

## 回旋管模式选择复合腔的设计分析

郭 炜 罗积润 朱 敏  
(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

**摘 要** 为了使一种新型复合开放式谐振腔能够应用于毫米波回旋管器件, 该文从工程设计的角度出发, 分析这种腔结构中的公共壁增厚和轴向开漂移孔对腔中工作模式稳定性的影响, 探讨在实际工程设计中补偿这种影响的手段。结果表明, 合理增大复合腔外腔的半径能够有效实现工作模式的模式纯度和相对稳定性。

**关键词** 回旋管, 复合腔, 模式稳定性, 电场分布, 相对储能

中图分类号: TN128

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)10-1971-04

## Design Analysis of a Mode Selective Cavity for Gyrotron Applications

Guo Wei Luo Ji-run Zhu Min

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

**Abstract** The effects of thickening the cavity wall and constructing a pair of drift tube in a new complex cavity on the operating mode stability for engineering design are analyzed in this article. Some compensating methods for alleviating the effects are discussed, which shows that rationally increasing the radius of the outer cavity in the complex cavity may effectively realize high purity and stability of the operating mode.

**Key words** Gyrotron, Complex cavity, Mode stability, E-field distribution, Stored energy

### 1 引言

在回旋管研究发展过程中, 复合腔在抑制竞争模式和改善工作模式稳定性等方面起到了非常重要的作用<sup>[1-3]</sup>。由于回旋管一般工作于高次模式, 为了抑制过模工作时存在的模式竞争, 希望谐振腔具有模式选择能力。复合腔的特殊设计要求复合工作模式 $TE_{mnl}/TE_{mnp}$ 各自的腔半径与 $m$ 阶贝塞尔函数导数的零点之间满足关系式:

$$R_1/R_3 = X_{mn}/X_{mp} = C \text{ (常数)} \quad (1)$$

于是人们可以通过设计合理的边界条件, 使得在复合腔中仅仅满足式(1)的两个模式之间才能发生强耦合, 所有不满足这一条件的其它模式之间的耦合都将被大大地削弱。笔者在文献[4]中采用内外耦合的方式形成一种新型复合开放式谐振腔结构, 按照式(1)合理设置公共腔壁并在壁上开孔耦合以破坏竞争模式存在的边界条件。在文献[4]中, 我们以 $TE_{021}/TE_{031}$ 作为这种复合腔的工作模式, 利用Ansoft HFSS高频分析计算软件, 对公共腔壁以及其上的开孔耦合对模式的选择和抑制的影响进行了详细分析。结果表明, 公共腔壁位置设置和其壁上开矩形孔能够有效地抑制内腔中的竞争模式 $TE_{221}$ 和 $TE_{511}$ , 同时能够避免复合腔中 $TE_{031}$ 的主要竞争模式 $TE_{231}$ 的形成, 这对提高工作模式的稳定性意义重大。不过, 在上述模型中, 公共腔壁的厚度被假定为零, 这对于实际工程设计是无法做到的。那么公共腔壁增厚后,  $TE_{021}/TE_{031}$ 模稳定性将受到什么样的影响是工程设计尤为关

心的问题。本文将从工程设计的实际出发, 探讨公共腔壁增厚后如何通过合理的结构调整获得相对稳定的 $TE_{021}/TE_{031}$ 模工作状态。

### 2 有限厚度公共腔壁对工作模式的影响

#### 2.1 基本模型的变化

图1是新型复合腔公共腔壁增厚后的示意图。对于这种腔结构, 如果 $R_2-R_1=0$ ,  $R_1/R_3$ 满足关系式(1), 则半径为 $R_3$ 的圆柱腔中的 $TE_{031}$ 模和如图1所示的复合腔中的 $TE_{031}$ 模(由I区的 $TE_{021}$ 圆柱腔模和II区的 $TE_{011}$ 同轴腔模组合而成)的频率和场分布是一致的。如果 $R_2-R_1 \neq 0$ , 但 $R_1/R_3$ 仍然满足关系式(1), 同样以 $TE_{021}/TE_{031}$ 模作为工作模式为例, 公共腔壁的有限厚度破坏了I区和II区合为一体时 $TE_{031}$ 模存在的理想边界条件。此时II区的体积变小, 这将对II区作为同轴腔的 $TE_{011}$ 模谐振频率、场强峰值位置和大小分布产生明显影响。当然, 这种影响也将波及I区。我们将利用Ansoft HFSS高频软件计算分析公共腔壁厚度对这种复合腔中工作模式的影响, 并且通过数值模拟优化选择外腔壁的尺寸, 尝试在一定程度上尽可能地使内腔壁厚度对工作模式的影响减到最弱。显然, 公共腔壁增厚也将对所有竞争模式具有与工作模式同等程度的影响。下面着重于工作模式的稳定建立和趋于理想的分布, 不再单独分析竞争模式在内腔壁增厚时的变化过程。

