

## 多注速调管外加载谐振腔的分析和模拟

张 丁

(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

(中科院研究生院 北京 100039)

**摘 要:** 该文对多注速调管谐振腔内加载技术和外加载技术以及相关的微波吸收材料作了分析和比较;理论上阐明外加载谐振腔品质因数的调节途径,用 MWS 设计出符合要求的外加载谐振腔;对由此产生的模式不对称性进行校正,找出了外加载谐振腔品质因数的影响因素和规律。

**关键词:** 速调管; 谐振腔; 品质因数; 频率; 微波衰减材料

中图分类号: TN122

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)05-1263-04

## Analysis and Simulation of the Out-loaded Resonant Cavity Using in the Multi-beam Klystron

Zhang Ding

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

(Graduate University of Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China)

**Abstract:** First of all, the in-loaded and out-loaded technologies of resonant cavity being used in the multi-beam klystron and some associated microwave attenuating materials are analyzed and compared. Not only the ways of adjustment of out-loaded resonant cavity quality characteristic is illuminated in theory, but is designed the out-loaded resonant cavity meeting the demand. Finally, the asymmetry of the E-field of the mode caused by the out-loaded cavity is adjusted and the influent factors and the change laws of quality characteristic of the out-loaded resonant cavity are located.

**Key words:** Klystron; Resonant cavity; Quality characteristic; Frequency; Microwave attenuating materials

### 1 引言

多注速调管相对单注速调管可以在相对较低的功率电平下获得宽频带,即既具有足够宽的群聚带宽,又要有相应的输出带宽。群聚带宽一般由多个谐振腔的参差调谐技术获得,这就要求各群聚腔能获得需要的频率和相应的品质因数。

速调管谐振腔通常采用内加载技术调节品质因数,应用非常广泛,但是多注速调管的一个重要的发展方向就是向高频段扩展,因此结构和工艺在一定程度上限制了内加载技术的继续使用。本文所讨论的外加载技术就是为了补充内加载技术的不足而专门设计的,俄罗斯曾在其 X 波段多注速调管中使用该技术,但是在国内该项工作尚未开展。本文的目的就是要通过比较说明外加载谐振腔的应用前景和优势,通过计算机模拟找出外加载谐振腔的调节规律,为其工程实用化奠定基础。

速调管谐振腔的内加载技术最常用的是在谐振腔的腔壁上喷涂、真空蒸发、溅射或涂覆烧结上一层磁性物质(康乃尔合金、羰基铁粉等);FeSiAl 薄膜微波衰减材料具有使用方

便、性能稳定、衰减量大等优点,目前已逐步取代了其他薄膜微波衰减材料,在 C, S 和 L 波段的速调管中得到了非常广泛的应用<sup>[1]</sup>。

但是此微波衰减材料需要在 1000℃ 以上的高温中涂敷烧结到谐振腔的腔壁上,因此经过此工艺的谐振腔经常会发生严重的形变,谐振腔本身的材质也会变软,直接给零件的后续加工带来困难并间接地给制管带来隐患;由于该衰减材料为磁性材料,因此势必对速调管聚焦系统的磁场带来干扰,给速调管的设计工作带来诸多不可预见因素;在实际工程中,当外部环境或烧结工艺甚至衰减粉本身出现不稳定时,烧结到腔壁上的衰减材料将会脱落,甚至污染整个速调管的内部,造成整个器件的报废。

谐振腔的外加载技术,是将主谐振腔与带有负载的负载腔相耦合,使电磁场的能量消耗到负载腔中而降低主腔的品质因数。因此谐振腔的外加载比内加载在结构上更复杂,技术上更困难,影响因素也更多,但是当多注速调管向高频段扩展时,谐振腔的外加载技术的优势将更加明显。

首先,当多注速调管向 X 波段甚至更高频段扩展时,速调管的体积越来越小,谐振腔通常也不再由几个零件拼凑焊接而成,往往整个群聚段本身就是一个零件加工而成,这给

涂敷技术造成了不可克服的障碍,而谐振腔外加载却完全不涉及到主谐振腔的加工或处理;其次,当涂敷发生困难时,负载腔可以采用无磁性的体衰减而避免出现微波衰减粉对主磁场产生干扰和可能脱落造成污染等诸多问题。

目前国内外微波管常用的体衰减材料主要有渗碳多孔磁、金属陶瓷、半导体-介质型衰减磁、碳化硅陶瓷等<sup>[2]</sup>。本文将模拟采用电子所研制的某氧化铝-钛衰减陶瓷加载负载腔对X波段多注速调管的谐振腔进行品质因数的调节。

