

# 一种具有两个传输零点的新型带通滤波器

邢孟江, 杨银堂, 李跃进, 朱樟明  
(西安电子科技大学微电子研究所, 陕西西安 710071)

**摘 要:** 在分析带通滤波器等效电路类型与特点的基础上, 提出了一种简单的且具有两个传输零点的新型带通滤波器结构, 有效解决了低介电常数多芯片组件(MCM)集成带通滤波器的性能与面积的问题. 通过实际设计加工测试了一款中心频率为 1.61GHz、带宽为 260MHz 的带通滤波器, 插入损耗为 0.71dB, 驻波 1.2, 测试结果与仿真结果一致, 器件整体尺寸为 3.2mm × 2.4mm × 0.6mm.

**关键词:** 低温共烧陶瓷; 带通滤波器; 多芯片组件; 低介电常数; 传输零点

**中图分类号:** TN386 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2010) 11-2482-04

## A Novel Bandpass Filter with Two Finite Transmission Zeros

XING Meng-jiang, YANG Yin-tang, LI Yue-jin, ZHU Zhang-ming  
(Microelectronics Institute, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

**Abstract:** A simple and novel band-pass filter have two transmission zeros was structured based on the analysis of the prototype bandpass filter equivalent circuit of the type and characteristics and use of T-equivalent circuit model and the combination of the two capacitive coupling between Input and output ports. An effective solution to a Low K of multi-chip module (MCM) integrated bandpass filter performance and space. A bandwidth of 260MHz, the center frequency of 1.61 GHz band-pass filter was designed and measured by used of Low Temperature Co-fired Ceramic (LTCC) technology. The simulated results are compared with the measured data, and good agreement is reported, the overall area of 3.2mm × 2.4mm × 0.6mm, insertion loss 0.71dB, VSWR1.2.

**Key words:** low temperature co-fired ceramic; bandpass filter; multi-chip module; low K; transmission zero

## 1 引言

目前射频/微波系统朝多功能、小型化发展, 基于低温共烧陶瓷 (Low Temperature Co-fired Ceramic, LTCC) 工艺的多芯片组件 (Multi-Chip Module, MCM) 技术得到广泛的关注, 它可将各种无源器件, 如电容、电感、电阻、天线、滤波器、平衡非平衡器、双工器、天线等完全掩埋在介质中, 以多层电路结构的形式实现, 并与有源器件相结合用于研制各种高集成度、低成本的小功率射频与微波功能模块<sup>[1-3]</sup>. 带通滤波器是射频/微波收发组件的基本单元, 作为一种选频元件, 用来选择或限定射频信号的频段范围, 在许多射频领域起着重要的作用. 基于低温共烧陶瓷 (LTCC) 工艺的带通滤波器研究已有非常多的报道<sup>[4-6]</sup>, 但其研究都是基于高介电常数的低温共烧陶瓷 (LTCC) 基板, 最具代表性的为香港中文大学吴克利教授发表具有两个传输零点的两级带通滤波器<sup>[6]</sup>. 高介电常数的陶瓷基板对于设计和加工单个带通滤波器元件具有一定的优势, 但并不适合设计加工多芯片组件 (主要是不宜加

工, 射频/微波信号插入损耗大).

本文在分析带通滤波器原形等效电路类型与特点的基础上结合低介电常数陶瓷基板的特点, 运用 T 形等效电路模型, 提出在输入输出端口加一个反馈电容 (反馈电容巧妙的利用两电容之间的相互耦合) 实现一种简单的具有两个传输零点的新型带通滤波器, 有效地解决了在低介电常数低温共烧陶瓷 (LTCC) 基板多芯片组件 (MCM) 集成带通滤波器的性能与面积问题. 并通过实际设计加工并测试了一款中心频率为 1.61GHz, 带宽为 260MHz 的带通滤波器, 整体尺寸为 3.2mm × 2.4mm × 0.6mm, 插入损耗为 0.71dB, 驻波 1.2, 测试结果与仿真结果一致.

