

一种 BGA 封装的低损耗毫米波前端模组设计

蒲星明¹, 赵怡², 董刚¹, 韩世宏², 范齐升², 余怀强²

(1. 西安电子科技大学 集成电路学部, 陕西 西安 710071; 2. 中国电子科技集团公司第二十六研究所, 重庆 400060)

摘要:针对小型化、低成本化、集成化 T/R 组件的需求, 提出了一种工作在 30~40 GHz 的毫米波前端模组。该模组采用高温共烧陶瓷 (HTCC) 基板和球栅阵列 (BGA) 封装, 实现了 4 个收发通道的高密度集成, 具备信号放大、功率分配和幅相控制等功能。通过对该模组毫米波信号垂直互连结构的仿真优化, 实现了该结构在毫米波频段的低损耗信号传输。设计制作 PCB 测试板对该垂直互连结构进行测试验证, 经计算得到该垂直互连结构最高插入损耗为 0.78 dB。采用该毫米波信号垂直互连结构制作了一款 Ka 波段四通道毫米波前端模组。测试结果表明, 该模组在 30~40 GHz 时单通道发射功率大于 20 dBm, 接收增益大于 21.33 dB, 驻波比优于 1.51, 满足射频系统的应用需求。

关键词:球栅阵列 (BGA) 封装; 毫米波; 前端模组; 垂直互连结构; 高温共烧陶瓷 (HTCC)

中图分类号: TN61 **文献标识码:** A

Design of a Low-Loss Millimeter-Wave Front-End Module with Ball Grid Array Packaging

PU Xingming¹, ZHAO Yi², DONG Gang¹, HAN Shihong², FAN Qisheng², YU Huaiqiang²

(1. Faculty of Integrated Circuit, Xidian University, Xi'an 710071, China;

2. The 26th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chongqing 400060, China)

Abstract: In response to miniaturization, low-cost, and integrated transmit/receive (T/R) module demands, a millimeter-wave frontend module operating in the frequency range of 30-40 GHz was studied. A high-temperature co-fired ceramic (HTCC) substrate and ball grid array (BGA) packaging were adopted to achieve high-density integration of four transceiver channels for functions such as signal amplification, power distribution, and amplitude-phase control. Through the simulation and optimization of the vertical interconnection structure of the millimeter-wave signal in this module, low-loss signal transmission of this structure in the millimeter-wave frequency band was realized. Moreover, a printed circuit board (PCB) was designed and fabricated to test and verify this vertical interconnection structure. After calculations, the maximum insertion loss of the vertical interconnection structure was 0.78 dB. Using this vertical interconnection structure for millimeter-wave signals, a Ka-band four-channel millimeter-wave frontend module was fabricated. The test results show that in the frequency range of 30-40 GHz, the single-channel transmission power of this module was greater than 20 dBm; the receiving gain was greater than 21.33 dB; and the voltage standing wave ratio was better than 1.51, fulfilling the application requirements of the radio-frequency system.

Key words: ball grid array (BGA) packaging; millimeter-wave; front-end module; vertical interconnection structure; high-temperature co-fired ceramic (HTCC)

0 引言

近年来, 新一代电子通信系统对小型化、集成化、多功能化有着迫切需求。毫米波前端模组是电子通信系统的关键部件之一, 其性能指标、尺寸参

数将直接影响通信系统的效率和稳定性。传统的封装形式如金属封装, 其尺寸较大且集成度低, 已不能满足毫米波前端模组对体积、质量和高密度集成的要求^[1]。因此, 国内外学者正在探索 SiP(系统

收稿日期: 2025-01-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (U23A20291)

作者简介: 蒲星明 (1997-), 男, 四川省通江县人, 硕士生。通信作者: 余怀强 (1987-), 男, 重庆市垫江县人, 博士, 正高级工程师。

级封装)解决方案,以实现更高的集成度和更小的尺寸。SiP 是一种将多个芯片、器件、模块和其他组件在三维空间进行集成,并通过特定的封装工艺将其封装成单个功能系统或子系统的技术^[2]。

