

· 天馈伺系统 ·

中图分类号: TN957

文献标志码: A

文章编号: 1004-7859(2011)08-0058-04

采用 LTCC 技术的 X 波段滤波器设计

高 勇, 高 宁

(南京电子技术研究所, 南京 210039)

摘要: 小型化和多通路设计是现代微波电路和系统的发展方向。MCM 和 LTCC 技术是实现这些研究方向的有效途径和手段。文中对采用低温共烧陶瓷(LTCC)技术设计实现的 X 波段 4 个带状线小型化滤波器进行了介绍, 将高频仿真软件 HFSS 设计优化的滤波器版图进行了 LTCC 制板和测试。对测试数据进行分析, 给出了采用 LTCC 技术设计实现微波小型化滤波器的一种解决方案。

关键词: 带状线滤波器; HFSS 软件; 低温共烧陶瓷; 小型化

Design of X Band Filter Based on LTCC Technology

GAO Yong, GAO Ning

(Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing 210039, China)

Abstract: Miniature design is the direction of modern microwave circuit and system. MCM (multi-chip module) and LTCC technology are the more effective methods for realizing the research direction. Four X-band filters based on LTCC are designed and optimized with HFSS in this paper. LTCC technology is employed to manufacture the filters. This paper analyses the tested data, gives a solve precept design miniature filter based on LTCC technology.

Key words: stripline filters; HFSS; LTCC; miniature

0 引言

随着微波射频电路和微电子技术不断发展, 微波电路和系统小型化设计成为主流研究趋势^[1-2]。最近几年, 日渐成熟的微波多芯片组件技术更是把芯片的微组装技术、混合集成电路的厚膜技术以及印制板技术中多层基板技术融为一体, 大大减小了电路体积, 提高了系统集成度和可靠性, 但是传统设计方法实现的滤波器却成为小型化发展的一个瓶颈。在 45 mm × 30 mm × 7.5 mm 体积内集成 4 路高性能带通滤波器接收前端这样小型化设计, 成为接收微波电路研究的重点和方向。

低温共烧陶瓷(LTCC)技术的日益成熟为滤波器小型化提供了方向。将滤波器内埋在基板内部实现, 并且可以灵活地将多个滤波器设计在同一个基板不同层上, 用埋孔将各个滤波器输入、输出引到表层, 实现滤波器组小型化^[3-4]。采用 LTCC 技术的多层基板是由许多层 0.10 mm ~ 0.15 mm 厚的、上面印刷有传输线的生胚陶瓷片烧结而形成, 这种生胚陶瓷片的介电常数在 4 ~ 8 之间, 可以设计出比较宽的微波传输线, 因此传输线的损耗比在硅、砷化镓和陶瓷等介质上的微波传输线的损耗要低。

我们基于成熟的微波电路技术和先进的 LTCC 厚膜技术设计并制作的 12 层基板, 进行了测试和数据分析; 并将 X 波段 4 个带状线滤波器集成在该基板中, 具有一定创新性, 为滤波器小型化的研究作了有益的探索。

1 带状线滤波器设计

滤波器设计理论已经非常成熟, 各种设计方法也有经典理论可循。目前微波工程师主要采用高效 EDA 软件辅助设计方法。HFSS 是 Ansoft 公司著名的三维电磁场仿真软件, 在电磁领域其准确度、易用度、效率等都有很高评价。HFSS 主要采用有限元方法, 对模型进行自适应网格剖分, 迭代计算直至收敛并输出 S 参数运算结果。

设计目标为 5 级发夹滤波器, 中心频率分别为 8.5 GHz、9.5 GHz、10.5 GHz、11.5 GHz, 通频带为 1 GHz, 插损 < 4.2 dB, 低端 $f_0 - 2.24$ GHz 以远抑制度 > 45 dB, 高端 $f_0 + 1.5$ GHz 以远抑制度 > 30 dB。滤波器设计方法采用更利于计算机辅助设计的外部品质因数 Q_i 和耦合系数 M_{ij} 方法。

首先, 根据设计指标选定滤波器类型, 查表^[5]得出低通原型参数 $g_0, g_1, \dots, g_n, g_{n+1}$, 由下面公式^[2]可以算出带通滤波器的参数

$$Q_{el} = \frac{g_0 g_1}{FBW}, \quad Q_{en} = \frac{g_n g_{n+1}}{FBW} \quad (1)$$

$$M_{i,i+1} = \frac{FBW}{\sqrt{g_i g_{i+1}}}, \quad i = 1, 2, \dots, (n-1) \quad (2)$$

FBW 为带通滤波器的相对带宽, g_0, g_1, g_n, g_{n+1} 为切比雪夫低通滤波器原型的元件数值, Q_{el}, Q_{en} 是谐振器在输入输出处的外部品质因数, $M_{i,i+1}$ 是相邻谐振器间的耦合系数。

