

基于硅基 MEMS 三维集成技术的片式多波束发射前端

赵 宇, 赵玛利, 赵永志, 张梦娇, 王 佳, 李美苓, 吴洪江
(中国电子科技集团公司第十三研究所 石家庄 050051)

摘要: 基于多波束发射前端的相控阵, 具有波束灵活扫描和多目标同时通信的能力, 是低轨互联网通信卫星的重要微波子系统。采用硅基 MEMS 三维异构集成技术, 将多个微波单片集成电路 MMIC (Monolithic Microwave Integrated Circuit) 和硅基 MEMS 功分交叉网络等无源结构一体化集成, 实现了一种 K 频段 8 波束 32 通道瓦片式相控阵发射前端。该器件由五个硅基封装模块堆叠而成, 不同封装模块之间通过植球 (金球凸点及铅锡焊球) 的方式互连, 内部通过 TSV 通孔技术实现垂直互连。为展示其性能, 制备了 19 GHz~21 GHz 频段的样件, 尺寸为 16.25 mm×14.25 mm×6.3 mm。经测试, 单通道发射增益 ≥ 18 dB, 输入输出端口驻波 ≤ 2.0 , 同时具备 6 位数控移相和 5 位数控衰减功能。

关键词: 硅基 MEMS 技术; 三维异构集成; 封装堆叠; 多波束发射前端

中图分类号: TN952 文献标识码: A 文章编号: CN11-1780(2021)05-0009-10

DOI: 10.12347/j.ycyk.20210525001

引用格式: 赵宇, 赵玛利, 赵永志, 等. 基于硅基 MEMS 三维集成技术的片式多波束发射前端[J]. 遥测遥控, 2021, 42(5): 85-94.

Multi-beam transmitting front-end based on the MEMS 3D integrated technology

ZHAO Yu, ZHAO Mali, ZHAO Yongzhi, ZHANG Mengjiao, WANG Jia, LI Meiling, WU Hongjiang
(The 13th Research Institute, China Electronic Technology Corporation, Shijiazhuang 050051, China)

Abstract: The multi-beam transmitting front-end proposed by phased-array mode is an important sub-system of low-orbit internet communication satellite due to its characteristics of flexible beam scanning and simultaneous communication of multi-targets. In this paper, several microwave monolithic integrated circuits (MMIC) and the passive structures, such as MEMS power divider crossover network, are integrated by using the silicon-based three-dimensional(3D) heterogeneous integration technology. A component of K-band 8 beam 32 channels tile transmitting array based on the MEMS technology is designed. The component consists of five layers of silicon module, and the different silicon modules are connected to each other with solder balls(including the golden ball and the SnPb ball). And the RF signal inside the silicon-based module is transmitted by the through silicon vias (TSV). The dimension of the component is about 16.25 mm×14.25 mm×6.3 mm. The test result shows that, in the range of 19 GHz~21 GHz, the transmit gain of each channel ≥ 18 dB, and the input and output VSWRs ≤ 2.0 . The component also has the functions of 6 bit phase shift and 5 bit attenuation.

Key words: Si MEMS technology; 3D heterogeneous integration; Package on package; Multi-beam transmitting front-end

DOI: 10.12347/j.ycyk.20210525001

Citation: ZHAO Yu, ZHAO Mali, ZHAO Yongzhi, et al. Multi-beam transmitting front-end based on the MEMS 3D integrated technology[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2021, 42(5): 85-94.

引 言

相控阵与多波束技术已广泛应用于卫星通信领域, 多波束发射相控阵利用对天线馈电幅度和相位的控制, 通过空间功率合成获取高等效全向辐射功率以支撑多目标通信^[1,2]。近年来, 随着卫星通信系统对相控阵天线小型化、低功耗、高集成度的迫切需求, 开展多波束发射前端高效集成技术研究已成为发展趋势。

硅基 MEMS 技术具有高精度、高集成、低成本等诸多优势, 在高性能封装集成领域应用受到了国

内外学者越来越多的关注^[3-10]。本文针对多波束发射相控阵小型化、轻量化发展需求, 开展了 K 频段 8 波束 32 通道发射前端的硅基 MEMS 三维异构集成研究, 通过采用贯穿性硅通孔 TSV (Through Silicon Via)、晶圆级键合、硅基封装模块的植球堆叠等制备工艺, 实现了半导体微波芯片与硅基 MEMS 无源器件 (MEMS 功分交叉网络) 的一体化集成设计, 大大缩小了多波束发射前端的体积, 提高了集成度和性能。

1 多波束发射相控阵工作原理

图 1 为 K 频段硅基 MEMS 片式多波束发射前端的电路原理图, 频率覆盖 19 GHz ~ 21 GHz, 包含 8 个波束的射频信号输入、32 个移相衰减通道和 4 路射频信号输出。相控阵工作时, 进入发射前端的 8 路射频信号通过两级硅基 MEMS 功分交叉网络后, 等功率分成 32 路射频信号并通过 16 个 GaAs 双通道移相衰减多功能芯片合成为 16 路射频信号, 然后经两级功率合成网络和放大, 最终形成 4 路射频输出信号, 输出给阵列天线。

设 8 个波束的射频输入信号分别为

$$s_n(t) = A_n \cos(\omega_n + \varphi_n) \quad n=1 \sim 8 \quad (1)$$

经过两级功分网络后, 每个波束射频信号理论衰减为 6 dB, 分别进入每个天线单元下的 8 个移相衰减通道 (如图 1 中波束 1 射频信号到波束 8 射频信号), 此时 8 路射频信号可表示为

$$s_n^T(t) = 0.25A_n \cos(\omega_n + \varphi_n) \quad n=1 \sim 8 \quad (2)$$

设 8 个移相衰减通道的幅相加权分别为 W_n ($n=1 \sim 8$)

