

# 低温共烧陶瓷微波多芯片组件

严伟<sup>1,2</sup>, 洪伟<sup>1</sup>, 薛羽<sup>2</sup>

(1. 东南大学无线电工程系毫米波国家重点实验室, 江苏南京 210096; 2. 南京电子技术研究所, 江苏南京 210013)

**摘要:** 低温共烧陶瓷(LTCC)是实现小型化、高可靠微波多芯片组件(MMCM)的一种理想的组装技术. 本文研究采用了一种三维LTCC微波传输结构, 并采用叠层通孔实现垂直微波互连. 利用电磁场分析软件对三维微波传输结构和垂直微波互连方式进行了模拟和优化, 并与试验样品的测试结果进行了对比, 两者吻合较好. 介绍了单片微波集成电路芯片测试和微波多芯片组件键合互连方法, 以及一个X波段微波多芯片组件的应用实例.

**关键词:** 低温共烧陶瓷; 微波多芯片组件; 垂直微波互连

**中图分类号:** TN304 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2002) 05-0711-04

## LTCC Microwave Multichip Modules

YAN Wei<sup>1,2</sup>, HONG Wei<sup>1</sup>, XUE Yu<sup>2</sup>

(1. State Key Lab of Millimeter Wave, Dept of Radio Engineering, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China;

2. Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing, Jiangsu 210013, China)

**Abstract:** Low Temperature Co-fired Ceramics (LTCC) is an excellent packaging technique for achieving highly reliable and miniature microwave multichip modules (MMCM). A three dimensional (3D) LTCC microwave transmission structure was studied in this paper, and stacked vias were applied in the structure to realize vertical microwave interconnecting. The 3D LTCC structure and the way of vertical interconnecting were simulated and optimized by the electromagnetic field analysis software. Good agreement was acquired between the simulated results and the experimental results. The testing of monolithic microwave integrated circuit (MMIC) chips and the bonding interconnecting technique for MMCM were described, and an application example of X-band MMCM was introduced.

**Key words:** LTCC; microwave MCM; vertical microwave interconnecting

### 1 引言

随着单片微波集成电路(MMIC)和收/发(T/R)组件在民用、军用雷达和通讯系统中的广泛应用, 迫切需要采用重量轻、体积小(尤其受到天线网格间距的限制)、成本低和可靠性高的微波多芯片组件(MMCM)技术. 低温共烧陶瓷(LTCC)是实现MMCM的一种理想的组装技术, 它提供了比传统的厚膜、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; 采用带状线和中间接地屏蔽层还可以改善收发通道间的隔离度. LTCC组件是由许多层0.1-0.15mm厚的、上面印刷有传输线的生胚陶瓷片组成, 这种材料的介电常数适中( $4 < \epsilon_r < 8$ ), 可设计出较宽的微波传输线, 因此其导体损耗比在硅(Si)、砷化镓(GaAs)和陶瓷上的微波传输线更低. 而且这种材料的损耗角在10GHz频率下约为0.002, 产生的介质损耗也较低.

LTCC技术应用在低频电路和数字电路中已有数十年的历史, 但在射频和微波领域的应用国外从九十年代初期才开

始研究并广泛应用在有源相控阵雷达和通讯领域<sup>[1-3]</sup>, 而国内在这方面的研究才刚起步, 尚未有相应的研究和应用文献发表.

本文研究采用了一种新型的LTCC三维微波传输结构, 并采用叠层通孔实现垂直微波互连. 由于LTCC结构具有三维特征, 通常很难用一个阻容特性的等效电路模型来表示, 因此LTCC电路模型多采用三维电磁场软件来进行精确的性能分析. 利用HP公司的电磁场分析软件高频结构模拟器HFSS对三维微波传输结构和垂直微波互连方式进行了模拟和优化, 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. 此外还介绍了MMIC芯片测试和MMCM键合互连方法, 以及一个X波段MMCM的应用实例.

### 2 LTCC微波电路设计及仿真

#### 2.1 三维微波传输结构设计

LTCC微波多芯片组件采用了图1所示的3D微波传输结构电路, 采用美国Ferro公司的Ferro-A6型LTCC生胚材料制成. Ferro-A6型LTCC生胚材料的相对介电常数为5.9, 损耗角正切值为0.002, 每层生胚材料的厚度为0.1mm. LTCC电路的