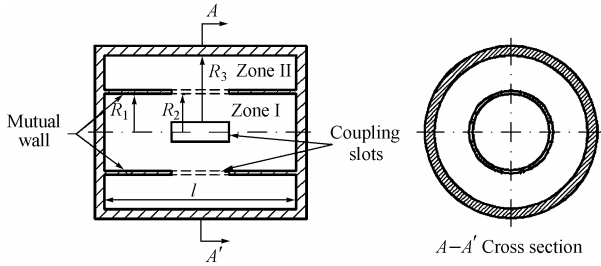


图 1 有限厚度公共腔壁的复合腔模型

Fig.1 Complex cavity model using a mutual wall with finite thickness

2.2 数值模拟和分析

利用Ansoft HFSS 高频分析软件，我们选定腔的几何参数 $R_1$ 、 $R_3$ 和 $l$ 的初值分别选为 10.26、14.88 和 12mm， $R_1/R_3$ 满足式(1)，工作模式为 $TE_{021}/TE_{031}$ ，首先将这种复合腔视为轴向金属封闭，仅仅公共腔壁上开矩形耦合槽孔。数值计算表明，当腔壁的厚度逐步增加时，复合腔的谐振频率逐步上升，外同轴腔中的能量逐步减少，而内腔中能量减少则相对不那么明显。表 1 给出了当 $R_2-R_1$ 的值分别为 0、0.1、0.2、0.3 时， $TE_{031}$ 模式的谐振频率 $f_0$ 和相对储能值的变化情况。图 2 给出了这种复合腔中 $TE_{021}/TE_{031}$ 角向电场在径向位置最大值随角度 $\phi$ 从 0 变到 90°的变化情况图。随着公共腔壁增厚，外同轴腔中(II区)的峰值电场主要集中在耦合孔附近，远离耦合孔区域的电场值大为下降；而I区 $TE_{021}$ 模的两个电场的最大值略有不同，在耦合孔附近场的最大值最小，离开耦合孔后，场幅值开始趋于等幅。 $R_2-R_1$ 的值越大，这种影响越明显。图 3 给出了公共腔壁厚度为分别为 0 和 0.3 时，复合腔中 $TE_{031}$ 模式的电场分布的对比图。从图 3 可见，腔壁增厚对外同轴腔中的 $TE_{011}$ 模式影响很大。外同轴腔在体积缩小的同时，同轴 $TE_{011}$ 模被挤压，电场在耦合孔附近较强，并通过耦合孔影响了内腔中的 $TE_{021}$ 模式。上述分析表明，耦合孔厚度的增加使得复合腔中电场分布偏离理想的 $TE_{021}/TE_{031}$ 模式结构，这将引起其它竞争模式的出现或增强。

为了改善由于耦合孔厚度增加对这种复合腔在稳定主模工作中的影响，我们尝试增大外腔壁半径 $R_3$ 以尽可能补偿公共腔壁增厚对电场分布的干扰作用。虽然公共腔壁越薄，对场分布的影响越小。但出于对金属加工工艺条件的考虑，我们取 $R_2-R_1=0.25\text{mm}$ ， $R_1$ 保持为 10.26mm，利用Absoft HFSS 高频软件计算 $R_3$ 从 14.88mm 开始增加对内腔 $TE_{021}$ 和外同轴腔中 $TE_{011}$ 模在腔中的相对储能和角向电场最大值的影响。图 4 给出复合腔中高频储能随 $R_3$ 的变化情况。当 $R_3$ 增大时，复合腔中总储能能在 $R_3$ 由 14.88mm 变到 15.30mm 的过程中单调增长， $R_3$ 超过 15.30mm 后储能下降；内腔储能在 $R_3$ 小于