则经过合成后的射频输出信号为

$$s_o(t) = \sum_{n=1}^8 0.25GW_n A_n \cos(\omega_n + \varphi_n) \quad n=1 \sim 8 \quad (3)$$

其中, G 为放大器线性增益, 假设放大器工作在理想的线性区, 无非线性交调信号产生。

在实际的通信系统中, 多频信号进入放大器后会产生复杂的交调信号, 需要根据实际系统交调干扰要求对放大器的多音交调抑制指标进行约束。

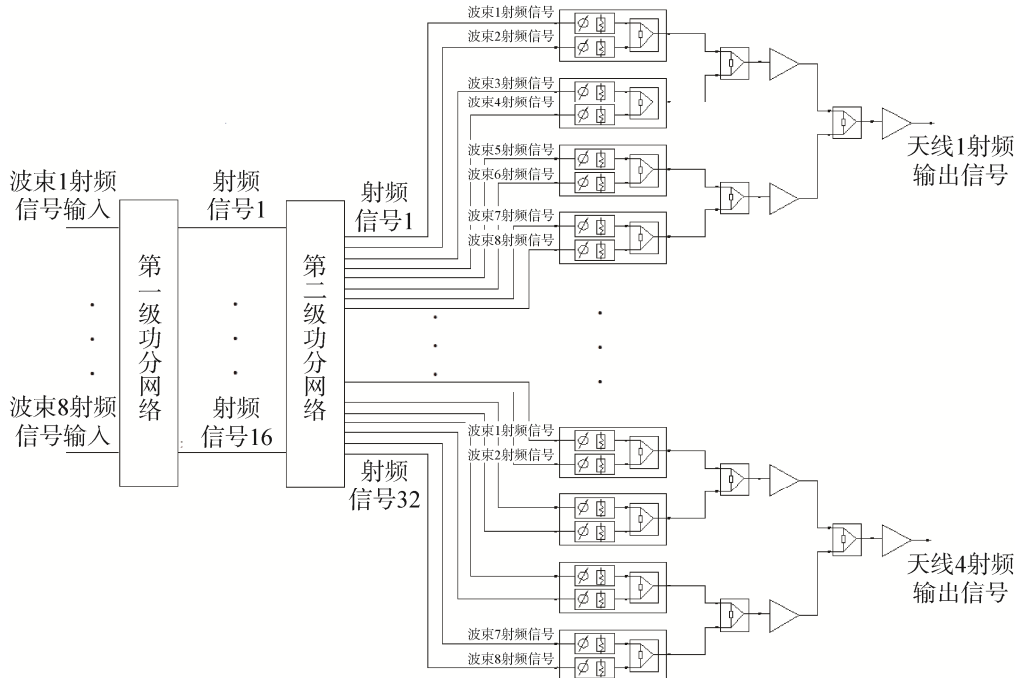


图 1 多波束发射前端基本原理框图

Fig. 1 Schematic diagram of multi-beam transmitting front-end

2 硅基 MEMS 三维集成设计

图 2 所示为片式多波束发射前端的硅基 MEMS 三维集成示意图。其中, 模块 1 和模块 2 为两级硅基 MEMS 交叉功分网络, 第一级硅基 MEMS 功分网络将 8 路射频输入信号等功率分成 16 路, 第二级硅基 MEMS 功分网络将 16 路信号等功率分成 32 路, 分别为 32 路移相衰减通道提供射频激励; 模块 3 和模块 4 为 32 路移相衰减通道的封装单元, 每个模块包含 16 路移相衰减通道, 结构上呈 2×2 阵列布局, 芯片使用了中国电科 13 所的 NC15267C—1921SD 型双通道幅相多功能芯片, 两个模块共集成芯片 16 只。32 路射频激励中的 16 路经 BGA 类同轴、TSV 类同轴和硅基传输线馈入模块 3 内部的幅相多功能芯片, 另外 16 路射频激励经 TSV 类同轴结构直接贯穿模块 3 馈入给模块 4 内部的幅相多功能芯片; 模块 5 为两级功率合成及射频放大封装单元。模块 1~模块 2、模块 3~模块 5 之间分别采用金球凸点 (直径 $100\ \mu\text{m}$) 超声热压的方式进行封装堆叠, 模块 2~模块 3 之间采用铅锡焊球 (直径 $250\ \mu\text{m}$) 工艺进行封装堆叠, 从而实现了射频、供电、控制信号等在不同单元模块间的三维垂直互连。8 路波束射频输入端口及加电控制端口位于模块 1 的底面, 通过 BGA 植球与外部多层 PCB 母板相连; 对接天线的 4 路射频输出端口位于模块 5 的顶面, 也通过 BGA 植球 (铅锡焊球) 与天线阵元转接板互连。在整体结构设计上, 采用集成无源元件 IPD (Integrated Passive Devices) 技术在多层硅基板上直接集成硅基 MEMS 功率分配交叉网络, 并通过多层封装三维堆叠的方式大幅减小无源器件及交叉网络的占用面积, 提高系统集成度。设计完成的器件整体尺寸为: $16.25\ \text{mm} \times 14.25\ \text{mm} \times 6.3\ \text{mm}$ (不包含上、下 PCB 板焊球高度)。图 3 给出了四个典型功能模块的电路版图和样品照片, 其中, 图 3 (a) 是模块 1 和模块 2 交叉功分网络版图布局及样品照片, 图 3 (b) 是模块 3 移相衰减通道封装单元版图布局及内埋芯片照片, 图 3 (c) 是模块 4 移相衰减通道封装单元版图布局及内埋芯片照片, 图 3 (d) 是模块 5 功率合成及射频放大封装单元版图布局及内埋芯片照片。