## 2 带通滤波器等效电路分析

用等效电路法设计带通滤波器的思路是根据滤波器的电气性能指标, 选用相应的带通滤波器原型电路, 计算出带通滤波器原型电路中各个 LC 元件值, 然后通过电路变换得到实际所需要滤波器的电路结构和元

件数值。目前常用的原型电路主要有电容耦合 II 型带通滤波器、电感耦合 II 型带通滤波器、电容耦合 T 型带通滤波器、电感耦合 T 型带通滤波器,其等效电路图分别为如图 1~图 4 所示。在 LTCC 工艺中,制作电容一般采用垂直交叉式电容形式,同一级采用通孔进行连接,为了减少通孔的影响,一般选用单层介质、两层金属的单层电容,这就使得若采用低介电常数的基板,其电容值不可能做的很大,否则面积太大,寄生电感使得自谐振频率提前。II 型带通滤波器的  $Q$  值,主要由并联谐振腔电感决定,所以电感不能做的太大,否则滤波器的  $Q$  值很低,如参考文献[5]中,其加工测试的滤波器性能一般的主要原因就是电感值取值过大。若选取较小的电感值,则电容值就会很大,这与低介电常数的 LTCC 基本相矛盾,故 II 型带通滤波器并不适合在低介电常数的 LTCC 基板中设计加工带通滤波器。T 型带通滤波器  $Q$  值主要有串联谐振腔  $Q$  值决定,在此 T 型带通滤波器中串联谐振腔此时  $Q$  值越小越好,所以可以将电容值做小,电感值做大,非常适合低介电常数的 LTCC 陶瓷基板。表 1 为带通滤波器原型电路特点与 LTCC 陶瓷基板关系的总结表。

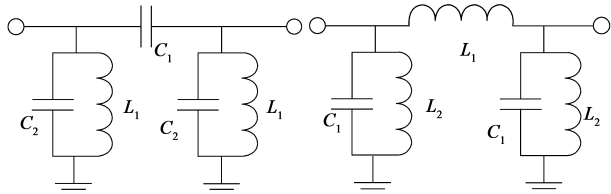


图1 电容耦合II型带通滤波器

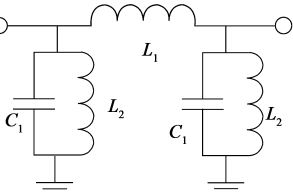


图2 电感耦合II型带通滤波器

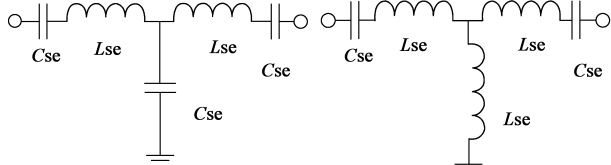


图3 电感耦合T型带通滤波器

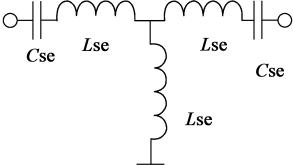


图4 电容耦合T型带通滤波器

表 1 带通滤波器原型电路特点

	电容耦合 II 型	电感耦合 II 型	电容耦合 T 型	电感耦合 T 型
谐振器类型	并联谐振	并联谐振	串联谐振	串联谐振
谐振器电感	小	小	大	大
谐振器电容	大	大	小	小
低 K 基板	不适合	不适合	适合	极适合
高 K 基板	极适合	适合	不适合	不适合

### 3 具有传输零点的新型带通滤波器

#### 3.1 电路设计与仿真

T 型带通滤波器是 2006 年中国台湾学者提出的一种新型的带通滤波器结构,其基本元件值可以通过输入输出阻抗匹配的方法得到,图 5 为其频率响应图。在参

考文献[7,8]中,已经给出 T 型带通滤波器中的电感、电容值可以通过两个反射零点  $\omega_1\omega_2$  和矩形系数  $S_{kf}$  确定,具体关系如下,其中  $Z_0$  为特性阻抗。

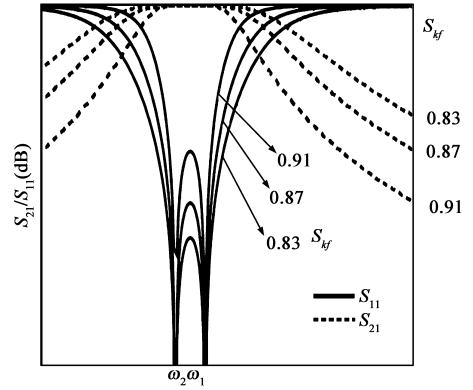


图5 T型带通滤波器频率响应

$$C_{se} = \frac{L_{\pi h}}{Z_0^2} = \frac{1}{Z_0^2} \sqrt{\frac{S_{kf}^{-2} + S_{kf}^2}{\omega_1 \omega_2} - \frac{1}{\omega_1^2} - \frac{1}{\omega_2^2}} \quad (1)$$

$$L_{se} = Z_0^2 C_{\pi h} = \frac{S_{kf}^2}{\omega_1 \omega_2 C_{se}} \quad (2)$$

$$L_{sh} = Z_0^2 C_{\pi e} = \frac{S_{kf}^{-2} - S_{kf}^2}{\omega_1 \omega_2 C_{se}} \quad (3)$$