表 1  $TE_{031}$ 模式的谐振频率 $f_0$ 和相对储能值随腔壁厚度的变化

Tab.1 Variation of the  $TE_{031}$  mode resonant frequency and stored energy with the thickness of mutual wall

$R_2-R_1$ (mm)	$f_0$ (GHz)	相对储能	
		复合腔总储能	内腔储能
0.0	34.94	9.66	6.59
0.1	35.08	8.42	6.52
0.2	35.17	7.81	6.43
0.3	35.23	7.56	6.37

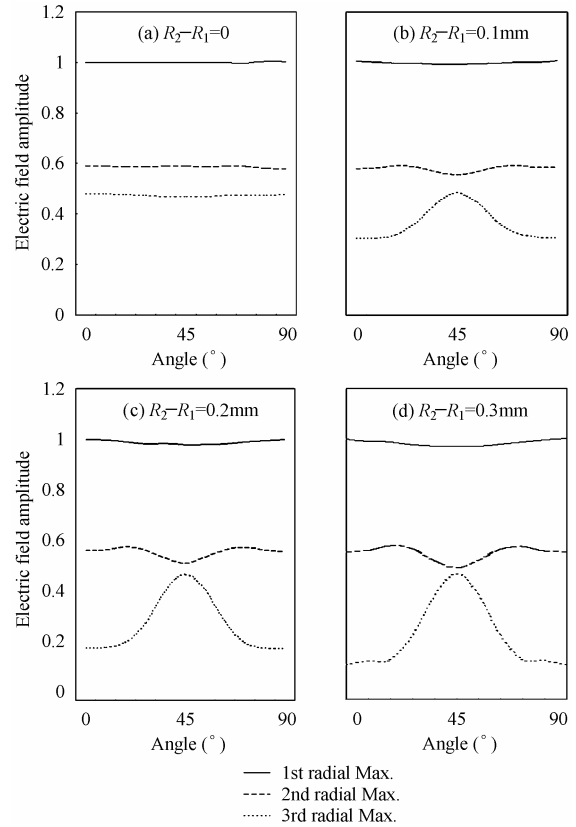


图 2 腔壁加厚时， $TE_{031}$ 模式电场角向分布的变化  
Fig.2 Variation of E field along  $\phi$ -direction for varying thickness of mutual wall

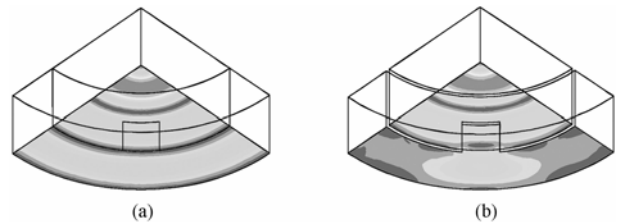


图 3 腔壁厚度为 0mm(a)和 0.3mm(b)时电场分布的比较  
Fig.3 E field distribution of  $R_2-R_1=0$  mm(a) and  $R_2-R_1=0.3$ mm (b)

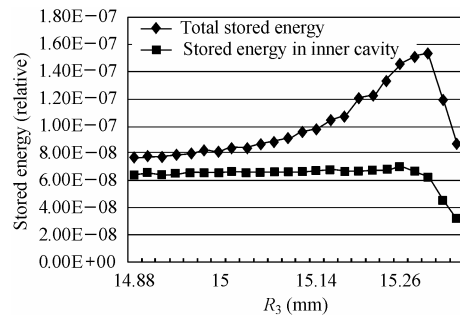


图 4 复合腔储能状况与 $R_3$ 的关系

Fig.4 Variation of stored energy with  $R_3$  in the complex cavity 等于 15.26mm 之前变化不明显，在 $R_3>15.26\text{mm}$ 后开始下降。图 5 展示了不同 $R_3$ 值复合腔中 $TE_{021}/TE_{031}$ 模角向电场 3 个最大值在角度 $\phi$ 从 0 变到 90°的变化情况。 $R_3$ 从 14.88 增大过程的初期，3 个角向电场最大值各自的起伏均有所好转，且振幅平均值上升，其中以外腔的幅值增加最为明显。当 $R_3=15.08$

