resonance Heating, ECRH) 主要通过兆瓦级高功率回旋管完成^[1]。这些兆瓦级高功率回旋管通常采用的工作频率为 140 GHz 和 170 GHz^[2-7], 并且使用高阶模式传输, 然而此类模式存在绕射与极化损耗较为严重的局限性, 无法在自由空间中传输, 必须通过准光模式变换器转换为适合

收稿日期: 2022-10-19, 修回日期: 2023-02-13

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFE0300203)

Foundation item: Supported by National Key Research and Development Program of China (2017YFE0300203)

作者简介 (Biography): 陈璞 (1998—), 男, 北京东城区人, 硕士, 从事回旋管准光模式变换器的研究。Email: cliffchen1998@163.com

* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: fengjinjun@tsinghua.org.cn

Received date: 2022-10-19, Revised date: 2023-02-13

传输的高斯波束。同时准光模式变换器可以实现波束横向输出,通过降压收集极让整管综合效率大幅提升。准光模式变换器由辐射器和多级镜面系统构成。辐射器将回旋管的高阶工作模式转换为类高斯波束,类型分为 Vlasov、Denisov^[8]、混合型辐射器^[9]。其中,Vlasov 型辐射器属于简单的开口圆波导,模式转换效率约为 80%,且切口处存在较大的功率损耗;而 Denisov 型辐射器把 2 个方向的周期性微扰添加到辐射器内壁,使得波束在辐射器内预聚束,并沿辐射场较小的地方进行开口,可将模式转换效率提升至 95% 左右,且切口处功率损耗大大降低;混合型辐射器将周期性微扰改为不规则扰动,进一步增加了模式转换效率,可达到 98%,但其不规则扰动给加工也带来了困难。镜面系统由聚焦波束的抛物面镜面和准椭圆镜面以及调整波束相位和幅度的相位校正镜面组成,一般由三级镜面组成,可以将辐射器射出的波束聚焦、调整相位并横向输出。准光模式变换器的原理图如图 1 所示^[8],其中,辐射器的作用是将高频腔中的高阶工作模式转换为准高斯模式并进行定向辐射,准椭圆镜面将波束进行角向聚焦,抛物面镜面将波束进行轴向聚焦,相位校正镜面主要调整波束最终的相位分布。因为准光模式变换器的重要性,国内外相关研究机构进行了许多研究^[10-16],目前主流采用 Denisov 型辐射器加镜面系统构成。其中,ITER 计划中,德国的 Thumm 团队于 2006 年研究设计了 2 MW、170 GHz、TE_{34,19} 模式回旋振荡管的准光模式变换器,标量高斯模式纯度为 94.8%,功率传输效率也超过了 95%;在 2017 年,为 ITER EU 所研究得到的 1 MW、170 GHz、TE_{32,9} 模式回旋振荡管的准光模式变换器^[9],矢量高斯模式纯度提升到了 99.1%。

本文根据课题组研制 170 GHz 回旋振荡管具体参数,设计出了 TE_{25,10} 模式准光模式变换器,其中使用几何光学、耦合波理论^[8]完成了 Denisov 型辐射器的相关设计,并使用 Surf3D 软件进行了验证;基于矢量衍射理论,使用 The Katsenelenbaum-Semenov 算法(简称为 KS 算法)^[17]完成镜面系统中相位校正镜的相关设计,并使用 FEKO 软件进行了验证。

