

文章编号: 2095-4980(2024)05-0575-05

基于三维异构集成技术的 X 波段 4 通道收发模组

李晓林, 高艳红, 赵宇, 许春良

(中国电子科技集团公司 第十三研究所, 河北 石家庄市 050051)

摘要: 基于硅基微电子机械系统(MEMS)三维异构集成工艺, 设计了一款适用于相控阵天线系统的三维堆叠 4 通道 T/R 模组。模组由 3 层功能芯片堆叠而成, 3 层功能芯片之间采用贯穿硅通孔(TSV)和球栅阵列实现电气互连; 模组集成了 6 位数控移相、6 位数控衰减、串转并、负压偏置和电源调制等功能, 最终尺寸为 12 mm × 12 mm × 3.8 mm。测试结果表明, 在 X 波段内, 模组的饱和发射输出功率为 30 dBm, 单通道发射增益可达 27 dB, 接收通道增益为 23 dB, 噪声系数小于 1.65 dB。该模组性能优异, 集成度高, 适合批量生产。

关键词: 微系统; T/R 模组; 三维异构集成; 微电子机械系统; 硅通孔

中图分类号: TN838; TN851

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2022228

X-band four-channel T/R module based on 3D integrated technology

LI Xiaolin, GAO Yanhong, ZHAO Yu, XU Chunliang

(The 13th Research Institute, CETC, Shijiazhuang Hebei 050051, China)

Abstract: Based on silicon Micro-Electro Mechanical System(MEMS) technology, an X-band four-channel 3D integrated T/R module suitable for array antenna system is designed. The module is stacked by three layers of chips connected to each other by Through Silicon Via(TSV) and Ball Grid Array(BGA). The module integrates functions such as 6-bit digital control phase shifting, 6-bit digital control attenuation and serial-to-parallel conversion, negative voltage bias, power modulation. The dimension of the module is 12 mm × 12 mm × 3.8 mm. The test results show that in the X-band, the saturated transmitting power of the single channel reaches 30 dBm, the gain of transmitting channel reaches 27 dB, the gain of receiving channel reaches 23 dB, the noise figure is less than 1.65 dB. The module bears excellent performance and high integration, which is suitable for mass production.

Keywords: microsystem; T/R module; 3D heterogeneous integration; Micro-Electro Mechanical System; Through Silicon Via

有源相控阵系统一直在向轻量化、小型化与低成本化的方向发展。T/R 模组作为有源相控阵的重要组成部分, 决定了整个系统的性能、质量、体积以及成本^[1]。为克服传统 T/R 模组体积和质量方面的缺点, 研发人员经过大量实验, 开发了多种新型集成技术。在众多集成技术中^[2], 以硅基 MEMS 三维异构集成技术最引人关注, 该项技术不仅克服了传统金属封装 T/R 模组体积和质量大的缺点, 还兼具极高的芯片间电磁屏蔽特性。相较于高温共烧陶瓷集成技术, 硅基 MEMS 三维异构集成技术具有更优异的微米量级加工精确度, 可实现软件仿真结果与加工实测结果高度吻合^[3], 真正实现免调试。

2018 年南京电子器件研究所基于硅基三维异构集成技术实现了 X 波段 8 通道接收变频模组^[4], 包含了接收多功能、8 通道滤波、镜像抑制混频多功能、中频多功能以及 3 种中频带宽可切换功能, 尺寸为 20 mm × 16 mm × 3 mm。2022 年中电科第三十八研究所基于硅基异构集成工艺, 设计出一款 X 波段单通道 T/R 组件^[5], 其发射功率大于 10 W, 噪声系数低于 3.5 dB, 尺寸为 16 mm × 16 mm × 1.4 mm。

为进一步提高器件的集成度, 本文基于硅基 MEMS 三维异构集成工艺设计了一款 X 波段 4 通道三维集成 T/R 模组。利用硅通孔(TSV)和球栅阵列(BGA)工艺实现了不同层芯片间的垂直互连; 模组内部各芯片腔之间采用高密度金属化 TSV 做电磁隔离屏蔽; 模组集成了射频收发功能、6 位数控移相功能、6 位数控衰减功能、串转并功

