



·高功率微波技术·

Ku 波段轴向输出同轴相对论磁控管仿真设计*

雷禄容, 王冬, 何琥, 徐莎, 秦奋, 刘振帮

(中国工程物理研究院应用电子学研究所, 先进激光与高功率微波全国重点实验室, 四川绵阳 621900)

摘要: 现阶段, 对相对论磁控管的研究还主要集中在频率较低的 L、S 等波段, 而对高频段相对论磁控管的研究却鲜有报道。为了拓展相对论磁控管的工作频段, 本文设计了一种 Ku 波段同轴相对论磁控管, 该管子采用内腔为 18 腔的同轴磁控管结构, 并采用同轴轴向输出技术, 在电压 180 kV、电流 1.4 kA、工作磁场 0.4 T 的条件下, 三维 PIC 仿真得到 108 MW 的仿真功率, 工作频率 14.613 GHz, 功率转换效率约 43%, 同轴输出波导输出口监测到的微波模式为 TE₀₁ 模。仿真结果表明该器转换效率高, 引导磁场低, 结构紧凑, 有利于系统的轻小型化。

关键词: 高功率微波; 同轴相对论磁控管; 轴向输出; Ku 波段; TE₀₁ 模

中图分类号: TN125

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202638.250331

Simulation investigation of Ku-band coaxial relativistic magnetron with axial output

Lei Lurong, Wang Dong, He Hu, Xu Sha, Qin Fen, Liu Zhenbang

(National Key Laboratory of Science and Technology on Advanced Laser and High Power Microwave,
Institute of Applied Electronics, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: [Background] With the development of pulse power technology and plasma physics, high-power microwave technology has developed rapidly, giving rise to various types of high-power microwave sources. Among them, the relativistic magnetron stands out as one of the most promising high-power microwave sources due to its high power conversion efficiency, compact structure, and tunable frequency. At present, the investigations of the relativistic magnetron mainly focus on microwave generation mechanisms, operation characteristics and radiation characteristics at relatively low frequency bands, such as L-band and S-band. The operating characteristics of the relativistic magnetron at higher frequencies are scarcely studied. [Purpose] A Ku-band coaxial relativistic magnetron (RM) is designed in this paper to broaden working frequency range of this type of high-power microwave (HPM) source, further expanding its application scope. [Methods] A coaxial magnetron structure with 18 inner cavities is applied in this tube. A particle-in-cell (PIC) simulation has been carried out with the coaxial-axial output. [Results] The high power microwave with power of 108 MW was detected at 14.613 GHz with a power conversion efficiency of about 43% when the applied voltage was 180 kV, the current was 1.4 kA, the inducing magnetic field was about 0.4 T, and the mode of output microwave in coaxial waveguide is TE₀₁ mode. [Conclusions] The simulation results show that the presented tube has a relative high conversion efficiency with low guiding magnetic field and more compact structure, which is convenient for decreasing the volume and weight of the system.

Key words: high power microwave, coaxial relativistic magnetron, axial output, Ku-band, TE₀₁ mode

20 世纪 70 年代, 随着脉冲功率技术^[1-2]和等离子体物理的发展^[3], 以及高功率微波在定向能武器、粒子加速、短脉冲雷达等领域的潜在应用^[4-6], 高功率微波技术迅速发展起来, 出现了多种不同类型的高功率微波源^[7-10]。其中, 相对论磁控管 (Relativistic Magnetron, RM) 因具有功率转换效率高、结构紧凑和频率可调谐等优点, 成为了最具有应用前景的高功率微波源之一^[11-12]。本世纪初随着透明阴极技术^[13]和一系列高效轴向提取技术^[14-16]等技术的提出和应用, 相对论磁控管的输出微波性能得到了大大地提高, 成为了轻小型化高功率微波源研究的热点^[17-21]。由

* 收稿日期: 2025-10-09; 修订日期: 2026-02-05

联系方式: 雷禄容, 445180846@qq.com。

通信作者: 刘振帮, liu9559@yeah.net。

于受物理机理、功率容量及模式竞争等问题的影响,目前相对论磁控管研究多集中于L、S或C等低频段,而高频段相对论磁控管(如X、Ku波段)的研究鲜有报道。本文模拟仿真了一支工作在Ku波段的轴向输出同轴相对论磁控管,模拟结果表明该器件转换效率较高,工作磁场较低,较易实现永磁包装,有利于系统的轻小型化和紧凑化,具有一定的应用价值。

