

导读:为了应对未来移动通信、新体制雷达、物联网、航空航天信息技术等的飞速发展,作为其中关键技术的射频微波技术,也应从设计理论、仿真方法、工程应用和测试系统等方面不断地取得新进展、新突破、新发明。为了加强国内同行在射频微波领域的学术交流,促进微波技术应用水平的提高,《电子技术应用》杂志 2020 年第 12 期和 2021 年第 1 期推出“射频与微波”主题专栏,论文内容涵盖射频微系统测试技术、手持终端 IoT 天线设计、接收机信道测试及下变频级联噪声系数研究等。本专栏论文都具有鲜明的工程应用背景,接触前沿技术应用,期待与读者互相切磋借鉴,共同提高我国的微波应用水平。



特约主编:谢拥军,北京航空航天大学电子信息工程学院教授,博士生导师。主要研究方向为天线与微波技术、计算电磁学及其应用、电磁兼容等。目前主持多项国家纵向和企业横向科研项目。发表学术论文 200 余篇(其中 SCI 论文 70 余篇),主编(或参编)《HFSS 原理与工程应用》、《简明微波》等专著 8 本。

DC-40 GHz 通用化 BGA 封装的射频微系统测试技术研究

张晓庆,刘德喜,祝大龙,史磊,刘亚威

(北京遥测技术研究所,北京 100094)

摘要:射频微系统是未来电子器件小型化的发展趋势,球栅阵列(BGA)封装是其常用实现形式之一。由于 BGA 封装无法连接矢网进行测量,因此对射频 BGA 封装的测试技术进行研究,设计了一款可应用于 DC-40 GHz 射频 BGA 封装的测试夹具,并为其设计了校准件,解决了射频 BGA 封装的测试问题。仿真结果显示,在 DC-40 GHz 频段内,工作状态的测试夹具回波损耗优于 18 dB,设计的开路校准件的回波损耗小于 0.88 dB,直通和延迟线校准件的插入损耗都小于 1.1 dB,符合校准的设计要求。该产品具有良好的电接触性,且具有免焊接、可重复使用、易加工、取放方便的特点,对于标准尺寸的 BGA 封装具有通用性。

关键词:球栅阵列(BGA)封装;射频测试;TRL 校准;校准件

中图分类号:TN710

文献标识码:A

DOI:10.16157/j.issn.0258-7998.200903

中文引用格式:张晓庆,刘德喜,祝大龙,等. DC-40 GHz 通用化 BGA 封装的射频微系统测试技术研究[J].电子技术应用,2021,47(1):2-6,10.

英文引用格式:Zhang Xiaoqing, Liu Dexi, Zhu Dalong, et al. Research on generalized testing technology of DC-40 GHz RF microsystem in BGA package[J]. Application of Electronic Technique, 2021, 47(1): 2-6, 10.

Research on generalized testing technology of DC-40 GHz RF microsystem in BGA package

Zhang Xiaoqing, Liu Dexi, Zhu Dalong, Shi Lei, Liu Yawei

(Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100094, China)

Abstract: The RF microsystem is the future development trend of electronic equipment miniaturization, and the ball grid array (BGA) is one of its common implementation forms. Because the BGA package cannot be measured by being connected to a vector network analyzer, the testing technology of the RF BGA package is studied. A test fixture that can be applied to the RF BGA package in DC-40 GHz is designed, and a series of cal-kits are designed for it, which solves the test problem for RF BGA package. The simulation results show that the return loss of the test fixture at work is more than 18 dB in DC-40 GHz. The return loss of the designed open-circuit cal-kit is less than 0.88 dB. The insertion loss of the through cal-kit and the line cal-kit are both less than 1.1 dB. The simulation results meet the designing requirements of calibration. The product has good electrical contact, and is solder-free, reusable, easy to process, and convenient to take and unload. It is universal for standard size BGA package.

