

封装天线技术最新进展

Recent Advances in Antenna-in-Package Technology

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2018) 05-0047-07

摘要: 封装天线(AiP)是基于封装材料与工艺,将天线与芯片集成在封装内实现系统级无线功能的一门技术。AiP技术顺应了硅基半导体工艺集成度提高的潮流,为系统级无线芯片提供了良好的天线与封装解决方案。最新权威市场分析报告断言: AiP技术会是毫米波5G通信与汽车雷达芯片必选的一项技术,所以AiP技术最近受到广泛重视,取得了许多重要进展。尝试全方位总结AiP技术在过去不到1年的时间内所获得的最新成果,内容包括新材料、新工艺、新设计、新测试等方面。

关键词: 封装天线;毫米波;无线通信;汽车雷达;物联网

Abstract: Antenna-in-Package (AiP) technology is an antenna solution technology that implements an antenna or antennas on (or in) an integrated circuit (IC) package that can carry a highly-integrated radio or radar transceiver die (or dies). Keeping with the trend of silicon semiconductor technologies, AiP technology provides elegant antenna solutions to radio-frequency system-on-chip. A market analysis report concludes that AiP technology is a need rather than an option for millimeter-wave 5G and automotive radars. Hence, AiP technology has received much attention and made great progress very recently. This paper aims to provide a comprehensive summary of the latest achievement in the development of AiP technology, including new materials and processes, design methods, and testing strategies.

Key words: antenna-in-package; millimeter wave; wireless communications; car radar; Internet of things (IoT)

张跃平/ZHANG Yueping

(南洋理工大学,新加坡 639798)
(Nanyang Technological University,
Singapore 639798, Singapore)

户要求进行定制。卷料、裁剪好的方形片料可供客户选择^[2]。

有机材料在高密度互连(HDI)工艺中得到广泛应用,它的种类很多,例如:玻璃纤维环氧树脂(FR4)、液晶聚合物(LCP)、陶瓷填充聚四氟乙烯(RO4000)等^[3-5]。在这些有机材料中,LCP具有良好的介质特性,标称介电常数为2.9,损耗角正切为0.003,非常适合于设计封装天线,而FR4则具有成本低廉的优势。

模塑化合物是晶圆级扇出式封装(FOWLP)工艺中再造晶圆的必需材料,近期也被尝试用于封装天线的设计上^[6-8]。表1是2种模塑化合物的介电常数及损耗角正切:第1种模塑化合物的相关值是通过谐振法在24~36 GHz频段提取出来的;第2种模塑化合物在不同频段相关值是通过自由空间法所得到的。从表1中可以看出:模塑化合物介电常数基本不随频率变化而变化,损耗角正切则随

▼表1 模塑化合物介电特性

频率/GHz	介电常数	损耗角正切
24 ~ 36	3.34	0.015
40 ~ 60	3.61	0.0045
75 ~ 110	3.62	0.0055
110 ~ 170	3.61	0.0090

作者于2017年发表的《封装天线技术发展历程回顾》一文讲述了封装天线(AiP)技术早期与蓝牙无线技术一起萌芽,中期与60 GHz无线技术及毫米波雷达一起成长,近期助力太赫兹、物联网(IoT)和5G移动通信发展历程^[1]。时间跨度从20世纪90年代末到2017年10月底,约20年。在文中作者指出: AiP技术开发正围绕着IoT及毫米波5G移动通信与汽车雷达芯片如火如荼地展开。到目前为止,已不断有新的成果出现。本文尝试全方位总结从2017年

10月以后到现在, AiP技术在材料、工艺、设计、测试等方面的新进展。

1 AiP的材料

封装天线介质材料主要有陶瓷、有机、模塑化合物3种,导体材料有金、银、铜3种。陶瓷材料是低温共烧陶瓷(LTCC)工艺必用的,典型代表是Ferro A6系列。最近,中国量子汇景公司属下晶材科技开发的陶瓷材料MG60介电常数为 5.9 ± 0.2 ,损耗角正切大约0.002,具有可与Ferro A6相媲美的特性,但是价格却相对低廉。MG60的生瓷带标准厚度约为120 μm ,标准宽幅规格为15.24 cm(6英寸),20.32 cm(8英寸);可依据客

收稿日期: 2018-07-27
网络出版日期: 2018-09-26

频率升高而增加。此外,在晶圆级扇出式封装工艺中还需用到聚合物介质,它的介电常数与模塑化合物相近,但损耗角正切一般高一个量级。

最近,无机材料如玻璃也逐渐尝试着被用在 HDI 工艺中作为封装天线的核心层介质材料。玻璃标称介电常数为 3,损耗角正切很小。研究发现:玻璃不仅比传统的核心层有机介质材料更加稳固,不易翘曲,而且可以做得更薄(30~100 μm)、更光滑^[9]。这样的特性非常有利于其支撑的其他电路层来实现更加良好的电性能。

2 AiP 的工艺

AiP 工艺主要有 LTCC、HDI 及 FOWLP3 种。LTCC 工艺是由 IBM 公司于 20 世纪 70 年代初为其大型计算机芯片封装而开发的,后来经过多家公司历经几十年的发展,目前已经相当成熟,中国有多家公司及研究所提供 LTCC 加工服务。