1 器件结构设计

同轴相对论磁控管与普通相对论磁控管结构相似,同轴磁控管是在普通磁控管谐振腔(同轴磁控管中称为内腔)的外面增加了一个同轴谐振腔(称为同轴外腔),每隔一个内腔的侧壁上开有缝隙使得内腔、同轴外腔相互耦合。同轴相对论磁控管也是典型的正交场器件,主要由阴极、阳极、内腔(角向均匀分布在阳极上,阴、阳极之间的区域被称为相互作用空间)、同轴外腔及微波输出结构组成。其阴极表面沿径向发射的电子流在径向直流电场和轴向磁场的共同作用下沿角向作旋转漂移运动,漂移的电子束在内腔谐振腔内激励起高频振荡而产生电磁波。通常,内腔 π 模振荡的电磁波幅度最强,这一电磁波反过来对漂移的电子束进行调制而形成电子轮辐。当电子轮辐的漂移速度接近并稍大于 π 模振荡电磁波的相速度时在相互作用空间产生强烈的束波相互作用,电子束的势能转换成电磁波的能量而通过内腔与同轴外腔间的耦合孔耦合到同轴外腔内,再耦合到微波输出结构而产生高功率微波。根据理论^[22],同轴磁控管的工作波长与内腔横向尺寸共度,即

$$\frac{\lambda}{4} = R_v - R_a \quad (1)$$

式中: λ 为工作波长,对于Ku波段 λ 在2 cm左右; R_v 与 R_a 分别为内腔半径和阳极半径。对Ku波段的同轴相对论磁控管,从式(1)可知,其阳极尺寸较小,内腔径向深度较浅,为了保证慢波系统储能能量满足正常工作要求,本文采用增加阳极腔数量(18腔)来扩大阳极腔内的储能^[23]。

同轴磁控管的内腔设计可根据磁控管的设计原则^[24],通常用经验公式

$$\sigma = 0.85 - \frac{3.83}{N} \quad (2)$$

式中: σ 为磁控管结构的阴极半径 R_c 与阳极半径 R_a 之比, N 为磁控管的腔数。把 $N=18$ 代入式(2)可得 $\sigma \approx 0.637$,即

$$\frac{R_c}{R_a} = 0.637 \quad (3)$$

取阳极半径 R_a 为14 mm,可得阴极半径 R_c 约为9 mm。

通过以上分析和计算,初步确定同轴磁控管内腔结构的阳极半径 $R_a=14$ mm,阴极半径 $R_c=9$ mm,谐振腔腔数 $N=18$,取谐振腔张角 $\theta=10^\circ$,谐振腔半径 $R_v=17.9$ mm,由文献[25]可以计算得到慢波结构色散曲线如图1所示,横向坐标为模式数,纵向坐标为频率。从图1看出,其 π 模频率约为14.83 GHz,其与相邻模式的频率几乎没有间隔,这就需要优化内腔尺寸来尽量避免产生模式竞争。

本文中同轴磁控管的同轴外腔工作模式为 TE_{01} 模,可以根据内腔的半径 R_v 大致确定同轴外腔的内腔 R_i ,本文 R_i 取19 mm,由文献[26]可得出同轴腔中 TE_{01} 模的本征方程为

$$J'_n(TR_i)N'_n(TR_o) - J'_n(TR_o)N'_n(TR_i) = 0 \quad (4)$$

式中: T 为同轴外腔内 TE_{01} 模的横向角波数; R_o 为同轴外腔的外径。拟取工作频率为14.5 GHz,可以计算得到工作频率下同轴腔的横向截止角波数 $T_c=303.687$,把 $T=T_c$ 和 R_i 的值代入式(4)并求解该式可以得到同轴外腔内存在 TE_{01} 模时同轴腔的外径 R_o 的最小值为27.2 mm,本文取 $R_o=32$ mm。