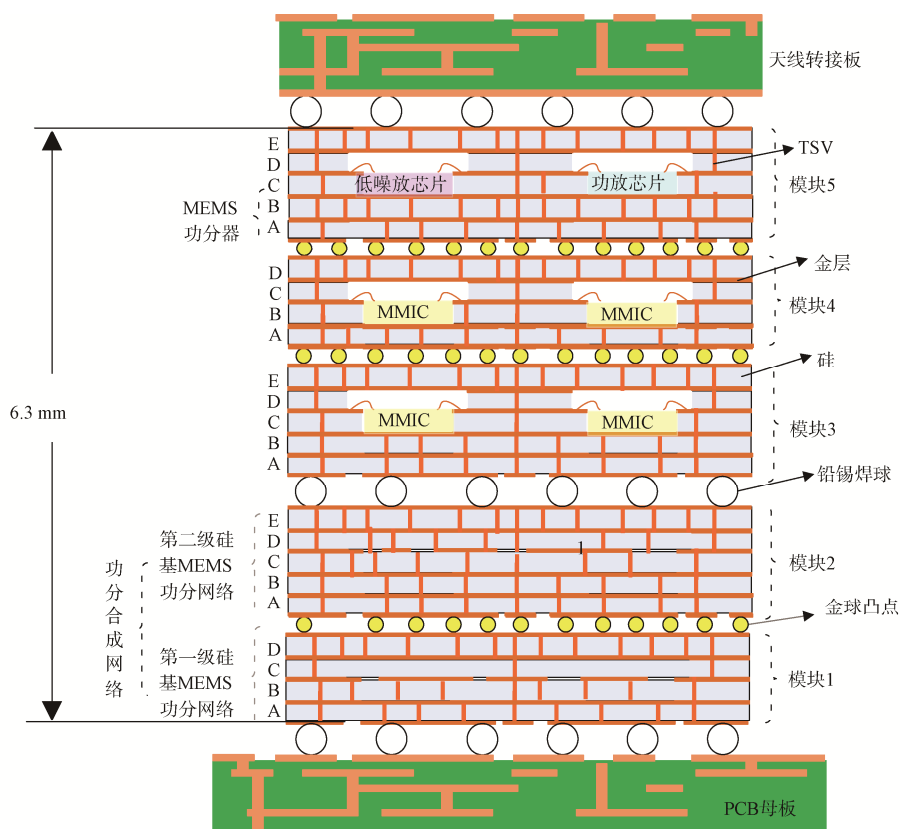
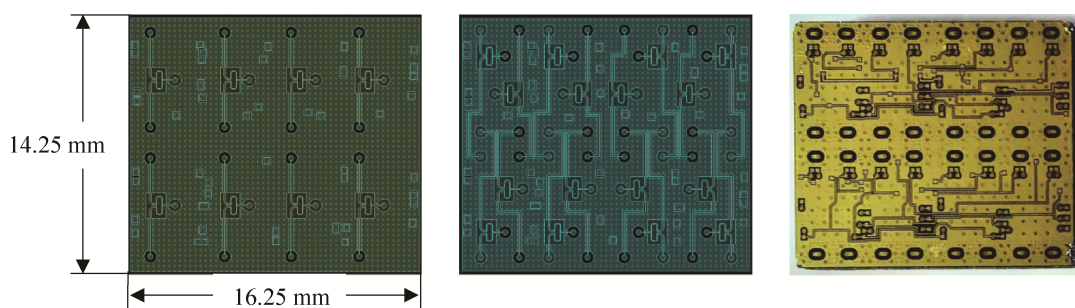


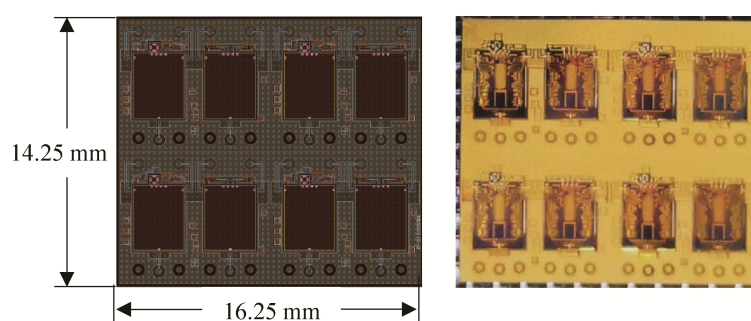
图 2 片式多波束发射前端的硅基 MEMS 三维集成示意图

Fig. 2 Schematic diagram of silicon based MEMS package structure of tile multi-beam transmitting array



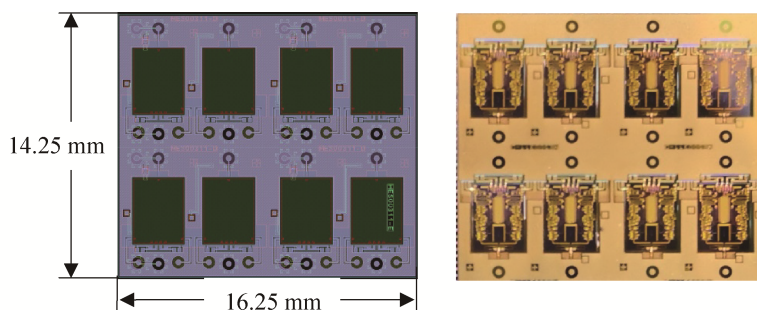
(a) 交叉功分网络版图布局及样品照片

(a) Circuit layout and sample photograph of the cross power splitter



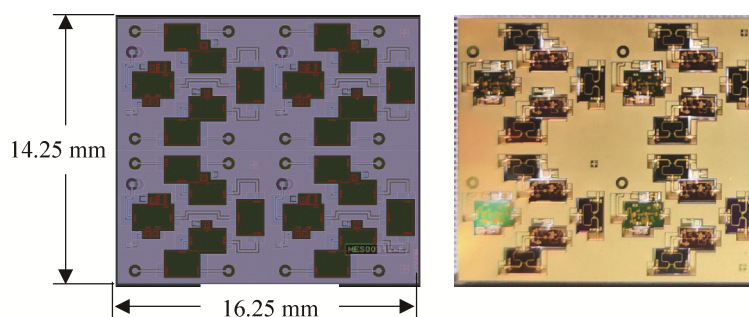
(b) 模块 3 移相衰减通道封装单元版图布局及内埋芯片照片

(b) Circuit layout and embedded chip photograph of the package module 3



(c) 模块 4 移相衰减通道封装单元版图布局及内埋芯片照片

(c) Circuit layout and embedded chip photograph of the package module 4



(d) 功率合成及射频放大模块的版图布局及内埋芯片照片

(d) Circuit layout and embedded chip photograph of the power combiner and amplifier module