能、负压偏置和电源调制等功能，最终尺寸为 12 mm×12 mm×3.8 mm。

1 电路与结构

1.1 方案介绍

采用的电路原理框图如图 1 所示，其中 PM 为电源调制功能。发射链路：射频信号由 COM 端口进入 4 通道幅相控制多功能芯片，经过芯片内部的一分四功分结构后变为 4 路射频信号，功分后的射频信号依次经过幅相控制多功能芯片内部的 6 位数控衰减单元、6 位数控移相单元和单刀双掷开关单元后，向下一级功率放大器芯片输出，经过放大处理后的射频信号采用地面共面波导(Grounded Coplanar Waveguide, GCPW)端口对外输出。此时的射频信号既可以直连天线辐射单元，也可以再次经过外置高功率功放芯片后连接到天线辐射单元，实际应用中具有非常高的灵活性。接收链路：射频信号通过 GCPW 端口先进入限幅器芯片，再进入低噪声放大器芯片，防止射频信号过大，烧毁接收低噪放芯片。放大处理后的信号进入 4 通道幅相控制多功能芯片，经过芯片内部的单刀双掷开关单元、6 位数控移相单元和 6 位数控衰减单元后合成一路射频信号，经 COM 端口对外输出^[6]。

T/R 模组共集成了 4 种不同材质的芯片：幅相控制多功能芯片、低噪声放大器芯片和限幅器芯片采用 GaAs 工艺制备；功率放大器芯片采用 GaN 工艺制备；电源调制芯片采用 Si 基 CMOS 工艺制备；内部集成的 0.1 μF 芯片电容采用陶瓷工艺制备。所需的 10 μF 电容元件采用陶瓷封装形式焊接在 T/R 模组上表面，实现了三维异构高集成目的，极大减小了产品尺寸^[7]。

1.2 三维结构

4 通道 T/R 模组共集成了 3 层芯片。第 1 层集成了限幅器芯片、低噪声放大器芯片、功率放大器芯片以及电容芯片；第 2 层集成了幅相控制多功能芯片和电容芯片；第三层集成了负压偏置芯片、电容芯片、电源调制芯片以及陶瓷封装电容。T/R 模组的结构示意图如图 2 所示。

第 1 层和第 2 层均由 5 层 250 μm 厚的硅片构成，每层硅片上下表面均有 5 μm 厚的镀金层，硅片间采用晶圆级金金热压键合工艺结合。底部 2 层硅片作为二次布线层以及芯片载托层，中间 2 层硅片作为二次布线层和芯片腔体支撑层，顶层硅片作为盖板层。第 1 层和第 2 层硅基封装结构之间采用直径 250 μm 的铅锡焊球连接。芯片腔体采用金属化 TSV 做屏蔽处理，可防止相邻芯片腔体间电磁干扰，该项措施可使整个 T/R 模组具有非常高的电磁兼容特性。芯片通过键合线、低损耗平面传输线、垂直互连 TSV 和焊球类同轴结构实现上下层间的信号互连。模组采用三维异构集成设计，内埋了 4 种材质芯片，共堆叠了 3 层，在提高收发系统性能的同时，极大提高了 T/R 模组的集成度。

1.3 电磁仿真

T/R 模组由 3 层芯片堆叠构成，不同层芯片间均需通过垂直互连结构实现信号传递。实际应用的垂直互连方式有多种^[8-10]，本文采用与硅基 MEMS 工艺最兼容的 TSV 和焊球类同轴结构作为主要的垂直互连方式。考虑到 T/R 模组的可扩展性应用，方便与外置高功率芯片互连，射频对外接口采用 GCPW 形式。

