

# 基于 LTCC 技术的三维集成微波组件

严 伟, 禹胜林, 房迅雷  
(南京电子技术研究所, 江苏南京 210013)

**摘 要:** 低温共烧陶瓷(LTCC)技术和三维立体组装技术是实现微波组件小型化、轻量化、高性能和高可靠的有  
效手段. 本文研究实现了基于 LTCC 技术的三维集成微波组件, 对三维集成微波组件的立体互连结构、三维集成 LTCC  
微波电路的垂直微波互连、微波多芯片模块(MMCM)的垂直微波互连等关键技术进行了重点阐述. 研制出的三维集成  
微波组件的体积和重量分别比传统的二维平面 LTCC 集成微波组件减小 40% 和 38%, 电气性能相当.

**关键词:** 低温共烧陶瓷; 垂直微波互连; 三维立体组装; 微波组件

**中图分类号:** TN386 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2005)11-2009-04

## Three Dimensional Integrated Microwave Modules Based on LTCC Technology

Yan Wei, Yu Sheng lin, Fang Xun lei

(Nanjing Research Institute of Electronic Technology, Jiangsu, Nanjing 210013, China)

**Abstract:** Low temperature co fired ceramics (LTCC) technology and three dimensional (3D) microwave cubic packaging  
technology for microwave modules are effective methods for realizing microwave modules miniature and light with high performance and  
high reliability. In this paper, 3D integrated microwave modules based on LTCC are studied and developed. The cubic interconnecting  
structure of 3D integrated microwave modules, the vertical microwave interconnecting of 3D integrated LTCC microwave circuit sub-  
strates, and the vertical microwave interconnecting of microwave multi chip module (MMCM) are described in detail. The volume and  
weight of 3D integrated microwave modules with these technologies are reduced by 40% and 38% respectively compared to traditional  
2D LTCC integrated microwave modules, and the electric performances are about the same.

**Key words:** low temperature co fired ceramics (LTCC); vertical microwave interconnecting; 3D cubic packaging; microwave  
module

### 1 引言

随着单片集成电路技术、新型电子材料和组装互连技术的快速发展, 固态有源相控阵技术在军用和民用电子装备中  
得到越来越广泛的应用. 先进的相控阵天线需要大量小型化、轻量化、高可靠、多功能和低成本微波组件, 推动微波电路  
技术向单片微波集成电路(MMIC)、微波多芯片模块(MMCM)、和三维集成微波电路方向发展. 三维集成微波电路是在二维  
MMCM 的基础上, 使组装和互连技术从二维向三维发展而实现的三维立体结构的微波电路, 以进一步提高组装密度、减小  
体积. 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. 如将低温共烧陶瓷(LTCC)技术引入  
三维集成微波组件的研制中, 利用 LTCC 技术具有的比传统厚膜、薄膜和高温共烧陶瓷(HTCC)技术更加灵活的设计方  
法, 即采用微波传输线(如微带线、带状线和共面波导)、逻辑控制线和电源线的混合信号设计, 可以将它们组合在同一个  
LTCC 三维微波传输结构中, 并且可将电阻、电容和电感等无源元件集成在 LTCC 多层微波电路基板中, 进一步提高集成

度和可靠性. 而且在 LTCC 多层微波电路中采用带状线和中间接地屏蔽层还可以改善微波系统中接收和发射通道之间的  
隔离度. 因此基于 LTCC 技术研制的微波组件具有高集成密度、多种电路功能和高可靠性等技术优势. 近年来随着高介电  
常数、低损耗角正切值的带金属衬底复合介电材料的研制成功及广泛应用, 也为解决垂直微波互连这一 3D 结构的技术  
关键, 实现多块 LTCC MMCM 的低成本、高可靠的垂直微波互连提供了有效的技术途径<sup>[1-3]</sup>.