Key words: ball grid array(BGA) package; RF test; through-reflect-line(TRL) calibration; cal-kits

0 引言

球栅阵列(Ball Grid Array, BGA)封装技术由美国 Motorola 公司于 1989 年开发,其使用焊球取代传统封装的金属丝和连接器,并以面阵列的形式排列于基板背面来连接集成电路中传输的电信号^[1],从而实现在 I/O 数目上的大大增加,同时可以使电信号连接距离大幅缩小,提高信号传递速度,减少信号损耗与延迟。随着微电子封装技术向小尺寸、低功耗、高性能等方向飞速发展,射频微系统集成技术符合未来电子器件小型化发展趋势的要求^[2],因此作为常用实现形式之一的 BGA 封装技术近年来愈发受到关注。

由于球栅阵列(BGA)封装端口非连接器结构,无法直接连接矢量网络分析仪进行 S 参数测量,因此对 BGA 封装的测试夹具的引入必不可少。为实现夹具与测试封装的可重复使用,目前采用的测试夹具与 BGA 封装一般以压接为主,常见的互连方法主要有弹性探针连接^[3]、铆纽扣连接形式、膜片连接形式^[4]等,其中膜片连接方法适用于数字信号和 10 GHz 以内的射频信号传输测试,对更高频率的射频信号的性能测试效果较差;铆纽扣连接方法可以完成 25 GHz 以下射频信号的测试,但其装配及返修更换非常复杂,且其插损较大。因此,引入一种易加工易操作、电接触良好、造价低廉且可重复使用的 BGA 封装测试方法可以为射频 BGA 封装的设计与加工带来很大便利。

基于上述需求,本文设计了一种用于射频微系统 BGA 封装模块的微波测试夹具,并为其设计了相应校准件。提出的微波测试方法为免焊接测试,因此具有可重复使用的特点;对设计的测试夹具进行仿真分析,仿真结果显示夹具具有良好的电接触性,且由于其特殊的焊球压触点形状,使用该测试夹具对 BGA 封装模块进行测试时对焊球的损坏较小;设计的测试夹具具有易加工、安装难度小、取放料方便等优点。同时,根据直通反射延迟线(Through-Reflect-Line, TRL)校准原理为该测试夹具设计了相应的校准件并仿真分析,其中开路校准件的回波损耗小于 0.11 dB,接近全反射,直通和延迟线校准件的插入损耗都小于 0.28 dB,满足 TRL 校准的设计要求,可以有效消除测试夹具带来的误差项。

1 测试夹具设计

测试夹具结构由 SMA 连接器、过渡板、待测封装(DUT)固定装置、DUT 定位装置以及夹具底座组成。SMA 连接器用于直接连接测试仪器;由于 DUT 的信号输入输出端口无法直接与连接器相连,因此设计过渡板用于对 BGA 焊球到 SMA 连接器之间的信号传输进行过渡;DUT 固定装置及定位装置用于避免待测件在夹具上的位移引起的射频端口接触不灵敏,从而影响测试结果。

设计的过渡板模型如图 1 所示,其中①为 SMA 同轴连接器;过渡板基板选择 Rogers RO4350B 作为介质材

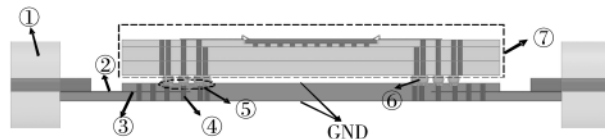


图 1 加入 DUT 后的过渡板模型示意图

料,②和③分别是水平过渡的微带线与带状线,其基板厚度分别为 0.127 mm 和 0.254 mm,带状线两侧布有接地孔,用于连接过渡板基板上下两侧的金属地层以及约束传输的电磁信号;④为传输信号的类同轴传输电路;⑤为 BGA 焊球压触结构;⑥为连接夹具过渡板与 DUT 的板间 BGA 互连电路;虚线框⑦为模拟的 DUT 模块。信号通过 SMA 连接器传输到过渡板上的微带线,然后经过“微带-带状线-类同轴”的垂直过渡传输至压触点,通过与压触点紧密压接的 BGA 焊球将信号传入 DUT,再以同样的方式最终输出至过渡板另一侧的 SMA 连接器。

1.1 过渡板互连设计

传统 BGA 测试夹具往往难以兼顾良好的射频电接触性和对焊球的低损伤,同时简单的加工工艺也是需要考虑的重要因素。针对这一问题,对测试夹具中的过渡板进行设计与仿真分析。

