



·高功率微波技术·

## S 波段低磁场紧凑型相对论磁控管设计\*

张 伟<sup>1,2</sup>, 徐 莎<sup>1</sup>, 秦 奋<sup>1</sup>, 雷禄容<sup>1</sup>, 王 冬<sup>1</sup>, 张 勇<sup>1</sup>, 鞠炳全<sup>1</sup>, 崔 越<sup>1,2</sup>

(1. 中国工程物理研究院 应用电子学研究所 高功率微波技术重点实验室, 四川 绵阳 621900;

2. 中国工程物理研究院 研究生院, 四川 绵阳 621999)

**摘 要:** 针对高功率微波器件的低磁场小型化发展需求, 设计了工作在 S 波段的低磁场紧凑型相对论磁控管, 建立了三维仿真模型。设计衍射输出结构, 输出模式为  $TE_{11}$  模。在圆波导中  $TE_{11}$  模具有最小的截止半径, 因此选取  $TE_{11}$  模输出比高阶模输出具有更小的波导半径。分析了磁控管的输出性能随磁场、输出波导半径和倾斜角的变化规律。在磁场 0.34 T、电压 352 kV 条件下, 模拟仿真结果显示磁控管输出功率达到 567 MW, 功率转换效率为 62.5%, 在频率为 2.37 GHz 时波导半径仅为 77.5 mm。

**关键词:** 磁控管; S 波段; 轴向衍射输出;  $TE_{11}$  模式; 粒子模拟

中图分类号: TN125

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.230058

## Design of a compact S-band relativistic magnetron operating at low magnetic field

Zhang Wei<sup>1,2</sup>, Xu Sha<sup>1</sup>, Qin Fen<sup>1</sup>, Lei Lurong<sup>1</sup>, Wang Dong<sup>1</sup>,

Zhang Yong<sup>1</sup>, Ju Bingquan<sup>1</sup>, Cui Yue<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory on High Power Microwave Technology, Institute of Applied Electronics, CAEP, Mianyang 621900, China;

2. Graduate School of China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, China)

**Abstract:** For compact high-power microwave devices operating at low magnetic field, a compact S-band relativistic magnetron operating at low magnetic field was designed and simulated with three-dimensional particle-in-cell codes. This tube radiates  $TE_{11}$  mode in circular waveguide with diffraction output structure. As the cutoff radius of  $TE_{11}$  mode is the smallest in circular waveguide, compared with higher modes, the radius of the output waveguide could be reduced obviously. The output performance as a function of magnetic field, radius of waveguide and angle was studied. Typical simulation results show that microwave power of 567 MW was generated at 2.37 GHz when the voltage and magnetic field were 352 kV and 0.34 T, the power conversion efficiency was 62.5%, and the radius of waveguide was only 77.5 mm.

**Key words:** magnetron, S-band, axial diffraction output,  $TE_{11}$  mode, PIC simulation

随着对高功率微波器件的不断深入研究, 具有结构紧凑、可便携、高功率、高可靠和高效等特点的微波器件越来越受到重视。在所有的高功率微波 (HPM) 器件中, 由于相对论磁控管 (RM) 具有起振快、高功率、宽带可调谐性和低磁场等优点<sup>[1-2]</sup>, 在超级干扰源、高功率雷达等领域都有广泛的应用<sup>[3]</sup>。现阶段对相对论磁控管的研究主要在高功率方向和高效率方向<sup>[4-8]</sup>。衍射输出相对论磁控管 (MDO) 除具有高功率高效率的优点外, 还能直接轴向辐射不同 TE 模式的微波, 是一种结构紧凑的高功率微波器件, 被人们寄予关注<sup>[9]</sup>。本文针对高功率微波器件中的低磁场和小型化要求, 提出一个工作磁场为 0.34 T、输出模式为  $TE_{11}$  模的高效率 S 波段相对论磁控管, 相对论磁控管采用衍射输出结构<sup>[9-11]</sup>。在磁场为 0.34 T、电压为 352 kV 条件下, 仿真结果显示输出功率为 567 MW, 功率转换效率为 62.5%, 并且在工作频率 2.37 GHz 时, 输出波导半径仅为 77.5 mm, 相较于高阶模输出, 磁控管的结构更为紧凑, 更便于实现磁控管的小型化发展需求, 利于磁控管在实际中的应用。

