

文章编号: 2095-4980(2024)03-0331-06

一种基于硅基 MEMS 三维异构集成技术的 T/R 组件

陈 兴, 张 超, 李晓林, 赵永志

(中国电子科技集团公司 第十三研究所, 河北 石家庄 050051)

摘 要: 基于硅基微电子机械系统(MEMS)三维异构集成工艺, 设计并制作了用于相控阵天线系统的三维堆叠式 Ku 波段双通道 T/R 组件。该组件由两层硅基结构通过球栅阵列(BGA)植球堆叠而成, 上下两层硅基封装均采用 5 层硅片通过硅通孔(TSV)、晶圆级键合工艺实现。组件集成了六位数控移相、六位数控衰减、串转并、电源调制、逻辑控制等功能, 最终组件尺寸仅为 15 mm × 8 mm × 3.8 mm。测试结果表明, 在 Ku 波段内, 该组件发射通道饱和输出功率大于 24 dBm, 单通道发射增益大于 20 dB, 接收通道增益大于 20 dB, 噪声系数小于 3.0 dB。该组件性能好, 质量轻, 体积小, 加工精确度高, 组装效率高。

关键词: 微系统; 硅基 MEMS; 收发组件; 三维集成

中图分类号: TN958.92

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2023208

A T/R module based on silicon-based MEMS 3D integration technology

CHEN Xing, ZHANG Chao, LI Xiaolin, ZHAO Yongzhi

(The 13th Research Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang Hebei 050051, China)

Abstract: A Ku-band dual-channel 3D integrated T/R module for array antenna system is designed and fabricated based on silicon Micro-Electro Mechanical System(MEMS) technology. The module consists of two layers of silicon-based packages stacked by Ball Grid Array(BGA). The upper and lower layers of silicon-based packages are realized by five layers of silicon wafers through Through-Silicon-Via(TSV) and wafer-level bonding. The module integrates the 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 finished module size is only 15 mm × 8 mm × 3.8 mm. The test results show that in the Ku-band, the saturation output power of the transmitting channel is greater than 24 dBm, the gain of transmitting channel reaches 20 dB, the gain of the receiving channel is greater than 20 dB, and the noise coefficient is less than 3.0 dB. The assembly bears the advantages of high performance, light weight, small volume, high machining precision and high assembly efficiency.

Keywords: microsystem; silicon-based MEMS; transceiver module; 3D integration

T/R 组件作为有源相控阵天线系统中核心部件, 使用数量巨大, 直接决定了整个系统的性能、质量、体积以及成本。整机系统一直在向小型化、轻量化及低成本方向发展, 因此 T/R 组件走向高集成路线是必然趋势^[1-2]。

传统的 T/R 组件在金属盒体内采用传统的微组装工艺, 整个 T/R 组件体积大, 质量大, 且工艺流程繁琐, 已不能满足整机系统的应用需求。研发人员经过大量实验, 开发了多种新型集成技术^[3-5], 其中硅基 MEMS 三维异构集成技术最引人关注。该技术实现了 T/R 组件的垂直互连, 打破了集成密度在二维尺度上的诸多限制, 将电路布局拓展到三维, 不仅克服了传统 T/R 组件体积大和质量大的缺点, 还兼具极高的芯片间电磁屏蔽特性。相较于低温共烧陶瓷和高温共烧陶瓷集成技术, 硅基 MEMS 三维异构集成技术更具有微米量级加工精确度, 可实现正向仿真设计与实测结果的高度吻合, 真正实现免调试。

综上, 本文基于硅基 MEMS 三维异构集成工艺, 设计了一款 Ku 波段双通道三维集成 T/R 组件。通过硅通孔(TSV)和球栅阵列(BGA)工艺实现了组件内部垂直互连和组件的电磁屏蔽, 通过晶圆级金热压键合工艺实现了高效组装。组件集成了六位数控移相、六位数控衰减、串转并、电源调制、逻辑控制等功能, 最终尺寸仅为

