

新型全腔输出半透明阴极相对论磁控管的理论和数值研究

杨温渊 董烨 董志伟

Theoretical and numerical investigations of the novel relativistic magnetron using all-cavity output and semi-transparent cathode

Yang Wen-Yuan Dong Ye Dong Zhi-Wei

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 65, 248401 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.248401

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.248401>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I24>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

传输矩阵法在行波管内部反射引起的增益波动计算中的应用

[Application of transfer matrix method to calculating the effect of multiple internal reflections on the small signal gain ripple of TWT](#)

物理学报.2016, 65(12): 128401 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.128401>

Ka 波段带状注相对论扩展相互作用速调管放大器的分析与设计

[Analysis and design of a Ka-band sheet beam relativistic extended interaction klystron amplifier](#)

物理学报.2015, 64(10): 108404 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.108404>

长脉冲 X 波段多注相对论速调管放大器的初步实验研究

[Experimental study on a long pulse X-band coaxial multi-beam](#)

物理学报.2015, 64(1): 018401 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.018401>

相对论返波管超辐射产生与辐射的数值模拟研究

[Numerical simulation of generation and radiation of super-radiation from relativistic backward wave oscillators](#)

物理学报.2014, 63(3): 038402 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.038402>

带状注速调管多间隙扩展相互作用输出腔等效电路的研究

[Research on equivalent circuit of multi-gap output cavity for sheet beam extended-interaction klystron](#)

物理学报.2014, 63(2): 028402 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.028402>

# 新型全腔输出半透明阴极相对论磁控管的理论和数值研究\*

杨温渊<sup>†</sup> 董焱 董志伟

(北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100094)

(2016年8月11日收到; 2016年9月6日收到修改稿)

为减小器件的体积和重量, 提高器件的实用性, 在轴向渐变输出结构半透明阴极相对论磁控管的基础上, 提出了全腔耦合输出结构半透明阴极相对论磁控管, 并对其进行了理论分析和数值模拟. 采用全腔输出结构后, 器件相互作用区径向半径由10.5 cm降到6.6 cm, 轴向长度由大于40 cm降到小于30 cm, 器件尺寸显著减小. 通过对输出结构的参数优化, 在注入电子束电压和电流分别约为395 kV和5.6 kA、外加磁场为4.75 kGs ( $1 \text{ Gs} = 10^{-4} \text{ T}$ )时, 模拟在S波段获得了效率约50%的微波输出, 输出功率达到1.15 GW, 模式更加纯净. 同时还分析了耦合孔的长度、宽度和深度以及输出波导的宽度和短路面起始位置等参数对输出性能的影响规律.

**关键词:** 相对论磁控管, 半透明阴极, 全腔耦合输出

**PACS:** 84.40.Fe, 07.57.Hm, 84.40.Az

**DOI:** 10.7498/aps.65.248401

## 1 引言

作为一种紧凑型器件, 相对论磁控管具有容易实现较大范围的频率调谐、外加磁场相对较小 ( $< 1 \text{ T}$ )、输出功率高和适合长脉冲和重复频率运行等优点, 在许多领域有着良好的应用前景<sup>[1-5]</sup>. 但是传统的相对论磁控管起振慢、效率较低且容易产生模式竞争, 因此相对论磁控管的研究热点主要集中在如何提高微波输出效率和缩短起振时间<sup>[4-10]</sup>等方面, 其中新墨西哥大学和密西根大学提出的透明阴极相对论磁控管具有效率高、起振快和模式选择性好的特点<sup>[6,7]</sup>, 近年来得到人们的重视. 2010年, 采用透明阴极的相对论磁控管的模拟效率达到了约70%<sup>[5]</sup>.

对透明阴极相对论磁控管的实验研究结果证实了其在起振方面的优势<sup>[11-14]</sup>. 但是效率的显著提高只有在新墨西哥大学的短脉冲实验中得到证实<sup>[11]</sup>. 文献<sup>[4]</sup>指出, 透明阴极相对论磁控管更适

合具有快上升前沿的脉冲功率来驱动. 另外, 相对于传统相对论磁控管, 透明阴极相对论磁控管对器件的准直度要求更高, 研究表明, 透明阴极即使只有0.3 mm的偏移也可能引起模式竞争<sup>[11]</sup>.

为降低加工难度, 提高器件实用性, 基于透明阴极相对论磁控管, 2014年提出了半透明阴极相对论磁控管<sup>[15]</sup>, 理论和数值研究表明半透明阴极相对论磁控管同样具有高的输出效率, 且当不同阴极槽具有不同的深度和宽度时, 与均匀阴极槽相比, 器件的输出性能基本不受影响, 因此在实际应用中更加稳定. 但是同透明阴极相对论磁控管一样, 由于采用了传统的轴向渐变输出结构, 器件尺寸尤其是径向尺寸仍然比较大.

2006年, Greenwood<sup>[16]</sup>提出的全腔耦合输出结构磁控管获得了美国专利. 2012年, 文献<sup>[9]</sup>对采用上述全腔输出结构的磁控管进行了理论研究, 获得了约100 MW的微波输出. 相对于轴向渐变输出结构, 全腔耦合输出结构的引入使得器件的径向尺寸显著减小, 从而有望使用永磁场聚焦电子束,

\* 国家自然科学基金(批准号: 11305015, 11475155)和中国工程物理研究院科学技术发展基金(批准号: 2015B0402091)资助的课题.