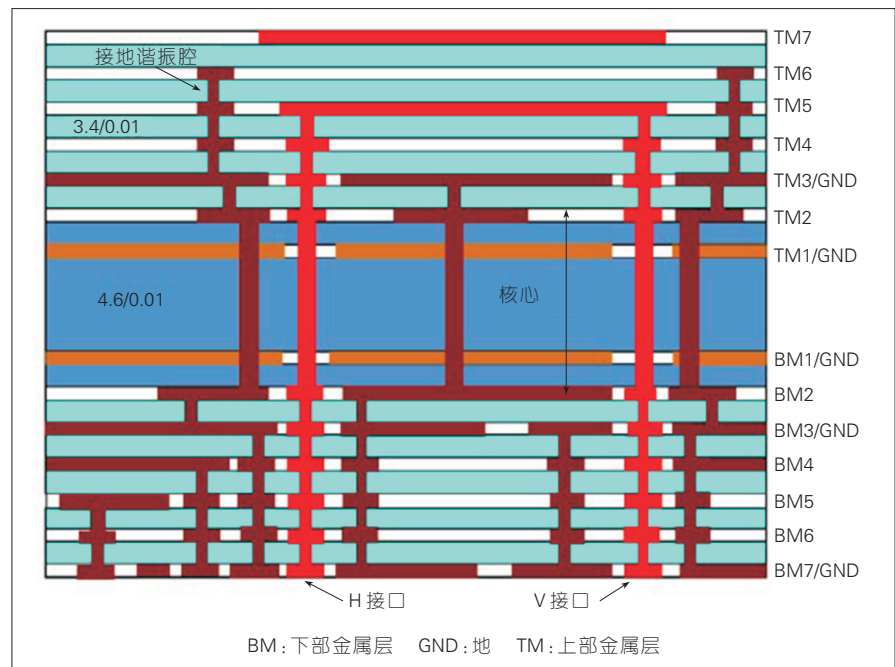
HDI 工艺已被许多公司用于开发毫米波封装天线^[1]。图 1^[10]所示的是 IBM 公司为毫米波 5G 通信系统开发的、基于 HDI 工艺的 AiP 结构剖面图。它由 1 个核心层与上下对称的各 5 个介质层及 6 个金属层相互叠加构成,厚度为 1.61 mm。此外,LG 与高通公司也分别发表了它们基于 HDI 工艺为毫米波 5G 通信系统开发的封装天线。LG 公司的 AiP 由 1 个核心层与上下对称的各 4 个介质层及 4 个金属层相互叠加构成,厚度为 0.8 mm^[11]。高通公司的 AiP 由 1 个核心层与上下对称的各 3 个介质层及 4 个金属层相互叠加构成,厚度略小于 1.1 mm^[12]。

如图 1 所示,传统 HDI 工艺核心层采用有机介质材料,为了防止整个结构发生翘曲,核心层厚度最少需要 400 μm。线宽与线距(L/S)取决于介质层及金属层的厚度,目前典型值 L/S = 50/50 μm。美国佐治亚理工学院系统级封装卓越研究中心研究人员

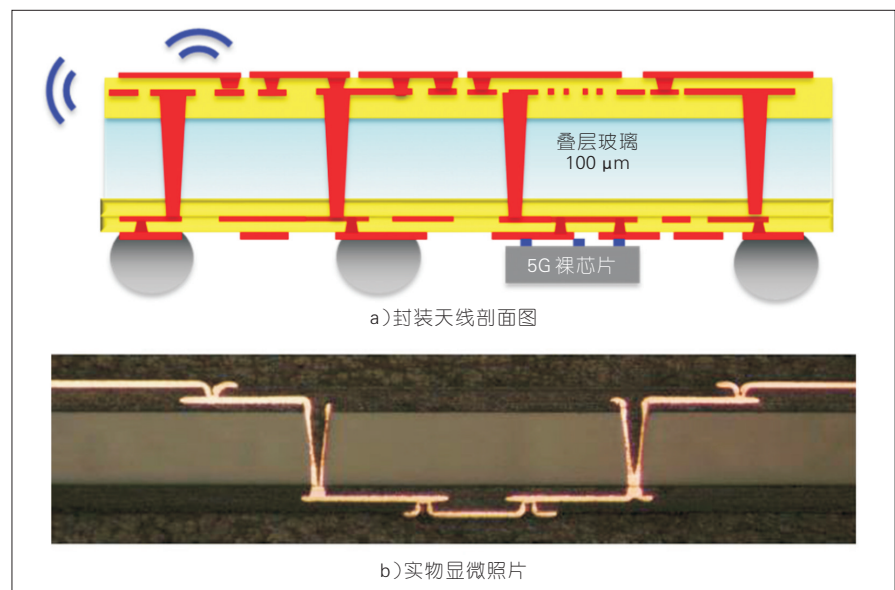
建议核心层采用无机介质材料玻璃,厚度 100 μm 就可以,而且在上下叠加层中金属线宽与线距可以做得更细,传输损耗可以更小。图 2 所示的是核心层采用玻璃及上下叠加层中金属走线的剖面图及实物照片^[9]。

