

## 轴向输出 $TE_{10}$ 模式的紧凑型相对论磁控管的粒子模拟\*

史迪夫, 钱宝良, 王弘刚, 李伟

(国防科技大学 光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:** 研究了一种轴向输出  $TE_{10}$  模式的紧凑型相对论磁控管, 该器件采用 6 谐振腔结构并工作在  $\pi$  模式下, 通过 4 腔轴向输出的结构设计使得谐振腔结构与矩形输出波导之间形成了较好的过渡, 实现了矩形  $TE_{10}$  模式的微波输出。与衍射输出相对论磁控管相比, 这种结构设计不仅能减小磁控管的轴向和径向的尺寸, 使得系统更加紧凑化, 而且能在输出波导中获得更加纯净的低阶微波模式。利用粒子模拟软件, 初步分析和优化了器件的工作性能。模拟结果表明: 当电压为 500kV, 磁场为 0.5T 时, 该器件的工作频率为 2.58GHz, 输出功率为 1.0GW, 功率转换效率达到 25.0%。

**关键词:** 相对论磁控管; 轴向输出;  $TE_{10}$  模式; 紧凑型

中图分类号: TN128 文献标志码: A 文章编号: 1001-2486(2015)02-032-04

## Simulation study on compact relativistic magnetron with $TE_{10}$ mode axial output

SHI Difu, QIAN Baoliang, WANG Honggang, LI Wei

(College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** A compact relativistic magnetron with axial output for  $TE_{10}$  mode was investigated. This magnetron with 6 resonant cavities operates at  $\pi$ -mode and can well transit between resonant cavities and rectangular output waveguide through the structure design of 4 cavities axial output, which realizes the microwave output of rectangular  $TE_{10}$  mode. Compared with the magnetron with diffraction output (MDO), this design not only makes both the diameter and the axial length of the magnetron minimized so that the whole system can be more compact, but also provides a much purer output mode of a low order in the output waveguide. The operating performance of the magnetron has been analyzed and optimized by using particle-in-cell simulation software. Simulation results show that the power conversion efficiency can reach to 25.0%, corresponding to the output power of 1.0GW and the working frequency of 2.58GHz, under the condition of the applied voltage of 500kV and the applied magnetic field of 0.5T.

**Key words:** relativistic magnetron; axial output;  $TE_{10}$  mode; compactness

Benford 从研制实用型的高功率微波系统角度出发, 指出了未来高功率微波源的四个发展方向<sup>[1]</sup>: 全面减小系统尺寸和重量, 提高功耗比; 高重复频率工作; 频率可调谐; 长寿命。为了满足未来高功率微波源的发展应用需求, 具有结构简单、效率高、频率可调、适合长脉冲和高重复频率运行等特点的相对论磁控管成了人们广泛和深入研究的对象之一<sup>[2]</sup>。相比径向输出相对论磁控管而言, 结构更加紧凑的轴向输出相对论磁控管在全面减小系统尺寸和重量方面具有更大的优势, 因而成为近期研究的一大热点。

2011 年, 国防科技大学李伟博士等针对轴向输出相对论磁控管相互作用区中的电子束长距离轴向漂移的问题, 提出了一种改进型外加磁场结构,

不仅提高了功率转换效率, 而且减小了轴向输出结构的轴向尺寸<sup>[3]</sup>; 2012 年, 他们以实验验证了该外加磁场结构的作用<sup>[4]</sup>。2012 年, 美国新墨西哥大学 Leach 博士等通过在磁控管的轴向输出端口直接连接一个与磁控管半径尺寸相同的输出圆波导, 研究了磁控管中不同数目的输出腔对输出特性的影响; 粒子模拟表明该新型轴向输出结构使得整个系统结构在轴向上和径向上更加紧凑化和小型化, 从而使得轴向电子束漂移距离更短, 外加磁场系统更紧凑, 输出模式  $TE_{11}$  更纯净; 结构未经优化的该磁控管工作频率为 2.44GHz, 输出功率为 520MW, 功率转换效率在 14% 左右<sup>[5]</sup>。2012 年, 美国新墨西哥州空军研究实验室 Hoff 等提出一种全腔提取结构的相对论磁控管, 提取结

