

# 叠层片式LTCC低通滤波器的设计与制作

李元勋, 边丽菲, 刘颖力, 张怀武, 李 颀

(电子科技大学微电子与固体电子学院 成都 610054)

**【摘要】**利用集总参数元件进行叠层片式低通滤波器的设计, 并使用ULF140材料, 经低温共烧陶瓷(LTCC)工艺制作出符合0805封装尺寸要求的截止频率为200 MHz的叠层片式低通滤波器。用矢量网络分析仪Agilent 8722ES对样品进行了相关测试, 测试结果为: 滤波器3 dB的频率点为200 MHz, 500 MHz时带外抑制达到26 dB。其仿真结果与实测结果吻合。采用该方法, 解决了设计和制作LTCC叠层低通滤波器的一致性问题。

**关键词** 制作; 低通滤波器; 低温共烧陶瓷; 仿真

中图分类号 TN713+4

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2009.04.011

## Design and Fabrication of Laminated Low Pass Filters

LI Yuan-xun, Bian Li-fei, LIU Ying-li, ZHANG Huai-wu, and LI Jie

(School of Microelectronics and Solid-State Electronics, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054)

**Abstract** A complete and effective design is introduced to realize the 0805 size of standard packaging laminated low pass filter (LPF) using the technology of low temperature co-fired ceramic (LTCC). The three-stage laminated LPF with 200 MHz cut-off frequency is successfully manufactured using the ceramic green tape with relative permittivity of 14 and tape-casting thickness of 25  $\mu\text{m}$ . Testing results show that the three-order LPF sample can achieve a 3 dB return loss at 200 MHz and a 26 dB return loss at 500 MHz by Agilent 8722ES. And the measured results agree well with the simulated data. This method illustrates a way to resolve the consistency problems between simulation and manufacture.

**Key words** fabrication; LPF; LTCC; stimulation

滤波器作为电子电路中的基本元件之一, 被广泛地应用于微波通信、雷达导航、电子对抗、卫星通信、导弹制导、测试仪表等系统中。利用它们可以分离或组合各种不同频率的信号, 其性能的优劣直接影响整个通信系统的性能指标。

随着电子整机系统向小型化、轻型化方向的发展, 要求器件的尺寸越来越小。因此, 在三维集成微波组件的研制中, 采用了许多新材料、新封装和互连工艺。如引入LTCC技术<sup>[1-5]</sup>, 该技术具有比传统厚膜、薄膜和高温共烧陶瓷(HTCC)技术更加灵活的设计方法。采用低损耗的低温共烧陶瓷材料叠层结构方式, 可以将滤波器的布局由平面转为立体, 并且可将电阻、电容和电感等无源元件集成在LTCC多层电路基板中, 进而制作出微小的叠层片式滤波器<sup>[6-9]</sup>, 不仅降低了成本, 而且还提高了系统的集成度和可靠性<sup>[10]</sup>。LTCC滤波器目前已应用于各种制式的手机、蓝牙模块、GSP、PDA、数码相机、WLAN、汽车电子、导航系统等电子产品中。同时LTCC滤波

器也是第三代(3G)移动手机中的首选器件。此外, WLAN无线网卡和Bluetooth技术的快速发展也给LTCC滤波器带来极大的市场。

本文研究了一种LTCC叠层滤波器, 利用通孔实现电感的互连, 侧面封端实现电容的互连以及电容和电感的互连。根据设计指标, 用Agilent ADS得到优化的电路元件的最优值, 用高频电磁场仿真软件Ansoft HFSS 10对滤波器的物理模型进行了模拟和优化, 并将优化结果与试验样品的测试结果进行了对比, 两者吻合较好。采用该方法, 解决了一系列LTCC叠层低通滤波器用软件仿真设计和生产工艺实现的一致性问题。

### 1 低通ADS电路设计

本文利用集总电感和电容元件构成LPF, 采用三阶 $\pi$ 型巴特沃斯型滤波器结构进行设计, 具体设计指标为: 截止频率 $f_c=200$  MHz; 带外抑制大于等于25 dB(700 MHz)。查最大平坦低通滤波器元件数值