现有文献中的大功率同轴磁控管一般采取径向矩形波导输出方式^[27-29],在这种输出方式下,一方面对于输出微波达到约百MW时,由于功率容量问题会导致矩形波导内打火而使得输出微波功率下降、输出微波脉宽缩短;另一方面径向输出波导极易破坏器件阳极角向对称性,而使得器件转换效率降低,而且输出波导需要从径向引出,进而增加了励磁系统的设计难度,会造成系统的体积和重量较大,不利于系统的轻量化、小型化及紧凑性设计。因

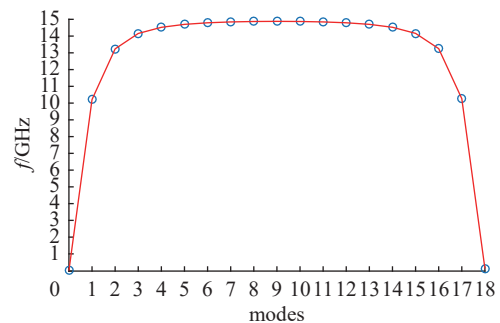


Fig. 1 Dispersion curve for Ku-band coaxial relativistic magnetron

图1 Ku波段同轴相对论磁控管内腔色散曲线

此, 本文设计的 Ku 波段同轴相对论磁控管采用轴向输出的技术路线, 即将同轴外腔内的 TE_{01} 模式沿着纵向提取到下游。最终所设计器件结构如图 2 所示, 主要结构参数如表 1 所示。

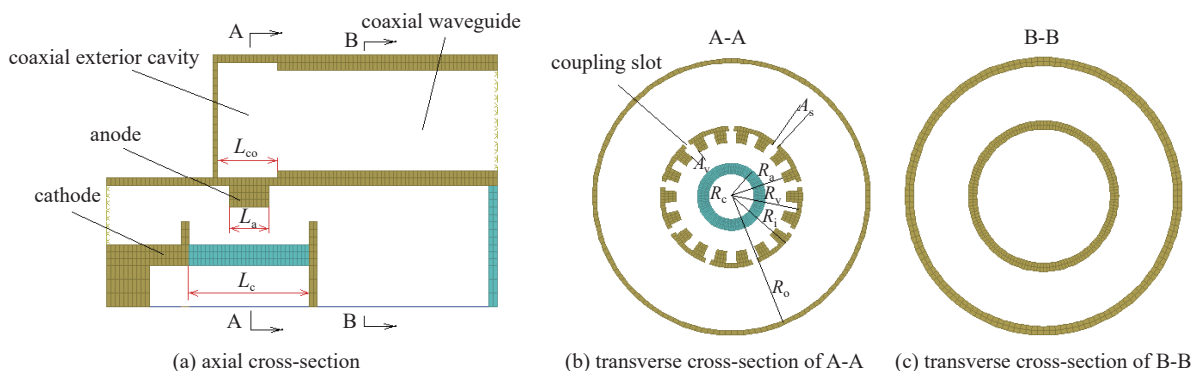


Fig. 2 Schematic of Ku-band coaxial relativistic magnetron

图 2 Ku 波段同轴相对论磁控管结构示意图

表 1 ku 波段相对论磁控管主要结构参数

Table 1 Brief dimension parameters of Ku-band coaxial RM

R_c/mm	R_a/mm	R_v/mm	R_r/mm	R_o/mm	L_c/mm	L_a/mm	L_{co}/mm	$A_v/(\circ)$	$A_s/(\circ)$
9	14	17.9	19	32	30	10	15	10	5

2 电子束工作磁场及工作电压

在平衡状态下, 做轮辐运动的电子刚好擦过阳极表面而不打在阳极上的条件, 称为 Hull 条件^[30], 即

$$\frac{eU}{m_e c^2} = \sqrt{\left(\frac{eB(R_a^2 - R_c^2)}{2mcR_a}\right)^2 + 1} - 1 \quad (5)$$

式中: e 和 m 分别为电子的电荷与静止质量; c 为真空中的光速; U 和 B 分别为工作电压与外加轴向磁场。

在静态坐标系下, 电子轮辐在互作用空间的旋转与高频场的相速同步, 确保电子与高频场的换能保持长时间进行的条件, 称为 Buneman-Hartree 条件或起振条件。由文献 [30] 得到 Buneman-Hartree 条件, 即

$$\frac{eU}{mc^2} = \frac{eB\omega_n(R_a^2 - R_c^2)}{2mc^2 n} - 1 + \sqrt{1 - \left(\frac{R_a\omega_n}{cn}\right)^2} \quad (6)$$