<sup>†</sup> 通信作者. E-mail: yang\_wenyuan@iapcm.ac.cn

器件的体积和重量将进一步减小. 为获得紧凑型吉瓦级高功率微波输出, 本文在已提出轴向渐变输出结构半透明阴极相对论磁控管的基础上, 提出了全腔耦合输出结构半透明阴极相对论磁控管, 并对其输出特性和运行规律进行了理论分析和数值模拟, 给出耦合孔的长度、宽度和深度以及输出波导的宽度和短路面位置等参数对输出性能的影响规律.

## 2 物理分析

### 2.1 模型介绍

半透明阴极是一种特定构型的阴极, 如图 1(a) 所示, 它通过将传统圆柱形阴极在角向开槽而获得. 阴极槽的截面均为扇形结构; 用于电子发射的

阴极叶片的截面也为扇形结构, 叶片与阴极中心区域连接在一起. 如果阴极中心区域被移走, 半透明阴极变为透明阴极. 当  $R_{c,in} = R_{c,out}$  时, 则半透明阴极变为传统阴极, 这里  $R_{c,in}$  和  $R_{c,out}$  分别为阴极的内径和外径.

全腔输出结构如图 1(b) 所示, 即磁控管的每一个阳极相互作用腔都径向向开一个具有一定角向宽度和纵向长度的耦合孔, 相邻的阳极腔通过其耦合孔与具有一定张角的扇形波导连通. 阳极腔中的电磁场通过耦合孔在扇形波导中激励相应模式的电磁场, 并通过扇形波导输出. 三个扇形输出波导沿角向均匀分布, 其中  $a$  为波导外半径,  $b$  为波导内半径,  $\alpha$  为波导张角.

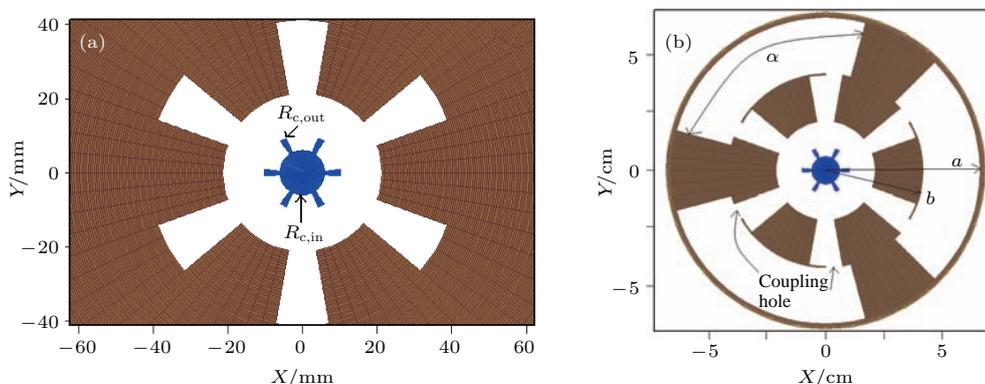


图 1 (网刊彩色) (a) 半透明阴极和 (b) 全腔输出结构示意图

Fig. 1. (color online) Schematic drawings of (a) the semi-transparent cathode and (b) all output structure.

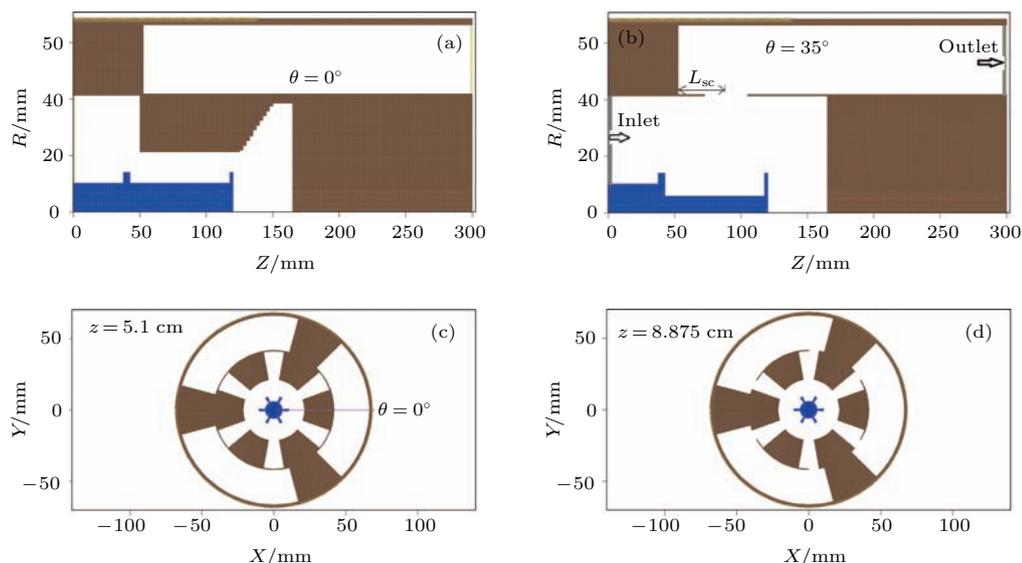


图 2 (网刊彩色) AS 相对论磁控管结构示意图 (a), (b)  $R$ - $Z$  截面; (c), (d)  $X$ - $Y$  截面;  $R_{c,in} = 0.6R_{c,out}$

Fig. 2. (color online) Schematic drawings of the AS relativistic magnetron: (a), (b)  $R$ - $Z$  cross sections with different  $\theta$ ; (c), (d)  $X$ - $Y$  cross sections with different  $z$ .