低温共烧陶瓷(LTCC)和高温共烧陶瓷(HTCC)是 SiP 常用的基板。LTCC 中通常使用贵金属作为导体,具有成本高且基板机械性能不佳的缺点。大尺寸 LTCC 基板需要额外金属外壳封装,难以实现小型化高密度集成,不适用于封装管壳电路基板。HTCC 使用 Al_2O_3 或 AlN 作为介质材料,钨金属作为导电材料,在约 $1\ 600\ ^\circ\text{C}$ 下烧成多层陶瓷电路基板。HTCC 结构强度高,可直接作为封装外壳基板,成本低,适合大批量生产^[3]。此外,在毫米波模组中采用 BGA(球栅阵列)封装技术,不仅能有效减小封装尺寸,同时可提高其高频性能。BGA 技术以焊料球替代传统的金属互连线,在缩短互连长度的同时,提升了毫米波信号传输的速度^[4-6]。这些技术的结合为模组的集成化和小型化提供了有力支撑。

在毫米波模组中,BGA 垂直互连是实现毫米波信号输入和输出的关键。损耗越小,传输性能越好。针对 BGA 封装的毫米波前端模组,本文对毫米波信号输入、输出的垂直互连结构进行了仿真优化,在该垂直互连结构的微带线传输结构中设计了一种匹配电路结构,实现了毫米波信号的低损耗传输。基于该垂直互连结构设计研制了 Ka 波段四通道毫米波前端模组,并对其进行测试与分析。该模组不仅体积小、集成度高,还展现出较好的电学性能,满足毫米波前端模组对集成化和小型化的需求。

1 毫米波前端模组总体设计

1.1 模组原理图设计

图 1 为所设计的一种毫米波前端模组电路原理图。该模组电路由功分器、开关、幅相多功能芯片、收发芯片组成。在接收链路中实现了低噪声放大、幅相控制和功率合成等功能。在发射链路中实现了功率分配、相位控制和功率放大等功能。为了实现模组的小型化,该模组内部采用了两类多功能集成芯片。其中,幅相多功能芯片由衰减器、移相器、

低噪声放大器和功率放大器构成,收发芯片由放大器和开关构成。

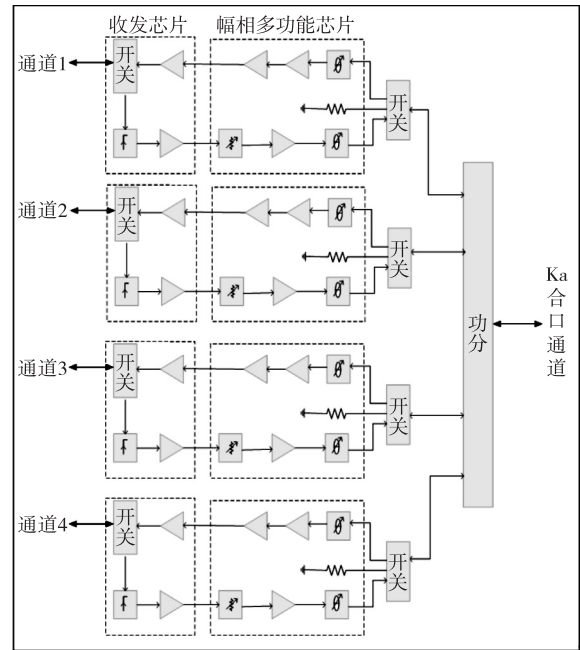


图 1 毫米波前端模组电路原理图

1.2 模组结构设计

图 2 为毫米波前端模组结构示意图,该结构由芯片、HTCC 基板、BGA 球组成。HTCC 基板顶层放置 Ka 幅相多功能芯片和收发芯片,基板中放置有带状线和各种无源器件。在 HTCC 基板底部利用 BGA 工艺可实现射频信号的互连以及 PCB 之间的连接支撑。HTCC 基板采用 Al_2O_3 作为介质材料,其介电常数为 9.8,介质损耗角正切为 $0.001\ 1$ ($@35\ \text{GHz}$),整体厚度为 $0.9\ \text{mm}$ 。