收稿日期: 2008-05-12; 修回日期: 2009-03-12

基金项目: 国家自然科学基金(60571017)

作者简介: 李元勋(1979-), 男, 博士, 主要从事电子信息材料与元器件方面的研究。

表得各元件的 $g$ 值,再经过截止频率变换和特征阻抗变换,得并联电容为15.91 pF,串联电感为79.57 nH。在ADS软件中建立相应的仿真电路,如图1所示。微调电感电容值 $C_1=C_2=20$  pF,  $L=70$  nH。

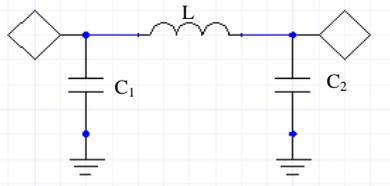


图1 ADS电路仿真图

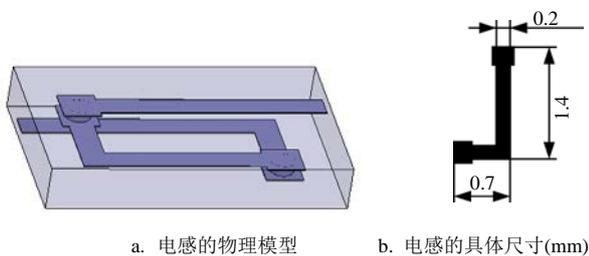
## 2 电感和电容元件的结构设计及模拟

所有元件选用美国Ferro公司的ULF140陶瓷材料制成。该LTCC材料的相对介电常数为14,损耗角正切值为0.001 5。

### 2.1 电感的结构设计及仿真

内埋置电感元件采用垂直螺旋结构,在相同的有效电感值下,该结构比平面螺旋式、位移式等结构具有更高的自谐振频率(SRF)和品质因数( $Q$ ),而且有利于缩小器件的尺寸。此外,三维螺旋结构中线圈与线圈间的耦合容易通过调节介质层膜厚来控制。

本文采用通孔实现电感的互连,通孔选用直径0.2 mm的圆形通孔,使通孔直径与印刷导体的线宽基本相等以减小传输线的不连续性。通孔和导体层的连接方式通过在垂直通孔与导体层的连接处适当扩展一定宽度,有助于把电磁场信号导入垂直通孔和下面的导体层,改善了传输性能。另外,这种连接方式对于垂直通孔形成工艺过程中产生的加工误差(如钻孔误差和填孔误差)具有更好的兼容性,在工程中具有很高的应用价值。电感的仿真模型和具体尺寸如图2所示。



a. 电感的物理模型 b. 电感的具体尺寸(mm)

图2 电感结构模型和具体尺寸

电感的计算公式为:

$$L = \frac{\mu_0 \mu_r A_e}{l_e} N^2 \quad (1)$$

式中  $N$ 为线圈的匝数;  $A_e$ 为有效横截面积;  $l_e$ 为有效长度;  $\mu_r$ 为介质的相对磁导率。计算后得 $A_e=$

0.349 mm<sup>2</sup>,  $l_e=2.848$  mm。通常 $x=2$ ,但是由于叠层电感的相互耦合作用相对较弱,故 $x < 2$ ,本文采用 $x=1.593 5$ ,是通过多次计算拟合得到的。

