

全腔输出相对论磁控管输出模式转换结构的理论设计和数值模拟

杨温渊 董烨 董志伟

Design and simulation of output mode conversion structure of relativistic magnetron with all cavity output

Yang Wen-Yuan Dong Ye Dong Zhi-Wei

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 188401 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20180358

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20180358>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I18>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[考虑谐波相互作用的行波管欧拉非线性理论模型](#)

Nonlinear theory considering harmonic interaction using Eulerian hydrodynamic analysis

物理学报.2018, 67(8): 088401 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20180024>

[锁频锁相的高功率微波器件技术研究](#)

Review on high power microwave device with locked frequency and phase

物理学报.2018, 67(8): 088402 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20172684>

[螺旋线行波管三维返波相互作用理论与数值模拟](#)

Study of three-dimensional nonlinear backward-wave interaction model and numerical simulation for helical traveling wave tube

物理学报.2017, 66(2): 028401 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.028401>

[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](#)

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

物理学报.2016, 65(24): 248401 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.248401>

[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>

# 全腔输出相对论磁控管输出模式转换结构的理论设计和数值模拟\*

杨温渊<sup>†</sup> 董焯 董志伟

(北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100094)

(2018年2月27日收到; 2018年6月4日收到修改稿)

采用全腔输出结构后, 相对论磁控管径向尺寸显著减小, 轴向长度也有较大幅度的缩短. 但是, 由于输出结构为三个相对独立的扇形波导, 实际应用时, 一般需要对微波输出模式进行转换. 针对全腔输出相对论磁控管, 本文研究了两种输出模式转换结构并利用三维全电磁粒子模拟程序对其进行了研究. 首先研究了将三个扇形波导角向增宽从而渐变或者突变为一个同轴波导的情况, 研究结果表明, 两种情况下输出微波功率均大于采用传统三个独立扇形波导输出时的90%, 输出模式主要是TEM模. 其次研究了输出区由三个扇形输出波导分别变换为三个截面大小与之接近的矩形输出波导的可行性, 研究结果表明, 注入扇形波导中的TE<sub>11</sub>模式几乎全部转换为矩形波导中的TE<sub>10</sub>模式. 实际应用时, 可根据需要选择上述输出模式转换结构.

**关键词:** 相对论磁控管, 半透明阴极, 全腔耦合输出, 扇形波导

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

**DOI:** 10.7498/aps.67.20180358

## 1 引言

相对论磁控管自诞生以来一直是被关注的焦点, 由于其巨大的应用潜力, 国内外都开展了大量研究<sup>[1-19]</sup>. 这些研究使得相对论磁控管得到了不断的发展. 其中通过改进器件的输出结构来提高器件的效率和性能是一种比较有效的方法, 例如采用轴向渐变输出结构<sup>[9-14]</sup>, 使得相对论磁控管的效率得到了很大的提高; 而采用全腔耦合输出结构<sup>[15-19]</sup>, 则使得器件的体积和重量显著减小, 有利于器件的小型化. 目前, 新型相对论磁控管不仅结构紧凑, 而且还具有高效率、高输出功率和适合长脉冲运行等特点.

基于已有工作, 文献<sup>[16]</sup>提出了全腔输出半透明阴极(all cavity output and semi-transparent cathode, AS)相对论磁控管, 该器件兼具紧凑、高效和稳定性好的优点. 通过参数优化, 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 Gs=10<sup>-4</sup> T)时, 模拟显示改进后的磁控管在S波段获得了效率约50%的微波输出, 输出模式纯净, 输出功率达到1.15 GW. 但是, 由于全腔输出结构为三个相对独立的扇形波导, 实际应用时, 一般需要对微波输出模式进行转换. 例如, 为了获得需要的微波模式, 文献<sup>[18, 19]</sup>提出了将一种轴向输出的全腔相对论磁控管输出端的扇形波导渐变为同轴波导结构, 并对波束相互作用区中不同电子轮辐数与可能的输出模式的对应关系进行了研究.

为提高器件通用性, 满足实际应用的需求, 本文对文献<sup>[16]</sup>提出的AS相对论磁控管的输出模式转换结构进行了理论设计和数值模拟, 主要研究了两种具体转换结构并利用三维全电磁粒子模拟程序通过数值模拟的方法证明了其可行性. 其中第一种转换结构为: 将三个相对独立的扇形输出波导转换为一个同轴波导, 即三个扇形波导在输出区某个位置沿角向增宽从而渐变或者突变为一个同轴波导. 第二种转换结构为: 三个扇形输出波导在输出

\* 国家自然科学基金(批准号: 11305015, 11475155, 11875094)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

区的某个位置分别变换为与扇形波导横截面大小接近的矩形输出波导, 矩形波导横截面长边分别与扇形波导横截面的内外圆弧相切, 短边过外圆弧的两个端点.