再如图 1 所示,传统 HDI 工艺为了防止整个结构发生翘曲,在核心层上下实行平衡式布局叠加层。矽品

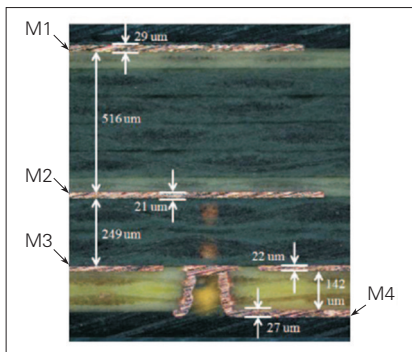
公司工程师建议增加核心层厚度实现叠加层非平衡式布局以利于低成本量产毫米波 5G 通信用户终端 AiP。图 3 是矽品公司毫米波汽车雷达 AiP 剖面图实物显微照片。如图 3 所示,AiP 由 4 层金属及 3 层介质构成。金属层 1—4 分别用来实现被动微带天线片、主动微带天线片、封装天线地及封装天线馈电网络。馈电



▲ 图 1 IBM 公司基于高密度互连工艺的封装天线结构剖面图



▲ 图 2 美国佐治亚理工基于玻璃核心层的封装天线剖面图及实物显微照片



▲图3 矽品公司毫米波汽车雷达封装天线剖面图实物显微照片

网络与主动微带天线片互连通过盲孔实现^[13]。

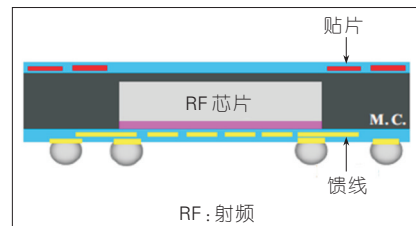
FOWLP工艺不同于LTCC或HDI工艺,它不再需要叠层基片,转而是用模塑化合物、重新配置金属与介质层代替。FOWLP工艺最早是由英飞凌公司研发的,被称为嵌入式晶圆级封装工艺(eWLB)。图4所示的是焊接在系统印制电路板(PCB)板上的eWLB工艺可以实现的封装结构。一般情况下,裸芯片被嵌入在厚度为450 μm,介电常数为3.2,损耗角正切为0.004的模塑化合物中。保护层厚度为35 μm,介电常数为3.2,损耗角正切为0.004。在裸芯片的扇入区以及封装的扇出区涂有介质层D1,起到保护裸芯片的作用,D1层的厚度为6.5 μm,介电常数为3.2,损耗角正切为0.035。重新配置的导体层

(RDL)是沉积厚度为7.5 μm的铜,用于实现连接线或天线。阻焊掩模层D2用于定义焊球的着落焊盘,其厚度为9.5 μm,介电常数为3.2,损耗角正切为0.035。目前使用的焊球直径为0.3 mm,间距为0.5 mm。谷歌公司的60 GHz手势雷达第1以及第2版的芯片都采用了基于eWLB工艺设计的AiP。

显然eWLB工艺因为仅有1层金属,不利于AiP天线设计。为了使得FOWLP工艺适合于AiP设计,台湾积体电路制造股份有限公司(简称为台积电)开发出的InFO-AiP技术在模塑化合物上面增加了一层金属。如图5所示,微带天线辐射片由模塑化合物上面增加的那一层金属实现,微带天线地、馈线及耦合槽则在RDL金属层来实现^[16]。

新加坡微电子研究院(IME)在eWLB的基础上增加了一层模塑化合物、一层金属及穿过原来模塑化合物与RDL相连的盲孔(TMV)实现毫米波AiP设计。图6展示了在eWLB的基础上增加的工艺流程及实现了的AiP实物剖面显微照片^[17]。

日月光集团开发的低成本先进的单边基片(aS³-AiP)工艺强调采用普通封装设备及超薄双层金属基片取代FOWLP介质及RDL层^[18]。这样不仅成本较低,而且过度损耗可与



