

研究与试制

## 双轴同轴型微波介质滤波器的仿真与设计

张丽慧<sup>1</sup>, 张火荣<sup>1</sup>, 夏永明<sup>2</sup>, 陶锋烨<sup>1</sup>, 方涛<sup>1</sup>

(1. 浙江嘉康电子股份有限公司, 浙江 嘉兴 314000; 2. 浙江理工大学, 浙江 杭州 310018)

**摘要:** 在介绍双轴同轴型谐振微波介质滤波器结构及工作原理基础上, 利用理论公式计算与 HFSS10.0 三维有限元仿真的混合设计方法, 设计了满足性能要求(插入损耗为-3 dB以上; -3 dB带宽为18 MHz以上)的微波介质滤波器。滤波器试样实际测试结果表明, 该设计方法正确可行, 测试结果与仿真结果有很好的-致性, 最终设计出的滤波器插入损耗为-2.83 dB, -3 dB带宽为35 MHz。

**关键词:** 双轴同轴微波介质滤波器; HFSS 仿真; 插入损耗; 带宽

doi: 10.3969/j.issn.1001-2028.2009.04.005

中图分类号: TN713<sup>+</sup>.3

文献标识码: A

文章编号: 1001-2028 (2009) 04-0014-04

## Simulation and design of double coaxial microwave dielectric filter

ZHANG Lihui<sup>1</sup>, ZHANG Huorong<sup>1</sup>, XIA Yongming<sup>2</sup>, TAO Fengye<sup>1</sup>, FANG Tao<sup>1</sup>

(1. Zhejiang Jiakang Electronics Co., Ltd, Jiaxing 314000, Zhejiang Province, China; 2. Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** The structure and operational principle of double coaxial microwave dielectric filter were introduced. The filter which can meet the property requirements (insertion loss was more than -3 dB and -3 dB bandwidth was more than 18 MHz) was designed by theoretical formulae and three dimensional finite element simulation with HFSS10.0. The testing results show that the mixed design method is correct and feasible, and the simulated results is consistent with the practical test results of filter sample. The final property parameters of designed filter are as follows: insertion loss more is -2.83 dB and -3 dB bandwidth is 35 MHz.

**Key words:** double coaxial microwave dielectric filter; HFSS simulation; insertion loss; bandwidth

同轴型微波介质滤波器是一种被研究较多的微波滤波器类型之一, 它的品种繁多, 性能各异, 其生产工艺、设计理论和计算方法也不尽相同。2005年, Chang等<sup>[1]</sup>采用LTCC工艺, 通过满足1/4波长的谐振器和电容器的耦合原理研制出了2.0 mm×1.2 mm的小型化微波介质滤波器。2007年, 美国采用高介电性能和金属化的两种电介质基片, 应用电磁带隙结构(EBGs)研制出多孔带通滤波器, 实现了滤波器的高品质因数、高频率和低插入损耗, 满足高频天线或滤波器设计应用的要求<sup>[2,3]</sup>。

三轴同轴型微波介质滤波器是较为常见的一种结构, 国内一些学者对其进行了详细的阐述与研究。随着器件进一步小型化及工艺实现的简单化和低成本, 市场上出现了双轴同轴型微波介质滤波器, 由于同轴腔数目的减少, 滤波器结构的改变使得其设

计方法与思路不能完全等同于三轴同轴型微波介质滤波器。因此, 笔者尝试利用理论公式计算与HFSS三维有限元仿真相结合的设计方法对双轴同轴型微波介质滤波器进行了仿真与设计。

### 1 结构及工作原理

双轴同轴型微波介质滤波器采用高介电常数陶瓷介质材料, 通过电子陶瓷工艺制作成长方体形介质块。沿长度方向对称排列两个谐振通孔, 两通孔的一面各存在一个耦合槽。除两个通孔所在的另一面、耦合槽及端口电极周围区域外, 介质块其余表面全部金属化, 其结构示意图如图1所示。

双轴同轴型微波介质滤波器信号由一侧电极馈入, 从另一侧电极输出。当电磁波信号从高介电常数介质进入低介电常数介质时, 会在界面上发生反

射和折射, 如图2所示。

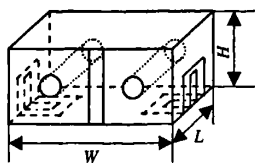


图1 微波介质滤波器结构示意图  
Fig.1 Schematic diagram of the structure of microwave dielectric filter

