



·高功率微波技术·

双频回旋管内置准光模式变换器设计*

黄麒力, 孙迪敏, 马国武, 胡林林, 卓婷婷

(中国工程物理研究院 应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 回旋管一般使用准光模式变换器实现高阶腔体模式到高斯波束的转换。结合标量衍射理论、KS 迭代算法、几何光学、最小均方法等方法设计了工作频率为 140 GHz($TE_{24,9}$)和 105 GHz($TE_{18,7}$)的双频准光模式变换器。仿真结果显示所设计的准光模式变换器工作频率为 140 GHz($TE_{24,9}$)时能量传输效率 99.0%、高斯含量 99.7%, 工作频率为 105 GHz($TE_{18,7}$)时能量传输效率 97.3%、高斯含量 98.0%。能够满足 MW 级双频回旋管的应用需求。

关键词: 准光; 回旋管; 模式变换器; 高斯波束; 双频

中图分类号: TN129

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202032.190446

Design of quasi-optical mode converter for dual-frequency gyrotron

Huang Qili, Sun Dimin, Ma Guowu, Hu Linlin, Zhuo Tingting

(Institute of Applied Electronics, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: Quasi-optical mode converters are usually used in gyrotrons to realize the conversion of high-order cavity mode to Gaussian beam. Using the scalar diffraction theory, the K-S phase-correcting optimization iterative algorithm Geometrical Optics and the least mean square(LMS) algorithm, this paper designs a dual-frequency quasi-optical mode converter with operating frequency of 105 GHz ($TE_{18,7}$) and 140 GHz ($TE_{24,9}$). According to the simulations results, the conversion efficiencies are 97.3% at 105 GHz and 99.0% at 140 GHz. And the Gaussian contents of the output beam on the window surface are 98.0% at 105 GHz and 99.7% at 140 GHz. This high efficiency dual-frequency quasi-optical mode converter can be used in a MW dual-frequency gyrotron.

Key words: quasi-optical; gyrotron; mode converter; Gaussian beams; dual-frequency

受控热核聚变是解决人类能源危机的主要途径之一。聚变能是无污染、资源丰富的理想能源, 实现受控核聚变将从根本上解决人类社会的能源问题。磁约束核聚变是实现受控核聚变的重要途径之一, 目前世界各国已在磁约束核聚变理论、关键技术上取得了突破性进展。在磁约束核聚变实验中, 需要使用高功率毫米波源进行电子回旋共振加热(ECRH)^[1]。而在毫米波频段, 回旋管是唯一能产生高功率(>1 MW)连续波输出的器件, 因而被广泛应用到热核聚变实验中。目前磁约束核聚变技术在国内外得到较快发展, 同时也对回旋管提出了更高的要求: 不仅提出了 MW 级功率输出、工作时间时长的要求, 还提出了双频点或多频点可调谐工作的要求^[2]。一般来说, MW 级回旋管要求准光模式变换器衍射损耗低于 5%^[3-5]。目前, 俄罗斯的 Gycom 公司设计了 170 GHz 和 135 GHz MW 级双频回旋管, 其准光模式变换器效率分别为 99.19%(170 GHz)和 97.42%(135 GHz)^[6]。国际上德国、日本、美国等国家的研究机构也完成了双频 MW 级回旋管内置准光模式变换器的研制工作^[7-11]。国内的科研机构也开展了准光模式变换器的研究工作^[12-18]。在双频(多频)准光模式变换器设计方面, 北京大学进行了太赫兹多模式准光模式变换器的设计^[16-17], 电子科技大学也对准光模式变换器的带宽进行了研究^[18], 但在国内尚未见到 MW 级双频回旋管内置准光模式变换器的公开报道。双频回旋管研制的难点之一就是准光模式变换器的双频复用, 通常针对某个频率和模式优化得到的准光系统与针对另一个频率和模式为目标优化得到的准光系统存在较大差异, 会产生较大损耗和造成高斯含量的降低, 无法满足 MW 级双频连续波回旋管的需求。如参考文献 [19] 中, 未针对镜面系统进行多频设计, 导致各个频率下的高斯含量差异较大。针对这一问题, 本文开展了双频准光模式变换器的设

