

X 波段功率器件外壳端口仿真与测试差异性研究

颜汇程,施梦侨,周昊,陈寰贝

(南京电子器件研究所,江苏南京 210016)

摘要: 基于探针测试方法进行 X 波段功率器件外壳端口的仿真与测试差异性研究。在使用仿真软件对其进行优化后,通过 HTCC(高温共烧陶瓷)工艺线制备和生产,发现使用 GSG 探针对该端口进行测试后的插入损耗远远大于仿真结果。通过对照实验和仿真验证等实验方法,分析出插入损耗仿真与测试的差异来源于辐射损耗,导致信号在返回路径的信号完整性受到影响。对结构进行相应的优化后插入损耗大幅减小,证明辐射损耗是造成差距的原因,通过电磁屏蔽可以得到有效解决。该研究可以为大功率器件类封装外壳的设计、测试和使用提供借鉴意义。

关键词: 探针测试;X 波段;大功率封装外壳;辐射损耗

中图分类号: TN454

文献标识码: A

DOI:10.16157/j.issn.0258-7998.212360

中文引用格式: 颜汇程,施梦侨,周昊,等. X 波段功率器件外壳端口仿真与测试差异性研究[J]. 电子技术应用, 2022, 48(4):98-103.

英文引用格式: Yan Huizeng, Shi Mengqiao, Zhou Hao, et al. Research on the differences of RF port simulation and test of X-band power device package[J]. Application of Electronic Technique, 2022, 48(4):98-103.

Research on the differences of RF port simulation and test of X-band power device package

Yan Huizeng, Shi Mengqiao, Zhou Hao, Chen Huanbei

(Nanjing Electronic Devices Institute, Nanjing 210016, China)

Abstract: This paper discussed research on the differences of RF Port simulation and test of X-band power device package which was based on probe test method. After optimizing it with simulation software, samples are produced through HTCC process line, the result of testing the port with GSG probe is much larger than the simulation results. It is analyzed by experimental methods such as control experiment and simulation result reproduction that the difference between S21 simulation and test is due to radiation loss, which affects the signal integrity of the signal in the return path. Insertion loss is greatly reduced after optimizing the structure, which proves that the radiation loss is the cause of the gap. Radiation loss can be effectively solved by electromagnetic shielding. This article can provide a reference for the design, test and practical use of high-power device packages.

Key words: probe test; X-band; high-power device package; radiation loss

0 引言

固态微波功率器件是信息化设备中的核心元件,对装备的信息探测能力、信息传输能力、信息处理和发射能力起着决定性作用^[1]。随着 X 波段微波组件的不断发展^[2],对封装外壳的端口传输性能要求不断提高。器件封装要求外壳提供更好的端口匹配特性,以避免端口损耗导致的大功率固态微波器件的输出功率下降^[3]。

面向固态微波功率器件封装的外壳多使用陶瓷绝缘子实现端口的传输要求。在以陶瓷为介质的信号传输中,采用波导转微带的传输方式可以消除谐振,有效地减小信号传输的插入损耗^[4]。其中施梦侨等人设计了一款面向小功率 4 通道收发模块封装用陶瓷外壳,在 8 GHz~12 GHz 的频带内,端口插入损耗 ≤ 0.6 dB^[5];李永

彬等人设计了一种应用于 18 GHz 功放模块的陶瓷外壳,在 DC~18 GHz 的频带内,端口插入损耗 ≤ 0.6 dB^[6],均采用共面波导-带状线-共面波导结构进行微波信号的传输。

分析已报道的各类微波外壳方面的文献,发现端口的仿真与测试结果存在差异的频率较高。为解决差异性,只能通过调整端口结构和尺寸来实现,但该方法不仅需要重新设计与制备端口,还无法从根本上解决差异性较大的问题。本文基于探针测试技术,重点分析共面波导-带状线-共面波导结构的陶瓷绝缘子仿真及测试结果,研究该结构微波性能恶化的原因以及提出相应的解决方法,可以为该类别的产品设计提供借鉴作用。

