

# 2 $\pi$ 工作模式下可调谐同轴辐射相对论磁控管的模拟研究

李伟<sup>†</sup> 刘永贵

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 长沙 410073)

(2010年12月24日收到; 2011年8月9日收到修改稿)

采用三维粒子模拟, 开展了 2 $\pi$  工作模式下同轴辐射相对论磁控管的频率调谐研究. 利用在相互作用区的谐振腔中填充固体电介质来实现器件的频率调谐. 通过改变电介质的相对介电常数以及内半径考察了所研究的同轴辐射相对论磁控管的工作频率、平均输出功率以及效率的变化情况, 并对电介质的频率调谐作用进行了简单的理论分析. 模拟结果表明: 在不改变基本结构参数以及工作点的情况下, 仅调整固体电介质的相对介电常数或内半径实现了所研究的同轴辐射相对论磁控管 S 波段到 L 波段的跨频段调谐; 电介质的插入同时也改善了输出性能, 当相对介电常数在 6—15 且内半径在 4.18—4.40 cm 之间时, 功率效率得到提升, 提升幅度可达 80%, 单边调谐宽度小于 55%.

**关键词:** 频率调谐, 同轴辐射磁控管, 粒子模拟, 高功率微波

**PACS:** 84.40. Fe, 52.59. Ye, 52.65. Rr

## 1. 引言

同轴辐射相对论磁控管, 又称为具有衍射输出结构的相对论磁控管<sup>[1-9]</sup>, 它是将传统的相对论磁控管的微波提取结构从径向改为轴向, 从而实现微波直接轴向辐射的高功率微波源器件. 这种类型的相对论磁控管具有输出微波功率高、外加磁场紧凑以及直接辐射不同横电波 (TE 模) 的特点, 将有望成为最紧凑的窄带高功率微波源之一<sup>[4]</sup>. 目前, 这种类型的相对论磁控管还处于初步研究阶段, 主要的研究工作放在调整和优化结构上<sup>[3-6]</sup>. 但是, 作为一种最终要实现实际应用的高功率微波源, 在一些关键技术 (如频率调谐、长脉冲、高重复频率运行等<sup>[10]</sup>) 有必要开展相关的研究工作. 频率调谐是一种可以在同一个微波源器件上实现不同频率微波输出的技术, 具有很高的实用价值. 可是, 目前对同轴辐射相对论磁控管的频率调谐研究作者尚未见文献报道.

传统的相对论磁控管的频率调谐研究主要针对一种被称为旭日型<sup>[11-13]</sup>的磁控管开展. 通过改变

小阳极滑块的半径来实现频率调谐, 且已获得了 S 波段调谐带宽超过 30% 的结果<sup>[13]</sup>. 虽然同轴辐射相对论磁控管与传统的相对论磁控管的区别主要在于微波提取方式的不同, 但是由于同轴辐射相对论磁控管微波提取结构的特殊性, 即需要将阳极渐变到输出喇叭口面上, 因此又不能照搬旭日型结构的调谐方法. 为此, 本文开展了将固体电介质填充到同轴辐射相对论磁控管相互作用区的谐振腔中实现频率调谐的研究. 首先, 采用三维粒子模拟建立可调谐同轴辐射相对论磁控管模型, 确定变化参量和观测参量; 其次, 对工作频率、输出功率以及效率与电介质参量的变化关系进行分析, 并对调谐原理和现象进行简单的物理解释.

## 2. 调谐模型

图 1 所示为同轴辐射相对论磁控管的结构剖面, 其主要构成是磁控管以及连接在磁控管轴向末端的微波提取结构. 对于这种器件, 目前研究最多的要数 A6 型结构<sup>[4-7]</sup>, 通过改变 A6 型同轴辐射相对论磁控管微波提取结构中渐变腔的数目可以实

<sup>†</sup> E-mail: nuddt\_weili@yahoo.com

现  $TE_{31}$ ,  $TE_{01}$  或  $TE_{11}$  等模式的输出<sup>[5-7]</sup>. 因此, 本文针对一个 A6 型同轴辐射相对论磁控管开展频率调谐研究. 基本结构参数如下: 磁控管部分, 阳极半径  $R_a = 2.88$  cm, 阴极半径  $R_c = 1.58$  cm, 谐振腔半径  $R_o = 4.88$  cm; 微波提取结构采用 6 腔渐变, 内张角  $\alpha = 25^\circ$ , 外张角  $\beta = 90^\circ$ , 口面半径为 13 cm. 在外加电压为 600 kV 和磁感应强度为 0.31 T 的条件下, 器件可以工作在  $2\pi$  模式, 工作频率为 3.71 GHz, 输出平均功率为 580 MW, 峰值功率为 1.2 GW, 效率为 6.2%, 输出模式为  $TE_{01}$  模, 该模式的电场矢量分布如图 2 所示.

