

一种小型多层LTCC折叠线交指带通滤波器设计

陈鹏 周邦华 李中云

(中国工程物理研究院 电子工程研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 提出了一种小型多层 LTCC (低温共烧陶瓷) 折叠线交指带通滤波器, 该滤波器采用 $\epsilon_r = 5.9$ 、 $\tan \delta = 0.002$ 的 FerroA6S 生瓷带作为基板材料, 在普通交指滤波器的基础上将 $1/4 \lambda_g$ 的传输线谐振器在垂直于基板的方向上进行了折叠, 使得谐振器从单层结构变成了双层结构, 并且上下两层之间通过金属通孔相连。折叠后的谐振器长度只有 $1/8 \lambda_g$, 从而显著地减小了滤波器尺寸。通过三维电磁仿真设计出一个 S 波段五阶切比雪夫折叠线交指滤波器, 最后加工出来的滤波器样品的测量结果与仿真结果相符合, 从而验证了设计的有效性。

关键词: 低温共烧陶瓷; 带通滤波器; 折叠线; 多层结构

Design of a Compact Multilayered LTCC Folded-Line Bandpass Filter

CHEN Peng¹, ZHOU Bang-hua², LI Zhong-yun³

(Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: A compact multilayered LTCC (low-temperature cofired ceramic) interdigital bandpass filter using folded-line structure is proposed in this paper. The filter is fabricated in a substrate that is made of Ferro-A6S green tape, of which $\epsilon_r = 5.9$, $\tan \delta = 0.002$. On the basis of common interdigital bandpass filter, the $1/4 \lambda_g$ transmission line resonators of this filter are folded in the direction that is perpendicular to the substrate, making the single level resonators become double-level structures, and the two layers of the resonators are connected by metal vias. The length of the folded resonator is only $1/8 \lambda_g$, and results in a prominent reduction in the size of the filter. A five-section Chebyshev folded-line interdigital bandpass filter in S-band is designed by 3-D electromagnetic simulation. The measurement results to the implemented filter accord with the simulation and therefore the filter design is verified.

Key words: LTCC; bandpass filter; folded-line; multilayered structure

1 引言

微波滤波器是通讯、雷达、遥测等系统中必不可少的重要元件。近年来, 随着微波集成电路的不断发展, 微波滤波器的小型化和轻型化成为研究关注的焦点之一, 大量结构新颖的小型化微波滤波器相继出现, 许多新的材料技术和服务方法被陆续运用到各种小型化滤波器中。其中多层滤波器是当前微波滤波器小型化的一个重要发展方向, 采用多层结构将传输线制作在不同层上, 不仅可以使滤波器的尺寸显著减小, 而且增加了滤波器结构设计的灵活性^[1]。LTCC(低温共烧陶瓷)以其优异的射频性能和可以内埋多层无源电路的特点成为制作多层滤波器的首选基板材料, 各种LTCC多层滤波器的广泛使用极大的提高了电子设备的集成度。

在微波的低频段, 如L波段、S波段, 由于波长

较长, 传统结构的四分之一波长微带交指带通滤波器尺寸较大, 无法满足当前日趋突出的小型化要求, 为了减小滤波器尺寸, 本文提出了一种结构紧凑的小型多层LTCC折叠线交指带通滤波器, 在普通交指滤波器的基础上将各级谐振器在垂直于基板的方向上进行了对折, 使得谐振器的长度几乎减小为原来的一半, 约为八分之一波长, 而滤波性能并无影响。这种谐振器的多层垂直对折结构, 减小了谐振器的长度, 却并没有增大谐振器宽度, 因此它与常见的类似发夹线结构的同层水平对折相比, 在减小尺寸方面具有更大优势^[2]。如果将谐振器在垂直方向进行多次对折, 还能够更大程度的缩短谐振器长度, 从而进一步减小滤波器尺寸。