\* 收稿日期: 2015-03-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51377164)

作者简介: 史迪夫(1987—), 男, 重庆北碚人, 博士研究生, E-mail: shidifu19@aliyun.com;

钱宝良(通信作者), 男, 教授, 博士, 博士生导师, E-mail: blqian@163.com

构采用径向耦合孔与扇形波导耦合输出,使结构更加紧凑<sup>[6]</sup>。2014年,中国北京应用物理与计算数学研究所杨郁林等在此基础上结合透明阴极技术,研究了一种全腔提取结构透明阴极相对论磁控管,该磁控管在1.375GHz的工作频率下,获得了TEM模式2.98GW的功率输出,效率达到54%<sup>[7]</sup>。

目前,国际上对轴向输出相对论磁控管的研究工作虽然在实现不同输出模式、提高功率转换效率、减小系统尺寸和重量以及提高输出模式纯度等方面取得了较大进展,但关于同时能使输出模式更纯净、整个系统更紧凑且功率转换效率较高的轴向输出相对论磁控管的报道较为少见。为此,本文研究了一种轴向输出 TE<sub>10</sub>模式的紧凑型相对论磁控管。

## 1 计算模型

利用三维粒子模拟软件CHIPIC<sup>[8]</sup>在柱坐标下对轴向输出 TE<sub>10</sub>模式的紧凑型相对论磁控管建立计算模型,如图1所示。本模型采用了典型的6谐振腔结构<sup>[9]</sup>。为了提高功率转换效率和减小起振时间,在阳极内表面采用了凹槽与突起结构<sup>[10-11]</sup>。

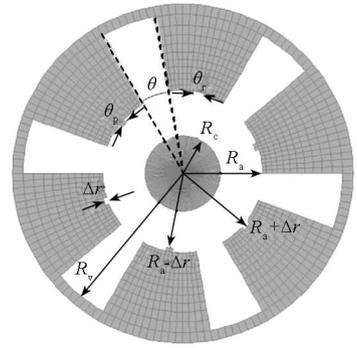
如图1(a)所示,磁控管的谐振腔结构主要由6个扇形阳极和1个圆柱形实心阴极构成。其中,阴极半径  $R_c = 10.0\text{mm}$ , 阳极半径  $R_a = 21.0\text{mm}$ , 谐振腔半径  $R_v = 41.1\text{mm}$ , 谐振腔张角  $\theta = 20^\circ$ 。阳极内表面上的凹槽与突起结构的径向深度均为  $\Delta r = 1.0\text{mm}$ , 角向宽度  $\theta_r$  和  $\theta_p$  均为  $5^\circ$ , 其轴向长度与阳极的轴向长度均为  $H = 72.0\text{mm}$ 。

如图1(b)和图1(c)所示,在磁控管的6个谐振腔中选取2个角向相对的谐振腔,命名为非输出腔,其余4个谐振腔命名为输出腔。2个非输出腔均轴向连接到一个张角为  $20^\circ$ , 轴向长度  $H_t = 30.0\text{mm}$  的扇形波导上。4个输出腔以角向旋转的方式轴向过渡到同一个矩形波导上。磁控管中的相互作用区以径向渐变的方式也轴向过渡到该矩形波导上。该矩形波导与磁控管谐振腔之间的轴向距离  $H_s = 100.0\text{mm}$ , 其横截面的长度和宽度分别为  $L = 82.2\text{mm}$  和  $W = 24.0\text{mm}$ 。

计算模型中,磁控管左端的同轴结构为电功率的输入端,右端的矩形波导结构为微波的输出端。阴极采用爆炸电子发射,外加电压设置为  $500\text{kV}$ , 外加磁场在相互作用区的大小设置为  $0.5\text{T}$ 。