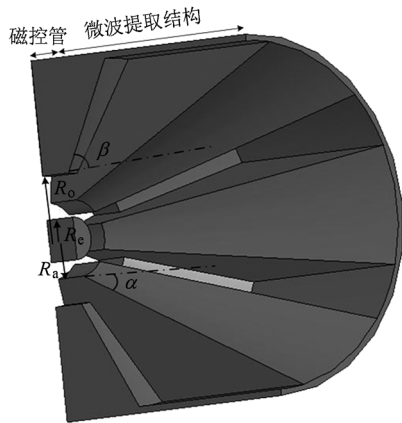


图 1 同轴辐射相对论磁控管结构剖面图

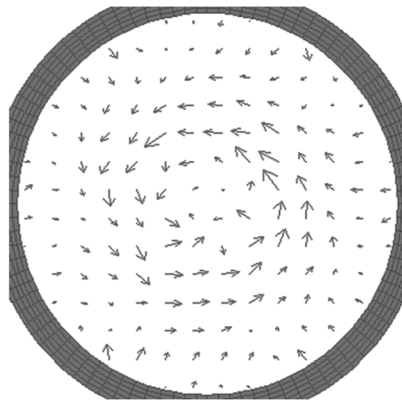


图 2 输出口面上的电场矢量分布

为了实现频率调谐, 将内半径为  $r$ 、外半径等于谐振腔半径  $R_o$  的固体电介质填充到同轴辐射相对论磁控管相互作用区的谐振腔中, 如图 3 所示, 电介质的相对介电常数为  $\epsilon$ .  $r$  和  $\epsilon$  均为变量. 利用三维粒子模拟, 保持器件的结构参数以及外加条件 (600 kV, 0.31 T) 不变的情况下, 考察工作频率、平均输出功率以及效率随  $\epsilon$  和  $r$  的变化情况.

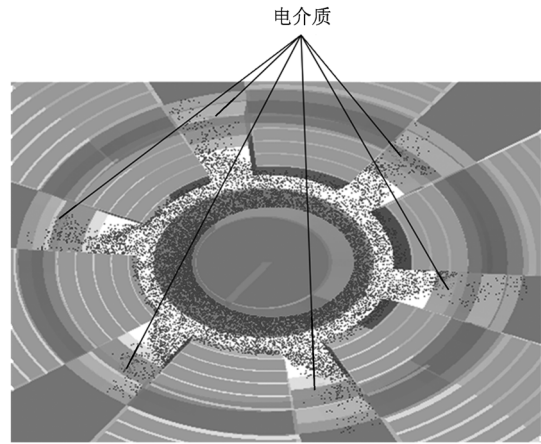


图 3 同轴辐射相对论磁控管谐振腔中的固体电介质以及电子轮辐图

### 3. 结果分析

图 4 所示为该同轴辐射相对论磁控管的工作频率  $f$  随  $\epsilon$  和  $r$  的变化关系. 从图 4 可以看出: 当电介质参数改变后, 器件的工作频率也随之发生变化, 将原本的 3.71 GHz 调整到小于 3 GHz 甚至小于 2 GHz, 实现了跨频段调谐. 当  $\epsilon$  一定时,  $f$  随着  $r$  的减小而降低, 存在类似于正切曲线的变化规律. 当  $r$  一定时,  $f$  随着  $\epsilon$  的增加而降低. 另外, 在模拟中发现, 当  $\epsilon > 25$  且内半径  $r < 3.96$  cm 时, 虽然  $f$  可以大幅度降低但工作模式越来越不稳定甚至出现停振.

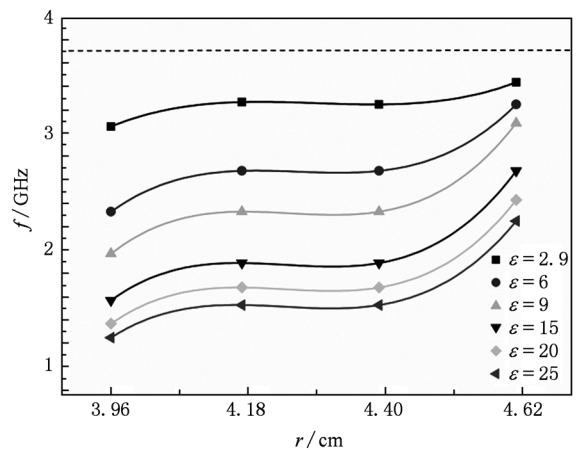


图 4 工作频率  $f$  与  $\epsilon$  和  $r$  的关系 水平虚线为无电介质填充时的工作频率

图 5 所示为平均输出功率  $P$  与  $\epsilon$  和  $r$  的变化关系. 从图 5 可以看出: 当  $\epsilon$  在 6—15 之间时, 出现了

$P$ 大幅度提高的情况;而当  $\varepsilon < 6$  或  $\varepsilon > 15$  时,根据  $r$  的不同, $P$  或提高或降低. 当  $\varepsilon > 20$  时, $P$  基本呈下降趋势,特别是当  $\varepsilon = 25$  时, $P$  下降到约 100 MW,降低了 82%.

