

W波段带状注速调管多间隙腔高频结构及其特性

陈姝媛^{1,2}, 阮存军¹, 阮望¹, 王勇¹, 张小峰^{1,2}

(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 100039)

摘要:通过对W波段带状注速调管的哑铃型谐振腔特性进行分析,利用三维高频仿真设计软件CST-MSW建立了单间隙、三间隙、五间隙腔的物理模型,详细分析了不同结构尺寸对于高频系统相关冷参数的影响,优化得到了相应的高频结构及其特注参数,以此作为开发的二维注波相互作用程序SBK2D快速计算的高频输入参数.同时,为了结合注波相互作用系统的冷参数三维仿真设计,采用MAGIC-3D对多间隙腔的高频特性及参数进行了仿真计算,得到的结果与CST冷参数设计基本一致,为W波段带状注速调管注波相互作用系统的设计提供了重要参数和依据.

关键词:W波段;带状注速调管;多间隙谐振腔;哑铃型;高频参数

中图分类号: TN249 **文献标识码:** A

RF structure and the cavity characteristics of W-band sheet beam klystron

CHEN Shu-Yuan^{1,2}, RUAN Cun-Jun¹, RUAN Wang¹, WANG Yong¹,
ZHANG Xiao-Feng^{1,2}

(1. Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: The dumb bell resonant cavity characteristics for W-band sheet beam klystron (SBK) are analyzed with one-, three-, and five-gap coupled cavity models by three dimensional high frequency simulation software (CST-MSW). The dependence of the cold parameters on the configurations of the cavity was analyzed. For the particle in cell (PIC) simulation analysis, the optimized cavity frequency combination of eight-cavity WSBK circuit was obtained using 2-D software SBK2D, which runs with high speed, thereby allowing an efficient investigation of input parameters. To unify the electronic-beam wave interaction system's hot parameter design, the calculated results are examined by PIC simulation (MAGIC-3D), and show good agreement with CST, thereby confirming the design method mentioned above. These results provide key parameters and a good foundation for developing higher performance on RF structure of sheet beam klystron in the future.

Key words: W band; sheet beam klystron; multi-gap coupled cavity; dumbbell; RF parameter

PACS: 32.30.Bv, 84.40.Fe, 42.50.Pq, 41.85.Ja, 85.75.Mm

引言

新型带状注速调管(Sheet Beam Klystron, SBK)是在传统的单注速调管的基础上,采用宽高比很大的薄片形带状电子注,在保持适当工作电压的情况下有效降低电流密度和空间电荷力,有望提高注波

互作用效率和增加功率容量的一种新型微波和毫米波真空电子器件^[1].采用周期永磁聚焦系统和平面高频结构,因而具有体积小、重量轻、结构紧凑等技术优势.

目前,带状注速调管已经成为真空电子器件前沿领域重要的发展方向之一^[2].2006年,Jensen等

收稿日期:2011-05-04,修回日期:2012-03-08

基金项目:国家自然科学基金(60501019,10775139,60971073)

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (60501019, 10775139, 60971073)

作者简介(Biography):陈姝媛(1989-),女,湖南永州人,博士研究生,主要从事新型高功率微波源与技术的研究. E-mail: shuyuan0808@163.com.

Received date: 2011-05-04, revised date: 2012-03-08

人用开发的一维仿真软件 AJDISK 设计出了 W 波段带状注速调管^[3], 计算得到的不同频率点的增益值与测量结果基本一致; 2007 年, 美国的 SLAC 设计出了峰值功率 50 kW、平均功率 2.5 kW 的 W 波段带状注速调管^[4]; 2009 年, Cusick 等人设计的 X 波段带状注速调管峰值功率为 5 MW, 研制出的高频样管得到了 2.67 MW 的峰值功率输出^[5], 成为带状注速调管发展的里程碑; 同年, Nguyen 等人对四个多间隙谐振腔的 220 GHz 带状注扩展互作用速调管进行了设计, 以 25 mW 的输入得到了 453 W 的功率输出^[6]; 2010 年, Young-Min, Shin 等人全面研究并设计了具有峰值输出功率 50 kW 的 W 波段带状注速调管多间隙腔准光输出结构和注波互作用系统^[7-8]。目前, 我国的带状注速调管研制工作还处于探索阶段, 因此, 对带状注速调管的高频结构及其注波互作用系统研究具有重要的意义。