被测件是工作在 X 频段的射频微系统 BGA 封装模块。常用的 BGA 焊球规格一般为 0.3 mm~0.75 mm,焊球直径越小,板间电信号的连接距离越小,而伴随着焊球尺寸减小,单个焊点因焦耳热而产生的热量也逐渐增加^[5],根据指标需求设计人员为 BGA 封装模块选择焊球规格为 0.4 mm^[6]。采用 ANSYS 电磁仿真软件仿真模拟引入夹具后对待测组件进行测试,使用以 GaAs 为介质基板的微带线来模拟封装中的芯片,BGA 封装模块基板材料为氮化铝(AlN)多层介质基板,被测封装整体尺寸为 6 mm×12 mm×1 mm。测试仪器为矢量网络分析仪。

为保证电路性能,设计的过渡板使用类同轴结构完成板内垂直互连,如图 2(a)所示。同轴线是微波设计中常用的 TEM 传输线,在均匀介质填充的情况下,同轴线的特性阻抗只与内外径的比值有关,类同轴结构是典型实现形式之一,兼具同轴线的优良特性和简单工艺,带宽宽且损耗小。类同轴结构由位于中心的金属化过孔代替同轴线的内导体,用于信号的传输;由周围一圈圆周对称排布的金属过孔代替同轴线的导体,用于信号的接地。同轴结构特性阻抗计算公式如式(1)所示:

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \frac{b}{a} \quad (1)$$

其中, a 为同轴线内导体直径, b 为同轴线外径, ϵ_r 为介质基板的相对介电常数。

类同轴结构的初步计算可参考式(1),其中 a 为中心信号通孔的半径; b 为类同轴的外半径,即类同轴截面圆心到接地通孔的距离。影响类同轴结构微波性能的主要参数如图 2(b)所示。其中, a 为中心通孔的半径, r_{out}

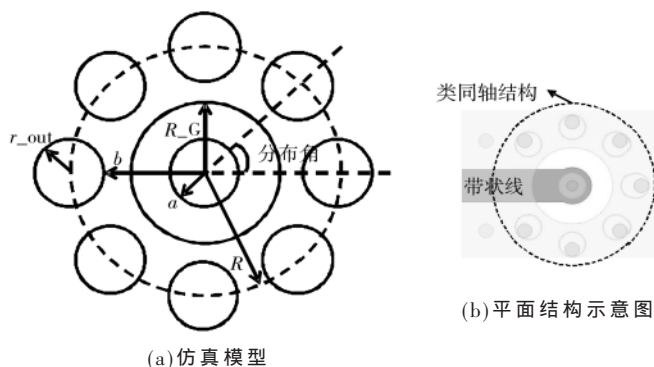
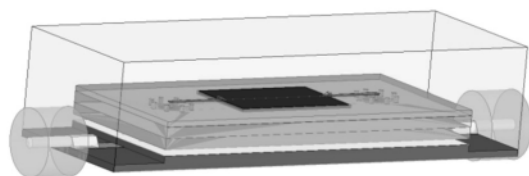


图2 类同轴结构

为外围通孔的半径, R_G 为地板开窗的半径, R 为接地通孔与中心通孔的中心距离, 而分布角则表示两相邻地孔与结构中心连线的夹角^[7]。本设计中采用 45° 的分布角, 去掉过孔中的 1 个接地柱并引入带状线抽头, 对主要参数进行仿真优化, 得到最优解, 从而达到垂直互连的目的。

根据被测封装的尺寸等物理特性设计相应过渡板的结构, 并使用 ANSYS 仿真软件对过渡板的“BGA-类同轴-微带线-SMA 连接器”的互连结构进行仿真分析。设计的电磁仿真模型如图 3 所示, 图 3(a) 为完整互连模型, 图 3(b) 仅展示过渡板部分。



(a) 夹具与 DUT 完整互连模型

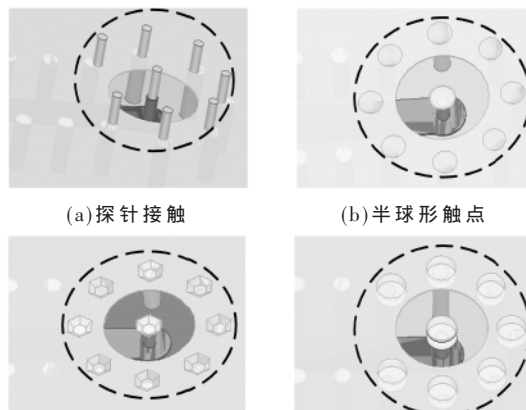


(b) 夹具过渡板模型

图3 夹具与 DUT 互连结构电磁仿真模型

在设计 BGA 压触点的接触形状时, 设计了 4 种接触形状, 分别为: 探针接触、半球形触点、钻石形触点、圆柱形触点。4 种接触形状的压触点模型示意图如图 4 中虚线圈内所示。