▲图5 InFO-AiP结构剖面图

FOWLP媲美,在77 GHz汽车雷达应用方面具有价格与性能优势。

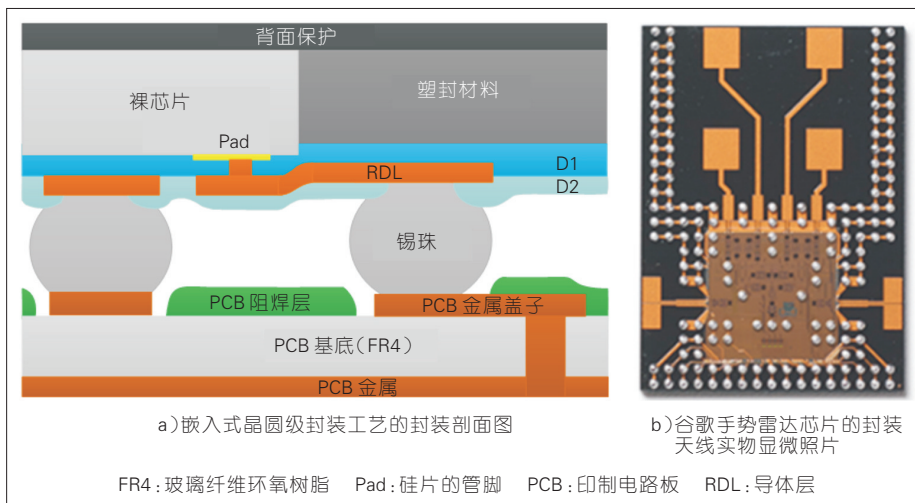
3 AiP的设计

AiP设计需要考虑到系统、电路、天线、封装、互连等多个方面。限于篇幅,本节仅介绍AiP设计中的天线部分,并且主要讲述最新发展出的叠层微带天线设计与优化方法。

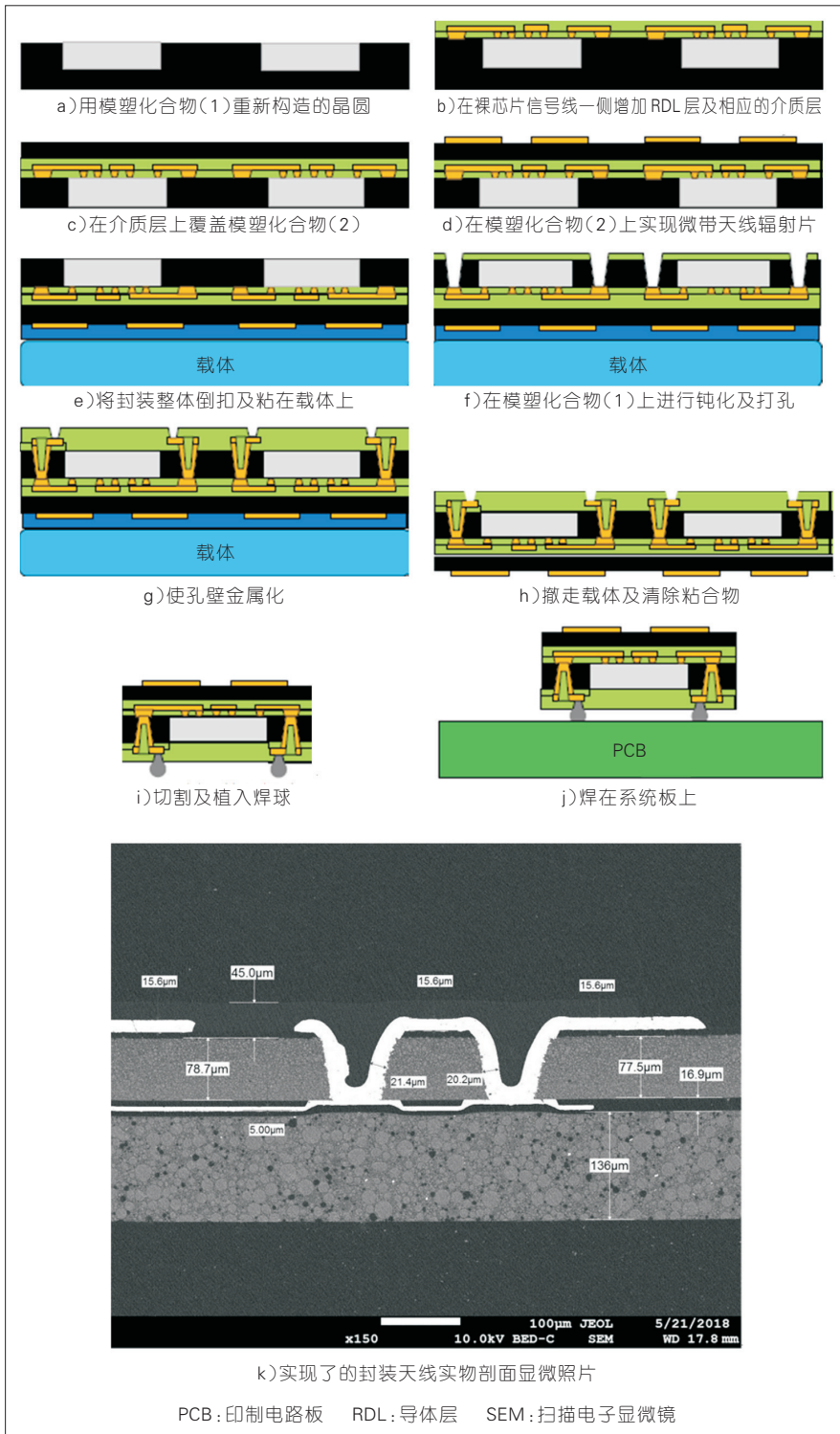
叠层微带天线可以设计成双频带或宽频带天线。双频带设计由LONG S A等人于1978年发表在《1978天线与传播国际会议论文集》上^[19]。宽频带设计^[20]由HALL P S等人于1979年发表在《电子学快报》中。后续对叠层微带天线的研究主要集中在进一步扩展宽频带叠层微带天线的带宽,例如:WATERHOUSE R B透露了高低介电常数基板搭配等增加带宽的设计技巧^[21]。刘章发等人^[22]给出了简单计算上下叠层贴片谐振频率的公式及增加带宽的方法。高式昌等人^[23]发明了新的双线极化槽耦合叠层微带天线,实现了宽带、高极化隔离度、低交叉极化及低后向辐射的良好性能。

叠层微带天线具有频带宽、波束宽、频域滤波、灵活实现单或双极化、方便静电保护、易于满足多层结构金属化密度要求及利于散热等优点,因而在AiP设计中得到广泛应用。最早将叠层微带天线引入到封装天线设计的是李融林等人^[24],他们提出的叠层微带天线设计指导原则对封装天线设计具有很高的参考价值。