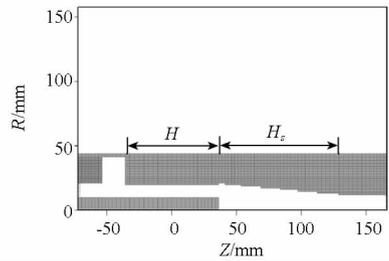
## 2 模拟结果

根据以上建立的计算模型,利用三维粒子模拟



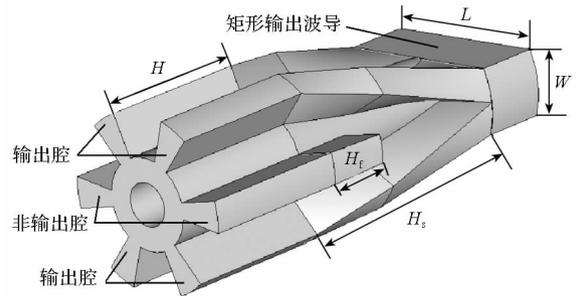
(a) A6磁控管横截面

(a) Horizontal cross section of the A6 magnetron



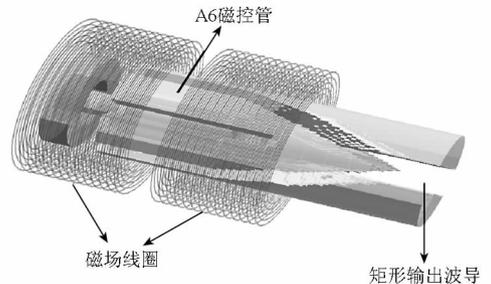
(b) 紧凑型磁控管纵剖面

(b) Vertical section of the compact magnetron



(c) 紧凑型磁控管内部的真空立体图

(c) 3D view of the inner space of the compact magnetron



(d) 紧凑型磁控管的立体图

(d) 3D view of the compact magnetron

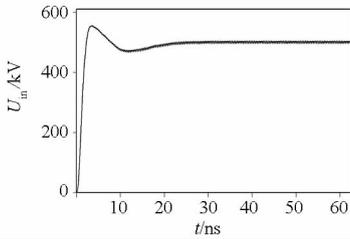
图1 紧凑型磁控管结构

Fig. 1 Structure of the compact magnetron

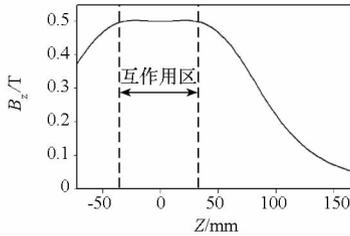
软件CHIPIC对轴向输出 TE<sub>10</sub>模式的紧凑型相对论磁控管进行了模拟计算,其模拟结果如图2所示。

图2(a)表明加在磁控管阴阳极之间的输入电压在经过5ns后达到500kV。图2(b)表明加在磁控管相互作用区的轴向磁场为0.5T。图2(c)给出了32ns时在磁控管Rθ横截面上电子轮辐的

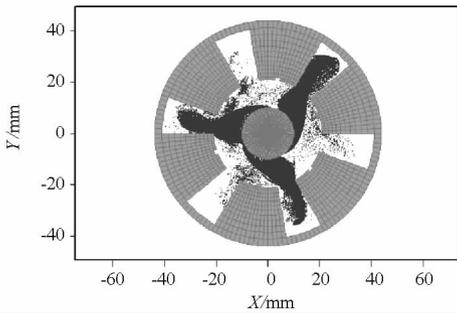
运动状态,表明该磁控管工作在  $\pi$  模式上,该模式的电场分布为输出端的矩形波导输出  $TE_{10}$  模式微波提供了有利条件。图 2(d) 给出了 32ns 时



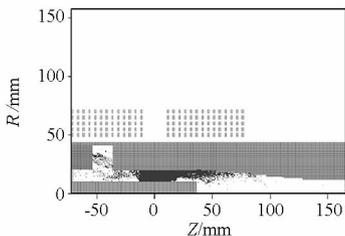
(a) 外加输入电压  
(a) Applied input voltage versus time



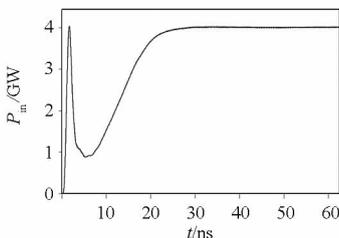
(b) 外加轴向磁场  
(b) Applied axial magnetic field