本文提出的采用全腔耦合输出结构和半透明阴极 (all cavity output and semi-transparent cathode, AS) 相对论磁控管的  $R$ - $Z$  截面 (不同角向位置  $\theta$ ) 和  $X$ - $Y$  截面 (不同轴向位置  $z$ ) 结构示意图如图 2 (a)—(d) 所示. 其中二极管区和相互作用区采用半透明阴极相对论磁控管中已经优化好的参数, 即电子束参数、阴极和阳极腔等参数均采用文献 [15] 中的优化参数, 本文重点对与输出结构有关的参数, 即耦合孔的尺寸以及输出波导的宽度和短路面起始位置  $L_{sc}$  等进行优化.

### 2.2 扇形输出波导中的模式分析

依据文献 [17], 我们对扇形波导中的本征模式的频率和模式隔离度做了初步分析. 图 3 给出了内半径  $b$  固定 ( $b = 4.2$  cm), 外半径  $a$  分别为 6.6, 7.3 和 8.0 cm 情况下,  $TE_{11}$  (基模) 和其他高阶模 ( $TE_{21}$ ,  $TE_{12}$ ,  $TE_{01}$ ) 对应的截止频率. 可以看到:  $TE_{11}$  的截止频率最低; 随着  $a$  的增大,  $TE_{01}$  与  $TE_{11}$  模的截止频率明显下降; 外径越小, 模式隔离度越好.

本文所模拟的 AS 相对论磁控管工作频率约为 2.38 GHz, 这样就要求基模  $TE_{11}$  (工作模式) 的截止频率小于 2.38 GHz, 使微波得以传输. 而高阶模的频率大于 2.38 GHz, 以保证基模单模运行, 避免可能的模式竞争. 结果表明, 在我们计算的范围内, 模式隔离度能够满足以上要求.

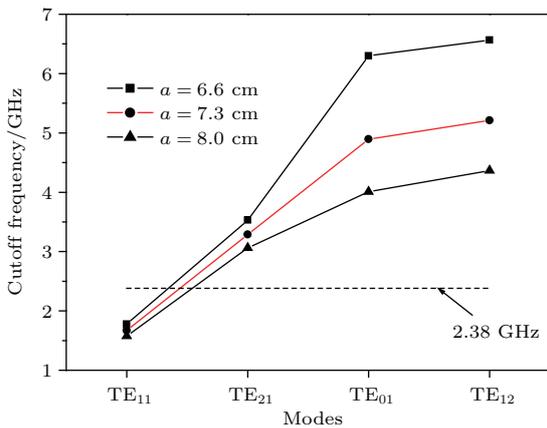


图 3 (网刊彩色) 不同外半径下扇形波导中基模和三个高阶模式的截止频率

Fig. 3. (color online) Cutoff frequencies of the fundamental mode and three higher order modes with different outer radii in the fan waveguide.

已经知道, 相对论磁控管的阳极相互作用腔中, 电子束主要与角向电场发生相互作用, 因此阳极腔中辐射场的角向电场和轴向磁场强度最大. 图 4

给出了扇形波导中基模  $TE_{11}$  的角向电场和轴向磁场等高图. 注意到角向电场和轴向磁场的方向沿角向正负交替一次, 呈现中间弱边缘强的分布. 扇形波导中  $TE_{11}$  模式分布的特点有利于阳极腔中产生的辐射场通过耦合孔耦合到扇形输出波导中.

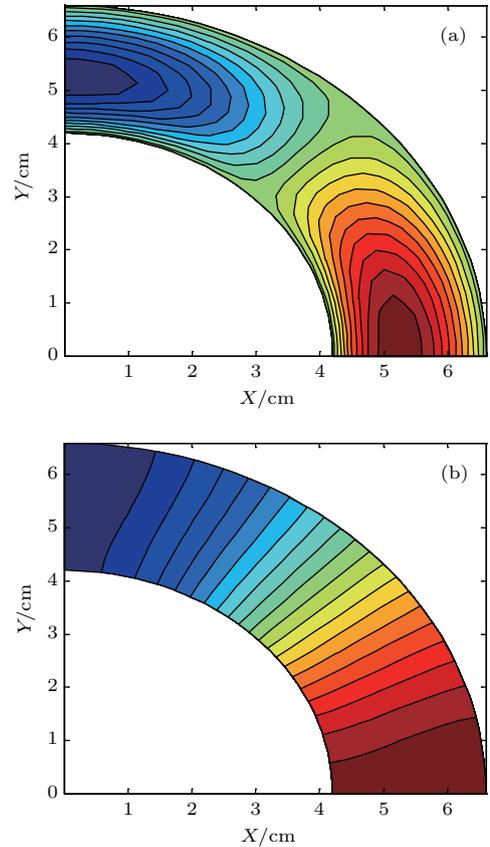


图 4 (网刊彩色) 扇形波导中  $TE_{11}$  模中电磁场分布等高图 (a)  $E_{\theta}$ ; (b)  $B_z$

Fig. 4. (color online) The contour plots of the electromagnetic field of  $TE_{11}$  mode in the fan waveguide: (a)  $E_{\theta}$ ; (b)  $B_z$ .

### 3 模拟结果与讨论

为了证明器件的运行特点并且获得其运行规律, 运用三维全电磁 PIC 程序对 AS 相对论磁控管进行了数值模拟并对结果进行了分析.