收稿日期: 2023-07-28; 修回日期: 2023-09-26

15 mm×8 mm×3.8 mm。

1 电路与结构

1.1 方案介绍

组件集成了 2 个功能相同的通道，每个通道包括发射链路和接收链路，电路原理框图如图 1 所示。组件所用的射频芯片进行了集成，考虑工艺兼容性，将链路前端开关电路、功率放大器、限幅器和低噪声放大器集成到一款双向放大器多功能芯片上；将数控移相、数控衰减和增益补偿放大器集成到一款幅相控制多功能芯片上，大幅减小了二维平面尺寸。

发射链路：射频信号由 COM 端口进入一分二功分器变为双路射频信号，功分后的射频信号依次经过幅相控制多功能芯片内部的六位数控衰减单元、六位数控移相单元和单刀双掷开关单元后，输向下一级双向放大器多功能芯片内部的发射放大单元，经过功率放大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至天线辐射单元，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 端口首先进入双向放大器多功能芯片内部的限幅器单元，然后进入低噪声放大器单元，防止射频信号过大，烧毁接收低噪声放大器。放大后的射频信号进入幅相控制多功能芯片，经过芯片内部的单刀双掷开关单元、六位数控移相单元和六位数控衰减单元后，经过一分二功分器合成一路射频信号从 COM 端口对外输出^[6]。组件具有通道控制、电源稳压、时序保护和调制等功能。

T/R 组件内部集成了 3 种不同材质的芯片，其中幅相控制多功能芯片、双向放大多功能芯片采用 GaAs 工艺制备；控制芯片、稳压芯片、调制芯片等采用硅 CMOS 工艺制备；100 pF 芯片电容采用单层陶瓷工艺制备。T/R 组件表面焊接的 10 μF 电容元件采用陶瓷封装形式。组件实现了三维异构集成的目的，极大减小了产品尺寸^[7]。

1.2 三维结构

组件在三维布局中充分考虑电磁屏蔽、通道干扰等问题，将组件结构分为上下两层。其中上层结构中内埋通道幅相控制多功能芯片、电容芯片、负压偏置芯片、电源调制芯片；顶部集成表面贴装式陶瓷封装电容，该层主要布局小信号射频芯片、电源控制芯片。下层结构中内埋双向放大多功能芯片以及电容芯片，该层主要布局大信号芯片。上下层结构采用直径 250 μm 的铅锡焊球将上下层连接起来，实现了上下层结构的垂直互联，有效解决了大小信号的互扰问题。两通道之间刻蚀硅基腔体进行物理隔离，同时硅基腔体金属化 TSV 做屏蔽处理，防止相邻芯片腔体间电磁干扰，整个 T/R 组件具有非常高的电磁兼容特性。TR 组件结构示意图如图 2 所示。