通过式(1)估算电感为70 nH的 $N=11.5$ ,即需要23层印刷导体层。有效电感值仿真结果如图3所示。

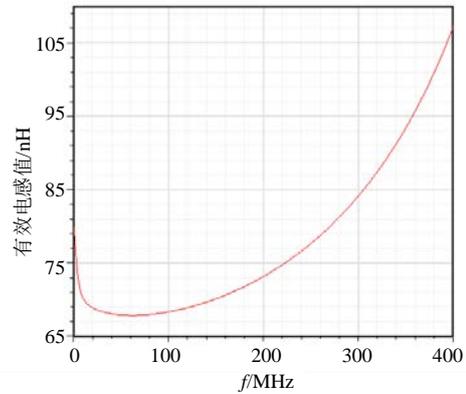


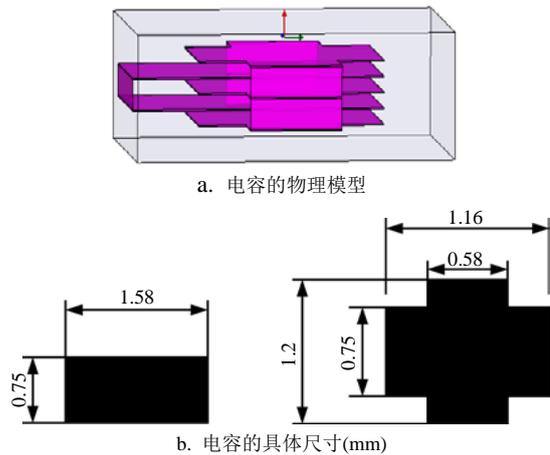
图3 电感的仿真结果

有效电感值由散射参数可表示为:

$$L = \frac{-1}{2\pi f \operatorname{Im}(Y_{11})} \quad (2)$$

### 2.2 电容的结构设计及仿真

内埋置电容元件采用垂直插指型电容(VIC)结构。为获得相同的电容量,利用VIC结构取代传统的MIM,能够减小端电极面积,从而有效减小滤波器尺寸。考虑到接地质量的好坏影响到其微波性能,尤其是地与地的连接方式对差损和驻波比影响很大,结合生产工艺,采用侧面封端的方式实现接地的互连、电容的互连以及电感和电容之间的互连。电容的仿真模型和具体尺寸如图4所示。



a. 电容的物理模型 b. 电容的具体尺寸(mm)

图4 电容的结构模型和具体尺寸

平行板电容的计算公式为:

$$C_{\text{eff}} = (n-1) \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{d} \quad (3)$$

式中  $n$ 为电容极板的层数;  $\epsilon_r$ 为介质的相对介电常

数;  $S$ 为极板的面积;  $d$ 为相邻两极板之间的距离。

通过式(3)可以估算电容为20 pF的 $n=5$ 。电容的仿真结果如图5所示。

有效电容值由散射参数可表示为:

$$C = \frac{-1}{2\pi f \operatorname{Im}(Z_{11})} \quad (4)$$

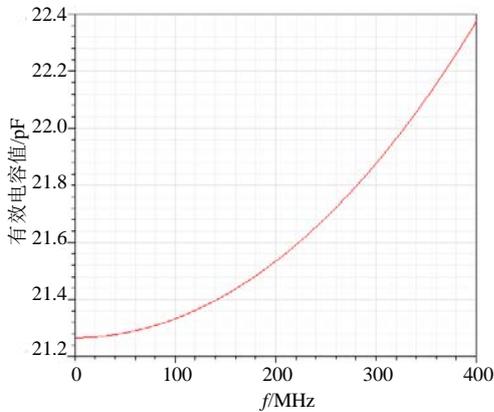


图5 电容的仿真结果

### 3 滤波器的设计及仿真

结合LTCC生产工艺、微调电感和电容元件尺寸,层叠低通滤波器多层结构设计如图6所示,其三维尺寸为2.0 mm×1.2 mm×0.9 mm,有效图形层为32层。制作LTCC滤波器的流延膜片厚度为25 μm,印刷导体采用银,导体层厚度为6 μm。

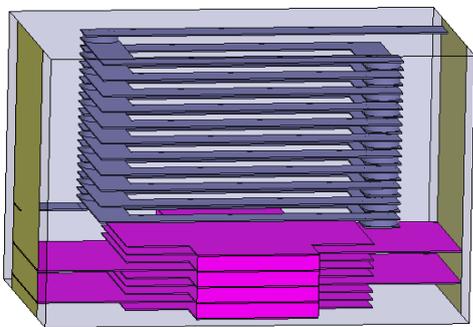


图6 200 MHz低通滤波器的物理模型

物理模型用HFSS仿真后的曲线如图7所示。比较电路模型与物理模型的散射参数,可见两者基本一致,都符合设计要求,说明在HFSS中建立的LC型LTCC滤波器是正确的。但同时可以注意到, HFSS中仿真曲线与ADS中的仿真曲线稍有偏差,分析可知,由于电感和电容等效模型在建立时对寄生效应的考虑不够充分,此外,物理模型的建立采用集总元件设计,从而导致HFSS中设计出的结果会出现少许误差。HFSS仿真结果在800 MHz时出现了陷波点,这可能是由于平行板电容器的寄生电感引起的。