对 4 种接触形状的过渡板与 DUT 的垂直互连结构进行仿真优化, 其仿真结果如图 5 所示。 S_{11} 仿真结果显示, 在使用探针实现各 BGA 球与测试夹具过渡板间连通时, 由于探针尺寸较长, 导致信号射频传输路径较长, 因此引入的测试插损也较大, 在 $8 \sim 12$ GHz 频段内, $S_{11} < -9.5$ dB, 因此这种压触形式不予选择; 在使用半球形触点、钻石形触点和圆柱形触点连通焊球和过渡板



(a) 探针接触 (b) 半球形触点 (c) 钻石形触点 (d) 圆柱形触点

图4 4种过渡板的接触形状

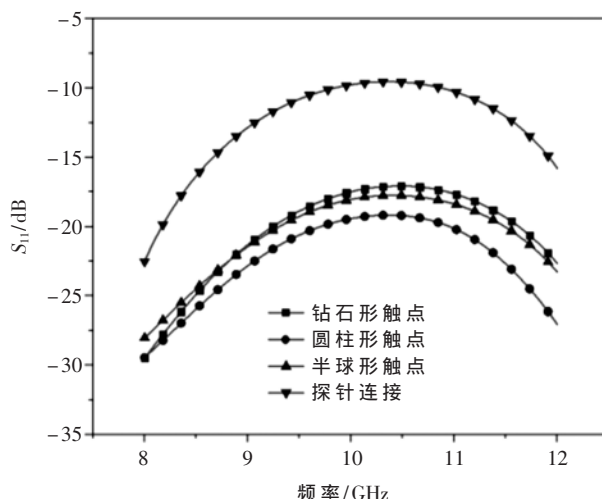


图5 测试夹具与 DUT 的互连仿真结果

时, 这 3 种接触形状的插入损耗 S_{11} 均小于 -15 dB, 其中圆柱形触点电接触性最优。

比较了半球形、钻石形、圆柱形 3 种压触点形的加工难易程度, 由于圆柱形触点仅需要使用激光打孔技术在 Rogers RO4350B 过渡板上开所需大小的阶梯孔并沉积金属层, 在三者中加工工艺最为简单, 因此最终将圆柱形触点作为设计选择。

经过进一步验证, 对夹具的频率可扩展性进行研究。仿真结果显示, 采用圆柱形触点的过渡板与 DUT 的互连结构在频率为 DC-40 GHz 内 $S_{11} < -18$ dB, 在低频至高频段均电性能良好, 因此使用该过渡板的测试夹具具有较好的频率可扩展性。仿真结果如图 6 所示。