时, 内腔中两个角向电场最大值从 0 到 90°同时达到等幅均匀状态; 当 $R_3$ 继续增大时, 内腔的电场开始出现起伏, 而外同轴腔中角向电场在 $R_3=15.14\text{mm}$ 达到等幅均匀状态; 当 $R_3$ 超过 15.14mm后, 内腔角向电场的平均振幅开始下降, 外同轴腔的角向电场最大值的平均值继续上升, 但角向起伏加剧, 在 $R_3=15.30\text{mm}$ 这种起伏达到最大, 且电场最大值的振幅超过了内腔的。此时腔体的总储能很高, 但很大部分来自于外腔, 内腔储能已呈下降趋势。 $R_3$ 继续增加, 外同轴腔中电场会再一次下降, 但内腔的电场却继续下降, 总储能下降。从电场幅值和腔中储能整个变化过程可以看出, 虽然内腔储能能在 $R_3=15.26\text{mm}$ 处最高, 但此时场角向起伏严重, 且 $R_3$ 稍稍增大就可导致储能跌落, 对于工程应用不利。在 $R_3=15.08\sim 15.14\text{mm}$ 之间, 复合腔中 $\text{TE}_{021}/\text{TE}_{031}$ 电场分布有较好的均匀性, 尤其是 $R_3=15.08\text{mm}$ 时, 内腔形成了较为理想的 $\text{TE}_{021}$ 模; 而外同轴腔中的 $\text{TE}_{011}$ 模在 $R_3=15.14\text{mm}$ 变得较理想均匀。在实际应用中, 这种复合腔仅仅内腔的 $\text{TE}_{021}$ 模与电子注发生相互作用, 外同轴腔中的 $\text{TE}_{011}$ 模不参与电子注与波的相互作用, 仅起稳定整个复合腔中工作模式和抑制竞争模式的作用。因此工程设计时可以在 15.08~15.14mm之间选择 $R_3$ 的值来保证工作模式的稳定性。

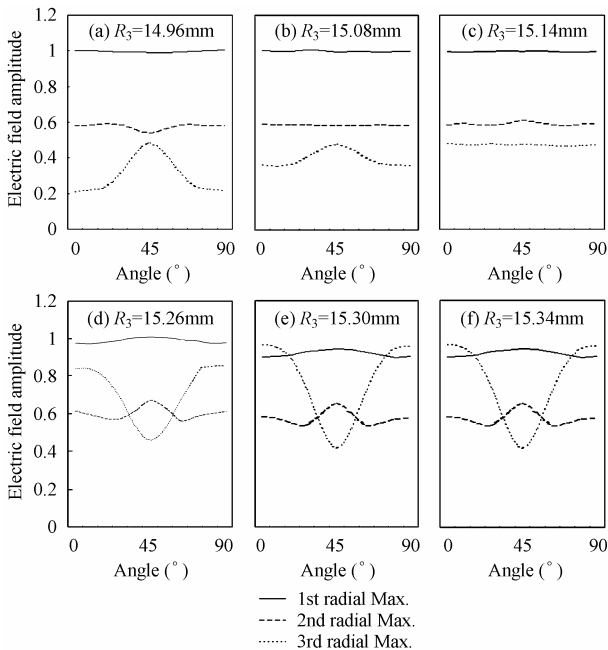


图 5 电场角向分布和 $R_3$ 的关系  
Fig.5 Relationship of E field along  $\phi$ -direction with  $R_3$

### 3 腔体轴向端面开放的影响

在实际回旋管的设计中, 谐振腔必须留出电子注的通道, 亦即, 谐振腔的轴向应该是开放的。在高次模开放式谐振腔中, 我们利用截止波导构造漂移管, 以使需要的工作模式可以稳定起振, 而部分截止频率低于工作模式的竞争模式将处于传输状态, 不能稳定起振。不过, 这种轴向开孔也将

影响复合腔中主模的电场分布结构。图 6 是我们研究的复合腔轴向开孔的示意图。仍以 $\text{TE}_{021}/\text{TE}_{031}$ 模作为复合腔的工作模式, 假定开孔半径 $R_4=8.7\text{mm}$ , 漂移管长度为 6mm, 我们进一步讨论 $R_3$ 的变化对谐振腔中电场分布的影响。