1 带状注速调管高频结构设计要求

速调管高频结构是高能电子注与高频电磁场相互作用并最终使电子注能量转化为高频能量的组件结构, 它是一组由漂移管连接起来的多个谐振腔链。目前, 传统的速调管均采用圆柱轴对称单间隙或双间隙谐振腔。但在带状注速调管中, 为了实现较高的注波互作用效率和功率容量, 引入了多间隙谐振腔。同时, 为了实现在大的宽边方向高频场的均匀性, 其高频系统一般采用哑铃型结构的谐振腔。带状注速调管高频系统的研究重点是高频谐振腔的结构及其特性参数, 其性能直接影响速调管的输出功率、效率、增益和带宽等诸多参数。

1.1 谐振腔的选择要求

带状注速调管的谐振腔一般采用工作在 TM_{110} 模式的哑铃型谐振腔, 这种谐振腔中间部分为一段波导, 波导末端为两个大小相同的耦合腔, 其尺寸与中间波导不同。如图 1 所示, 与矩形谐振腔不同, 哑铃型谐振腔可以实现与电子注垂直的 XY 截面上电场的均匀分布, 以实现电子注与高频场良好的匹配和充分的能量交换, 并获得很高的注波互作用效率。此外, 带状注速调管采用了多间隙谐振腔, 具有比单间隙腔更长的等效间隙长度, 也可进一步提高注波互作用效率和输出功率。

1.2 高频参数设计要求

带状注速调管谐振腔的关键高频参数为谐振频率 f_0 , 特性阻抗 R/Q 和品质因子 Q 。本文所研究的 W 波段带状注速调管参数见表 1。为了获得相应的

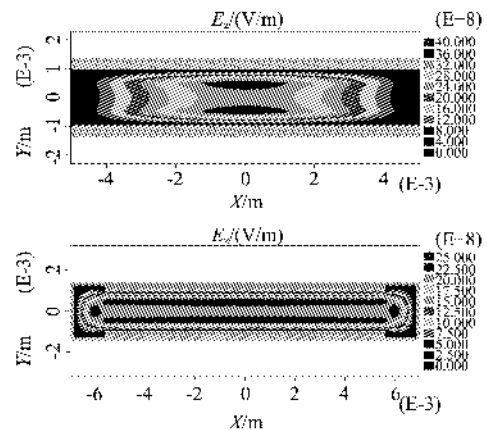


图 1 带状注速调管不同谐振腔的场形分布图
(a) 矩形谐振腔 (b) 哑铃形谐振腔
Fig. 1 Field distribution in different resonant cavity structure (a) rectangle cavity (b) dumbbell cavity

高频输出特性, 所研究的谐振腔应满足以下的设计目标: 1) 工作频率为 f_0 , 具有大于 100 MHz 的带宽; 2) 输入腔和输出腔的外观品质因子 Q_{ext} 满足速调管工作要求; 3) 各个谐振腔间隙电场保持均匀; 4) 获得尽可能大的特性阻抗 R/Q ; 5) 避免各个谐振腔间隙可能产生的高频击穿; 6) 充分抑制谐振腔高次模式, 以及引起的振荡和杂谱。依据上述要求并参照文献[8], 所研究的 W 波段带状注速调管拟采用四个单间隙腔, 三个三间隙腔和一个五间隙腔。为此, 需要对这些单间隙谐振腔、三间隙耦合谐振腔、五间隙耦合谐振腔的高频特性进行仿真设计与分析, 以满足所设计的速调管工作要求。中间腔采用三间隙腔, 以及输出腔采用五间隙腔, 主要是为了满足输出功率 30 kW 时的功率容量并有效避免高频击穿问题。

表 1 W 波段带状注速调管的工作参数

Table 1 Parameters for the W-band SBK

电子注电压/kV	75	均匀磁场强度/T	0.3
电子注电流/A	3.9	输出功率/kW	30
漂移管尺寸/mm ²	12 × 0.8	效率/%	11
电子注尺寸/mm ²	10 × 0.5	增益/dB	34


2 高频结构的 CST 三维仿真设计研究与分析

2.1 多间隙谐振腔物理模型的建立

CST 软件 (Computer Simulation Technology) 是一款对三维全波电磁场结构进行仿真的有效工具, 为带状注速调管过模非轴对称多间隙腔高频结构的三维仿真设计及其特性研究提供了功能完善的平台。表 2 给出了利用 CST-MWS 建立的带状注速调

管单间隙腔、三间隙腔和五间隙腔的物理模型(只给出以 $x-y$ 为对称面的部分),以及通过分析内置的优化器和参数扫描器对系统进行设计、分析和优化,最后用后处理模板对 2D/3D 场、1D 信号及标量场进行相关处理和分析,得到了对应工作模式下高频场形图计算结果.

