

Ka-K 波段收发模块的 3D 系统级封装(SiP)设计

汪 鑫^{1,2,3}, 刘丰满^{1,2}, 吴 鹏^{1,2,3}, 王启东^{1,2}, 曹立强^{1,2,3}

(1 中国科学院 微电子研究所, 北京 100029; 2 华进半导体封装先导技术研发中心有限公司, 江苏 无锡 214135; 3 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 介绍了一种基于有机基板堆叠的高密度多芯片模块的新型三维系统封装(SiP)设计. 该模块是工作在 Ka 波段(发射)和 K 波段(接收)的 SiP. 有机基板通过球栅阵列(BGA)堆叠, 将收发模块与两个不同频段的天线集成在一起. 对于有源芯片部分, 包括单片式微波集成电路(MMIC)互连的邦定线设计, 电磁辐射隔离和大功率芯片的散热处理; 对于无源元件部分, 主要包括微带式带通选频滤波器, DC-AC 隔离块和天线设计. 该系统把收发天线也集成在了毫米波前端里, 系统具有多频段、小型化、低轮廓、高增益的优势, 在未来毫米波无线通信系统中具有广阔的应用前景.

关键词: 毫米波前端; 多芯片模块; 堆叠式贴片天线; 系统级封装

中图分类号: TN4 文献标识码: A 文章编号: 1000-7180(2017)08-0113-05

Design and Implementation of a Ka-K Band Receiver Andtransmitter 3D SiP Module

WANG Xin^{1,2,3}, LIU Feng-man^{1,2}, WU Peng^{1,2,3},
WANG Qi-dong^{1,2}, CAO Li-qiang^{1,2,3}

(1 Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;
2 Nation Center for Advanced Packaging(NACP), Wuxi 214315, China; 3 University of
Chinese Academy of Sciences(UCAS), Beijing 100049, China)

Abstract: This paper demonstrates the three-dimensional system in package (SiP) design for high-density multi-chip modules based on organic substrate stacking. TheSiPmodule is operating in Ka-band (transmit) and K-band (receive). The organic substrate is stacked with a ball grid array (BGA) to integrate the transceiver module with the two frequency band antennas. For the active-chip part, the bonding wire design, the electromagnetic radiation isolation and the heat treatment of the high-power chip are the focus of this paper. For the passive components, including microstrip bandpass filter, DC-AC isolation block and antenna design. The system has a multi-band, miniaturization, low profile, high gain advantage, in the future millimeter-wave wireless communication system has broad application prospects.

Key words: millimeter-wave front-end; multi-chip module; stacked patch antenna; SiP

1 引言

工作在 Ka 和 K 波段的毫米波前端的收发模块已广泛用于诸如卫星、军用或商用雷达的领域. 宽带宽和短波长使得该频段适合高速数据通信和高分辨

率图像扫描. 多芯片模块封装是毫米波前端的小型化、智能化的通用方法. 然而叠层设计需要实现阻抗匹配并优化邦定线长度以减少高频下的寄生效应. 基板的常用材料是低温共烧陶瓷(LTCC)、有机介质、铝. LTCC 由于良好的热导率, 低介电常数和腔

体制造的灵活性等优点,长期以来一直是微波和毫米波前端的首选材料^[1-4]. 然而其价格昂贵,在制造成本上不那么具有竞争力. 铝具有良好的热特性和可接受的信号衰减,也被用于毫米波前端,但很难实现系统集成^[5]. 有机基板由于热膨胀系数与印刷电路板匹配,以及廉价的制造价格,已广泛用于大批量的生产中^[6]. 本文选用 Rogers4350B 型号材料作为基板.

本文设计的是应用在商用卫星通信收发器的双频段测试模块.