叠层微带天线的上下层贴片分别和地之间构成了2个谐振频率不同的微带天线。一般通过选择尺寸



▲图4 嵌入式晶圆级封装工艺的封装剖面图及谷歌手势雷达芯片的封装天线实物显微照片



▲图6 IME在嵌入式晶圆级封装工艺的基础上增加的工艺流程及实现了的封装天线实物剖面显微照片

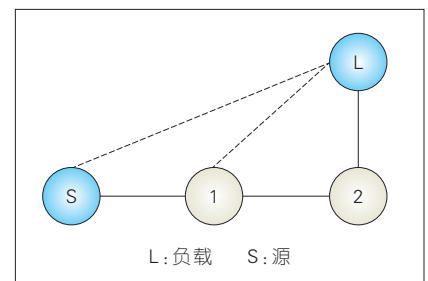
有稍微差异的上下层贴片,产生较为接近的2个谐振频率,达到拓宽频带的效果。此外,研究还发现叠层微带

天线在离开工作频带高段不远处的一个频点上,会出现电流在上下层贴片流向正好相反的状况,从而导致远

场区的辐射在此频点上互相抵消,辐射效率频谱曲线上出现了一个“传输”零点,叠层微带天线也就成为了一个名不副实的滤波器。

叠层微带天线可以更准确地被称为叠层微带滤波天线,它的拓扑结构如图7所示。图7中的辐射体2与1分别代表上下层贴片。馈电探针提供了源(S)与辐射体1之间的外部耦合,而源和负载(L)之间由于探针功率的外泄也存在微弱的耦合。辐射体1与2的辐射分别提供了它们到负载之间的耦合。辐射体1和辐射体2是通过它们之间的间隙进行耦合。

叠层微带天线设计常常遇到的问题是如何调控上下层贴片的谐振频率及二者间的耦合。文献[22]中给出的上下叠层贴片谐振频率的公式较好地解决了计算谐振频率的问题,但是上下叠层贴片之间耦合的问题一直困扰着设计者,没有能得到很好地解决。设计者通常都还是通过参数扫描来确定谐振频率与耦合,这样做存在着很大盲目性,常会遇到在2个谐振频率附近 $|S_{11}|$ 远低于-10 dB,但是在2个谐振频率中间某个频段 $|S_{11}|$ 不论如何调,总是高于-10 dB。目前,这一困扰天线设计者多时的耦合问题由上海交通大学毛军发院士团队的吴林晟博士指导研究生利用滤波器耦合矩阵理论解决了^[25]。吴林晟等人将叠层微带滤波天线看作一个二阶带通滤波器,天线的输入口当作滤波器的一个端口,天线远场辐射当作滤波器的另一个端口。众所周知二阶带通滤波器有一套成熟的设计方法,诊断与调试通过观测耦合矩



▲图7 叠层贴片天线的拓扑结构

阵来实现。那么现在的问题是如何获取叠层微带滤波天线的耦合矩阵?方法如下:

(1)通过全波仿真软件得到了叠层微带天线 S_{11} 和可实现辐射效率信息 h_{rad} ;

(2)去除 S_{11} 的群时延与相位加载之后在归一化的频域范围内用矢量拟合的方法得到 S_{11} 的表达式^[26-27];

(3)通过优化拟合 h_{rad} 可得到 S_{21} 的一组零点解。这样另外 2^N-1 组零点也能得到,其中 N_z 是 S_{21} 分子的阶数,暂时先选取其中一组解去进行后续的分析;

(4)使用文献[25]中公式得到 S_{22} 的留数,同时满足不等式时找到 S_{22} 常数项的范围,在所有可能的解中找到最接近于1的解;

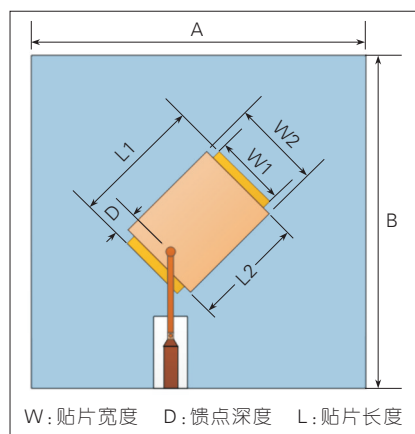
(5)从 2^N 组解中找到最终的结果,把 S_{22} 和 S_{21} 的相位加载效应去掉;

(6)把二端口的散射矩阵转换成导纳矩阵,然后得到耦合矩阵;

(7)计算出灵敏度矩阵,然后得到滤波天线新的几何尺寸;

(8)重复步骤(1)~(7),直到获得我们想要的频率响应。

图8是基于 Ferro A6M LTCC 材料与工艺设计的 45° 极化叠层微带天线结构。设计要求天线应具有 2 GHz 的带宽,以覆盖 5G 通信的 27.5 ~ 29.5 GHz 频段。设计时的初始值选取参考了文献[24]中的数据,诊断与调试根据上述方法来执行。我们发