* 收稿日期: 2019-12-03; 修订日期: 2020-02-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(U1830201); 中物院创新发展基金项目(CX2019038); 中物院创新发展基金培育项目(PY2019130)

作者简介: 黄麒力(1992—), 男, 硕士, 从事毫米波与太赫兹电真空器件研究; huangqilicaep@163.com。

通信作者: 孙迪敏(1987—), 男, 博士, 从事毫米波与太赫兹电真空器件研究; sundimin@caep.cn。

计。通过选择圆波导内传播模型近似的传播模式,并利用数值方法在圆波导内壁引入不规则微扰,将圆波导口输入的高阶腔体模式转换为准高斯模式,本文完成了双频预聚束辐射器的设计。在后续双频镜面系统设计中,本文基于标量衍射理论,并在KS迭代算法^[20]中引入权重和最小均方法等方法完成了双频相位修正镜设计,进一步将准高斯波束修正为高斯波束。仿真结果显示所设计的准光模式变换器能满足 MW 级双频回旋管的要求。

1 双频准光模式变换器设计

准光模式变换器包括一个预聚束辐射器和后续的反射镜面系统,如图 1 所示。辐射器将回旋管产生的 $TE_{0,n}$ 或 $TE_{m,n}$ 模式进行预聚束,并通过切口处辐射至后续镜面系统。后续镜面系统进一步对波束传播方向和相位进行修正,最终修正为高斯波束(TEM_{00})输出。针对目前以单一频率为优化目标的准光模式变换器设计方法会造成两个频率之间准光系统差异较大,本文将两个频率同时设为优化目标(既需要保持较低衍射损耗,同时获得尽可能高的高斯含量),并通过筛选圆波导内传播模型近似的模式,在迭代算法中引入权重、最小均方法分别完成了双频辐射器和双频相位修正镜的设计。

1.1 双频辐射器设计

辐射器主要包括 Vlasov 型辐射器^[21-22]、Denisov 型预聚束辐射器^[23]、不规则微扰型预聚束辐射器^[3]三种。Vlasov 型辐射器损耗较大,聚束效果较差。Denisov 型辐射器通过对两组周期微扰进行优化将高阶模式变换为该模式与 8 个卫星模式的混合模式,使得波导内的场呈现为准高斯分布。但 Denisov 型辐射器在过低阶模式和圆对称模式难以形成有效的卫星模式,过高阶的模式需要较长的微扰段。且对于一些 π/θ (θ 为波束角向传播方向与角向单位矢量的夹角)不接近于整数的高阶边廊模式,基于耦合理论的 Denisov 辐射器无法获得足够的变换效率^[16]。不规则微扰型预聚束辐射器通过数值方法在圆波导内壁引入不规则微扰,将圆波导口输入的高阶腔体模式转换为高斯模式。不规则微扰型预聚束辐射器比 Denisov 型预聚束辐射器在模式选择上更具普适性,结构也更为紧凑,因此本文选择不规则微扰型辐射器作为双频准光模式变换器的辐射器。

由于辐射器圆波导半径远大于回旋管的工作频率所对应的自由空间波长,因此电磁波在波导内的传播情况可以采用几何光学进行分析。可以考虑通过电磁波在圆波导内的传输参数逆向选择合适的传播模式。通过对 105 GHz 和 140 GHz 的多个模式在圆波导中的传播情况进行分析,我们最后选择了 105 GHz($TE_{18,7}$) 和 140 GHz($TE_{24,9}$),两者在圆波导中的传播参数如表 1 所示,105 GHz($TE_{18,7}$) 和 140 GHz($TE_{24,9}$) 在圆波导内传播的布里渊区参数、焦散圆半径等参数非常接近,两者在圆波导内的几何光学传播模型近似,有利于高效率双频辐射器的设计。

表 1 两种模式在圆波导中的传播参数

Table 1 Propagation parameters of the circular waveguide for considered modes

mode	frequency/GHz	waveguide radius/mm	caustic radius/mm	pitch distance/mm	axial bounce angle/(°)
$TE_{18,7}$	105	21.5	8.76	41.1	73.1
$TE_{24,9}$	140	21.5	8.80	42.6	72.4

