

# 高次模多注速调管的矩形双间隙输出腔的研究<sup>1</sup>

陈新桥 朱允淑 丁耀根

(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

**摘 要** 研究一种工作在  $TM_{120}^{2\pi}$  高次模的速调管矩形双间隙输出腔模型。运用 Mafia 三维电磁场计算软件对模型进行计算机模拟, 得出  $TM_{120}^{2\pi}$  工作模式的频率、特性阻抗和场分布。加工了  $TM_{120}^{2\pi}$  高次模多注速调管双间隙输出腔模型并进行冷测试, 测试结果与计算相符, 并对计算和测试结果进行了分析。对该模型的研究为进一步研制工作在  $TM_{120}^{2\pi}$  高次模多注速调管的高频输出系统提供了理论依据。

**关键词** 多注速调管, 高次模, 特性阻抗  $R/Q$ , 双间隙耦合腔

**中图分类号** TN122, TN815

## 1 引 言

目前, 多注速调管的高频谐振腔采用圆柱形重入谐振腔, 工作模式多采用  $TM_{010}$  基模<sup>[1]</sup>。速调管的漂移头的直径取决于导流系数和阴极容许承受的发射电流密度。对于工作在基模的多注速调管而言, 它的谐振腔的漂移头要容纳多个电子注通道, 因而其直径要比普通单注速调管的大得多, 一般漂移管的直径为谐振腔直径的  $1/2 \sim 3/4$ 。大漂移头造成外层电子注通道的微波电磁场小于内层电子注通道的微波电磁场, 将影响电子注与微波电磁场的有效相互作用, 从而导致多注速调管的相互作用效率的降低。随着工作频率的提高, 谐振腔体积进一步减小; 如果漂移头直径不变的话, 内外层电子注通道的微波电磁场差别将进一步加剧; 如果漂移头直径减少的话, 为了使导流系数不变, 势必要提高阴极的电流发射密度。另外, 随着漂移头直径的增大, 谐振腔特性阻抗  $R/Q$  也要下降。从此分析可见, 工作在基模的多注速调管, 由于受到阴极发射电流密度, 漂移头直径大小的限制, 也就是阴极有效电子发射面积的限制, 其输出功率将受到限制。目前工作在基模的多注速调管在低频段, 其输出功率可达几百千瓦至几兆瓦, 而在高频段, 其输出功率仅几千瓦至几十千瓦。通常, 窄带管要比宽带管的输出功率高一些。

为了突破工作在基模的多注速调管在高频下的输出功率的限制, 一种有效的途径是发展工作在高次模的多注速调管。在高次谐振模式下工作, 可以增大腔体的尺寸, 增加漂移头的截面积, 从而增加电子束和阴极的面积, 减轻阴极的负载, 增加电子枪的导流系数, 降低管子的工作电压, 提高功率容量, 获得高的脉冲功率和平均功率输出。这类器件可广泛应用于雷达发射机系统, 具有广泛的应用前景。研制这类速调管的关键问题之一是研究工作在高次模式的高频谐振系统。目前, 一些研究单位已经展开了高次模的多注速调管的研究<sup>[2,3]</sup>。本文对工作在  $TM_{120}^{2\pi}$  高次模的多注速调管的矩形输出腔进行理论和实验研究, 得出了工作模式的主要物理参量和实验数值, 为进一步研制工作在  $TM_{120}^{2\pi}$  高次模速调管高频输出系统提供理论依据。

## 2 矩形双间隙输出腔的设计

高次模多注速调管的谐振腔可以采用矩形腔、圆柱腔和同轴腔<sup>[4]</sup>。我们采用矩形腔为模型进行研究。为了利于电子注与高频电场相互作用, 在矩形谐振腔中我们采用  $TM_{mnp}$  模为工作模式,  $TM_{mnp}$  模的电场分布为

<sup>1</sup> 2002-01-28 收到, 2002-04-26 改回  
国家自然科学基金资助项目 (69771002)

$$E_x = -\frac{k_x \beta}{k_c^2} E_{zm} \cos(k_x x) \sin(k_y y) \sin \beta z;$$

$$E_y = -\frac{k_y \beta}{k_c^2} E_{zm} \sin(k_x x) \cos(k_y y) \sin \beta z;$$

$$E_z = E_{zm} \sin(k_x x) \sin(k_y y) \cos \beta z$$

其中  $k_c^2 = k_x^2 + k_y^2 = (m\pi/a)^2 + (n\pi/b)^2$ ,  $\beta = p\pi/c$ ,  $f = (C/2)\sqrt{(m/a)^2 + (n/b)^2 + (p/c)^2}$ ,  $f$  为腔体的谐振频率,  $m(n) = 1, 2, 3, \dots$ ,  $p = 0, 1, 2, 3, \dots$ ,  $b, a, c$  分别为矩形腔的长、宽和高。