表 2 CST-MWS 优化后的工作模式场形图
Table 2 Simulation of field distribution of optimized TM_{110}

单间隙哑铃型谐振腔 (single dumbbell cavity)	三间隙哑铃型谐振腔 (three-gap dumbbell cavity)	五间隙哑铃型谐振腔 (five-gap dumbbell cavity)
工作模式下 XY 截面场形图 (field distribution of x-y section plan)		
		

2.2 结构参数对场强均匀性的影响分析

图 2 给出了带状注速调管哑铃型谐振腔几何结构及其 9 个参数, $cenwh$ 、 $cenht$ 、 $cenlh$ 分别表示中间波导模型的 x 、 y 、 z 方向的尺寸, $reewh$ 、 $reelt$ 、 $reelh$ 分别表示哑铃型谐振腔两边的耦合腔模型的 x 、 y 、 z 方向的尺寸, $drwh$ 、 $drht$ 、 $drlh$ 分别表示电子注漂移管的 x 、 y 、 z 方向的尺寸. 其中漂移管的横截面积的尺寸 $drwh$ 、 $drht$ 是由带状注速调管总体设计确定的, $drlh$ 的大小根据谐振腔 E_z 沿漂移管 Z 方向的场强可以衰减到足够小, 以至于当再增大 $drlh$ 值时, 不再影响腔体的谐振频率为依据进行确定, 其它的几何结构参数是可以变化的. 为了满足谐振腔间隙电场均匀性的要求, 必须用后处理模块扫描结构参数, 研究腔体各高频结构尺寸变化对于场强均匀性的影响. 研究表明, $cenht$ 、 $reewh$ 、 $cenwh$ 和 $reelt$ 等四个参数对于场强均匀性影响比较显著, 而其它的尺寸参数影响不大.

图 3 讨论了在工作频率下, 五间隙谐振腔的高频参数对于场强均匀性的影响图 3 给出的情况, 计算得到在工作频率时, 五间隙谐振腔的不同结构参数变化图. 图 3 以五间隙腔为例(单间隙、三间隙腔类似), 分别给出了四个结构参数 $cenht$ 、 $reewh$ 、 $cenwh$ 和 $reelt$ 以 0.05 mm 的步长变化 0.2 mm 幅值时 TM_{110} 模沿中心线的电场均匀性的影响情况. 可以看出, 对场强均匀性影响大小依次为: $cenht$ 、 $reewh$ 、 $cenwh$ 和 $reelt$, 其中参数 $cenht$ 对场强均匀性的影响最为敏感, 参数 $cenht$ 越大, 曲线越凸; $reewh$ 、 $cenwh$ 、 $reelt$ 越大, 曲线越凹. 该结论可以从哑铃型谐振

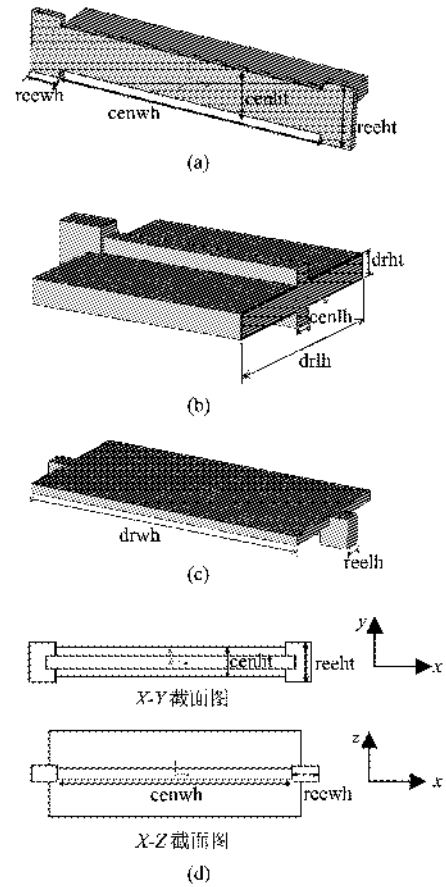


图 2 哑铃型谐振腔的截面图(a)XY 截面(b)YZ 截面(c)XZ 截面(d)主要结构参数
Fig.2 Cross sectional view of dumbbell cavity along (a)XY plane, (b)YZ plane, (c) XZ pland, and (d) primary structure parameter