利用标量衍射理论,结合 KS 迭代算法,可快速求解波导内壁电流分布和逆向求解辐射器内壁微扰分布。

$$\mathbf{u}(\mathbf{r}) = - \iint [u(\mathbf{r}_0)\nabla G(\mathbf{r}, \mathbf{r}_0) - G(\mathbf{r}, \mathbf{r}_0)\nabla u(\mathbf{r}_0)] \mathbf{n}_0 \cdot d\mathbf{s}_0 \quad (1)$$

$$G(\mathbf{r}, \mathbf{r}_0) = \frac{\exp(\pm jk|\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|)}{4\pi|\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|} \quad (2)$$

式中: \mathbf{n}_0 是波导壁的法向矢量; k 是波数; $G(\mathbf{r}, \mathbf{r}_0)$ 表示自由空间格林函数如式(2)中所示; $\mathbf{u}(\mathbf{r})$ 表示波导壁上的场分布^[18]。

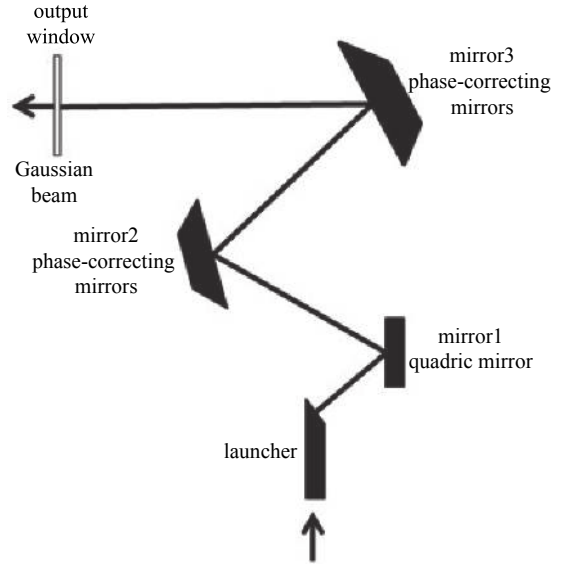


Fig. 1 Schematic arrangement of the quasi-optical mode converter

图 1 准光模式变换器示意图

两个工作频率的圆波导沿径向展开的壁电流分布如图2(图中红色线表示螺旋切口的位置和辐射场), 辐射器内壁微扰分布如图3所示。辐射器长度140 mm, 螺旋切口长度35 mm。经螺旋切口辐射, 入射在与辐射器同圆心、半径为5 cm的圆柱面上的场分布如图4所示。由图2和图4可见从波导端口馈入的高阶腔体模式经过辐射器微扰修正, 逐渐转换为高斯波束, 且辐射波束旁瓣较低, 实现了预聚束。

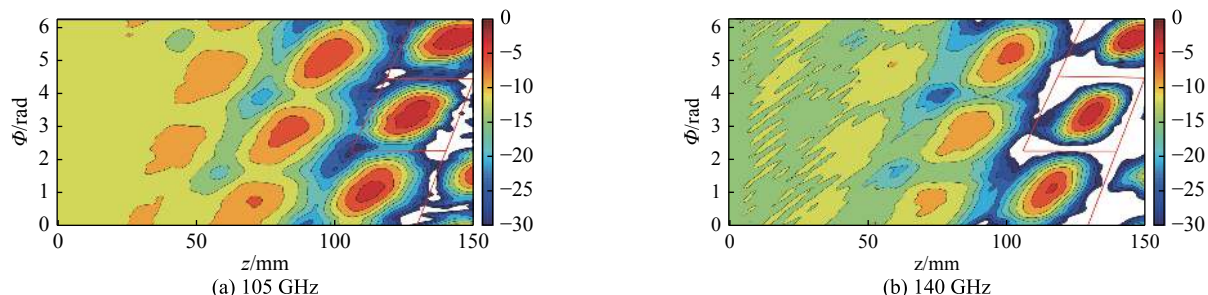


Fig. 2 Field distribution on the wall of the launcher for 105 GHz TE_{18,7} and 140 GHz TE_{24,9} gyrotron (in dB), the edges of the launcher aperture and cut are indicated