入口处注入一脉宽为 25.0 ns 的电脉冲, 上升沿为 1.0 ns. 外加引导磁场由螺线管产生. 无特殊说明, 模拟时取如下优化参数: 中心磁场峰值 4.75 kGs ( $1 \text{ Gs} = 10^{-4} \text{ T}$ ); 阴极外半径  $R_{c,out} = 1.0$  cm, 内半径  $R_{c,in} = 6$  mm, 角向宽度为  $10^\circ$ ; 阳极半径为 2.11 cm, 阳极腔半径为 4.11 cm. 阳极腔和阴极发射区长度为 7.5 cm. 阴极左右挡板的厚度分别为 0.5 mm 和 0.25 mm, 高度为 14 mm.

耦合孔角向宽度  $10^\circ$ ,  $z$  方向长度 3.25 cm,  $r$  方向深度 0.55 mm; 扇形波导张角  $90^\circ$ , 内半径 4.2 cm, 外半径 6.6 cm, 扇形波导短路面距耦合孔中心距离为 3.875 cm. 下面, 我们将给出主要模拟结果.

图 5(a) 和图 5(b) 为注入电压和功率随时间的变化. 可以看到, 在平台区, 注入电子束电压和平均功率分别约为 395 kV 和 2.22 GW. 计算可得, 电子束电流约 5.6 kA.

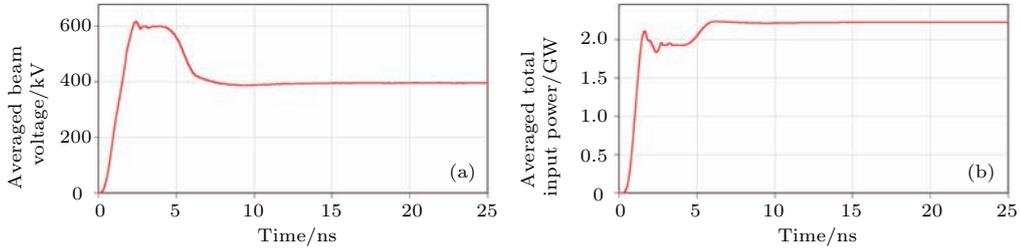


图 5 (a) 注入电压和 (b) 功率平均值随时间的变化

Fig. 5. Time plots of the averaged (a) beam voltage and (b) total input power obtained on the diode.

### 3.1 基本运行规律

图 6(a)—(d) 描述了电子束轮辐的发展、形成和旋转过程. 在  $t = 1.722$  ns 时, 由于外加电场和磁场的共同作用, 阴极发射电子在向阳极移动的同时

绕着阴极旋转; 在  $t = 4.591$  ns 时, 三个电子束轮辐开始现出雏形, 这意味着器件将工作在  $\pi$  模. 在器件达到饱和时, 三个轮辐完全形成且随时间沿角向旋转. 此时, 波束相互作用最强, 大量电子能量转换为微波能量, 器件产生高效率的微波输出.

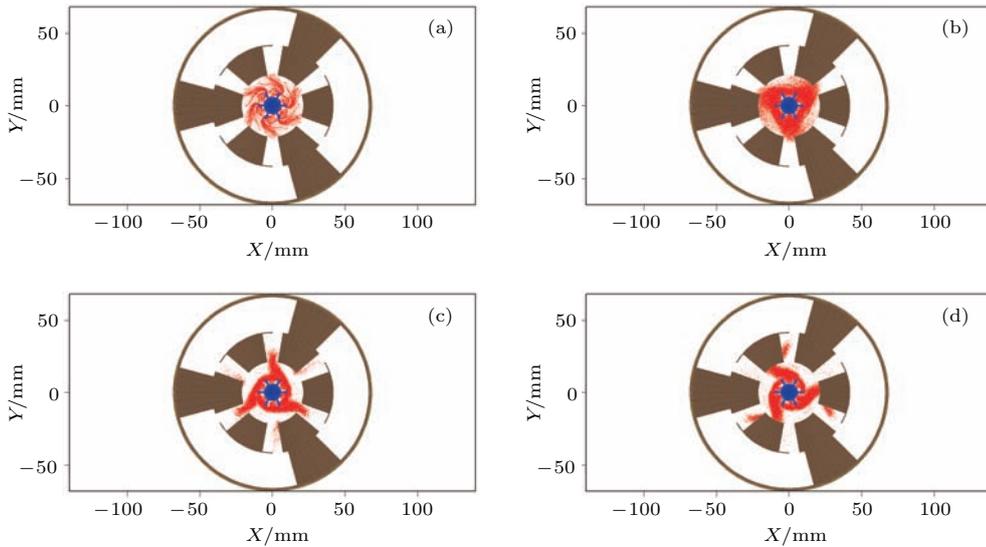


图 6 (网刊彩色) 电子相位演化图 (电子束轮辐的形成和旋转) (a)  $t = 1.722$  ns; (b)  $t = 4.591$  ns; (c)  $t = 20.374$  ns; (d)  $t = 21.808$  ns

Fig. 6. (color online) Formation and rotation of electron spokes at different times: (a)  $t = 1.722$  ns; (b)  $t = 4.591$  ns; (c)  $t = 20.374$  ns; (d)  $t = 21.808$  ns.

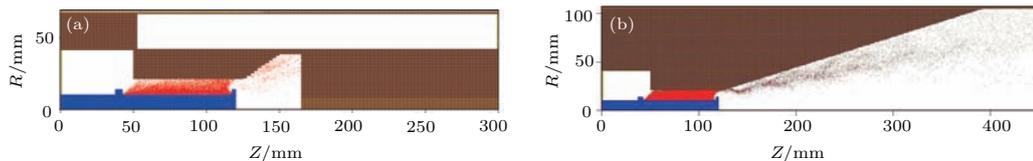


图 7 (网刊彩色) 电子在  $R$ - $Z$  平面的分布图 (a) 全腔输出; (b) 轴向渐变输出

Fig. 7. (color online) Phase space plots of electrons in  $R$ - $Z$  plane: (a) All cavity output structure; (b) axial diffraction extraction.