腔储能角度进行分析, 当中间波导高度 $cenht$ 较小时, 谐振腔在中间波导段沿 z 方向形成的工作模式 TM_{110} 其频率距离截止频率较近, 因此其高频电场在中间波导中距离哑铃形部分较近的两端电场强, 中间弱, E_z 曲线变凹. 当逐步增大中心高度 $cenht$ 时, 距离截止频率逐渐变远, 使得波导中间部分电场逐渐增强, 即得到图 3 中由凹形逐渐向凸形变化的过程. 因此, 为了保证哑铃型谐振腔在宽边方向上电场强度均匀性的要求, 需要对四个参数仔细调节和优化, 最后可以得到的 $cenht$ 、 $reewh$ 、 $cenwh$ 和 $reelt$ 分别为 1.810 、 1.220 、 11.200 、 2.520 mm .

2.3 结构参数对特性阻抗的影响分析

谐振腔的特性阻抗表示一个高频周期内谐振腔的储能和谐振腔间隙上建立的电场的大小. 特性阻抗越大, 电子注与谐振腔电场的相互作用强度越强, 特性阻抗直接影响到整管的效率和带宽. 由于带状注速调管输出腔一般采用多间隙腔, 因此重点研究五

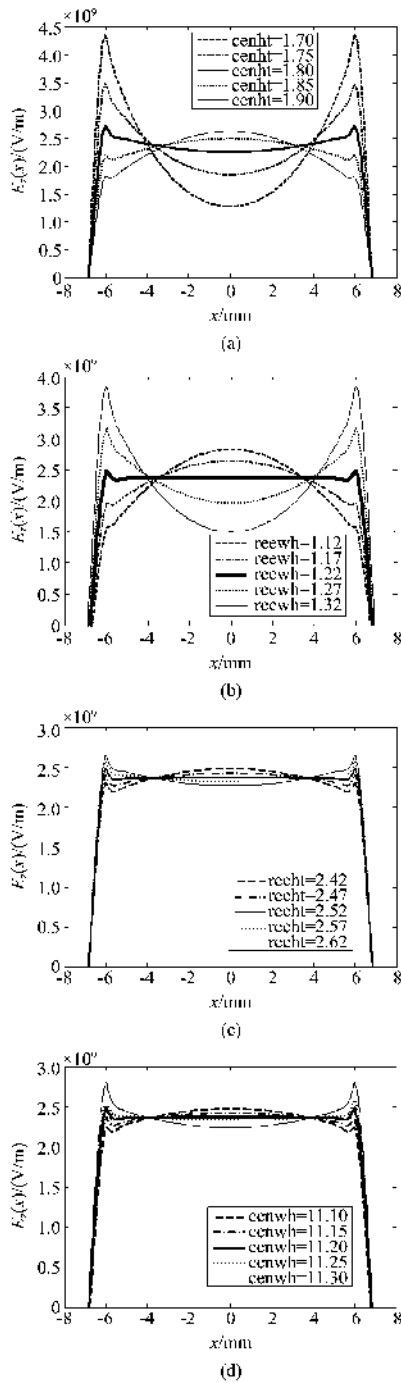


图3 各高频结构参数对场强均匀性影响 (a) reewh = 1.22 mm, cenwh = 11.2 mm, reeht = 2.52 mm, (b) cenht = 1.81 mm, cenwh = 11.2 mm, reeht = 2.52, (c) cenht = 1.81 mm, reewh = 1.22 mm, reeht = 2.52 mm, (d) cenht = 1.81 mm, reewh = 1.22 mm, cenwh = 11.2 mm