图2 105 GHz TE_{18,7}和140 GHz TE_{24,9}双频辐射器的内壁上的场分布图(dB值)。辐射器边缘和口径已在图中标出

1.2 双频相位修正镜设计

经过辐射器螺旋切口辐射出的电磁波经过第一个镜面的反射, 还需利用相位修正镜将入射的准高斯波束精确修正为所需束腰大小的高斯波束。相位修正镜的原理类似于相控阵天线, 镜面上每一点类似于相位控制元件, 相控阵天线理论表明足够数量的相位控制元件可以控制波束的方向和方向图, 同样通过对反射镜面进行赋形也可以改变镜面上的电流相位和分布以得到期望的波束^[8]。

相位修正镜的设计采用标量衍射理论、KS迭代算法、几何光学等方法。相位修正镜面采用的设计流程如图5所示。首先利用衍射理论将入射波传播至镜面(如图中序号1, 2所示), 然后将理想高斯波束反向传播至镜面(如图中序号3, 4所示), 此时通过比较正向传播至镜面和反向传播至镜面上的场可以得到相位差。利用相位差可得到镜面的相位修正尺寸, 再结合KS迭代算法就可以逆向得到相位修正镜面。

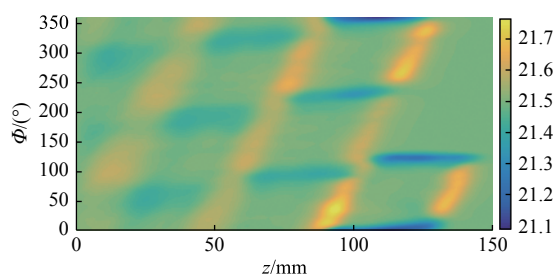


Fig. 3 Profile of the wall surface of the dual-frequency launcher for 105 GHz TE_{18,7} and 140 GHz TE_{24,9} gyrotron

图3 105 GHz TE_{18,7}和140 GHz TE_{24,9}双频辐射器的内壁微扰分布图

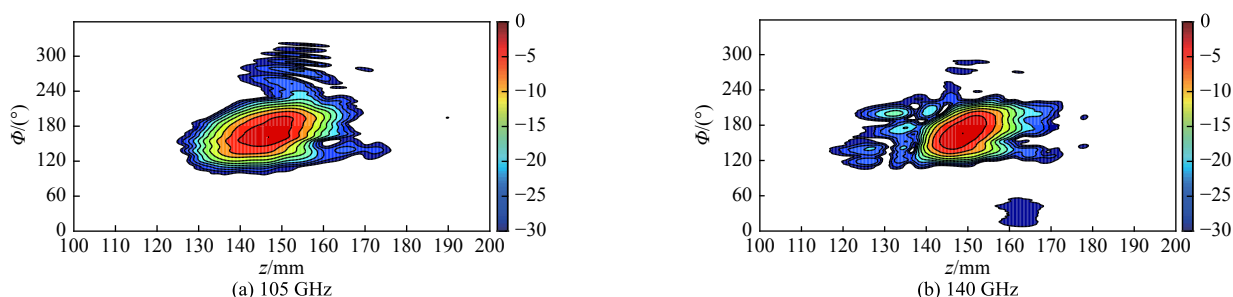


Fig. 4 E-field distribution on a cylinder with radius of 5 cm in the same coordinate system as the launcher(in dB)

图4 与辐射器同坐标系, 半径为5 cm圆柱面上的电场分布图(dB值)

由图2可以看出, 经由辐射器出射的场存在差异, 仅针对某个单一频率进行优化的相位修正镜并不能同时适用于另一个频率。为了避免造成较大损耗和高斯含量的下降, 减小两个工作频率之间准光模式变换器性能的差异, 我们考虑将两个目标频率同时设为优化目标进行优化, 同时在KS迭代算法中引入了权重和最小均方法优化以加快寻优。定义成本函数如下

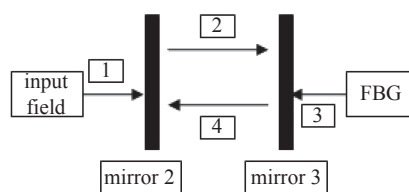


Fig. 5 Design procedure of the phase correction mirror

图5 相位修正镜的设计流程

$$P = \iint \sum_m [w_m |v_m \delta_y - \delta \theta_m|^2] dx dz \quad (3)$$

$$\frac{\partial P}{\partial \delta_y} = 0 \quad (4)$$

给两个频率分别赋予权重

$$w_m = \frac{|E_m|^2}{\sum_m |E_m|^2} \quad (5)$$

式中: δ_y 是镜面表面的相位修正的尺寸; w_m 是第 m 个频率的权重; θ_m 是第 m 个频率的相位差; v_m 是与频率有关的值, E_m 是第 m 个频率对应的电场。我们通过式(3)~(5)得出了双频镜面的修正尺寸 δ_y , 再结合前文提到的方法完成了双频相位修正镜的设计。