本文研究了实现基于 LTCC 技术的三维集成微波组件的高密度组装和互连技术. 对三维集成微波组件的结构、三维集  
成 LTCC 微波组件的垂直微波互连、MMCM 的垂直微波互连等进行了理论分析、电路和电磁场仿真、电路样品制作和实验  
研究. 研制出的三维集成微波组件的体积和重量分别比传统的二维平面 LTCC 集成微波组件减小 40% 和 38%, 电气性能  
相当.

### 2 三维集成微波组件结构

为了实现三维集成微波组件, 将构成微波组件的电路系

统划分为发射支路、接收支路和控制支路等三部分. 首先采用三维 LTCC 微波互连电路技术和微波多芯片模块技术分别研制出发射支路 LTCC 微波多芯片模块、接收支路 LTCC 微波多芯片模块和控制支路 LTCC 微波多芯片模块. 然后再采用垂直微波互连技术将上述三块 LTCC 微波多芯片模块的底面的微波传输线/控制线利用带金属衬底的微波复合介质基板(表面贴装环行器和隔离器也安装在其上)上的导带垂直叠层互连而形成三维集成微波组件. 为了最大限度地减小发射支路和接收支路之间的干扰, 发射支路 LTCC 微波多芯片模块和接收支路 LTCC 微波多芯片模块之间的距离应大于接收支路 LTCC 微波多芯片模块和控制支路 LTCC 微波多芯片模块之间的距离. 其结构示意图如图 1 所示.

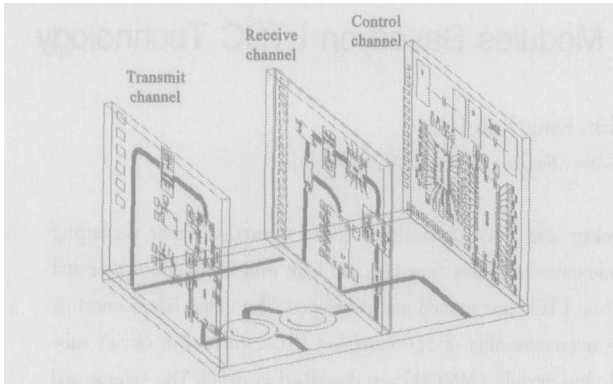


图 1 三维集成微波组件结构示意图

由于发射支路的耗散功率比较大, 将发射支路安装在三维集成微波组件的最左边, 并且直接焊接在封装外壳上, 使封装外壳起到散热器的作用, 以提高其散热能力, 同时三维集成微波组件在安装到相控阵天线上时, 还可以将安装了发射支路的外壳的这一面紧贴在天线冷板上, 进一步改善三维集成微波组件的工作环境, 提高三维集成微波组件的可靠性.

### 3 三维集成 LTCC 微波电路的垂直微波互连

低温共烧陶瓷(LTCC)微波多层互连电路是实现三维集成微波组件的一种较理想的互连电路<sup>[4]</sup>. 由于烧结温度低(850℃), 可使用金、银或铜等高电导率的金属材料, 导体的损耗比较低. 而且在 LTCC 多层微波电路制造过程中, 还可以将集总参数电阻、电容和电感等无源元件埋置在 LTCC 多层电路中, 以取代表面贴装元件, 形成三维立体结构, 进一步缩小体积、降低成本、改善电性能和提高可靠性.

#### 3.1 LTCC 中的垂直微波互连

在 LTCC 三维微波互连结构中, 垂直微波互连对于实现微带线和带状线之间的平稳转换, 保证微波信号的有效传输是至关重要的. 采用三维电磁场仿真软件高频结构模拟器(HFSS)对垂直微波互连结构进行了分析和优化.

垂直通孔与微带线和带状线等微波传输线的连接方式有很多种, 我们对图 2 所示的三种连接方式进行了研究.