间隙腔结构参数对于特性阻抗的影响,如图4所示,单间隙腔和三间隙腔与其类似.由结果分析得出,在保持工作模式不变的情况下,特性阻抗大小与中心波导高度 cenht 成正比,与哑铃型谐振腔两边耦合腔宽度 reewh、两边耦合腔高度 reeht、中心波导宽度 cenwh 成反比.从谐振腔储能角度分析,这是因为

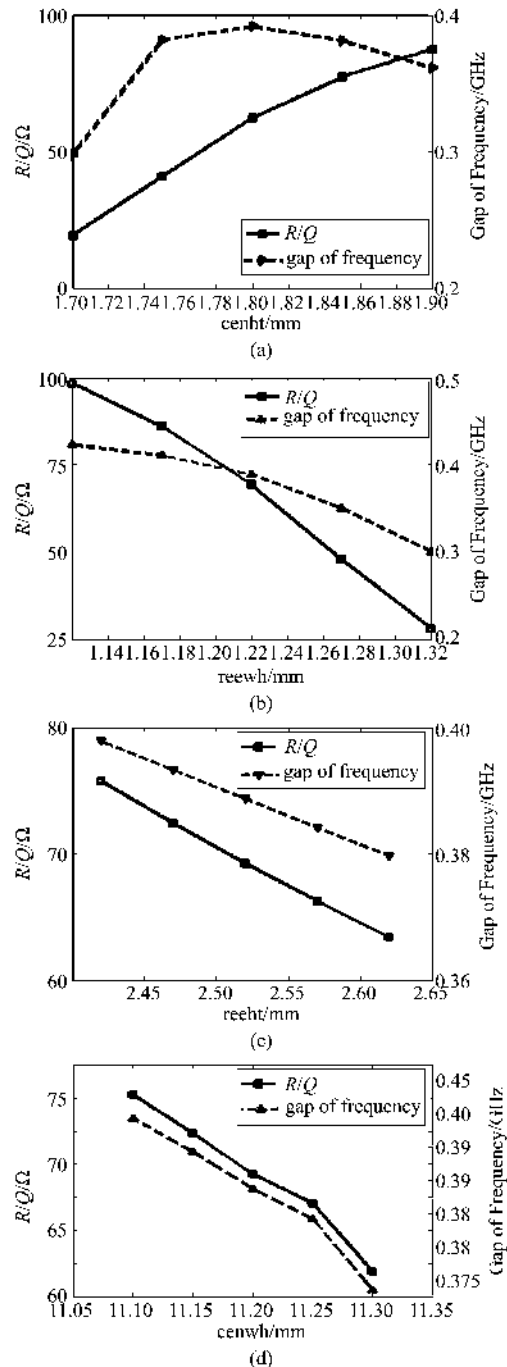


图4 各高频结构参数变化对于特性阻抗和频率间隔的影响 (a) cenht, (b) reewh, (c) reeht, (d) cenwh

cenht 越大,谐振腔间隙上储能越多,在谐振腔间隙上建立的电场也越大,特征阻抗就越大.而 reewh、reeht、cenwh 越大,哑铃型谐振腔两边耦合腔的储能越多,中间波导储能越小,在谐振腔间隙上建立的电场也越小,特征阻抗就越小.当 cenht、reewh、reeht、cenwh 分别变化 0.2 mm 时, R/Q 的大小分别变化 75.8Ω 、 70.5Ω 、 13.4Ω 、 12.3Ω . 因此,参数 cenht、reewh 对于特性阻抗的影响都比较敏感.在设计中,要求获得尽可能大的特性阻抗,单间隙腔、三间隙腔、五间隙腔最大 R/Q 的设计参数依次为 20、50 和 75. 因此,可以通过适当增加 cenht 和减小 reewh、cenwh、reeht 来提高 R/Q ,使其达到提高注波相互作用效率的要求.最后优化得到的五间隙腔的特性阻抗为 70.12Ω .

2.4 结构参数对模式及其频率间隔的影响

哑铃型谐振腔沿电子注窄边方向上尺寸小,工作在单模.而沿电子注宽边上的大尺寸可能引入较多的非工作模式,对于三间隙腔和五间隙腔引入的非工作模式将更多.