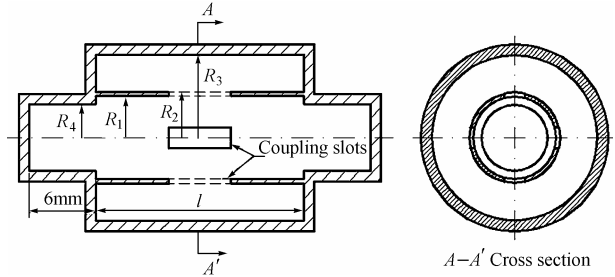


图 6 加入漂移管后的复合腔模型

Fig.6 Model of the complex cavity with a pair of drift tube

对内腔的 $\text{TE}_{021}$ 模,  $R_4=8.7\text{mm}$ 的圆波导截止频率为 40GHz, 而内腔的工作频率在 34GHz附近。图 7 给出了 $R_3=14.88\text{mm}$ 时, 轴向封闭和开口时复合腔中 3 个角向电场峰值随角度 $\phi$ 的变化。表 2 给出了相应的谐振频率和储能情况。图 7 和表 2 的数据表明, 复合腔端面开口后, 内腔的有效体积增大, 储能明显增加。通过对角向电场的观察发现, 电场的起伏更加明显, 且内腔电场的平均振幅减小。相对封闭腔而言, 由于轴向开口的衍射损耗, 内腔的谐振频率降低, 这意味着相对前述封闭腔的分析结果,  $R_3$ 应该有相应进一步的增加, 以补偿因开口衍射引起内外腔之间频率差异造成的电场分布变形。

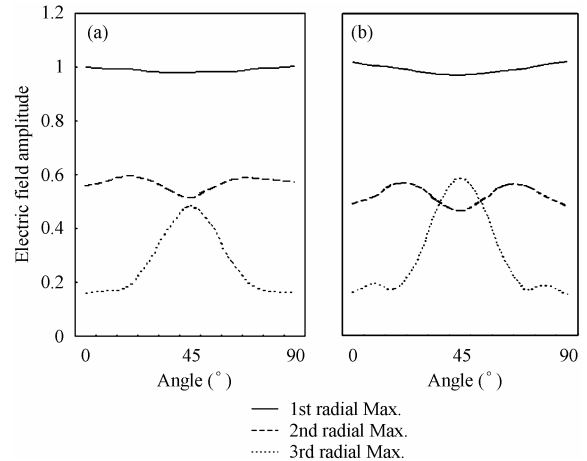


图 7 开漂移管前(a)后(b)复合腔中角向电场峰值分布的变化  
(a)无漂移管 (b)有漂移管

Fig.7 E-field distribution along  $\phi$ -direction before and after adding drift tube

(a)No drift tube (b)Drift tube

表 2 复合腔开口前后参数的变化

Tab.2 Variation of electric parameters before and after adding drift tube

	$f_0(\text{GHz})$	相对储能	
		复合腔总储能	内腔储能
未开漂移管模型	35.20	7.61	6.38
开漂移管模型	34.56	9.82	8.06

图 8 给出了  $R_3$  由 14.88 逐步增大时，轴向开口后复合腔中储能的变化情况。从图中可知，与表征封闭腔中储能的图 4 相比，整体变化趋势类似，但为了获得高的储能， $R_3$  需要更大一些。内外腔的储能均在  $R_3=15.42\text{mm}$  时达到峰值。同样  $\text{TE}_{021}/\text{TE}_{031}$  电场分布达到理想均匀状态和复合腔中储能最大也不一致。图 9 描述了改变  $R_3$  的大小对复合腔中角向电场分布改善的情况。在  $R_3=15.20\sim 15.26\text{mm}$  之间，复合腔中  $\text{TE}_{021}/\text{TE}_{031}$  电场分布有较好的均匀性，在  $R_3=15.20\text{mm}$  时，内腔形成了较为理想的  $\text{TE}_{021}$  模；而外同轴腔中的  $\text{TE}_{011}$  模在  $R_3=15.26\text{mm}$  变得较理想均匀。图 10 给出了  $R_3=15.20\text{mm}$  时， $\text{TE}_{021}/\text{TE}_{031}$  模电场分布图。和图 3(a) 相比，内腔的电场分布已和理想腔体相同，呈现出十分规则的  $\text{TE}_{021}$  模分布；外腔电场亦有很大改善，在耦合孔附近的均匀性已不明显，与内