\* 收稿日期: 2023-03-23; 修订日期: 2023-07-05

联系方式: 张 伟, 2621040633@qq.com。

通信作者: 徐 莎, sc171996@sina.com。

## 1 相对论磁控管器件设计

相对论磁控管是一种典型的正交场器件,其轴向磁场与径向电场正交。相对论磁控管由阴极、阳极和输出结构组成,由于阴阳极之间的高压,阴极发射角向漂移的电子。电子满足束波同步条件时,会激励起高频场。高频场会对电子产生约束,形成电子群聚,同时电子在阴阳极间运动并与高频场交换能量,最后输出结构提取并输出高频场能量。

相对论磁控管正常工作需要合适的电压和磁场,根据 Buneman-Hartree 公式,可以计算一定电压下的最低谐振磁场, Buneman-Hartree 公式

$$\frac{eV}{mc^2} = \frac{eB}{mc} \frac{(r_a^2 - r_c^2)}{2r_a} \frac{r_a \omega_n}{cn} + \left[ 1 - \left( \frac{r_a \omega_n}{cn} \right)^2 \right]^{1/2} - 1 \quad (1)$$

式中:  $e$  表示电子电荷量;  $m$  表示电子质量;  $c$  表示光速;  $V$  表示电压;  $B$  表示磁场;  $n$  表示模式数;  $\omega_n$  表示模式数为  $n$  的角频率;  $r_a$  表示阳极半径;  $r_c$  表示阴极半径。

为了设计低磁场的相对论磁控管,固定工作电压为 350 kV,仅改变阳极半径,分析不同阳极半径下的最低谐振磁场。结果如图 1 所示,随着阳极半径的增加,工作电压为 350 kV 时,相对论磁控管的最低谐振磁场呈现下降的趋势,对比其他结构参数<sup>[12]</sup>,当阳极半径为 21.1 mm 时,相对论磁控管的最低谐振磁场为 0.454 T,而当阳极半径为 23.6 mm 时,相对论磁控管的最低谐振磁场仅为 0.349 T。同时阳极半径的增加可以降低阳极的高频场强,防止击穿的风险。

本文采用的是典型的 6 腔磁控管的基本结构<sup>[13-14]</sup>,结构如图 2 所示,该器件包含有阴极、阳极和衍射输出结构等,  $R_c$  表示阴极半径,  $R_a$  表示阳极半径,  $R_v$  表示谐振腔半径,  $\theta$  表示谐振腔张角,  $\alpha$  和  $\beta$  表示阳极块和外壁渐变的角度,  $R_o$  表示输出波导半径。图 2(a) 是磁控管阳极结构的横截面图。磁控管阳极包括有 6 个扇形结构的谐振腔,其中阳极半径  $R_a$  为 23.6 mm,谐振腔半径  $R_v$  为 44.2 mm,谐振腔张角为 20°,阴极采用透明阴极<sup>[12,15-18]</sup>,其中阴极半径  $R_c$  为 10.2 mm,圆柱形发射条直径为 3 mm,发射条长度为 85 mm,阴极端帽为圆柱形端帽<sup>[19-21]</sup>。

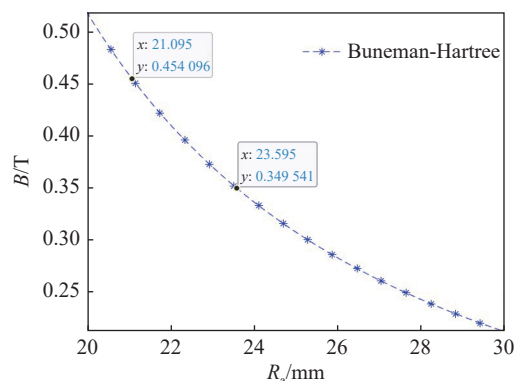
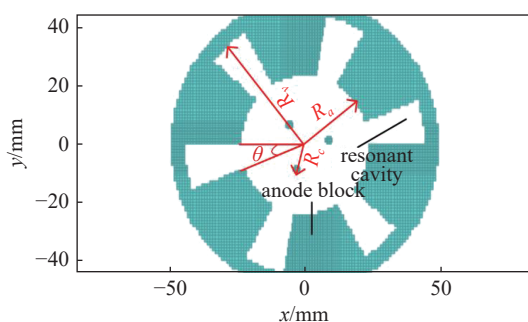
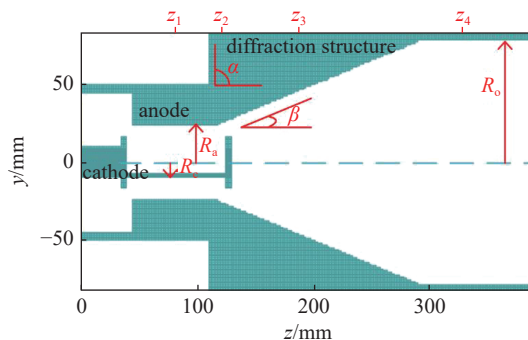