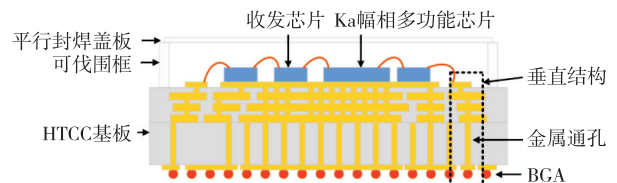


图 2 毫米波前端模组结构示意图

图 2 中虚线框代表该模组的垂直互连结构,由基板顶层的微带线传输到金属通孔再到基板底层的 BGA。通过垂直互连结构可实现毫米波信号的输入、输出,但可伐围框和盖板共同为模组内裸芯片提供了气密封环境,且当该模组与其他模组或电路串联使用时不易发生信号自激现象。

2 模组接口优化设计

空间电磁场在毫米波频段分布较复杂,毫米波传输线互连信号的不连续会降低电路的传输性能,对毫米波前端模组的性能产生不利影响。因此,本文使用高频系统仿真软件对模组垂直互连结构进行仿真优化。

2.1 输入、输出信号仿真

图3为模组垂直互连结构仿真模型图。图中微带线和台阶式介质基板用于模拟芯片键合。毫米波信号传输过程如下:毫米波信号先从HTCC基板表面的微带线通过两根金丝传输到匹配电路,再经类同轴结构的金属通孔传输到基板底部的BGA。在信号通孔周围和信号传输线两边放置接地孔作为屏蔽孔,既能束缚和屏蔽电磁场,又能抑制电磁场不连续激发的寄生高阶模式产生^[7],同时在信号通孔上设计孔盘以改善传输结构的不连续性。

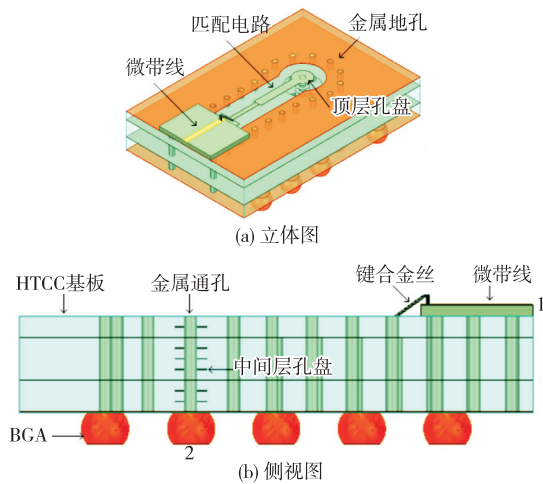


图3 模组垂直互连结构仿真模型

由加工工艺确定了模块内毫米波信号通孔半径为0.065 mm, BGA球直径为 $\varnothing 0.45$ mm,金属厚度为0.018 mm。图4为匹配电路结构模型。经高频系统仿真软件优化后,具体尺寸为: $x_1 = 0.48$ mm, $y_1 = 0.1$ mm, $x_2 = 0.1$ mm, $y_2 = 0.72$ mm, $x_{ms} = 0.19$ mm, $R_a = 0.22$ mm。中间层孔盘半径为0.15 mm,模块顶层微带线线宽0.11 mm。

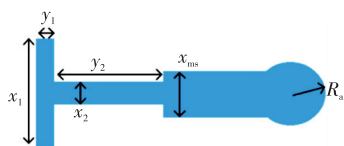


图4 匹配电路结构的物理模型

对模组垂直互连结构的传输特性进行优化仿真后,该结构的阻抗匹配良好,在30~40 GHz时插入损耗小于0.22 dB,回波损耗小于-20.38 dB,仿真结果如图5所示。由图可知,毫米波信号在模组垂直互连结构中能量损耗较少,传输性能良好。

