

一种新型滤波器加载同轴复合腔输出回路

华逢珍^{*①②} 沈斌^① 张兆传^① 丁耀根^① 曹静^① 王彩英^①

^①(中国科学院电子学研究所中国科学院高功率微波源与技术重点实验室 北京 100190)

^②(中国科学院研究生院 北京 100049)

摘要: 该文介绍了一种适用于 S 波段宽带多注速调管的新型滤波器加载同轴复合腔输出回路。根据耦合谐振腔理论对该输出结构进行了理论分析并给出其等效电路;采用 3 维电磁场仿真软件 CST-MWS 进行计算模拟,研究了输出腔间隙的场分布均匀性及输出回路间隙阻抗的频率特性。研究表明,采用该滤波器加载同轴复合腔输出回路不仅可以极大地降低多注速调管总体对高阴极发射电流密度的要求,而且在保证多注速调管 128 MHz/dB 带宽的同时输出腔间隙处的轴向电场有较好的均匀性。

关键词: S 波段宽带多注速调管;同轴复合腔;阴极发射电流密度;场均匀性;间隙阻抗的频率特性

中图分类号: TN122

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2013)05-1241-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2012.01256

A New Type of Output Circuit with Coaxial Compound Cavity Loaded with a Filter

Hua Feng-zhen^{①②} Shen Bin^① Zhang Zhao-chuan^①
Ding Yao-gen^① Cao Jing^① Wang Cai-ying^①

^①(Key Laboratory of High Power Microwave Sources and Technologies, Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

^②(Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: This paper presents a new type of coaxial cavity loaded with a ridged cavity and a filter as the output circuit of S-band multiple-beam klystron. Theoretic analysis and equivalent circuit of the output circuit are given based on the theory of coupling resonance cavity. The uniformity of the gap field distribution in the output cavity and the gap impedance varying with frequency of output circuit are studied and simulated by means of CST-MWS simulation software. The results show that coaxial output cavity of the output circuit with coaxial compound cavity loaded with a filter not only reduces the request for the high current density emitted by the cathode, but also realizes 128 MHz/dB broad bandwidth and ensures the uniformity of the gap field distribution in the output cavity.

Key words: S-band broadband multiple-beam klystron; Coaxial compound cavity; Current density emitted by the cathode; Uniformity of the field distribution; Gap impedance varying with frequency

1 引言

多注速调管具有工作电压低、频带宽、增益高、效率高、体积小和重量轻等优点,在现代通信、雷达、电子对抗以及粒子加速器等微波电子系统中得到越来越广泛的应用,成为现代宽带微波电子系统发射机末级功率放大器最有竞争力的器件之一^[1,2]。多注速调管的工作模式一般为圆柱腔的基模,由于受到腔体和漂移管空间的限制,其电子枪的收敛比较小,阴极发射电流密度通常较高,较大的电子注电流密度制约了多注速调管工作频率和输出功率的

提高,限制了其功率电平和使用寿命^[3]。因此,降低阴极发射电流密度是多注速调管的关键技术问题之一,目前国内达到的阴极发射电流密度约为 10~15 A/cm²。此外,多注速调管通常采用波导滤波器加载输出腔来展宽工作带宽,波导端面与输出腔直接耦合使得输出腔间隙处不同电子注通道的轴向电场分布不均匀,使输出腔间隙电压不能建立到最佳值,从而降低了多注速调管的效率^[4]。

针对以上问题,本文研制了一种新型滤波器加载同轴复合腔输出回路,该输出结构的同轴输出腔大幅度地减小了多注速调管总体对阴极发射电流密度的要求,有效降低了阴极负荷,提高了阴极乃至整管的工作寿命。此外,该输出回路采用新的耦合