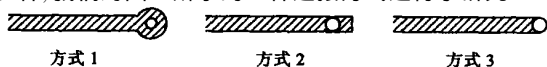


图 2 垂直通孔与微波传输线的三种连接方式

根据三维电磁场仿真软件 HFSS 对这三种连接方式的仿真和优化结果, 连接方式 1 的传输特性最好, 而连接方式 3 的反射信号最大, 因而传输特性最差. 因此在实现微带线和带状线之间的转换时, 采用方式 1 所示的垂直通孔. 从仿真结果还可以看出, 连接方式 1 通过在垂直通孔与微波传输线的连接处适当扩展微波传输线(环状), 有助于把电磁场信号导入垂直通孔和下面的带状线, 改善了传输性能. 这一仿真结果与理论分析的结果也是一致的, 微带线从上层过渡到下层时, 会有一段附加的垂直连接线(垂直通孔), 这段线可以等效为电感, 其电感值近似为<sup>[5]</sup>:

$$L = 60 \frac{\Delta l}{v} \left[ -\gamma + \ln \frac{2\lambda_0}{\pi w \sqrt{\epsilon_r}} \right] \quad (1)$$

式中  $\Delta l$  为垂直连接线的长度,  $v$  为自由空间的波速,  $\gamma = 0.5772$  为欧拉常数,  $w$  为微带线宽度,  $\epsilon_r$  为微带线等效介电常数. 这个电感与微带线原有的电感串联, 导致在过渡段微带线的总电感增加到:

$$L = L_0 + \Delta L \quad (2)$$

这样如果不加补偿, 该过渡段微带线的特性阻抗变为:

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C_0}} = \sqrt{\frac{L_0 + \Delta L}{C_0}} \quad (3)$$

而过渡段外微带线的特性阻抗仍然是:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} \quad (4)$$

这样两边阻抗不同引起了反射. 为此需要引入补偿电容  $\Delta C$ , 使得过渡段的特性阻抗仍然保持在  $Z_0$ , 即令:

$$\sqrt{\frac{L_0 + \Delta L}{C_0 + \Delta C}} = Z_0 \quad (5)$$

因此补偿电容值应该是:

$$\Delta C = \frac{L_0 + \Delta L - Z_0^2 C_0}{Z_0^2} \quad (6)$$

在结构上, 在垂直通孔与微波传输线的连接处的环状导体提供了所需的补偿电容. 上面的附加电感计算公式是一个近似式子, 随着工作频率的升高, 附加电感的大小也会变化, 其精确值没有可用的解析式, 需要采用电磁场全波数值分析方法才能得到. 同样补偿电容也会随频率变化, 如果两者变化的趋势和速度不一致的话, 则特性阻抗就不再保持一致, 这就是垂直连接线驻波频率特性的内在原因, 也是改善设计的关键所在. 另外, 由于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, 所以在工程中具有很高的应用价值.

采用方式 1 实现的微带线和带状线之间的转换如图 3 所示. 图中接地孔是为了连接三维 LTCC 微波电路的中间接地层和背面接地层. 对于带状线, 在三维结构中为消除寄生平板波

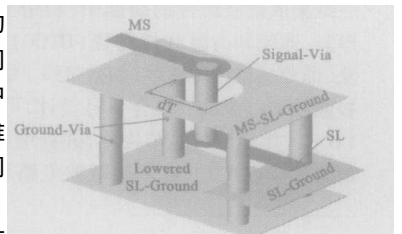


图 3 微带线和带状线之间的转换

导效应,通常采用图 3 所示的在带状线两侧排布两排接地通孔来实现中间接地层与背面接地层的可靠连接。经过 HFSS 软件仿真和优化后,该结构取得了较为满意的微波性能,而且仿真结果和测试结果吻合较好,如图 4 所示。