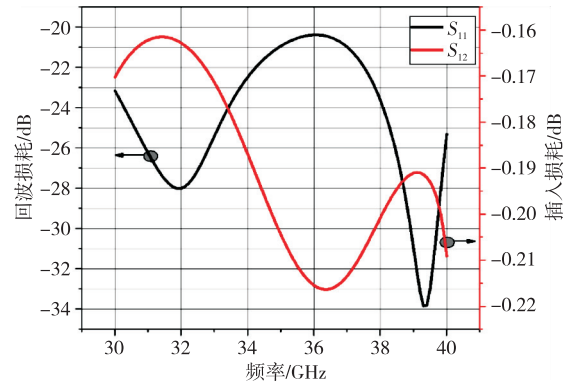
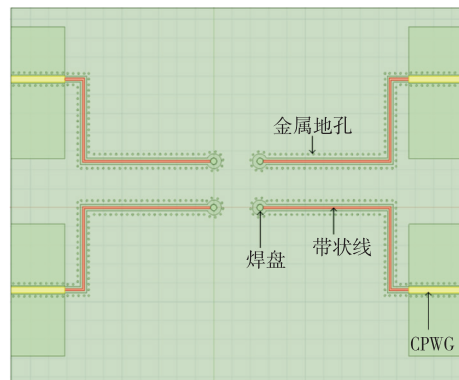


图5 模组垂直互连结构S参数仿真结果

2.2 PCB测试板仿真

由于不便直接测试模组垂直互连结构,所以针对该模组结构设计了相应的PCB测试板。考虑到PCB带状线的特性不便直接测试,故在仿真设计时外加一段共面波导(CPWG)过渡结构。PCB测试板结构从端口1传输到端口2,分别经过CPWG、带状线与垂直通孔等结构,如图6所示。PCB基板材料采用TSM-DS3,介电常数为3,金属厚度为0.018 mm,射频信号通孔和接地孔半径都为0.1 mm。经仿真优化后可知,PCB测试板的CPWG线宽为0.6 mm,带状线线宽为0.2 mm,焊盘半径为0.4 mm。PCB测试板结构中端口1到端口2的仿真结果如图7所示。由图7可知,PCB测试板的插入损耗小于0.5 dB,回波损耗小于-20 dB。



(a) 俯视图

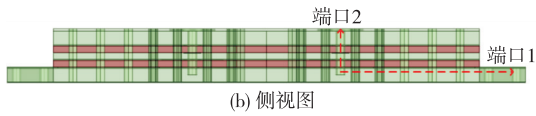


图 6 PCB 测试板结构示意图

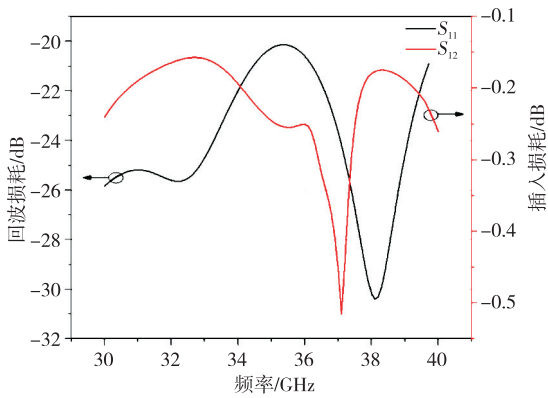


图 7 PCB 板测试结构 S 参数仿真结果

2.3 实物测试

2.3.1 模组垂直互连结构实物测试

测试时,CPWG 与 SMA 射频接头相连。带有 4 个相同的垂直互连结构的测试模组样品与 PCB 测试板组装后的实物如图 8 所示。整个射频信号传输走线如图中虚线所示,一组信号从端口 1 输入,经两个垂直互连结构后,从端口 2 输出。另一组信号从端口 3 输入,经另两个垂直互连结构后,从端口 4 输出。测试模组样品内部基板顶层中两段对称的微带线通过 0 dB 衰减器连接,如图 9 所示。因此,从端口 1 到端口 2、端口 3 到端口 4 测出的一组数据为两个对称的垂直互连结构的实测数据,测试数据如图 10 所示。由图 10 可知,两个对称的垂直互连结构插入损耗最大值约为 5.15 dB,回波损耗小于 -15 dB。