为快速得出最优的类同轴结构参数，采用同轴结构的特性阻抗(Z_0)^[11]来确定仿真初始参数：

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \frac{D_o}{D_i} \quad (1)$$

式中： ϵ_r 为介质相对介电常数； D_o 为同轴结构外导体直径； D_i 为同轴结构内导体直径。由于硅基 MEMS 工艺的硅通孔直径已被固化为 100 μm，因此硅基内部的同轴结构内导体直径已经确定。硅基封装之间采用直径 250 μm 焊球互连，因此硅基封装之间的同轴结构内导体直径也已经确定。将已经确定的工艺参数代入式(1)，得到硅基内部同轴外导体直径为 1 770 μm，硅基封装之间的同轴外导体直径为 575 μm。

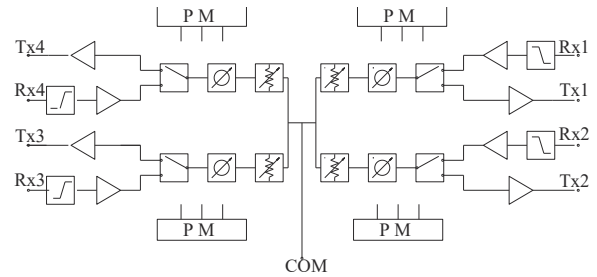


Fig.1 Circuit schematic diagram of the T/R module

图 1 T/R 模组电路原理框图

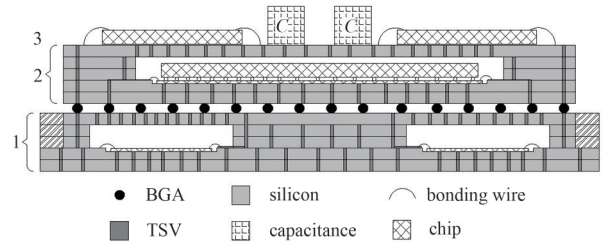


Fig.2 Structure diagram of the T/R module

图 2 T/R 模组结构示意图

根据硅基 MEMS 三维集成结构建立了 2 种类同轴垂直互连仿真模型，第 1 种模型为模组第 1 层外部 GCPW 结构至第 2 层芯片的类同轴垂直传输结构；第 2 种模型为上下 2 层芯片之间的类同轴垂直传输结构。将得到的初始参数代入模型进行仿真优化，仿真过程中主要对匹配传输线的宽度和硅通孔焊盘大小进行优化。

第 1 种模型如图 3 所示，该结构实现了外部馈入信号至射频芯片的传输功能。仿真和测试结果如图 4 所示，在 X 波段内回波损耗优于 -15 dB，带内插入损耗最大约为 0.45 dB，整体性能优异。

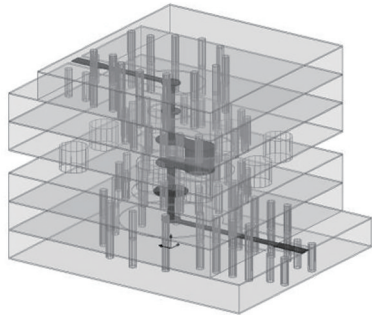


Fig.3 Simulation model of the interconnection transmission structure with the GCPW port
图3 带 GCPW 端口的互连传输结构仿真模型

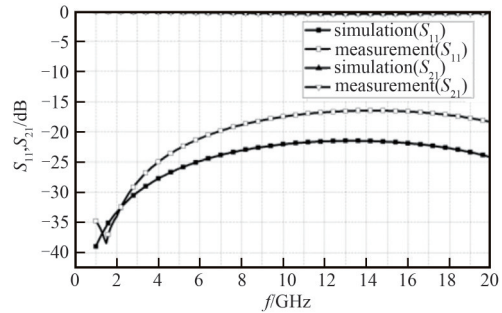


Fig.4 Simulation results and measurement results of the interconnection transmission structure with the GCPW port
图4 带 GCPW 端口的互连传输结构仿真和测试结果