2 仿真分析

经过仿真软件(算法为 MLFMM)计算 105 GHz 和 140 GHz 双频准光模式变换器的 xz 平面电场传播情况和回旋管窗片上的场分布如图 6、图 7 所示。图 6(a) 为 105 GHz 时准光模式变换器截面的电场传播图, 图 6(b) 为 140 GHz 时截面上的电场传播图。从图 6 中可以看出波导端输入的高阶腔体模式经过波导内壁微扰逐渐被转换为高斯模式, 从辐射器出射时电场幅值达到了最大值且实现了聚束, 随后经后续镜面系统调整传播方向以及相位修正, 将入射波束的束腰修正为期望的束腰大小, 最终从回旋管窗片输出, 电磁波在整个双频准光模式变换器中的传播过程中衍射损耗低于 -30 dB, 回旋管窗片(直径 88 mm)边缘的电场幅度低于 -27 dB, 电场幅值也呈现高斯分布, 如图 7 所示。图 7(a) 为 105 GHz 窗片上的电场分布图, 图 7(b) 为 140 GHz 窗片上的电场分布情况。

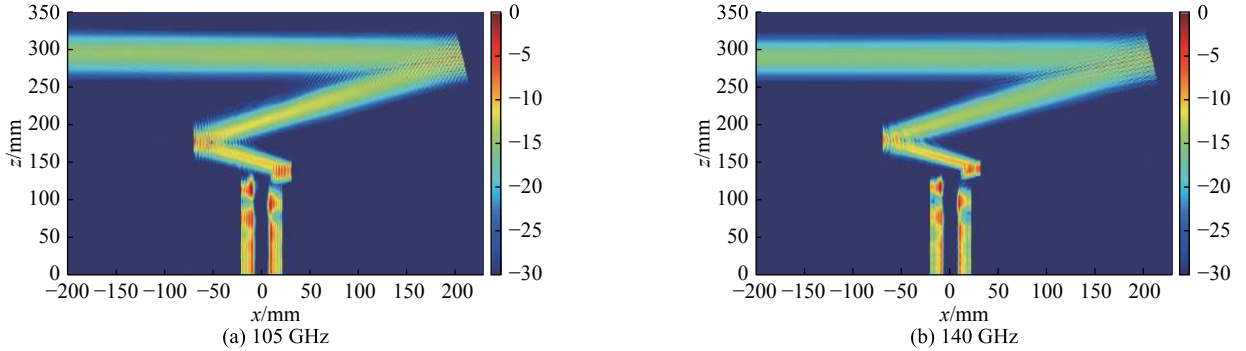


Fig. 6 Side view of the E-field of the whole system along the center symmetry xz plane obtained from simulation(in dB)

图 6 仿真软件中得到的 xz 平面上的电场分布图(dB 值)