## 2 多注速调管外加载谐振腔的结构

多注速调管的谐振腔分为输入腔,中间腔和输出腔<sup>[3]</sup>。工作时,能量通过波导或同轴线馈入输入腔,在输入腔中激励起相应的高频场对通过两漂移头之间的电子注进行速度调制,带有高频信号电子注在漂移过程中再进行密度调制,当已群聚的电子注进入第2个谐振腔时,激起了第2个谐振腔的振荡,所形成的间隙高频电场又对电子注进行第2次速度调制;随后,电子注在第2段漂移管中再度经历群聚过程,这次群聚得更加紧密,从而使电子注中的高频电流成分更强。这样的过程将反复进行多次,直到最后,当电子注到达输出腔时,电子注的群聚达到最紧密的状态并激励输出腔产生强烈的谐振。最后被放大的电磁能量再通过输出腔的耦合口输出。多注速调管的群聚带宽通常受制于谐振腔的工作带宽。

多注速调管谐振腔谐振时的半功率带宽可由下式获得。

$$\Delta f = f_0 / Q \quad (1)$$

因此,多注速调管的谐振腔只有降低  $Q$  才能获得比较宽的工作带宽。输入腔和输出腔通常通过改变输入输出系统耦合机构的耦合度来获得合适的  $Q$ ,而中间腔一般则采用本文提到的内加载或外加载来改变  $Q$ 。除此之外,为了使多注速调管获得较高的效率和相位稳定性,往往希望各电子注同步地被调制、群聚、交换能量,即希望谐振腔谐振时其电场在间隙中心对称分布。

谐振腔的品质因数  $Q$  可表示为<sup>[4]</sup>

$$Q = (2\pi / T)(W / P_d) = (\omega_0 W / P_d) \quad (2)$$

式中  $W$  是谐振腔的储能(包括电场储能和磁场储能),  $P_d$  是损耗功率,  $\omega_0$  是谐振角频率。若认为主谐振腔损耗很小,则  $P_d$  主要为负载腔中的微波吸收材料吸收的功率。因此降低  $Q$  的途径主要有两条:第一,增大负载腔的吸收能力,使其等效为一个匹配吸收负载,仅靠改变耦合孔的大小来调节  $P_d$ ;第二,将负载腔等效为一个谐振腔,通过调节耦合孔和负载腔的结构来改变负载腔吸收功率大小,从而调节  $Q$ 。

由于第一种方法过于理想,实际工程中难以实现,因此本文仅对第二种方法进行讨论。第二种方法结构相对复杂,负载腔的体积上通常比第一种方法要小,比较适合高频段的多注速调管。但是无论采用哪种方法,主谐振腔开耦合口后肯定会使腔中的电场发生偏移,从而破坏电场的对称性。如

何模拟并改善这种不对称性,在本文中也会详细讨论。

图1中左侧为要研究的多注速调管的主谐振腔,右侧为装有微波衰减陶瓷的外加载腔。根据多注速调管的整体设计要求,主谐振腔的腔体为方形重入式谐振腔(长和宽约为20mm)、上下对称分布两个漂移头,漂移管头直径为12.8mm,两漂移头间隙为2mm,漂移管头上共分布内外两层电子注通道,内层电子注为在直径为4.84mm的圆周上均分5个漂移管,外层电子注为在直径10.1mm的圆周上均分10个漂移管,漂移管直径都为1.8mm。该谐振腔的工作频率为8500MHz和品质因数要求为40。

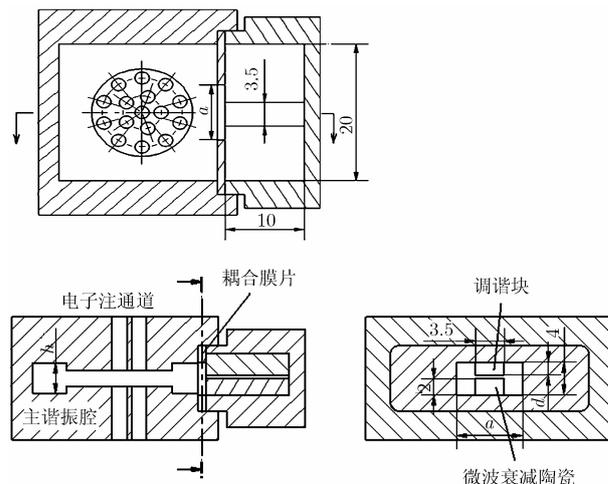


图1 外加载多注速调管谐振腔的结构示意图

外加载腔内的负载为某氧化铝-钛微波衰减陶瓷。负载腔的宽度为20mm,高度为4mm,长度为10mm。

## 3 多注速调管外加载谐振腔的设计和模拟

CST微波工作室是专门用于微波无源器件及天线设计与分析的软件包<sup>[5]</sup>。本文主要使用其本征模求解器对多注速调管外加载谐振腔进行模拟分析。

为了比较加载前后主腔中电场的变化,本文先对未加载的谐振腔作计算机模拟,腔壁为无氧铜,当腔高  $h=4\text{mm}$  时其谐振频率为8500MHz,  $Q$  值为3000。