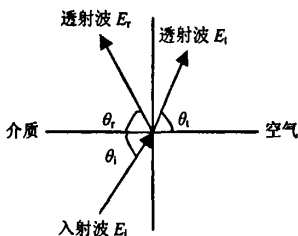


图2 介质表面的反射和折射  
Fig.2 Reflection and refraction on the medium surface

当入射角大于或等于临界角时, 电磁波发生全反射。介质的介电常数越高, 临界角越小, 全反射现象越完善, 在介质表面形成磁壁, 磁壁所围成的介质块构成介质谐振器。由于介质品质因数很高, 电磁能量绝大部分集中在介质谐振器内, 电磁振荡就能维持下去。双轴同轴型微波介质滤波器就是利用这种原理做成的<sup>[5]</sup>。

双轴同轴型微波介质滤波器由两个谐振器构成, 每个谐振器谐振通孔的长度大约为谐振频率处的1/4波长, 即构成一个1/4波长谐振器<sup>[6]</sup>。在介质滤波器中, 未金属化的端面为开路面, 此处电场强度最大。与开路面相对的另一个端面为短路面, 此处磁场强度最大。两个1/4波长同轴谐振器间通过耦合槽互相耦合。当输入信号经金属电极由电容耦合到一个近似于终端短路的同轴谐振器中时, 在谐振频率处产生谐振, 能量将由两个谐振器间的耦合槽耦合到输出端的同轴谐振器, 然后再经输出端电极与介质块周围电极的电容耦合输出。输入输出的耦合强弱可以通过调节其电容大小(即电极的大小)来控制; 而电极间耦合强弱则可以通过调整耦合槽的宽度来确定。

## 2 滤波器结构参数设计

### 2.1 公式估算

根据微波传输线的理论, 谐振器长度 $L$ 与谐振频率 $f_0$ 、相对介电常数 $\epsilon_r$ 有如下关系:

$$L = \frac{c}{4f_0\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1)$$

式中,  $c$  为光速。

谐振器的插入损耗 $B_0$ 由式(2)计算:

$$B_0 = \frac{4.343f_0}{W_B Q_u} \sum g_i \quad (2)$$

式中:  $W_B$  是阻带的3 dB带宽;  $g_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) 是滤波器的低通原型参数;  $Q_u$  是单谐振器的品质因数, 其计算公式如式(3)所示:

$$\frac{1}{Q_u} = \frac{1}{Q_0} + \frac{1}{Q_c} \quad (3)$$

式中:  $Q_0$  是陶瓷介质的品质因数;  $Q_c$  是谐振器表面金属膜的品质因数, 其值可以通过式(4)和(5)计算得到:

$$Q_c = \delta_s \left[ \frac{\left( \frac{1}{a} + \frac{\pi}{2W} \right)}{\ln \left( \frac{2aW}{\pi} \right)} + \frac{1}{L} \right] \quad (4)$$

$$\delta_s = \sqrt{\frac{2}{\omega_0 \mu_0 \sigma_c}} \quad (5)$$

式中:  $\delta_s$  为趋肤深度;  $a$  为介质谐振器中谐振孔的半径;  $\omega_0$  为角频率;  $\mu_0$  为谐振器表面金属膜的磁导率;  $\sigma_c$  为金属膜的电导率。

介质填充同轴线的特性阻抗 $Z_0$ 可以表示为<sup>[7]</sup>:

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \frac{b}{a} \quad (6)$$

式中,  $b$  为谐振子边长的一半。

由以上公式估算图1所示滤波器结构参数, 包括 $L$ 、 $W$ 、 $H$ 以及 $a$ , 估算结果用作HFSS仿真设计的初始数据, 结合原材料性能和使用要求, 设计出滤波器模型的基本尺寸。

### 2.2 HFSS仿真设计

根据理论公式计算结果, 利用HFSS10.0有限元软件对其进行仿真、修正, 优化滤波器性能。

HFSS仿真步骤主要包括实体建模、材料属性设置、边界条件设定、器件表面属性设定、求解条件设置及模型调试等。实体模型如图3所示。模型中除了建立滤波器实体, 考虑实际测试环境, 将测试平台也建立在模型中。滤波器采用同轴馈电方式, 同轴线内导体与滤波器的I/O端口相连, 外导体与测试平台的地板相连。同轴线阻抗为50 Ω。

