

# 8mm 回旋速调管的模拟设计与实验

喻 胜, 牛新建, 李宏福, 赵 青, 罗 勇, 邓 学, 徐 勇, 王 晖  
谢仲怜, 王 丽, 刘迎辉, 杨 鸣  
(电子科技大学高能电子研究所, 四川成都 610054)

摘 要: 设计了 8mm 波段回旋速调管, 并进行了热测实验, 在中心频率 34GHz 下, 得到了最大脉冲功率 172kW, 最大平均功率大于 2kW, 增益 31.9dB, 电子效率 23.4%, 3dB 带宽 280MHz.

关键词: 8mm; 回旋速调管; 模拟设计

中图分类号: TN12 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112 (2006) 12A-2541-03

## Simulation Design And Experiment of An 8mm Gyroklystron Amplifier

YU Sheng, NIU Xirr jian, LI Hong fu, ZHAO Qing, LUO Yong, DENG Xue, XU Yong, WANG Hui  
XIE Zhong lian, WANG Li, LIU Ying hui, YANG Ming

(Research Institute of High Energy Electronics, University of Electronics Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China)

Abstract: Basing on the simulation of magnetron injection gun, cavities and interaction between electron beam and wave, the design and experiment of 8mm four cavity gyrokylytron are reported. Initial experiments show an efficiency of 23.4%, a 3dB bandwidth of 280MHz, and a saturated gain of 31.9dB which corresponds to peak power of 172kW and average power of 2kW.

Key words: 8mm; gyrokylytron; simulation design

### 1 引言

回旋速调管是以相对论质量效应为基础的新型大功率毫米波回旋器件的一个重要品种, 它具有功率大、增益与效率高, 且有一定带宽的特点, 在雷达、通讯、等离子体加热及工业处理等领域有广泛的应用前景, 在国际上受到高度重视, 特别是美、俄等强国. 俄罗斯科学院应用物理研究所 (IAP) 与 Toriy 等工业联合体研制与生产了一批高水平的回旋速调管<sup>[1~4]</sup>, 其中一支 8mm 波段二腔回旋速调管, 峰值功率达 750kW、平均功率 5kW、增益 20dB、带宽 0.6%、效率 24%. 俄国研制的另一支 8mm 回旋速调管 (三腔), 峰值功率为 250kW、平均功率 1.2kW、增益高达 40dB、相对带宽 1.4%、效率 35%. 美国海军研究室研制一支 8mm 回旋速调管 (二腔)<sup>[5]</sup>, 峰值功率为 210kW、增益 23.6dB、相对带宽 0.36%、效率 37%. 本文在磁控注入电子枪、高频输入及注波互作用的模拟分析基础上, 设计了 8mm 波段回旋速调管, 并进行了热测实验, 得到了如下初步结果, 在中心频率 34GHz 下, 最大脉冲功率为 172kW, 最大平均功率大于 2kW, 增益 31.9dB, 电子效率 23.4%, 3dB 带宽 280MHz.

### 2 高频结构的模拟

#### 2.1 输入腔

输入腔为同轴谐振腔 (外腔) 与圆柱腔 (内腔, 电子注通过

其中) 的组合. 采用圆波导输入, 前级放大链输出的矩形波导, 通过方圆过渡将矩形波导的  $H_{10}$  模变为圆波导的  $H_{11}$  模, 再输入外腔激励起外腔中的  $H_{411}$  模, 并通过内、外腔间壁上的隙缝在内腔中激励起  $H_{011}$  模, 在用近似方法进行初步设计的基础上, 再用 HFSS 软件对它进行了详细数值计算, 计算所得场分布如图 1 所示. 我们通过改变内、外腔尺寸, 改善了谐振腔高频输入特性.

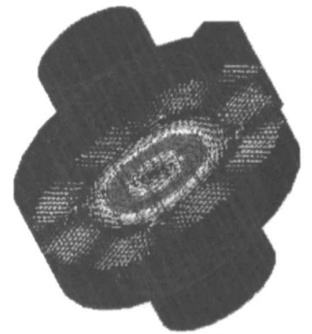


图 1 输入腔场分布

#### 2.2 中间群聚腔

中间两个谐振腔为两端开孔 (电子注通道) 并涂有衰减层的圆柱形腔, 如图 2 所示. 由分区求解、本征模展开, 突变面边界匹配的办法解决



了腔体计算问题, 同时用 HFSS 软件进行了模拟 (图 3), 实践中设法控制衰减层厚度以调节谐振频率与 Q 值, 使群聚腔问题得到解决.

