

文章编号: 2095-4980(2024)01-0035-04

带状电子注驱动的准光谐振腔回旋管

雷于露, 杨积涛, 杜朝海

(北京大学 电子学院, 北京 100871)

摘要: 回旋管作为一种重要的真空电子源, 能够在毫米波和太赫兹频段生成高峰值以及高平均功率的电磁辐射, 在波谱学、雷达、通信、生物医学等领域具有广泛的应用前景。传统的回旋管将不可避免地面对激烈的模式竞争问题, 引入准光谐振腔将有望大大减小模式竞争的激烈程度。本文基于电子回旋脉塞理论, 将准光谐振腔及带状电子注进行结合, 以期实现更高的输出功率及效率。仿真结果表明, 在电子电压为 40 kV, 背景磁场为 8.4 T 时, 设计的准光回旋管能在 220 GHz 频段处产生 6.1 kW 的输出, 电子效率达到 6.1% 且在一段时间内能稳定运行。本文结构将可能为高频段乃至高次谐波工作的回旋管设计提供全新方案, 从而进一步用于通信、雷达等领域。

关键词: 准光谐振腔; 回旋管; 带状电子注

中图分类号: TN1;O46

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2023283

Quasi-optical cavity gyrotron with sheet e-beam

LEI Yulu, YANG Jitao, DU Chaohai

(School of Electronics, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: As an important vacuum electron device, the gyrotron has the capability to generate high peak and average powers in the millimeter-wave and terahertz frequency ranges, holding broad prospects of application in fields such as spectroscopy, radar, communication, and biomedical science. However, conventional gyrotrons inevitably face intense mode competition issues, and the introduction of quasi-optical cavity is expected to significantly alleviate the severity of mode competition. In this study, based on the theory of electron gyrotron oscillation, the innovative combination of quasi-optical cavity and sheet electron beam is proposed with the aim of achieving higher output power and efficiency. Simulation results indicate that under conditions of 40 kV electron voltage and an 8.4 T background magnetic field, the designed quasi-optical gyrotron can generate 6.1 kW of output power at a frequency of 220 GHz, with an electron efficiency of 6.1% and stable operation over a certain duration. The proposed structure in this study may provide a novel solution for gyrotron design operating in high-frequency and even higher harmonic regimes, thus furthering its applications in fields such as radar and controlled nuclear fusion.

Keywords: quasi-optical cavity; gyrotron; sheet e-beam

太赫兹波(0.1~10 THz)位于电子学与光谱学的交界频段, 因此被认为是电子学到光谱学过渡的频段。太赫兹波兼具微波和光波的双重特性, 拥有丰富的频率资源, 但目前尚未大规模开发利用。太赫兹波段的独特频率范围赋予了它独特的性质, 如宽谱特性、低能量性和透射性等, 在通信、生物医学等领域具有广泛的应用前景和重要价值。

随着研究的深入, 越来越多的国家开始重视太赫兹科学技术的发展并加大投入。回旋管是一类基于电子回旋脉塞原理的快波器件^[1], 由于回旋管不受传统慢波器件中尺寸共渡的限制, 目前已成为毫米波和太赫兹波段一种极其重要的相干辐射源。得益于其高频率和高功率的优势, 回旋管在受控核聚变和材料无损检测等领域中得到广泛应用^[2]。

随着人们对电磁波研究的进一步深化, 电磁波的应用频段不断拓宽, 高频器件腔体尺寸也随着频率上升而

收稿日期: 2023-09-26; 修回日期: 2023-11-17

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2021YFA1600302); 国家自然科学基金资助项目(62271011; U21A20458); 北京市杰出青年科学基金资助项目(JQ21011)

减小,从而带来腔体散热难,功率容量低,腔体损耗增加,实际加工难等问题。回旋管工作模式逐渐由低阶模式转变为高阶模式,在一定程度上可以避免尺寸共渡效应带来的元件尺寸小,功率容量低等问题。但传统的圆柱形相互作用腔体存在模式密度高、模式竞争激烈、器件难以起振、工作不稳定、输出功率受限等缺点。因此,研究人员提出了多种具有模式选择性的新型结构。1996年,Vlasov等提出在谐振器内增加衍射光栅,以增加器件的模式选择性和回旋管的功率^[3]。之后有学者提出在输出端口增加光栅,以实现不同模式各异的模式衍射率,从而增强结构的模式选择性。美国麻省理工学院率先将这一概念用于回旋振荡器^[4]和回旋行波管^[5]中的准光波导结构,将微波和光学技术相结合,同样具有良好的模式选择性。