1 射频端口的研究与分析

1.1 射频端口的仿真设计

本文设计的 X 波段功率器件封装外壳射频端口采用带地共面波导(GCPW)-带状线-带地共面波导的传输结构实现信号的穿墙,陶瓷件的上下左右四面满金属化。介质材料采用的是陶瓷材料,其中氧化铝占比约为 92%,介电常数为 9.2 ± 0.2 ,介质损耗角正切小于 0.001,金属化部分材料为金。

端口激励采用波端口激励的方式,经过模型仿真及参数扫描优化之后,确定了关键参数的值。如图 1 所示,共面波导距 GND 的高度 $H_1=1$ mm,共面波导中心带的宽度 $W_1=0.81$ mm,穿墙厚度 $T=0.5$ mm,中心带与接地带的距离 $S=0.345$ mm,内部带状线与上层金属平面的高度 $H_2=1$ mm,带状线宽度 $W_2=0.67$ mm,共面波导、带状线以及侧面覆金的厚度 $H_3=0.01$ mm。在 X 波段下优化后的两个关键结果为:回波损耗 $|S_{11}| \geq 25$ dB,插入损耗 $|S_{21}| \leq 0.15$ dB。

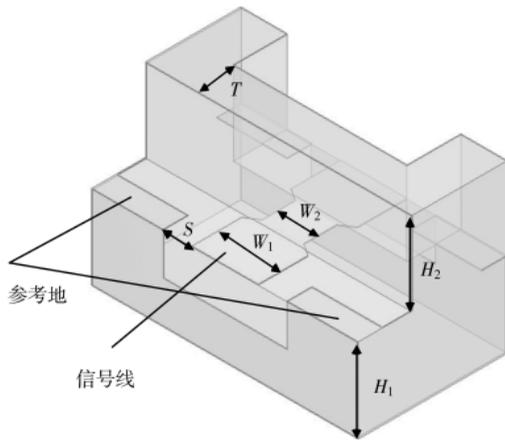


图 1 X 波段功率器件外壳端口的仿真模型

1.2 射频端口的测试

本文所设计的射频端口由中国电科 55 所 HTCC 工艺线制造与生产。如图 2 所示,采用 Agilent 公司型号为 N5224A 的矢量网络分析仪、Cascade 公司型号为 PM5 的探针台以及 900 μm 的探针针对射频端口进行测试。

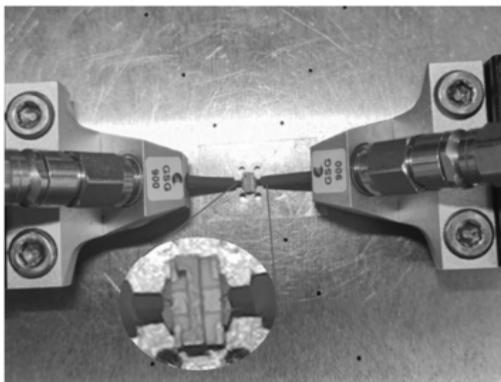
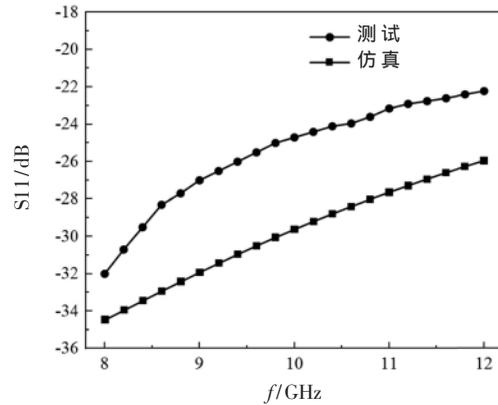
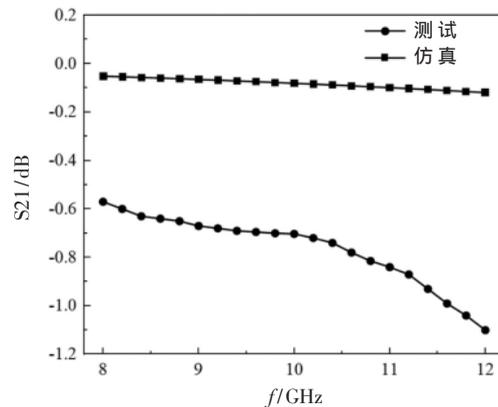