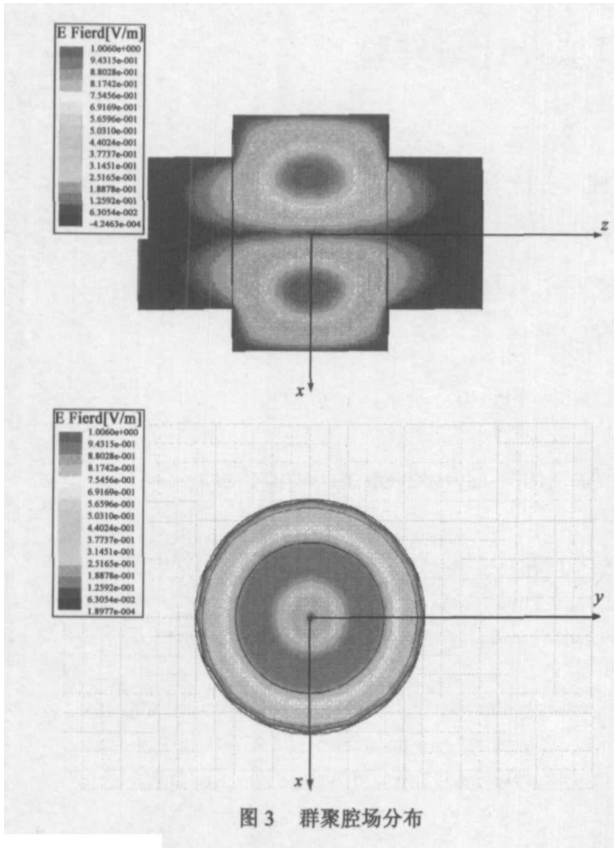


图 3 群聚腔场分布

### 2.3 输出腔

如图 4 所示, 输出腔为具有多级突变结构的开放式谐振腔, 我们用分区求解、本征模展开、界面匹配的办法处理突变面, 并将突变面两侧入射波与散射波写成散射矩阵, 腔中均匀段与渐变段均写成散射矩阵形式, 然后用矩阵级联, 将整个开放腔写成总的散射矩阵, 用此办法处理输出开放腔的计算问题, 简化了数值计算, 较好解决了腔体问题, 用 HFSS 软件进行计算, 两者结果符合很好. 图 5 给出了输出腔中电场幅值曲线.

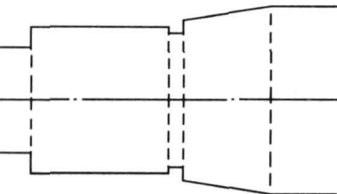


图 4 输出腔

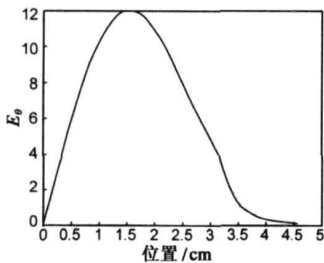


图 5 电场幅值曲线

### 3 双阳极磁控注入电子枪研究的模拟

我们自主发展了磁控注入电子枪的大型数字模拟的程序软件, 并利用此软件, 对用于基波回旋速调管的双阳极磁控注入电子枪进行了详细模拟计算, 对电极形状、尺寸、阳极电压、阴极区磁场及过渡区磁场分布、电流大小等各种因素对电子枪性能的影响进行了详细数值模拟, 优化了电子枪的结构尺寸. 双阳极电子枪电极形状、等位线分布、电子轨迹及纵向磁

场分布如图 6 所示<sup>[6]</sup>.