式中: ω_n 为谐振模式角频率; n 为谐振模式号数。对于工作于 14.5 GHz、内腔谐振于 π 模、内腔数为 18 腔的同轴磁控管, 其 $n=9$, $\omega_n=91.1$ GHz。

根据前面初步选定器件阴极、阳极半径、Buneman-Hartree 谐振条件 (简称 B-H 条件) 及 Hull 条件, 计算得到的器件工作曲线如图 3 所示, 当工作电压高于 Hull 曲线时, 电子直接打上阳极, 虽然有阳极电流, 但没有电子与场的能量交换, 这时同轴 RM 工作在传导区。当工作电压低于 B-H 曲线时, 电子的能量不能使电子达到与场同步所要求的角向速度, 电子与场也不能进行换能, 这时同轴 RM 工作在截止区。据此选择器件工作电压 170~200 kV, 工作磁场 0.4 T。

3 粒子模拟

利用粒子模拟软件对器件进行了仿真研究, 设置工作磁场为 0.4 T, 工作电压为 180 kV, 其上升沿约为 30 ns。仿真时间 140 ns, 模拟中发现内、外腔之间的耦合孔张角及轴向长度影响着模式纯度, 通过优化该耦合孔张角和轴向长度可以抑制非工作模式的起振, 当耦合孔的张角 A_s 为 5° 、轴向长度为 8 mm 时, 输出微波频谱纯净、没有模式竞争。优化结构参数得到器件互作用区横向电子空间分布如图 4(a) 所示。可见此时电子已经形成 9 个稳定的轮

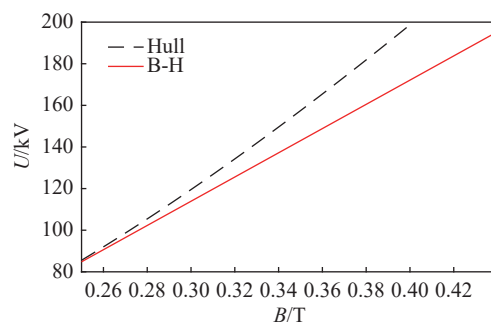


Fig. 3 B-H condition curve and Hull cutoff curve for Ku-band coaxial relativistic magnetron

图 3 Ku 波段同轴相对论磁控管工作曲线

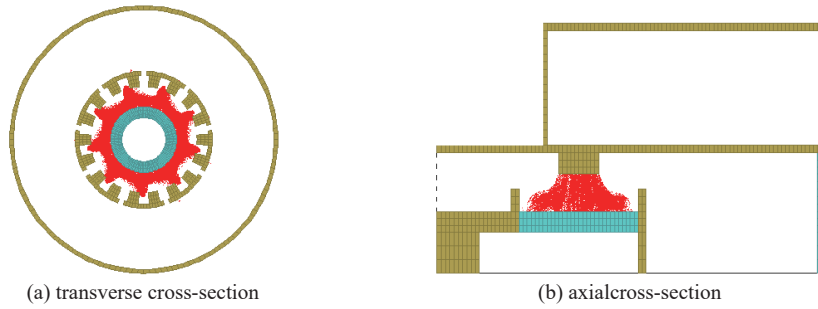


Fig. 4 Electron distribution at 20 ns

图 4 20 ns 时电子空间分布图

辐, 电子与 π 模换能充分。电子纵向分布如图 4(b) 所示, 可见电子在轴向运动区域被限制在阴极两个端帽之间, 几乎没有电子逃逸出相互作用区域, 这样就有较多的电子参与束波相互作用, 可以保证较高的束波相互作用效率。

