

## 用于 L 波段多注速调管的半波长矩形同轴腔研究

沈斌\*\*\* 丁耀根\*

\*(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

\*\* (中国科学院研究生院 北京 100039)

**摘要:** 本文研究了适合于低频段宽带多注速调管的新型微波谐振腔——半波长矩形同轴腔, 用三维电磁场计算软件ISFEL3D计算了矩形同轴腔的高频参数和场分布, 并与双间隙耦合圆柱腔进行了分析比较。结果表明, 矩形同轴腔体积小, 带宽潜力大, 可应用于低频段多注速调管。

**关键词:** 宽带多注速调管, 半波长, 矩形同轴腔, 特性阻抗,  $\pi$  模

中图分类号: TN122 文献标识码: A 文章编号: 1009-5896(2005)11-1825-04

## Study of Half-Wavelength Rectangular Coaxial Cavity for L-Band Multiple Beam Klystron

Shen Bin\*\*\* Ding Yao-gen\*

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

\*\* (Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract** A kind of rectangular coaxial cavity, which is used for low frequency broadband multiple beam klystron, is studied. The 3D electromagnetic code of ISFEL3D is used to calculate the main parameters and field distribution of rectangular coaxial cavity. The results show that rectangular coaxial cavity has small volume and potential of bandwidth extending. It can be used in low frequency band multiple beam klystrons.

**Key words** Broadband multiple beam klystron, Half-wavelength, Rectangular coaxial cavity, Characteristic resistance,  $\pi$  mode

### 1 引言

谐振腔的选择和设计是速调管设计过程中一个重要的环节, 传统的宽带多注速调管一般采用工作在基模 $TM_{010}$ 的重入式圆柱腔作为群聚腔, 用滤波器加载双间隙耦合重入式圆柱腔 (工作于 $\pi$ 模或 $2\pi$ 模)作为输出腔<sup>[1,2]</sup>。这类腔的特点是高频电场集中在谐振腔的中心部分, 谐振腔工作时, 在间隙处形成了很强且较均匀的轴向电场, 有利于电子注与电场进行能量交换, 并且由于电场集中于狭窄的间隙处, 因而具有较小的等效电容以及较高的特性阻抗( $R/Q$ 值), 这对大功率宽带多注速调管的设计十分有利。

然而, 在高频段如X波段使用这种谐振腔, 由于腔的直径比较小, 而要得到比较大的输出功率, 就要求漂移头直径也比较大, 因此间隙电场的均匀性降低, 影响注波互作用的效率。要解决这个问题, 可以采用高次模谐振腔<sup>[3-5]</sup>, 这样既能增加漂移头的有效面积, 又能使间隙电场分布均匀, 从而提高多注速调管的输出功率。

而在低频段, 如L波段和P波段, 采用重入式圆柱谐振腔的主要问题是腔体直径将达到十几至几十厘米, 使整管的体积和重量大增, 既增加了成本又不便使用。为了保持宽带多注速调管体积小, 重量轻的优点, 必需寻找新型的谐振腔, 以减小腔体的尺寸, 并保证一定的输出功率和带宽。我们在这方面已经开展了一些工作, 如强耦合双间隙谐振腔的研究<sup>[6]</sup>。本文试图采用工作在 $\pi$ 模的半波长矩形同轴腔来减小腔体尺寸, 用ISFEL3D三维电磁场计算软件对这种类型的谐振腔的特性进行了研究, 并与双间隙耦合圆柱腔进行比较。

### 2 矩形同轴腔中的场结构

同轴线中电压和电流的分布可由入射波和反射波叠加并满足边界条件而求得:

$$U(z,t) = U_m \sin kz \sin \omega t, \quad I(z,t) = I_m \cos kz \cos \omega t$$

其中 $U_m = I_m Z_c$ 为电压幅值,  $I_m$ 为电流幅值,  $Z_c$ 为同轴线特性阻抗。

根据同轴线中电磁场和电压、电流的关系,同轴线谐振腔中电磁场分布为

$$E_r(z,r,t) = \frac{U_m}{r \ln(D/d)} \sin kz \sin \omega t$$

$$H_\phi(z,r,t) = \frac{U_m}{\eta r \ln(D/d)} \cos kz \cos \omega t$$

其中  $U_m$  为电压幅值,  $D$  和  $d$  分别为同轴线外径和内径,  $\eta = \sqrt{\mu/\epsilon}$  为 TEM 波的波阻抗。

当谐振腔的长度  $l$  为  $1/2$  波长的整数倍时,在  $z=l$  处也满足电磁场边界条件。因此,取  $l = \lambda/2$ , 就得到了如图 1 所示的  $1/2$  波长同轴谐振腔。