▲图8 45° 极化叠层微带天线结构

现一般经过 3~5 个循环就可以达到设计目标。表2是具体的设计尺寸。

图9是 45° 极化叠层微带天线实物照片及设计与测试的 S_{11} 与增益频谱曲线。如图9所示,设计与测试结果吻合得非常好,这表明新方法不仅正确,而且可以提高设计效率^[28]。

上面提出的方法目前只用于二阶的上下叠层微带滤波天线,而实际的应用中可能面对更严苛的要求,比如:需要三阶的上中下叠层微带滤波天线,然而随着阶数的升高, S_{21} 分子的选择可能性就会呈现指数式的增长,所以对 S_{21} 分子零点的选取应该找一些更有力的依据,使其最好只能选取一种情况。同时对于 S_{22} 常数项的选取方法也需要一个严格的数学推导。

为了进一步提高 AiP 技术天线部分设计通用性及效率,上海交通大学毛军发院士团队成功地将蝙蝠优化算法在 Matlab 中实现,而且通过 Script 链接到高频电磁结构仿真软件 (HFSS) 对天线进行自动优化调试,取得了非常令人满意的结果。同样基于 Ferro A6M LTCC 材料与工艺,二阶的上下叠层微带滤波天线经过优

▼表2 45° 极化叠层微带天线设计尺寸

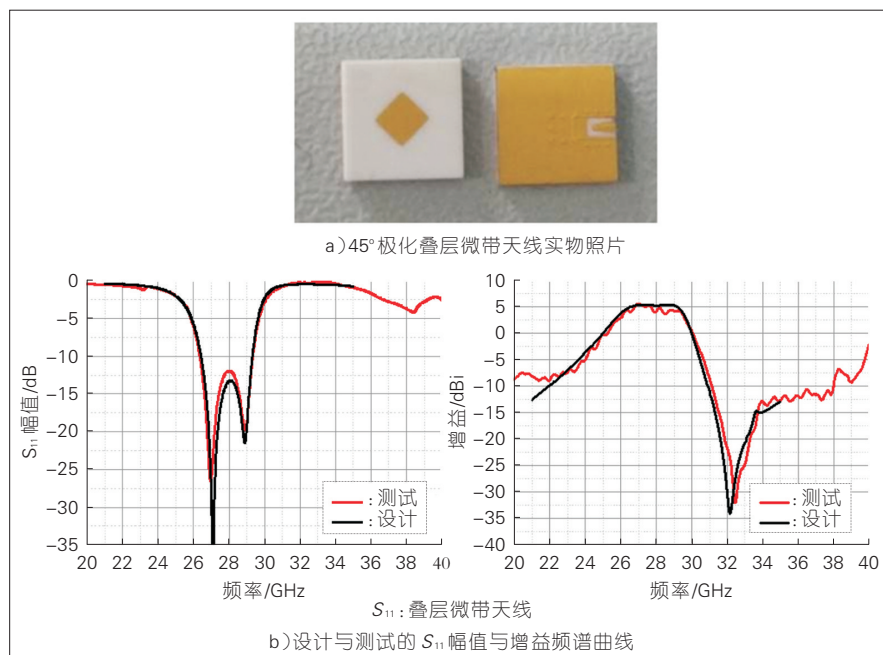
变量	值/mm
A	6
B	6
L1	1.928
L2	1.867
D	0.59
W1	0.79
W2	1.959
上下层贴片之间距离	0.384
下层贴片基板厚度	0.096

W: 贴片宽度 L: 贴片长度 B: 基板长度
D: 馈点深度 A: 基板宽度

化实现了 6 GHz 的带宽,覆盖 5G 通信的 24 ~ 30 GHz 频段。

4 AiP 的测试

测试是 AiP 技术非常重要的一环,目前 AiP 测试的重点已经由研发环境下仔细深入地测试与表征向生产阶段快速功能测试与系统级标准指标评估方面转移。研发环境下的 AiP 测试技术相对成熟,一般都采用在小型天线暗室中搭建的探针式测试平台上完成。图10是上海交通大学毛军发院士团队建成的集成天线



▲图9 45° 极化叠层微带天线实物照片及设计与测试的 S_{11} 幅值与增益频谱曲线

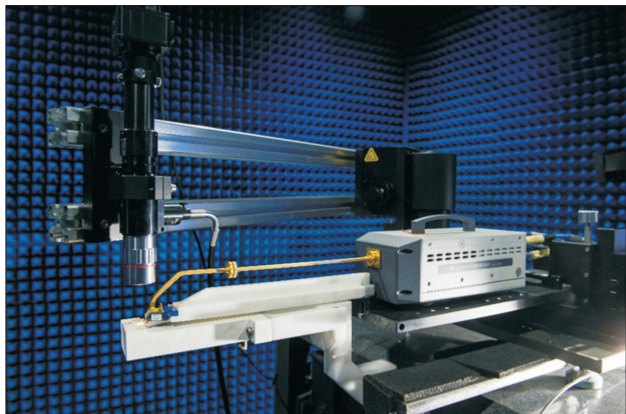


图10
上海交通大学集成天线
远场自动测试平台照片

远场自动测试平台照片。该测试平台可以完成从18~32.5GHz(为适应THz频段天线测试可扩展到500GHz或更高)片上天线及封装天线阻抗及辐射特性测试。平台支持探针及波导馈电,110GHz以下也可用同轴馈电,性能达到世界先进水平。平台自建成后,利用率相当高,已为中国多家科研院所的研究项目及公司产品开发提供了测试服务,极大地助进了中国在片上天线及封装天线方面的研究与发展。