输出方式, 在实现宽频带的同时保证了输出腔间隙处的轴向电场有较好的均匀性, 有利于整管效率的提高和稳定性的实现。

2 滤波器加载同轴复合腔输出回路的结构及特点与优势

2.1 滤波器加载同轴复合腔输出回路的结构

该滤波器加载同轴复合腔输出回路主要是由同轴输出腔、环状脊弓谐振腔及输出波导滤波器3部分组成, 其结构示意图如图1所示。

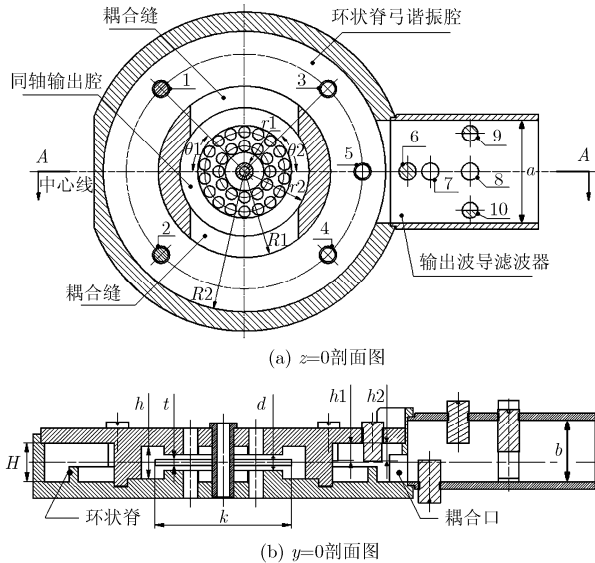


图1 滤波器加载同轴复合腔输出回路的结构示意图

输出腔采用工作在 TM_{010} 模、谐振频率为2800 MHz的单间隙环状双重入同轴腔。漂移头端面较大, 共设置30个内半径为4 mm的漂移通道, 内环12个漂移管均匀地分布在半径为18 mm的圆周上, 相邻漂移管中心间隔 30° , 外环18个漂移管均匀地分布在半径为28 mm的圆周上, 相邻漂移管中心间隔 20° , 如图1(a)所示。同轴输出腔与环状脊弓谐振腔之间采用对称的双耦合缝相互耦合, 耦合缝的厚度(t)为3 mm, 宽度(k)为75 mm。环状脊弓谐振腔中, 为了减小腔体体积, 在半径为82 mm的圆周上引入了高度为8.12 mm、环宽为4.9 mm的环状单脊; 在此圆周上还分布着5个半径为5 mm的金属销钉, 其中1, 2号为短路金属销钉, 3, 4, 5号为调谐金属销钉。环状脊弓谐振腔与输出波导滤波器之间采用高度为15 mm、与波导同宽的耦合口相互耦合。在输出波导滤波器中, 为了减小滤波器的长度, 增大滤波器的电容, 在中心线上设置了3个半径为6 mm的6~8号电容性金属销钉; 半径为5.5 mm的9号和10号金属销钉为电感性半圆柱金属销钉。其它参数尺寸如表1所示。

表1 输出回路尺寸参数

参数	符号	数值(mm)
同轴腔内半径	r_1	6.00
同轴腔外半径	r_2	45.00
同轴腔高度	h	16.00
漂移间隙距离	d	8.50
脊弓腔内半径	R_1	60.00
脊弓腔内半径	R_2	98.20
脊弓腔高度	H	21.20
输出波导宽度	a	72.14
输出波导高度	b	34.04