Fig. 1 Relationship between radius of anode and magnetic field

图 1 磁场随阳极半径的变化关系



(a) cross section



(b) axial section

Fig. 2 Schematic of the axial extraction relativistic magnetron

图 2 轴向输出相对论磁控管结构示意图

磁控管输出结构的主要作用是提取存储在谐振腔的高频场能量并输出,根据提取方式的不同,分为径向输出和轴向输出。相比径向输出,轴向输出结构具有角向对称、工作模式稳定、结构紧凑的优点。衍射输出结构是一种常见的轴向输出结构。

衍射输出结构可以直接从谐振腔提取高频场能量,采用不同数目的提取腔可以输出不同模式的微波<sup>[7]</sup>。当阳极形成  $\pi$  模高频场能量时,相邻谐振腔的电场角向方向相反,因此将衍射输出结构的提取腔数目设置为 4 个,衍射输出结构内的电场分布会逐渐由  $\pi$  模变为  $TE_{11}$  模,衍射输出相对论磁控管的结构示意图如图 3 所示。

阳极块以倾斜角  $\beta=17^\circ$  渐变扩张到输出波导,如图 4(a) 所示;4 个对称分布的谐振腔以倾斜角  $\alpha=90^\circ$  扩张到输

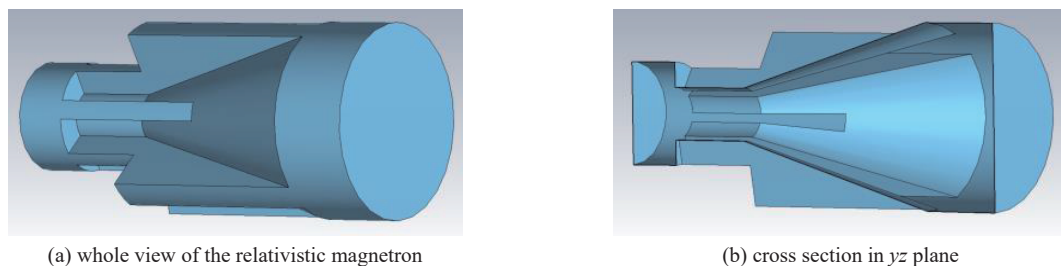


Fig. 3 Configurations of relativistic magnetron with diffraction output

图 3 衍射输出相对论磁控管结构图

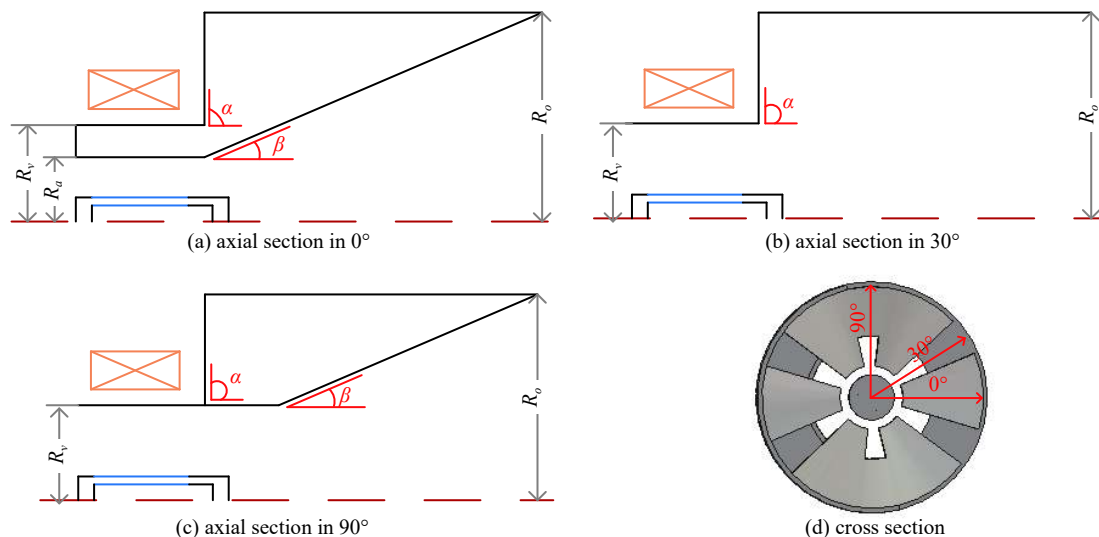


Fig. 4 Axial section in different azimuthal positions

图 4 不同角度的轴向图

出波导, 如图 4(b) 所示; 其余 2 个对称分布的谐振腔先延伸一段最后以倾斜角  $\beta$  渐变到输出端口, 并且输出波导的半径  $R_o$  为 77.5 mm, 如图 4(c) 所示; 衍射输出结构如图 4(d) 所示。