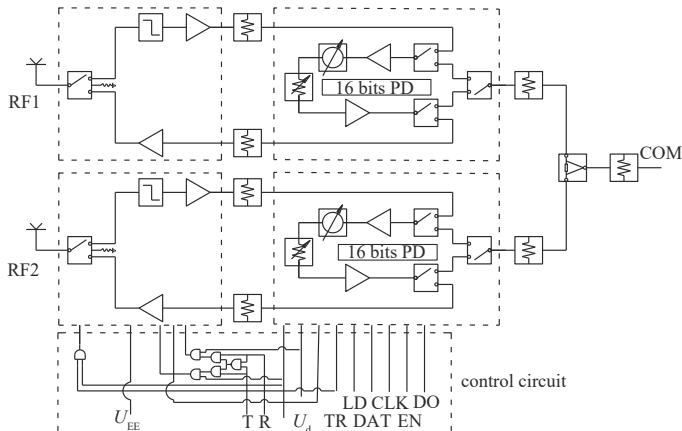


Fig.1 Schematic diagram of the T/R module circuit
图 1 T/R 模组电路原理框图

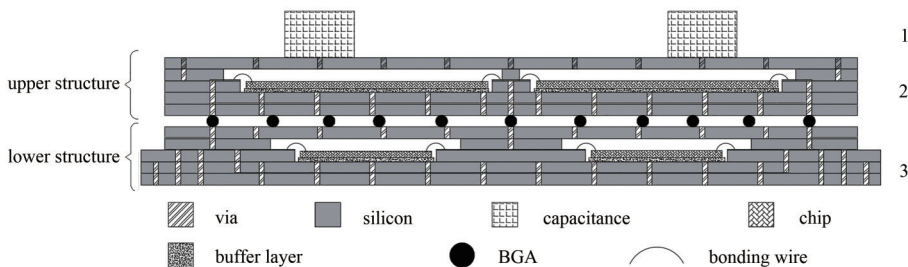


Fig.2 Structure diagram of the T/R module
图 2 T/R 模组结构示意图

上层和下层结构均采用 5 层 250 μm 厚的硅片，每层硅片表面均有 5 μm 的镀金层，包含金属图形、通孔(侧壁电镀)、空腔(侧壁不电镀)等结构，多层硅片通过晶圆级金热压键合工艺结合在一起。芯片通过导电胶粘结、键合等微组装工艺内埋在多层结构的空腔中，上层顶部焊接表贴陶瓷封装电容。组件实现了三维异构集成设计，内埋了 3 种材质芯片，共堆叠了 3 层，充分利用了纵向空间，极大提高了 T/R 组件的集成度。

2 关键技术仿真

设计的两通道T/R组件采用上下两层硅基结构堆叠的方式实现。微波信号的垂直传输采用TSV和焊球两种结构实现，两种结构均为类同轴结构^[2]。该结构有效地减小了组件体积，提高集成密度。TSV垂直过渡同轴结构的阻抗为：

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

式中： ε_r 为介质相对介电常数； D_i 为中心内导体的直径； D_o 为类同轴传输结构的外导体直径。

硅基的相对介电常数为11.9，TSV垂直过渡的中心内导体孔直径 D_i ，根据MEMS工艺规则设计为 $65\text{ }\mu\text{m}$ ，为保证传输结构与芯片更好地匹配，其特性阻抗应尽量接近 $50\text{ }\Omega$ 。根据式(1)，可确定 D_o 。

2.1 硅基结构内部TSV类同轴结构

硅基结构内部含有带状线到TSV的穿层结构，再转到带状线，最后以GCPW作为端口与芯片进行连接，此垂直互连TSV类同轴结构的插入损耗直接影响发射的输出功率和接收的噪声系数，因此必须对该结构的插损和驻波进行优化仿真。

通过计算确定硅片层间TSV类同轴传输结构的外导体直径 D_o 为 $500\text{ }\mu\text{m}$ ，建立微波端口信号从第3层到第4层的传输模型，如图3所示。制作硅片层间TSV类同轴传输结构仿真验证电路并进行测试，模型仿真结果与实测结果如图4所示。结果显示仿真曲线和实测曲线高度吻合，在14~18 GHz频段内，端口回波损耗低于 -28 dB ，插入损耗小于 0.2 dB ，正向仿真具有很高的设计指导意义。

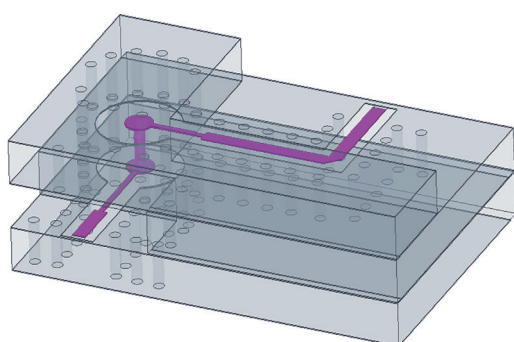


Fig.3 TSV simulation model of silicon-based package
图3 硅基结构内部TSV类同轴仿真模型

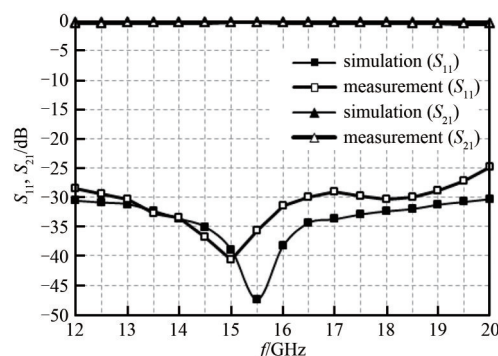


Fig.4 TSV simulation results and measurement results of silicon-based packaging
图4 硅基结构内部TSV类同轴仿真结果与测试结果