## 2 AS 相对论磁控管基本结构

本文采用文献 [16] 中优化的 AS 相对论磁控管作为研究对象, 并在此基础上进行输出转换结构的

理论设计和数值模拟. 数值模拟运用了三维全电磁粒子模拟程序来实现. AS 相对论磁控管利用半透明阴极产生和发射电子束, 采用全腔耦合输出结构提取和输出微波, 其中波束相互作用区和微波输出区的横向  $X$ - $Y$  截面如图 1 (a) 和图 1 (b) 所示, 纵向  $Z$ - $X$  截面如图 1 (c) 所示, 微波提取和输出部分三维结构如图 1 (d) 所示, 可以看到器件所产生的微波从三个相对独立的扇形波导输出.

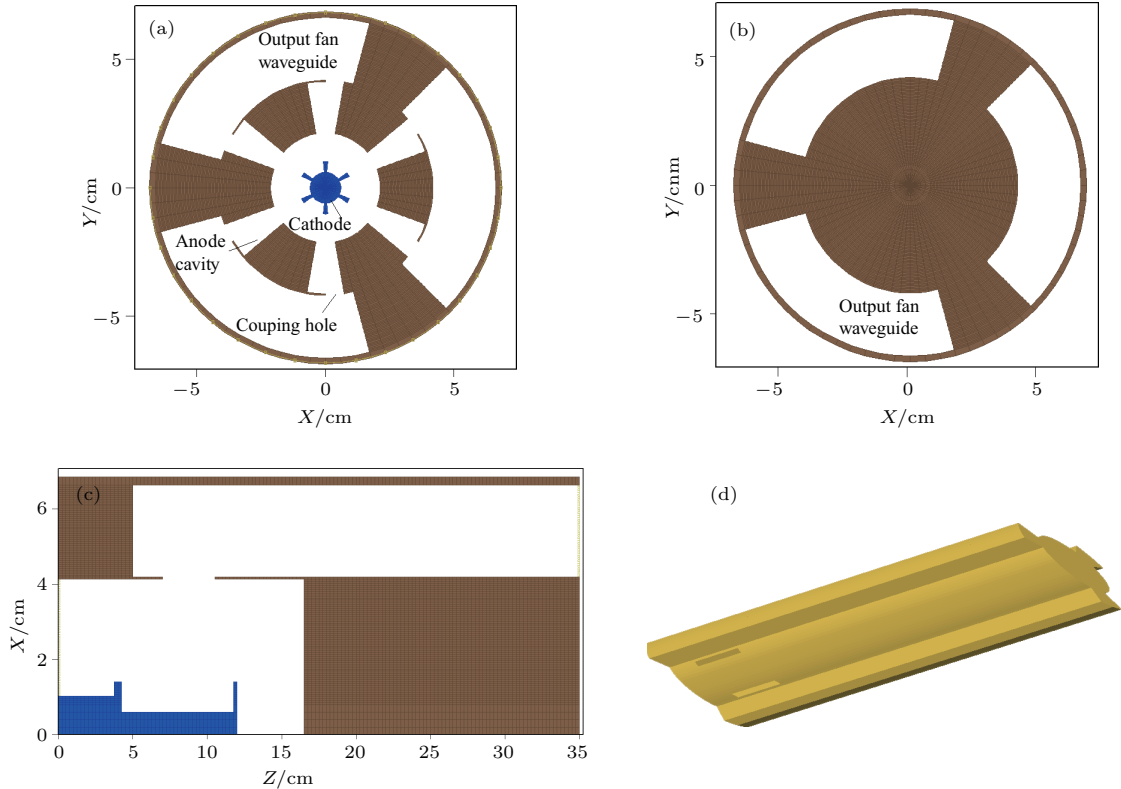


图 1 传统 AS 相对论磁控管结构示意图 (a), (b) 波束相互作用区和微波输出区  $X$ - $Y$  截面图; (c)  $Z$ - $X$  截面图; (d) 隐藏阳极外壳后的微波提取和输出部分的三维图

Fig. 1. Schematic drawings of the conventional AS relativistic magnetron: (a), (b)  $X$ - $Y$  sections in the beam-wave interaction and in the output region; (c)  $Z$ - $X$  sections of all the region; (d) three-dimensional geometry structures of the extraction and output region without anode shell appeared.

## 3 AS 相对论磁控管输出模式转换结构的设计和模拟

由于传统 AS 相对论磁控管目前输出结构为三个相对独立的扇形波导, 为满足一般应用, 研究了两种输出模式转换结构. 一是在输出区将三个扇形波导合成为一个同轴波导; 二是在输出区将三个扇形输出波导分别变换为截面大小接近的三个矩形输出波导. 下面逐一对上述输出转换结构进行验证.

### 3.1 扇形波导转换为同轴波导

将三个独立的扇形输出波导转换为一个同轴输出波导的方法有两种: 1) 在输出区适当位置直接将三个扇形波导连通, 合成为一个同轴波导; 2) 在输出区适当位置开始将三个扇形波导角向逐渐增宽, 从而渐变成为一个同轴波导的情况.

为了考察该输出转换结构, 建立了一个采用该输出转换结构的 AS 相对论磁控管的整体物理模型. 其中二极管区和相互作用区等参数直接利用文献 [16] 已经优化的参数, 只对输出部分末端进行了

上述改变.