在圆波导中, 相同频率下  $TE_{11}$  模的截止半径是最小的。在频率为 2.37 GHz 时,  $TE_{11}$  截止半径仅为 3.71 cm。同频率下, 相比高阶模输出,  $TE_{11}$  模输出时波导半径可以明显减小。在使用相同倾斜角  $\beta$  的情况下, 磁控管的轴向长度也可以相应地减小。

当磁控管工作时, 阳极的横截面形成了  $\pi$  模的电场分布, 如图 5(a) 所示; 衍射输出结构可以提取阳极腔内的  $\pi$  模高频场能量并转换为  $TE_{11}$  模式的微波, 电场分布逐渐由阳极腔内的  $\pi$  模变为  $TE_{11}$  模, 如图 5(b)、图 5(c) 所示; 最后可以在输出波导形成  $TE_{11}$  模式的电场分布, 如图 5(d) 所示。

## 2 模拟及优化设计

利用模拟软件对图 2 建立的磁控管模型进行模拟与分析。在模拟计算中, 器件工作电压 352 kV, 磁场 0.34 T。仿真结果如图 6(a) 所示, 器件在 4 ns 开始起振, 并且在 10 ns 达到饱和, 仿真的电压波形上升前沿为 3 ns, 输出微波频率 2.37 GHz, 输出微波功率 567 MW, 功率转换效率 62.5%。从图 6(b) 可以看出, 只在中心频率 2.37 GHz 上出现了一个明显的峰值, 说明微波频谱单一性较好。

表 1 对比了不同文献<sup>[22-24]</sup> 的 S 波段衍射输出相对论磁控管, 与表 1 中的衍射输出相对论磁控管相比, 本文的相对论磁控管的波导半径仅为 77.5 mm, 磁场为 0.34 T, 结构更加紧凑, 同时具有较高的功率转换效率。

由图 7(a) 可以看出, 通过阴极端帽的设计, 电子主要约束在束波相互作用区附近, 有效减少电子漂移出束波相互作用区, 减小轴向泄露电流; 图 7(b) 为阳极横截面上的电子轮辐分布, 在 18 ns 时 6 腔磁控管的相互作用空间里已经完全形成了 3 个角向电子轮辐, 这表明该磁控管腔内为  $\pi$  模高频场能量。图 7(c) 为在 18 ns 时刻输入输出的电场分布图, 经过衍射结构的模式转换后在输出端口为  $TE_{11}$  模式输出。