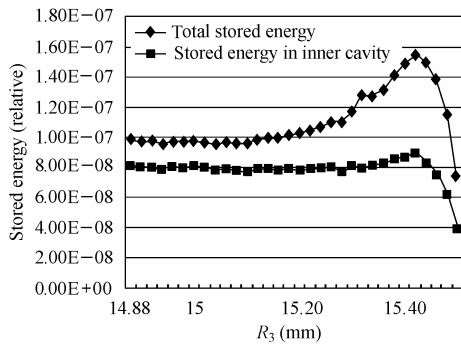


图 8 复合腔轴向开口后储能随  $R_3$  的变化  
Fig.8 Relationship of the stored energy with  $R_3$  in the complex cavity with a pair of drift tube

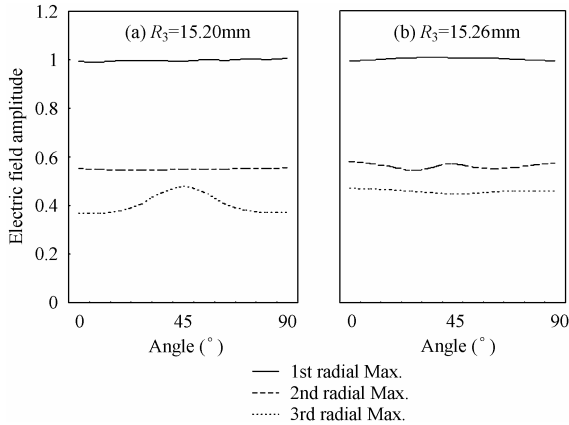


图 9 改变  $R_3$  的大小，复合腔轴向开口后角向电场分布的变化情况  
Fig.9 Relationship of E field distribution along  $\phi$ -direction with  $R_3$  in the complex cavity with a pair of drift tube

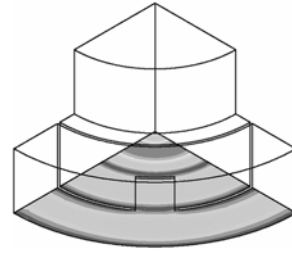


图 10 改进设计后  $\text{TE}_{031}$  模电场分布图

Fig.10 Mode field distribution of  $\text{TE}_{031}$  with the improved design  
腔电场之间分界线十分明确，不存在任何耦合，这表明腔中有较好的模式纯度。

4 结束语

新型复合腔公共腔壁增厚和轴向开孔对内外腔中工作模式的储能大小、稳定性和电场分布的均匀性影响严重。合理增大复合腔外腔半径  $R_3$  能够有效补偿公共壁增厚和轴向开孔产生的这种影响。本文取得的结果对这种复合腔的设计和工程应用过程中的改进具有实际意义，可供工程研制的设计人员参考。

致谢 感谢郭和忠研究员在理论建模方面给予的指导和吴尔生研究员在工程设计方面提供的帮助。

参考文献

[1] Granatstein V L, Levush B, Danly B G, Park R K. A quarter century of research and development. *IEEE Trans. Plasma Sci.* 1997, 25(6): 1322–1335.  
 [2] Jiang L. Theory for cylindrical, open ended, complex cavities supporting all  $\text{TE}_{0n}$  modes: Gyrotron application. *IEE Proceedings-H*, 1991, 138(4): 297–306.  
 [3] Guo H, Wu D S, Liu G, Miao Y H, Qian S Z, Qin W Z. Special complex open-cavity and low-magnetic-field high-power gyrotron. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 1990, 18(3): 326–333.  
 [4] 郭炜, 罗积润. 一种回旋管新型复合开放式谐振腔的性能分析. *电子与信息学报*, 2006, 28(4): 765–768.

郭 炜: 男, 1977 年生, 工程师, 主要从事回旋管和速调管高频结构方面的研究。

罗积润: 男, 1957 年生, 研究员, 博士生导师, 主要从事微波毫米波产生和应用方面的研究。

朱 敏: 女, 1976 年生, 助理研究员, 主要从事回旋管和速调管高频结构方面的研究。