### 3.1.1 扇形波导突变为同轴波导

图2是扇形波导突变为同轴波导的提取和输出部分结构图. 对比图1(d), 可以看到, 在输出区适当位置, 三个扇形波导之间的隔断被移去, 直接合成为一个同轴波导. 下面的计算中, 缺省情况下, 选取扇形波导突变为同轴波导的位置为  $z = 20$  cm, 耦合孔中心位置为  $z = 8.75$  cm, 突变位置距离耦合孔中心  $z = 11.25$  cm.

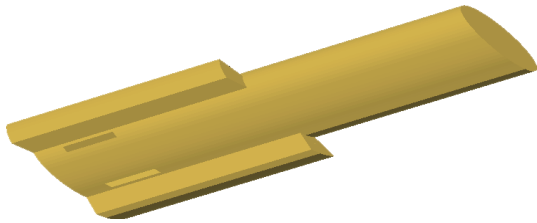


图2 输出末端突变为同轴波导后, AS相对论磁控管微波提取和输出部分结构图(隐藏阳极外壳)

Fig. 2. Schematic drawings of the extraction and output region of the AS relativistic magnetron (without anode shell appeared) with the output structure directly converting to coaxial output structure.

图3(a)—(d)给出了饱和时同轴输出区不同纵向位置电场和磁场的矢量图, 其中图3(a)和

图3(c)为电场矢量图, 图3(b)和图3(d)为磁场矢量图. 可以看到, 不同纵向位置的电场和磁场的分布特点均与同轴波导中TEM模的电磁场分布特点完全一致, 因此, 可以认定输出模式主要是TEM模<sup>[20]</sup>.

为考察输出端波导结构变换位置对束波相互作用和耦合提取的影响, 对变换位置进行了优化, 见图4中曲线1, 其中曲线3为传统扇形波导输出的结果,  $L$ 为变换位置与耦合输出孔中心的  $z$  方向的距离, 耦合孔中心位置固定不变. 模拟结果表明:  $L$ 对输出功率有一定的影响, 结构变换位置在较大范围内变化时, 器件输出功率均大于采用传统三个独立扇形波导输出功率的90%, 最优位置  $L = 13.75$  cm, 最优结果与传统结构持平, 但输出功率对突变位置的变化较敏感.

图5(a)和图5(b)给出了AS相对论磁控管分别采用传统三个独立扇形波导输出和直接突变为一个同轴波导输出的输出功率随时间的变化曲线. 对于扇形输出波导, 此处功率为三个扇形波导的总和. 对于突变为同轴波导的情况, 根据前面优化结果, 取  $L = 13.75$  cm (对应输出功率最高的点). 可以看到: 两种情况下, 瞬时输出功率都超过了2.3 GW, 输出平均功率均约为1.15 GW.

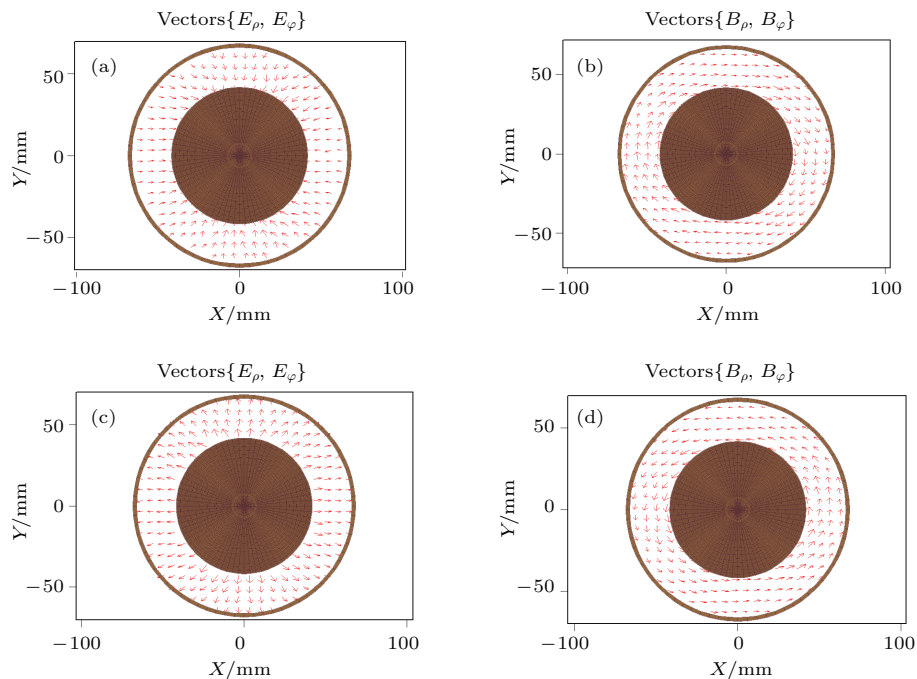


图3 输出区不同纵向位置时电场和磁场分布矢量图 (a), (b)  $z = 29.12$  cm; (c), (d)  $z = 33.87$  cm

Fig. 3. Vector plots of the electric and magnetic field on the cross section in the output region with (a) and (b)  $z = 29.12$  cm, (c) and (d)  $z = 33.87$  cm.