1.2 测试夹具结构设计

根据工艺要求和实际操作需求, 设计的测试夹具三维结构示意图如图 7 所示。图 8 为加入 DUT 后的夹具操作示意图。

设计的 BGA 封装测试夹具由长方体状的支撑底座、过渡板、加压弹性金属片、低频矩形连接器和 SMA 同轴

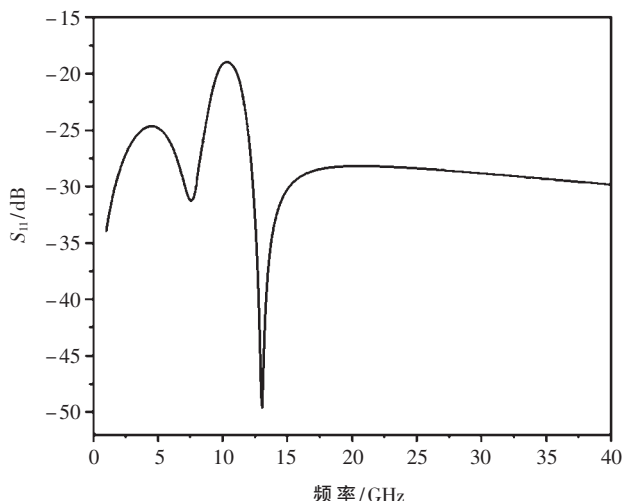


图6 过渡板与DUT互连结构在DC-40 GHz仿真结果

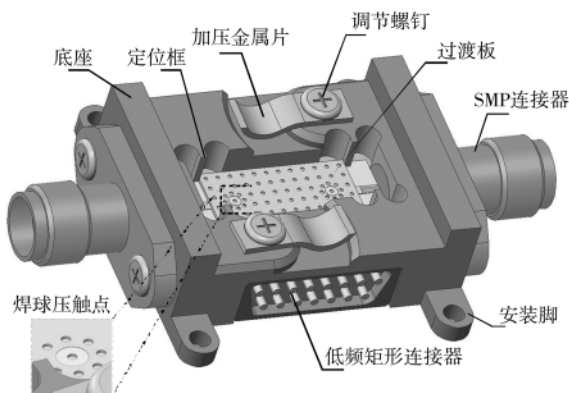


图7 BGA封装测试夹具示意图

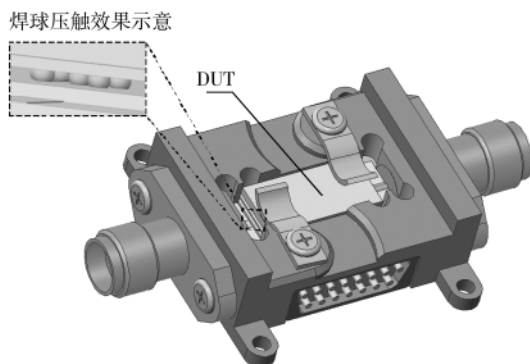


图8 工作状态的测试夹具示意图

连接器组成。为方便 SMA 连接器装配,支撑底座两端凸起,用于焊接 SMA 同轴连接器。在底座四周设有安装脚,可使用螺钉通过安装脚将夹具固定在散热冷板上。底座中间开腔用于放置过渡板及待测封装模块,通过替换携带不同尺寸触点的过渡板,可以使该测试夹具适用于不同规格的焊球;在待测封装放置位置的四角设计有定位框,用于对待测封装模块进行限位固定,从而保证焊球精确对位。底座底部焊有低频矩形连接器,使用金丝键合与过渡板背面直流焊盘相连,用于为待测封装模

块进行直流供电。为保证焊球压触平衡稳定,底座的上端面设计有对 DUT 进行加压固定的弹性金属片,由调节螺钉固定在支撑底座上,并在底座上端面开槽以便于加压金属片在不工作时可以旋转收起,在工作状态时,加压金属片旋至 DUT 上方并旋紧调节螺钉,从而对 DUT 进行锁紧固定。通过以上设计,使得测试夹具可重复使用。设计的 BGA 封装测试夹具具有取放料方便、可重复使用、易加工、安装难度小等优点。

2 TRL 校准件设计

在使用矢量网络分析仪对 DUT 进行 S 参数测试时,测量的原始参考平面往往在仪器内部,引入测试夹具后,所得测试结果包括夹具和 DUT 两个部分,因此不可避免地会给 DUT 的测试带来误差。基于这种问题的存在,对测试系统进行校准是非常必要的。

常用的校准方法一般有全双端口校准(SOLT 校准)方法和 TRL 校准方法。SOLT 校准即“短路(short)-开路(open)-负载(load)-直通(thru)”校准,其采用 12 项误差模型,可以修正两个端口方向的传输跟踪、反射跟踪、负载匹配、源匹配、串扰和方向性共 12 项误差,对校准件的精度要求非常严格^[8]。TRL 校准即“直通(thru)-反射(reflect)-延迟线(line)”校准,在对 DUT 进行 S 参数的测量时,采用 8 项误差项校准模型,相比于传统 SOLT 校准方法更加简化,如图 9 所示。TRL 将整个测量结果看作是“夹具-DUT-夹具”3 个网络的级联,其校准的准确性与校准件的质量仅为部分相关,只要求传输线标准的特性阻抗与系统一致,因此对校准件的制作要求比 SOLT 校准件更低,从而比 SOLT 校准方法有着更高的精度^[9]。本文选用 TRL 校准方法对所设计的测试夹具进行校准。