2.2 滤波器加载同轴复合腔输出回路的特点与优势

滤波器加载同轴复合腔输出回路的输出腔为设置30个直径为8 mm的漂移管的基模同轴腔, 设计阴极的直径为8 mm、总发射电流为90 A, 则阴极发射电流密度为 6 A/cm^2 ; 在相同的输出功率条件下, 以往传统的设计方案是设置24个(内环9个, 外环15个)直径为5 mm的漂移管的基模圆柱腔, 阴极的直径为5 mm、总发射电流为71.5 A, 则阴极发射电流密度为 15 A/cm^2 。从总体设计对阴极发射电流密度要求方面加以比较, 由于同轴输出腔的电子注分布径向半径、电子注数目及电子注通道半径增加, 从而电子注总横截面积增加, 使得阴极发射电流密度由 15 A/cm^2 降低到 6 A/cm^2 , 极大地降低了多注速调管对高阴极发射电流密度的要求, 有利于提高多注速调管的寿命和稳定性。此外, 设置24个漂移管的基模圆柱腔间隙处的特性阻抗 $(R/Q)_{\text{外环}}/(R/Q)_{\text{内环}}$ 约为0.74, 设置30个漂移管的基模同轴腔间隙处的特性阻抗 $(R/Q)_{\text{外环}}/(R/Q)_{\text{内环}}$ 约为0.91, 可见同轴输出腔内外两层漂移管间隙处的电场差别比基模圆柱腔更小, 有利于整管性能指标的实现。

为了保证输出腔中高频场的对称性和均匀分布, 输出腔与环状脊弓谐振腔之间采用对称的、较宽较薄的双耦合缝进行耦合。经仿真计算可得, 输出腔间隙处的特性阻抗 $(R/Q)_{\text{min}}/(R/Q)_{\text{max}}$ 约为0.86, 可见输出腔中高频场的分布比较均匀。

在环状脊弓腔中, 为了有效地减小腔体的体积, 引入了单脊。此外, 远离波导口处对称的两个金属销钉起到短路的作用, 两钉之间的腔体内没有场, 有利于场向波导滤波器的耦合输出; 靠近波导口处是3个调谐金属销钉, 通过调谐可以得到较好的输出平坦性, 进一步保证输出带宽。

为了进一步拓展带宽, 该输出回路加载了1节波导滤波器, 相对于传统的波导加电感圆柱或电感膜

片的波导滤波器，该滤波器中增加了多个电容性金属销钉，因此比传统的波导滤波器长度更短、体积更小。环状脊弓谐振腔与波导滤波器之间采用了尺寸较大的耦合口相互耦合，但并不影响输出腔间隙的场均匀性。

3 滤波器加载同轴复合腔输出回路的等效电路分析

根据耦合谐振腔的理论^[5]，图2给出了滤波器加载同轴复合腔输出回路的等效电路。设同轴输出谐振腔的等效电容为 C_1 、等效电感为 L_1 ，环状脊弓谐振腔的等效电容为 C_2 、等效电感为 L_2 ，最后1节腔体滤波器的等效电容为 C_3 、等效电感为 L_3 ，同轴输出谐振腔与环状脊弓谐振腔间双耦合缝的耦合电感为 L_{01} ，环状脊弓谐振腔与腔体滤波器间耦合口的耦合电感为 L_{02} ，输出传输线的特性阻抗为 Z_0 。该滤波器加载同轴复合腔输出回路关于中心线结构对称，其等效电路可简化为图3所示的3节滤波器输出电路的等效电路形式。

文献[5]中详细推导了图3等效电路的阻抗矩阵 $[Z]$ ，在此直接引用其结果：对于实际的输出回路，当 $I_2 = I_3 = 0$ 时，间隙阻抗为 Z_{11} ，假定各谐振腔的频率相同， $\Phi_1 = \Phi_2 = \Phi_3 = \Phi$ ，相对于负载阻抗 Z_0 的间隙阻抗为

$$\frac{R_{11}}{Z_0} = \frac{K_1^2 K_2^2}{(-\Phi^2 + K_1^2)^2 + \Phi^2(-\Phi^2 + K_1^2 + K_2^2)^2} \quad (1)$$

$$\frac{X_{11}}{Z_0} = \frac{\Phi(-\Phi^2 + K_1^2) - \Phi(K_2^2 - \Phi^2)(-\Phi^2 + K_1^2 + K_2^2)}{(-\Phi^2 + K_1^2)^2 + \Phi^2(-\Phi^2 + K_1^2 + K_2^2)^2} \quad (2)$$