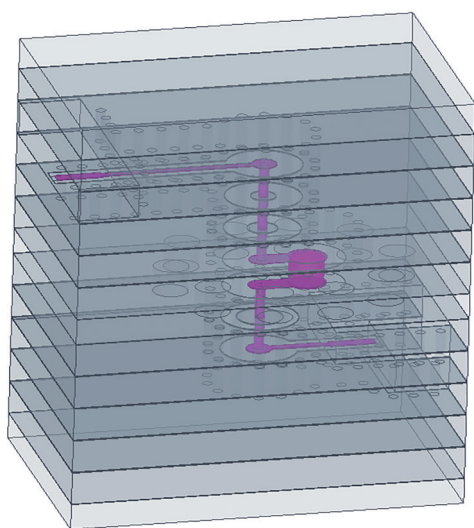


Fig.5 TSV simulation model of upper and lower silicon package connection
图5 上下层硅基结构连接TSV类同轴仿真模型

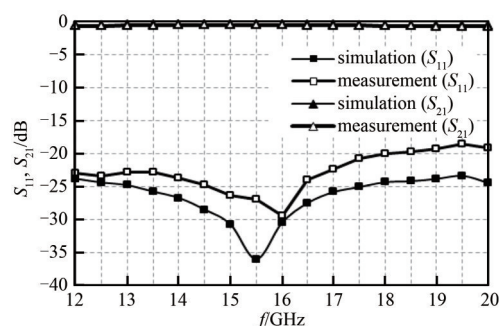


Fig.6 TSV simulation results and measurement results of upper and lower silicon package connection
图6 上下层硅基结构连接TSV类同轴仿真结果与测试结果

2.2 上下层焊球类同轴结构

上下层硅基结构通过 BGA 植球连接, 微波端口采用焊球垂直互连类同轴结构。该结构的插入损耗和驻波系数直接影响发射和接收的增益平坦度等指标, 因此必须对该结构的插损和驻波进行优化仿真。

通过计算确定焊球的类同轴传输结构的外导体直径 D_0 为 $1\ 000\ \mu\text{m}$, 建立上层和下层植球连接的传输模型, 如图 5 所示。制作上层和下层植球连接的传输结构仿真验证电路并进行测试, 模型优化结果和实测结果如图 6 所示。结果显示仿真曲线和实测曲线高度吻合, 在 $14\sim 18\ \text{GHz}$ 频段内端口回波损耗低于 $-19\ \text{dB}$, 插入损耗小于 $0.5\ \text{dB}$, 正向仿真具有很高的设计指导意义。

2.3 微带电路阻抗设计

除了垂直互连传输结构, 组件内部还应用了 GCPW 形式的平面传输结构, 用来连接芯片和对外互连。因所用芯片输入输出端口均已匹配到 $50\ \Omega$, 故微带电路阻抗匹配设计时重点考虑键合丝的寄生感性效应。建立微带匹配模型时, 采用容性的宽带线抵消键合丝的寄生感性效应, 再利用高阻抗的窄带线将阻抗实部降低到 $50\ \Omega$, 达到拓展宽带的效果。该组件为 25% 的相对带宽, 微带阻抗匹配采用一级高低阻抗变换即可达到目的, 通过仿真优化带线的宽度、长度等参数, 进而得到微带电路阻抗设计参数。微带匹配电路仿真模型如图 7 所示。

制作微带匹配仿真验证电路并进行测试, 模型优化结果和实测结果如图 8 所示。结果显示正向仿真具有很高的设计指导意义, 在 $2\sim 20\ \text{GHz}$ 频段内, 端口回波损耗低于 $-25\ \text{dB}$, 插入损耗小于 $0.2\ \text{dB}$ 。