现在设计中心频率为 1.61GHz,带宽为 260MHz 的带通滤波器,选取图 3 的等效电路架构,取  $\omega_1 = 1.48\text{GHz}$ ,  $\omega_2 = 1.74\text{GHz}$ ,  $S_{kf} = 0.85$  由公式可得:

$$C_{se} = \frac{1}{50} \sqrt{\frac{0.85^{-2} + 0.85^2}{1.48 \times 1.74} - \frac{1}{1.48^2} - \frac{1}{1.74^2}} = 0.56\text{pF}$$

$$L_{se} = \frac{0.85^2}{1.48 \times 1.74 \times 0.56} = 12.6\text{nH}$$

$$L_{sh} = \frac{0.85^{-2} + 0.85^2}{1.48 \times 1.74 \times 0.56} = 5.7\text{nH}$$

采用 Ansoft designer 电路仿真软件,建立相应的电路图进行仿真,仿真结果如图 6 所示,由仿真结果可知,其通带内反射系数约为 20dB,传输损耗为 0.06dB,传输损耗小。二倍频程带外抑制约为 20dB,带外抑制一般。

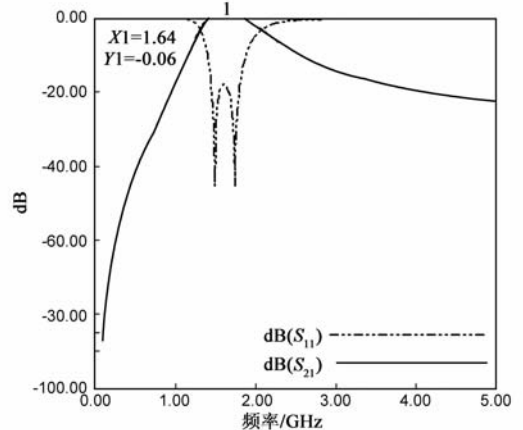


图6 1.61GHz带通滤波器仿真结果

### 3.2 带有传输零点的等效电路实现

通过分析带通滤波器的等效电路可知,在输入与输出端口加上一个反馈电容就可以实现上下边带两个传输零点,两个传输零点的位置主要有反馈电容的大小决定,图7为本文提出的一种简单的具有上下两个边带传输零点的等效电路图结构,图8为不同大小的反馈电容对传输零点的大小的影响.从图8中可以看出,电容值越大,传输零点越靠近通带.通过调整电容的大小,可以实现带通滤波器中心频率与上下边带的传输零点刚好为二倍频程关系,这给滤除混频器等非线性器件产生的二次谐波具有极大的好处.

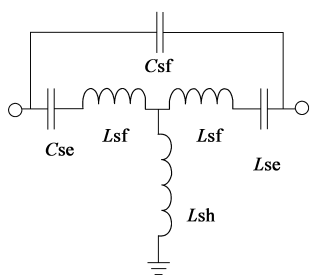


图7 具有两个传输零点的等效电路图

定,图7为本文提出的一种简单的具有上下两个边带传输零点的等效电路图结构,图8为不同大小的反馈电容对传输零点的大小的影响.从图8中可以看出,电容值越大,传输零点越靠近通带.通过调整电容的大小,可以实现带通滤波器中心频率与上下边带的传输零点刚好为二倍频程关系,这给滤除混频器等非线性器件产生的二次谐波具有极大的好处.

滤波器中心频率与上下边带的传输零点刚好为二倍频程关系,这给滤除混频器等非线性器件产生的二次谐波具有极大的好处.