1 矢量衍射理论

因兆瓦级高阶回旋振荡管中准光模式变换器的尺寸比其波束工作波长大一个量级,故可以使用基于惠更斯原理的矢量衍射理论进行分析。惠更

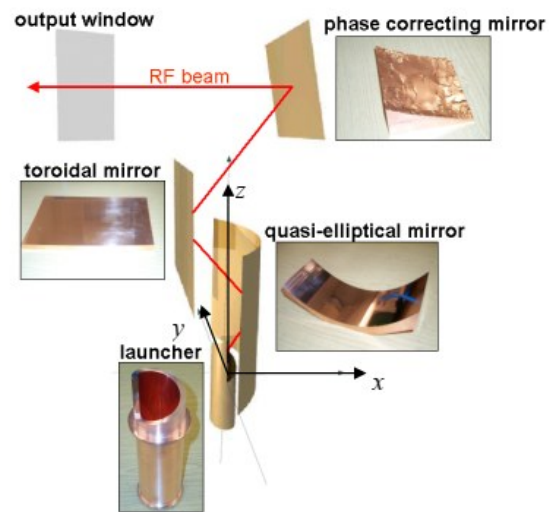


图1 准光模式变换器原理图

Fig. 1 The schematic of quasi-optical mode converter

斯原理观点是介质中所处波动对相应波动状态起到直接决定作用,那么可以取一包围波源的闭合面,闭合面外任意一点的电磁场, E, H 都由闭合面上全部电磁场 E', H' 共同决定的。

矢量衍射公式:

$$E(r) = \frac{1}{j\omega\epsilon} \int_S \left[\begin{array}{l} k^2 \vec{J}(r') G_0(r, r') \\ -j\omega\epsilon \vec{J}_m(r') \times \nabla' G_0(r, r') + (\vec{J}(r') \cdot \nabla') \nabla' G_0(r, r') \end{array} \right] ds \quad (1)$$

$$H(r) = -\frac{1}{j\omega\epsilon} \int_S \left[\begin{array}{l} k^2 \vec{J}_m(r') G_0(r, r') + j\omega\mu \vec{J}(r') \times \nabla' G_0(r, r') \\ + (\vec{J}_m(r') \cdot \nabla') \nabla' G_0(r, r') \end{array} \right] ds \quad (2)$$

$S, G_0(r, r')$ 分别为源场、自由空间格林函数。

$$\left\{ \begin{array}{l} G_0(r, r') = \frac{e^{-jk_0 R}}{4\pi R} \\ R = \sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2 + (z - z')^2} \end{array} \right. \quad (3)$$

x, y, z, x', y', z' 分别为场的某一点和源场的全点坐标。

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{J}(r') = \vec{e}_n \times \vec{H}(r') \\ \vec{J}_m(r') = \vec{E}(r') \times \vec{e}_n \end{array} \right. \quad (4)$$

$\vec{J}(r'), \vec{J}_m(r'), \vec{E}(r'), \vec{H}(r'), \vec{e}_n$ 分别为等效电流源、等效磁流源、电场、磁场、法向量。当表面上的等效磁流源是 0 时,等效电流源:

$$\vec{J}(r') = 2 \vec{e}_n \times \vec{H}(r') \quad (5)$$

根据矢量衍射公式可以计算得出等效电流源,进一步可以计算获得从辐射器输出到一级镜面的辐射场分布,及镜面之间传输的辐射场分布,以完成准光模式变换器的设计。

2 Denisov 型辐射器的设计

辐射器在模式变换器中作用至关重要,主要是将回旋管的高阶工作模式转换为高斯分布,并进行定向辐射。辐射器使用几何光学及耦合波理论,在波导壁内部加入角向和径向的周期性微扰,使得高阶模式 $TE_{m,n}$ 耦合成为特定模式,并在辐射器内部进行聚焦,在切口处形成高斯波束。

波导壁微扰结构方程为:

$$R(\varphi, z) = a + \alpha z + \delta_1 \cos(L_1 \varphi + \Delta\beta_1 z) + \delta_2 \cos(L_2 \varphi + \Delta\beta_2 z) \quad (6)$$

$$\Delta\beta_1 = k_{zm,n} - k_{zm \pm 1,n}, l_1 = \pm 1 \quad (7)$$

$$\Delta\beta_2 = k_{zm,n} - k_{zm \pm \Delta m, n \mp \Delta n}, l_2 = \pm \Delta m \quad (8)$$