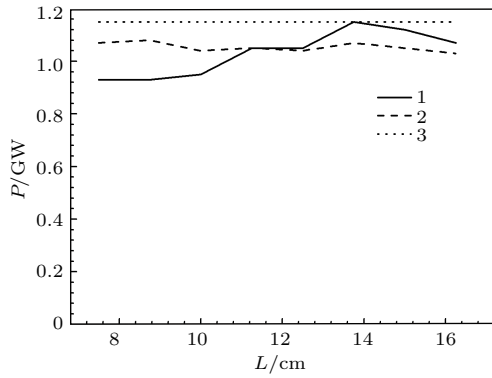


图4 输出平均功率随  $L$  的变化, 其中曲线 1 为突变结构的结果, 曲线 2 为渐变结构的结果, 曲线 3 为传统扇形波导输出的结果

Fig. 4. Variation of the average output power with the distance  $L$ , where  $L$  is the distance from the output hole center to the waveguide converting point in  $z$ -direction. Here curve 1 stands for the directly converting case, curve 2 stands for the gradually converting case, and curve 3 is conventional fan waveguide case.

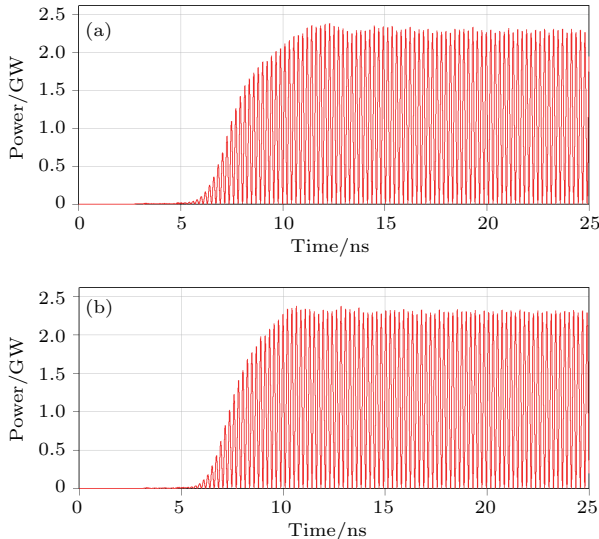


图5 输出口 ( $z = 35$  cm) 瞬时输出功率随时间的变化 (a) 扇形波导输出; (b) 突变同轴波导输出

Fig. 5. Time plot of the instantaneous output power: (a) Fan waveguide output; (b) coaxial waveguide output.

### 3.1.2 扇形波导渐变为同轴波导

根据前面的模拟结果, 采用突变结构时, 输出功率对突变位置的变化较敏感. 作为对上述突变结构的改进, 图 6 给出了三个扇形波导渐变为一个同轴波导的结构图. 可以看到: 在输出区给定位置开始, 三个扇形波导角向逐渐增宽, 从而渐变为一个同轴波导.

图 4 中的曲线 2 给出了采用渐变结构后, 输出功率随输出结构变换位置的变化情况. 可以看到对于渐变结构: 变换位置在较大范围内变化时, 器件

输出功率大于采用传统三个独立扇形波导输出功率的 90%, 且输出功率对结构变换位置的变化不敏感, 最优位置为  $L = 10$  cm. 相比突变结构, 波导变换最优位置离耦合输出孔更近一些, 有利于缩短器件纵向长度, 但最优输出功率略低一些. 因此实际应用时, 可根据需要选择适合的结构转换方式.

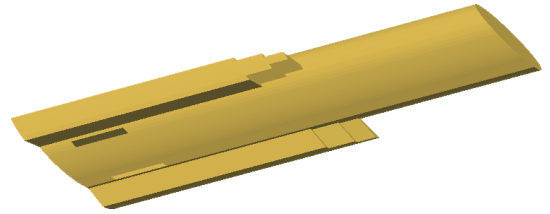


图6 输出末端渐变为同轴波导输出后, AS 相对论磁控管微波提取和输出部分结构图 (隐藏阳极外壳)

Fig. 6. Schematic drawings of the extraction and output region of the AS relativistic magnetron (without anode shell appeared) with the output structure gradually converting to coaxial output structure.

### 3.2 扇形波导转换为矩形波导

下面考察在输出区适当位置将扇形波导转换为与其截面大小接近的矩形波导输出的可行性. 首先设计了如下组合波导结构, 如图 7 (a)—(c) 所示, 该波导由一段扇形波导和一段矩形波导组成, 扇形波导的张角和内外径与文献 [16] 中 AS 相对论磁控管输出区扇形波导的参数完全一致. 矩形波导横截面的长边分别与扇形波导横截面的内外圆弧相切, 短边过外圆弧的两个端点. 具体结构参数为: 扇形波导截面的内外径分别为 4.2 cm 和 6.6 cm, 张角为  $90^\circ$ ; 矩形波导截面的长边和短边长度分别为 9.34 cm 和 2.4 cm. 组合波导总长度为 52 cm, 其中扇形波导和矩形波导长度均为 26 cm.