但是,图10所示的测试平台并不适用于生产线上快速测试的要求。生产阶段快速测试与生产线所采用的封装工艺紧密相关。如果AiP采用HDI工艺制造,那么AiP本身可以进行独立的传导及空中下载技术(OTA)测试,芯片封装好以后还可以进行OTA测试。如果AiP采用FOWLP工艺制造,那么AiP本身已与芯片融为一体,仅可以进行OTA测试。生产线上AiP测试至少需要测试仪、操作仪、接触器、探头及天线暗室等仪器设备。测试仪与操作仪可以在已有的半导体封测设备上添加或扩充,天线暗室可以直接定制;但是在接触器与探头方面仍然面临许多挑战。美国Xcerra公司最近在为毫米波汽车雷达AiP测试方面开发接触器与探头方面取得进展,接触器工作频率可以到100GHz,适用于球形焊点阵列间距最小到0.3mm封装。此外,该公司也一直尝试将微

带天线嵌入到接触器中进行无线测量^[29]。

系统级指标评估是AiP已经安装在整机内,需要按照系统应用标准所进行的测试。目前这一方面的测试系统与方法已取得显著进展,这里不再赘述。

5 结束语

2018年注定是商用毫米波通信与雷达发展史上重要的一年,也会是毫米波5G通信发展里程碑式的一年,更会是奏响AiP技术进入海量应用序曲的一年。

我们发现开发适用于毫米波5G通信用户终端的AiP技术是目前大家最关注的热点。一些大公司正在不断地投入大量人力、物力开发适合于AiP设计的新材料和新工艺,旨在实现高辐射效率及低成本量产。反观传统的天线公司,由于缺乏芯片与封装方面的能力,正在考虑或尝试看看如何介入。我们还重点介绍了AiP技术在材料、工艺、设计、测试等方面的新进展:在材料方面,模塑化合物与玻璃受到关注。在HDI工艺方面,增加核心层厚度来实现非平衡式叠层布局,证明有利于低成本量产毫米波5G通信用户终端AiP;在FOWLP工艺方面,我们注意到为了更加灵活地实现高性能AiP,金属层在增加。设计方面是大学研究生可以着力的地方。上海交通大学毛军发院士团队最近在AiP设计方法上取得了新

成果,成功地将蝙蝠优化算法在Matlab中实现,而且通过Script链接到HFSS对天线进行自动优化。测试是AiP技术非常重要的一环,目前AiP测试的重点已经由研发环境下深入细致地测试与表征向生产阶段快速功能测试与系统级标准指标评估方面转移,将微带天线嵌入到接触器中进行无线测量是令人耳目一新及有意义的尝试。

致谢

本文的研究受到太原理工大学盛剑桓教授、香港中文大学黄振峰博士、香港中文大学程伯中教授、南洋理工大学杜茂安教授的大力支持,在此对他们表示感谢!

参考文献

- [1] 张跃平. 封装天线技术发展历程回顾[J]. 中兴通讯技术, 2017, 23(6): 41-49. DOI: 10.3969/j.issn.1009-6868.2017.06.010
- [2] Miracle Materials Technology. Information about LTCC [EB/OL]. [2018-07-27]. <http://www.miracle-tek.com/>
- [3] HONG W, BAEK K H, GOUDELEV A. Grid Assembly-Free 60-GHz Antenna Module Embedded in FR-4 Transceiver Carrier Board [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2013, 61(4): 1573-1580. DOI: 10.1109/tap.2012.2232635
- [4] KAMGAING T, ELSHERBINI A A, OSTER S N, et al. Low-Profile Fully Integrated 60 GHz 18 Element Phased Array on Multilayer Liquid Crystal Polymer Flip Chip Package[C]// 2015 IEEE 65th Electronic Components and Technology Conference (ECTC). USA: IEEE, 2015: 994-998. DOI: 10.1109/ECTC.2015.7159716
- [5] KAM D G, LIU D, NATARAJAN A, et al. Organic Packages with Embedded Phased-Array Antennas for 60-GHz Wireless Chipsets [J]. IEEE Trans. Compon. Packag. Manuf. Technol., 2011, 1(1): 1806-1814
- [6] HASEGAWA T, ABE H, IKEUCHI T. Wafer Level Compression Molding Compounds[C]// 2012 IEEE 62nd Electronic Components and Technology Conference. USA: IEEE, 2012: 1400-1405. DOI: 10.1109/ECTC.2012.6249019
- [7] HASEGAWA T, ABE H, IKEUCHI T. Wafer Level Compression Molding Compounds[C]// Proceeding of IEEE Electronic Component Technology Conference. USA: IEEE, 2012
- [8] CHEN Z H, GUAN L T, WEE D H S, et al. Characterization of Molding Compound Material and Dielectric Layer of RDL[C]// 2017 IEEE 19th Electronics Packaging Technology Conference (EPTC). USA: IEEE, 2017: 1-5. DOI: 10.1109/EPTC.2017.8277538.2722873