将主谐振腔与负载腔相耦合,由于腔体开耦合口,主腔中的主模频率远远低于设计值,约为8291MHz。通过优化腔高  $h$ ,不断改变耦合膜片的尺寸  $a$  和  $d$  可以对外加载谐振腔的频率和品质因数进行调整。当  $h=3.78$ ,  $a=9$  且  $d=1.9$  时,主腔中的主模的频率和品质因数可调整为8485MHz和39.7(主模的频率还可以通过继续优化  $h$  而不断接近设计值)。

但是观察间隙中间的场强分布时,发现外加载谐振腔漂移头间隙中间的电场向负载腔一侧偏移而引起各漂移孔中心的电场不平衡。通常多注速调管谐振腔的设计中希望各电子注都能在电场较强的地方通过间隙,从而获得较高的增益和效率。而图2所示的场型的不对称性将使多注速调管各电子注总的增益下降,各电子注调制、群聚不同步,最终影响效率。因此必须对该外加载谐振腔继续加以改进。

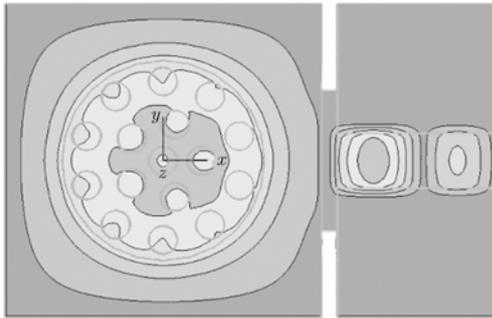


图 2 调整前外加载谐振腔间隙中间的场强分布不对称

由于主腔内的电场向负载一侧发生偏移，因此需将主腔中的漂移头也向负载腔一侧偏移，同时调整主谐振腔在  $X$ 、 $Y$  方向的尺寸，希望获得间隙中心对称电场的同时谐振腔能达到设计的频率和品质因数。当漂移头向负载一侧偏离主腔轴线  $L=0.4\text{mm}$ ，同时主谐振腔分别在  $X$  方向和  $Y$  方向减小和增大  $0.4\text{mm}$  时，间隙中心的场强分布比较对称，如图 3 所示，同时外加载谐振腔的谐振频率和品质因数变化不大。

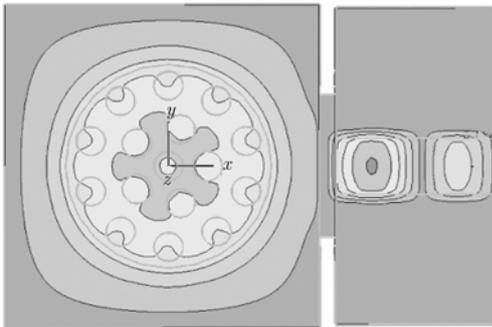


图 3 调整后外加载谐振腔间隙中间的场强分布

至此，本文通过计算机模拟设计出了满足要求的加载谐振腔，但是耦合口的宽度  $a$  和负载腔内的调谐块高度  $d$  如何影响主腔的品质因数  $Q$  需进一步研究，因此下面要通过计算机模拟，找出加载谐振腔调节的一般规律和方法。

首先，改变外加载谐振腔中耦合膜片的尺寸  $a$ ，结果如表 1 所示。

从表 1 可以看出随着  $a$  的不断加大，将有更多的能量耦合进负载腔并被吸收，主模的频率和品质因数都不断降低。

表 1 主模的  $f$  和  $Q$  随图 1 中外加载谐振腔中耦合膜片的尺寸  $a$  的变化规律

$a(\text{mm})$	8	8.5	9
主模 $f(\text{MHz})$	8553	8512	8485
主模 $Q$	48	43	39.7

表 2 主腔中的主模  $E_{110}$  和负载腔  $E_{210}$  模式随调谐块的高度  $d$  的变化规律

$d$		1.7	1.75	1.8	1.85	1.86	1.87	1.9
主模 $E_{110}$	$f(\text{MHz})$	8415	8420	8414	8434	8445	8456	8485
	$Q$	51	48	40	32.7	32.1	32.3	39.7
负载腔 $E_{210}$ 模	$f(\text{MHz})$	9388	9185	8911	8515	8413	8303	7932
	$Q$	3.9	4.0	4.3	4.5	4.59	4.6	4.4