第 2 种模型如图 5 所示，该结构实现了上下 2 层芯片之间的垂直互连传输功能。仿真和测试结果如图 6 所示，在 X 波段内回波损耗优于 -14dB，带内插入损耗最大约为 0.4 dB，整体性能优异。

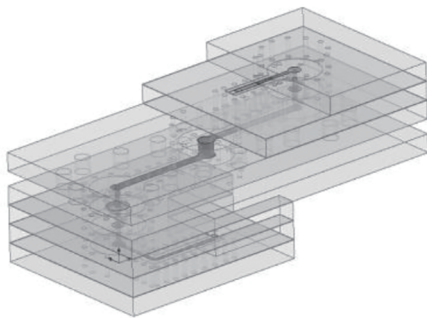


Fig.5 Simulation model of the internal interconnection transmission structure
图5 内部互连传输结构仿真模型

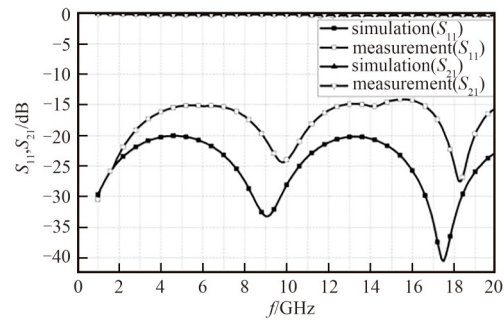


Fig.6 Simulation results and measurement results of the internal interconnection transmission structure
图6 内部互连传输结构仿真结果和测试结果

除了垂直互连传输结构，T/R 模组中还应用了 GCPW 形式的平面传输结构，用来解决模组对外互连问题。同样在软件中建立了 GCPW 的模型，并进行了优化仿真，模型如图 7 所示，仿真和测试结果如图 8 所示。

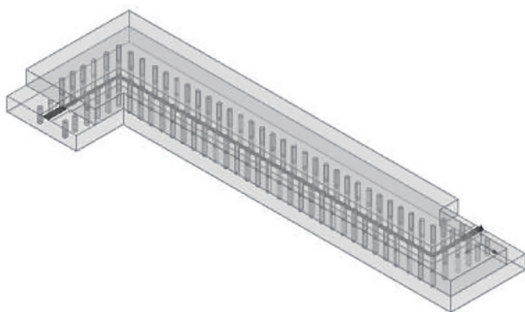


Fig.7 Simulation model of the GCPW
图7 GCPW 仿真模型

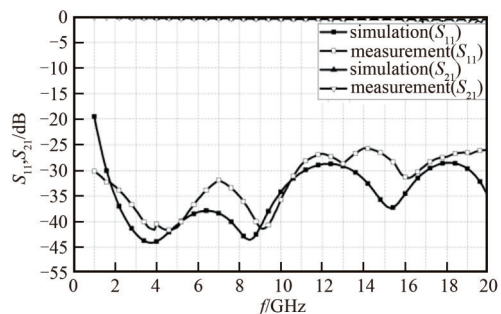


Fig.8 Simulation results and measurement results of the GCPW
图8 GCPW 仿真结果和测试结果

综合分析上述 3 种仿真模型的仿真和测试结果，可以得出 T/R 模组所使用的互连传输结构均具有较高的性能，可以满足应用需求。

2 测试结果与分析

装配完成后的 T/R 模组如图 9 所示, 尺寸仅为 12mm×12mm×3.8mm。搭建了 X 波段的探针台测试系统对 T/R 模组进行了全面的性能测试, 指标测试结果如表 1 所示。发射通道饱和输出功率仿真和测试结果如图 10 所示, 接收增益仿真和测试结果如图 11 所示, 噪声系数仿真和测试结果如图 12 所示。