其次, 确定滤波器的物理尺寸, 谐振器的长度 L 由中心频率确定, 将谐振器模型导入 HFSS 中进行本征模式仿真, 如图 1a) 所示, 通过改变谐振器的长度 L , 达到所需的中心频率; 2 个谐振器之间的耦合系数仿真模型见图 1b), 在 HFSS 本征模式下得到的 2 个频率 f_{p1}, f_{p2} 为相邻耦合器间的插入损耗 S_{21} 所对应的上下 2 个谐振频率点^[6], 通过式(3)计算可得, 通过调节耦合间距 S , 达到由理论计算的值即可确定耦合间距 S ; 外部品质因数的仿真模型及结果见图 2, 由式(4)计算可得, 调整抽头位置 t , 确定 Q_e 值^[6]

$$M = \frac{f_{p2}^2 - f_{p1}^2}{f_{p2}^2 + f_{p1}^2} \quad (3)$$

$$Q_e = \frac{\omega_0}{\Delta\omega_{\pm 90^\circ}} \quad (4)$$

式中: ω_0 是谐振器的中心频率; 在增加抽头的谐振器仿真 S_{11} 相位图中, $\Delta\omega_{\pm 90^\circ}$ 是的绝对相位偏移所对应的频率差。

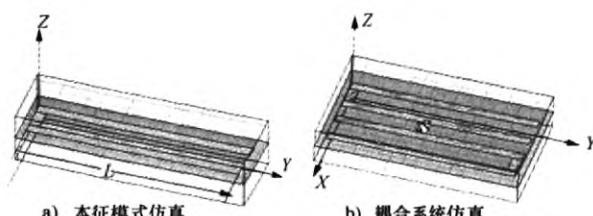


图 1 谐振频率和谐振器间隙与耦合系数仿真

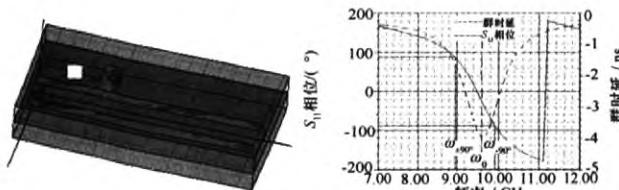


图 2 谐振器抽头位置与品质因数仿真

LTCC 多层基板设计选用美国 Ferro 公司的 Ferro-A6 型 LTCC 生胚材料。该材料的相对介电常数为 5.9 ± 0.2 , 损耗角正切值 ≤ 0.002 , 每层生胚材料的厚度为 0.1 mm 。综合考虑带状线 50Ω 线宽、加工工艺和介

质损耗等因素, 将滤波器图形埋置在 6 层介质中间, 即 $B = 0.6 \text{ mm}$, 采用标准带状线结构。仿真计算得到滤波器初步参数谐振器长度 L 、线宽 W 、耦合间隙 $S_{12}, S_{23}, S_{34}, S_{45}$, 抽头位置 t , 再进行综合优化变量, 使滤波器达到最佳效果。

2 4 个带状线滤波器小型化设计

LTCC 基板的优势在于多层微波信号线的集成, 我们将 X 波段 4 个滤波器分别设计在 12 层基板的第 4 层和第 10 层, 第 1 层、第 7 层和第 12 层背面为带状线接地面; 各滤波器的输入、输出通过埋孔引到第 1 层转为微带线方便和有源电路级联。4 个滤波器小型化设计模型, 如图 3 所示。

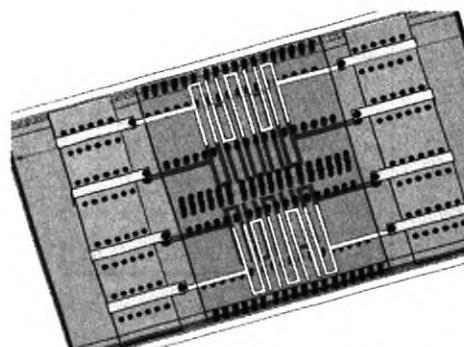


图 3 4 个带状线滤波器小型化设计模型

理论上实现接地面互通可以通过通孔或侧壁刷银浆的方法, 这 2 种方法对 LTCC 工艺要求都很高。我们通过多次制板试验验证, 通孔接地效果最佳。但通孔的数量和密度对电路性能的影响, 还需要进一步研究来找到规律。目前, 我们采用仿真设计时减少接地通孔数量, 而在版图设计时, 在工艺允许的条件下尽量增加通孔数量的方法, 这样可以节省仿真运算时间, 版图的效果也可以保证。