从电场分布函数可见, 当  $p = 0, m, n \neq 0$  时,  $E_z = E_{zm} \sin(k_x x) \sin(k_y y)$ ,  $E_x = 0, E_y = 0$ ,  $TM_{110}$  为基模。可见,  $TM_{mn0}(n > 1, \text{ 或 } m > 1)$  为高次模, 比如可选  $TM_{120}$ 、 $TM_{210}$ 、 $TM_{310}$  等为工作模式。选择的工作模式越高, 可放置的漂移头位置越多, 提高的输出功率的容量越大, 但需要抑制的杂模就越多。为便于研究, 选择最简单的高次模  $TM_{120}$  为工作模式。对于矩形腔的  $TM_{120}$  模, 有  $E_z = E_{zm} \sin(\pi x/a) \sin(2\pi y/b)$ ,  $E_x = 0, E_y = 0$ , 为了利于两组漂移头间隙处电场分布的均匀性, 选  $b = 2a$ 。

双间隙耦合腔输出电路是一种有效展宽速调管输出段带宽的方法, 现有多注速调管输出腔多数采用双间隙耦合腔结构<sup>[5]</sup>。由于耦合缝的存在, 谐振腔中的每个模式都分解成为  $\pi$  模和  $2\pi$  模两个模式。一般而言, 对于工作在低频段速调管, 谐振腔体积较大, 为了缩小谐振腔间隙的距离, 采用  $\pi$  模工作方式, 对于工作在高频段速调管, 谐振腔的体积较小, 为了增加谐振腔的间隙距离, 采用  $2\pi$  模工作方式。高次模多注速调管是为了在高工作频率下获得高输出功率,

所以我们采用  $2\pi$  模为工作模式。谐振腔与波导的耦合方式, 一般分为环耦合和缝耦合两种, 根据  $\pi$  模和  $2\pi$  模的场分布特点, 一般  $\pi$  模采用环耦合,  $2\pi$  模采用缝耦合, 据此我们设计的双间隙耦合腔采用缝耦合。为了保证耦合孔对上下漂移头间隙场的影响一样, 谐振腔与波导的耦合方式采用波导与两个谐振腔同时耦合, 上下对称耦合。

根据上面分析, 我们设计和加工了工作频率为 5.6GHz C 波段的双间隙耦合矩形谐振腔, 采用  $TM_{120}^{2\pi}$  的高次模为工作模式。

模型的结构如图 1 所示。

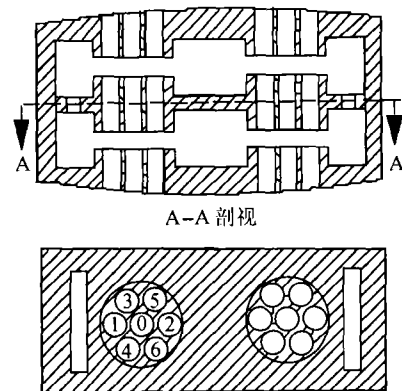


图 1  $TM_{120}$  模双间隙耦合腔结构示意图

### 3 模型的计算与测试

采用三维电磁场软件 Mafra 和 ISFEL3D 对上述矩形双间隙输出腔模型进行计算, 得出各个模式的场分布图, 这里仅给出  $TM_{120}^{2\pi}$  这个模式电场  $E_z$  的二维分布图, 如图 2 所示。

#### 3.1 谐振频率

表 1 给出计算和测试模型的前面 4 个模式的谐振频率。表中  $\Delta f = f_{2\pi} - f_{\pi}$  为  $TM_{120}^{2\pi}$  与  $TM_{120}^{\pi}$  的频率差,  $f_c$  为计算频率,  $f_m$  为测量频率。冷测数据与计算值略有不同, 部分原因来源于计算的物理模型和数学处理方式与实际的偏差。部分原因来源于测量误差。