接着考察了给定模式的电磁场在上述组合波导中的功率传输和模式转换情况. 已经知道, AS 相对论磁控管输出模式为扇形波导中的  $TE_{11}$  模. 我们从扇形波导入口注入一定强度的、模式为扇形波导  $TE_{11}$  模的电磁场, 电磁场通过该组合波导, 从矩形波导出口辐射出去. 具体参数为: 注入微波的频率为 2.32 GHz, 最大场强位于波导中心处, 稳定后电场强度约为 5.0 kV/cm.

图 8 (a) 和图 8 (b)、图 9 (a)—(c) 分别给出了扇形波导区电磁场分布的矢量图和电磁场各分量的等高图. 可以看到, 注入到组合波导中的电磁场分布为标准的扇形波导中的  $TE_{11}$  模式 [20].

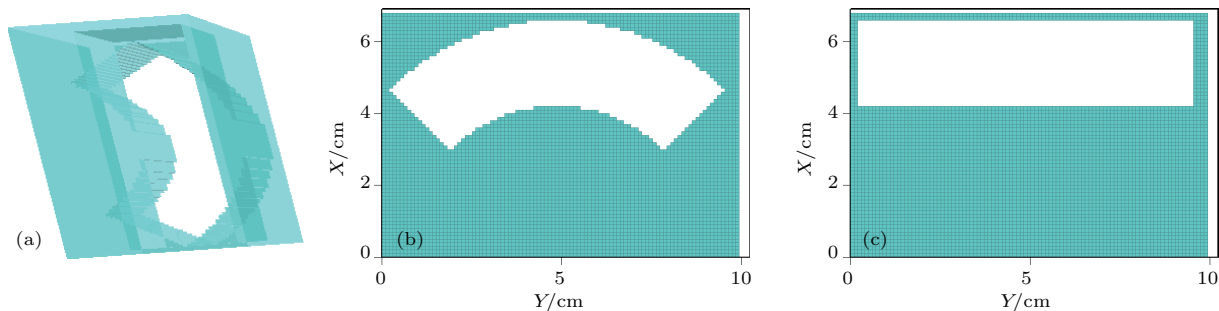


图7 含扇形波导和矩形波导的组合波导结构图 (a) 三维立体图; (b), (c) 不同区间的 X-Y 截面图, 分别对应  $0 \leq z \leq 26$  cm 和  $26 \text{ cm} < z \leq 52$  cm

Fig. 7. Schematic drawings of the combination waveguide with fan waveguide and rectangular waveguide: (a) Three-dimensional views from the outlet; (b) and (c) X-Y section in regions  $0 \leq z \leq 26$  cm and  $26 \text{ cm} < z \leq 52$  cm, respectively.

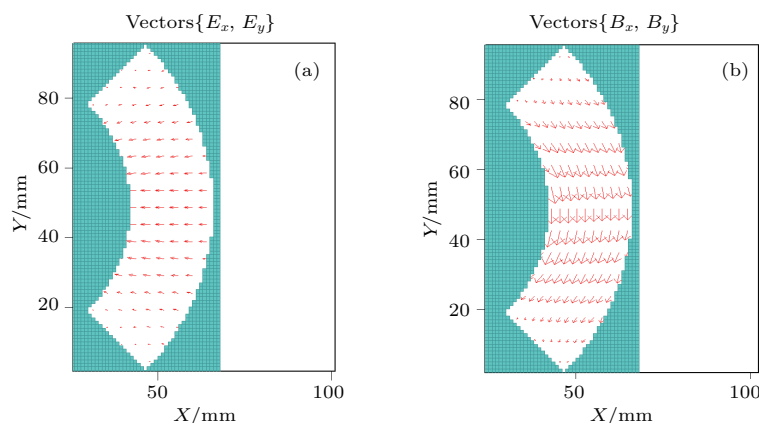


图8 扇形波导区电磁场分布的矢量图 (a) 电场; (b) 磁场

Fig. 8. Vector plots of the electromagnetic field on the cross section in the fan waveguide region: (a)  $E_x$  and  $E_y$ ; (b)  $B_x$  and  $B_y$ .

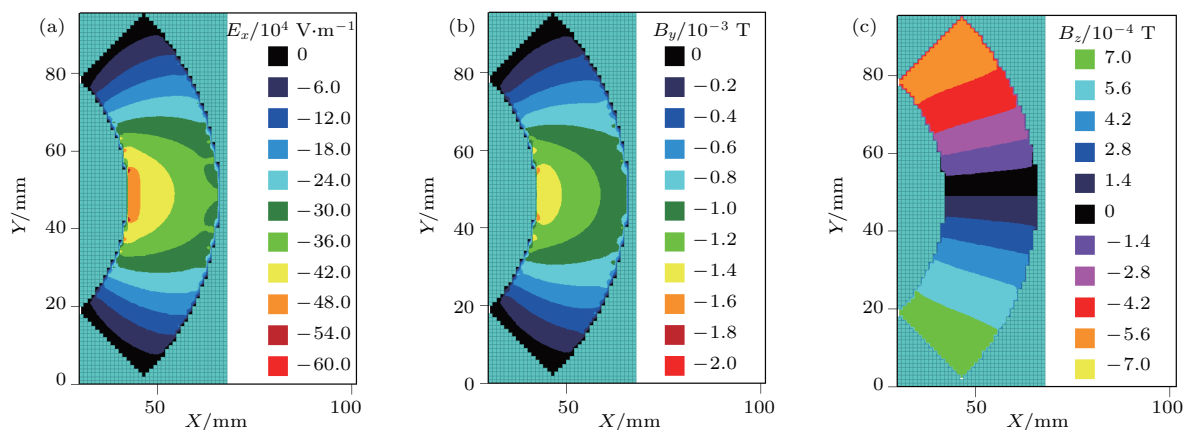


图9 扇形波导区电磁场各分量的等高图 (a)  $E_x$ ; (b)  $B_y$ ; (c)  $B_z$

Fig. 9. Contour plots of the electromagnetic field in the fan waveguide region: (a)  $E_x$ ; (b)  $B_y$ ; (c)  $B_z$ .