图 3 典型功能模块电路版图及样品照片

Fig. 3 Circuit layouts and sample photographs of some typical modules

3 硅基 MEMS 微波传输电路结构仿真设计

垂直互连是瓦片式相控阵架构特有的电路结构,也是能否实现射频信号高效传输的核心。微波信号垂直互连的方式有很多,本文采用 TSV 通孔和焊球构成类同轴结构进行微波信号的传输。根据公式(4)可以预估类同轴结构特征阻抗^[11,12],再通过仿真优化调整焊盘尺寸和线宽线间距等参数,可以得到类同轴结构的精确设计参数。

$$Z = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}} 60 \ln \left(\frac{D_o}{D_i} \right) \quad (4)$$

在公式(4)中, D_i 表示同轴结构中内导体直径, D_o 表示同轴结构中外导体直径。TSV 通孔直径和焊球直径都是确定的,它们的内导体直径 D_i 分别确定为 $100 \mu\text{m}$ 和 $250 \mu\text{m}$ 。为尽量使传输结构的特性阻抗接近 50Ω ,通过计算可以确定通孔和焊球的外导体直径 D_o 分别是 $250 \mu\text{m}$ 和 $660 \mu\text{m}$ ^[9]。在得到类同轴结构的参数后,围绕微波传输线的线宽、焊盘大小、不同传输路径等采用 Ansoft HFSS 三维电磁场仿真软件进行了大量仿真优化。

3.1 同一功能模块层间垂直互连的 TSV 类同轴传输结构设计

同一模块内部的 TSV 类同轴传输结构仿真模型如图 4 所示,传输信号从下层硅片,通过 TSV 类同轴结构传输到第二层硅片的上表面,即微波信号实现单层硅板垂直传输(单层硅板厚度为 $250 \mu\text{m}$)。该结构传输线为带状线,线宽 $30 \mu\text{m}$,TSV 孔直径为 $50 \mu\text{m}$ 。从仿真结果可以看出,在 $1 \text{ GHz} \sim 35 \text{ GHz}$ 范围内,TSV 类同轴传输结构的插损小于 0.1 dB ,回波损耗小于 -20 dB 。

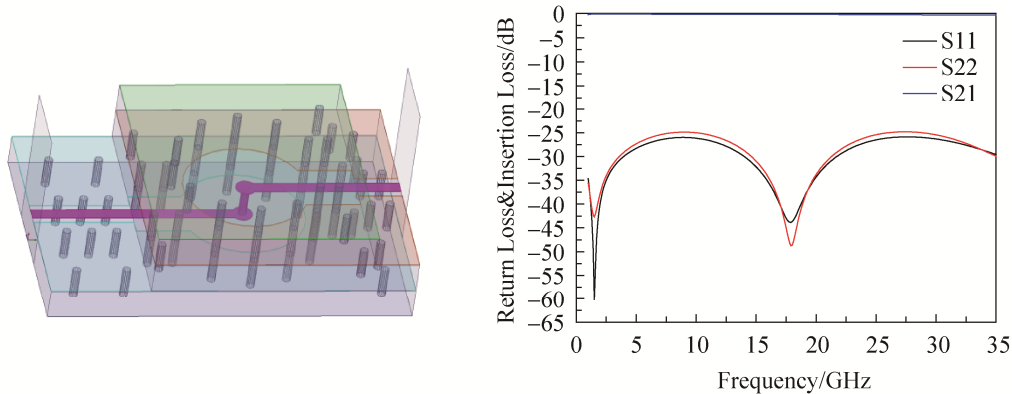


图 4 同一模块内的 TSV 类同轴传输结构模型及仿真结果

Fig. 4 Simulation model and results of TSV coaxial transmission structure

3.2 不同功能模块之间垂直互连的 TSV 类同轴传输结构设计

常见的不同功能模块间的垂直互连包括毛纽扣、弹性连接器和球栅阵列(BGA)直接焊接技术^[13]。本文提出了一种基于超声热压金球凸点的毫米波垂直互连结构,通过 Bonding Ball 工艺在硅基模块表面制备金球凸点,再利用超声热压的方式实现模块的封装堆叠。下面根据在硅基封装结构设计中的几种情况进行分析。

当信号从下方 PCB 板进入时,通过铅锡焊球的类同轴结构与上方硅基模块实现互连,然后通过同一模块内部的 TSV 类同轴传输结构将信号传输到芯片所在硅层,通过 CPWG 端口与芯片实现键合互连。该结构传输线为带状线,线宽为 $30 \mu\text{m}$,TSV 孔直径为 $50 \mu\text{m}$,铅锡焊球直径为 $250 \mu\text{m}$ 。仿真模型及仿真结果如图 5 所示,从仿真结果可以看出,在 $1 \text{ GHz} \sim 35 \text{ GHz}$ 频率范围内,传输过渡结构的差损小于 0.2 dB ,回波损耗基本小于 -20 dB 。

当输入信号从最下方 PCB 板进入时,首先通过铅锡焊球 TSV 类同轴传输结构将信号传输到下方模块的输入端口,再经过同一模块内部的 TSV 传输至该模块的顶层,通过金球凸点的类同轴传输结构与上方模块实现互连,最后通过 TSV 将信号传输到上方模块的芯片层硅基板,通过 CPWG 端口与芯片实