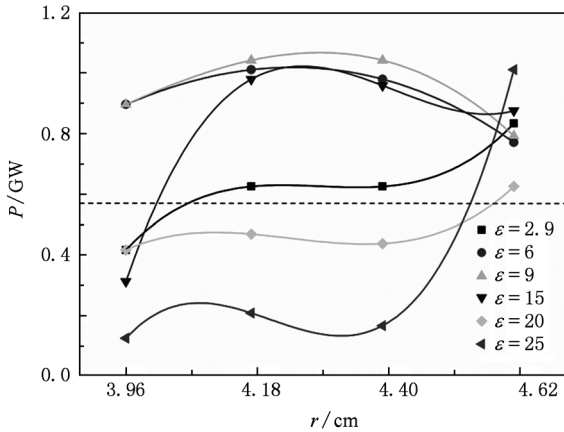


图5 平均输出功率  $P$  与  $\varepsilon$  和  $r$  的关系 水平虚线为无电介质填充时的平均输出功率

此外,功率提取效率随调谐带宽的波动情况也是衡量高功率微波源器件频率调谐优劣的关键指标之一. 因此,考察了调谐带宽  $df/f_0$  和效率波动率  $d\eta/\eta_0$  随  $\varepsilon$  的变化关系,所得结果如图 6 所示. 这里

$$df = f_0 - f,$$

其中  $f_0$  为未调谐时的工作频率(3.71 GHz);

$$d\eta = \eta - \eta_0,$$

其中  $\eta$  为介质参数改变后所得到的功率效率, $\eta_0$  为未调谐时的功率效率(6.2%). 从图 6 可以看出: $d\eta/\eta_0$  和  $P$  一样,同样存在提高或降低的两种情况. 当  $\varepsilon$  在 6—9 之间时,  $d\eta/\eta_0$  得到提升,最大提升约 80%,对应  $df/f_0$  为 40%;当  $\varepsilon > 20$  时,  $df/f_0$  增大的同时  $d\eta/\eta_0$  下降显著. 当  $\varepsilon = 25$  时,虽然  $df/f_0 > 60%$ ,但是  $d\eta/\eta_0$  降低 70% 以上.

由图 4—图 6 可知,当调谐带宽  $df/f_0 > 55%$ ,即  $f < 1.67$  GHz 时,输出功率  $P$  和效率  $\eta$  显著降低,不利于器件的正常工作. 因此,对于该同轴辐射相对论磁控管,最佳的调谐范围应控制在 55% 以内.

对于同轴辐射相对论磁控管中电介质的频率调谐作用可以简单解释如下:同轴辐射相对论磁控管中起束波转换作用的是相互作用区部分. 当电子与相互作用空间中的某个谐波同步时,即两者的相速度相同或相近时,电子的群聚以及群聚电子与波的换能才能发生. 而谐波的相速度  $v_p$  又是由角向周期变

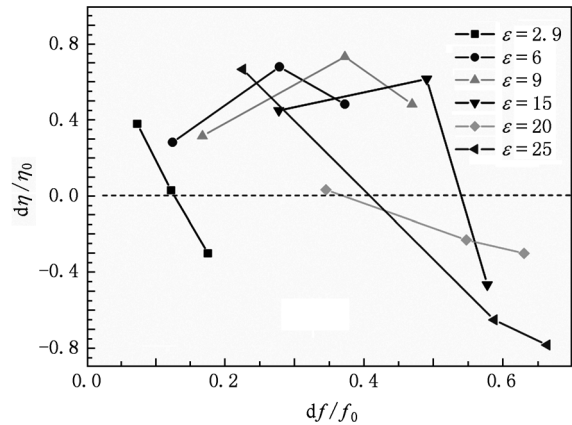


图6 不同  $\varepsilon$  下的调谐带宽  $df/f_0$  与效率波动率  $d\eta/\eta_0$  的对应关系 水平虚线为无电介质填充时的效率波动率