相较于传统的圆柱形波导,准光谐振腔中的模式密度表现得更为均匀和分散,腔体内模式等间距分布,与频率无关,不存在频谱浓缩效应^[6-7]。因此,在高频范围内,准光腔能够显著减少由于采用高阶模式而引起的模式竞争,从而更容易实现工作模式的启动。电子科技大学关晓通等于2018年首次提出一种新型高频相互作用结构,即双共焦波导结构,大幅提高了共焦柱面波导结构的输出效率,工作模式为 $TE_{0,11}$ 。仿真表明该器件在328.93 GHz输出功率为5 kW,相互作用效率为6.2%^[8]。此外,2019年,俄罗斯科学家提出了带状电子注结构,通过增大与电磁场之间的相互作用面积提高整个系统的工作效率,在140 GHz的频点处实现了最高35%的输出效率^[9]。

考虑到220 GHz大功率电磁波源在雷达和通信等领域的重要应用潜力,本文结合准光谐振腔与带状电子注,采用文献[7]中提到的结构,验证220 GHz带状电子注回旋管的注-波相互作用特性,以期达到更高的输出效率。文中将对准光谐振腔的特点进行分析,采用仿真软件进行仿真验证的同时,对带状电子注进行参数扫描优化。仿真结果显示,该结构在220.6 GHz频率下,实现了6.1 kW的输出功率,输出效率达到6.1%。与原始结构相比,效率几乎相当,但电流却减小了一半,为实现高效率的回旋管开辟了新的研究方向和思考路径。

1 准光谐振腔

准光谐振腔的结构示意图如图1所示,可以看到准光谐振腔由2个对称的镜面构成。和传统圆柱形波导腔体一致,共焦柱面波导同样采用三段式分布结构,两侧开放。上渐变段 L_1 靠近电子枪,可以通过控制 θ_1 从而防止高频场反向进入电子枪;下渐变段 L_3 作为输出端,保证电磁场能够从腔体中辐射至自由空间;中间的均匀段 L_2 作为振荡器的核心部分,主要进行电磁场与电子注之间的注波相互作用过程^[10],该部分也是对腔体品质因数影响最大的部分。准光谐振腔内的模式密度可以表示为 $\Delta N/\Delta f = 2R_c/c$ (R_c 为准光谐振腔的镜面半径, c 为光速),模式分布如图2所示。

由图2可见,腔体内模式密度分布均匀分散,与频率无关,更适合用于高次谐波回旋器件的设计。

波导结构的镜面宽度与衍射损耗直接相关,镜面宽度越小,模式的衍射损耗越高。经过理论计算,准光腔的衍射损耗率可表示为^[7]:

$$LossRate = 20 \lg \left[\exp(k_{zi}/100) \right] \quad (1)$$

式中纵向传播波数虚部 $k_{zi} = \text{Im} \left[\sqrt{(\omega/c)^2 - k_z^2} \right]$ 。对于共焦柱面波导,由于腔体两侧是开放的,部分场能量会从开放边沿衍射从而产生衍射损耗,因此衍射损耗对于准光波导工作模式的选择以及腔体中的电磁场传播极其重要。在准光谐振腔体中,模式 $TE_{m,n}$ ($m \neq 0$)由于电场分布相对分散,电场能量会通过开放边界不断泄露,最终导致该模式无法在准光谐振腔内正常起振。因此共焦柱面波导内能工作的模式仅有 $TE_{0,n}$ 模式,这大大降低了在高频段高次谐波模式工作时的模式竞争激烈程度。