单间隙腔主要由为工作高次模式对于工作模式 TM_{110} 的竞争,依次为 TM_{210} 和 TM_{310} 模,可以通过优化几何尺寸参数,使得 TM_{210} 和 TM_{310} 场值很小,以至于基本不存在.图 5(a) 图给出了单间隙腔高次模式 TM_{310} 模带来的模式竞争,图 5(b) 图给出了工作模式图.

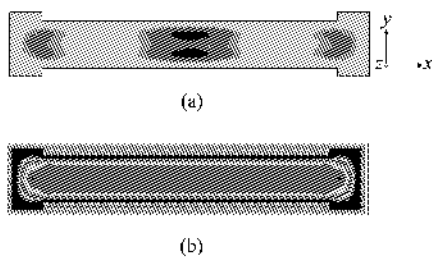


图 5 模式图 (a)非工作高次模式图 TM_{310} , (b)工作模式图 TM_{110}

Fig. 5 Field distribution (a) TM_{310} , and (b) TM_{110}

多间隙腔的模式竞争包括非工作高次模式竞争和多间隙腔结构所引起的模式竞争.由于高次模式离工作模式的频率间隔一般比较大,高次模式引起的模式竞争比较容易避免.对于由多间隙结构引起的模式竞争,对于工作模式的要求为每个谐振腔间隙都工作在 TM_{110} 模,且每个间隙沿 z 轴的电场方向要保持一致,即 2π 模,以满足电子注通过这些间隙时注波相互作用要求.以五间隙谐振腔为例,仿真计算

结果表明,工作模式主要与 2π 模、 $2/5\pi$ 模、 $4/5\pi$ 模之间存在着模式竞争,如图 6 所示.

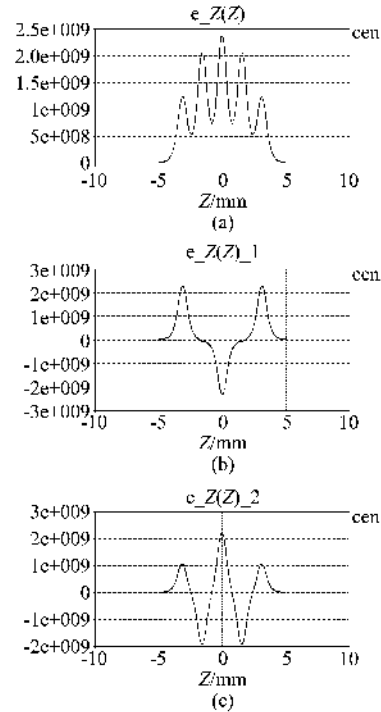


图 6 五间隙腔 E_z 沿 z 方向不同模式场强分布图 (a) 2π 模, (b) $2/5\pi$ 模, (c) $4/5\pi$ 模

Fig. 6 RF electric field of different mode (a) 2π -mode, (b) $2/5\pi$ -mode, and (c) $4/5\pi$ -mode

对于 $2/5\pi$ 模中 1、3、5 间隙的电场方向相反, 2、4 间隙电场为零;而 $4/5\pi$ 模中 1、3、5 间隙与 2、4 间隙的电场方向相反,且都不为零;这两个干扰模式需要在设计中必须避免.因此,必须严格调节各结构参数,经过仔细分析得到需要的工作模式.为了保证带状注速调管有一定的工作带宽,必须增大工作模式与非工作模式之间的频率间隔,同时使所选择的工作模式不易激起非工作模式,保证其工作的稳定性.用后处理模块研究了各个高频尺寸参数对于模式间隔的影响,见图 4.由结果分析得知,当 cenht、reewh、reeht、cenwh 四个参数以一定步长变化 0.2 mm 时,选定的工作模式与距离其最近的非工作模式之间的频率间隔分别变化 0.131、0.122、0.026、0.018 GHz. 设 k_m 和 k_n 分别为 TM_m10 和 TM_n10 的临界波数,两者之差 Δk 可用来衡量模式频率间隔^[9]:

$$\Delta k = k_m - k_n = \frac{m\pi}{cenwh} - \frac{n\pi}{cenwh} \propto \frac{1}{cenwh}$$

可以看出,电子注宽边尺寸 cenwh 越小, Δk 越大, TM 模式频率间隔越大,同理其他参数类似.设计的

带状注速调管工作在 f_0 , 频带宽度要求 100 MHz, 因此在设计和工程加工过程中必须严格控制参数的精度要求, 并尽可能增加频率间隔值, 以达到增强高频稳定性, 减少模式竞争的效果. 此外, 在一定范围内, 减小上述结构参数尺寸有利于增大模式间隔, 从而减少模式竞争.