其中参量的定义为： $K_r = \frac{L_{0r}}{L_r} Q$ 为耦合系数， $\Phi_r =$

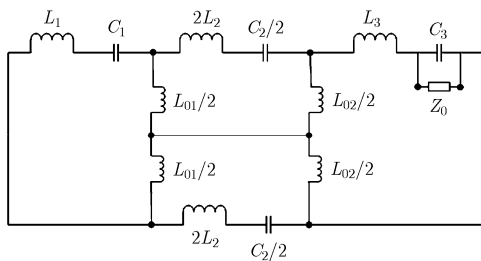


图2 滤波器加载同轴复合腔输出回路的等效电路

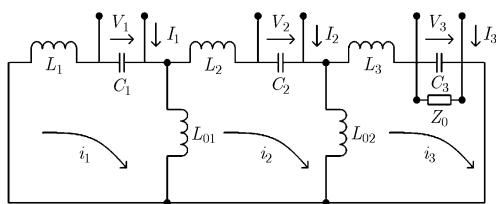


图3 3节滤波器输出电路的等效电路

$\frac{2(\omega - \omega_r)}{\omega_r} Q$ 为对应于工作频率 ω 和谐振频率 ω_r 的

相对相位差， $Q = Z_0/\rho$ 为第3个谐振结构与负载耦合的 Q 值， $\rho = R/Q$ 为输出谐振腔的特性阻抗。

由等效电路分析法推导出的间隙阻抗计算公式(1)，式(2)中有些参量不能精确给出，因此不能直接用于实际滤波器加载同轴复合腔宽带输出回路间隙阻抗频率特性的计算。在实际应用中，模拟计算方法^[6]能够较精确地计算出等效间隙阻抗的频率特性。在设计宽带输出回路和采用模拟计算方法进行优化的过程中，以上式(1)，式(2)可以作为调节各个元件的定性分析工具，也可用于分析和判断总体设计构想和模拟计算结果的合理性。另外，由设计要求的输出段带宽，可确定 K_1 和 K_2 ，从而由式(1)，式(2)计算得到满足特定要求的输出回路最理想的阻抗相位特性曲线或阻抗频率特性曲线，可作为模拟计算所得的实际输出回路间隙阻抗频率特性的优化目标。

4 同轴输出腔场分布均匀性分析

4.1 输出腔间隙处特性阻抗的计算

漂移管间隙处的特性阻抗是输出腔主要的参数之一，由于输出腔中各漂移管间隙处的特性阻抗随着间隙电场的改变而变化^[7]，因此本文通过计算各个漂移管间隙处的特性阻抗来间接分析输出腔间隙场分布的均匀性。在解决单端口问题时，CST-WMS的后处理计算不能直接得到工作模式的特性阻抗，因此可根据特性阻抗的定义式计算工作模式在各个漂移管间隙处的特性阻抗。

$$Z_i = \frac{\left(\int_{-h/2}^{h/2} E_{zi} \cdot dz \right)^2}{2\omega_0 W_0} = \frac{\left(\int_{-h/2}^{h/2} E_{zi} \cdot dz \right)^2}{4\pi f_0 \cdot \iiint_V w_e dV} \quad (3)$$

式(3)中 h 为同轴腔的高度， E_{zi} 为间隙处的纵向电场强度， ω_0 为工作模式的角频率， W_0 为输出腔中储能， w_e 为输出腔中电场能量密度分布， V 为输出腔的体积。

本文采用各个漂移管间隙处特性阻抗的均方根值 σ 来衡量输出腔间隙场分布均匀性，较小的 σ 值表示较均匀的间隙场分布。此外 σ 值与特性阻抗 Z 具有相同的单位，可以衡量各个漂移管间隙处特性阻抗的相互偏离程度。各个漂移管间隙处特性阻抗的均方根值 σ 可由式(4)计算求得^[8]。

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Z_i - \bar{Z})^2}, \quad \bar{Z} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Z_i \quad (4)$$