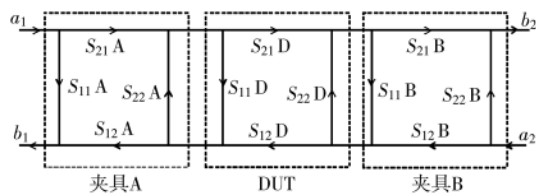


图9 TRL 校准 8 项误差模型

TRL 校准方法的原理^[10]是采用 3 个可直接测量出 S 参数的校准件来代替图 9 中 DUT,从而计算出 DUT 的真实 S 参数。TRL 校准方法所需校准件有以下 3 种:(1)直通校准件。其设计要求 DUT 参考面在校准件的中央,从而保证其互易性,传输延时应当接近零,特性阻抗与标准接近,并且在校准参考面上的反射和损耗应当尽量小。(2)反射校准件。其要求采用反射系数很大的负载,譬如短路或开路。在本文中,由于开路校准件可以直接由未接 DUT 的测试夹具代替,因此选用开路反射校准件。(3)延迟线校准件。其一般是通过一段匹配传输线来代替 DUT 连接输入输出触点,选择传输线的电长度时,应

保证与直通校准件的相位差在 $20^\circ \sim 160^\circ$ 之间,传输线特性阻抗与直通校准件尽量保持一致。

进行 TRL 校准时,如图 10 所示,默认夹具 A 和夹具 B 对称。在使用夹具对直通校准件进行 S 参数测量时,在原始参考面上测量出 S 参数:

$$T_{11} = \frac{b_1}{a_1} \bigg|_{a_2=0} = S_{11} + \frac{S_{22}S_{12}^2}{1-S_{22}^2} \quad (2)$$

$$T_{12} = \frac{b_1}{a_1} \bigg|_{a_2=0} = \frac{S_{12}^2}{1-S_{22}^2} \quad (3)$$

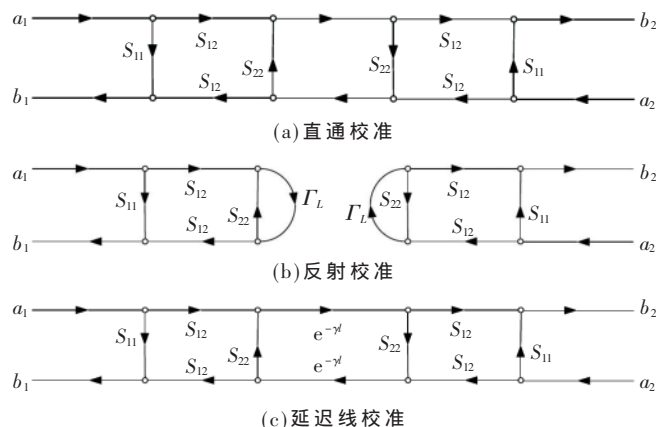


图 10 TRL 校准方法信号流图

由于对称性和互易性, $T_{22}=T_{11}$, $T_{21}=T_{12}$ 。类似地,可测得反射校准件的 S 参数 R_{11} 和 R_{22} 、延迟线校准件的 S 参数 L_{11} 和 L_{22} ,并易知其与 S_{11} 、 S_{22} 、 S_{12} 的变换关系。然后联立 3 种校准件的 S 参数方程,计算出 DUT 两端包含夹具及电缆等误差盒的 S_{11} 、 S_{22} 、 S_{12} ,由于误差盒对称,有 $S_{21}=S_{12}$ 。再把得到的 S 参数转换为误差盒的 ABCD 参量,便可计算出 DUT 的参量 A'B'C'D'为:

$$\begin{bmatrix} A' & B' \\ C' & D' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} A^m & B^m \\ C^m & D^m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中, $A^m B^m C^m D^m$ 为测试夹具工作状态时矢量网络分析仪的原始参考平面测得的 S 参数转换得到的传输矩阵参量。

在实际使用矢量网络分析仪对引入测试夹具的封装进行 TRL 校准时,首先分别将延迟线校准件、开路校准件、短路校准件作为被测件,通过矢量网络分析仪测量得到三者的 S 参数并录入仪器,矢量网络分析仪内部将上述 S 参数转换为 ABCD 参数;然后将携带 DUT 的测试夹具作为被测件对其进行测试,矢量网络分析仪利用前面得到的 ABCD 参数以及 ABCD 参数矩阵级联的特性可以解出所测 DUT 的 ABCD 参数,并将其转换为 S 参数输出,即为所需 DUT 的测试结果。