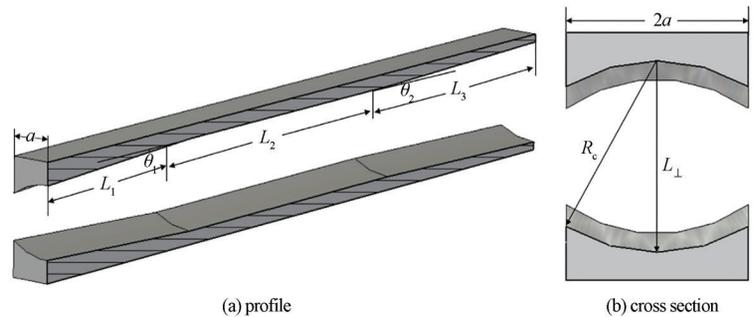


Fig.1 Confocal cavity
图1 共焦柱面波导

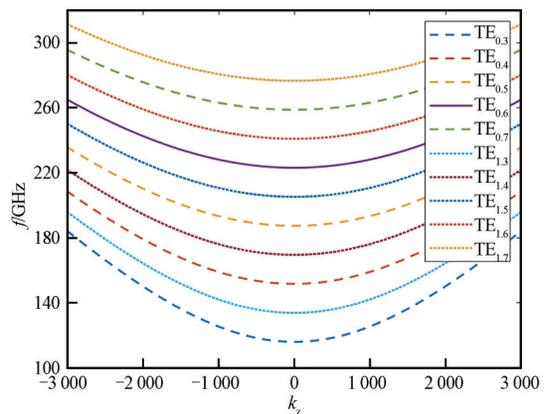


Fig.2 Mode intensity in the quasi-optical cavity
图2 准光谐振腔内模式密度

在选定曲率半径的前提下，利用式(2)可以计算出衍射损耗和频率之间的关系。此外，在固定镜面宽度的前提下，随着频率不断升高，电场衍射损耗率也会逐渐减小。而对于同一镜面宽度，不同模式的衍射损耗率也存在差异。通过合理选择镜面宽度，可以有效防止在相同设计参数下具有竞争性的模式起振，这也是准光回旋管具有良好模式选择性的原因。

本文采用的结构是 2016 年电子科技大学关晓通等针对 220 GHz 设计的 TE_{06} 基波模式回旋管，结构参数为 $L_1=10\text{ mm}$ 、 $L_2=13\text{ mm}$ 、 $L_3=10\text{ mm}$ 、 $\theta_1=2.1^\circ$ 、 $\theta_2=0.86^\circ$ 、 $R_c=L_\perp=4.2\text{ mm}$ 。通过 CST STUDIO SUITE 中的 Particle In Cell (PIC) 模块进行建模，并在结构两侧增加模拟的吸波材料，可以复现以环形电子注激发的结构起振过程，复现结构最终实现在 222.5 GHz 处生成 18 kW 的稳定输出，效率达到 9.02%。

2 带状电子注设计

在已有结构的基础之上，将环形电子注替换为和电场分布重合程度更高的带状电子注，尝试对该结构的输出效果进行更进一步的提升。该结构在 CST 中的模型如图 3 所示。两侧增加用于模拟准光谱谐振腔结构的开放边界条件的介电材料($\epsilon_r=7$)，使非 $TE_{0,n}$ 的竞争模式产生损耗，减小模式竞争的激烈程度。

带状电子注初步设置的参数为：宽度 $w_1=0.4\text{ mm}$ 、厚度 $d=0.1\text{ mm}$ 、高度 $h=2.94\text{ mm}$ ，电子注需旋转一定程度以满足电子横纵速度比的设计要求。该结构最终实现了 $TE_{0,6}$ 模式输出，如图 4 所示。但在该组参数设置下，输出信号功率幅值在第 8 ns 开始上升，第 28 ns 之后开始下降，场型分布也开始逐渐紊乱，此时输出达到最高效率，为 6.05%。对输出信号 $TE_{0,6}$ 模式做傅里叶分析可知，该点信号出现在 220.74 GHz，基本吻合设计指标。之后对该结构做进一步优化。