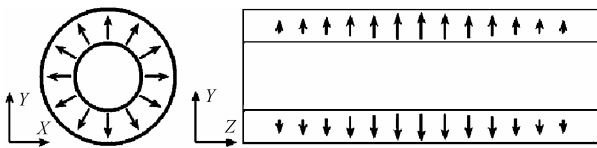


图1 1/2 波长同轴腔结构和电场分布示意图

电子沿  $Y$  方向注入,考虑到高频电场与电子注相互作用,改变同轴谐振腔的结构,从圆形结构变为矩形结构,得到如图 2 所示的矩形同轴腔。

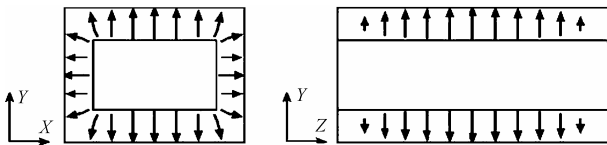


图2 矩形同轴腔结构和电场分布示意图

此时,电子注穿过内导体前后均与高频电场相互作用,其效果相当于一个  $\pi$  模双间隙耦合腔。因此也可将该腔看作是耦合很强的  $TE_{101}$  模矩形双间隙腔。

### 3 矩形同轴腔参数和场分布的计算

图 2 所示矩形同轴腔的内导体是均匀的,在多注速调管中,考虑到高频电场与多电子注的相互作用,需要面积足够大的漂移头,因此采用变尺寸的内导体。内导体变尺寸区的大小对腔体特性的影响比较大。在确定变尺寸区大小时,需要综合考虑漂移孔直径,漂移孔数目,相邻漂移孔之间距离

等因素。为了排列 18~20 个漂移管,并且漂移管之间有足够大的间隙,以便聚焦磁场通过。同时漂移头不能过大,否则腔体体积增大,并且各漂移管间隙中心的特性阻抗不均匀性也会增加。

考虑到该多注速调管的工作参数和工艺加工的实际情况,采用图 3 所示的矩形同轴腔。采用 20 个漂移管,漂移管直径 5mm(电子注直径 3mm);相邻漂移管中心距离 8mm,此时相邻漂移管之间的间隙为 3mm。以腔体的对称中心为坐标轴原点,电子运动方向为  $Z$  向。在该坐标系下,该腔的基模可看作是工作在  $\pi$  模的  $TM_{110}$  模式。

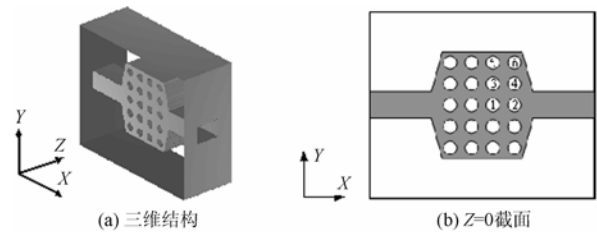


图3 半波长矩形同轴腔模型结构

该矩形腔的长宽高分别为 85mm, 70mm, 32mm。对该模型进行计算机模拟,得到以下结果。各模式谐振频率如表 1 所示。

第一个模式是  $\pi$  模,  $Q=4938$ , 其电场分布如图 4 所示。

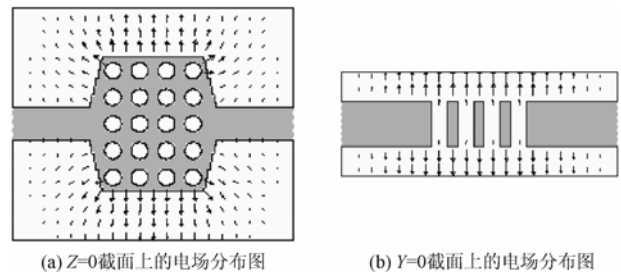


图4 半波长矩形同轴腔模型的电场分布

根据结构的对称性,漂移管中心的  $(R/Q)$  有 6 个不同的值,如表 2 所示,编号如图 3 所示,其余各漂移管中心的  $(R/Q)$  可由对称性得出。

$$(R/Q)_{\max} / (R/Q)_{\min} = 1.24, \quad \overline{(R/Q)} = 91.2$$

表1 半波长矩形同轴腔前 5 个模式的谐振频率

模式	1	2	3	4	5
频率(MHz)	1295.1	2370.1	2736.5	3507.7	3993.0

表2 半波长矩形同轴腔各漂移孔间隙的  $(R/Q)$  值

漂移管	1	2	3	4	5	6
$(R/Q)$	93.62	80.24	95.14	83.60	99.40	91.11

### 4 半波长矩形同轴腔的等效电路分析

半波长矩形同轴腔结构以及谐振模式的场分布特点表明它是一个双间隙耦合腔,其集总元件等效电路<sup>[7]</sup>如图 5 所示。

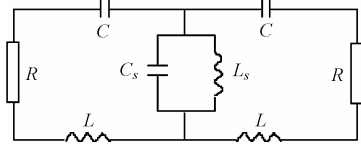


图 5 半波长矩形同轴腔的等效电路

图 5 中  $L, C$  代表两个单腔的等效电感和等效电容,  $L_s$  和  $C_s$  代表耦合槽的等效电感和等效电容。在理想无耗的情况下,从这个等效电路可以算出 3 个谐振频率,分别为