2 系统框架

该系统是应用在商用卫星通信终端的测试模块,工作频段如表 1 所示. 该模块包含两个不同的信号链路(图 1),3D 图如图 2 所示. 在发射链路中,中频(IF)信号先通过数字可调衰减器(Attenuator)再与本振(LO)信号混频(Mixer). 上变频得到射频信号,然后通过两个滤波器(Filter)和一个放大器(Amp)放大. 为了覆盖足够大的距离,射频信号由功率放大器(PA)进一步放大,然后由天线发射出去. 由于发射链路很容易受到雨,雾等天气的影响^[7]. 于是增加功率检测器(Power Detector)来控制数字可调衰减器以调节输出功率,来减小天气因素影响. 在接收链路中,高频信号首先经过一级低噪声放大器(LNA),然后经过带通滤波,最终到达混频器的 RF 端口与本振(LO)信号进行下变频,得到中频(IF)信号.

表 1 收发器模块的频段

分类	频段(带宽)	特点
发射部分	19.4~21 GHz (1.6 GHz)	K-band
接收部分	29.4~31 GHz (1.6 GHz)	Ka-band

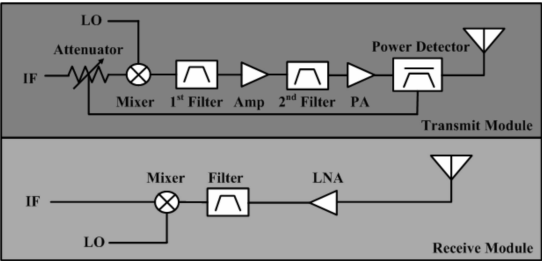


图 1 收发器模块的系统框图

3 有源芯片设计

3.1 邦定线设计

对于 MMIC 芯片的组装,本文提出了挖腔的方法,即在基板的表面用激光刻蚀出一个腔体,用来放

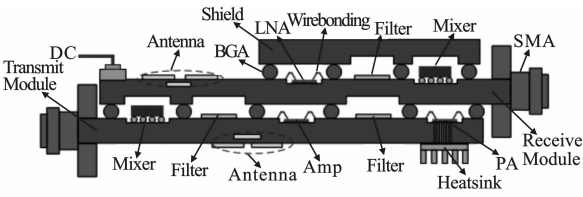


图 2 收发器模块 3D 示意图

置芯片然后通过邦定线与其他芯片实现互连,实现邦定线长度最小. 从图 3 所示的仿真结果可以看出,较长的邦定线插入损耗较大. 综合 S11 和 S21 曲线可以看出,插入损耗(S21)增加而回波损耗(S11)没有太大变化,因此大部分的信号能量是在邦定线上损耗掉了. 本文邦定线设计主要是在基板中合理设计腔体大小,以 PA 为例,设计了一个 3.6 mm×1.9 mm×0.1 mm 腔体(PA 尺寸为 3.4 mm×1.7 mm×0.07 mm),用电银胶使芯片与基板相连,用邦定线实现基板线条与芯片焊盘互连(图 4),把 PA 芯片直接放在腔体,基本上与基板持平,这样基板和 MMIC 之间的邦定线的长度可以大大缩短,减小损耗.