图 2 射频端口微波测试

实际测试结果与仿真结果的对照如图 3 所示。从图 3 可以看出,回波损耗的测试和仿真结果差距不大,但是插入损耗的测试结果与仿真值存在很大差距。通过多组测试,排除测试结果的偶然性,得到大功率器件封装外壳的微波测试与仿真存在巨大差异的问题。



(a) S11



(b) S21

图 3 原始端口测试与仿真结果

若将该射频端口的信号输入输出面焊上 3 层测试板,由于测试板上下表面均为金属层且内部有通孔起到互连作用,可以起到良好的电磁屏蔽作用。将图 4 所示的样品进行测试,通过结果分析 S21 过大的原因。

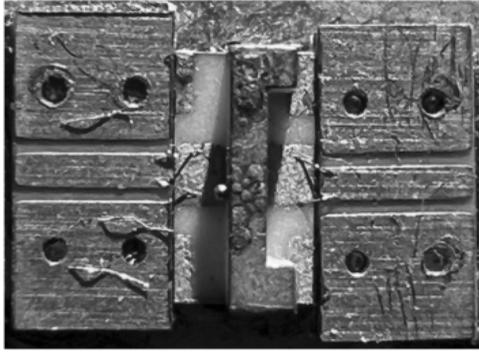
从测试结果中可以得到, $S_{11} \leq -17$ dB, $S_{21} \geq -0.4$ dB。由于测试板与端口需要采用金丝键合,会产生电感导致阻抗发生失配,从以往的测试结果来看,在端口两端加上夹具再用金丝键合后, S_{11} 与 S_{21} 均会适当变差。但在本次测试中,该端口的 S_{21} 与直接测试的相比得到大幅好转。下文将对该情况进行具体分析。

1.3 差异分析

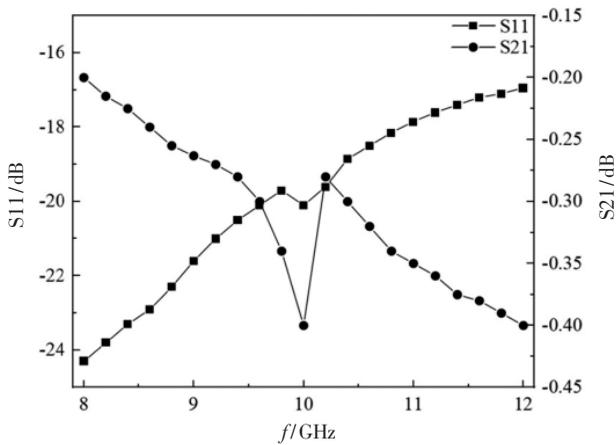
当在一个二端口网络中输入一定的能量时,二端口网络中的能量分布如图 5 所示。其中图 5 中各符号的意义如表 1 所示。

基于微波电路相关知识,在无源二端口网络中有:

$$P_1 = P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6 \quad (1)$$



(a) 端口实物图



(b) 测试结果

图 4 在输入输出端焊上 3 层测试板的端口测试

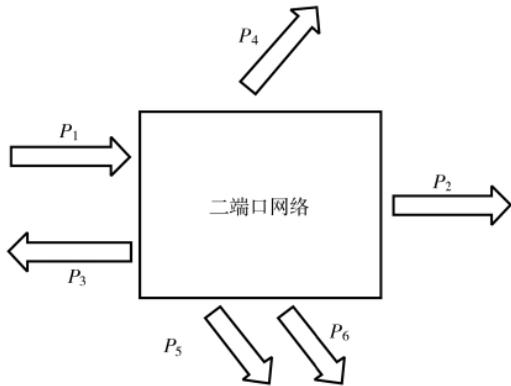


图 5 二端口网络中的能量分布图

表 1 图 5 中各符号意义

符号名称	意义
P_1	1 端口输入的能量
P_2	2 端口输出的能量
P_3	反射回 1 端口的能量
P_4	介质损耗的能量
P_5	导体损耗的能量
P_6	辐射损耗的能量