$$f_{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1)$$

$$\frac{f_{\pi 1, \pi 2}}{f_{2\pi}} = \left\{ 2 \times \left[ \left( 1 + 2(L_s/L) + (f_{2\pi}/f_s)^2 \right) \pm \sqrt{\left[ 1 + 2(L_s/L) + (f_{2\pi}/f_s)^2 \right]^2 - 4(f_{2\pi}/f_s)^2} \right]^{-1} \right\}^{1/2} \quad (2)$$

其中缝模频率:

$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_s C_s}} \quad (3)$$

由式(1)–式(3)还可以得到如下关系:

$$f_{\pi 1} \cdot f_{\pi 2} = f_s \cdot f_{2\pi} \quad (4)$$

$$\frac{L_s}{L} = \frac{f_{\pi 1}^2 + f_{\pi 2}^2 - f_{2\pi}^2 - f_s^2}{2f_s^2} \quad (5)$$

用 ISFEL3D 可以计算出  $f_{\pi 1}$  (1295.1MHz),  $f_{\pi 2}$  (3507.7MHz) 和  $f_{2\pi}$  (2370.1MHz) 3 个谐振频率,从而可以计算出缝模频率和耦合系数:  $f_s = 1916.7\text{MHz}$ ,  $L_s/L = 0.638$ 。

实际选择的工作模式为 1 模,由等效电路可以得到 1 模和 2 模的特性阻抗如下:

$$\left(\frac{R}{Q}\right)_{2\pi} = 2\sqrt{\frac{L}{C}} \quad (6)$$

$$\left(\frac{R}{Q}\right)_{\pi 1} = \frac{2\sqrt{L/C}}{\frac{f_{\pi 1}}{f_{2\pi}} \left[ 1 + \frac{2(f_{\pi 1}/f_{2\pi})^2(L_s/L)}{(f_s/f_{\pi 1})^2 [1 - (f_{\pi 1}/f_s)^2]^2} \right]} \quad (7)$$

利用式(4)–(7)还可以得到 1 模和 2 模的特性阻抗有如下关系:

$$\frac{(R/Q)_{2\pi}}{(R/Q)_{\pi 1}} = \frac{f_{\pi 1}(f_{\pi 2}^2 - f_{\pi 1}^2)}{f_{2\pi}(f_{\pi 2}^2 - f_{2\pi}^2)} \quad (8)$$

式(8)两边的所有参数均可以采用三维电磁场模拟计算软件 ISFEL3D 计算出,从而检验由集中元件等效电路推出的表达式是否与三维电磁场模拟计算结果是否一致。式(8)右边的值为 0.868,式(8)左边的值如表 3 所示。结果表明,三维电磁场模拟计算软件 ISFEL3D 的计算结果与等效电路的结果基本符合。

### 5 常用的双间隙耦合圆柱形输出腔的计算

现有的 L 波段多注管输出腔的结构是双间隙耦合圆柱腔,其结构如图 6 所示,坐标系以腔体对称中心为坐标原点,电子运动方向为 Z 向。

该腔直径为 118mm,腔高 49.4mm。对该输出腔结构进行计算机模拟计算,得到以下结果。各模式谐振频率如表 4 所示。

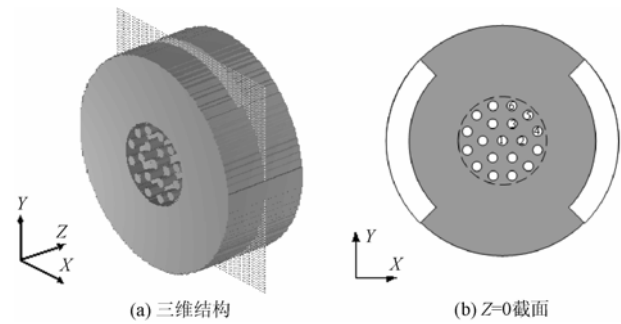


图 6 双间隙耦合圆柱腔结构示意图

表 3 2π 模和 π 1 模的特性阻抗比值

漂移管	1	2	3	4	5	6	平均值
π 1 模(R/Q)	93.62	80.24	95.14	83.60	99.40	91.11	91.24
2π 模(R/Q)	84.74	71.64	78.13	66.65	59.96	51.82	66.95
(R/Q) <sub>2π</sub> /(R/Q) <sub>π1</sub>	0.905	0.893	0.821	0.797	0.603	0.568	0.734