3 组件装配与测试

组件的装配工艺涉及硅基 MEMS 加工工艺和芯片微组工艺^[8-9]。首先采用 MEMS 体硅微加工工艺, 在晶圆硅片衬底上刻蚀出放置芯片的腔体、盖板的腔体和 TSV 过孔, 并制作图形; 再采用微组工艺将微波芯片粘结在腔体内, 并进行金丝键合, 然后进行晶圆级金热压键合、划片分割, 得到上下层的硅基结构; 最后使用球焊机完成硅基封装表面的植铅锡球, 上下层硅基模块采用回流焊的方式实现植球堆叠。具体工艺过程如图 9 所示。

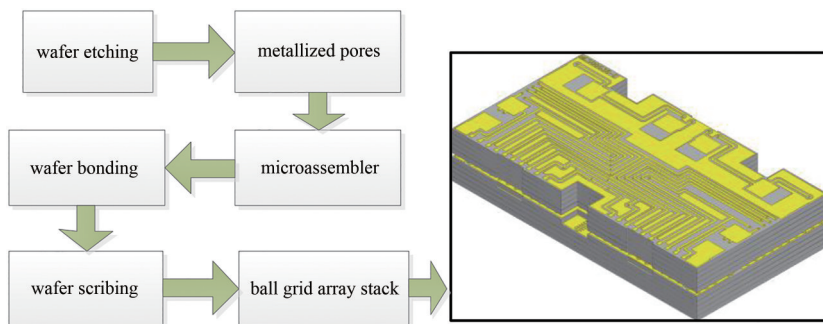


Fig.9 Process of MEMS 3D integration

图 9 MEMS 三维集成的工艺过程

完成的 T/R 组件如图 10 所示, 尺寸仅为 $15\ \text{mm}\times 8\ \text{mm}\times 3.8\ \text{mm}$ 。组件对外端口均为 GCPW 形式, 可方便高效地利用探针台进行自动测试, 如图 11 所示。测试系统包含: 矢量网络分析仪、可编程控制板、计算机、通用型接口总线 (GBIP 线)。对 TR 组件进行了全面指标测试, 指标测试结果如表 1 所示。接收通道增益、噪声系数仿真曲线和测试曲线如图 12; 发射通道饱和输出功率仿真曲线和测试曲线如图 13; 收发公共通道 64 态数控移相均方根 (Root-Mean-Square, RMS)、64 态数控衰减 RMS 仿真曲线和测试曲线如图 14, 仿真结果和测试结果高度吻合。

从上述测试结果可以看出: 硅基 MEMS 三维异构集成 T/R 组件在 Ku 波段发射通道接收增益大于 $20\ \text{dB}$, 噪声系数小于 $3.0\ \text{dB}$; 发射饱和输出功率大于 $24\ \text{dBm}$; 通道移相精确度 RMS 小于 3.5° , 衰减精确度 RMS 小于