现互连。该结构中金球凸点直径为 $100\text{ }\mu\text{m}$ 。仿真模型及仿真结果如图 6 所示, 从仿真结果可以看出, 在 $19\text{ GHz}\sim 21\text{ GHz}$ 频率范围内, 传输过渡结构的差损小于 0.5 dB , 回波损耗在 -20 dB 以下。

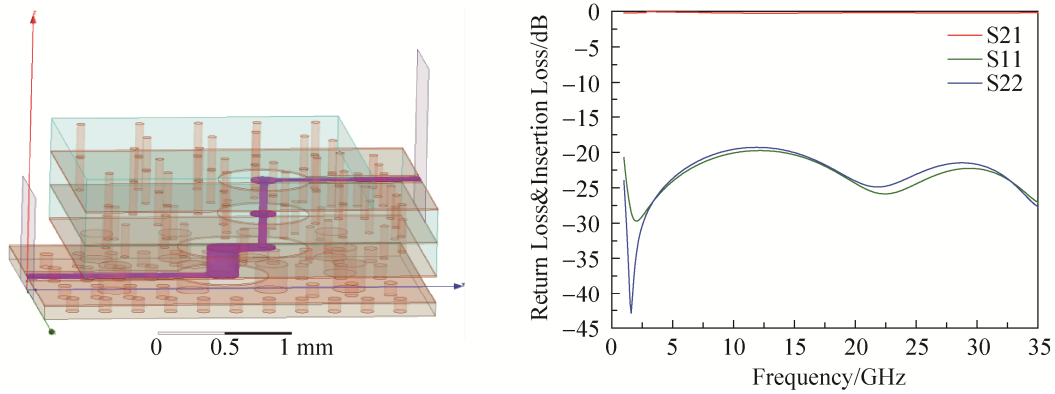


图 5 基于铅锡焊球的类同轴结构模型及仿真结果

Fig. 5 Simulation model and results of coaxial transmission structure based on SnPb solder ball

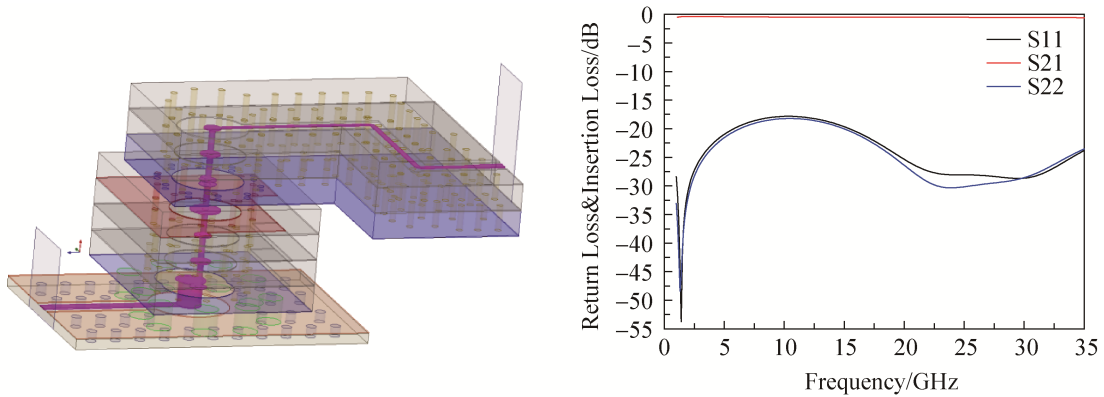


图 6 基于铅锡焊球及金球凸点的类同轴结构模型及仿真结果

Fig. 6 Simulation model and results of coaxial transmission structure based on SnPb solder ball and golden ball

3.3 硅基 MEMS 功分交叉网络设计

本文选用的威尔金森功分器具有频带宽、端口间隔离度高、易于设计实现等优点^[13]。为了缩小器件尺寸, 可将功率分配交叉网络进行叠层布局, 这就需要 MEMS 功分器将与 TSV 类同轴结构进行一体化集成设计, 通过 TSV 垂直互连, 实现多层功分器的垂直交叉网络。MEMS 功分器与 TSV 类同轴结构的仿真模型如图 7 所示。

在模型中, 三个端口为 PCB 板的三个射频端口, 通过植球, 与硅基 MEMS 功合网络的底部输入端口互连, 随后射频信号通过 TSV 类同轴结构进行多层硅基板的垂直传输。图 8 为仿真结果。从结果可见, 在 $19\text{ GHz}\sim 21\text{ GHz}$ 频率范围内, 端口回波损耗小于 -18 dB , 端口隔离度大于 25 dB , 损耗 (包括 2 组多层硅基板的 TSV 类同轴结构、2 组基于植球的类同轴传输结构的损耗、功分器的损耗及功率分配损耗) $< 5\text{ dB}@21\text{ GHz}$ 。

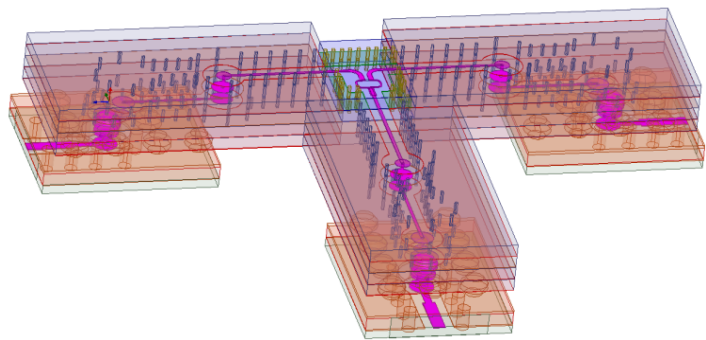


图 7 MEMS 功分器将与 TSV 类同轴结构一体化设计模型

Fig. 7 Simulation model of MEMS power divider cooperated with TSV coaxial transmission structure