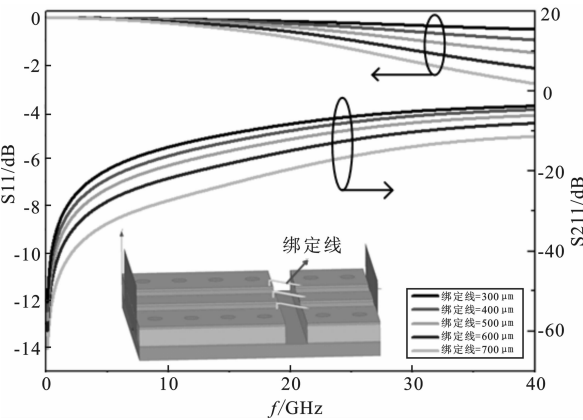


图 3 不同长度邦定线的 S11、S21 参数

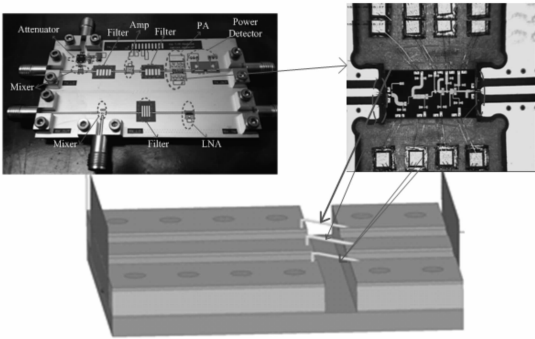


图 4 收发器模块实物图 MMIC 上的邦定线

3.2 BGA 球隔离

随着多芯片和无源器件的集成度越来越高,电磁干扰问题的处理在设计中也越凸显其重要性.当屏蔽结构覆盖在芯片和传输线上方时,将在不同功能 MMIC 中产生自谐振. BGA 球尺寸的选择需要不影响信号传输和耦合线带通滤波器的功能.在基板上,设计合适的通孔柱,以消除基板所耦合的高频噪声(图 5).对于自谐振问题,凸起尺寸应该被最小化以防止在此形成高阶电磁波模式.凸起尺寸可以从矩形波导模式公式计算,因为是 BGA 焊球组成的侧壁,于是本文引入了等效模型.确定谐振频率的更容易的方法是利用全波电磁场仿真(HFSS)软件.图 6 所示为利用 HFSS 仿真模拟的屏蔽结构对信号传输的影响.

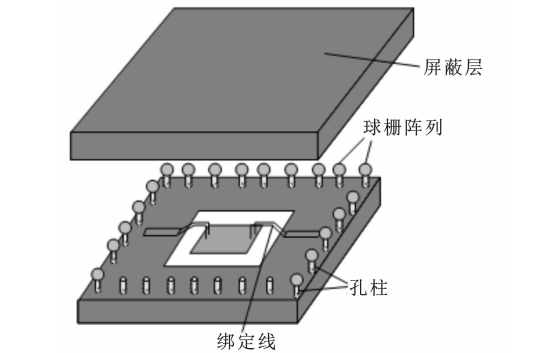


图 5 基板上的 BGA 球栅阵列

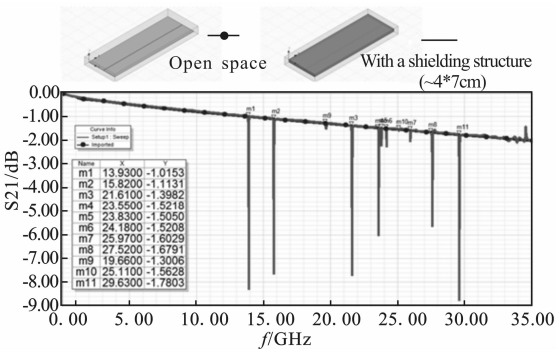


图 6 有无屏蔽结构时自谐振的 S21

从仿真结果可以看出,对于基板上的传输线,对于 4 cm×7 cm 的屏蔽罩,腔体中出现了谐振模式,从而传输性能在谐振频率处急剧恶化,其中部分频点处的插入损耗高达-7 dB,因此,在加入屏蔽结构时,需要优化屏蔽结构的尺寸,使最小的谐振频率高于系统的工作频段.

3.3 散热结构设计

随着系统越来越小、集成度越来越高,系统的整

体功率会越来越大,热管理的问题就不可以忽视.本文设计的毫米波收发模块包含几颗大功率芯片,如表 2 所示,功率放大器是该模块的重要热源,且接收部分的整体功率远低于发送部分的功率.因此在设计时,将较高功率的发射部分放置在底层上,另外安装一个热沉在功率放大器芯片正下方.在 PA 的位置下方的基底上打通孔并填铜,以此来增加热导率.芯片底部通过热孔直接与热沉连接,形成良好和高效的散热路径(图 7).