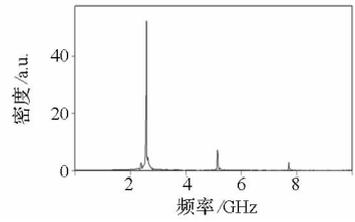
(c)  $R\theta$  横截面上电子束分布  
(c) Electron beam distribution in the  $R\theta$  cross section of the magnetron



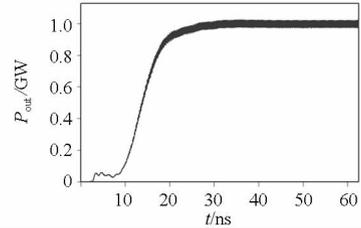
(d)  $RZ$  纵剖面上电子束分布  
(d) Electron beam distribution in the  $RZ$  vertical section of the magnetron



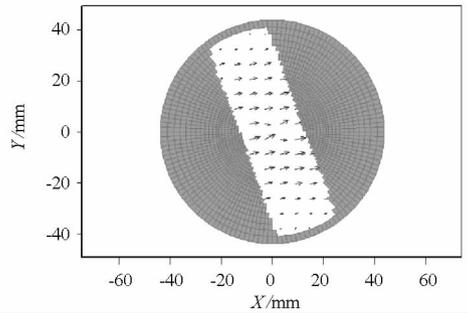
(e) 输入功率  
(e) Input power versus time



(f) 工作频率  
(f) Working frequency



(g) 输出功率  
(g) Output power versus time



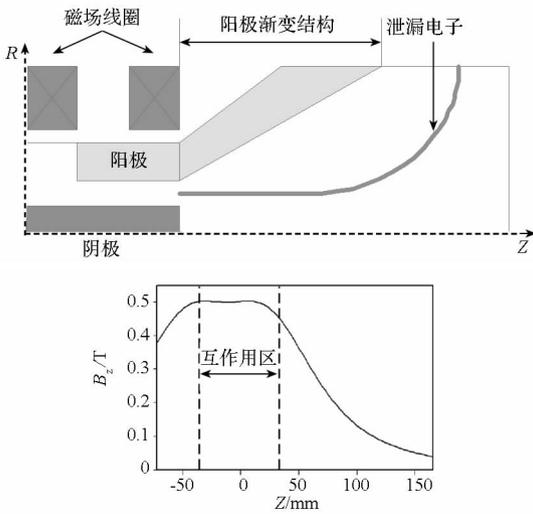
(h) 输出模式  
(h) Radiated mode of output port

图 2 模拟结果

Fig. 2 Simulation results

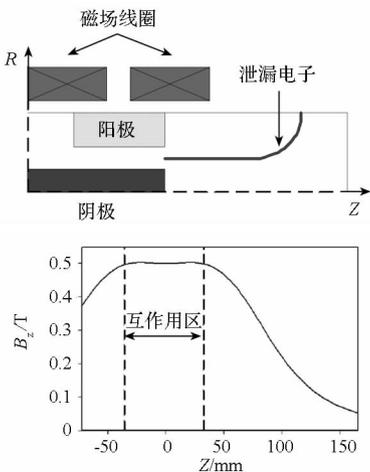
在磁控管  $RZ$  纵剖面上电子束的运动状态,表明从相互作用区泄漏的大多数电子在轴向漂移到矩形输出波导之前能够尽快打在过渡结构上,从而减小了泄漏电子对输出微波能量的吸收概率。图 2(e) 表明磁控管输入的电功率为 4.01GW。图 2(f) 表明磁控管的工作频率为 2.58GHz,且频谱单一性较好。图 2(g) 表明矩形输出波导口面的微波功率在经过 25ns 后达到饱和,为 1.0GW,相应的功率转换效率达到 25.0%。这里的微波起振时间较长,主要是因为磁控管的 6 个谐振腔工作在  $\pi$  模式时电场分布具有 3 个角向对称周期,而矩形输出波导在提取微波时提取了其中 4 个谐振腔中的微波,这 4 个输出腔的电场分布只具有 1 个角向对称周期,这种不一致性导致了微波起振时间的增加。图 2(h) 表明矩形波导输出的模式为矩形  $TE_{10}$  模式。由于矩形波导横截面尺寸的限制,工作频率为 2.58GHz 的微波能在这个矩形波导中传播的只有  $TE_{10}$  模式,因此输出的微波模式纯净单一。