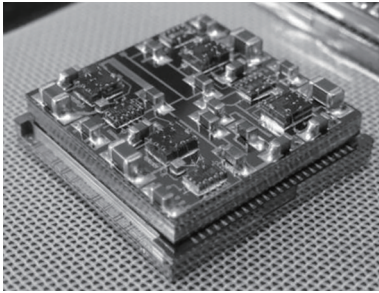


Fig.9 Photograph of the T/R module
图 9 T/R 模组实物图

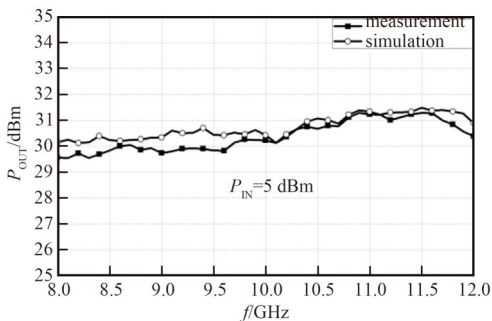


Fig.10 Simulation results and measurement results of the saturated transmitting power
图 10 发射通道饱和输出功率仿真结果和测试结果

从上述测试结果可以得出, 硅基 MEMS 三维异构集成 T/R 模组在 X 波段发射通道饱和输出功率大于 30 dBm, 接收通道增益大于 23 dB, 噪声系数小于 1.65 dB, 同时具有 6 位移相和 6 位衰减功能, 移相和衰减精确度均比较理想。得益于设计初期全面的仿真, 设计结果与预期结果完全吻合。

3 结论

基于硅基 MEMS 工艺, 将多种材质、多种功能的芯片集成在 12 mm×12 mm×3.8 mm 的模组内部, 通过高密度金属化 TSV 实现了相同层不同芯片腔体间的电磁屏蔽, 通过垂直互连结构实现了不同层芯片间的低损耗、高性能互连, 最终测试结果良好, 符合设计预期。T/R 模组可以晶圆级自动化装配和测试, 适合批量生产, 同时免调试, 极大提高了生产效率, 降低了生产成本。本设计思路新颖, 具有高性能、低成本、轻量化、小型化和易生产的优点, 具有非常高的推广价值。

参考文献:

- [1] 吴洪江, 高学邦. 雷达收发组件芯片技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2017. (WU Hongjiang, GAO Xuebang. Chip technology for T/R module[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2017.)
- [2] 夏静, 陈云飞. 半导体封装技术研究[J]. 电子技术与软件工程, 2021(13): 76-77. (XIA Jing, CHEN Yunfei. Research on semiconductor packaging technology[J]. Electronic Technology & Software Engineering, 2021(13): 76-77.)

表 1 T/R 模组测试结果

parameter	typical value
frequency/GHz	8~12
P_{sat} /dBm	>30
receive gain/dB	>23
noise figure/dB	<1.65
RMS of phase shift/(°)	3
phase shift amplitude fluctuation/dB	±0.6
RMS of attenuation/dB	0.9
attenuation additional phase shift/(°)	±5
VSWR	<2

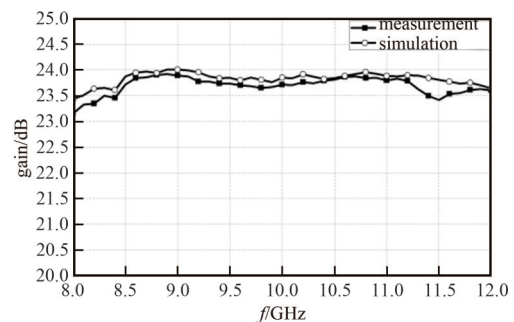


Fig.11 Simulation results and measurement results of the receiving gain
图 11 接收通道增益仿真结果和测试结果

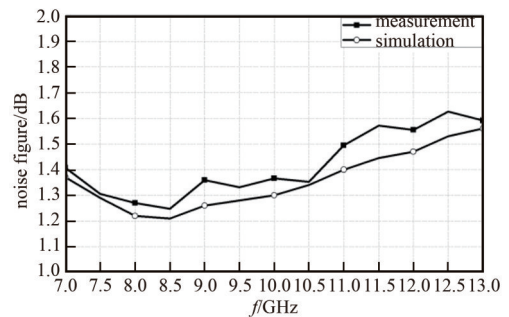


Fig.12 Simulation results and measurement results of the noise figure
图 12 噪声系数仿真结果和测试结果