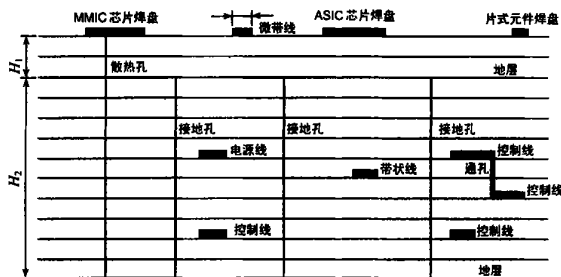


图 1 三维微波传输结构横截面示意图

微波传输线由微带线和带状线组成,微带线和带状线之间采用叠层通孔实现垂直微波互连.采用 HP-ADS 软件电路模拟器对微带线和带状线的结构进行了分析和优化,微带线导带的宽度为 0.31mm 以产生 50 特性阻抗,导带到接地层的高度  $H_1$  为 0.2mm(即两层生胚片的厚度);带状线导带的宽度也为 0.31mm 以产生 50 特性阻抗,其接地层之间的距离  $H_2$  为 1.0mm(即十层生胚片的厚度);微带线和带状线之间的垂直微波互连通孔为 0.3mm 直径的圆形通孔,使通孔直径与微带线和带状线线宽基本相等以减小传输线的不连续性. MMIC 芯片焊盘和 ASIC 芯片焊盘、低频控制信号线和电源线分别排布在上表面层和中间层上.在大功率 MMIC 芯片焊盘下设置了散热通孔,直接连到 LTCC 电路背面接地层以有利于大功率 MMIC 芯片. LTCC 电路背面接地层安装在一个金属壳体上以增强 MMCM 的机械强度和散热能力.

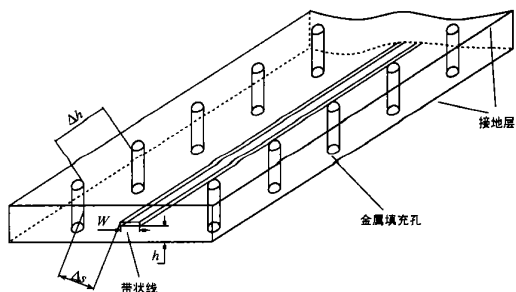


图 2 带状线接地层之间的连接

对 MMCM 来说,接地质量的好坏直接影响到其微波性能,尤其是中间接地层与地的连接方法和接地质量对微带线和带状线的插损和驻波影响很大.为此,对于微带线,采用直径为 0.381mm,间距为 1.27mm 的一排通孔,来实现中间接地层与地的可靠连接,以满足设计对微带线插损和驻波的要求.对于带状线,在三维结构中,为消除寄生平板波导效应,通常采用图 2 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地的可靠连接,以满足设计对带状线插损和驻波的要求.图中接地通孔直径为 0.381mm,通孔间距为通孔直径的 1.5 到 5 倍.接地通孔到带状线之间的距离  $S$  很关键.  $S$  太小,会影响带状线的特性阻抗,增大驻波、插损和辐射损耗;  $S$  太大,有可能激发介质填充矩形波导模式.通过实验发现,  $S$  应同时满足  $2 S + W < d/2$  ( $d$  为在 LTCC 介质中的波长)和  $S/h > 2$  这两个条件,才能得到较好的带状线微波性能<sup>[4]</sup>.上述这些几何参数均符合标准 LTCC 制造工艺,因此可

直接在 MMCM 设计中采用.

### 2.2 垂直微波互连技术

在 LTCC 三维微波传输结构中,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 HP 公司的高频结构模拟器 (HFSS) 对垂直微波互连结构进行了分析和优化.

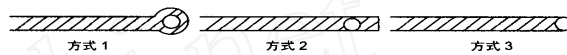


图 3 垂直通孔与微波传输线的三种连接方式

2.2.1 垂直通孔与微波传输线的互连 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 3 所示的三种连接方式进行了研究,采用三维电磁场仿真软件 HFSS 对这三种连接方式进行了电磁场仿真,其反射系数和传输系数的比较如图 4 (a) 和 (b) 所示.从图中曲线可见,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.从仿真结果可以看出,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.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,因此在工程中具有很高的应用价值.

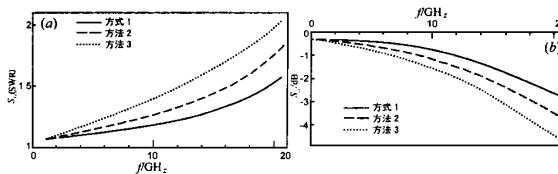


图 4 三种连接方式的驻波 ( $S_{11}$ ) (a) 和插损 ( $S_{21}$ ) (b)

2.2.2 微带线与带状线之间的互连 (MS-SL) 在三维微波传输结构电路中,为提高电路密度,微波传输线通常要在微带线与带状线之间进行转换<sup>[5]</sup>.