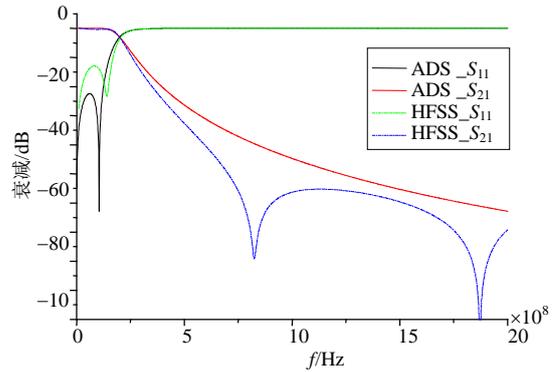


图7 电路模型与物理模型的散射参数比较

### 4 200 MHz滤波器的制作及结果测试

考虑到材料在X、Y方向的收缩率为15%,故需按比例放大单个元件模型的丝网尺寸。

电感丝网的设计采用在电感L形带线上的短端打孔以便连接上下膜片层。考虑到印刷的简便,把L形和倒L形设计到一张丝网上,只要印刷时将膜片沿Y方向向下移动2.3 mm,即可使两次印刷的图形在同一位置处分别为L形和倒L形,保证叠层时不会出错。设计的电感线圈半匝图形如图8所示。

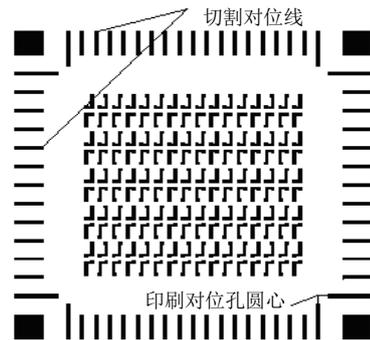


图8 电感丝网

结合生产线的工艺特点和成本,应尽量减少丝网的数目,设计电容丝网时使左右两极板用同一丝网来实现,最后左右两极板通过不同的切割线来实现。印刷银浆时上下两极板错位,使切割后银浆导体可裸露在器件两端,经过两端封银实现不同极板间的互连,而且在同一个电容极板切割后可分别构成两个相邻电容的左右极板。电容丝网如图9a所示,接地丝网如图9b所示。为保证切割后露出银导体,同时,两端封端和前后封端后不造成短路,设计成所有接地图形相连的形式。