化的阳极慢波结构所决定的,与  $1/\sqrt{\mu\varepsilon}$  成正比. 因此,在结构参数不变的情况下,当慢波结构中的相对介电常数  $\varepsilon$  增加时,相速度将会减小,从而导致频率降低. 另外,当  $\varepsilon$  在 6—15 之间且  $r$  介于 4.18—4.40 cm 时,出现了  $P$  增大到约 1.05 GW 和  $d\eta/\eta_0$  提高到 80% 的情况. 这种情况在图 4 中对应于  $f$  在 1.9—2.7 GHz,说明该同轴辐射相对论磁控管的微波提取结构有利于这个频率范围内的微波输出. 对于提取结构对不同频率不同模式微波传输能力的分析可以用选优法<sup>[7]</sup>来解决.

## 4. 结 论

同轴辐射相对论磁控管由于其具有结构紧凑、输出微波功率高、可以直接辐射不同 TE 模式微波的特点,成为目前高功率微波源领域研究的热点之一. 本文采用三维粒子模拟对一个工作于  $2\pi$  模式的同轴辐射相对论磁控管开展了频率调谐研究. 通过将固体电介质填充到束波作用区的谐振腔中实现频率调谐. 改变电介质的相对介电常数  $\varepsilon$  以及内半径  $r$ ,考察了器件的工作频率、输出平均功率以及效率的变化情况. 结果表明:在不改变结构参数以及工作条件的情况下,仅调整所填充电介质的  $\varepsilon$  以及  $r$  就可以实现同轴辐射相对论磁控管的频率调谐. 此外,电介质的加入也改善了输出性能,当  $\varepsilon$  在 6—15 且  $r$  在 4.18—4.40 cm 的范围内时,功率效率得到提升,最大提升幅度约为 80%,单边调谐宽度小于 55%.

- [1] Kovalev N F, Kol'chugin B D, Nechaev V E, Ofitserov M M, Soluyanov E I, Fuks M 1977 *Sov. Tech. Phys. Lett.* **3** 430
- [2] Kovalev N F, Kolomenski A A, Krastelev E G, Kuznetsov M I, Maine A M, Nechaev E V, Ofitserov M M, Papdichev V A, Petelin M I, Fuks M, Chekanova L N 1980 *Sov. Tech. Phys. Lett.* **6** 197
- [3] Fuks M, Schamiloglu E 2002 *Proc. SPIE* **4720** 18
- [4] Fuks M, Kovalev N F, Andreev A D, Schamiloglu E 2006 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **34** 620
- [5] Daimon M, Jiang W H 2007 *Appl. Phys. Lett.* **91** 191503
- [6] Li W, Liu Y G 2009 *J. Appl. Phys.* **106** 053303
- [7] Li W, Liu Y G 2010 *J. Appl. Phys.* **108** 113303
- [8] Li W, Liu Y G 2011 *Phys. Plasmas* **18** 023103
- [9] Fuks M, Schamiloglu E 2010 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **38** 1302
- [10] Benford J 2010 *International Conference on CAVMAG* (Bournemouth; IEEE) p40
- [11] Treado T A, Doggett W O, Thomas G E 1988 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **16** 237
- [12] Lemke R W, Genoni T C, Spencer T A 2000 *Phys. Plasmas* **7** 706
- [13] Levine J S, Harteneck B D, Price H D 1995 *Proc. SPIE* **2557** 74

## Simulation investigation of the $2\pi$ mode operating tunable relativistic magnetron with axial radiation

Li Wei<sup>†</sup> Liu Yong-Gui

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

(Received 24 December 2010; revised manuscript received 9 August 2011)

### Abstract

A tunable relativistic magnetron with axial radiation operating at  $2\pi$  mode is investigated by three-dimensional particle-in-cell simulation in this paper. The tuning is realized by filling solid dielectric material into the cavities of the interaction region. The effects of changing the relative permittivity and the inner radius of the dielectric material on the operating frequency, the average output power and the efficiency are analyzed. Then the principle of the tuning is demonstrated. The simulation results show that under the unchanged structure parameters and the work point, the relativistic magnetron realizes the tuning from S band to L band by varying the relative permittivity or the inner radius of the solid dielectric material. Furthermore, with inserting the dielectric material, the output capability of the relativistic magnetron is improved. When the relative permittivity is 6—15 and the radius is 4.18—4.40 cm, the increase in efficiency can reach 80%, the decreased frequency range is less than 55%.

**Keywords:** frequency tuning, magnetron with axial radiation, particle-in-cell simulation, high power microwave

**PACS:** 84.40. Fe, 52.59. Ye, 52.65. Rr

<sup>†</sup> E-mail: nudt\_weili@yahoo.com