其中 n 为漂移管的数目, 在此例中 n 为16。图4(a)中给出了漂移管的编号, 由于输出结构的整体对称性, 这里只标注了一半的漂移管。

首先通过CST-WMS本征计算得到无耦合装置的规则圆柱型同轴腔的基模谐振频率, 再通过CST-WMS的后处理模块可得到各个漂移管间隙处的特性阻抗。对于滤波器加载同轴复合腔输出回路, 为了仿真计算同轴输出腔(记为A腔)间隙的特性阻抗, 采用同轴输出腔耦合环状脊弓波导再与矩形波导耦合的结构, 结构示意图如图4(b)所示。图4(b)中环状脊弓波导与图1中工作于谐振状态的环状脊弓谐振腔不同, 它工作在行波状态, 起到场合成的作用; 在结构上, 环状脊弓谐振腔去掉3个调谐钉并适当拓展腔体的环宽, 即可得到环状脊弓波导。若采用相同的同轴输出腔加载两节波导滤波器的输出结构, 为了实现与滤波器加载同轴复合腔输出回路相同的带宽(由第5节可知, 带宽约为130 MHz), 开耦合口后同轴输出腔(记为B腔)的 Q_{ext} 为240, 由此可确定耦合口的大小, 结构示意图如图4(c)所示。

为了比较, 分别计算了A腔和B腔的特性阻抗, 并分别绘制了16个漂移管间隙处特性阻抗 Z_i 的直方图, 如图5所示。

图5中的编号 $i=1, 2, \dots, 16$ 对应图4(a)中的16个漂移管。由图5(a)可见, 在忽略仿真误差的条件下, A腔漂移管间隙处的特性阻抗比较均匀; B腔中靠近耦合口的漂移管间隙处的特性阻抗比远离耦合口的漂移管间隙处的特性阻抗大, 特性阻抗差别较大, 如图5(b)所示。根据式(4)计算可得 $\sigma_A=0.955 \Omega$, $\sigma_B=4.132 \Omega$, 由 $\sigma_A < \sigma_B$ 可知A腔间隙处的场比B腔间隙处的场具有更好的均匀性。

4.2 输出耦合方式对场均匀性的影响

A腔和B腔的场均匀性有较大差别, 这是由输出腔不同的输出耦合方式决定的。A腔与环状脊弓波导的侧面耦合, 如图6(a)所示, 环状脊弓波导内的电场与输出腔中的电场反向, 由于环状脊弓波导外侧壁的限制, 环状脊弓波导内的场向耦合缝内扩张, 使得电场的零点依然为输出腔的腔壁, 因此环状脊弓波导的内侧壁通过较宽、较薄的耦合缝与输出腔