图10(a)和图10(b)、图11(a)—(c)分别给出了出口附近电磁场分布的矢量图和电磁场分量等高图. 可以看到, 组合波导输出的电磁场分布为标准矩形波导中的  $TE_{10}$  模式<sup>[20]</sup>.

图12给出了组合波导中辐射场沿轴向的传

输和模式转换过程. 图13给出了入口注入微波和出口输出微波的瞬时功率随时间的变化. 结合图12和图13可以看到, 两种波导结构的交界处 ( $z = 26$  cm) 模式转换自然, 从扇形波导入口注入到组合波导中的  $TE_{11}$  波几乎全部转换为出口处矩

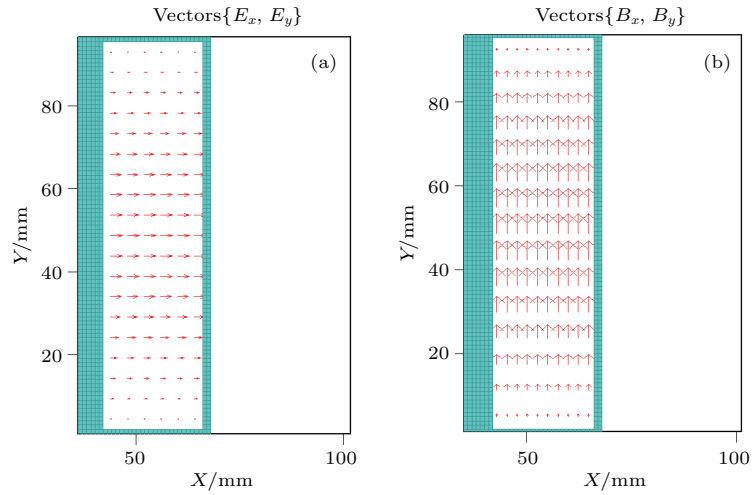


图 10 矩形波导区电磁场分布的矢量图 (a) 电场; (b) 磁场

Fig. 10. Vector plots of the electromagnetic field on the cross section in the rectangular region: (a)  $E_x$  and  $E_y$ ; (b)  $B_x$  and  $B_y$ .

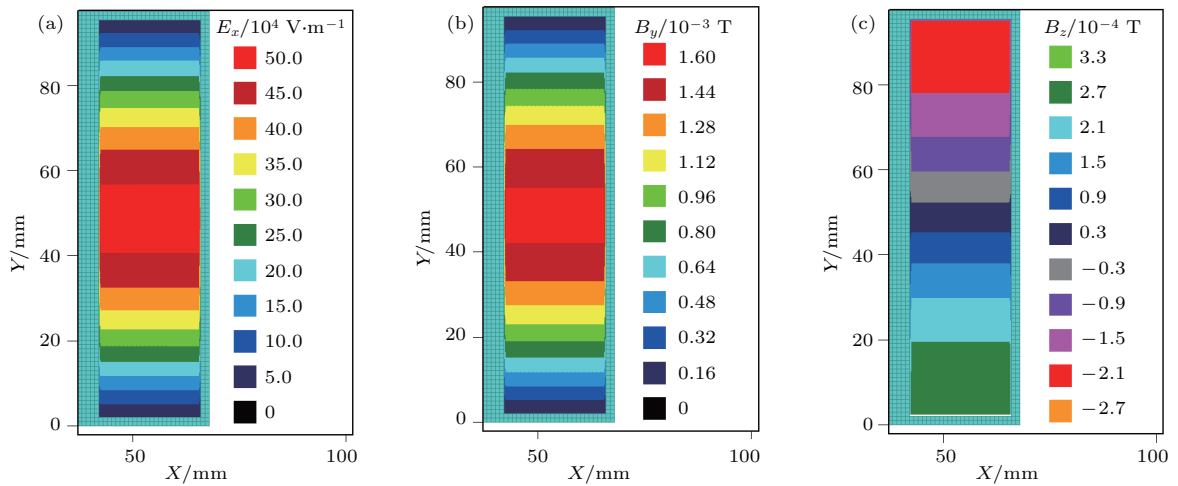


图 11 矩形波导区电磁场各分量的等高图 (a)  $E_x$ ; (b)  $B_y$ ; (c)  $B_z$

Fig. 11. Contour plots of the electromagnetic field in the rectangular region: (a)  $E_x$ ; (b)  $B_y$ ; (c)  $B_z$ .