从一端口传输到二端口所损耗的能量为：

$$P_L = P_1 - P_2 = P_3 + P_4 + P_5 + P_6 \quad (2)$$

插入损耗为：

$$I_L = |S_{21}| = -10 \lg |P_2/P_1| \text{ dB} \quad (3)$$

根据公式可知，当 $|P_2/P_1|$ 减小时，S21 会变差；反之当 $|P_2/P_1|$ 变大时，S21 结果会好转。分析 1.2 节中的两种测试方法，相较于直接在共面波导处压探针（测试方法 A），在输入输出端焊上 3 层测试板并用金丝键合（测试方法 B）会使得信号传输的阻抗失配更严重，导致信号的反射更加严重，即 P_{3B} 更大。而两种测试中采用同样规格的样品进行测试，可以保证 P_4 和 P_5 一致。根据测试结果， P_{1B} 要明显小于 P_{1A} ，可以得到 P_{6B} 要远小于 P_{6A} 。

由于测试方法 B 相较于测试方法 A 在信号的输入输出端增加了电磁屏蔽，可以有效地减小辐射损耗，说明在射频端口处存在着明显的辐射损耗，导致直接在共面波导端压探针进行测试的 S21 结果会远远差于仿真结果。

2 仿真验证

本次测试所采用的探针的使用机理是将测量信号从 3D 传输介质 (RF 电缆或矩形波导) 转换到准 2D 的待测件 (Device Under Test, DUT) 共面接口上，电磁场的传输模式则由 TE₁₀ 模转化成 TEM 波，其中探针头和共面波导结构只支持 TEM 传输模式。采用 TRL (Thru-Reflect-Line) 方式进行探针校准，可以对共面波导与参考地等 BEOL (后段制程) 形成的寄生效应进行去嵌处理，保证探针测试的精度。但大功率器件封装外壳的微带与 GND 的距离较大，TRL 校准的方式无法完全去除共面波导与 GND 间的寄生效应，故探针测试存在着一定范围内的误差^[7]。

而仿真模型中采用的激励方式是波端口激励，设置如图 6(a) 所示，该端口能提供一个能量流进/流出的窗口，通过流入或流出窗口内的能量大小来计算二端口网络的 S 参数。因波端口的面积较大，在仿真中几乎不会出现由于辐射损耗导致的 S21 恶化。将波端口平面上移 0.3 mm，不计算射频端口输入输出面下方 0.3 mm 部分的能量流通，仿真结果如图 6(c) 所示， $S_{11} \leq -21.5 \text{ dB}$ ， $S_{21} \geq -1.1 \text{ dB}$ 。

该结果与初始测试结果相一致，且从图 6(b) 所示的电场分布中可以看出，在端口底部存在部分电场。可见采用 GSG 探针直接测试时由于 GSG 探针采集的信号分布范围有限，部分能量会通过射频端口靠近底部的陶瓷部分泄露到空气中，该部分的能量损失会直接导致大功率封装外壳射频端口的插入损耗增加。为了改善端口下边缘电磁能量泄露问题，在泄露面增加金属化能够起到良好的电磁屏蔽效果，如图 7(a) 所示，将波端口下边缘与 GND 的间隙面设置为理想导体边界条件 (Perfect E)，仿真结果如图 7(b) 所示， $S_{11} \leq -28 \text{ dB}$ ， $S_{21} \geq -0.16 \text{ dB}$ ，与未上移波端口平面结果相近。