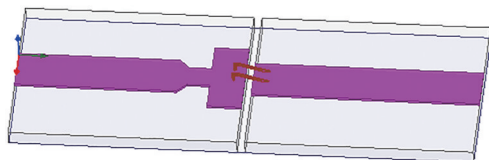


Fig.7 Simulation model of microstrip matching circuit

图 7 微带匹配电路仿真模型

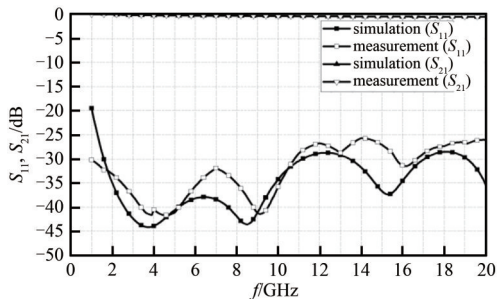


Fig.8 Simulation results and measurement results of microstrip matching circuit

图 8 微带匹配电路的仿真结果和测试结果

0.45 dB，均达到了设计目标。通过正向全面仿真设计，仿真结果和测试结果高度吻合，真正做到了组件免调试。

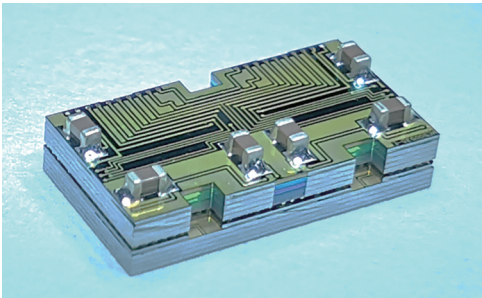


Fig.10 Photo of TR module
图 10 TR 组件实物图

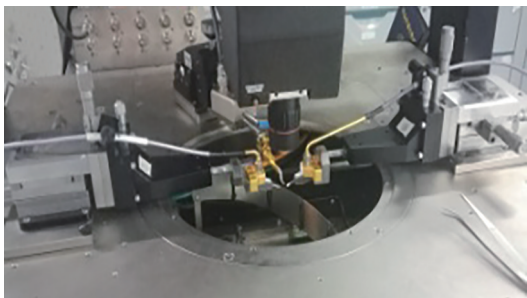
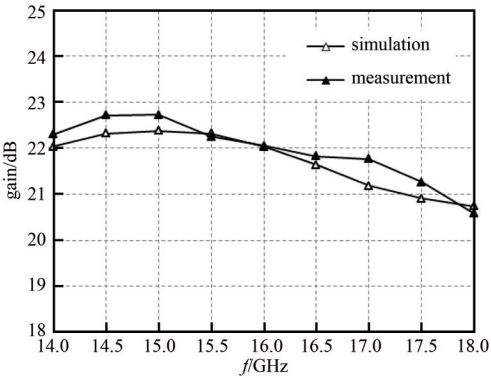
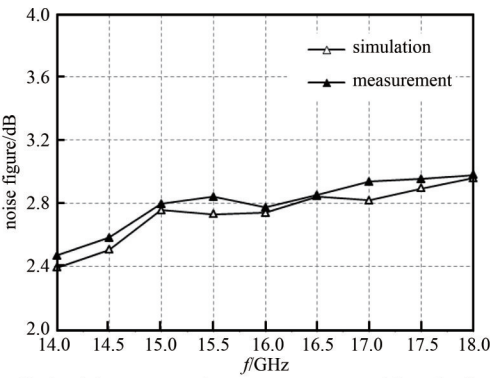


Fig.11 The test system of the probe station
图 11 探针台测试系统



(a) simulation curves and measurment curves of the gain



(b) simulation curves and Measurement curves of the noise figure

Fig.12 Simulation curves and measurement curves of the receiving channel
图 12 接收通道仿真曲线和测试曲线

表 1 T/R 模块测试结果 Table1 Test results of the T/R module	
parameter	value
operating frequency/GHz	12~18
saturation output power/dBm	>24
receive channel gain/dB	>20
noise figure/dB	<3.0
phase shift accuracy RMS/(°)	3.5
attenuation accuracy RMS/dB	0.45
voltage standing wave ratio	<2

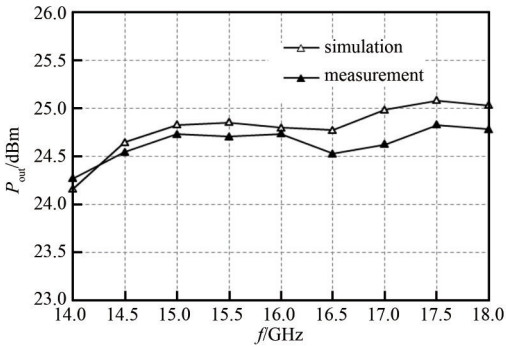


Fig.13 Simulation curves and measurement curves of the saturation output power
图 13 发射通道饱和输出功率仿真曲线和测试曲线