2.5 结构参数的优化与确定

综合考虑以下四个方面的因素: 1) 整管工作频率为 f_0 ; 2) 场强 E_z 沿 x 方向保持均匀; 3) 特性阻抗尽可能大; 4) 模式间隔尽可能大. 最终通过详细的优化设计, 得到 9 个结构参数尺寸值、特性阻抗和频率间隔, 如表 3 所示.

表 3 优化后的谐振腔结构参数

Table 3 Optimized RF structure parameters of resonant cavity

	单间隙(one-gap)	三间隙(three-gap)	五间隙(five-gap)
cenwh/mm	11.2	11.2	11.2
Conht/mm	1.83	1.82	1.82
Cenlh/mm	0.56	0.56	0.56
Rcewh/mm	1.23	1.22	1.22
Reehl/mm	2.47	2.55	2.52
Reelh/mm	0.77	0.7	0.68
Drwb/mm	12	12	12
Drbt/mm	0.8	0.8	0.8
Drlh/mm	4	8	10
$R/Q(\Omega)$	15.09	42.88	70.12
$\Delta f/\text{GHz}$	1.9	0.56	0.40
竞争模式	TM_{310}	$2/3\pi$ 模	$2/5\pi$ 模

3 高频结构的 Magic 仿真计算与验证

为了采用 MAGIC-3D 对带状注速调管注波互作用系统进行三维仿真设计, 利用该软件对多间隙腔的高频特性及参数进行了仿真验证. 图 7 给出了由 MAGIC-3D 软件计算的单间隙腔、三间隙腔、五间隙腔的电场 E_z 在 x - z 截面的场形分布图. 可以看出, 三间隙腔、五间隙腔的场形是左右对称的, 并且由于存在间隙耦合, 中间腔的场强最强, 两边腔依次减小. 图 8 将 CST 计算的场强强度结果与 MAGIC 的计算结果进行了对比, 结果表面波形基本一致, 只是强度最大值略有微差别. 表 4 给出了上述两种三维仿真软件得到的关键高频参数, 可以看出计算结果基本一致, 验证从而证了高频参数设计的正确性.

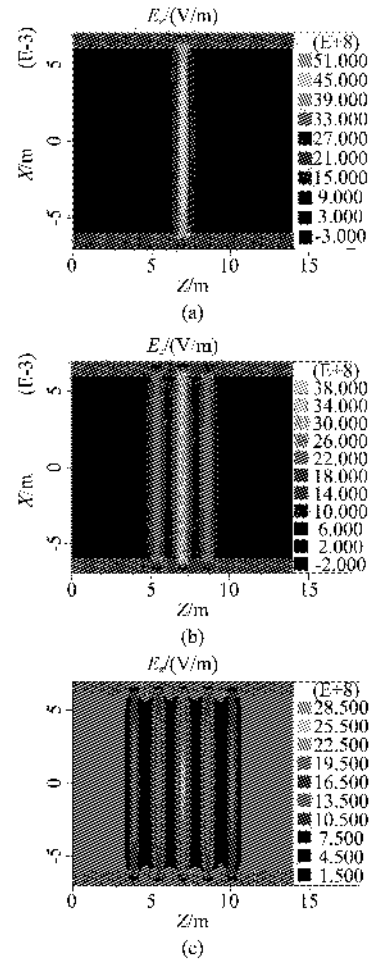


图 7 XZ 截面场形分布图(MAGIC 3D 仿真模拟结果) (a)单间隙, (b)三间隙, (c)五间隙

Fig. 7 Field distribution of W-band sheet-beam Klystron along X-Z plane simulated by Magic 3D (a) single cavity, (b) three-gap cavity, and (c) five-gap cavity

表 4 CST 和 Magic 的计算结果对比

Table 3 Results calculated by CST software and MAGIC-3D

	单间隙		三间隙		五间隙	
计算结果对比	CST	Magic 3D	CST	Magic 3D	CST	Magic 3D
工作频率/GHz	$f_0 - 0.02$	$f_0 - 0.16$	$f_0 + 0.15$	$f_0 + 0.02$	$f_0 + 0.05$	$f_0 - 0.05$
$R/Q(\Omega)$	15.09	15.63	42.88	45.82	70.12	77.55
与最邻近干扰模式的频率间隔/GHz	1.9	2.0	0.56	0.60	0.40	0.43