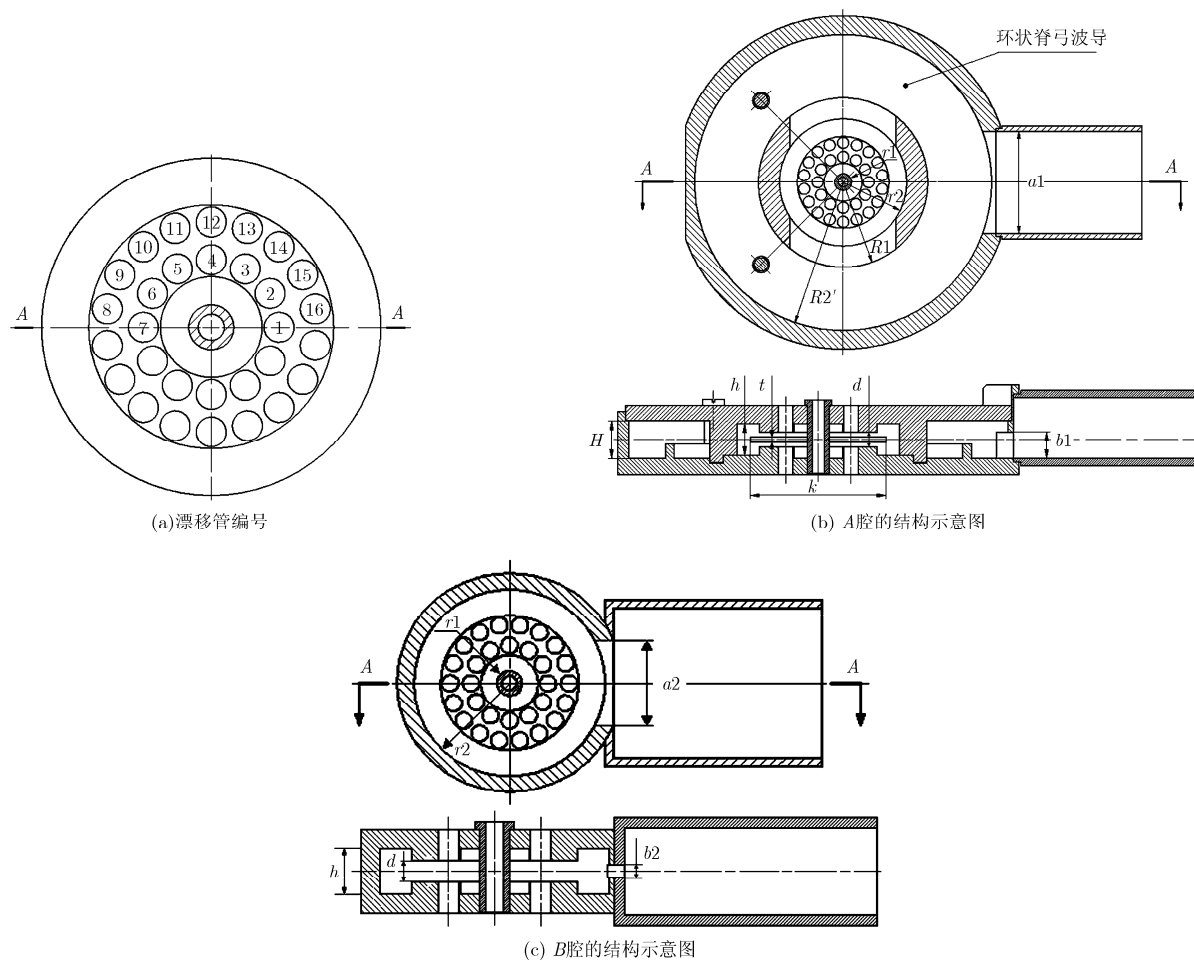


图4 结构示意图及漂移管编号

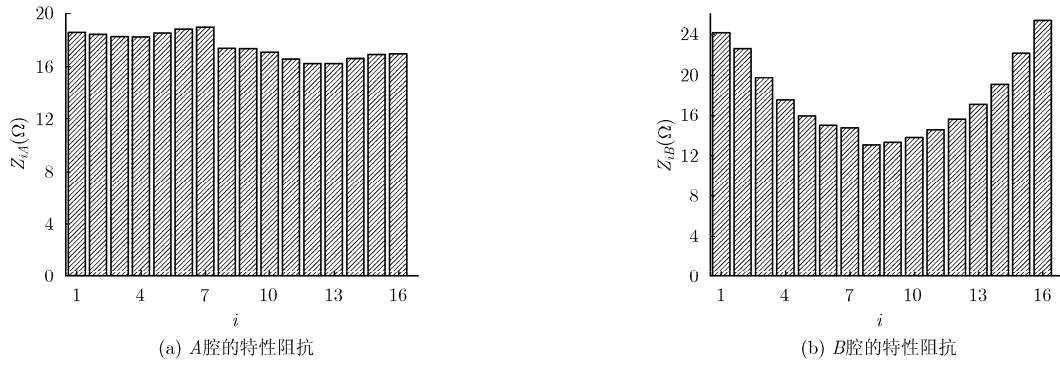


图5 场分布均匀性

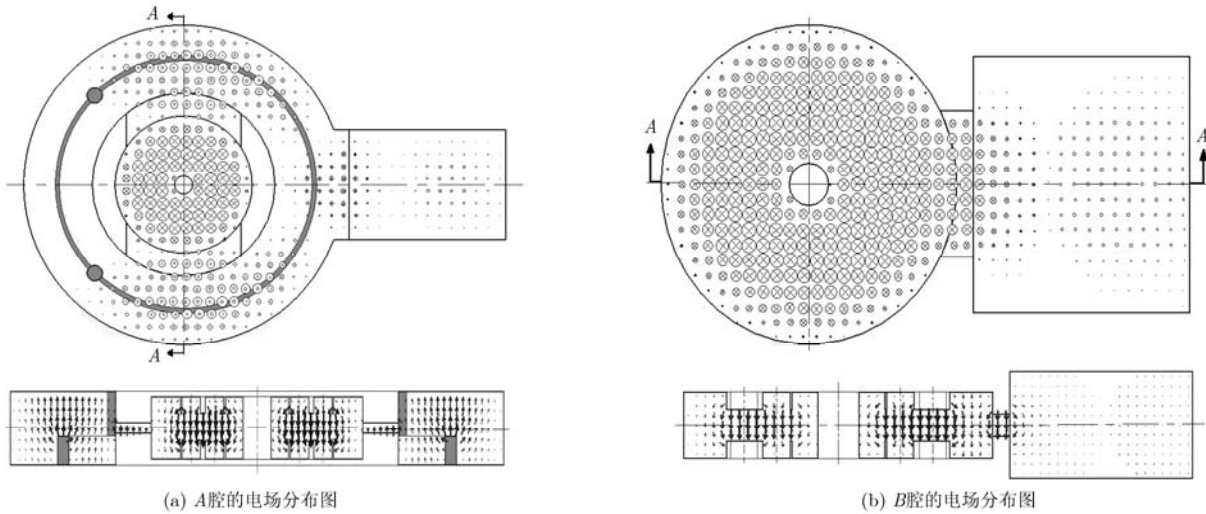


图6 电场分布图

耦合，对输出腔内的电场影响较小，输出腔的频率下降也较小。*B*腔与矩形波导的端面直接耦合，如图6(b)所示，由于耦合口尺寸较大并且矩形波导不限制电场沿波导的传输，使得电场的零点由输出腔壁扩展到波导内，则等效输出腔的体积增大，频率下降，中心往耦合口方向偏移，电场向耦合口方向集中，电场分布均匀性变差。

以上分析表明，采用同轴输出腔耦合环状脊弓波导再耦合矩形波导的输出结构，在保证输出同轴腔具有较高的特性阻抗的同时，也使得各个漂移管间隙处的高频场均匀分布，有利于提高注波互作用效率，这是滤波器加载同轴复合腔输出回路结构最重要的特点之一。

5 滤波器加载同轴复合腔输出回路的间隙阻抗频率特性

输出腔的间隙阻抗是速调管输出回路最重要的特性之一，其频率特性决定了输出带宽以及整管效率。研究表明，传输法是模拟滤波器型输出回路间隙阻抗频率特性的一种快捷而准确的方法^[9]。因此，可以采用传输法对滤波器加载同轴复合腔输出回路

进行仿真调试和优化设计。本文采用传输法和传统而经典的相位法^[10]模拟计算了滤波器加载同轴复合腔输出回路的间隙阻抗频率特性，结果如图7所示。

由图7可直接看出该滤波器加载同轴复合腔输出回路等效间隙阻抗实部的1 dB带宽为2766~2894 MHz，绝对带宽为128 MHz，相对带宽为4.5%，有效值约为230~284 Ω 。从图7中也可以看到，由传输法模拟计算的 S_{21} 的平方与传统相位法的模拟计算结果有较好的一致性，从而验证了传输法模拟滤波