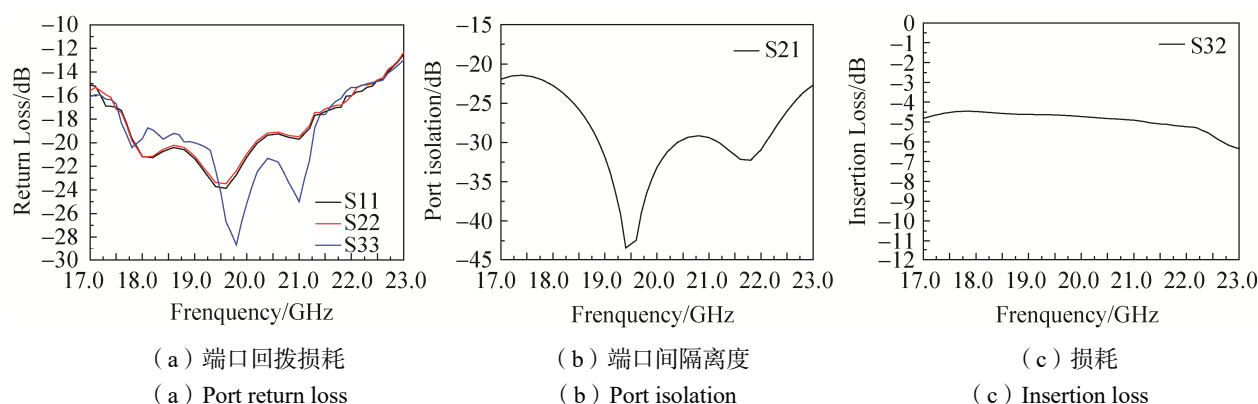


图 8 功分器与 TSV 类同轴一体化设计仿真结果

Fig. 8 Simulation results of MEMS power divider cooperated with TSV coaxial transmission structure

4 片式多波束发射前端的工艺实现

图 9 为硅基 MEMS 三维集成器件制造工艺流程图, 主要工艺包含硅基板刻蚀、电镀、晶圆级键合、晶圆级微组装、晶圆级封装、划片、封装堆叠(植球)等。详细步骤如下所述:

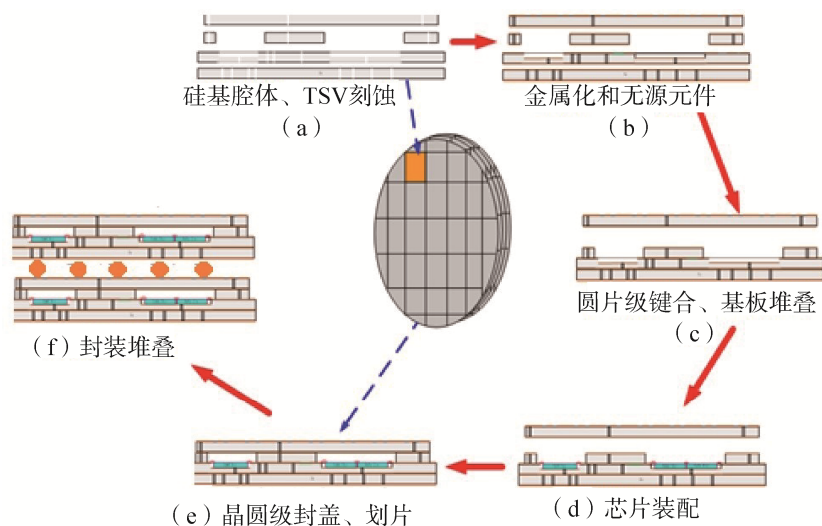


图 9 硅基 MEMS 三维集成器件制造工艺流程图

Fig. 9 Manufacturing process flow chart of silicon-based three-dimensional integration technology

如图 9 (a) 所示的硅基腔体的刻蚀技术。硅基板芯片埋置腔体主要是通过干法刻蚀工艺实现的, 该腔体的表面质量将影响芯片装配精度, 从而影响器件的性能。本文通过优化刻蚀程序, 实现了高精度基板腔体的加工。对于 TSV 通孔的刻蚀, 通过调整刻蚀方式和时间, 可实现对高深宽比贯穿硅通孔 (TSV) 的制备。

如图 9 (b) 所示的硅基板及 TSV 通孔的金属化工艺技术。为了得到表面粗糙度低的金属层, 在硅基板和 TSV 通孔的金属化过程中, 首先在硅板上形成厚度均匀的薄导电金属种子层, 随后通过电镀实现金属化。表面图形是通过光刻工艺做出来的, 由于半导体的光刻工艺加工精度非常高, 表面互连、无源元件的制作可以实现与设计的高度吻合。

如图 9 (c) 所示的单层硅基板加工完成以后, 通过晶圆级键合设备, 可以把多层基板堆叠在一起, 这样硅通孔就实现了多层结构之间的互连作用, 也实现了嵌入式的无源结构的三维集成。微米精度的腔体和所有过孔结构可以一次性地加工出来。完成硅基结构加工后, 可以对硅基板无源结构进行检验和测试评价。测试主要采用探针台方式, 对无源结构电性能进行评价。图 10 为未装配芯片的硅基板实物照片。

如图 9 (d) 所示的经过晶圆键合形成的多层硅基载板是芯片组装的载体, 采用自动化的微组装工艺, 可以把 CMOS、砷化镓、GaN 等不同材质的芯片安装在硅基封装中。引线键合把一些需要连接的芯片用键合丝连接在基板上, 或芯片之间的互连。

如图 9 (e) 所示的芯片组装和互连完成以后, 还要通过晶圆级封装技术, 把芯片屏蔽起来, 起到电气隔离或空间保护的作用。基于硅基 MEMS 的三维微系统, 是用半导体工艺在一个晶圆上批量加工出来的, 通过切片工艺把各个单元从整个晶圆上切割下来。图 11 为装配芯片并封帽之后的硅基模块实物照片。