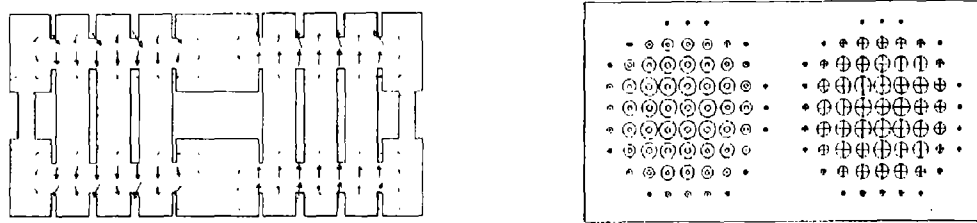


图 2  $TM_{120}^{2\pi}$  模二维电场分布图

表 1 模型的前 4 个谐振频率

模式	$TM_{110}^{\pi}$	$TM_{110}^{2\pi}$	$TM_{120}^{\pi}$	$TM_{120}^{2\pi}$	$\Delta f = f_{2\pi} - f_{\pi}$	$\Delta f/f_{2\pi}$
$f_c$	4827	4910	5527	5692	165	2.9%
$f_m$	4790	4980	5460	5736	276	4.8%

### 3.2 $TM_{120}^{2\pi}$ 的特性阻抗 $R/Q$

表 2 给出各漂移小孔间隙处的  $R/Q$  数值, 编号 0 为中心漂移孔, 1~6 分别为同一圆周上均匀分布的 6 个漂移孔的编号, 小孔编号见图 1 的 A-A 剖视图。

从表 2 中的数据可见, 冷测结果比计算值略小, 根据表 2 计算的数据可得出  $K = (R/Q)_{\max}/(R/Q)_{\min} = 1.27$ ,  $(R/Q)_{\text{平均}} = 49.7$ 。由各漂移小孔间隙处  $R/Q$  值可见, 各小孔间隙处场强分布不均匀, 中心部位的漂移头间隙场强比边缘的要强, 在漂移头同一圆周上的各小孔间隙处  $R/Q$  值相差也较大, 靠近腔中心的电场强度比靠近窄边的要弱。这主要是由于靠矩形腔窄边开有耦合槽, 对一个漂移头来说, 造成了两边结构不对称。冷测数据比计算值略小, 对于工作在基模的谐振腔漂移头而言, 同一圆周上的各小孔间隙处  $R/Q$  值相差一般较小。

表 2 各漂移孔间隙的  $R/Q$

小孔编号		0	1	2	3	4	5	6
$R/Q$	计算	58.9	48.7	46.4	48.3	48.3	47.3	47.3
	测量	58.5	48.3	46.1	48.0	48.0	47.1	47.2

### 3.3 耦合槽长度对工作模式的 $R/Q$ 和 $f$ 的影响

表 3 给出计算出的工作模式的  $R/Q$  和  $f$  随耦合槽的长度的变化而变化的数据。表 3 中  $d$  表示耦合槽的长度,  $f_1, f_2, f_3, f_4$  分别代表  $TM_{110}^{\pi}, TM_{110}^{2\pi}, TM_{120}^{\pi}, TM_{120}^{2\pi}$  的谐振频率, 0~6 表示漂移孔的编号, 定义同表 2。从计算和测试可见, 模型的  $TM_{120}^{2\pi}$  模与  $TM_{120}^{\pi}$  的频率间隔不够, 这样影响了输出段带宽。这说明耦合槽的长度不够。当  $d$  从 18mm 增加到 20mm,  $\Delta f/f_{2\pi}$  从 2.9% 增加到 5.1%, 可见,  $2\pi$  和  $\pi$  模的间隔随耦合槽的长度增加而增加, 同时频率有所下降, 间隙的电场均匀性下降。这是由于随着耦合槽的长度增加, 腔体的体积增大, 导致频率降低, 耦合槽对电场的影响增大。

表 3  $R/Q$  和频率随耦合槽长度  $d$  的变化

$d$ (mm)	$f_1$ (MHz)	$f_2$ (MHz)	$f_3$ (MHz)	$f_4$ (MHz)	$R/Q$						$(R/Q)_{\text{平均}}$	$K$	
					0	1	2	3	4	5			6
18	4933	5071	5643	5854	58.9	48.7	46.4	48.3	48.3	47.3	47.3	49.7	1.27
20	4884	5065	5552	5847	60.1	51.8	46.3	53.9	51.6	47.6	44.7	50.7	1.34