图 8 展示了衍射输出相对论磁控管工作参数与磁场的关系, 在电压为 352 kV 条件下, 电流随着磁场的增加而

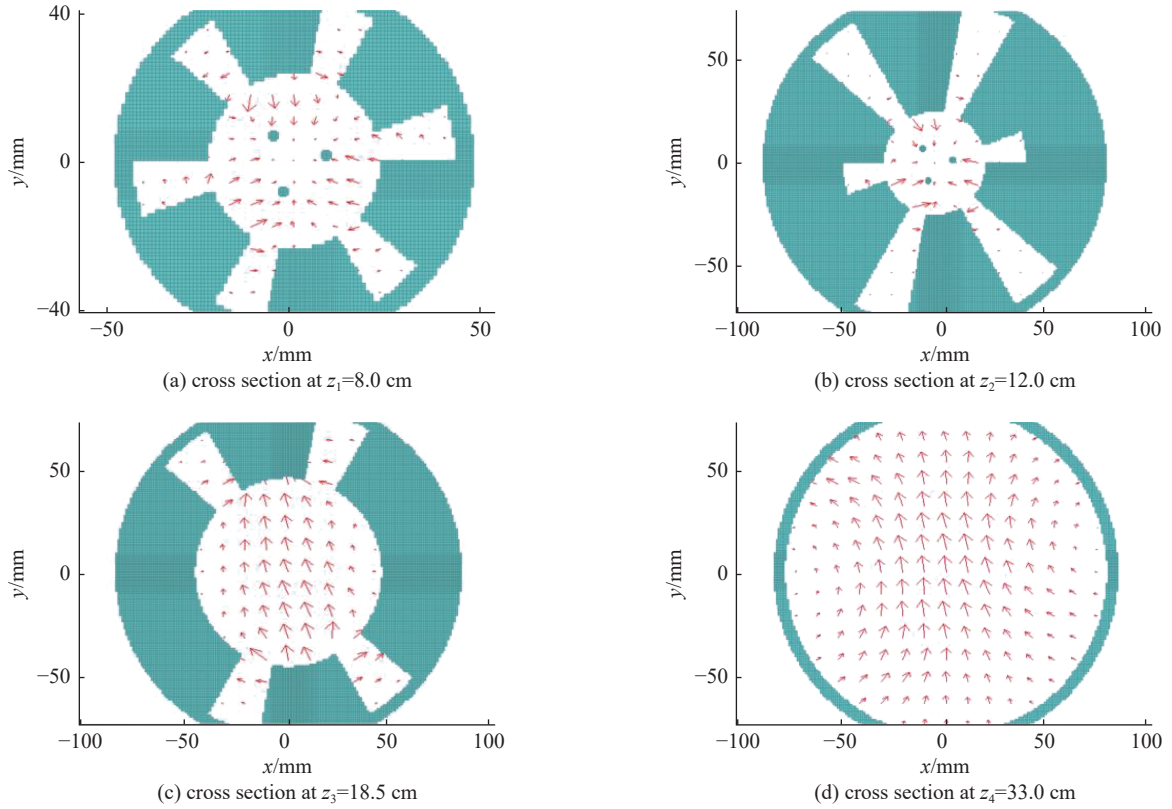


Fig. 5 Spatial distribution of electric field at different positions

图 5 不同位置的电场分布

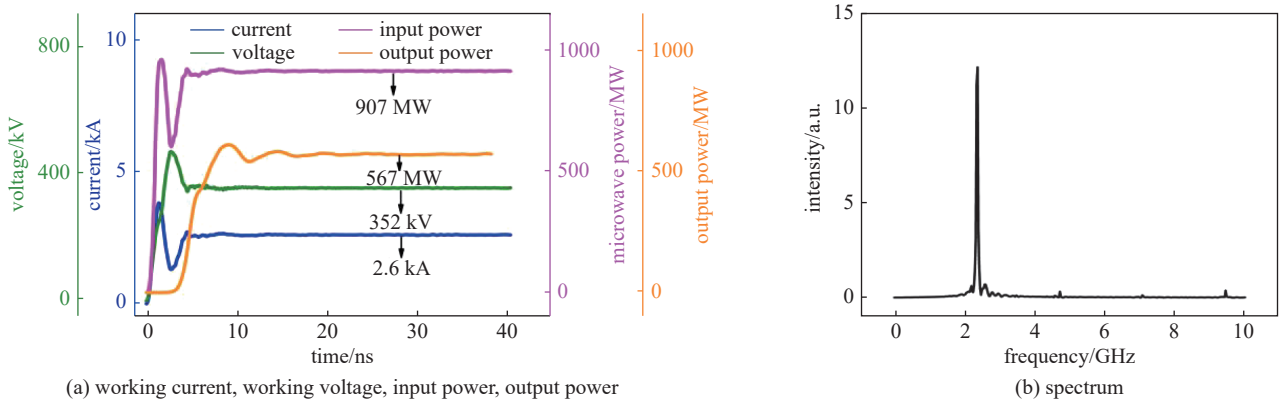


Fig. 6 Simulation waveforms

图 6 器件工作波形

表 1 S 波段衍射输出相对论磁控管的比较

Table 1 Comparison of S-band relativistic magnetron with diffraction output

	voltage/kV	magnetic field/T	radius of waveguide/mm	output power/MW	efficiency/%
Ref [22]	353	0.45	105.0	512	40.4
Ref [23]	440	0.43	105.0	1000	44.0
Ref [24]	355	0.36	105.0	1000	48.0
this work	352	0.34	77.5	567	62.5

减小, 磁场为 0.34 T 时效率最高为 62.5%, 这是因为磁场的增加会减小电子的运动速度, 围绕布里渊层流的空间电荷限制力增强, 从而导致电流的减小。

图 9 展示了相对论磁控管输出功率和效率与输出波导半径的关系。优化了输出波导半径, 在半径为 77.5 mm 条件下, 输出功率 567 MW, 器件效率 62.5%。图 10 展示了相对论磁控管输出功率和效率与倾斜角  $\beta$  的关系。在倾