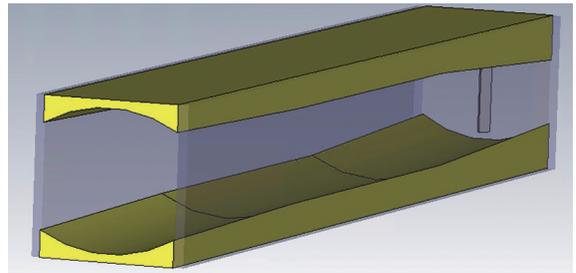


Fig.3 Simulation diagram of sheet e-beam confocal cavity
图 3 带状电子注准光谱谐振腔仿真示意图

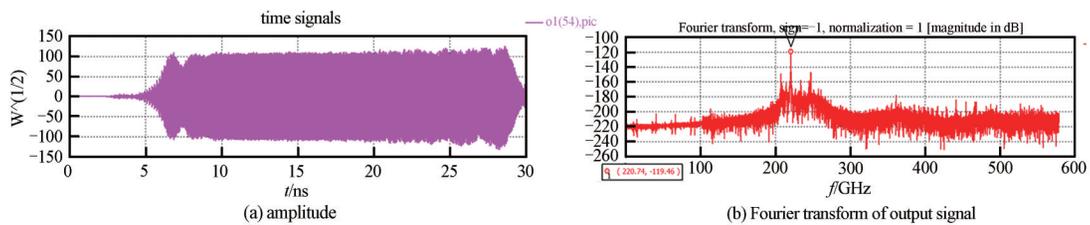


Fig.4 Simulation results
图 4 输出性能结果图

对带状电子注 3 个维度的参数进行扫参之后发现，对输出结果影响最为显著的参数为宽度，其余 2 个参数的影响并不明显。最终得到的最优解为 $w_1=0.1\text{ mm}$ 、 $d=0.1\text{ mm}$ 、 $h=2.94\text{ mm}$ 。此外，在优化参数的过程中发现，降低带状电子注的电流可以显著提高系统的输出性能，低电流情况下准光谱谐振腔将实现模式稳定的输出。因此，最终带状电子注的电压设置为 40 kV，电流为 2.5 A，能够得到一个稳定输出的信号并且持续到 30 ns，输出功率达到 6.1 kW，效率提高为 6.1%，且并未出现输出信号大幅下降的问题。对该信号进行傅里叶分析，可以获知该频点在 220.6 GHz 且频谱较为纯净，仍满足 220 GHz 的设计要求。电场分布如图 5(c) 所示，表明激励起的模式确实为 $TE_{0,6}$ 模。相比原设计，效率基本一致，但电子注电流大大减小。

优化后的带状电子注准光谱谐振腔回旋管结构参数如表 1 所示。

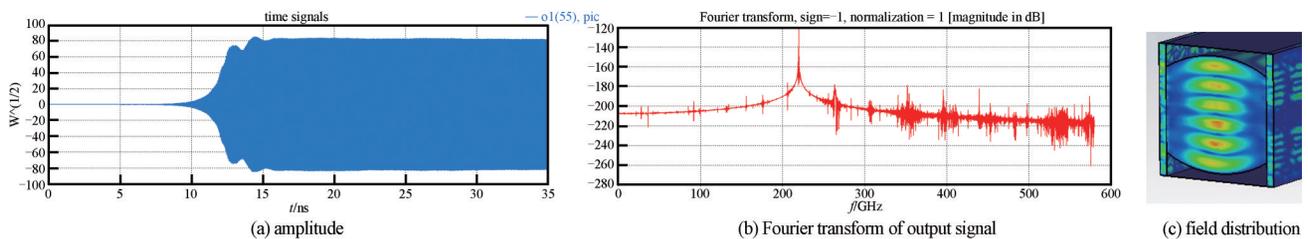


Fig.5 Simulation results with improvement
图 5 优化后输出性能结果图

目前,针对环形电子注已经建立起相当成熟的耦合理论以及有关起振电流的分析理论。这些理论可以根据回旋管腔体参数精确设计环形电子注的半径和起振电流,最大程度地减少模式竞争,实现最佳参数配置,并可以进行理论预测与仿真实验的相互印证。针对带状电子注与电磁波之间的相互作用过程,目前还缺少对应的理论体系进行深入分析。因此,本文中带状电子注驱动结构经过多次仿真实验尝试,获得相对优化的参数设置。未来带状电子注驱动的回旋管领域仍有广阔的研究空间,需进一步挖掘和开发相关理论,提高该技术的理论基础和实际应用。