为前文的测试夹具设计了 TRL 校准件,并对其使用 ANSYS 仿真软件进行仿真验证。开路校准件由不连接 DUT 的测试夹具代替,直通校准件和延迟线校准件的三维示意图如图 11 所示,为了降低加工复杂度,设计的

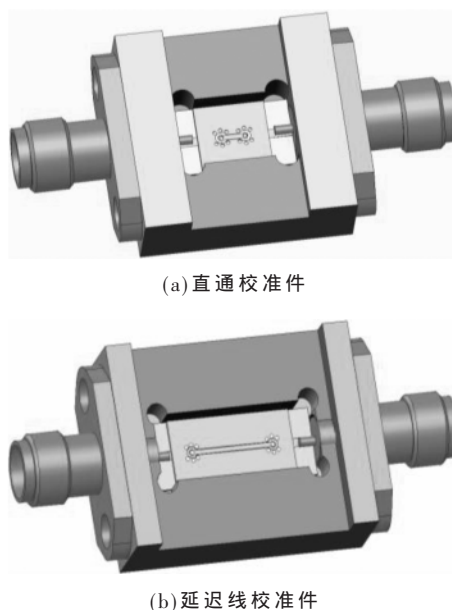


图 11 设计的 TRL 校准件

校准件结构进行了适当简化。

图 12 为 3 种校准件 S 参数仿真结果。图 12(a)为直通校准件和延迟线校准件的 S_{21} 仿真结果,图 12(b)为开路校准件(即测试夹具)的 S_{11} 仿真结果。由图可知,在 DC-40 GHz 频段内直通和延迟线校准件的插入损耗 $|S_{21}|$ 都小于 1.1 dB,开路校准件的回波损耗 $|S_{11}| < 0.88$ dB,符合 TRL 校准的设计要求。

3 结论

本文为 X 频段的射频微系统 BGA 封装模块设计了一款取放料方便、易加工、易操作的测试夹具,用于连接矢量网络分析仪测量 S 参数。由于其免焊接的特点,因此可以重复使用。通过对 BGA 焊球压触点形状的优化,采用圆柱形作为压触形状。对测试夹具进行仿真分析,仿真结果表明,该测试夹具射频传输性能良好,且频率可扩展至 DC-40 GHz。随后为该测试夹具设计了相应的 TRL 校准件并进行仿真分析,其中开路校准件的回波损耗小于 0.88 dB,直通和延迟线校准件的插入损耗都小于 1.1 dB,符合 TRL 校准的设计要求。设计的测试夹具工艺简单,除应用于本文中的待测封装外,亦可以为其他射频 BGA 封装测试夹具的设计提供参考。

参考文献

- [1] 薛明阳.BGA 的可靠性模拟与实验验证[D].广州:华南理工大学,2013.
- [2] 付浩,刘德喜,祝大龙,等.X 频段接收组件三维 SiP 微系统设计[J].电子技术应用,2020,46(7):7-9,14.
- [3] 重庆邮电大学.一种 BGA 封装芯片测试支架:CN2010-10218845.XP[P].2010-11-30.
- [4] 中国电子科技集团公司第二十九研究所.一种 BGA 封装产品射频性能测试夹具:CN201910341707.1[P].2019-

(下转第 10 页)

- [4] 袁国靖, 马美霞, 郑飞腾. 二次变频系统噪声系数研究[J]. 空间电子技术, 2015(5): 63-66.
- [5] 徐辉, 李兵, 李栓涛. 镜像频率抑制度对射频前端噪声系数的影响分析[J]. 微波学报, 2018(2): 70-74.
- [6] 高葆新, 胡南山, 洪兴楠, 等. 微波集成电路[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.
- [7] IRE Standards Committee. IRE standards on electron tubes: definitions of terms, 1957[J]. Proceedings of the IRE, 1957, 45(7): 983-1010.
- [8] 顾其铮, 项家桢, 彭孝康. 微波集成电路设计[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1978.
- [9] RAZZELL C. System noise-figure analysis for modern radio receivers[Z]. Maxim, 2014.
- [10] 邢燕, 赵爱萍, 陈颖鸣. 接收机下变频器噪声系数测试方法研究[J]. 时间频率学报, 2016(2): 104-110.
- [11] 曹芸, 邱新宇, 鲁芳丽, 等. 正确测量混频器的噪声系数[J]. 中国仪器仪表, 2013(8): 64-66.
- [12] KEYSIGHT TECHNOLOGY. Noise figure measurement accuracy: the Y-factor method(AN 57-2), literature number 5952-3706E[EB/OL]. [2020-11-03]. https://www.keysight.com/find/nf.
- [13] KEYSIGHT TECHNOLOGY. Noise figure measurements of frequency converting devices(AN 1487), literature number 5989-0400E[EB/OL]. [2020-11-03]. https://www.keysight.com/find/nf.
- [14] 黄成, 蒲璞, 文忠锋. 噪声系数测试方法研究[J]. 微电子学, 2013, 43(6): 113-117.
- [15] 王瑛, 朱祥维, 王飞雪. 一种新的噪声系数测量方法[J]. 电子学报, 2005, 33(6): 1132-1135.