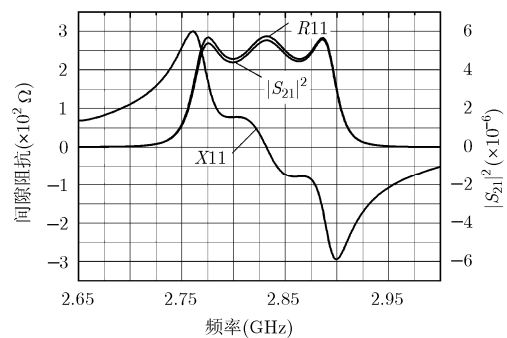


图7 输出腔等效间隙阻抗的频率特性曲线

器型输出回路间隙阻抗频率特性的有效性和准确性。

6 结束语

本文基于耦合谐振腔理论, 采用 3 维电磁场仿真软件, 研究了一种新型滤波器加载同轴复合腔输出回路。该输出结构的同轴输出腔降低了对阴极发射电流密度的要求, 解决了多注速调管要求高阴极发射电流密度的关键技术问题。此外, 相比于传统的输出腔直接与输出波导的端面耦合的方式, 在这种新型滤波器加载同轴复合腔输出回路中, 采用输出腔通过双耦合缝与环形脊弓谐振腔的侧壁耦合输出的方式, 在保证多注速调管带宽的同时, 使得输出腔间隙处的场分布更加均匀、结构更加紧凑, 对于新型多注速调管的研究和工程实现具有指导性的意义。

参 考 文 献

- [1] Nguyen K, Abe D K, Wright E, *et al.* Multiple-beam amplifiers[C]. 2011 Abstracts IEEE International Conference On Plasma Science (ICOPS), Chicago, IL, 2011: 214-217.
- [2] 张向辉. 高性能多注速调管发射机研究[D]. [硕士学位论文], 南京理工大学, 2011.
Zhang Xiang-hui. Research of high performance multiple-beam klystron transmitter[D]. [Master dissertation], Nanjing University of Science and Technology, 2011.
- [3] Silva R K B and Motta C C. Design of multiple-beam klystron cavities[C]. 2012 IEEE Thirteenth International Vacuum Electronics Conference (IVEC), Monterey, CA, 2012: 61-62.
- [4] 林福民. 3 节滤波器型 π 模双间隙腔加载同轴-矩形波导输出电路研究[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(11): 2775-2779.
Lin Fu-min. Research on 3-stage filter type of output circuit of π -mode double-gap cavity laded by coaxial-rectangular waveguide[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2008, 30(11): 2775-2779.
- [5] 丁耀根. 大功率速调管的理论与计算模拟[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008: 283-374.
- [6] 刘海旭. 速调管非对称双间隙输出腔及输出回路研究[D]. [硕士学位论文], 广东工业大学, 2011.
Liu Hai-xu. Investigation of klystron asymmetric double-gap out put cavities and out put circuit[D]. [Master dissertation], Guang Dong University of Technology, 2011.
- [7] 韩慧鹏, 王勇, 张瑞. 高次模多注速调管同轴输出腔性能改进的研究[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(8): 1981-1987.
Han Hui-peng, Wang Yong, and Zhang Rui. Study of the performance improvement on coaxial output cavity for higher-order mode multiple-beam klystron[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(8): 1981-1987.
- [8] Frederick M. Mathematics Manual[M]. New York: McGraw-Hill Book Company, Inc., 1962: 351.
- [9] 曹静, 丁耀根, 刘濮鲲, 等. 传输法模拟滤波器型输出回路的间隙阻抗频率特性[J]. 真空科学与技术学报, 2012, 32(5): 399-403.
Cao Jing, Ding Yao-gen, Liu Pu-kun, *et al.* Gap-impedance simulation of output circuit with filter in transmission method[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2012, 32(5): 399-403.
- [10] 电子管设计手册编辑委员会. 大功率速调管设计手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 1979: 150-159.
The editorial board for the vacuum tube design manuals. A Design Manual of the High-Power Klystron[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1979: 150-159.

华逢珍: 女, 1986年生, 硕士生, 研究方向为高功率微波真空电子器件与技术。

沈 斌: 男, 1976年生, 副研究员, 研究方向为高功率微波真空电子器件与技术。

张兆传: 男, 1965年生, 研究员, 研究方向为高功率微波真空电子器件与技术。