三维仿真中采用的电压波形和阴极爆炸发射得到的电流波形分别如图 5 所示, 从图 5 可见器件稳态电流为 1.4 kA。

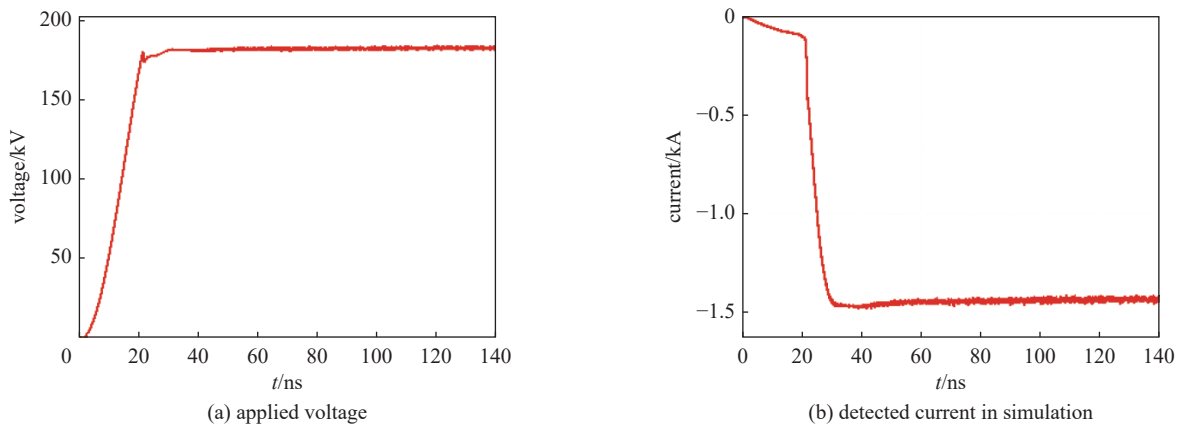


Fig. 5 Applied voltage and cathode current

图 5 电子束电压电流参数

经过优化器件结构参数, 得到典型工作状态下器件输出口的微波功率瞬时、平均波形及输出微波的频谱如图 6 和图 7 所示。从图 6 和图 7 可以看出, 器件稳定输出微波功率为 108 MW, 效率约为 43%, 中心频率为 14.613 GHz, 器件工作频谱纯净, 无竞争模式出现。仿真得到的中心频率稍微低于图 1 所示色散曲线中 π 模的频率, 这可能是由于理论计算色散曲线时没有考虑内腔与同轴外腔之间开有的耦合缝隙导致的。

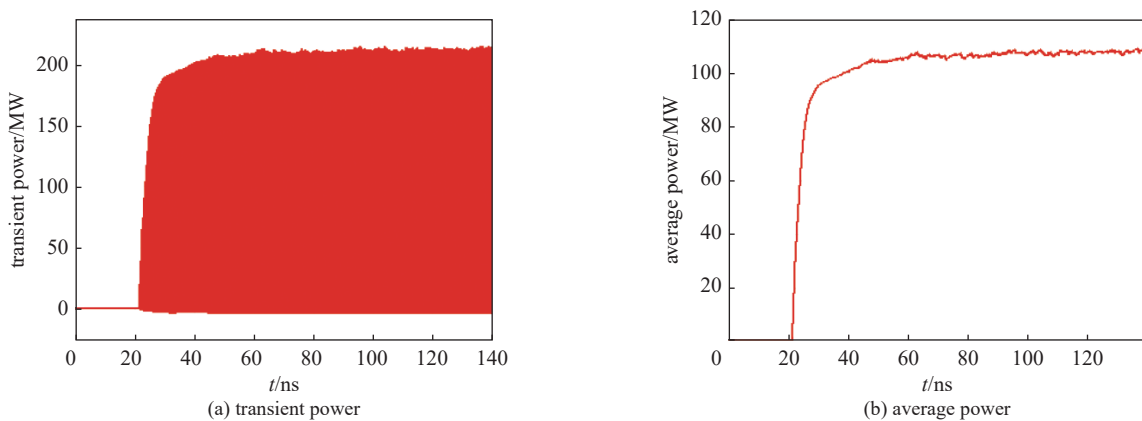


Fig. 6 Output power in simulation

图 6 仿真功率波形

图 8 为饱和后器件内部电场分布, 可见器件内部电场最大值出现在两个阴极端帽表面和腔内位置, 约为 600 kV/cm, 小于 Ku 波段频率为 14.613 GHz 时的真空射频击穿阈值 984 kV/cm, 表明工作时器件内不会出现射频击穿情况。