4 结论

对 W 波段带状注速调管的高频结构进行了研究, 采用 CST-MSW 对哑铃型单间隙腔、三间隙腔以及五间隙腔进行了设计; 分析了不同的高频结构参数对于场强均匀性、特性阻抗、模式竞争和频率间隔的影响; 研究了如何增大模式间隔、有效减少模式竞争, 并给出了优化后的高频结构. 最后结合注波互作

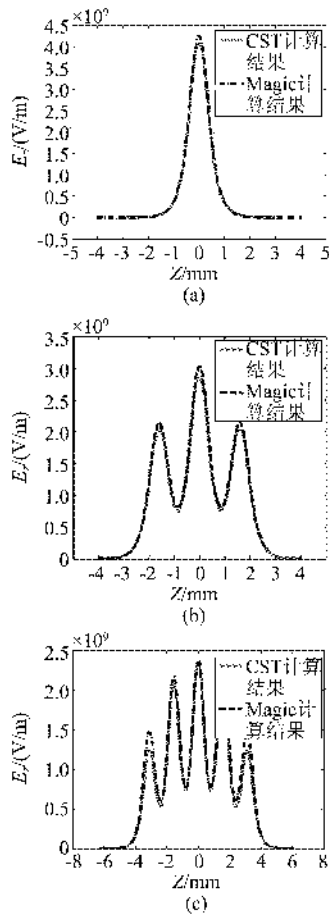


图8 带状注多间隙腔 E_z 沿 z 方向场强对比图
(a) 单间隙, (b) 三间隙, (c) 五间隙
Fig.8 Results calculated by CST software and MAGIC-3D (a) Single cavity, (b) three-gap cavity, and (c) five-gap cavity

用系统的热参数三维仿真设计,采用 MAGIC-3D 三维仿真软件对结果进行了验证,得到了较好的一致

性. 研究结果对于 W 波段带状注速调管高频结构的物理设计和工程加工制造具有重要的参考价值.

REFERENCES

- [1] Scheitrum G, Caryotakis G, Burke A, *et al.* W-band sheet beam klystron design. *Infrared and Millimeter Waves*, 2004 [C]. 2004 and 12th International Conference on Terahertz. 525 - 526.
- [2] Scheitrum G. Design and construction of a W-band sheet beam klystron [C]. SLAC-PUB_11866, June 2005. AIP Conference Proceedings, 2006; 120 - 125.
- [3] Jensen A J, Caryotakis G, Scheitrum G, *et al.* Sheet beam klystron simulations using AJDISK [C]. *Vacuum Electronics Conference, 2006 held Jointly with 2006 IEEE International Vacuum Electron Sources.*, IEEE International. 2006; 489 - 490.
- [4] Scheitrum G, Caryotakis G, Jensen A, *et al.* Fabrication and testing of a w-band sheet beam klystron [C]. 2007 8th IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC) 2007; 191 - 192.
- [5] Cusick M, Atkinson J, Balkcum A, *et al.* X-band sheet beam klystron (XSBK) [C]. *Vacuum Electronics Conference, 2009. IVEC '09.* IEEE International. 2009; 296 - 297.
- [6] Nguyen K T, Pasour J, Wright E L, *et al.* Design of a G-band sheet-beam extended-interaction klystron [C]. 2009 IEEE International Vacuum Electronics Conference. 2009; 298 - 299.
- [7] Shin Y M, Barnett L R., Luhmann NC. Quasi-optical output-cavity design for a 50-kW multicavity W-Band sheet-beam klystron [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2009; 3196 - 3202.
- [8] Shin Y M, Wang J X, Barnett L R, *et al.* Particle-In-Cell simulation analysis of a multicavity W-band sheet beam klystron [J]. *Electron Devices, IEEE Transactions* 2011, 58 (1); 251 - 258.
- [9] Colby E R, Caryotakis G, Fowkes G W, *et al.* W-Band sheet beam klystron simulation, AIP conference proceedings, 1999; 74 - 90.