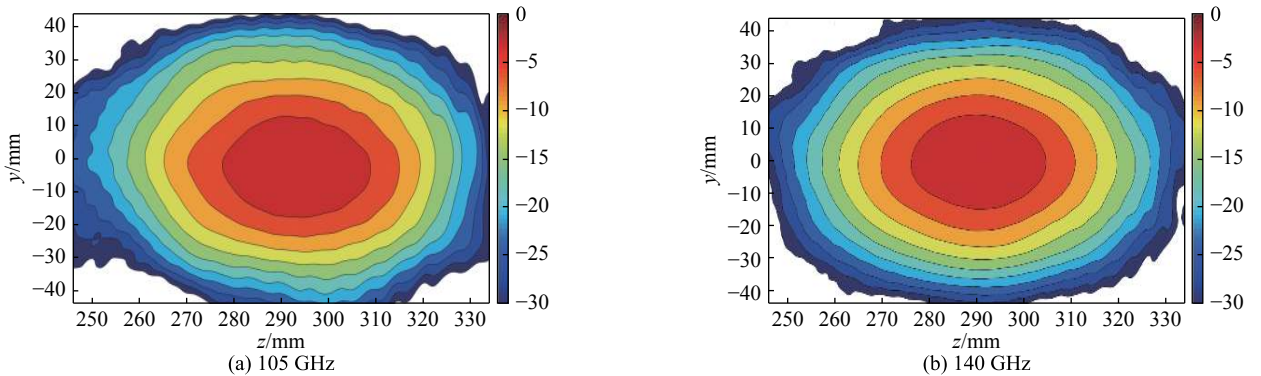


Fig. 7 Contour plots of the E-field on the window plane. The contours are in 3 dB increments

图 7 窗平面处的电场等值线图。每条线间隔 3 dB

经过分析计算得到结果如表 2 所示, 本文设计的双频准光模式变换器在工作频率 140 GHz($TE_{24,9}$)时能量传输效率为 99.0%、高斯含量大于 99.0%, 场强最大值点偏移 z 向 0.50 mm, y 向 0.50 mm; 工作频率为 105 GHz($TE_{18,7}$)时能量传输效率大于 97.0%、高斯含量为 98.0%, 场强最大值点偏移 z 向 2.00 mm, y 向 2.25 mm。较好地实现了模式转

换和能量传输。其中能量传输效率的定义为

$$\eta = \frac{P_1}{P_2} \quad (6)$$

高斯含量定义为

$$c = \frac{\iint_s |A_x| |B_x| ds}{\sqrt{\iint_s |A_x|^2 ds \iint_s |B_x|^2 ds}} \quad (7)$$

式中： P_1 表示回旋管窗片位置处的功率； P_2 表示辐射器入口处的输入功率。 A_x 表示回旋管窗片位置处的电场分布， B_x 表示理想高斯分布。

表 2 仿真结果

Table 2 Results of simulation

mode	frequency/GHz	Gaussian content/%	conversion efficiency/%	z-offset/mm	y-offset/mm
TE _{18,7}	105	98.0	97.3	2.00	2.25
TE _{24,9}	140	99.7	99.0	0.50	0.50

3 结 论

本文通过对毫米波在圆波导内的传输参数进行分析，选择圆波导内传播模型近似的传播模式，并利用数值方法在圆波导内壁引入不规则微扰，将圆波导口输入的高阶腔体模式转换为高斯模式，完成了双频预聚束辐射器的设计；考虑到两个工作频率下经双频辐射器出射的场分布有差异，在迭代算法中引入权重并结合最小均方法等方法完成了双频相位修正镜面的设计，最终实现将输入的波束修正为期望束腰的高斯波束，准光模式变换器中衍射损耗较低，能满足 MW 级双频回旋管的要求。今后将考虑引入新的优化方法对双频辐射器的设计进一步优化，同时探索多频准光模式变换器的设计方法。