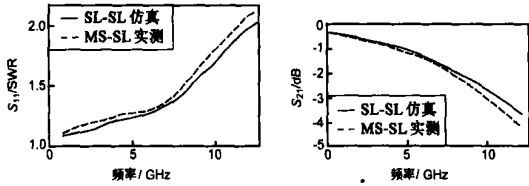


图 4 微带线和带状线之间转换仿真和测试结果

### 3.2 穿墙结构的设计和仿真

为了实现图 1 所示三维结构中中间接收支路 MMCM 插件前后两面复合介质基板上的微带传输线的连接,研究采用了在接收支路 LTCC MMCM 插件的金属衬底板上开一个矩形槽口,利用槽口上的 LTCC 基板正、反面的微带线和通孔来连接接收支路 MMCM 插件前后的微带传输线的穿墙结构。为确定这种结构的尺寸及其是否对微波性能有影响,采用 HFSS 软件对这种结构进行了仿真,仿真模型如图 5 所示。仿真结果如图 6 所示。

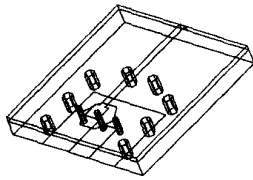


图 5 穿墙结构的 HFSS 仿真模型

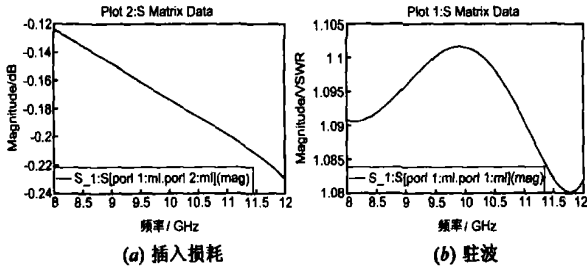


图 6 穿墙结构的仿真结果

从图 6 的仿真结果可见,采用这种穿墙结构,其插损和驻波均很小,对整个微波性能的影响也很小,因此可以在三维集成微波组件中采用。

### 4 MMCM 的垂直微波互连

在三维集成微波组件中,形成三维结构的关键是如何实现各平面 LTCC MMCM 间的垂直微波互连。本文中采用了 T 型垂直互连的方法来实现多个 LTCC MMCM 之间的互连,即用一块水平母板作为实现多个 LTCC MMCM 之间的互连的载

体,每一块需要垂直互连的 LTCC MMCM 采用如图 7(a) 所示的 T 形垂直互连结构实现与母板的互连。

在每一块需要垂直互连的 LTCC MMCM 基板的侧面制作互连的金属化连线,然后将叠装后的 MCM 基板侧面金属化连线用引线或附铜介质侧板层层焊接互连起来。由于不同二维平面 LTCC MMCM 电路之间的微波信号都是通过垂直传输线来进行传输,在微波信号传输线的垂直拐角会产生不连续性效应,影响微波组件的电特性,而且在垂直拐角电场的集中会引起电容效应;电流运动在垂直拐角附近受到阻碍会引起电感效应和辐射效应,因此需要对微波信号垂直传输结构进行分析和优化,使其损耗和驻波均能满足技术要求。在三维集成微波组件中,选用带金属衬底的微波电路复合介质层压板作为实现多个二维平面 MMCM 电路之间的垂直微波互连的介质材料。与传统的双面附铜板相比,带金属衬底的微波电路复合介质层压板具有散热性能好、方便连接器安装、可通过在介质层上开槽或打盲孔的方法将有源或无源器件直接安装在金属衬底上,最大限度地降低在恶劣温度环境条件下介质层和导体层开裂的现象、外形尺寸稳定性和易于气密封装等优点。

图 7(b) 所示为对 T 形垂直结构进行三维电磁场仿真和优化的 HFSS 模型。仿真结果和实际测试结果如图 8(a) 和 (b) 所示。从图 7 中可以看出,经过设计优后的垂直互连微带线应在垂直拐角处变窄,这是因为微带线从垂直面过渡到水平面时,在拐角处接地板的面积增大,而且单位长度的导带面积也比正常的情况下大,因此这个拐角等效为一个电容  $\Delta C$ 。