LTCC 多层基板设计与工艺非常密切^[7], 图形加工精度、叠层精度、介电常数稳定性、生胚厚度一致性等都影响版图效果, 每条 LTCC 基板生产线都有这些参数特定值。我们通过几轮制板验证, 摸清 LTCC 基板生产线参数规律, 在仿真设计中将这些参数带来的影响提前考虑, 比如制板后频率响应向高端漂移大约 200 MHz , 那么在仿真设计时将目标频率向低端先偏移 200 MHz 。

3 小型化滤波器制板和验证

我们在尺寸 $15.5 \text{ mm} \times 11 \text{ mm}$ 的 12 层基板上设计了 4 个带状线滤波器, 加工版图及测试方法见图 4。

测试结果和仿真结果对比见图5~图8。

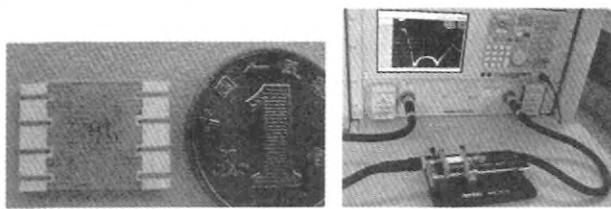


图4 滤波器版图和测试方法

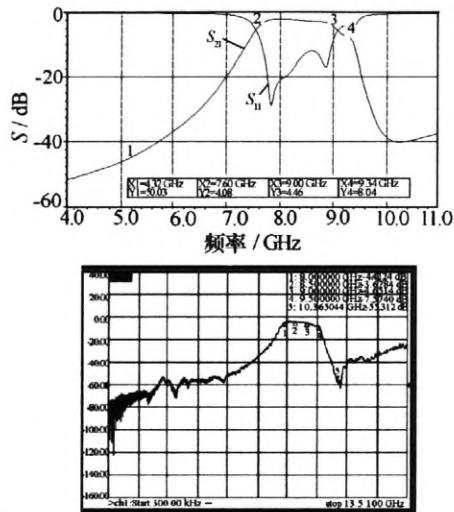


图5 8 GHz ~ 9 GHz 仿真和测试 S_{21} 参数比较

仿真结果:通带范围为 7.6 GHz ~ 9.3 GHz, 中心频率为 8.45 GHz, 带外 4.32 GHz 时, 损耗达到 50 dB;
测试结果:通带范围为 8 GHz ~ 9.5 GHz, 中心频率为 8.75 GHz。

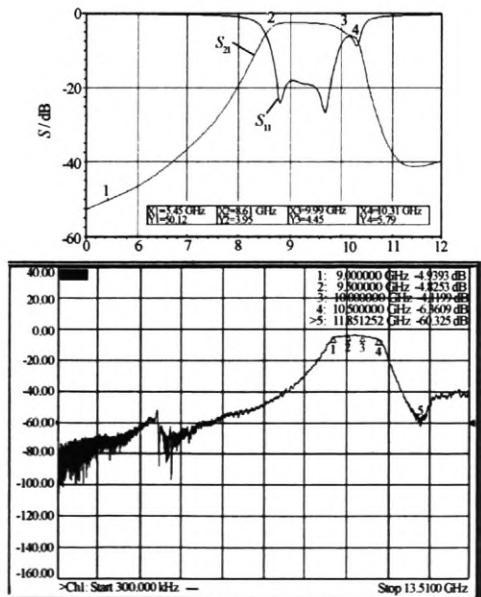


图6 9 GHz ~ 10 GHz 仿真和测试 S_{21} 参数比较

仿真结果:通带范围为 8.6 GHz ~ 10.3 GHz, 中心频率为 9.45 GHz, 带外 5.45 GHz 时, 损耗达到 50 dB;

— 60 —

测试结果:通带范围为 9 GHz ~ 10.5 GHz, 中心频率为 9.75 GHz。

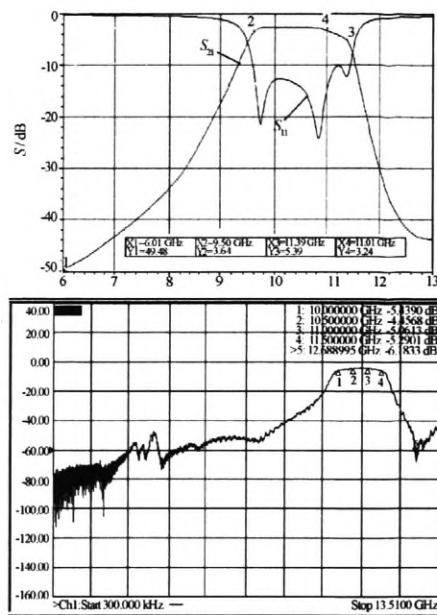


图7 10 GHz ~ 11 GHz 仿真和测试 S_{21} 参数比较

仿真结果:通带范围为 9.6 GHz ~ 11.3 GHz, 中心频率为 10.45 GHz, 带外 6 GHz 时, 损耗达到 50 dB; 测试结果:通带范围为 10 GHz ~ 11.5 GHz, 中心频率为 10.75 GHz。