其中, a 为辐射器初始半径; α 为辐射器张角斜率; δ_1 为纵向扰动幅度, δ_2 为角向扰动幅度; $l_1 = 1, l_2 = \Delta m = 3$; $\Delta\beta_1$ 为纵向相位差, $\Delta\beta_2$ 为角向相位差。辐射器张角 α 对电子注寄生振荡、波束反射起到抑制作用,一般取较小的角度即可。

进一步结合耦合波理论内容可知^[18], 耦合波方程:

$$\frac{\partial A_i(z)}{\partial z} = -jk_{z,i} A_i(z) - j \sum_j C_{i,j}(z) A_j(z) \quad (9)$$

其中, $A_i(z), A_j(z)$ 为耦合波幅度, $k_{z,i}, C_{i,j}(z)$ 为第 i 个模式波数、与第 j 个模式间耦合系数,进一步结合有关文献资料能够推导出模式耦合理论^[18]。

表 1 合成准高斯模式所需的九个模式及相对功率分布

Table 1 Relative power of each mode in the launcher after superposition

azimuthal bunching		
TE _{m-2, n+1} (1/36)	TE _{m+1, n} (1/9)	TE _{m+4, n-1} (1/36)
axial bunching		
TE _{m-3, n+1} (1/9)	TE _{m, n} (4/9)	TE _{m+3, n-1} (1/9)
TE _{m-4, n+1} (1/36)	TE _{m-1, n} (1/9)	TE _{m+2, n-1} (1/36)

对于 $TE_{25,10}$ 模式,纵向扰动耦合出 $TE_{24,10}$ 、 $TE_{26,10}$ 模式,角向扰动耦合出 $TE_{22,11}$ 、 $TE_{28,9}$ 模式。最终辐射器切口处耦合成的各模式及相对功率分布如表 1 所示。

对于 170 GHz $TE_{25,10}$ 模式 Denisov 型辐射器,首先采用几何光学理论进行分析 $TE_{25,10}$ 模式在波导中的传播路径,可以获得波束在辐射器内沿角向传播一周的轴向距离,即切口长度为 37 mm。根据耦合波理论和麦克斯韦方程,并使用 Runge-Kutta 法进行求解,可计算获得辐射器内壁的扰动参数和场分布,根据矢量衍射的 Stratton-Chu 公式可以计算获

得辐射器的出射辐射场。使用自编数值计算程序进行了参数计算,将初始参数代入 Surf3D 进行仿真时,波束高斯含量不理想,约为 85% 左右。将两个方向的扰动分别单独归零,使用一侧的扰动进行仿真分析,发现纵向扰动在切口处聚焦情况不理想,对纵向扰动的幅值及分布进行了优化调整,获得的波束标量高斯含量有明显提升。但矢量高斯含量未达到使用条件,后续对参数相位差 $\Delta\beta$ 进行了调整,提升了波束的矢量分布。最终设计参数如下:初始半径 $a = 19$ mm,纵向扰动 $\delta_1 = 0.0492$ mm,角向扰动 $\delta_2 = 0.045$ mm。扰动分布如图 2 所示,主模 $TE_{25,10}$ 模式相对功率为 46.3%,其余模式相对功率也基本符合理论值,各模式相对功率如图 4 所示。

$TE_{25,10}$ 模式经过辐射器内壁扰动后,逐渐形成比较规则的类高斯波束,并沿场较弱的地方进行切口,使用 Surf3d 进行验证后的辐射器内壁高斯场分布展开如图 3 所示。其中,虚线为辐射器切口位置,切口起点坐标为 $z = 173$ mm, $\phi = 160^\circ$,可以看出切口边缘处辐射场较弱。切口处口径场波束标量高斯含量为 97.2%,波束矢量高斯含量为 87.4%,不考虑热损耗时,能量转换效率为 99.7%。本辐射器应用于兆瓦级回旋管中,故需要对辐射器的欧姆损耗进行分析。一般辐射器采用水冷系统,确保温度变化不会对螺旋波纹波导中的模式和场分布造成影响。根据计算获得,辐射器中欧姆损耗最大值为 419.95 W/cm²,符合辐射器内壁峰值欧姆损耗不超过 500 W/cm² 的设计要求^[8],欧姆损耗总计约 19.7 kw,本文主要对电参数进行了具体分析,关于热损耗仅进行了可行性分析。因对辐射器仅进行了无辐射器张角 α 的设计,得出波束的矢量高斯含量不够理想,后续可通过加入张角或使用不规则微扰设计进行提升。