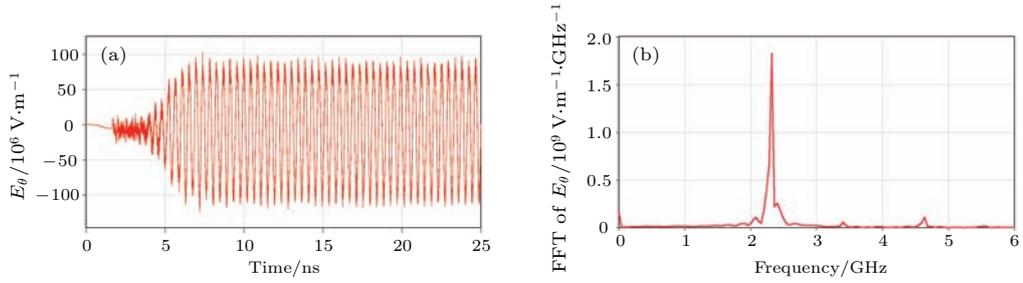


图8 (a) 阳极腔间隙角向电场随时间的变化及(b)相应的FFT变换图

Fig. 8. (a) Variations of  $E_\theta$  with time at the anode cavity gap and (b) the corresponding Fourier transform.

由图7(a)和图7(b)分别给出了采用全腔输出结构和轴向渐变输出结构的半透明阴极相对论磁控管中,电子束在R-Z空间的分布图.可以看到,采用全腔输出结构后,径向尺寸大大减小(由10.5 cm降到6.6 cm),轴向尺寸明显缩短(由大于40 cm降到小于30 cm).

图8(a)和图8(b)给出了阳极腔间隙角向电场随时间的变化及相应的傅里叶快速变换(FFT)图.可以看到,辐射场大约8.0 ns达到饱和,谐振频率为2.32 GHz.需要说明的是,由于耦合孔开在阳极腔的强磁场处,输出耦合孔的存在引起的谐振腔的谐振频率的降低,因此与采用轴向渐变输出的半透明阴极相对论磁控管相比,工作频率由2.5 GHz降为2.32 GHz.

图9周期平均功率随时间的变化.可以看

到,饱和时输出功率约1.15 GW,效率达到50%.图10给出了两种不同输出结构时输出瞬时功率随时间的变化.可以看到,采用全腔输出结构后,输出微波模式更加纯净,起振阶段没有模式竞争.这主要是由于相互作用腔耦合孔的出现使得腔内Q值降低,相应的竞争模式增益太小,无法起振.

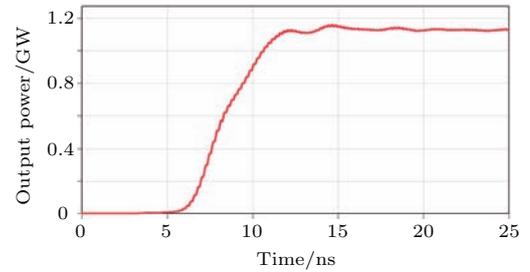


图9 输出瞬时功率和周期平均功率随时间的变化

Fig. 9. Time plots of the periodic-average output power.

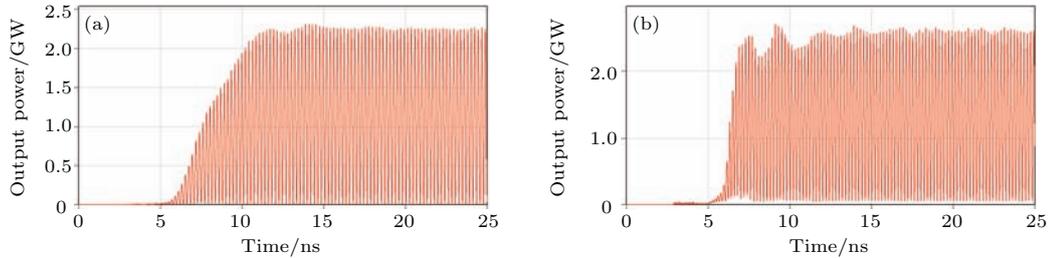


图10 输出瞬时功率随时间的变化 (a) 全腔输出; (b) 轴向渐变输出

Fig. 10. Time plots of the instantaneous output power for different output structures: (a) All cavity output structure; (b) axial diffraction extraction.

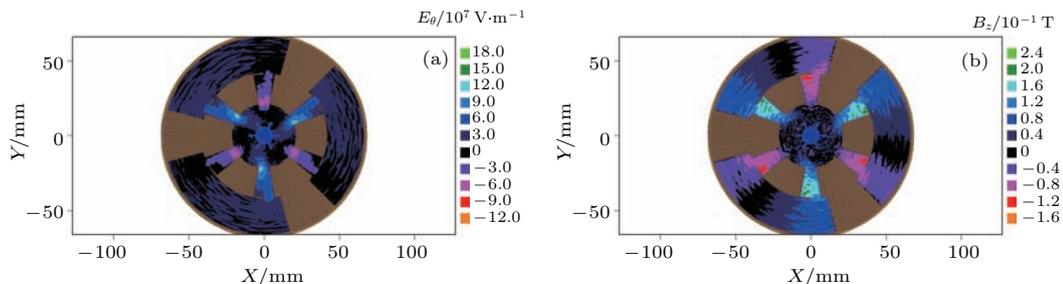


图11 (网刊彩色) 相互作用区X-Y截面 (a) 角向电场  $E_\theta$  以及(b) 轴向磁场  $B_z$  分布图

Fig. 11. (color online) Contour plots of the radiation fields in the interaction region: (a)  $E_\theta$ ; (b)  $B_z$ .