参考文献：

- [1] Gregory S N, Manfred K T, Michael I A P. The gyrotron at 50: Historical overview[J]. Journal of Infrared Millimeter & Terahertz Waves, 2014, 35(4): 325-381.
- [2] Drumm O, Dammertz G, Thumm M. Design methods for mirrors in a quasi-optical mode converter for a frequency step-tunable gyrotron[C]//Infrared and Millimeter wave. 2002: 191-192.
- [3] Jin J, Thumm M, Piosczyk B, et al. Novel numerical method for the analysis and synthesis of the fields in highly oversized waveguide mode converters[J]. IEEE Trans Microw Theory Tech, 2009, 57(7): 1661-1668.
- [4] Hirata Y, Mitsunaka Y, Hayashi K, et al. The design of a tapered dimple-type mode converter/launcher for high-power gyrotrons[J]. IEEE Trans Plasma Science, 2003, 1(31): 142-146.
- [5] Rock B, Neilson J M, Vernon R J. A power-optimizing integrated design of a dual-frequency gyrotron quasi-optical mode converter[J]. IEEE Trans Plasma Science, 2012, 40(6): 1522-1529.
- [6] Agapova M, Belov Y, Chirkov A, et al. Megawatt power dual-frequency gyrotrons for modern fusion facilities[C]//2019 44th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves. 2019: 627-628.
- [7] Jin J, Gantenbein G, Jelonnek J, et al. Quasi-optical mode converter for 1MW dual-frequency gyrotrons[C]//2017 Eighteenth International Vacuum Electronics Conference. 2017.
- [8] Jin J, Gantenbein G, Ruess T, et al. Design of a quasi-optical mode converter for a dual-frequency coaxial-cavity gyrotron[C]//2019 44th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves(IRMMW-THz). 2019.
- [9] Prinz O, Gantenbein G, Thumm M. Advanced quasi-optical mode converter for a multi-frequency gyrotron[C]//2008 IEEE International Vacuum Electronics Conference. 2008: 64-66.
- [10] Ikeda R, Oda Y, Kobayashi T, et al. Development of multi-frequency gyrotron for ITER and DEMO at QST[C]//2016 41st International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves(IRMMW-THz). 2016.
- [11] Liao Shaolin. Multi-frequency beam-shaping mirror system design for high-power gyrotrons: Theory, algorithms and methods[D]. Madison: University of Wisconsin at Madison, 2008: 155-166.
- [12] 施美友, 屈劲, 薛长江, 等. 95GHz回旋管内置准光模式转换器仿真设计[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(9): 172-176. (Shi Meiyu, Qu Jin, Xue Changjiang, et al. Simulation design of quasi-optical mode converter for 95 GHz gyrotron[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(9): 172-176)
- [13] 王斌, 刘云龙, 王虎, 等. 高阶不对称体模回旋管Denisov型准光模式变换器[J]. 强激光与粒子束, 2016, 28: 073005. (Wang Bin, Liu Yunlong, Wang Hu, et

- al. Denisov-type quasi-optical mode converter for higher-order asymmetric volume mode gyrotron[J]. [High Power Laser and Particle Beams](#), 2016, 28: 073005)
- [14] 刘健卫. 准光模式变换器研究与设计[D]. 成都: 电子科技大学, 2014: 19-20. (Liu Jianwei. Research and design of quasi-optical mode converter[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2014: 19-20)
- [15] 李浩, 汪海洋, 李天明, 等. W波段 TE_{62} - TEM_{00} 准光模式变换器[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(11): 278-282. (Li Hao, Wang Haiyang, Li Tianming, et al. W-band quasi-optical TE_{62} - TEM_{00} mode converter[J]. [High Power Laser and Particle Beams](#), 2011, 23(11): 278-282)
- [16] 边慧琦, 杜朝海, 潘石, 等. 太赫兹多模式宽带准光模式变换器的设计分析[C]//2018年全国微波毫米波会议. 2018: 1419-1412. (Bian Huiqi, Du Chaohai, Pan Shi, et al. Design and analysis of terahertz multimode broadband quasi-optical mode converter[C]//2018 National Microwave and Millimeter Wave Conference. 2018: 1419-1412.)
- [17] Du Chaohai, Pan Shi, Liu Pukun. THz broadband quasi-optical mode converter antenna system[C]//2016 IEEE international conference on microwave and millimeter wave technology(ICMMT). 2016.
- [18] 乔益民. 220 GHz边廊模准光模式变换器的研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2013: 41-43. (Qiao Yimin. Study of a quasi-optical mode converter for 220 GHz whispering-gallery mode[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2013: 41-43)
- [19] Prinz O, Gantenbein G, Liu Yinghui, et al. Highly efficient quasi-optical mode converter for a multifrequency high-power gyrotron[J]. [IEEE Trans Electron Devices](#), 2009, 56(5): 828-934.
- [20] 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.
- [21] Vlasov S N. Transformation of a whispering gallery mode, propagating in a circular waveguide, into a beam of waves[J]. [Radiofizika](#), 1972, 15(4): 14-17.
- [22] Vlasov S N, Orlova I M. Quasioptical transformer which transforms the waves in a waveguide having a circular cross section into a highly directional wave beam[J]. [Radiophysics and Quantum Electronics](#), 1974, 17(1): 115-119.
- [23] Denisov G G, Kuftin A N, Malygin V I, et al. 110 GHz gyrotron with a built-in high-efficiency converter[J]. [International Journal of Electronics](#), 1992, 72(5): 1079-1091.