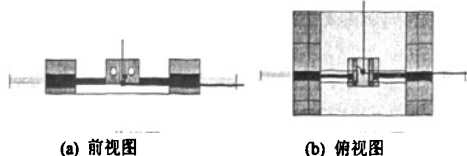


图3 HFSS仿真模型  
Fig.3 Simulated model attained by HFSS

模型中滤波器外部银层与地板采用“Sheet”结构, 边界条件设置为“Perfect E”。测试地板、同轴线内导体材料设置为铜。同轴线外导体边界条件设置为“Perfect E”。器件模型外建立一个包括所有部件的空气长方体(Air Box), 其六个面设置成远场辐射面(Radiation)。模型端口类型选择为“Inner Port”, 端口分别设置在同轴线的两个端面。

### 3 结果与分析

由式(1)可知, 在 $f_0$ 一定的情况下, 要想降低滤波器的尺寸, 就必须提高电介质材料的 $\epsilon_r$ 。笔者选择 $\epsilon_r$ 为91的BaO-TiO<sub>2</sub>系微波介质陶瓷材料。根据 $f_0 = 1\,575\text{ MHz}$ ,  $\epsilon_r = 91$ , 可以算出滤波器长度 $L$ 约5.00 mm。

滤波器的插入损耗 $B_L$ 与 $B_0$ 的关系为:

$$B_L \propto nB_0 \quad (7)$$

式中,  $n$ 为滤波器的级数。

由式(7)可知, 要降低滤波器的 $B_L$ , 需要降低 $B_0$ , 由式(2)可知, 就要增大 $Q_0$ , 再由式(3)可知,  $Q_0$ 和 $Q_c$ 就要增大。由式(5)可知, 同轴谐振器应同时满足最大功率容量条件 $b/a = 1.650$ 和最小衰减条件 $b/a = 3.592$ 。同时考虑最大功率容量和最小衰减条件, 选择 $b/a = 2.00 \sim 3.00$ 。选定 $a = 0.50\text{ mm}$ ,  $b = 1.50\text{ mm}$ , 考虑耦合槽及双谐振器, 确定滤波器 $W = 5.70\text{ mm}$ 。综合考虑 $f_0$ 和 $B_0$ 的要求, 求出满足滤波器性能指标的 $L$ 、 $H$ 和 $W$ 。

利用HFSS仿真对以上计算结果分别进行优化, 并总结各结构参数对滤波器的 $B_L$ 以及阻带衰减( $\pm 50\text{ MHz}$ )等电性能的影响规律。

谐振孔的直径 $2a$ 、孔间距 $d$ 的变化对滤波器电性能的影响如图4所示。 $2a$ 的减小可降低 $B_L$ 和阻带

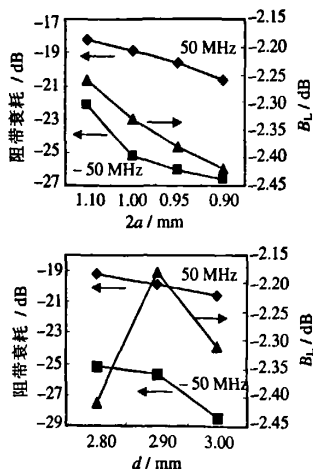


图4 孔直径 $2a$ 和孔间距 $d$ 与滤波器电性能的关系  
Fig.4 The relationships between the property of filter and its  $2a$  or  $d$

衰减。当 $b/a$ 为2.00~3.00时, 比值大则 $B_L$ 低。 $d$ 的变化对滤波器电性能的影响存在一个最佳值。这是因为 $2a$ 和 $d$ 的改变, 引起了构成滤波器的两个谐振器的等效电容和电感的变化, 从而改变了耦合等效电路中的电容、电感间的耦合量, 进而引起滤波器电性能的改变。

如图5所示, 滤波器的 $W$ 和 $H$ 的变化对器件在 $\pm 50\text{ MHz}$ 的阻带衰减影响不大, 但是对 $B_L$ 的影响都存在一个最佳值。