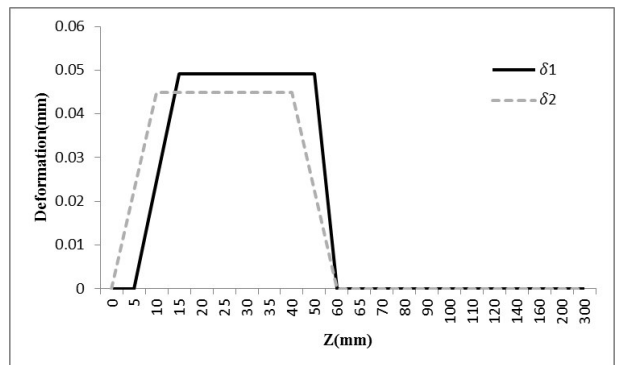


图 2 扰动幅度变化图

Fig. 2 Disturbance amplitude change

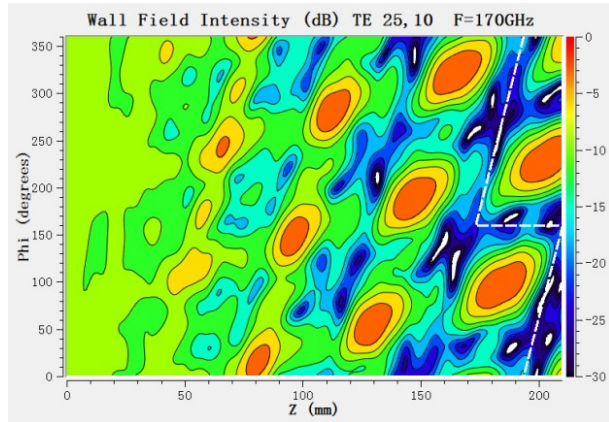


图3 Denisov型辐射器内壁高频场等位场分布平面展开图
Fig. 3 Amplitude contours of fields on the unfolded launcher wall the edges of cuts

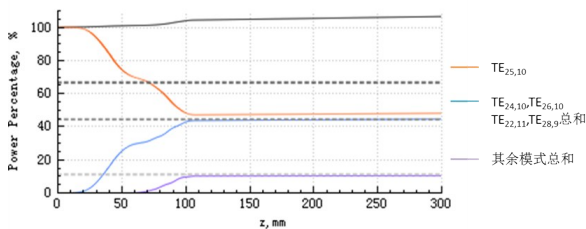


图4 各模式的功率随辐射器长度变化
Fig. 4 The relative power of each mode varies with the length of the radiator

3 准光镜面系统的设计

准光镜面系统由准椭圆镜面和相位校正镜面组成,将辐射器射出的准高斯波束进行汇聚和相位调整,使得回旋管的高阶工作模式转换为便于传输的高斯波束,并进行定向输出。设计的准光镜面系统由三级镜面组成,1级镜面为抛物面镜面,2级镜面为准椭圆镜面,3级镜面为相位校正镜面。其中,抛物面镜面及准椭圆镜面只对波束具有聚束效果,相位校正镜面对波束进行了相位调整,提高了波束的高斯含量。相位校正镜面的设计原理是当电磁波入射到镜面表面时,因镜面上分布的微小扰动,电磁波的相位发生了变化,因此可以通过镜面扰动控制相位变化,原理如图4所示。

相位校正领域算法应用较为普遍的就是KS算法,原理建立在将扰动镜面场和目标高斯波束场进行比较的基础上,通过其相差部分完成平方积分的计算,此积分即为误差函数。再进行相应的离散化求导处理,将导数是0微扰量计算出来。最后将其不断迭代,得到与目标场最接近的扰动