设计的叠层LPF在电子科技大学LTCC生产线上经过流延、切割、打孔、填孔、导体层印刷、叠层、烘巴、等静压、切割、排胶、烧结、封端、检测等工艺步骤制作完成。

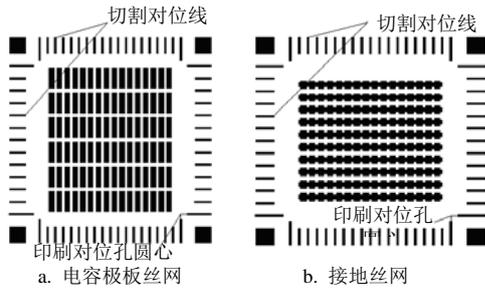


图9 电容元件的丝网图

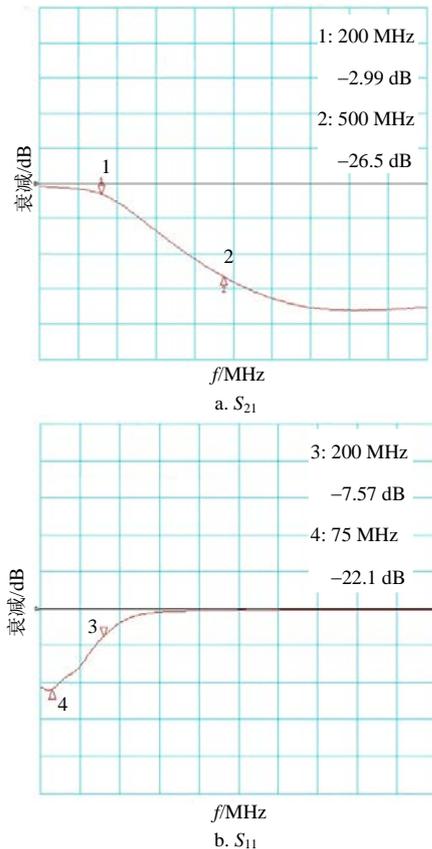


图10 200 MHz低通滤波器样品散射参数测试结果

制作的滤波器样品符合0805尺寸要求，其性能用矢量网络分析仪Agilent 8722ES进行测试，散射参数的测试结果如图10所示。可以看出，测得的3 dB点为200 MHz，500 MHz时带外抑制达到26 dB，制作的样品符合设计要求，测试结果与设计仿真结果基本吻合。

## 5 结论

通过设计与制作截止频率为200 MHz的叠层LPF，介绍了基于LTCC技术的叠层低通滤波器的一般设计过程。计算机仿真软件对微波器件的设计能

提供有效的帮助。研制出的LTCC叠层滤波器符合0805尺寸要求，具有结构紧凑、体积小、重量轻、滤波性能优良和高可靠性等优点。采用该方法，解决了一系列采用低温共烧陶瓷材料制作的滤波器用软件仿真设计和生产工艺实现的一致性问题。

## 参考文献

- [1] WOLFF I. Design and technology of microwave and millimeter wave LTCC circuits and systems[C]//ISSSE '07: International Symposium on Signals, Systems and Electronics. Montreal: IEEE Press, 2007: 505-512.
- [2] CHIRIAC V A, LEE T Y T. Thermal assessment of RF-integrated LTCC front end modules[J]. IEEE Transactions on Advanced Packaging, 2004, 27(3): 545-557.
- [3] SHAMIM A, BRZEZINA G, ARSALAN M, et al. 5.2 GHz differential LTCC antenna and balun for biomedical system in package (SiP) application[C]//IWAT'07: International Workshop on Antenna Technology. Cambridge: IEEE Press, 2007: 443-446.
- [4] KIM Ki-il, KIM Jung-Mu, KIM Jong-Man, et al. Packaging method for RF MEMS devices using LTCC capping substrate and BCB adhesive bonding[C]//TRANSDUCERS '05: The 13th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems. Korea: IEEE Press, 2005: 1092-1095.
- [5] LI R L, DEJEAN G, MAENG M, et al. Design of compact stacked-patch antennas in LTCC multilayer packaging modules for wireless applications[J]. IEEE Transactions on Advanced Packaging, 2004, 27(4):581-589.
- [6] LI Yuan-xun, LIU Ying-li, ZHANG Huai-wu, et al. The design and fabrication of RF band pass filter by LTCC technology[C]//International Conference on Electronic Packaging Technology & High Density Packaging. Shanghai: IEEE Press, 2008: 1-4.
- [7] CHEN Xi-dan, LIU Ying-li, LI Yuan-xun. Multilayer low pass filter using LTCC technology[J]. Journal of Electronic Science and Technology of China, 2007, 5(4): 374-377.
- [8] MILITARU N, LOGEWSKI G, BANCIU M G. Aperture couplings in multilayer filtering structures[J]. Signals, Circuits and Systems, 2007, 2: 1-4.
- [9] VOROTNIKOV B, CHERNYAKOV A, SAKHNENKO S, et al. High performance 2.4 GHz combined LTCC/SAW filter for WLAN applications in mobile phones[C]// European Microwave Conference. Germany: IEEE Press, 2007: 438-441.
- [10] SCRANTOM C Q, LAWSON J C. LTCC technology: where we are and where we're going-II[C]//1999 IEEE MTT-S Symposium on Technologies for Wireless Applications. Canada: IEEE Press, 1999: 193-200.

编辑 张俊