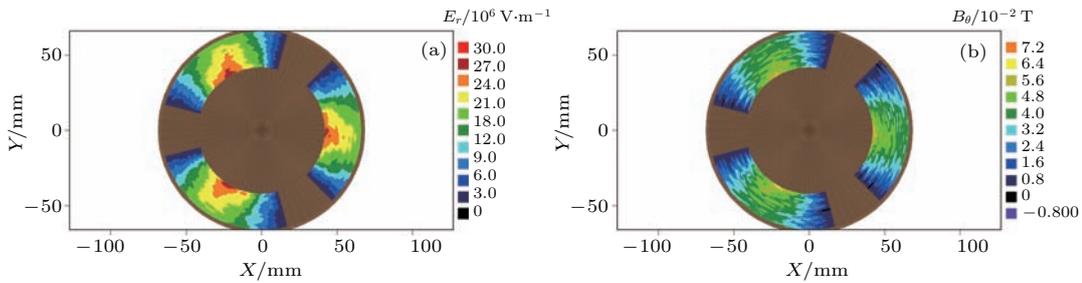


图 12 (网刊彩色) 输出区 X-Y 截面 (a) 径向电场  $E_r$  以及 (b) 角向磁场  $B_\theta$  分布图

Fig. 12. (color online) Contour plots of the radiation fields in the output region at saturation: (a)  $E_r$ ; (b)  $B_\theta$ .

图 11 给出了相互作用腔中的电场分布图, 可以确定器件工作于  $\pi$  模, 电磁场在腔内沿角向正负交替出现, 从而使得相互作用腔内的辐射场通过耦合孔高效地耦合到扇形输出波导中, 激发了扇形波导中的  $TE_{11}$  模, 实现磁控管的高效输出.

图 12 给出了输出区 X-Y 截面电磁场分布图, 输出的电磁场模式为扇形波导中的  $TE_{11}$  模式.

图 13 给出了输出功率、效率和最优磁场随电子束电压的变化. 可以看到, 在较大的电压范围内, 输出功率随着电压的升高而升高, 效率基本保持不变.

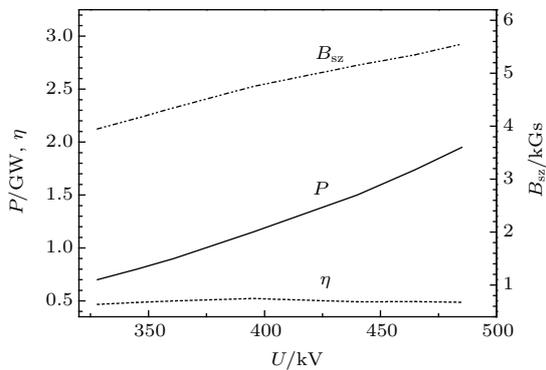


图 13 输出功率、效率和最优磁场随电压的变化

Fig. 13. Variation of the output power, efficiency and the corresponding optimal guiding magnetic field versus the beam voltage.

### 3.2 耦合孔和扇形波导尺寸对输出的影响

耦合孔大小包括纵向长度、角向宽度和径向深度三个分量. 图 14 给出了纵向长度和角向宽度固定时, 输出功率随耦合孔径向深度的变化. 可以看到, 输出功率随着耦合孔径向深度的增加而减小. 因此, 在优化设计时, 在允许范围内, 耦合孔径向深度取最小值.

图 15 给出了径向深度固定时, 耦合孔角向宽度分别为  $5^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $15^\circ$  和  $20^\circ$  时, 输出功率随耦合孔纵向长度的变化.

由图 15 可以看到, 耦合孔角向宽度固定时, 随着耦合孔纵向长度的增加, 输出功率先增加后减小, 纵向长度存在最优值; 角向宽度大时, 最优纵向长度小; 角向宽度小时, 最优纵向长度大.

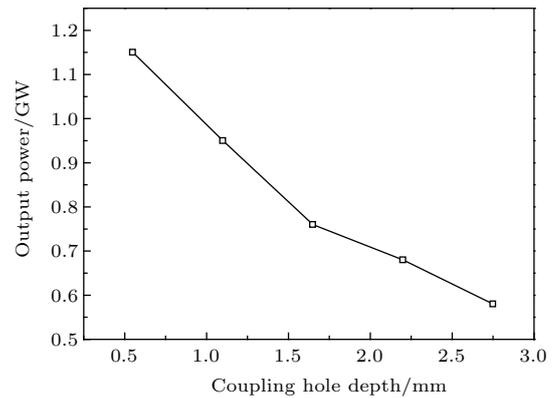


图 14 输出功率随耦合孔径向深度的变化

Fig. 14. Variation of the output power versus the coupling hole depth.

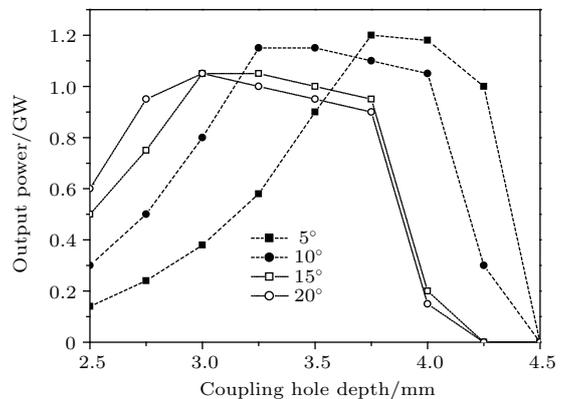


图 15 输出功率随耦合孔纵向长度和角向宽度的变化

Fig. 15. Variation of the output power versus the coupling hole length and width.