## 4 结束语

通过计算和测试我们得到一些初步结论。  $TM_{110}$  基模场强度较强,  $TM_{120}$  高次模场强较

弱,  $TM_{120}$  模的场与电子注的相互作用强度低于  $TM_{110}$  模的场; 与圆柱腔相比, 矩形腔同一圆周上的漂移头电子注通道上的  $R/Q$  差别较大, 电场分布不对称, 这将进一步影响速调管的效率,  $2\pi$  和  $\pi$  模的间隔随耦合槽的长度增加而增加, 但同时间隙处的场分布均匀性随之变差。

进一步研究的问题: (1) 杂模的抑制。采用  $TM_{120}^{2\pi}$  的高次模为工作模式时, 同时存在  $TM_{120}^{\pi}$ ,  $TM_{110}^{2\pi}$  和  $TM_{110}^{\pi}$  3 个杂模, 是要设法抑制的模式。由于采用的是缝耦合, 谐振腔中存在的各种模式中主要是  $2\pi$  模耦合到波导, 也就是  $TM_{110}^{2\pi}$ 、 $TM_{120}^{2\pi}$  等  $2\pi$  模耦合出去, 因此, 最主要的是抑制的杂模  $TM_{110}^{\pi}$  基模; (2) 波导与腔的耦合。 $TM_{120}^{2\pi}$  与波导的耦合采用缝耦合, 实验和计算均显示耦合孔的大小尺寸对工作模的频率、 $R/Q$  和场分布有较大的影响, 须进一步研究腔体与波导的耦合方式; (3) 需进一步研究耦合缝的形状和大小, 在对间隙的场影响最小的情况下, 获得所需  $2\pi$  和  $\pi$  模的间隔, 我们尝试过把直耦合槽变成圆弧耦合槽, 进行了计算, 计算结果显示圆弧状的耦合槽对场的均匀性影响比直耦合槽小; (4) 滤波器加载高次模谐振腔。滤波器加载谐振腔会对输出腔的两组漂移头间隙的电场影响不同, 导致这两组漂移头与电子注作用效率不同, 影响整管的效率, 需进一步研究滤波器加载输出腔的方式。

### 参 考 文 献

- [1] 丁耀根, 彭钧, 多注速调管——一种新型大功率微波放大器, 电子科学学刊, 1996, 18(1), 64-67.
- [2] R. H. Abrams, B. Leoush, A. A. Mondelli, R. R. Parker, Vacuum electronics for the 21 century, IEEE Trans. on Microwave Theory and Technology, 2001, 87(5), 65-66.
- [3] 张益林, 王定中等, 5cm 波段高次模多注速调管, 中国电子学会真空电子学分会第十三届学术年会, 贵阳, 2001, 85-88.
- [4] 丁耀根, 朱允淑, 多注速调管高次模谐振腔的研究, 中国电子学会真空电子学分会第十届学术年会论文集, 北京, 1995, 77-80.
- [5] 丁耀根, 多注速调管双间隙耦合腔特性的三维计算, 中国电子学会真空电子学分会第十一届学术年会论文集, 青岛, 1997, 122-124.

## STUDY OF RECTANGULAR DOUBLE GAP OUTPUT CAVITY OF HIGH MODE MULTI-BEAM KLYSTRON

Chen Xinqiao    Zhu Yunshu    Ding Yaogen

(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**Abstract** In this paper, a kind of rectangular double gap output cavity model is studied. Simulation of the model with Mafia and ISFEL3D, three dimension electromagnetic field calculation software, is given. The frequency, characteristic impedance and field distribution of operating mode  $TM_{120}^{2\pi}$  are obtained. The model is made and the test result of the model accords with the calculation. The analysis of the test and calculation is given. The study of this model has provided the foundation for further development of  $TM_{120}^{2\pi}$  high order high frequency output system of multi-beam Klystron.

**Key words** Multibeam Klystron, High order mode, Characteristic impedance, Double gap coupling cavity

陈新桥: 男, 1965 年生, 讲师, 研究方向为大功率微波器件。  
朱允淑: 女, 1942 年生, 研究员, 研究方向为大功率微波器件。  
丁耀根: 男, 1942 年生, 研究员, 研究方向为大功率微波器件。