矩形负载腔中存在诸多模式，图 4 所示为频率比较接近主腔主模  $E_{110}$  频率的  $E_{210}$  模式的电场图，该模式的场主要存在负载腔内， $Q$  较低通常为 4 左右。改变负载腔内的调谐块高度  $d$  可以改变该模式的谐振频率，同时主腔中的主模的谐振特性也随之变化。规律如表 2 所示。

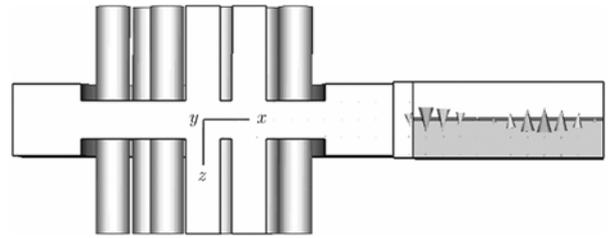


图 4 负载谐振腔内的  $E_{210}$  模式

从表 2 可以看出，随着负载腔内的调谐块高度  $d$  的不断变大，负载腔  $E_{210}$  模的谐振频率也不断降低，同时主模  $E_{110}$  的品质因数也不断降低。当其负载腔  $E_{210}$  模的频率接近主模  $E_{110}$  的谐振频率时，主模  $E_{110}$  的品质因数达到最低，如果  $d$  继续变大，则主模  $E_{110}$  的品质因数又会不断升高。

进一步计算表明，对于不同的耦合口宽度  $a$ ，调节负载腔内的调谐块高度  $d$  可以得到类似的变化规律。但是当耦合口宽度  $a$  越宽时，调节负载腔  $E_{210}$  模频率能得到的品质因数最低值就越低。

因此设计外加载谐振腔时，为了尽量减小耦合口对主腔内场型的影响，本文认为应采取如下步骤：(1)先取一个宽度较小的耦合口，然后调节负载腔内的调谐块高度  $d$ ，找到主腔基模的品质因数最低值  $Q_{\min}$ ；(2)若  $Q_{\min}$  仍然偏高，则加大耦合口宽度继续调节调谐块高度  $d$ ，确定该耦合口下的  $Q_{\min}$ ；(3)重复步骤(1)和步骤(2)，直到调节出符合要求的主腔基模的品质因数。

当本文进一步减小负载腔内调谐块的高度  $d$  时，负载腔的高次模  $E_{210}$  频率升高而逐步远离主腔频率失去加载功能，而负载腔基模  $E_{110}$  不断接近主腔频率，此时负载腔基模  $E_{110}$  变为主要加载模式，其加载规律与本文模拟的高次模  $E_{210}$  基本一致。

#### 4 结束语

本文对外加载谐振腔品质因数的影响因素和调节规律进行了详细的描述，并对由此引起的场分布不对称进行了模拟及改进。

一个实用的外加载谐振腔除了应该具备基本的耦合膜片、负载腔等之外,主腔还应该具备调谐膜片或调谐钉来调整主腔的频率;负载腔可以配备相应得调谐机构来调节负载腔的频率;通过改变耦合口的尺寸改变外加载谐振腔的品质因数。

本文仅仅对外加载谐振腔的主腔体结构、耦合膜片和负载腔的结构进行了分析,在实际工程应用中,如何研制出衰减性能好,导热率高,真空出气少且易于焊接或喷涂的实用的微波衰减材料对外加载谐振腔的推广和应用至关重要。

本文讨论的主谐振腔外加负载腔除了可以降低主腔中主模的品质因数,还可以用来消除主腔中的杂模。原理基本相同,即通过外加负载腔来降低主腔中杂模的品质因数使杂模不易谐振,同时保证主腔中的主模不受影响,从而达到消除杂模的目的。

**致谢:** 本项目的工作得到了丁耀根老师的关心和指导,罗积润研究员纠正了文章中的一些错误和不足,沈滨博士在

电磁场模拟计算方面给予了无私的帮助,在此表示衷心的感谢。

### 参 考 文 献

- [1] 张永清等. 用于大功率微波器件的新型薄膜衰减材料. 真空电子技术, 2001, (3): 20-22.
- [2] 石明. AlN-SiC 复合衰减材料及其电磁特性研究. [硕士学位论文], 电子科学研究院, 2006.
- [3] 中科院电子所编. 大功率速调管设计手册. 北京. 国防工业出版社, 1979 年: 1-2.
- [4] 李宗谦, 余京兆, 高葆新. 微波工程基础. 北京. 清华大学出版社, 2004: 264-265.
- [5] 张敏. CST 用户全书. 成都: 电子科技大学出版社, 2005.

张 丁: 男, 1979 年生, 工程师, 主要从事多注速调管的相关课题研究。