Δz_0

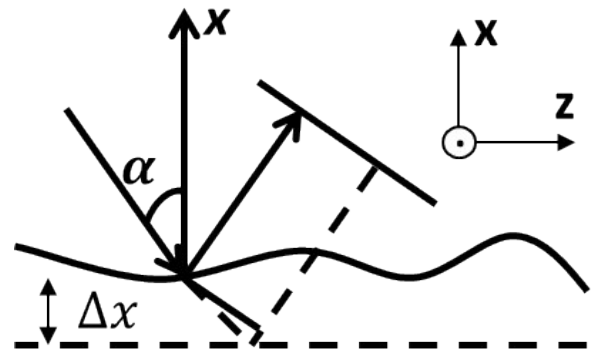


图5 相位校正镜面原理图
Fig. 5 The schematic of phase correction mirror

将辐射器焦散圆处视为波束的束腰,通过几何光学分析得到一级椭圆镜面的分布,并将一级镜面的次焦点视为二级抛物面镜面的初焦点,三级相位修正镜依然是抛物面镜,将其焦点设计在出射面中心,可得出镜面系统坐标分布。根据矢量衍射Stratton-Chu公式,通过求解辐射器的辐射场可以获得一级镜面的表面场分布,结合电磁场的边界条件可以获得镜面的表面电流分布,如式(5),通过麦克斯韦方程组并利用洛伦兹规范将表面电流积分导出,由此即可对表面感应电流所处空间所有辐射场加以计算。同理,可获得二级镜、三级镜的场分布。使用数值计算及电磁仿真软件对镜面系统进行仿真,设计准光变换器系统实体模型如图5所示,镜面坐标如表2所示。

表2 各级镜面坐标

Table 2 The coordinates of each mirror

mirror(No.)	Central location (mm)
1	(0, 0, 0)
2	(75.763 8, 0, 83.945 7)
3	(-36.945 5, 0, 381.739)

通过将目标场与标准高斯场分布进行对比,可以获得波束的高斯相关系数。

标量转换效率公式为:

$$\eta_s = \frac{\int_s |U_1| \cdot |U_2| ds}{\sqrt{\int_s |U_1|^2 ds} \cdot \sqrt{\int_s |U_2|^2 ds}} \quad (10)$$

矢量转换效率公式为:

$$\eta_v = \frac{\int_S |U_1| \cdot |U_2| \exp[j(\varphi_1 - \varphi_2)] ds \cdot \int_S |U_1| \cdot |U_2| \exp[j(\varphi_2 - \varphi_1)] ds}{\int_S |U_1|^2 ds \cdot \int_S |U_2|^2 ds} \quad (11)$$

经过理论分析和计算,所设计的准光模式变换器能量转换效率为 95.2%,最终波束在输出窗处场分布与理想高斯波束的标量相关系数约为 97.6%,矢量相关系数约为 91.8%,等效波束束腰半径约为 15.5 mm。一般兆瓦级镜面系统采用水冷系统来确保镜面系统的温度变化不会影响模式转换器的模式纯度和转换效率。对于 170 GHz 兆瓦级长脉冲回旋管,在每级镜面不大于 9 L/min 的水冷系统冷却下,镜面总体热形变量不超过 0.1 mm,不会对波束传输造成影响。三级镜面及输出窗处场分布如图 7~10 所示,可以看出场强较高的中心比较符合高斯分布,但边缘分布不均匀,后续可以通过提升辐射器高斯转换能力和使用多级相位校正镜面进行进一步提升。