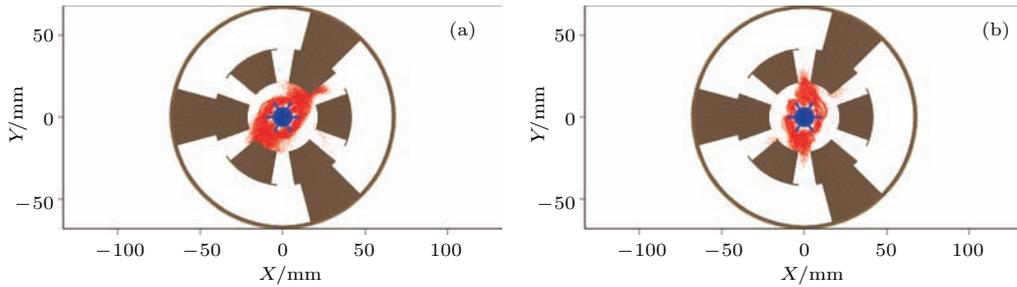


图 16 (网刊彩色) 耦合孔纵向长度为 4.0 cm、角向宽度为 20° 时, 电子的空间分布图 (a)  $t = 6.026$  ns; (b)  $t = 16.049$  ns  
 Fig. 16. (color online) Phase space plots of electrons in X-Y plane with large coupling hole when the hole length and width are 4.0 cm and 20°, respectively: (a)  $t = 6.026$  ns; (b)  $t = 16.049$  ns.

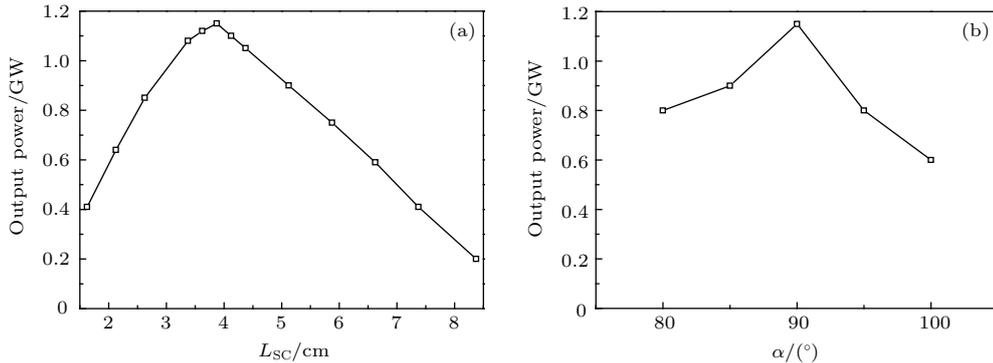


图 17 输出功率随 (a) 短路面距耦合孔中心的距离  $L_{sc}$  和 (b) 扇形波导张角  $\alpha$  的变化  
 Fig. 17. Variation of the output power versus (a)  $L_{sc}$  (distance from the beginning of the fan waveguide to the hole center) and (b)  $\alpha$  (width in angular direction).

耦合孔尺寸较小时, 输出功率较小, 但没有模式竞争, 输出模式为  $\pi$  模. 耦合孔尺寸较大时, 初期存在模式竞争, 竞争模式主要是  $\pi/3$  模. 图 16 给出了耦合孔尺寸过大时电子相位图. 可以看到, 随着耦合孔尺寸的进一步增大,  $\pi/3$  模占优,  $\pi$  模无法起振, 此时输出功率大幅下降.

图 17 给出了输出功率随扇形输出波导短路面距耦合孔中心的距离  $L_{sc}$  和波导张角  $\alpha$  的变化. 可以看到,  $L_{sc}$  和  $\alpha$  均存在最佳值.  $L_{sc}$  和  $\alpha$  的大于或小于最佳值都会导致输出功率下降.

## 4 结 论

本文提出了 AS 相对论磁控管, 即全腔输出结构半透明阴极相对论磁控管, 并对其进行了理论和数值模拟研究. 研究表明: 与轴向渐变输出结构相比, 采用扇形耦合腔输出结构的半透明阴极相对论磁控管, 相互作用区径向尺寸由 10.5 cm 降到 6.6 cm, 轴向尺寸由必须大于 40 cm 降到可以小于 30 cm, 但所需外加磁场强度没有差别, 因此器件体积明显减小; 同时, 器件的输出性能, 包括输出功率和效率

等基本相同. 当注入电子束电压和平均功率分别约为 395 kV 和 2.22 GW、外加磁场为 4.75 kGs 时, 在 S 波段获得了功率为 1.15 GW、效率约 50% 的微波输出且模式更加纯净. 因此, 全腔输出结构的使用为实现器件的小型化、提高器件实用性有积极促进作用. 考察了耦合孔的长度、宽度和深度等对器件输出性能的影响, 研究结果为后续的实验研究提供了相应的理论指导.