- [9] LIU D, GU X X, CHRISTIAN W, et al. Antenna-in-Package Design Considerations for Ka-Band 5G Communication Applications [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(12): 6372-6379. DOI: 10.1109/tap.2017.9
- [10] LIU D X, GU X X, BAKS C W, et al. Antenna-in-Package Design Considerations for Ka-Band 5G Communication Applications[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(12): 6372-6379. DOI:10.1109/tap.2017.2722873
- [11] HONG-TEUK K, BYOUNG-SUN P, SEONG-SIK S, et al. A 28-GHz CMOS Direct Conversion Transceiver with Packaged Antenna Array for 5G Cellular System [J]. 2018, 53(5): 1245-1259. DOI: 10.1109/RFIC.2017.7969019
- [12] OU Y C. MMW Phased Array Antenna and Front-End Co-Design for Smartphones and Small Cells[R]. Presented at the WFH workshop at IMS 2018. IMS, 2018
- [13] LU Y W, FANG B S, MI H H, et al. Mm-Wave Antenna in Package (AiP) Design Applied to 5th Generation (5G) Cellular User Equipment Using Unbalanced Substrate[C]// 2018 IEEE 68th Electronic Components and Technology Conference (ECTC). USA: IEEE, 2018: 208-213. DOI:10.1109/ECTC.2018.00040
- [14] FISCHER A, TONG Z Q, HAMIDIPOUR A, et al. 77-GHz Multi-Channel Radar Transceiver with Antenna in Package [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2014, 62(3): 1386-1394. DOI: 10.1109/tap.2013.2294206
- [15] Atap [EB/OL]. <https://atap.google.com/soli/>
- [16] WANG C T. InFO-AiP Technology for High Performance and Compact Millimeter Wave System Integration[C]//Proceeding of IEEE Electronic Components Technology Conference. USA:IEEE, 2018
- [17] CHEN Z H, GUAN L T, WEE Ho D S, et al. Millimeter-Wave Antenna in Fan-Out Wafer Level Packaging for 60 GHz WLAN Application[C]//2018 IEEE 68th Electronic Components and Technology Conference (ECTC). USA: IEEE, 2018: 331-336. DOI: 10.1109/ECTC.2018.00057
- [18] HO C Y, HSIEH S C, JHONG M F, et al. A 77GHz Antenna-in-Package with Low-Cost Solution for Automotive Radar Applications[C]//2018 IEEE 68th Electronic Components and Technology Conference (ECTC). USA: IEEE, 2018:191-196. DOI: 10.1109/ECTC.2018.00037
- [19] LONG S, WALTON M. A Dual Frequency, Stacked Circular Disc Antenna[C]//1978 Antennas and Propagation Society International Symposium. USA: IEEE, 1978: 260-263. DOI:10.1109/APS.1978.1147923
- [20] HALL P S, WOOD C, GARRETT C. Wide Bandwidth Microstrip Antennas for Circuit Integration [J]. Electronics Letters, 1979, 15 (15): 458. DOI:10.1049/el:19790329
- [21] WATERHOUSE R B. Small Microstrip Patch Antennas [M]. Microstrip Patch Antennas: A Designer Guide. MA:Springer US, 2003: 197-276
- [22] LIU Z F, KOOI P S, LI L W, et al. A Method for Designing Broad-Band Microstrip Antennas in Multilayered Planar Structures [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1999, 47(9): 1416-1420. DOI: 10.1109/8.793321
- [23] GAO S, LI L W, LEONG M S, et al. A Broad-Band Dual-Polarized Microstrip Patch Antenna with Aperture Coupling [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2003, 51(4): 898-900. DOI:10.1109/tap.2003.811080
- [24] LI R, DEJEAN G, MAENG M, et al. Design of Compact Stacked-Patch Antennas in LTCC Multilayer Packaging Modules for Wireless Applications [J]. IEEE Transactions on Advanced Packaging, 2004, 27(4): 581-589. DOI:10.1109/tadvp.2004.831866
- [25] 周华华. 基于耦合矩阵的滤波天线研究[D]. 上海:上海交通大学, 2017
- [26] GUSTAVSEN B, SEMLYEN A. Rational Approximation of Frequency Domain Responses by Vector Fitting [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1999, 14 (3): 1052-1061. DOI:10.1109/61.772353
- [27] MENG M, WU K L. An Analytical Approach to Computer-Aided Diagnosis and Tuning of Lossy Microwave Coupled Resonator Filters [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2009, 57(12): 3188-3195. DOI:10.1109/tmmt.2009.2033868
- [28] GUO G, WU L S, ZHANG Y P, et al. Stacked Patch Array in LTCC for 28 GHz Antenna-in-Package Applications[C]//2017 IEEE Electrical Design of Advanced Packaging and Systems Symposium (EDAPS). USA: IEEE, 2017: 1-3. DOI:10.1109/EDAPS.2017.8277007
- [29] Xcerra. xWave Contactor or WLCSP Probe Head[EB/OL]. [2018-07-27]. <https://xcerra.com/xwave>

作者简介



张跃平,新加坡南洋理工大学电子工程学讲座教授、IEEE Fellow、IEEE天线与传播学会杰出讲师、上海交通大学“千人计划”国家特聘专家、《ZTE COMMUNICATIONS》编委;目前研究方向为无线电子学;曾荣获IEEE天线与传播学会谢昆诺夫论文奖;已发表论文260篇,拥有授权美国专利7项。