表 2 MMIC 各芯片的功率

模块	MMIC 种类	功率/mW	总和/mW
发射部分	衰减器	5	1 720
	放大器	275	
	功率放大器(PA)	1 440	
接收部分	低噪声放大器(LNA)	220	220

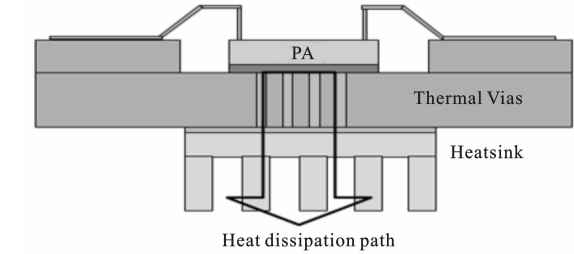


图 7 功率放大器(PA)散热结构

4 无源器件的设计

4.1 滤波器设计

本文设计的是耦合微带式的带通滤波器,选用低损耗板材 Rogers4350B 作为基板,保证了滤波器的低带内损耗.滤波器的带长约为信号波长的一半.对于发射部分,在 Ka 频段上设计了五阶带通滤波器,3 dB 带宽为 1.6 GHz,带内插入损耗为-3.8 dB,在 27 GHz 时的带外抑制为-27 dBc,满足系统设计要求.对于接收部分,四阶滤波器足以检测到 K 频带的弱接收信号,四阶滤波器 3 dB 带宽为 1.6 GHz,带内插入损耗为-2.8 dB,在 17.4 GHz 时的带外抑制为-24 dBc.仿真结果如图 8 所示.

4.2 DC-AC 模块

在发射链路的末端使用功率检测器来检测输出信号的功率.选用 Avago 公司工作在 Ka 频段的 SMT 封装的探测芯片.在芯片的一端需要直流偏置电压,而在另一端检测电压大小(图 9a)^[8].为了减小 DC 偏压和功率检测对 RF 链路信号的影响,采

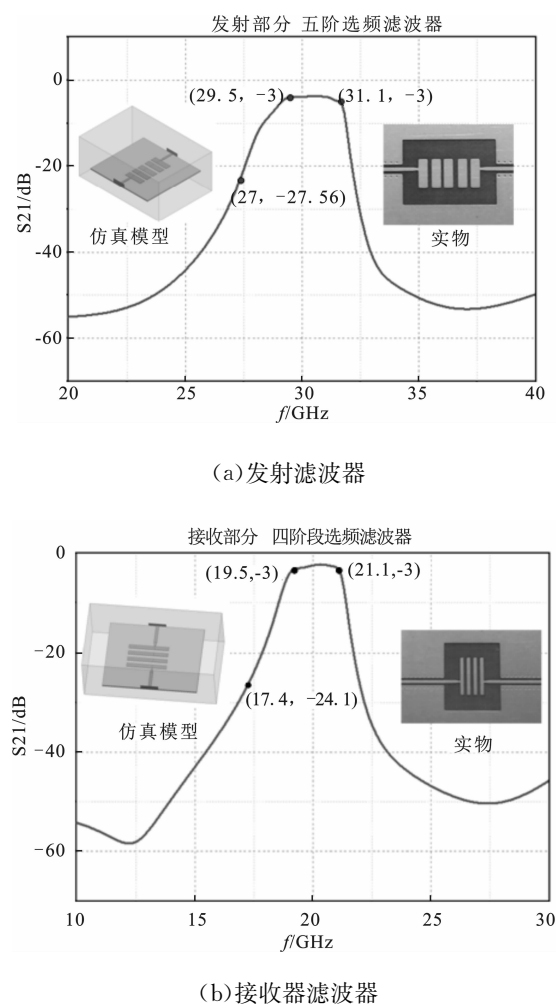


图 8 发射滤波器与接收器滤波效果

用在基板上设计扇形结构 DC-AC 模块. 模型及仿真结果如图 9(b)所示. 从 S31 曲线中可以看出, 在 29.4~31 GHz 的工作频段, 直流信号与 RF 信号的隔离度小于 -40 dB. 从 S21 曲线可以看出该频段插入损耗小于 0.2 dB, 可以看出直流偏置和检测对 RF 信号传输的影响非常小, 满足系统设计要求.