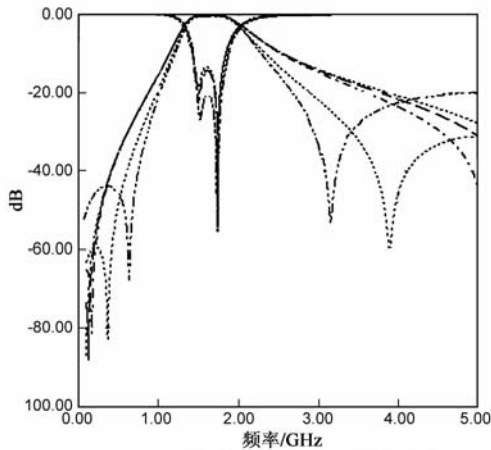


图8 反馈电容与传输零点的关系

### 3.3 基本元件设计

采用标准的 LTCC 工艺,建立 LTCC 基板的三维电磁场仿真模型,目前基于 LTCC 标准工艺制作的电感值可以达到 20nH,电容值可达 30pF,对于 12.6nH 和 5.7nH 的电感值,根据实验室已经建立的电感电容模型库,选取三圈和一圈的螺旋电感模型,其线宽为 100μm,间距为 100μm,通过调整模型库中电感的中间间距相应的提取公式得到在 1.61GHz 下 12.6nH 和 5.7nH 的电感,结果如图9,提取公式为:

$$L_{eff} = \frac{1}{\omega Y_{12}}$$

对于反馈电容,我们采取两电容相互耦合的形式,对于 0.56pF 的串联谐振电容,其电容值不大,采用单层直接接地的电容实现,其介质厚度为 84.5μm.为了方便提取,采用的是双端口的电容模型.通过调整电容的长宽,得到 0.56pF 的电容,其仿真结果如图 10. 电容的提取公式为<sup>[9]</sup>:

$$Z_{in} = Z_0 \frac{1 + \Gamma_{in}}{1 - \Gamma_{in}} = Z_0 \frac{1 + S_{11} + S_{22} + S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21}}{1 - S_{11} + S_{22} - S_{11}S_{22} + S_{12}S_{21}}$$
$$C_{eff} = \frac{1}{\omega Z_{in}}$$

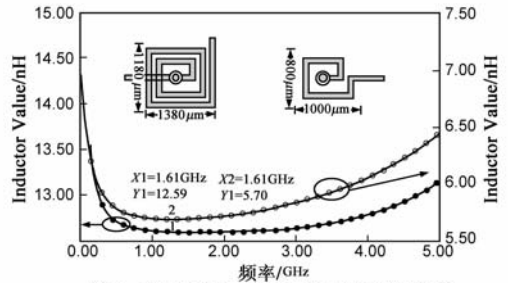


图9 在1.6GHz下12.6nH,5.7nH的电感

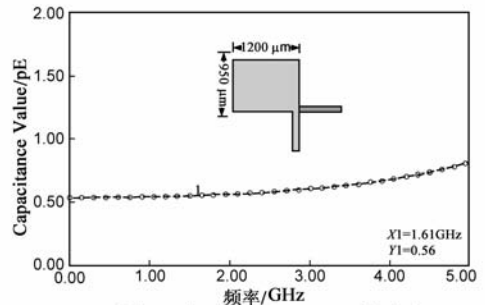


图10 在1.6GHz下0.56pF的电容

### 3.4 滤波器三维电磁场仿真加工测试

在提取相应的电感、电容值后,通过带通滤波器的整体布局,得到加工结构图,图11为中心频率1.61GHz带通滤波器的三维视图.图12为加工完成后的照片,其整体尺寸为3.2mm×2.4mm×0.6mm,图13为带通滤波器测试与仿真结果.由测试结果可知,插入损耗与反射损耗稍微与仿真结果相比稍微偏大,中心频率与带宽无变化,测试结果表明采用T型等效电路与一反馈电容实现具有两个传输零点的低介电常数LTCC带通滤波器是一种简单而且有效的方法.