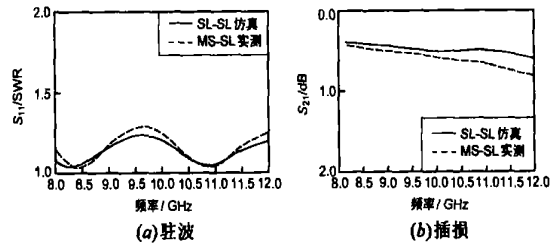


图 8 垂直微带线仿真和实测结果比较图

这个电容与微带线原有的电容  $C_0$  并联,导致在过渡段微带线的总电容增加到:

$$C = C_0 + \Delta C \quad (7)$$

如果不加补偿,该过渡段微带线的特性阻抗变为:

$$Z = \sqrt{\frac{L_0}{C}} = \sqrt{\frac{L_0}{C_0 + \Delta C}} \quad (8)$$

而过渡段外微带线的特性阻抗仍然是:

$$Z_0 = \sqrt{L_0 / C_0} \quad (9)$$

这样会导致两边阻抗不同而引起反射。为此需要减少总的电容,使得过渡段的特性阻抗仍然保持在  $Z_0$ , 即令:

$$\sqrt{\frac{L_0}{C_0 + \Delta C}} = Z_0 \quad (10)$$

因此要减少微带线导带本身的电容值  $C'_0$ , 它应该满足

$$C_0 = C'_0 + \Delta C \quad (11)$$

在结构上,通过减小过渡段微带线导带宽度的方式就可以保

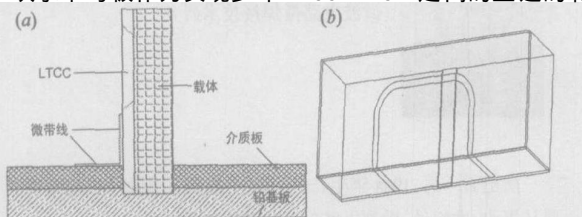
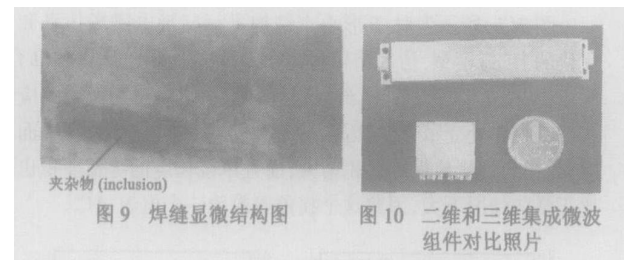


图 7 (a) T 形垂直互连结构图; (b) 垂直微带线试验样品的 HFSS 模型

证总电容不变. 在静电场情况下, 利用保角变换的方法可以得到电容与微带线导带宽度之间的关系. 在微波频率, 微带线电容与导带宽度之间不存在解析关系式, 需要采用电磁场全波数值分析方法才能得到它们之间的关系, 而且随着工作频率的升高, 即使结构尺寸不变, 微带线等效电容的大小也会变化. 但是一般而言, 微带线的电容与导带宽度近似成正比. 因此可以通过改变导带宽度得到所需的电容. 需要注意的是, 拐角处电感同样也会随频率变化, 如果电容、电感两者变化的趋势和速度不一致的话, 则特性阻抗就不再保持一致.

在制作工艺方面, 由于在  $X$  波段这样的高频区间, 垂直接头的形状和焊缝的质量对微波传输特性的影响是很大的, 因此对这种相互垂直的微波传输线的互连可应用激光焊接或热板钎焊等精密焊接互连技术来实现其高精度、高可靠的连接, 主要考虑使钎焊组织不要形成脆性金属间化合物, 不影响 LTCC MMC 插件板的质量, 通过控制钎焊温度与时间来获得良好的金相组织结构. 目前我们采用激光精密焊接和整体加热的软钎焊方式获得了优质焊缝和满足微波传输特性要求的焊点形状. 图 9 为焊缝显微组织结构照片. 从图 9 中所示的焊缝显微结构可以看出, 获得的焊缝均匀一致.