图 9 为该管子高频腔内和同轴波导输出口横截面上的场分布, 可以看出内腔内的工作模式为 π 模, 而同轴外

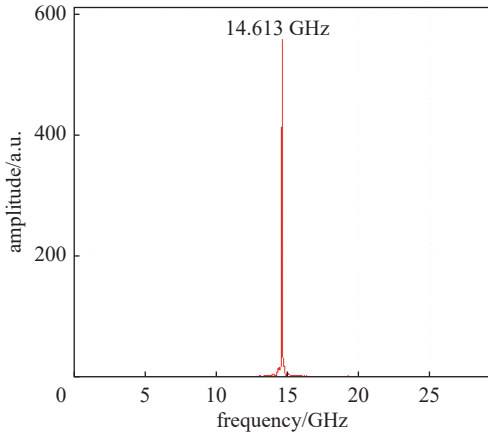


Fig. 7 Frequency spectrum of output microwave

图 7 输出微波频谱

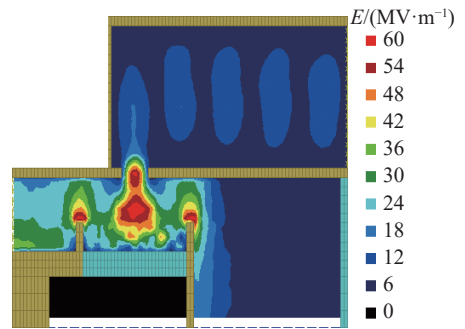


Fig. 8 Electric field distribution in Ku-band coaxial RM

图 8 器件内部电场分布

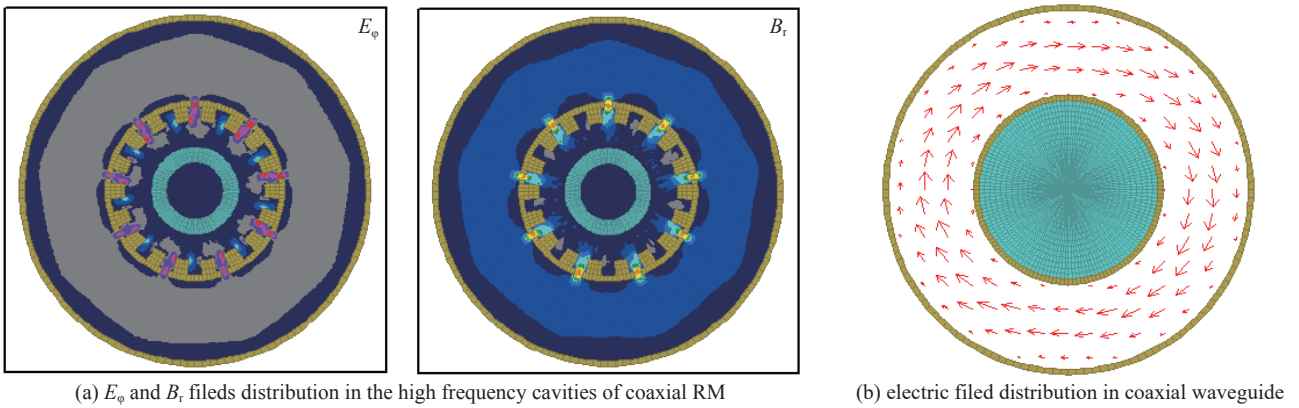


Fig. 9 Filed distribution of the transverse section in coaxial RM

图 9 同轴磁控管高频腔内及同轴波导内的场分布

腔内的工作模式为 TE_{01} 模, 输出到同轴波导内的微波模式为 TE_{01} 模。

此外, 在保持模式纯度的基础上, 取磁场强度为 0.4 T 时, 得到电压工作区间及相应的功率转换效率如图 10 所示。保持电压为 180 kV 时, 得到磁场的工作区间及相应的功率转换效率如图 11 所示。

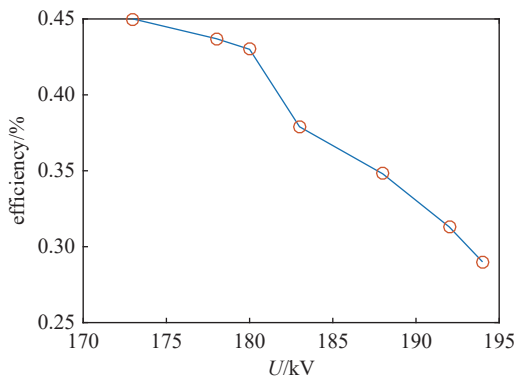


Fig. 10 Output power conversion efficiency with different voltages when the magnetic field is 0.4 T