4.3 天线设计

本系统还在基板上设计了一种堆叠式贴片天线, 用于实现天线和微波前端的整体集成. 对于该宽频带收发模块, 普通贴片天线的带宽通常只有 5% 的相对带宽, 达不到该系统的带宽要求. 堆叠式贴片天线已被发现具有宽带宽和高增益的优点^[6]. 本文设计的堆叠式贴片天线, 由底部的微带方式馈入信号到下层贴片天线中, 并由顶部的四个贴片进一步辐射出去 (图 10a). 如图 10(b)所示, 在 S11 = -15 dB (VSWR=1.5) 时, 30 GHz 堆叠式贴片天线的相对带宽为 35.1%, 20 GHz 天线增益为 6.7 dBi, 30 GHz 天线增益为 7.6 dBi.

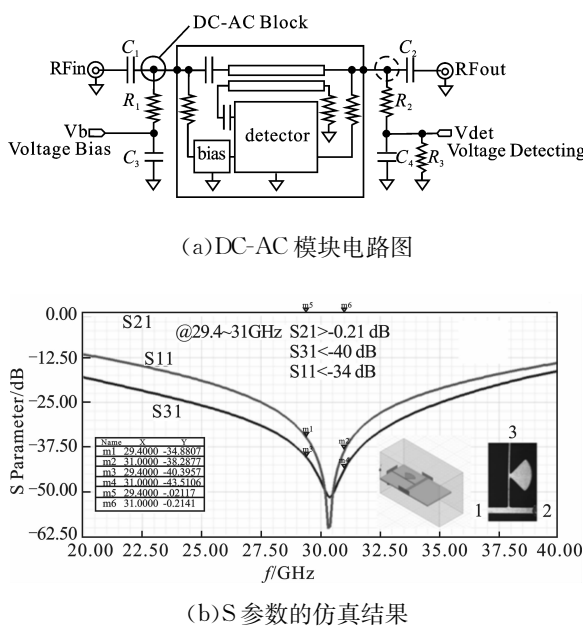


图 9 DC-AC 模块电路图与 S 参数的仿真结果

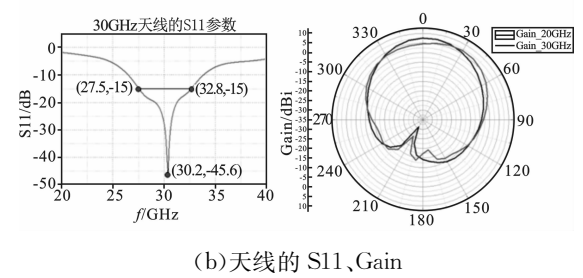
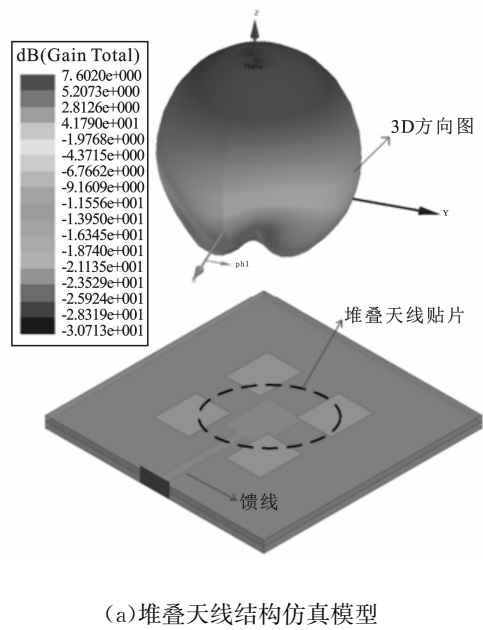