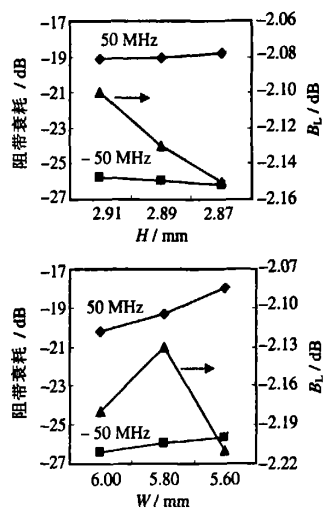


图5 滤波器宽度 $W$ 和高度 $H$ 与其电性能的关系  
Fig.5 The relationships between the properties of filter and its width or height

由以上计算与仿真结果, 综合确定滤波器尺寸为:  $W = 5.80\text{ mm}$ ,  $L = 5.00\text{ mm}$ ,  $H = 2.89\text{ mm}$ ,  $2a = 0.95\text{ mm}$ ,  $d = 2.90\text{ mm}$ 。按优化后的给定尺寸(由于试验条件所限, 器件实际长度 $L$ 为4.95 mm), 利用HFSS10.0软件仿真滤波器性能。滤波器HFSS仿真 $S$ 参数曲线如图6所示: 中心频率 $f_0 = 1\,600\text{ MHz}$ ; 插入损耗 $B_L$ 为-2.10 dB; -3 dB带宽 $W_B$ 为31 MHz; 在-50 MHz和50 MHz处的阻带衰减分别为-25.12和-19.26 dB。

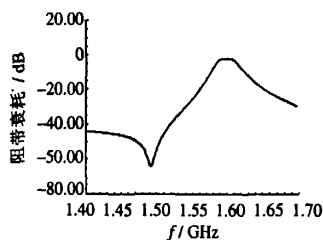


图6 滤波器HFSS仿真 $S$ 参数曲线  
Fig.6 Curve of  $S$  parameter by HFSS simulation of filter

### 4 滤波器制备与测试

根据以上的仿真设计结果, 采用热压注浆成型工艺, 制备介质生坯, 再经埋粉、排胶、烧结工序

制备介质瓷块, 后序经过研磨、超声清洗、镀银、电极形成、开槽和调频等一系列工艺, 制备出满足要求的滤波器, 其器件尺寸为:  $W = 5.80 \text{ mm}$ ,  $L = 4.95 \text{ mm}$ ,  $H = 2.89 \text{ mm}$ , 孔直径  $2a = 0.95 \text{ mm}$ , 孔间距  $d = 2.90 \text{ mm}$ , 误差控制在  $\pm 0.02 \text{ mm}$ 。采用 Advantest R3765/67CG 系列矢量网络分析仪测试制备滤波器的实际性能, 如图 7 所示。实物测试与仿真性能对比结果列于表 1。数据对比结果表明, 仿真数据与实测结果基本一致, 仿真设计对器件的制备起到了很好的指导作用。利用理论公式计算与 HFSS 三维有限元仿真相结合的设计方法可以得到较精确的滤波器尺寸, 从而制备出符合性能要求的器件。

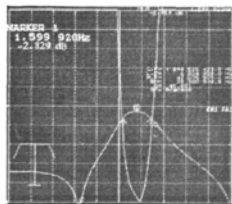


图 7 滤波器实测性能曲线

Fig.7 The practical test curves of properties for filter

表 1 滤波器仿真结果与测试性能对比

Tab.1 Comparisons of simulated results and test results of properties for filter

试样	$f_0 / \text{MHz}$	$B_L / \text{dB}$	$W_B / \text{MHz}$ (-3 dB)	阻带衰减/dB (-50 MHz)	阻带衰减/dB (50 MHz)
仿真	1 600.00	-2.28	31	-25.12	-19.26
实物	1 599.92	-2.83	35	-25.40	-19.06

## 5 结论

(1) 利用理论公式计算与 HFSS10.0 软件仿真优化相结合, 得到了较精确的双轴同轴型微波介质滤波器的各项尺寸参数。根据仿真优化结果, 制备出符合性能要求的实物滤波器, 其插入损耗为  $-2.83 \text{ dB}$ ,  $-3 \text{ dB}$  带宽为  $35 \text{ MHz}$ 。