如图 9 (f) 所示的封装堆叠工艺是利用植球的方法, 将封装好的硅基模块进行垂直互连。本文涉及到两种植球方式, 一种是基于金球凸点超声热压的方式进行的硅基模块封装堆叠, 另一种是基于 BGA 铅锡焊球的硅基模块封装堆叠。由于金球凸点的耐热温度较高, 这样可以减少多个封装模块堆叠的温度梯度, 保证多个封装模块垂直堆叠工艺的可实现性, 同时避免了由于多次施加温度而造成的焊球失效等问题。图 12 (a) 为植金球后的模块表面照片, 图 12 (b) 为器件堆叠后的侧面照片。其中, 上面三个模块之间的黄色凸点为金球, 下面银色凸点为铅锡焊球。

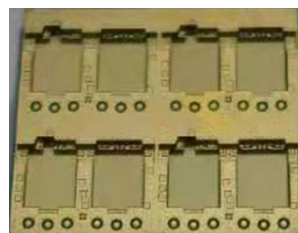


图 10 装配芯片之前的硅基板实物照片
Fig. 10 Photo of the silicon substrate before chip assembly

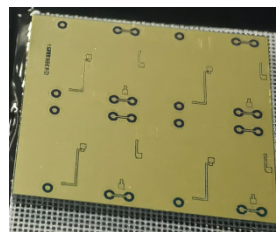
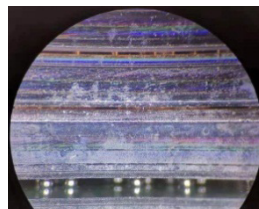
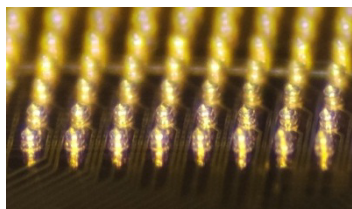


图 11 封帽后的硅基模块实物照片
Fig. 11 Photo of the silicon module after cap sealing



(a) 植金球后模块的表面照片 (b) 封装堆叠后模块侧视照片
(a) Practical photo of golden ball (b) Practical photo of packaging stack

图 12 植球及堆叠后实物照片

Fig. 12 Practical photos after golden ball planting and packaging stack

图 13 是基于硅基 MEMS 三维集成技术制备的多波束射频前端样品照片, 尺寸为 16.25 mm×14.25 mm×6.3 mm。

5 测试结果

如图 14 所示, 为便于测试, 设计了一套基于 TSV 类同轴的测试夹具。夹具分为上下两部分结构, 上半部分与 4 路射频输出端口互连, 下半部分通过内部走线实现 8 路射频输入端口分置。样品器件可放置在夹具中间凹槽内, 凹槽内部通过金属探针与射频、供电、控制端口焊盘互连。

硅基内部的幅相多功能芯片采用-5 V 供电, 放大器芯片采用+5 V 供电。样品的所有-5 V 供电互连, 工作电流为 160 mA。为了避免通道间串扰, 射频放大器芯片采用多路+5 V 供电, 动态电流为 120 mA~130 mA。

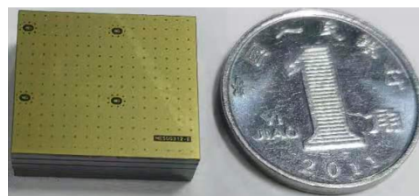


图 13 封装堆叠后的发射前端样品照片
Fig. 13 Photo of the transmitting front-end module after package stacking

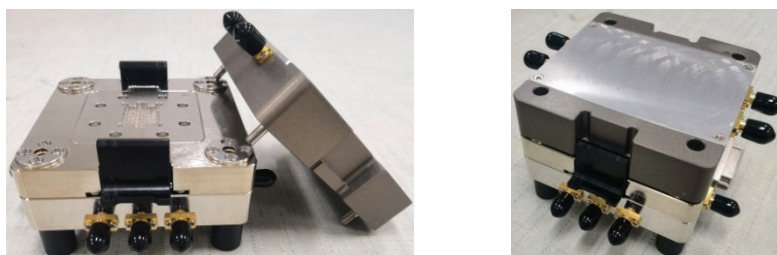


图 14 测试夹具实物照片
Fig. 14 Photos of the test fixture

为获取样品的电性能,使用中国电科 41 所 3672E 型矢量网络分析仪进行分析测试,图 15 为模块单个通道在不同衰减量下的增益曲线及端口回波损耗测试结果。从测试曲线中可见,在 19 GHz ~ 21 GHz 工作频段,基态时,模块的总增益 ≥ 18 dB,端口回波损耗 ≤ -15 dB。图 16 为基本移相态的测试结果,工作频段范围内的移相 RMS 误差小于 5° 。

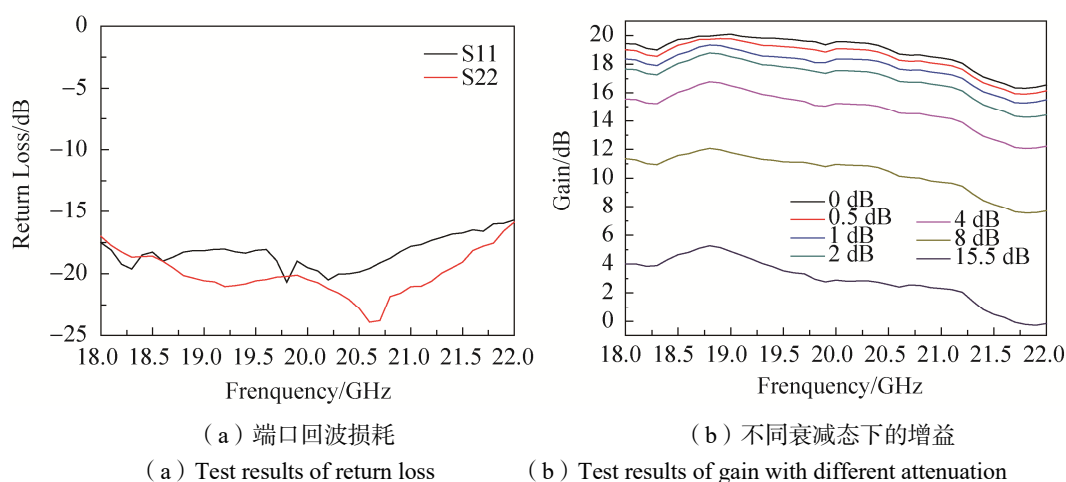


图 15 不同衰减态下的增益曲线及端口回波损耗
Fig. 15 Test results of return loss and gain with different attenuation