2 滤波器结构

本文利用谐振器的多层垂直对折结构成功地

设计出一个S波段五阶切比雪夫折叠线交指滤波器，其结构如图1(a)所示。

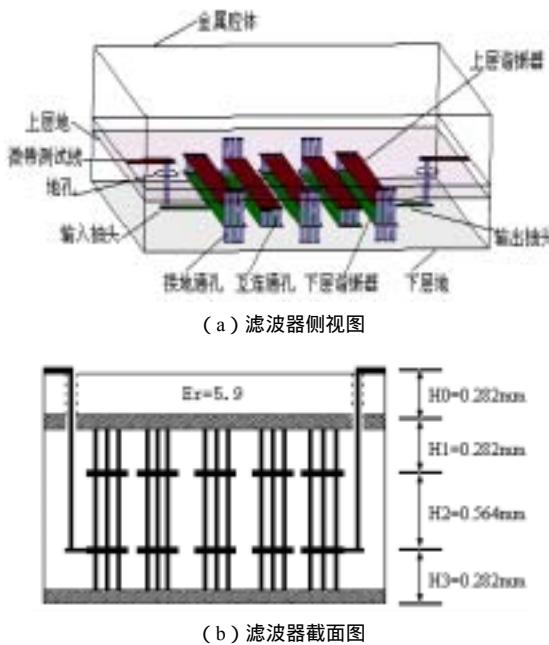


图1 滤波器结构示意图

该滤波器共有三层介质，其材料为Ferro-A6S LTCC生瓷带， $\epsilon_r = 5.9$ 、 $\tan \delta = 0.002$ ，各层介质的厚度分别为0.282mm、0.564mm、0.282mm，总厚度1.128mm。各级谐振器均为双层结构，它是将普通的单层四分之一波长短路谐振器在垂直于基板的方向上进行了对折，对折后谐振器从单层结构变为双层结构，分别位于中间层介质的上下两个表面，且上下两层之间通过金属通孔相连，通孔直径为0.2mm。谐振器上下两层的长度并非完全相等，其中下层的长度要比上层长0.5mm，目的是为了避开上层谐振器以便借助金属通孔与上下地层相连，实现短路。垂直对折后，谐振器的长度变为5.7mm，与对折前四分之一波导波长10.3mm相比，长度几乎减半，接近八分之一波导波长，而谐振器宽度不变，从而极大地减小了滤波器尺寸。图2分别列出了传统的四分之一波长终端短路谐振器、同层水平对折谐振器和本文中的多层垂直对折谐振器的结构，由比较可知，多层垂直对折谐振器的尺寸在三者当中是最小的。整个滤波器由五级双层结构的谐振器按照类似于交指带通滤波器的结构相互交错组成，输入输出端采用抽头形式，抽头为特性阻抗50Ω的带状线，与下层谐振器处在同一平面上。由于该滤波器的抽头为带状线形式，为了方便实际测试，在滤波器的上地层上增加一层厚度为H0=0.282mm的介

质，介质材料仍然为Ferro-A6S，然后使用信号互连通孔将介质表面50Ω的微带测试线与滤波器的输入输出抽头相连，此外在上地层上还需要打出地孔，以使信号互连通孔穿过地层。滤波器整体放置于封闭的金属腔体中。

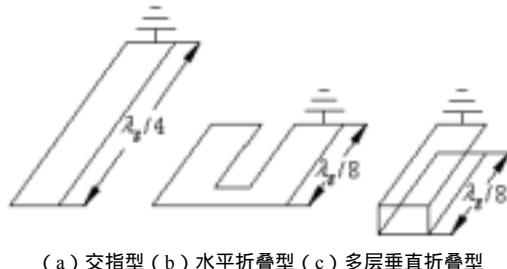


图2 三种谐振器的比较

3 滤波器设计与测试

本文设计的小型多层LTCC折叠线交指带通滤波器，工作在S波段，中心频率为 f_0 ，相对带宽10%，带内波纹0.1dB，插入损耗小于3dB。采用5阶0.1dB等波纹的契比雪夫低通滤波电路为原型，归一化低通原型的元件值分别为 $g_0=g_6=1.0$ ， $g_1=g_5=1.1468$ ， $g_2=g_4=1.3712$ ， $g_3=1.9750$ 。根据式(1)、式(2)可以分别求出滤波器各谐振器间的耦合系数K和输入输出端的外部Q值。

$$K_{n,n+1} = \frac{BW}{f_0 \sqrt{g_n g_{n+1}}} \quad n=1,2,3,4 \quad (1)$$

式中， $K_{n,n+1}$ 为第n和第n+1级谐振器之间的耦合系数，BW为等波纹带宽。

$$Q_e = \frac{f_0}{BW} g_0 g_1 = \frac{f_0}{BW} g_n g_{n+1} \quad n=5 \quad (2)$$

式中， Q_e 为单个谐振器的外部Q值。计算结果为： $k_{12}=k_{45}=0.0797$ ， $k_{23}=k_{34}=0.061$ ； $Q_{e1}=Q_{e2}=11.468$ 。从而得到滤波器的耦合系数矩阵为：

$$M = \begin{bmatrix} 0 & 0.0797 & 0 & 0 & 0 \\ 0.0797 & 0 & 0.0608 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0608 & 0 & 0.0608 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0608 & 0 & 0.0797 \\ 0 & 0 & 0 & 0.0797 & 0 \end{bmatrix} \text{滤}$$