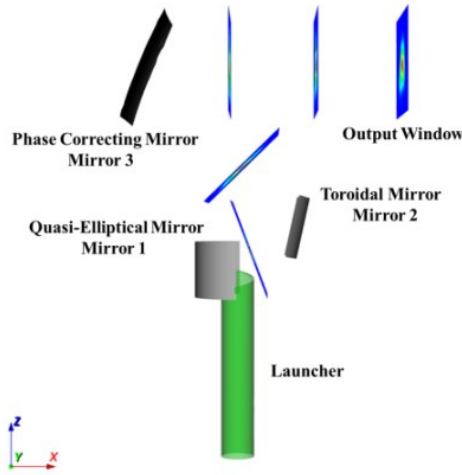


图 6 准光变换器系统实体模型图
Fig. 6 Solid model of the quasi-optical converter system

3 结论

本文针对 170 GHz、TE_{25,10} 模式回旋管的使用需求,进一步结合耦合波理论内容,通过自编程序,进行了理论分析,设计并优化了 Denisov 型辐射器,实现了高阶工作模式的模式转换,并将准高斯波束进行定向辐射。采用几何光学理论,设计并优化出三级准光镜面系统,实现了回旋管的横向输出。进行

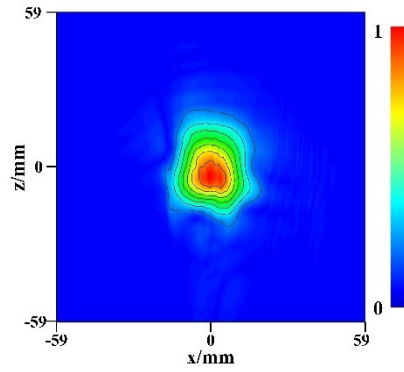


图 7 一级镜面处场分布
Fig. 7 Field distribution pattern at mirror 1

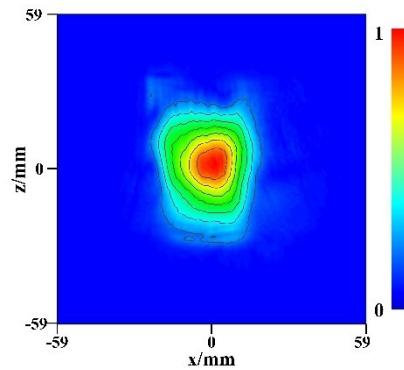


图 8 二级镜面处场分布
Fig. 8 Field distribution pattern at mirror 2

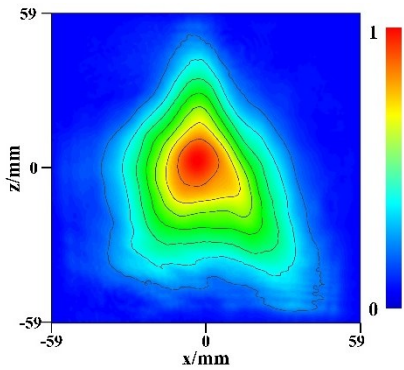


图 9 三级镜面处场分布
Fig. 9 Field distribution pattern at mirror 3

了相关数值计算及电磁仿真,设计出的准光模式变换器从输出窗输出波束的场分布与理想高斯波束矢量相关性为 91.8%,标量相关性为 97.6%,系统能量转换效率约为 95.2%,达到了回旋管应用要求。未来将对混合型辐射器进行设计,并调整镜面系统,以获得更好的高斯转换效率。