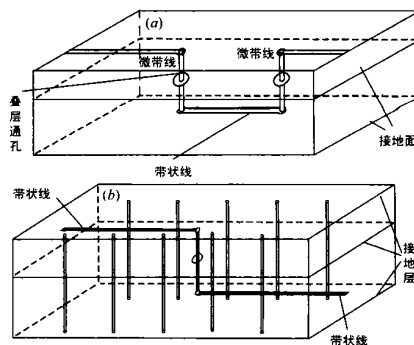


图 5 不同传输线之间的互连.(a)微带线和带状线之间互连示意图;(b)带状线到带状线转换的 HFSS 模型

微带线与带状线之间通过叠层通孔实现互连,如图 5 (a) 所示.图中微带线和带状线的线宽均为 0.31mm,叠层通孔的直径为 0.3mm,与微带线和带状线连接的叠层通孔盘直径为 0.5mm.在中间接地层上开一个 1.2mm 的孔以便让叠层通孔

穿过,使信号通过叠层通孔从微带线传输到带状线。采用 HFSS 软件对图 5(a) 所示结构进行了三维电磁场仿真,其插入损耗和反射系数的仿真结果如图 6 所示。从仿真结果可以看出该结构能够满足三维微波传输电路的微波性能要求。

### 2.2.3 带状线与带状线之间的互连(SL-SL)

图 5(b) 所示为从带状线到带状线转换的 HFSS 模型,从一根带状线到另一根带状线的连接采用直径为 0.3mm 的圆形通孔穿过中间接地层上的大开孔来实现。对中间接地层上开孔的尺寸、沿带状线两侧排列的接地通孔与带状线之间的距离等参数进行了优化,以获得最小的反射系数和插入损耗。优化的结果如图 6 所示。达到了三维微波传输电路工程应用要求。

## 3 MMIC 芯片测试及 MMCM 互连

### 3.1 MMIC 芯片测试

MMCM 中大量采用单片微波集成电路(MMIC)芯片。通常使用共晶焊接的工艺方法将大功率 MMIC 芯片焊接到 LTCC 多层互连基板上;用环氧导电胶粘接的方法将小信号 MMIC 芯片粘接到 LTCC 多层互连基板上。因此,为了保证 MMCM 的电性能和成品率,必须保证焊(粘)接到 LTCC 多层互连基板上的 MMIC 芯片是确好芯片(KGD)。采用 HP8510C 矢量网络分析仪、CASCADE 公司的微波探针测试台和共面波导微探针组成 MMIC 芯片测试系统对 MMIC 芯片进行无损伤芯片的电性能参数测试<sup>[6]</sup>。MMIC 芯片测试时先在一个阻抗标准基板(ISS)上进行传输-反射-匹配校准,然后用真空拾取器将被测 MMIC 芯片放置于测试平台上的真空吸口位置,打开测试平台侧面的真空开关使被测 MMIC 芯片吸附在测试平台上。分别调节定位器上的 X-Y-Z 三个方向的定位旋钮,将 RF 探针和直流探针的探头接触到被测 MMIC 芯片相应的焊盘上,并根据被测 MMIC 芯片的测试条件在直流探针端接入馈电电源。在 HP8510C 矢量网络分析仪上进行 MMIC 芯片性能参数的测量和数据读取。由此筛除不合格 MMIC 芯片,得到确好芯片。

### 3.2 MMCM 的互连

MMCM 中的 MMIC 芯片采用金丝或金带键合的方法实现互连。微波电路不同于数字电路,MMIC 芯片键合金丝(带)拱高与跨距对微波信号传输有较大影响,金丝(带)键合的一致性和重复性非常重要。通常对 MMIC 芯片而言,芯片焊区到 50 线的最佳距离是 20mils ~ 25mils 或 25mils ~ 30mils(即:0.508 ~ 0.635mm 或 0.635 ~ 0.762mm)。同时理论和试验表明,

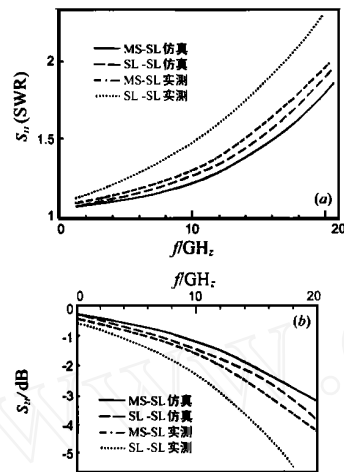


图 6 仿真结果

金丝(带)键合拱高与跨距应满足以下要求:在同跨距情况下,键合金丝(带)的拱高越低越好,以平直为最佳(对单根金丝);在同拱高情况下,键合金丝(带)的跨距越短越好(对单根金丝);若芯片焊区尺寸允许,尽量采用同时键合二根、三根金丝,特别是三根金丝,则无论拱高多少(<0.5mm),跨距多少(1mm),其效果类似平直简短的单根金丝,对传输特性影响较小。