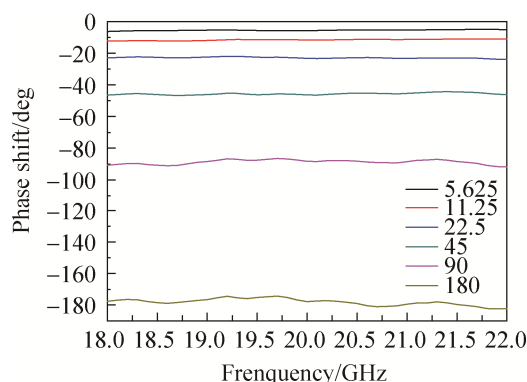


图 16 不同相移下的测试曲线
Fig. 16 Test results of different phase shift

6 结束语

本文设计了一种基于硅基 MEMS 三维集成技术的片式多波束发射前端,采用硅基 MEMS 封装工艺、高精度微组装工艺,实现了 8 波束 32 通道片式发射前端的高密度三维异构集成,通过 TSV 类同轴、BGA 类同轴、硅基传输线等传输结构,实现了微波信号在多层封装堆叠结构中的低损耗垂直传输,保证了器

件的微波性能。硅基 MEMS 三维异构集成技术为多波束发射/接收相控阵的小型化提供了新思路, 具有广泛的应用前景。

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: 2–10.
- [2] 李太波, 张洋. 提高多波束发射阵合成效率的方法分析[J]. 电子信息对抗技术, 2009, 24(1): 66–69.
LI Taibo, ZHANG Yang. Analysis of methods for improving synthesis efficiency of multi-beam transmitting array[J]. Electronic Information Warfare Technology, 2009, 24(1): 66–69.
- [3] 付佳辉, 吴群, 顾学迈, 等. 射频 MEMS 封装技术[J]. 电子器件, 2004, 27(1): 207–210.
Fu Jiahui, Wu Qun, Gu Xuemai, et al. RF MEMS Package Technology in Wireless Systems[J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2004, 27(1): 207–210.
- [4] 张卓, 汪学方, 王宇哲, 等. MEMS 圆片级真空封装金硅键合工艺研究[J]. 电子与封装, 2011, 11(1): 1–4.
Zhang Zhuo, Wang Xuefang, Wang Yuzhe, et al. Study on Au-Si Bonding of Wafer Level MEMS Vacuum Packaging[J]. Electronics & Packaging, 2011, 11(1): 1–4.
- [5] 王宇哲, 汪学方, 徐明海, 等. 应用于 MEMS 封装的 TSV 工艺研究[J]. 微纳电子技术, 2012, 49(1): 62–67.
Wang Yuzhe, Wang Xuefang, Xu Minghai, et al. Research of TSV Technology for MEMS Packaging[J]. Micronanoelectronic Technology, 2012, 49(1): 62–67.
- [6] JANG D M, RYU C, LEE K Y, et al. Develop and evaluation of 3-D SiP with vertically interconnected through silicon via (TSV) [C]//Proceeding of IEEE Electronic Components and Technology Conference, Reno, NV, USA, 2007: 847–852.
- [7] Liu E D, Wu H J, Zhao Y Z. Design of Phase ARRAY T/R Component Microsystem Based on Heterogeneous Integration Technology[C]//Journal of Physics: Conference Series, vol. 1325, 2019: 1–7.
- [8] Zhao Y Z, Wang S D. A Novel 3D T/R Module With MEMS Technology[C]//2016 IEEE International Conference on Integrated Circuits and Microsystems, 2016: 286–289.
- [9] Zhao Y Z. A Novel Dual Channel Receive Front-end Module with MEMS Technology[C]//2018 Joint IEEE EMC & APEMC, June 22, 2018: 674–677.
- [10] 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.
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.
- [11] Lin Y J, Chen K, Linda Chua, et al. Advanced 3D eWLB-PoP (Embedded Wafer Level Ball Grid Array-Package on Package) Technology[C]// IEEE 66th Electronic Components and Technology Conference (ECTC), 31 May-3 June, 2016: 1772–1777.
- [12] Lee J.Y, Lee S.K, Park J.H. Fabrication of Void-free Copper Filled Through-glass-via For Wafer-level RF MEMS Packaging [J]//ELECTRONICS LETTERS, 2012, 48(17): 1–5.
- [13] Psychogiou D, Yang Z A, Peroulis D, et al. RF MEMS enabled power divider with arbitrary power division ratio[C]//Proceedings of the 42nd European Microwave Conference, Amsterdam, Netherlands. 2012: 53–56.

[作者简介]

赵宇 1984 年生, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为射频微系统集成技术。

赵玛利 1985 年生, 博士, 工程师, 主要研究方向为微波射频电路设计。

赵永志 1984 年生, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为微波电路设计及硅基 MEMS 封装工艺研发。

张梦娇 1990 年生, 硕士, 工程师, 主要研究方向为射频微系统数字电路设计。

王佳 1996 年生, 本科, 工程师, 主要研究方向为射频微系统数字电路设计。

李美苓 1987 年生, 硕士, 工程师, 主要研究方向为微波电路设计。

吴洪江 1963 年生, 本科, 研究员, 主要研究方向为微波毫米波芯片及器件。

(本文编辑: 潘三英)