图 10 0.4 T 磁场下不同电压的输出功率转换效率

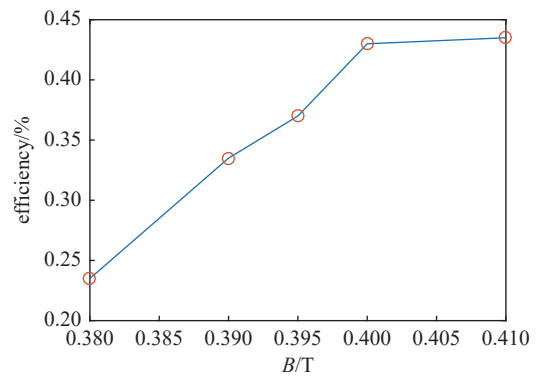


Fig. 11 Output power conversion efficiency with different magnetic field when the voltage is 180 kV

图 11 180 kV 电压下不同磁场的输出功率转换效率

从图 10 和图 11 可以看出, 在磁场强度为 0.4 T 时, 工作电压的范围为 173~194 kV; 在电压 180 kV 时, 引导磁场的工作范围为 0.38~0.41 T。

4 结 论

本文设计并仿真研究了 Ku 波段同轴相对论磁控管, 首先通过理论和经验公式计算并选取了其内腔和同轴外

腔的结构参数,得到了内腔的色散曲线、模式分布、 π 模工作频率、器件工作区的电压参数和磁场参数。采用粒子模拟软件对其进行了粒子模拟仿真分析,仿真结果表明:该器件能够在 180 kV、0.4 T 的条件下得到 108 MW 的 Ku 波段高功率微波输出,功率转换效率 43%,输出微波频率 14.613 GHz。模拟结果表明该器件转换效率较高,工作磁场较低,且采用轴向输出,较易实现永磁包装,有利于系统的轻量化和紧凑化,具有一定的应用价值。

参考文献:

- [1] Bluhm H. 脉冲功率系统的原理与应用[M]. 江伟华,张弛,译.北京:清华大学出版社,2008.(Bluhm H. Pulsed power systems: principles and applications[M]. Jiang Weihua, Zhang Chi, trans. Beijing: Tsinghua University Press, 2008)
- [2] 刘锡三. 高功率脉冲技术[M]. 北京:国防工业出版社,2005.(Liu Xisan. High pulsed power technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005)
- [3] 徐家鸾,金尚宪. 等离子体物理学[M]. 北京:原子能出版社,1981.(Xu Jialuan, Jin Shangxian. The physics of plasma[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1981)
- [4] 禹化龙,伍尚慧. 美军定向能武器反无人机技术进展[J]. 国防科技, 2019, 40(6): 42-47.(Yu Hualong, Wu Shanghui. Progress and development trend analysis on US directed energy weapons against unmanned aerial vehicles[J]. National Defense Technology, 2019, 40(6): 42-47)
- [5] 张邦楚,廖剑,匡宇,等. 美国无人机集群作战的研究现状与发展趋势[J]. 航空兵器, 2020, 27(6): 7-12.(Zhang Bangchu, Liao Jian, Kuang Yu, et al. Research status and development trend of the United States UAV swarm battlefield[J]. Aero Weaponry, 2020, 27(6): 7-12)
- [6] 冯奇,傅镇波. 高功率微波武器典型场景应用分析[J]. 中国电子科学研究院学报, 2021, 16(9): 916-920.(Feng Qi, Fu Zhenbo. Application analysis of HPM weapon in typical scenarios[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2021, 16(9): 916-920)
- [7] 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.
- [8] Liu Zhenbang, Huang Hua, Lei Lurong, et al. Investigation of an X-band gigawatt long pulse multi-beam relativistic klystron amplifier[J]. Physics of Plasmas, 2015, 22: 093105.
- [9] Wu Yang. Suppression of high order mode oscillation in a C-band long pulse high efficiency relativistic backward wave oscillator[J]. Physics of Plasmas, 2023, 30: 093303.
- [10] Qin Fen, Wang Dong, Xu Sha, et al. A magnetically insulated transmission line oscillator with metal array cathode[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2016, 44(5): 738-742.
- [11] Benford J. History and future of the relativistic magnetron[C]//International Conference on the Origins and Evolution of the Cavity Magnetron. 2010: 40-45.
- [12] Andreev D, Kuskov A, Schamiloglu E. Review of the relativistic magnetron[J]. Matter and Radiation at Extremes, 2019, 4: 067201.
- [13] Fuks M, Schamiloglu E. Rapid start of oscillations in a magnetron with a "transparent" cathode[J]. Physical Review Letters, 2005, 95: 205101.
- [14] Daimon M, Jiang W. Modified configuration of relativistic magnetron with diffraction output for efficiency improvement[J]. Applied Physics Letters, 2007, 91: 191503.
- [15] 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.
- [16] Hoff B W, Greenwood A D, Mardahl P J, et al. All cavity-magnetron axial extraction technique[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2012, 40(11): 3046-3051.
- [17] Liu Meiqin, Fuks M I, Schamiloglu E, et al. Operation characteristics of A6 relativistic magnetron using single-stepped cavities with axial extraction[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2014, 42(10): 3344-3348.
- [18] 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.
- [19] Qin Fen, Xu Sha, Lei Lurong, et al. A compact relativistic magnetron with lower output mode[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2019, 66(4): 1960-1964.
- [20] Qin Fen, Zhang Yong, Xu Sha, et al. A frequency-agile relativistic magnetron with axial tuning[J]. IEEE Electron Device Letters, 2020, 41(5): 781-783.
- [21] Qin Fen, Xu Sha, Zhang Yong, et al. A cross-band tunable relativistic magnetron with all cavity axial extraction[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2023, 70(3): 1283-1287.
- [22] 周传明,刘国治,刘永贵,等. 高功率微波源[M]. 北京:原子能出版社,2007: 254.(Zhou Chuanming, Liu Guozhi, Liu Yonggui, et al. High power microwave source[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 2007: 254)
- [23] Vintzenko I. Relativistic magnetrons[M]. Boca Raton: CRC Press, 2019: 55.
- [24] 电子管设计手册编辑委员会. 磁控管设计手册[M]. 北京:国防工业出版社,1979.(Electronic Tube Design Handbook Editorial Committee. Magnetron design handbook[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1979)
- [25] Fan Yuwei, Liu Jing, Zhong Huihuang, et al. Theoretical investigation of the fundamental mode frequency of A6 magnetron[J]. Journal of Applied Physics, 2009, 105: 083310.
- [26] 张克潜,李德杰. 微波与光电子学中的电磁理论[M]. 2版. 北京:电子工业出版社,2001.(Zhang Keqian, Li Dejie. Electromagnetic theory for microwave

- and optoelectronics[M]. 2nd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2001)
- [27] 裘家琪, 陈怀璧, 唐传祥. 衰减瓷对同轴磁控管起振过程的影响[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(12): 2889-2892. (Qiu Jiaqi, Chen Huaibi, Tang Chuanxiang. Effect of attenuator on oscillating process of coaxial magnetrons[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(12): 2889-2892)
- [28] 张洁熹, 李泉凤, 韩运生, 等. 同轴磁控管永磁磁路的模拟及实验[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2008, 48(8): 1248-1251. (Zhang Jiexi, Li Quanfeng, Han Yunsheng, et al. Permanent magnetic circuits in a coaxial magnetron of medical linear accelerators[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2008, 48(8): 1248-1251)
- [29] 郎建东, 谢磊, 秦向荣, 等. 用于小型加速器的高频同轴磁控管研究进展[C]//中国电子学会真空电子学分会第二十一届学术年会论文集. 2018. (Lang Jiandong, Xie Lei, Qin Xiangrong, et al. Research progress on High frequency coaxial magnetron for compact accelerators[C]//Proceedings of the 21st Academic Annual Conference of the Vacuum Electronics Branch of the Chinese Institute of Electronics. 2018)
- [30] Palevsky A, Bekefi G, Drobot A T, et al. High power relativistic magnetrons: experiments and simulation[C]//3rd International Topical Conference on High-Power Electron and Ion Beam Research & Technology. 1979: 759-768.