## 4 试验验证及应用实例

### 4.1 试验验证

采用标准的 LTCC 制作工艺制作了微带线与带状线的转换(MS-SL)、带状线与带状线的转换(SL-SL)等三维微波传输结构,其中微带线和带状线的宽度均为 0.31mm,叠层通孔的直径为 0.3mm,微带线到接地面的厚度为 0.2mm(采用两层生胚片),带状线的两个接地面的距离 1.0mm(采用十层生胚片)。利用 HP8510C 矢量网络分析仪和平面传输线测试夹具(WILTRON 公司的 Universal Test Fixture 3680)对这些三维微波传输结构进行了电性能测试以验证利用 HFSS 模型进行分析的正确性。测试结果如图 6 所示。通过比较可以看出,测试结果和仿真结果吻合较好。带状线与带状线转换的测试结果比仿真结果差是由于为测试方便,将带状线的两输出端通过叠层通孔连接到表面进行测试的缘故。

### 4.2 应用实例

上述三维微波传输结构已应用在相控阵雷达 X 波段 LTCC 微波多芯片组件中。该 MMCM 采用了 12 层 LTCC 微波互连基板,其中微带线到接地面采用两层生胚片(厚度为 0.2mm),带状线的两个接地面采用十层生胚片(距离 1.0mm);控制逻辑线和电源线分布在两个接地面的十层生胚片中;最细线条达 0.1mm,线条精度达  $\pm 0.025$ mm,微波传输线插损为 0.22dB/mm。该 MMCM 集成了十余个 MMIC 芯片和 ASIC 芯片、数十个小型片式阻容器件,采用共晶焊接技术将 MMIC 芯片焊接到 LTCC 基板上,芯片焊透率超过 90%;采用金丝(带)键合技术实现 MMIC 芯片和 LTCC 基板的互连;采用大面积焊接技术将整个 LTCC 基板焊接到 AlSiC 外壳中。其体积和重量仅为常规微波电路组件的四分之一左右。

## 5 结论

采用 LTCC 三维微波传输结构设计的微波多芯片组件将微带线、带状线、低频控制线和电源线等混合信号线组合在同一个多层结构中,利用中间接地层可以实现不同信号线间的良好隔离。因此研制出的 LTCC 微波多芯片组件具有结构紧凑、体积小、重量轻、微波性能好和可靠性高等优点,在现代雷达和通讯领域具有广泛的应用前景。

### 参考文献:

- [1] D Richard Decker, Ramani Tatikola, Narayan Rangappa Mysoor. Multi-chip MMIC package for X and Ka bands [J]. IEEE Transactions on MTT, February 1997, 20(1): 27 - 32.
- [2] Mark S Hauhe, John J Wooldridge. High density packaging of X-band

array modules [J]. IEEE Transactions on CPMT, August 1997, 20(3) : 279 - 291.

- [ 3 ] D Sturzebecher, J Leen, R Cadotte, etc. 20GHz LTCC Phased Array Module [M]. IEEE MTT-S Digest, 1996:991 - 994.
- [ 4 ] George E Ponchak, Donghoon Chen, Jong-Gwan Yook, Linda P B Katerhi. Characterization of Plated Via Hole Fences for Isolation Between Stripline Circuits in LTCC Packages [M]. IEEE MTT-S Digest, 1998. 1831 - 1834.
- [ 5 ] A Pham, A Sutono, J Laskar, V Krishnamurthy, H S Cole, T Sitnik-Niteters. Development of Millimeter Wave Multi-layer Organic Based MCM Technology [M]. IEEE MTT-S Digest, 1998. 1103 - 1106.
- [ 6 ] Hiroshi Uchimura, Takeshi Takenoshita, Mikio Fujii. Development of a laminated waveguide [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1998, 46(12) :2438 - 2443.

#### 作者简介:



严伟男, 1965年生于安徽蚌埠, 研究员级高级工程师, 南京电子技术研究所微电路研究部主任, 东南大学无线电工程系在职博士生, 主要从事收/发组件、微波封装和互连技术研究。



洪伟男, 1962年生于河北张北, 教授, 博士生导师, 东南大学无线电工程系副主任, “长江学者奖励计划”特聘教授, 主要从事微波通信和计算电磁学等方面的科研和教学工作。