从图 8 中可以看出, 采用这种垂直互连结构, 在  $X$  波段的插损小于  $0.15\text{dB/cm}$ , 驻波小于  $1.25$ , 完全可以满足三维集成微波组件的技术应用要求. 而且由于采用了精密的焊接夹具和焊接方法, 实现了两块互相垂直的微波传输线的均匀一致、可靠的互连, 样品的实测结果与仿真结果吻合得较好, 满足了三维集成微波组件的要求.

## 5 测试结果

采用上述高密度组装互连技术研制的三维集成微波组件样品与采用 LTCC 基板研制的传统的二维微波组件样品对比照片如图 10 所示. 三维集成微波组件样品的体积和重量分别比二维微波组件样品的体积和重量降低  $40\%$  和  $38\%$ , 接收增益达到  $24\text{dB}$ , 发射功率达到  $5\text{W}$ , 与二维微波组件的电气性能相当.

## 6 结论

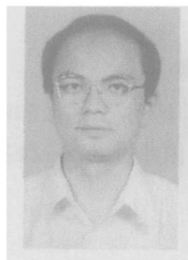
通过对三维集成微波组件的结构、三维集成 LTCC 微波电路的垂直微波互连和 MMC 的垂直微波互连进行仿真和优化, 得到了较好的微波性能, 并有效地减小了微波组件的体积和重量, 实现了微波组件的三维集成及高密度组装和互连. 基于 LTCC 的三维集成微波组件是实现射频和微波电路小型

化、轻量化、高性能和高可靠的有效途径, 在雷达和通讯等技术领域具有广泛的应用前景<sup>[6-8]</sup>.

## 参考文献:

- [1] A Contolatis, V Sokolov. 90° RF vertical interconnects[J]. Microwave Journal, 1993, 36(6): 102-104.
- [2] Yan Wei, Fang Xunlei, Yu Shenglin, Fu Peng. High density packaging technologies for 3D integrated phased array microwave modules[A]. 2004 International Radar Conference(RADAR2004)[C]. Toulouse, France, 2004.
- [3] A Isarawi S F, Abbott D, Franzen P D A. Review of 3D packaging technology[J]. IEEE Tran. On CPMT, Part B, 1998, 21(1): 2-14.
- [4] F J Schmuckle, A Jentsch, W Heinrich, et al. LTCC as MCM substrate: design of strip line structure and flip chip interconnects[A]. 2001 IEEE MTT-S Digest[C]. Phoenix, USA, 2001. 1903-1906.
- [5] Dearney, R W, A R F Barel. A broad band transmission line model for a rectangular microstrip antenna[J]. IEEE Trans. AP, 1989, 37(1): 6-15.
- [6] Yan Wei, Fang Xunlei, Hong Wei. 3D packaging & interconnecting techniques for microwave modules[A]. 6th International Symposium on Antenna, Propagation, and EM Theory (ISAPE2003)[C]. Beijing, China, 2003. 847-850.
- [7] Mark S Hauhe, John J Wooldridge. High density packaging of X band active array modules[J]. IEEE Trans. on CPMT, Part B. 1997, 20(3): 279-291.
- [8] P Monfrak, P Ulian, C Drevon, et al. 3D microwave modules for space applications[A]. Proceedings of 1998 IEEE MTT-S Digest[C]. Maryland, USA, 1998. 1289-1292.

## 作者简介:



严伟男, 1965 年出生, 工学博士, 研究员级高级工程师, 江苏南京人, 南京电子技术研究所微电路研究部主任, 主要从事收/发组件、微波电路封装和互连技术研究.  
E-mail: Z\_j3282@yahoo.com.cn.



禹胜林男, 1967 年生, 工学硕士, 高级工程师, 江苏泰州人, 南京电子技术研究所微电路研究部副主任, 主要从事收/发组件微组装工艺和微波电路微焊接技术研究.

房迅雷男, 1968 年生, 工学硕士, 高级工程师, 江苏南通人, 主要从事收/发组件、微波电路封装和互连技术研究.