图 10 堆叠天线结构仿真模型与 S11、Gain

5 结束语

对于毫米波前端来说, 封装设计是其中一个关键的步骤, 需要考虑很多因素. 本文介绍了一种基于

有机基板的双频段收发系统模块 SiP 的设计方案,在这个系统中集成了有源和无源的器件.对于有源芯片,通过激光蚀刻腔体以扩大 SMD 封装芯片的空间并缩短 MMIC 的邦定线. BGA 球、阵列通孔设计用于互连及电磁隔离,整体屏蔽结构的尺寸需要优化,避免形成谐振模式,从而消除自谐振对系统微波信号的影响.在大功率放大器芯片正下方使用热孔和热沉构造良好的散热路径.对于无源元件,在基板上设计耦合微带滤波器,DC-AC 模块,堆叠式的贴片天线.发射部分的五阶滤波器 3 dB 带宽为 1.6 GHz,带内插入损耗为-3.8 dB,在 27 GHz 时的带外抑制为-27 dBc. 30 GHz 天线的相对带宽(VSWR=1.5)达到了 35.1%,增益达到了 6.7 dBi,达到了系统要求.在未来毫米波无线通信系统中具有广阔的应用前景.

参考文献:

- [1] Weng C C, Chang C F, Chung S J. Development of a compact low-temperature co-fired ceramic antenna front-end module[J]. Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on, 2008 ,56:2483-2492.
- [2] Lee Y C, Chang W I, Park C S. Monolithic LTCC SiP transmitter for 60GHz wireless communication terminals Microwave Symposium Digest[C] // 2005 IEEE MTT-S International, IEEE,2005: 1015-1018.
- [3] Xu Z Q, Xia H, Wang P, et al. A LTCC cavity filter for MMW transceiver module application [C] // 2011 International Conference on. Chengdu, 2011:627-630.
- [4] Chin S, Chang CC, Chen C H, et al. LTCC multilayered substrate-integrated waveguide filter with enhanced frequency selectivity for system-in package Applications,[J]. IEEE Transactions on Components,

Packaging and Manufacturing Technology, 2013, 4 (4): 664-672.

- [5] Meniconi E, Ziegler V, Sorrentino R, et al. 3D integration technologies for a planar dual band active array in ka-band[C] // Microwave Conference (EuMC), 2013 European. IEEE,2013: 215-218.
- [6] Yeo S K, Chun J H, Kwon Y S. A 3-D X-Band T/R module package with an anodized aluminum multilayer substrate for phased array radar applications[J]. Advanced Packaging, IEEE Transactions on, 2010, 33: 883-891.
- [7] Evans J V. Proposed US global satellite systems operating at Ka-band[C] // Aerospace Conference, 1998. IEEE, 1998: 525-537.
- [8] Holzwarth S, Kulke R, Kassner J. Integrated stacked patch antenna array on LTCC material operating at 24 GHz [automotive radar applications] [C] // Antennas and Propagation Society International Symposium, 2004. IEEE, 2004:1583-1586.

作者简介:

汪鑫女(土家族),(1989-),硕士.研究方向为毫米波天线设计及与射频前端的系统封装集成.

E-mail:wangxin1@ime.ac.cn.

刘丰满男,(1980-),副研究员.研究方向为光电集成、射频封装和 MEMS 封装.

吴鹏男,(1989-),博士.研究方向为高频高速电子系统级封装技术、阵列式摄像模组封装技术及电路系统小型化.

王启东男(回族),(1983-),副研究员.研究方向为系统封装和高速互连.

曹立强男,(1974-),研究员.研究方向为系统级封装和先进封装的有限元建模.

(上接第 112 页)

- [6] 周鹏,车进,张英.基于 CVUT 的双目视觉图像三维信息构建[J].宁夏大学学报(自然版),2016,37(3): 306-310.
- [7] 刘一凡,蔡振江,索雪松.基于基础矩阵与 HEIV 模型的双目相机标定[J].电子测量与仪器学报,2016,30(9):1425-1431.
- [8] 魏迎梅,康来.基于单视点调节相机模型的水下图像三维重构[J].北京航空航天大学学报,2015,41(11): 2017-2022.
- [9] 江国威,李成龙,汤进,等.基于三目视觉的红外热像仪

标定方法[J].计算机应用与软件,2015,32(1): 136-138.

- [10] 黄伟光,董安国,HuangWeiguang,等.基于粒子群算法的摄像机自标定[J].计算机应用与软件,2015,32(5): 216-219.

作者简介:

茹金平女,(1980-),讲师.研究方向为计算机应用、平面设计. E-mail:rujinping@yahoo.cn.