## 参考文献

- [1] Barker R J, Schamiloglu E 2001 *High-Power Microwave Sources and Technologies* (New York: Institute of Electrical and Electronics Engineer, Inc.) pp56-60
- [2] Liu M Q, Liu C L, Galbreath D, Michel C, Prasad S, Fuks M I, Schamiloglu E 2011 *J. Appl. Phys.* **110** 033304
- [3] Kim H J, Choi J J 2007 *IEEE Trans. Dielectr. Elect. Insul.* **14** 1045
- [4] Bosman H L, Fuks M I, Prasad S, Schamiloglu E 2006 *IEEE Trans. Plas. Sci.* **34** 606
- [5] Fuks M I, Schamiloglu E 2010 *IEEE Trans. Plas. Sci.* **38** 1302
- [6] Jones M C, Neculaes V B, Lau Y Y, Gilgenbach R M, White W M, Hoff B W, Jordan N M 2005 *Appl. Phys. Lett.* **87** 081501



- [7] Fuks M I, Schamiloglu E 2005 *Phys. Rev. Lett.* **95** 205101
- [8] Daimon M, Jiang W 2007 *Appl. Phys. Lett.* **91** 191503
- [9] Hoff B W, Greenwood A D, Mardahl P J, M D Haworth 2012 *IEEE Trans. Plas. Sci.* **40** 3046
- [10] Fleming T P, Mardahl P J, Bowers L A, Cartwright K L 2006 *Conference Record of the 2006 Twenty-Seventh International Power Modulator Symposium* Arlington Virginia, USA, May 14–18, 2006 p401
- [11] Prasad S, Roybal M, Buchenauer C J, Prestwich K, Fuks M I, Schamiloglu E 2009 *IEEE Pulsed Power Conference* Washington, DC, USA, June 27–July 1, 2009 p81
- [12] Yamazaki H, Jiang W 2007 *Proceedings of ITC/ISHW* Toki, Japan, October 15–19, 2007 p1
- [13] Su L, Li T M, Li J Y 2011 *High Power Laser and Particle Beams* **23** 3039 (in Chinese) [苏黎, 李天明, 李家胤 2011 强激光与粒子束 **23** 3039]
- [14] Li W, Liu Y, Zhang J, Shu T, Yang H, Fan Y, Yuan C 2012 *Rev. Sci. Instrum.* **83** 024707
- [15] Yang W, Dong, Z, Yang Y, Dong Y 2014 *IEEE Trans. Plas. Sci.* **42** 3458
- [16] Greenwood A D 2006 *US Patent* 7 106 004[2006-9-12]
- [17] Zhang K Q, Li D J 2001 *Electromagnetic Theory in Microwaves and Optoelectronics* (1st Ed.) (Beijing: Publishing House of Electronics Industry) pp295–297 (in Chinese) [张克潜, 李德杰 2001 微波与光电子学中的电磁理论 (第1版) (北京: 电子工业出版社) 第295—297页]

# Theoretical and numerical investigations of the novel relativistic magnetron using all-cavity output and semi-transparent cathode\*

Yang Wen-Yuan<sup>†</sup> Dong Ye Dong Zhi-Wei

(Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100094, China)

(Received 11 August 2016; revised manuscript received 6 September 2016)

## Abstract

Relativistic magnetron is a kind of compact cross-field high power microwave source. It has the virtues of wide frequency tunability and ability to operate with relative lower external magnetic field. To improve the compactness and reduce the size and weight of the relativistic magnetron further, a novel relativistic magnetron using all-cavity output and semi-transparent cathode is investigated theoretically and numerically. By using the all-cavity output structure, the radial dimension is reduced markedly (from 10.5 cm to 6.6 cm) and the axial dimension is also shortened considerably (from larger than 40 cm to less than 30 cm). Since the radiation fields in the interaction cavity are coupled through the coupling hole to the output fan waveguide, the cutoff frequencies of the fundamental mode and three higher order modes in the fan waveguide with different outer radii are calculated. The calculation results show that the mode separation is wide enough for the single mode operation on the fundamental mode. And by using the semi-transparent cathode, the high output efficiency can be obtained and the output characteristics are insensitive to the depth and width of each cathode slot. To verify the characteristic of the proposed magnetron, numerical simulations are carried out by using the three-dimensional particle-in-cell code. After careful optimization, simulations show that with a beam voltage of 395 kV and beam current of 5.6 kA, 1.15 GW output microwave with an efficiency of about 50% can be obtained at S-band with purer mode. The corresponding applied magnetic field is 4.75 kGs ( $1 \text{ Gs} = 10^{-4} \text{ T}$ ). In a relatively large range, both radiation power and the optimal magnetic field increase with the beam voltage. But the output efficiency keeps almost unchanged.

The effects of the depth, width and length of the coupling hole, width of the fan waveguide  $\alpha$  and the distance from the beginning position of the fan waveguide to the coupling hole center  $L_{sc}$  on the output characteristics are also analyzed. Simulation results show that when the dimension of the coupling hole is small, the output power is low. But there is no mode competition and the device works on the  $\pi$  mode. With the increase of the coupling hole, the output power increases accordingly. When the coupling hole is large enough, the mode competition between the  $\pi$  mode and  $\pi/3$  mode becomes so serious that the  $\pi$  mode cannot win any more. At the same time, the output power decreases markedly. There also exist optimal values of both the fan width  $\alpha$  and the beginning position of the fan waveguide ( $L_{sc}$ ) for maximal output power.

**Keywords:** relativistic magnetron, semi-transparent cathode, all cavity output

**PACS:** 84.40.Fe, 07.57.Hm, 84.40.Az

**DOI:** 10.7498/aps.65.248401

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11305015, 11475155) and the Science Foundation of China Academy of Engineering Physics, China (Grant No. 2015B0402091).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: yang\_wenyuan@iapcm.ac.cn