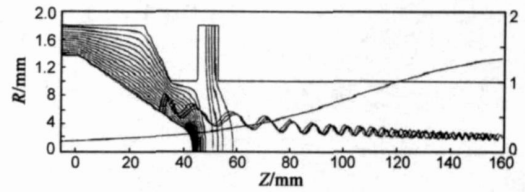


图 6 双阳极电子枪计算结果

### 4 注一波相互作用的模拟

我们利用 MAGIC 软件对回旋速调管从电子枪阴极电子发射, 注波相互作用至电子回收进行全程粒子模拟. 通过大量模拟计算, 分析了电参量及高频参量对放大器增益、效率及输出功率的影响. 图 7 给出了回旋速调管放大器粒子模拟模型及稳态下电子的空间分布.

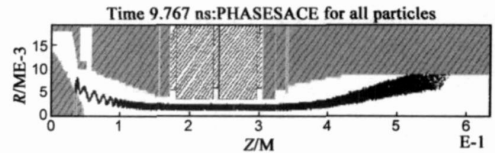


图 7 回旋速调管放大器粒子模拟模型及稳态电子空间分布

### 5 整管设计

在高频结构、磁控注入电子枪及注一波相互作用模拟分析的基础上, 我们通过优化, 得到了输出功率 200kW, 相互作用效率 30%, 饱和增益大于 30dB, 3dB 带宽大于 200MHz 的回旋速调管放大器设计方案. 各腔体参数如表 1 所示, 主要电参量如表 2 所示.

表 1 各腔体的谐振频率与 Q 值

	谐振频率 $f_0$ (GHz)	Q 值
第一腔	34	170
第二腔	33.8	100
第三腔	33.5	120
第四腔	33.9	150

表 2 主要电参量

电子注电压 $U$	68kV
电子注电流 $I$	12A
$\alpha$ 值	1.5
回旋中心半径 $r_0$	2.2mm
磁场 $B_0$	1.33T

### 6 热测结果与分析

研制的 8mm 回旋速调管(如图 8 所示) 经过测试, 最大脉冲功率 172kW, 3dB 带宽 280MHz, 最大平均功率 2016W, 增益 31.9dB, 电子效率 23.4%. 实验测试结果与理论设计参数有一定差距, 特别是相互作用效率及输出功率, 主要原因之一在于, 在制管过程中由于加工工艺及整管装配引起的误差, 导致了高频参量的误差, 另外, 实验测试过程中所测输出功率未考虑外接波导损耗及功率计水负载反射的影响. 本项计算与实验工作只是初步的, 进一步



图 8 回旋速调管样管照片

改进与实验正在进行中.

#### 参考文献:

- [1] I I Antokov, E V Zasykin, E V Sokolov. 35GHz radar gyrokystron[A]. J R Birch and T J Parker, Eds, Colchester. Proc. 18<sup>th</sup> Int Conf IR & MM Wave[C]. UK: 1993. 338- 339.
- [2] E V Zasykin, M A Moiseev, E V Sokolov, et al. Effect of penultimate cavity position and tuning on three cavity gyrokystron amplifier performance[J]. Int J Electronics, 1995, 78 ( 2): 423- 433.
- [3] E V Zasykin, M A Moiseev, I G Gachev, et al. Study of high harmonic Ka band second harmonic gyrokystron amplifier[J]. IEEE Trans on Plasma Sci, 1996, 24( 3) : 666- 670.
- [4] Antokov I I, Zasykin E V, Sokolov E V. 35GHz radar gyrokystron[A]. Colchester. Proc of 18<sup>th</sup> Int Conf IR & MM Waves[C]. UK: 1993. 338- 339.
- [5] Choi J J, McCurdy, et al. Experimental investigation of a high power, two cavity, 35GHz gyrokystron amplifier [ J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1998, 26( 3) : 416- 425.
- [6] 赵青, 李宏福, 等. 双阳极磁控注入枪束流特性的研究 [J]. 强激光与粒子束, 2004. 16( 6): 764- 766.
- Zhao Q, Li H F, et al. Study on beam characteristics of a double anode magnetron injection gun[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2004. 16( 6): 764- 766. ( in Chinese)

#### 作者简介:

喻 胜 男, 1970 年生, 博士, 电子科技大学副教授、硕士生导师. 主要从事相对论电子学、微波电子学、高功率微波等领域的研究.  
E-mail: yush@ uestc. edu. cn