(2) 实际性能测试结果与仿真优化结果有很好的一致性, 验证了设计方法的正确可行。

## 参考文献:

- [1] Chang Y Z, Lee W S, Wu H I, et al. Miniaturizing the size of microwave filter by using LTCC technology with hybrid dielectrics [C]// 2005 Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings. Suzhou, China: IEEE, 2005.
- [2] Gong X, She W H, Chappell W J. Aperiodic artificial substrates for multipole bandpass filters [J]. Microwave Antenna Propag, 2007, 1(1): 240-247.
- [3] Ukrainets N I. Possibilities of extending the stop and pass bandwidths of the microwave antenna-filters by means of a dielectric resonant scatterer [J]. Ultrawideband Ultrashort Impulse Signal, 2006, 18: 256.
- [4] 樊鹏, 周东祥, 赵俊, 等. 1 800 MHz 同轴谐振微波介质滤波器的结构设计及其仿真 [J]. 计算机与数字工程, 2005, 33(5): 115-118.
- [5] 方棉花, 齐子忠, 朱清亮. S 波段窄带介质滤波器的分析与设计 [J]. 现代电子技术, 2006, 216(1): 52-54.
- [6] 梁飞, 吕文中, 汪小红, 等. 1/4 波长同轴型微波介质滤波器的设计与仿真 [J]. 华中科技大学学报, 2004, 32(4): 93-95.
- [7] Rescorla E, 崔凯. SSL 与 TLS [M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.

(编辑: 陈丰)

## 大容量锂离子电容器走向实用

锂离子电容器在设计上采用了双电层电容器的原理, 同时又在负极添加了锂离子, 从而提高了电容器的能量密度。日本旭化成电子公司和 FDK 公司都曾研制过在电解液中采用锂氧化物的电容器, 但都没有实现产品化。转机发生在 2005 年, 富士重工业公司公开了锂离子电容器的制造技术: 电容器负极采用多并苯类材料, 并在其中掺杂大量的锂离子, 电容器的正极材料则仍沿用以往的活性炭。

此后, 多家厂商利用这样的技术, 制造出既具有双电层电容器的高输出、长寿命特性, 同时又能提供较高能量密度的电容器。2008 年末, 旭化成电子、ACT(高级电容器技术)、NEC、JM Energy、太阳诱电等多家企业都在开发锂离子电容器产品, 其中 ACT 和 JM Energy 两家公司的产品已进入量产。

锂离子电容器的能量密度得到提高的主要原因在于电容器单元的电压和负极静电容量的增加。传统电容器的电压通常为  $2.5 \sim 3.0 \text{ V}$ , 而在添加了锂离子之后就可提高到  $4.0 \text{ V}$ 。与正极采用相同材料的普通电容器相比, 锂离子电容器的单元能量可提高 3.5 倍。另有看法认为, 为实现更大容量, 今后锂离子电容器正极材料的静电容量还需要提高。

总之, 人们找到了可以取代双电层电容器的大容量锂离子电容器, 并对其性能和应用前景很有信心。某市场调研公司表示, 目前双电层电容器的市场规模约为 400 亿日元(100 日元约合 7.6 元人民币); 而锂离子电容器于 2008 年开始进入量产, 预计 2010~2011 年可正式建立起市场, 2020 年其市场规模将可达到 80 亿日元, 届时年出货量将达 4 000 万个单元。(日经 BP 社)

## 微波滤波器设计培训——视频课程

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立, 致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养, 是国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地。客户遍布中兴通讯、研通高频、国人通信等多家国内知名公司, 以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们推出的微波滤波器设计培训专题, 有资深工程师领衔主讲, 课程既有微波滤波器设计原理的详细解释, 也有各种仿真分析工具的实际设计应用讲解, 设计原理和设计仿真实践相结合, 向大家呈现各种结构的微波滤波器的完整设计流程。旨在帮助大家透彻地理解并实际的掌握各种微波滤波器的设计。



### 微波滤波器设计培训专题视频课程

高清视频, 专家授课, 中文讲解, 直观易学; 既有微波滤波器设计原理的详细解释, 也有像 ADS、CST、HFSS 各种仿真分析工具的实际设计应用讲解, 旨在帮助大家透彻地理解并实际的掌握各种微波滤波器的设计。

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/filter/>

### 更多专业培训课程:

- **HFSS 视频培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/>

- **CST 视频培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/>

- **天线设计专业培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/>