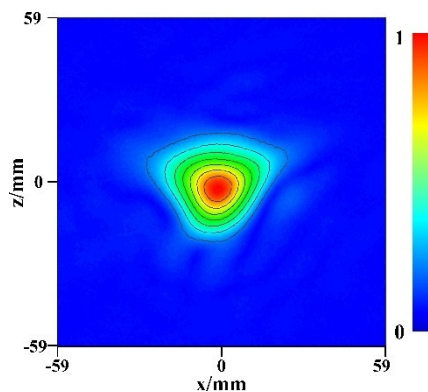


图10 输出窗处场分布

Fig. 10 Field distribution pattern at output window

References

- [1] TAN Bao-Lin. Comparison and combination of mcf and ICF [J]. PHYSICS, 2002, **31**(03). (谭宝林. 受控核聚变两大途径的对比与结合[J]. 物理), 2002(03): 159-161.
- [2] Twiss R. Radiation Transfer and the Possibility of Negative Absorption in Radio Astronomy [J]. *Australian Journal of Physics*, 1958, **11**(4): 564-579.
- [3] Schneider, Jürgen. Stimulated Emission of Radiation by Relativistic Electrons in a Magnetic Field [J]. 1959, **2**(12): 504-505.
- [4] A. V. Gaponov. Interaction between electron fluxes and electromagnetic waves in waveguides [J]. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Radiofiz.*, 1959, **2**: 450.
- [5] Hirshfield J L, Wachtel J M. Electron Cyclotron Maser [J]. *Phys.rev.lett.*, 1964, **12**(19): 533-536.
- [6] Flyagin, V. A., Gaponov, M.I. Petelin, et al. The Gyrotron [J]. *Microwave Theory and Techniques*, IEEE Transactions on, 1977.
- [7] Thumm M. State-of-the-art of high power gyro-devices and free electron masers update 2010 [R]. Karlsruhe Institute of Technology Science Report 7575, 2011, 1-43.
- [8] JIN Jian-Bo. QUASI-OPTICAL MODE CONVERTER FOR A COAXIAL CAVITY GYROTRON [D]. Southwest Jiaotong University, 2006. (金践波. 同轴腔回旋管准光学模式转换器[D]. 西南交通大学, 2006.
- [9] Jin J, 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, PP(3): 1-8.
- [10] M. Thumm, Xiaokang Yang, Andreas Arnold, et al. A high-efficiency quasi-optical mode converter for a 140-GHz 1-MW CW gyrotron [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2005, **52**(5): 818-824.
- [11] G. G. Denisov, A. N. Kufin, V. I. Malygin, et al. 110GHz Gyrotron with a Built-in High Efficient Converter [J]. *International Journal of Electronics*, 1992, **72**(5): 1093-1102.
- [12] Tax D, Choi E, Mastovsky I, et al. Experimental Results on a 1.5 MW, 110 GHz Gyrotron with a Smooth Mirror Mode Converter (vol 32, pg 358, 2011) [J]. *Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*, 2011(7): 32.
- [13] LIU Ben-Tian, ZHANG Yang, ZHANG Yi-Chi, et al. Optimized design of quasi-optical mode converter for TE_{22,6}-mode to Gaussian beam [J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2018, **016**(005): 772-775. (刘本田, 张杨, 张亦弛, 等. TE_{22,6}模式—高斯波的准光模式转换器设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报), 2018, **016**(005): 772-775.
- [14] HUANG Qi-Li, SUN Di-Min, MA Guo-Wu, et al. Design of quasi-optical mode converter for dual-frequency gyrotron [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2020, **32**: 053001. doi: 10.11884/HPLPB202032.190446. (黄麒力, 孙迪敏, 马国武, 等. 双频回旋管内置准光模式变换器设计[J]. 强激光与粒子束), 2020, **32**(5): 37-42. DOI: 10.11884/HPLPB202032.190446.
- [15] W. Wang, D. Liu, S. Qiao, et al. Study on the Terahertz Denisov Quasi-Optical Mode Converter [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2014, **42**(2): 346-349.
- [16] YANG Chen, GUO Wei, LI Wen-Qi, et al. Design and Experiment of a Quasi-Optical Mode Converter [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2022, **44**(7): 2592-2601. doi: 10.11999/JEIT210347. (杨晨, 郭炜, 李文奇, 等. 一种准光模式变换器的设计和实验[J]. 电子与信息学报), 2022, **44**(7): 10.
- [17] Bogdashov A A, Denisov G G. Synthesis of the sequence of phase correctors forming the desired field [J]. *Radio-physics & Quantum Electronics*, 2004, **47**(12): 966-973.
- [18] M, THUMM. High-power millimetre-wave mode converters in overmoded circular waveguides using periodic wall perturbations [J]. *International Journal of Electronics*, 1984, **57**(6): 1225-1246.