- [3] 杨志,董春晖,柏航,等. 多层圆片级堆叠THz硅微波导结构的制作[J]. 微纳电子技术, 2020,57(4):328-332. (YANG Zhi, DONG Chunhui, BAI Hang, et al. Fabrication of a THz silicon micro-waveguide structure with multilayer wafer-level stack[J]. Micronanoelectronic Technology, 2020,57(4):328-332.) doi:10.13250/j.cnki.wndz.2020.04.012.
- [4] 周明,张君直,王继财,等. 硅基晶圆级封装的三维集成X波段8通道变频模块[J]. 固体电子学研究进展, 2018,38(2):157. (ZHOU Ming, ZHANG Junzhi, WANG Jicai, et al. 3D integration of X band 8 channel down conversion module with silicon wafer level package[J]. Research & Progress of Solid State Electronics, 2018,38(2):157.) doi:10.19623/j.cnki.rpsse.2018.02.009.
- [5] 王蕴玉,刘勇,赵丁雷,等. 基于硅基异构集成的T/R组件设计[J]. 科学技术创新, 2022(20):165-168. (WANG Yunyu, LIU Yong, ZHAO Dinglei, et al. Design of T/R module based on silicon heterogeneous integration[J]. Scientific and Technological Innovation, 2022(20):165-168.) doi:10.3969/j.issn.1673-1328.2022.20.042.
- [6] LIU Enda, WU Hongjiang, ZHAO Yongzhi. Design of phased array T/R component microsystem based on heterogeneous integration technology[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2019(1325):012010. doi:10.1088/1742-6596/1325/1/012010.
- [7] 王清源,吴洪江,赵宇,等. 一种基于MEMS体硅工艺的三维集成T/R模块[J]. 半导体技术, 2021,46(4):300-304,336. (WANG Qingyuan, WU Hongjiang, ZHAO Yu, et al. A 3D integrated T/R module with bulk silicon MEMS technology[J]. Semiconductor Technology, 2021,46(4):300-304,336.) doi:10.13290/j.cnki.bdtjs.2021.04.008.
- [8] 石海然,张涛,薛欣,等. Ka频段八波束接收组件的设计与实现[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2019,17(2):252-257. (SHI Hairan, ZHANG Tao, XUE Xin, et al. Design of a Ka band 8 beams receiver module[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2019,17(2):252-257.) doi:10.11805/TKYDA201902.0252.
- [9] 陈柏桑,唐杨,岳海昆,等. 基于LGA工艺的D波段微带线-波导过渡结构[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2019,17(5):735-738. (CHEN Baishen, TANG Yang, YUE Haikun, et al. A D-band transition from microstrip to waveguide based on LGA technology[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2019, 17(5): 735-738.) doi: 10.11805/TKYDA201905.0735.
- [10] 汪繁星,张浩,刘海涛. 三维系统级封装中垂直互联结构的设计[J]. 微处理机, 2018,39(4):10-13. (WANG Canxing, ZHANG Hao, LIU Haitao. Design of a vertical interconnection structure used in 3D system-in-package[J]. Microprocessors, 2018,39(4): 10-13.) doi:10.3969/j.issn.1002-2279.2018.04.003.
- [11] ZHAO Yongzhi, WANG Shaodong, WU Hongjiang. A novel dual channel receive front-end module with MEMS technology[C]// 2018 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility and 2018 IEEE Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility(EMC/APEMC). Suntec City:IEEE, 2018:647-677. doi:10.1109/ISEMC.2018.8393866.

作者简介:

李晓林(1989-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为射频微系统集成技术. email:cetclxl@163.com.

赵宇(1984-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为射频微系统集成技术.

高艳红(1985-), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为毫米波电路与技术.

许春良(1979-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事微波毫米波射频芯片、模块、微系统等电路的研究.