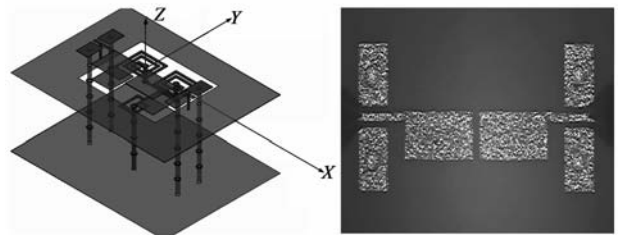


图11 带通滤波器三维视图 图12 带通滤波器加工视图

### 4 结论

本文提出了一种设计方法简单且具有两个传输零点的新型带通滤波器设计方法,通过简单调整输入输出端口电容之间耦合量的大小,就可实现传输零点位置的调整.并通过低温共烧陶瓷(LTCC)工艺实际设计加工并测试了一款中心频率为1.61GHz,带宽为260MHz的带通

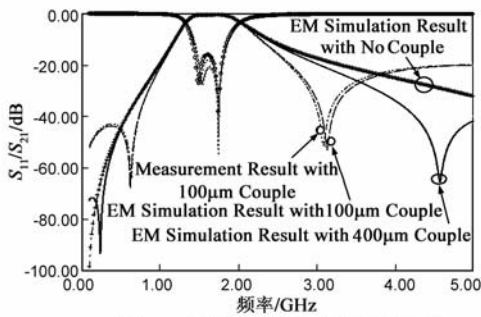


图13 带通滤波器仿真与测试结果

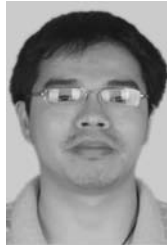
滤波器,整体尺寸为  $3.2\text{mm} \times 2.4\text{mm} \times 0.6\text{mm}$ ,插入损耗为  $0.71\text{dB}$ ,驻波  $1.2$ ,测试结果表明,这种方法实现的带通滤波器带内插入损耗小,带外抑制强,方法简单有效,可广泛应用于多芯片组件(MCM)、单片微波集成电路(MMIC)中。

#### 参考文献:

- [1] 严伟,禹胜林,等.基于LTCC技术的三维集成微波组件[J].电子学报,2005,33(11):2009-2012.  
Yan Wei, Yu Sheng-lin, et al. Three Dimensional Integrated Microwave Modules Based on LTCC Technology [J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(11): 2009-2012. (in Chinese)
- [2] 张祥军,方大纲.基于版图级综合的频率部分空间映射神经网络建模技术及其在LTCC射频电路中的应用[J].电子学报,2007,35(6):1187-1192.  
Zhang Xiang-jun, Fang Da-gang. Layout-level synthesis based frequency partial-space-mapped neuromodeling technique for LTCC RF circuit design [J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(6): 1187-1192. (in Chinese)
- [3] Chia-Chun Weng, et al. Development of a compact low-temperature co-fired ceramic antenna front-end module [J]. IEEE Trans on MTT, 2008, 56(11): 2483-2492.

- [4] Ching-Wen Tang, et al. Harmonic-suppression LTCC filter with the step-impedance quarter-wavelength open stub [J]. IEEE Trans on MTT, 2004, 52(2): 617-624.
- [5] Greg Brzezina, et al. Design enhancement of miniature lumped-element LTCC bandpass filters [J]. IEEE Trans on MTT, 2009, 57(4): 815-823.
- [6] Lap Kun Yeung, Ke-Li Wu, et al. A compact second-order LTCC bandpass filter with two finite transmission zeros [J]. IEEE Trans on MTT, 2003, 51(2): 337-441.
- [7] Chiu C T, Chen C H, et al. Design of miniature bandpass filters embedded in the organic substrate for RF SOP applications [A]. 2006 Proceedings of the 36<sup>th</sup> european microwave conference [C]. European: Academic Press, 2006. 502-505.
- [8] Chen C H, Chiu C T, et al. Design of miniature bandpass filters on an organic laminate substrate using a modified T prototype [A]. 2008 Proceedings of the 38<sup>th</sup> European Microwave Conference [C]. European: Academic Press, 2008. 725-728.
- [9] Blood W. Library development process for embedded capacitors in LTCC [A]. 2000 IEEE Conference on Electrical Performance of Electronic Packaging [C]. New York: Academic Press, 2000. 147-150.

#### 作者简介:



邢孟江 男,1981年,西安电子科技大学博士研究生,主要从事基于低温共烧陶瓷(LTCC)工艺的射频/微波无源元件设计与建模技术研究,基于低温共烧陶瓷(LTCC)工艺的射频/微波多芯片组件(MCM)的应用研究。  
E-mail: 67643372@qq.com

杨银堂 男,1962年,教授,博士生导师,西安电子科技大学副校长、主要从事多芯片组件集成技术、新型半导体材料与器件、模拟集成电路设计等研究。