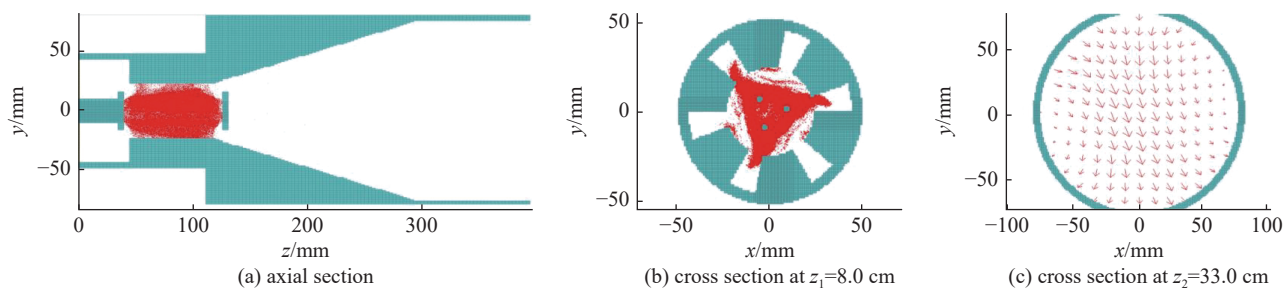


Fig. 7 Spatial distribution of electrons and electric field

图7 电子和电场的空间分布

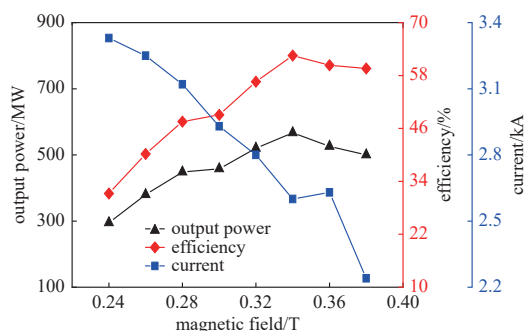


Fig. 8 Relationship between output parameters and magnetic field

图8 输出参数随磁场变化关系

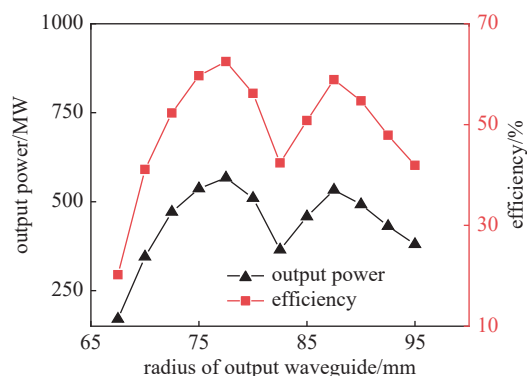


Fig. 9 Relationship between output parameters and radius of output waveguide

图9 输出参数随输出波导半径变化关系

斜角  $\beta$  为  $17^\circ$  的条件下, 相对论磁控管的输出功率和功率转换效率都会达到峰值, 此时输出功率 567 MW, 效率为 62.5%, 这是因为波导半径和倾斜角  $\beta$  会影响衍射输出结构的模式转换和传输性能<sup>[25]</sup>, 在某些波导半径和倾斜角下衍射结构会发生微波反射, 导致腔内出现模式竞争, 输出功率和功率转换效率也随之降低。

### 3 结论

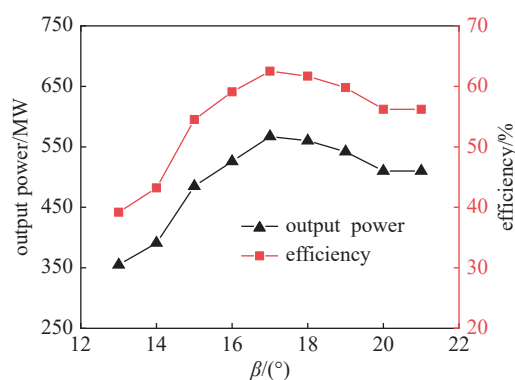
为了高功率微波器件的低磁场和小型化需求, 本文设计了工作在 S 波段的低磁场  $TE_{11}$  输出模式的紧凑型相对论磁控管, 并对器件进行设计及模拟优化。与传统衍射输出相对论磁控管相比, 在磁场为 0.34 T、电压为 352 kV 条件下, 模拟仿真结果显示输出功率为 567 MW, 功率转换效率为 62.5%, 工作频率为 2.37 GHz 时输出波导半径仅为 77.5 mm, 器件结构更为紧凑。该结果验证了衍射输出相对论磁控管低磁场和小型化的可行性, 并为进一步研究高效率、低磁场和小型化的相对论磁控管提供了一定的参考价值。

### 参考文献:

- [1] Benford J. History and future of the relativistic magnetron[C]//2010 International Conference on the Origins and Evolution of the Cavity Magnetron. 2010: 40-45.
- [2] Andreev D, Kuskov A, Schamiloglu E. Review of the relativistic magnetron[J]. *Matter and Radiation at Extremes*, 2019, 4: 067201.
- [3] 张兆铿. 磁控管的历史、现状与未来发展—兼论微波功率应用的前景[J]. *真空电子技术*, 2016(2): 38-41,46. (Zhang Zhaotang. The history, present status and future development of magnetrons-foreground of microwave power applications[J]. *Vacuum Electronics*, 2016(2): 38-41,46)
- [4] Cheng Renjie, Li Tianming, Qin Fen, et al. An efficient all cavity axial extraction relativistic magnetron with virtual cathode[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2020, 67(5): 2165-2169.
- [5] Xu Sha, Lei Lurong, Qin Fen, et al. Compact, high power and high efficiency relativistic magnetron with L-band all cavity axial extraction[J]. *Physics of Plasmas*, 2018, 25: 083301.