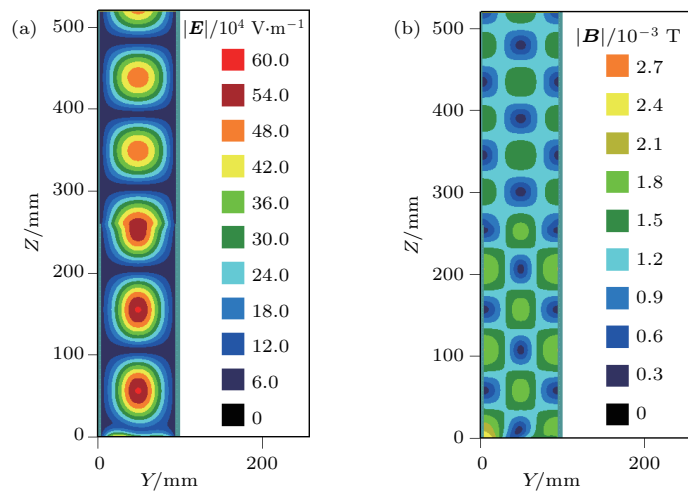


图 12 组合波导中纵截面 Y-Z 中电场和磁场模值的等高图 (a) 电场; (b) 磁场

Fig. 12. Contour plots of the amplitude of the electromagnetic field in the Y-Z cross section: (a) Electric field; (b) magnetic field.

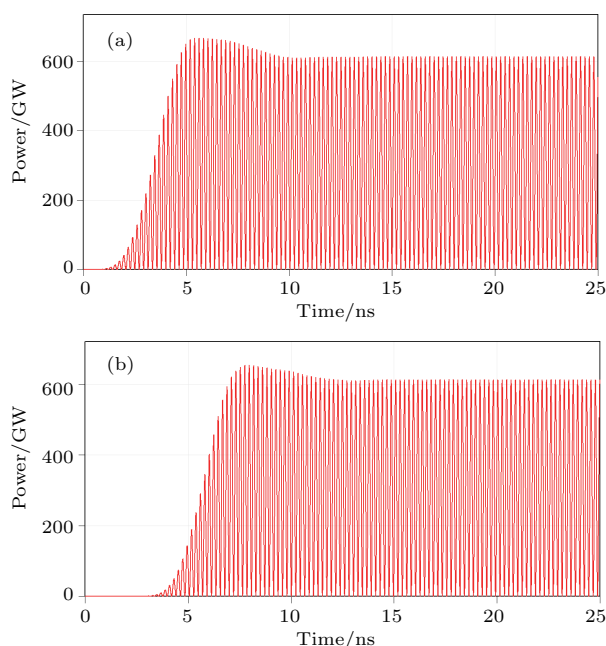


图13 入口和出口附近微波的瞬时功率随时间的变化 (a)  $z = 6.0$  cm; (b)  $z = 52.0$  cm  
Fig. 13. Time plot of the instantaneous microwave power near the inlet and the outlet at (a)  $z = 6.0$  cm, (b)  $z = 52.0$  cm.

形波导中的 $TE_{10}$ 模式. 上述研究结果表明了传统AS相对论磁控管中, 在输出区将三个扇形输出波导变换为三个截面接近的矩形输出波导, 从而输出的矩形波导 $TE_{10}$ 模式的可行性.

综上, 本文研究了两种AS相对论磁控管的模式输出转换结构的可行性. 从输出功率和转换后的模式看, 各有特点, 因此实际应用时, 可根据需要选择上述模式转换结构.

## 4 结 论

AS相对论磁控管具紧凑、高效和稳定性好的优点. 已有模拟结果表明该器件在S波段可以获得效率约50%的GW级高功率微波输出. 由于其输出区结构为三个相对独立的扇形波导, 为了进一步满足实际应用需求, 本文研究了两种输出模式转换结构. 首先研究了将三个扇形波导换为一个同轴波导的情况. 研究表明: 不论是采取直接突变还是渐变方式, 波导变换位置在较大范围内变化时, 器件输出功率都大于采用传统三个独立扇形波导输出功率的90%. 对于突变结构: 最优突变位置需离耦合输出孔远一点, 且输出功率对突变位置的变化略微敏感. 对于渐变结构, 波导变换位置可以离

耦合输出孔近一些, 输出功率对突变位置的变化不敏感. 其次研究了输出区由扇形输出波导变换为矩形输出波导的可行性. 为了使矩形输出波导横截面大小尽量接近相应的扇形波导, 矩形波导横截面的长边分别与扇形波导横截面内外圆弧相切, 短边过外圆弧的两个端点. 研究表明: 注入扇形波导中的 $TE_{11}$ 模式波几乎全部转换为矩形波导中的 $TE_{10}$ 模式. 实际应用时, 可根据需要选择上述输出模式转换结构. 研究结果为后续的实验研究和实际应用提供了相应的理论参考.