3 结论

本文结合了准光谐振腔和带状电子注,实现了共焦波导 $TE_{0,6}$ 模式的准光回旋管。仿真结果表明在工作频点 220 GHz 处的峰值功率输出功率可以达到 6.1 kW,效率为 6.1%。与原有设计相比,这一新结构在电流减半的前提下,基本保持了相同的输出效率,验证了带状电子注可以提高回旋管输出性能的特点。此外采用准光谐振腔有助于通过选择适当的镜面宽度有效地控制各种模式的 Q 值,抑制可能出现的模式竞争。然而,目前的研究仍仅基于仿真实验,需要更多理论支持。未来,将对带状电子注在回旋管内的注波相互作用进行进一步研究。这一结构也有望为高频段的高次谐波回旋管提供新的解决方案,从而进一步应用于通信、雷达等领域。

参考文献:

- [1] CHU K R. The electron cyclotron maser[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2004,76(2):489–540. doi:10.1103/RevModPhys.76.489.
- [2] NUSINOVICH G S, THUMM M K A, PETELIN M I. The gyrotron at 50: historical overview[J]. *Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*, 2014,35(4):325–381. doi:10.1007/s10762-014-0050-7.
- [3] VLASOV S N, KOPOSOVA E V, PAVEL'EV A B, et al. Gyrotrons with echelette resonators[J]. *Radiophysics and Quantum Electronics*, 1996,39(6):458–462. doi:10.1007/BF02122392.
- [4] HU W, SHAPIRO M A, KRIESCHER K E, et al. 140 GHz gyrotron experiments based on a confocal cavity[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 1998,26(3):366–374. doi:10.1109/27.700767.
- [5] SIRIGIRI J R, SHAPIRO M A, TEMKIN R J. High-power 140 GHz quasioptical gyrotron traveling-wave amplifier[J]. *Physical Review Letters*, 2003,90(25):258302. doi:10.1103/PhysRevLett.90.258302.
- [6] BOYD G D, GORDON J P. Confocal multimode resonator for millimeter through optical wavelength masers[J]. *The Bell System Technical Journal*, 1961,40(2):489–508. doi:10.1002/j.1538-7305.1961.tb01626.x.
- [7] 关晓通. 太赫兹准光电子回旋脉塞研究[D]. 成都:电子科技大学, 2018. (GUAN Xiaotong. Research on terahertz quasi-optical electron cyclotron maser[D]. Chengdu, China: University of Electronic Science and Technology of China, 2018.)
- [8] GUAN Xiaotong, FU Wenjie, LU Dun, et al. A novel terahertz harmonic gyrotron with dual confocal cavity[C]// 2018 IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC). Monterey, CA, USA: IEEE, 2018:305–306. doi:10.1109/IVEC.2018.8391652.
- [9] GLYAVIN M Y, ZASLAVSKI V Y, MANUILOV V N, et al. Simulations of sub-THz confocal-cavity gyrotrons with different configurations of electron beams[C]// 2019 the 44th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves. Paris, France: IEEE, 2019:1. doi:10.1109/IRMMW-THz.2019.8874501.
- [10] 古彪. 高次谐波准光腔太赫兹回旋管的仿真研究[D]. 成都:电子科技大学, 2017. (GU Biao. Simulation study on terahertz gyrotron of high harmonic quasi-optical cavity[D]. Chengdu, China: University of Electronic Science and Technology of China, 2017.)

作者简介:

雷于露(1999-),女,在读硕士研究生,主要研究方向为自由电子辐射. email:2201213032@stu.pku.edu.cn.

杨积涛(2001-),男,在读博士研究生,主要研究方向为自由电子辐射.

杜朝海(1982-),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为毫米波-太赫兹回旋器件、自由电子辐射等.

表1 准光谐振腔结构设计参数

Table 1 Parameters of quasi-optical cavity

parameter	value
up-tapered length L_1/mm	10.00
uniform part length L_2/mm	13.00
down-tapered length L_3/mm	10.00
up-tapered angle $\theta_1/^\circ$	2.10
down-tapered angle $\theta_2/^\circ$	0.86
mirror radius R/mm	4.20
mirror distance L_4/mm	4.20
width of shee e-beam w_1/mm	0.10
thickness of shee e-beam d/mm	0.10
height of shee e-beam h/mm	2.94
voltage of shee e-beam U/kV	40.00
current of shee e-beam I/A	2.50