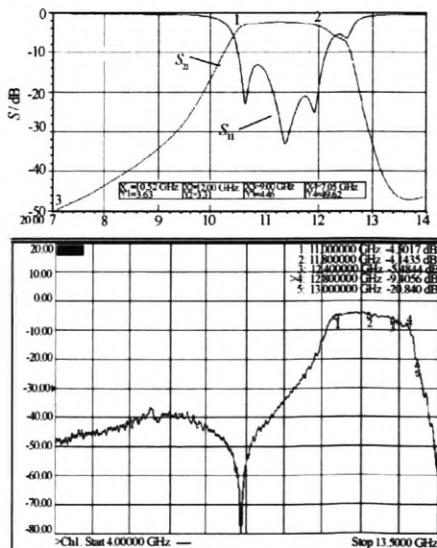


图8 11 GHz ~ 12 GHz 仿真和测试 S_{21} 参数比较

仿真结果:通带范围为 10.5 GHz ~ 12.3 GHz, 中心频率为 11.45 GHz, 带外 7 GHz 时, 损耗达到 50 dB; 测试结果:通带范围为 11 GHz ~ 12.5 GHz, 中心频率为 11.75 GHz。

由于将 LTCC 基板加工工艺带入的因素在仿真设计时考虑, 对设计目标进行预处理, 所以滤波器测试结

果中通带差损、平坦度、驻波等基本满足设计目标,只有低端带外抑制度不太理想,主要原因是滤波器在测试时,只是固定在测试夹具上,没有安装在金属腔体内测试,带外抑制度和仿真数据有一定差别。图 9 为小型化滤波器应用在 45 mm × 30 mm × 7.5 mm 体积内全 X 波段接收前端内的电路,在接收前端中,4 个滤波器实现镜像频率抑制作用。LTCC 技术在国内外应用非常普遍,MCM 组件也比较常见,如 T/R 组件基本全部采用该技术。但将滤波器组中 4 个滤波器采用带状线方法集成在多层基板中,和有源电路高密度进行信号滤波、变频处理构成接收通道还是比较少见的产品类型,具有一定先进性和应用性。

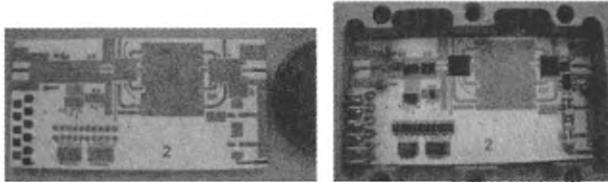


图 9 小型化滤波器应用

4 结束语

小型化滤波器设计效果与基板制造工艺水平非常相关,这就要求设计师不仅对仿真软件熟练使用,根据工艺参数修改模型参数,还要对加工工艺稳定性、一致性及关键参数影响度进行预判,在版图测试数据中分析找到规律,快速准确设计出高性能小型化滤波器。

参 考 文 献

- [1] 洪伟. 微波理论与技术的新进展和发展趋势[J]. 微波学报, 1996, 12(4): 341–344.
- [2] Kopp B A, Borkowski M, Jerinic G. Transmit/receive modules[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2002, 50(3): 827–834.
- [3] Hommel H, Feldle H P. Current status of airborne active phased array (AESA) radar systems and future trends [C]// 34 th European Radar Conference Digest. Amsterdam: IEEE Press, 2004.
- [4] Adolph M, Hackenberg U, Reber R, et al. High-precision temperature drift compensated T/R-Module for satellite based SAR applications[C]// European Microwave Conference. Paris: IEEE Press, 2005.
- [5] Sheppard S T, Smith R P, Pribble W L, et al. High power hybrid and MMIC amplifiers using wide-bandgap semiconductor devices on semi-insulating SiC substrates[C]// the 60th Annual Device Research Conference. California: IEEE Press, 2002.
- [6] Koliassis N J, Kazior T E. GaN HEMTs: an enabling technology for next generation solid state phased arrays[C]// IEEE Microwave Theory and Techniques Symposium Digest. [S. l.] : Fort Worth/Texas, 2004.
- [7] Nilsson J, Billstrom N, Rorsman N, et al. S-band discrete and MMIC GaN power amplifiers[C]// Proceedings of the 4th European Microwave Integrated Circuits Conference. Rome: IEEE Press, 2009.

姚小江 男, 1976 年生, 博士。研究方向为化合物半导体器件在 T/R 组件电路中的应用。

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/>