## 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.) pp54–57
- [2] Kim H J, Choi J J 2007 *IEEE Trans. Dielectr. Elect. Insul.* **14** 1045
- [3] Lau Y Y, Luginsland J W, Cartwright K L, Simon D H, Tang W, Hoff B W, Gilgenbach R M 2010 *Phys. Plasmas* **17** 033102
- [4] Liu M Q, Fuks M I, Schamiloglu E, Liu C L 2012 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **40** 1569
- [5] Leopold J G, Shlapakovski A S, Sayapin A, Krasik Y E 2015 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **43** 3168
- [6] Yang W, Dong Z, Yang Y, Dong Y 2014 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **42** 3458
- [7] Shi D F, Wang H G, Li W, Qian B L 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 151101 (in Chinese) [史迪夫, 王弘刚, 李伟, 钱宝良 2013 物理学报 **62** 151101]
- [8] Vintizenko I I, Mashchenko A I 2018 *Instrum. Exp. Tech.* **61** 65
- [9] Fuks M I, Kovalev N F, Andreev A D, Schamiloglu E 2006 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **34** 620
- [10] Daimon M, Jiang W 2007 *Appl. Phys. Lett.* **91** 191503
- [11] Fuks M I, Schamiloglu E 2010 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **38** 1302
- [12] Li W, Liu Y Q, Zhang J, Yang H W, Qian B L 2012 *Phys. Plasmas* **19** 113108
- [13] Leach C, Prasad S, Fuks M I, Buchenauer J, McConaha J W, Schamiloglu E 2017 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **45** 282
- [14] Jiang Y Q, Li T M, Hao J L 2016 *High Power Laser and Particle Beams* **28** 033003 (in Chinese) [姜亚群, 李天明, 郝晶龙 2016 强激光与粒子束 **28** 033003]
- [15] Greenwood A D 2006 *US Patent* 7 106 004 [2006-9-12]
- [16] Yang W Y, Dong Y, Dong Z W 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 248401 (in Chinese) [杨温渊, 董焯, 董志伟 2016 物理学报 **65** 248401]
- [17] Wang D, Qin F, Yang Y L, Zhang Y, Xu S 2016 *High Power Laser and Particle Beams* **28** 033013 (in Chinese) [王冬, 秦奋, 杨郁林, 张勇, 徐莎 2016 强激光与粒子束 **28** 033013]



- [18] Shi D F, Qian B L, Wang H G, Li W, Du G X 2017 *Sci. Rep.* **7** 1491
- [19] Shi D F, Qian B L, Wang H G, Li W, Du G X 2017 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **49** 465104
- [20] Zhang K Q, Li D J 2001 *Electromagnetic Theory in Mi-*

*crowaves and Optoelectronics* (1st Ed.) (Beijing: Publishing House of Electronics Industry) pp279–297 (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279—297页]

# Design and simulation of output mode conversion structure of relativistic magnetron with all cavity output\*

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

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

( Received 27 February 2018; revised manuscript received 4 June 2018 )

## Abstract

A relativistic magnetron using all cavity extraction and semi-transparent cathode has the virtues of compactness, high output power and high efficiency. The three-dimensional particle-in-cell simulations show that 1.15 GW output microwave with an efficiency about 50% can be obtained at S-band with pure TE<sub>11</sub> mode of the fan waveguide.

However, due to the fact that the output structure is composed of three detached fan waveguides, mode conversion structure in the output region is required for the convenience of practical applications. Therefore, two mode conversion structures are studied for the output mode conversion. The first structure is to widen gradually or abruptly the fan waveguide in the azimuthal direction from a given position (starting point) along the microwave transport direction. And then the three fan waveguides are connected into one coaxial waveguide. The effects of the position of the starting point on the beam-wave interaction and microwave extraction are numerically studied. For the convenience of description, we define  $L$  as the axial distance between the center of the output coupling hole and starting point. Simulation results show that for the abrupt and gradual variation case, when the length of  $L$  changes in a relatively wide region, the output power is larger than 1.0 GW in TEM mode at S-band. It is about 90% of the conventional fan waveguide with 1.15 GW. For the gradual variation case, the optimal value of  $L$  equals 10.0 cm, and the corresponding output power is beyond 1.0 GW. For the abrupt variation case, the optimal value of  $L$  equals 13.75 cm, the corresponding output power is about 1.15 GW. But in the abrupt variation case, the output power is a little more sensitive to the value of  $L$ . The second structure is to convert the fan waveguide into a rectangular waveguide. A compound waveguide composed of a section of fan waveguide and a section of rectangular waveguide is designed for studying its feasibility. In the compound waveguide, the wide edges of the cross section of the rectangular waveguide are tangent to the inner and outer arc of the fan cross section respectively. And the narrow edges cross the end points of the outer arc. Simulation results show that in the compound waveguide the microwave with TE<sub>11</sub> mode of the fan waveguide input at the inlet can be changed into the TE<sub>10</sub> mode of the rectangular waveguide at the outlet with almost no power loss. In all, the output microwave power larger than 1.0 GW could be obtained after using the two proposed mode conversion structures. In practical applications, one could choose the relevant mode conversion structure according to the requirement.

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

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

**DOI:** 10.7498/aps.67.20180358

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11305015, 11475155, 11875094) and the Science Foundation of China Academy of Engineering Physics (Grant No. 2015B0402091).

† Corresponding author. E-mail: yang\_wenyuan@iapcm.ac.cn