与衍射输出相对论磁控管 (Magnetron with Diffraction Output, MDO) 相比,如图 3 所示,由于采用了与磁控管谐振腔径向尺寸相近的轴向输出结构,而不是 MDO 中径向尺寸较大的阳极渐变输出结构,因而所研究的紧凑型磁控管能够有效减小输出结构的径向尺寸和轴向尺寸,这不仅减小了外加磁场线圈的体积和重量,使得整个系统更加紧凑化和小型化,而且便于外加磁场线圈环绕在磁控管的外围圆周空间区域,使得相互作用区中轴向磁场的分布更加均匀,电子束与微波的相互作用更加充分,另外还减小了泄漏电子的漂移距离,从而减小了泄漏电子对输出微波能量的吸收概率,提高了功率转换效率。



(a) MDO 及其轴向磁场分布的示意图

(a) Schematic diagram of the MDO and its axial magnetic field distribution



(b) 紧凑型磁控管及其轴向磁场分布的示意图

(b) Schematic diagram of the compact magnetron and its axial magnetic field distribution

图 3 MDO 与紧凑型磁控管的比较

Fig. 3 Comparison between the MDO and the compact magnetron

### 3 结论

本文研究的轴向输出 TE<sub>10</sub>模式的紧凑型相对论磁控管与衍射输出相对论磁控管相比,其结构设计不仅能减小磁控管的轴向和径向的尺寸,使得系统更加紧凑化,而且能在输出波导中获得更加纯净的低阶微波模式。利用粒子模拟软件,初步分析和优化了器件的工作性能。模拟结果表明:当电压为 500kV,磁场为 0.5T 时,该器件的工作频率为 2.58GHz,输出功率为 1.0GW,功率转换效率达到 25.0%。这一结果为结构更加紧凑、模式更加纯净、效率更高的轴向输出相对论磁控管的进一步研究提供了参考。

### 参考文献 (References)

- [1] Benford J. Making HPM practical [C]//IEEE International Conference Record-Abstract, Plasma Science, 1995: 241.
- [2] Benford J, Swegle J A, Schamiloglu E. High-power microwaves [M]. 2nd ed. Norwood, Massachusetts: Artech House, 2006: 259 - 320.
- [3] Li W, Liu Y G. Modified magnetic field distribution in relativistic magnetron with diffraction output for compact operation [J]. Physics of Plasmas, 2011, 18(2): 023103 - 1 - 023103 - 4.
- [4] Li W, Liu Y G, Shu T, et al. Experimental demonstration of a compact high efficient relativistic magnetron with directly axial radiation [J]. Physics of Plasmas, 2012, 19(1): 013105 - 1 - 013105 - 4.
- [5] Leach C, Prasad S, Fuks M I, et al. Compact relativistic magnetron with Gaussian radiation pattern [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2012, 40(11): 3116 - 3120.
- [6] 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.
- [7] 杨郁林, 董志伟, 王冬. 相对论全腔提取磁场管理理论分析与数值模拟 [J]. 微波学报, 2014, 30: 402 - 404. YANG Yulin, DONG Zhiwei, WANG Dong. A study on the transparent cathode in the relativistic all cavity magnetron [J]. Journal of Microwaves, 2014, 30: 402 - 404. (in Chinese)
- [8] Zhou J, Liu D, Liao C, et al. CHIPIC: an efficient code for electromagnetic PIC modeling and simulation [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2009, 37(10): 2002 - 2011.
- [9] Palevsky A, Bekefi G. Microwave emission from pulsed, relativistic e-beam diodes II: the multiresonator magnetron [J]. Physics of Fluids, 1979, 22(5): 986 - 996.
- [10] Kim J I, Won J H, Park G S. Electron prebunching in microwave magnetron by electric priming using anode shape modification [J]. Applied Physics Letters, 2005, 86(17): 171501 - 1 - 171501 - 3.
- [11] Shivendra M, Singh V V P, Jain P K. Three-dimensional particle-in-cell simulation of fast oscillation startup and efficiency improvement in a relativistic magnetron with electric priming [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2012, 40(10): 2686 - 2692.