表 4 双间隙耦合圆柱腔前 5 个模式的谐振频率

模式	1	2	3	4	5
频率(MHz)	1285.6	1517.9	1985.7	2366.2	3163.2

表5 双间隙耦合圆柱腔各漂移孔间隙的 $(R/Q)$ 值

漂移管	0	1	2	3	4	5
$(R/Q)$	89.57	88.76	87.89	86.29	84.45	83.54

第一个模式是 $\pi$ 模,  $Q=6751$ , 其电场分布如图7所示。

计算各漂移管中心的 $(R/Q)$ , 由对称性可知, 有6个不同的 $(R/Q)$ 值, 如表5所示:

表5中心漂移管(编号为1)无电子注。

$$(R/Q)_{\max}/(R/Q)_{\min} = 1.06, \quad \overline{(R/Q)} = 85.8$$

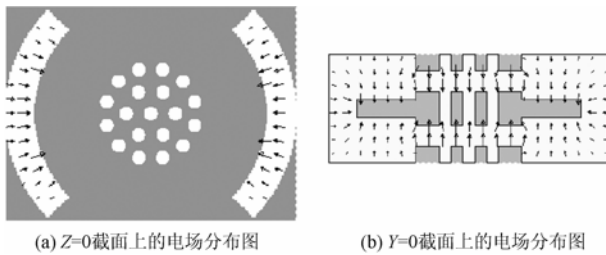


图7 双间隙耦合圆柱腔模型的电场分布

## 6 结束语

以上计算结果显示, 工作于 $\pi$ 模的半波长矩形同轴腔和双间隙耦合圆柱腔各有其优缺点, 经过比较可以得出以下结论:

半波长矩形同轴腔的尺寸确实比工作于同一频率的双间隙耦合圆柱腔的尺寸小, 在 $X$ 和 $Y$ 两个方向减小幅度比较接近, 其截面积约为双间隙耦合圆柱腔的54%, 体积仅为双间隙耦合腔的35%。在频率更低的P波段, 如果要大幅度的减小管体的尺寸, 可以考虑采用别的谐振腔, 如1/4波长矩形同轴谐振腔<sup>[8]</sup>。

工作在 $\pi$ 模的半波长矩形同轴腔的模式间隔很大, 其 $\pi$ 模与 $2\pi$ 模频率间隔为1075MHz, 因此其工作带宽的扩展有极大的潜力, 对宽带多注速调管的设计极为有利。而双间隙耦合圆柱腔的 $\pi$ 模与 $2\pi$ 模频率间隔仅为232MHz, 这极大限制了它的工作带宽。从这一点比较可看出, 半波长矩形同轴腔有明显的带宽优势。

半波长矩形同轴腔的 $(R/Q)$ 值比双间隙耦合圆柱腔的高, 但是其间隙处纵向电场的均匀性比双间隙耦合圆柱腔要差一些, 对整管的效率会有一些影响。根据经验, 当谐振腔的 $(R/Q)_{\max}/(R/Q)_{\min}$ 小于1.3时, 影响不大, 可以在实际

中应用。因此, 可以在低频段宽带多注速调管中使用半波长矩形同轴腔, 从而显著减小速调管的体积和重量。

由于工作在 $\pi$ 模的半波长矩形同轴腔体积小, 与单腔相比其特性阻抗大, 因此这类谐振腔也可作为宽带多注速调管的群聚腔。

## 参考文献

- [1] 丁耀根, 彭均. 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] 丁耀根. 多注速调管双间隙耦合特性的三维计算. 中国电子学会真空电子学会第十一届学术年会论文集, 青岛, 1997: 122-124.
- [3] 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会第十届学术年会论文集, 北京, 1995: 77-80.
- [4] 陈新桥, 朱允淑, 丁耀根. 高次模多注速调管的矩形双间隙输出腔的研究. 电子与信息学报, 2003, 25(8): 1126-1129.
- [5] 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会第十三届学术年会论文集, 贵阳, 2001: 85-88.
- [6] 林福民, 丁耀根, 沈斌. 强耦合双间隙微波谐振腔的特性分析. 电子与信息学报, 2003, 25(7): 982-989.
- [7] Lien E, Robinson D. Study and investigation leading to the design of broadband high-power klystron amplifiers. Technical Report for United States Army Electronics Command, No.ECOM-02157-1, March, 1967.
- [8] 沈斌, 丁耀根, 刘韦. 用于L波段多注速调管的1/4波长同轴谐振腔的研究. 中国电子学会真空电子学会第十四届学术年会论文集, 丹东, 2003: 183-186.

沈斌: 男, 1976年生, 博士生, 研究方向为大功率微波器件.

丁耀根: 男, 1942年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为微波电子学和大功率微波器件.