波器的等效电路如图3所示。

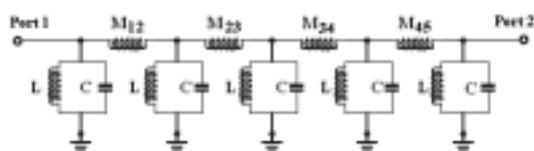


图3 五阶多层次折叠线交指带通滤波器等效电路图

在计算得到了带通滤波器的电路设计参数后，需要据此确定其物理尺寸。根据所选基板的介电常数 $\epsilon_r = 5.9$ 以及滤波器中心频率 f_0 可以计算出传统的四分之一波长交指型谐振器的长度为10.3mm，则八分之一波长为5.15mm。由于垂直折叠型谐振器的上下两层之间存在相互耦合，使得每层谐振器的长度超过了八分之一波长。在基板厚度保持1.128mm不变的情况下，通过减小谐振器上下两层之间的耦合，即增加谐振器上下两层之间介质层H2的厚度，可以在相同的谐振频率下，使得垂直折叠型谐振器的长度缩短。图4是谐振频率固定为 f_0 的条件下，通过电磁仿真软件HFSS计算得到的谐振器下层长度随中间介质层厚度H2的变化曲线。其中，谐振器下层长度始终保持比上层长0.5mm。

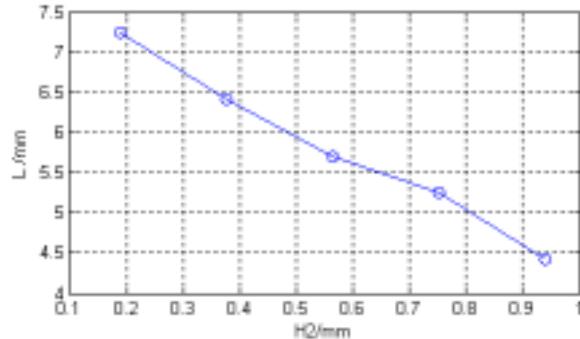


图4 折叠谐振器长度随中间介质层厚度的变化曲线

图5是谐振频率固定为 f_0 的条件下，HFSS计算得到的谐振器的无载品质因子随中间介质层厚度H2的变化曲线。结合图4、图5的仿真结果可知，在基板总厚度一定的情况下，为了使得垂直折叠谐振器既具有较短的长度，又具有较高的无载品质因子，应该选择 $H2=0.564\text{mm}$ ，相应的 $H1=H3=0.282\text{mm}$ 。此时的折叠谐振器下层长度为5.7mm，无载品质因子 $Q=91$ 。

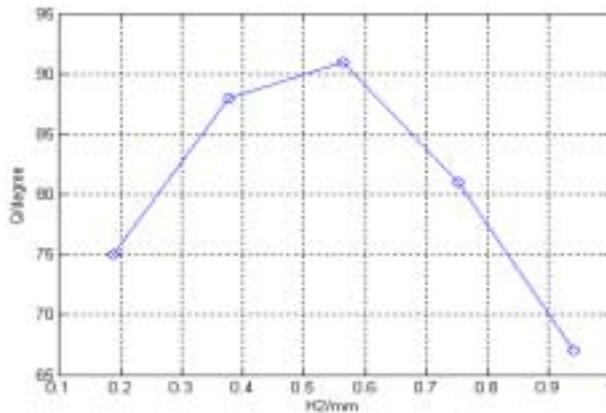


图5 折叠谐振器品质因子随中间介质层厚度的变化曲线

在确定了基板的结构和单个谐振器的尺寸之后，按照文献^[3]中设计滤波器的实验方法，使用HFSS来计算滤波器各谐振器之间的水平距离 $S_{n,n+1}$ 和输入输出抽头的位置 h ，如图6、7所示。通过调节 $S_{n,n+1}$ 和 h 的大小，使得运用实验方法计算出的级间耦合系数 $K_{n,n+1}$ 和外部 Q_e 值与(1)(2)式计算出的 $K_{n,n+1}$ 和 Q_e 值相等，从而确定 $S_{n,n+1}$ 和 h 的准确数值。实验中滤波器输入输出抽头为线宽0.3432mm的50Ω传输线。最后实验计算得到的各谐振器之间的水平距离为 $S_{12}=S_{45}=0.43\text{mm}$ ， $S_{23}=S_{34}=0.52\text{mm}$ ， $h=3.8\text{mm}$ 。