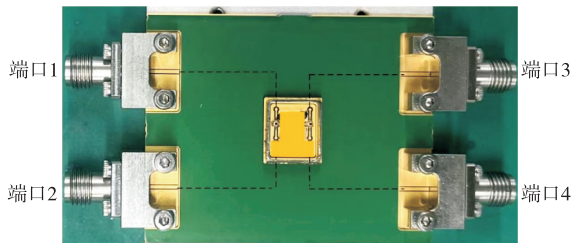


图 8 模组垂直互连结构与 PCB 测试板组装后的实物图

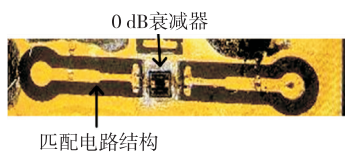


图 9 测试模组内部两个垂直互连结构互连细节

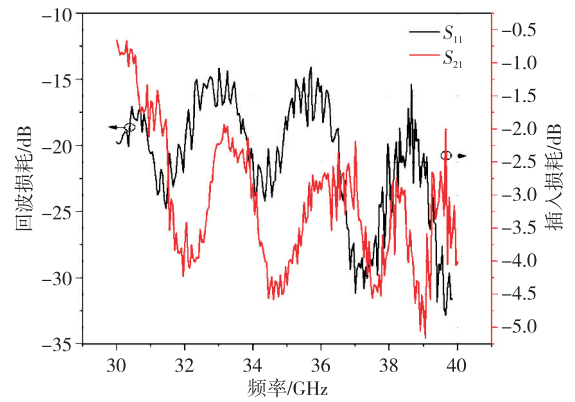


图 10 模组垂直互连结构 S 参数实测结果

2.3.2 PCB 测试板实物测试

为了得到模组毫米波信号输入、输出垂直互连结构的插入损耗,采用 3672C 型矢量网络分析仪与 GSG 探针对 PCB 测试板内所述测试结构进行 S 参数测试,测试现场如图 11 所示。图 12 为测试结果图。由图 12 可知,PCB 测试板结构的插入损耗小于 1.8 dB,这与图 7 仿真结果(小于 0.5 dB)存在些许差异,其主要归因于加工引入的误差和探针测试引入的误差。

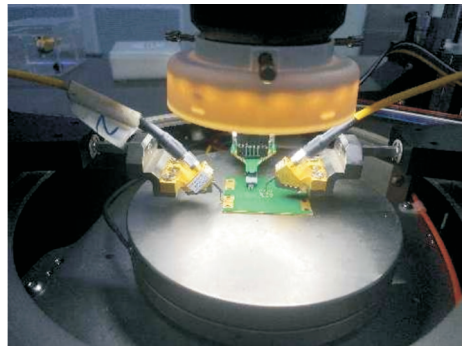


图 11 PCB 测试板探针测试现场照片

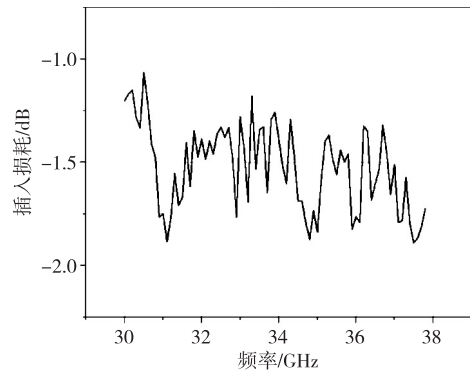


图 12 PCB 板测试结构 S₂₁ 测试结果

2.3.3 模组垂直互连结构损耗计算

图 8 中端口 1 到端口 2 实际经过了两个相同的模组垂直互连结构和两个相同的 PCB 板测试结构,

因此,对 2.3.1 节中测试数据进行计算,单个模组垂直互连结构和单个 PCB 板测试结构的插入损耗为 2.58 dB,再减去 PCB 板测试结构的插入损耗,最终得到模组垂直互连结构的插入损耗为 0.78 dB (@30~40 GHz)。该测试结果表明,所设计的垂直互连结构具有低损耗传输特性。