Fig. 10 Relationship between output parameters and tilt angle  $\beta$

图10 输出参数随倾斜角  $\beta$  变化关系



- [6] Fang Xianghe, Qin Fen, Zhang Yong, et al. S-band GW-level relativistic magnetron operating at relatively low applied voltage[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2022, 70(2): 1111-1118.
- [7] 孙晓亮, 张军, 李伟. X波段衍射输出相对论磁控管的粒子模拟研究[J]. *微波学报*, 2014, 30(s1): 422-425. (Sun Xiaoliang, Zhang Jun, Li Wei. Simulation study of an X-band relativistic magnetron with diffraction output[J]. *Journal of Microwaves*, 2014, 30(s1): 422-425)
- [8] 王冬, 秦奋, 杨郁林, 等. L波段全腔提取轴向输出相对论磁控管设计[J]. *强激光与粒子束*, 2016, 28: 033013. (Wang Dong, Qin Fen, Yang Yulin, et al. Design of L band all cavity axial extraction relativistic magnetron[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2016, 28: 033013)
- [9] Fuks M I, Kovalev N F, Andreev A D, et al. Mode conversion in a magnetron with axial extraction of radiation[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2006, 34(3): 620-626.
- [10] Li Wei, Liu Yonggui. An efficient mode conversion configuration in relativistic magnetron with axial diffraction output[J]. *Journal of Applied Physics*, 2009, 106: 053303.
- [11] Daimon M, Jiang W. Modified configuration of relativistic magnetron with diffraction output for efficiency improvement[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 91: 191503.
- [12] Fuks M I, Schamiloglu E. 70% efficient relativistic magnetron with axial extraction of radiation through a horn antenna[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2010, 38(6): 1302-1312.
- [13] Lei Lurong, Qin Fen, Xu Sha, et al. Preliminary experimental investigation of a compact high-efficiency relativistic magnetron with low guiding magnetic field[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2019, 47(1): 209-213.
- [14] 秦奋, 张勇, 鞠炳全, 等. L波段相对论磁控管长时间稳定运行实验研究[J]. *强激光与粒子束*, 2021, 33: 073002. (Qin Fen, Zhang Yong, Ju Bingquan, et al. Experimental investigation of L-band relativistic magnetron at long-term steady operation[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2021, 33: 073002)
- [15] Fuks M, Schamiloglu E. Rapid start of oscillations in a magnetron with a "transparent" cathode[J]. *Physical Review Letters*, 2005, 95: 205101.
- [16] Prasad S. Fast start of oscillations in a short-pulse relativistic magnetron driven by a transparent cathode[D]. New Mexico: The University of New Mexico, 2010.
- [17] 苏黎, 李天明, 李家胤. 相对论磁控管透明阴极的仿真与实验[J]. *强激光与粒子束*, 2011, 23: 3039-3042. (Su Li, Li Tianming, Li Jiayin. Simulation and experiment on transparent cathode for relativistic magnetron[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23: 3039-3042)
- [18] 周豪, 蔡伟鸿, 王姣银, 等. 相对论磁控管透明阴极技术作用机理研究[J]. *强激光与粒子束*, 2021, 33: 073007. (Zhou Hao, Cai Weihong, Wang Jiaoyin, et al. Research on mechanism of transparent cathode in relativistic magnetron[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2021, 33: 073007)
- [19] Saveliev Y M, Spark S N, Kerr B A, et al. Effect of cathode end caps and a cathode emissive surface on relativistic magnetron operation[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2000, 28(3): 478-484.
- [20] Gilgenbach R M, Lopez M R, Jones M C, et al. Effects of cathode endcaps on long-pulse, relativistic magnetron operation[C]//Twenty Seventh International Conference on Infrared and Millimeter Waves. 2002: 137-138.
- [21] 刘则阳, 李思锐, 樊玉伟, 等. 阴极帽结构L波段相对论磁控管的效率提升[J]. *强激光与粒子束*, 2021, 33: 073006. (Liu Zeyang, Li Sirui, Fan Yuwei, et al. Efficiency enhancement of L-band relativistic magnetron with endcaps[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2021, 33: 073006)
- [22] Leach C, Prasad S, Fuks M I, et al. Experimental demonstration of a high-efficiency relativistic magnetron with diffraction output with spherical cathode endcap[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2017, 45(2): 282-288.
- [23] Liu M, Schamiloglu E, Fuks M I, et al. A "crab-like" A6 relativistic magnetron with diffraction output driven by a transparent cathode[J]. *Physics of Plasmas*, 2019, 26: 013301.
- [24] Li Yong, Liu Meiqin, Liu Chunliang, et al. Mode control by rearrangement of the slow wave structure in a 12-cavity relativistic magnetron with diffraction output using single-stepped cavities driven by a transparent cathode[J]. *AIP Advances*, 2021, 11: 035306.
- [25] 李伟, 刘永贵. 磁控管衍射输出结构的 $\pi$ 模特性[J]. *强激光与粒子束*, 2011, 23: 735-738. (Li Wei, Liu Yonggui. Characteristic of  $\pi$  mode dispersion in diffraction output of magnetron[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23: 735-738)