(收稿日期: 2020-11-03)

作者简介:

张广显(1967-), 男, 高级工程师, 主要研究方向: 电路设计。

(上接第6页)

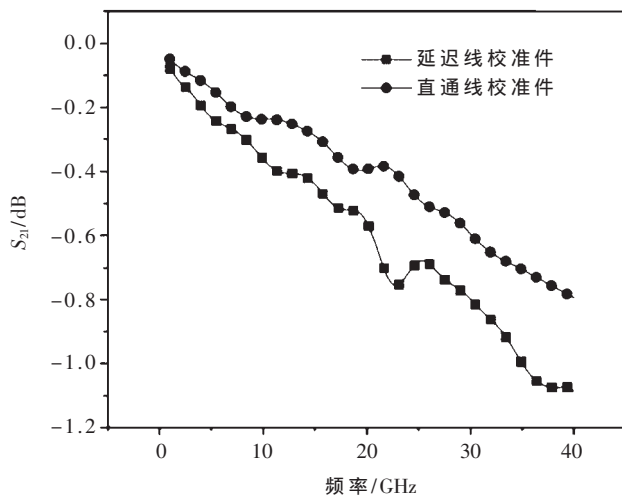
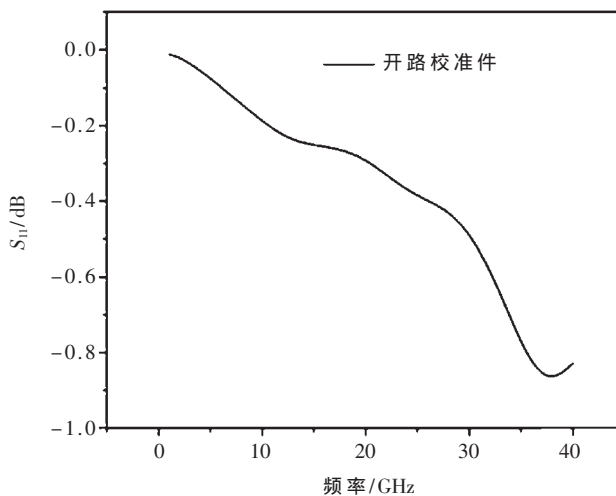
(a) 校准件 S_{21} 仿真结果(b) 夹具 S_{11} 仿真结果

图 12 测试夹具及其校准件的仿真结果

08-09.

- [5] 谭士海. 无铅焊点热疲劳再结晶微观机理研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2018.
- [6] 李渭荣, 薛雅明. 高可靠性计算机中 BGA 芯片的可制造性设计[J]. 电子技术与软件工程, 2013(12): 109-110.
- [7] 杨涛, 宋庆辉, 杜江坤. 45° 准同轴微波多层过孔 TDR 仿真技术[J]. 无线电工程, 2016, 46(5): 56-59.
- [8] 刘宏. 矢量网络分析仪的校准方法[J]. 电子质量, 2011(7): 71-72.
- [9] 芮金城, 曹锐, 陶晓辉. 微波测试夹具及其 TRL 校准件的设计与制作[J]. 电子科技, 2017(11): 97-99, 103.
- [10] POZAR D M. 微波工程(第三版)[M]. 张肇仪, 周乐柱, 吴德明, 等, 译. 北京: 电子工业出版社, 2015.

(收稿日期: 2020-09-14)

作者简介:

张晓庆(1998-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 微波毫米波电路设计。

刘德喜(1973-), 男, 硕士, 研究员, 主要研究方向: 微波毫米波电路设计。

祝大龙(1980-), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向: 微波毫米波电路设计。

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所