4 结论

基于硅基 MEMS 三维异构集成工艺，Ku 波段双通道 T/R 组件实现了多种不同功能和不同材质芯片的 3 层堆叠，最终尺寸仅为 15 mm×8 mm×3.8 mm；通过硅通孔和球栅阵列工艺实现了不同层芯片间的低损耗、高性能垂直互联，并兼有良好的电磁屏蔽效果；优于微米级精确度的硅基工艺，实现了组件正向仿真设计与实测结果的高度吻合，实现了免调试，最终测试结果良好，达到了设计预期。该组件可晶圆级自动装配和探针自动测试，非常适合批量生产，可极大提高生产效率，降低生产成本。该组件具有性能好，质量轻，体积小，加工精确度高，组装效率高等特点，具有非常高的推广价值。

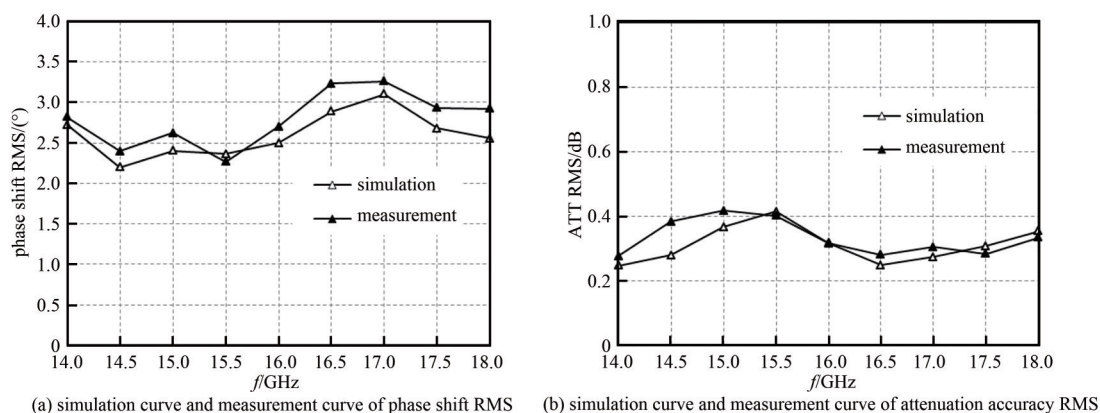


Fig.14 Simulation curves and measurement curves of phase shift and attenuation accuracy RMS

图 14 移相衰减精度 RMS 仿真曲线和测试曲线

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] 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.
- [3] YEO S K,CHUN J H,KWON Y S. A 3D X-band T/R module package with an anodized aluminum multilayer substrate for phased array radar applications[J]. IEEE Transactions on Advanced Packaging, 2010,33(4):883-891.
- [4] 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.
- [5] LUCERO R, QUTTENEH W, PAVIO A, et al. Design of an LTCC switch diplexer front-end module for GSM/DCS/PCS applications[C]// 2001 IEEE Radio Frequency Integrated Circuits(RFIC) Symposium. Phoenix: IEEE, 2001: 213-216. doi: 10.1109/RFIC.2001.935678.
- [6] 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.
- [7] 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/TKYDA 201905.0735.
- [8] 王驰,卢伊伶,祝大龙,等. 基于硅基 MEMS 工艺的 X 频段三维集成射频微系统[J]. 遥测遥控, 2019,40(3):47-51. (WANG Chi, LU Yiling,ZHU Dalong,et al. Design of X-band three-dimensional integrated RF transceiver microsystem based on silicon based MEMS technology[J]. Journal of Telemetry,Tracking and Command, 2019,40(3):47-51.) doi:10.3969/j.issn.2095-1000. 2019.03.008.
- [9] ZHAO Yongzhi,WANG Shaocong,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. Suntec City:IEEE, 2018:674-677. doi:10.1109/ISEMC.2018.8393866.

作者简介:

陈 兴(1979-), 男, 学士, 高级工程师, 主要研究方向为集成电路设计及微波校准和测量技术. email: ccyt9837@sohu.com.

张 超(1983-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为微波集成电路设计及微波组件设计.

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.

赵永志(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.