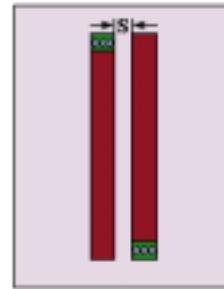


图6 耦合系数仿真模型

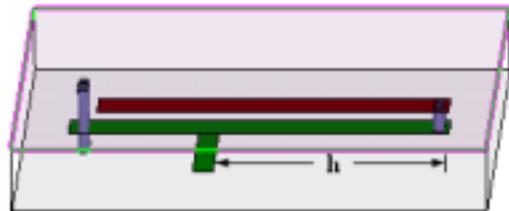


图7 外部Q值仿真模型

为了设计从滤波器抽头到表面微带测试线的过渡结构，在HFSS中建立过渡结构的仿真模型^[4]，如图8所示。通过优化地孔以及通孔覆盖区1、2的直径，使得过渡结构对微波信号的传输性能影响最小，即带宽内输入输出驻波比最小。优化结果为地孔直径0.7mm，通孔覆盖区1、2的直径分别为0.5mm、0.4mm。

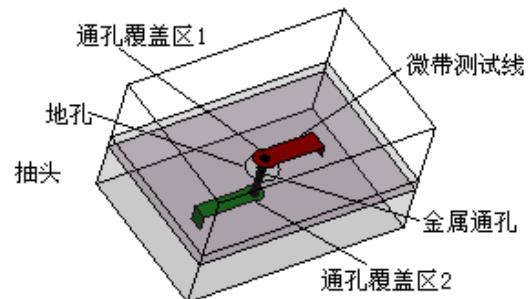


图8 过渡结构仿真模型

在获得了滤波器各部分的物理尺寸之后，运用HFSS建立如图1(a)所示的整个滤波器的三维电磁

仿真模型，对其进行S参数仿真，仿真结果如图9中虚线部分所示，图9中实线部分为测试滤波器实物得到的S参数曲线。可以看出测试结果与仿真结果十分吻合，从而证明了此种滤波器设计的有效性。图10为加工出的滤波器实物，测试时滤波器放置在金属腔体中，由于采用的是带状线结构，从基板表面只能看到输入输出的微带测试线，测试线与SMA接头相连。

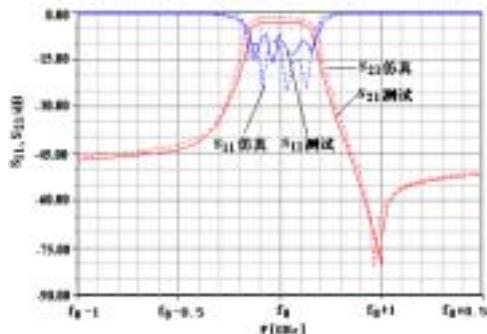


图 9 滤波器仿真结果与测试结果的比较

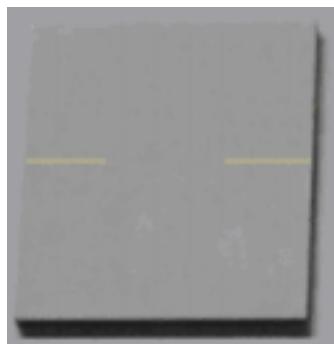


图 10 滤波器实物图

4 结论

本文设计并实现了一种LTCC多层折叠线交指带通滤波器。该滤波器工作在S波段，其中各谐振器均为双层结构，谐振器长度仅为八分之一波导波长，相比普通交指滤波器，体积显著减小。滤波器的测试结果与仿真结果十分吻合，证明了设计的有效性。该滤波器在小型化微波通信系统以及雷达系统中有着广阔的应用前景。

参考文献

- [1] 陈鹏 ,周邦华 ,李中云 ,附加传输零点的小型多层 LTCC 带通滤波器设计 ,电讯技术 ,2008 , 4
- [2] 牟亚妮 ,马哲旺 ,一种新型交指-发夹型多层带状线带通滤波器 ,电子学报 ,2006 , 12
- [3] Inder Bahl , Prakash Bhartia , Microwave Solid State Circuit Design: 2nd edition , 2003
- [4] 曾耿华 ,基于 LTCC 技术的小型雷达接收机前端设计与仿真 , 硕士学位论文 ,2007

微波滤波器设计培训——视频课程

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，致力于专注于微波、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/>