3 毫米波前端模组实物测试

图 13 为基于该垂直互连结构的毫米波前端模组实物图,模组尺寸为 12 mm×13 mm×2.7 mm。表 1 为测试结果。由表可见,模组的发射功率大于 20 dBm,接收增益大于 21 dB。

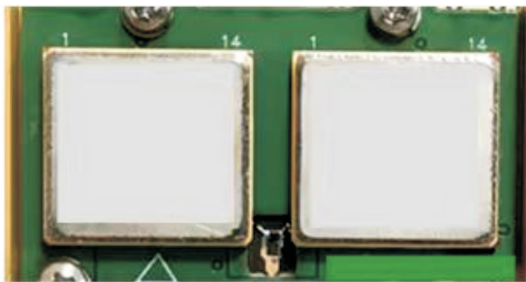


图 13 毫米波前端模组封装实物图
表 1 模组主要性能参数测试结果

频率/GHz	通道	接收增益/dB	发射功率/dBm	驻波比
32	CH1(SiP1)	21.91	20.51	1.26
33	CH2(SiP1)	21.80	20.13	1.26
34	CH3(SiP2)	21.33	20.91	1.51

4 结束语

本文设计了一种 BGA 封装的毫米波前端模组,完成了毫米波模块的三维异构集成,并通过模组垂直互连结构实现了毫米波信号的低损耗互连传输。对模组垂直互连结构进行测试,经计算得到其最高插入损耗为 0.78 dB。采用该垂直互连结构的毫米波模组在工作频带内的接收增益 ≥ 21.33 dB,驻波比 ≤ 1.51 ,单通道发射功率 ≥ 20 dBm。毫米波前端模组实现了小型化和轻量化要求,其中垂直互连结构紧凑、传输特性良好,适用于毫米波前端模组 SiP 应用,具有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 李翀,舒安刚,胡俊丰,等.超宽带多通道接收前端设计与研制[J].压电与声光,2024,46(4):458-462.
LI Chong, SHU An'gang, HU Junfeng, et al. Design of an ultra-wideband and multi-channel receiving front-end[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2024, 46(4): 458-462.
- [2] 赵家胜.基于 SiP 技术的多通道 TR 组件小型化关键技术研究[D].成都:电子科技大学,2023.
ZHAO Jiasheng. Research on key technologies for miniaturization of multi-channel TR modules based on SiP technology[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2023.
- [3] 赵怡,田野,毛繁,等.基于 HTCC 工艺的短砖式毫米波收发模组技术研究[J].压电与声光,2022,44(4):647-650.
ZHAO Yi, TIAN Ye, MAO Fan, et al. Research on millimeter wave transceiver module technology of short brick type based on HTCC process[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2022, 44(4): 647-650.
- [4] 王亦何,汪黎星,钱嵩松.应用于毫米波段的垂直互联结构设计[J].微波学报,2019,35(S1):186-188.
WANG Yihe, WANG Canxing, QIAN Songsong. Design of vertical interconnection structure applied in millimeter wave band [J]. Journal of Microwaves, 2019, 35(S1): 186-188.
- [5] ZHONG Y, XU L, YANG J. Co-simulation design of RF front-end based on three-dimensional vertical interconnection of BGA[C]//Dalian, China: 2023 International Conference on Advances in Electrical Engineering and Computer Applications, 2023: 547-552.
- [6] ZHU W T, ZHANG H B, KUANG X L. Study on rework process of BGA components[C]//Changsha, China: Proceedings of 2015 International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT), 2015: 682-68.
- [7] LIU H, LI C, HAO J, et al. An ultra-wideband vertical interconnection structure[C]//Harbin, China: 2022 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT), 2022: 1-3.