可以看出：改变波端口的位置，电磁场会从端口下

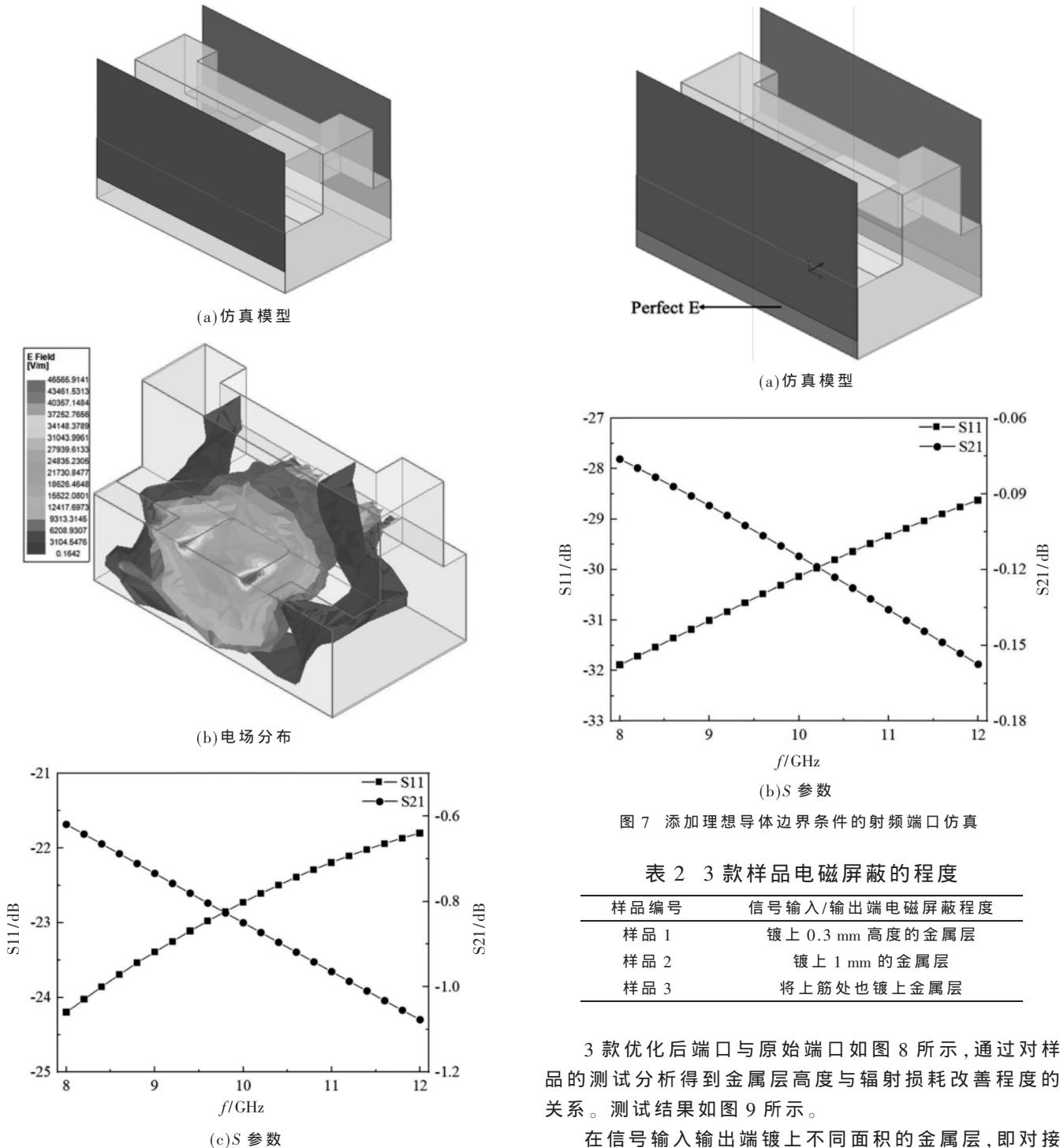


图6 上移波端口平面的射频端口仿真

边沿发生泄露,影响信号传输的完整性,插入损耗会明显恶化。

3 优化后测试结果及分析

为了减小辐射损耗,在传输结构不变的基础上对原始端口进行了优化。制作了3款端口,如表2所示对信号输入输出端做出了不同程度的电磁屏蔽,使用矢量网络分析仪测试其对插入损耗的改善程度。

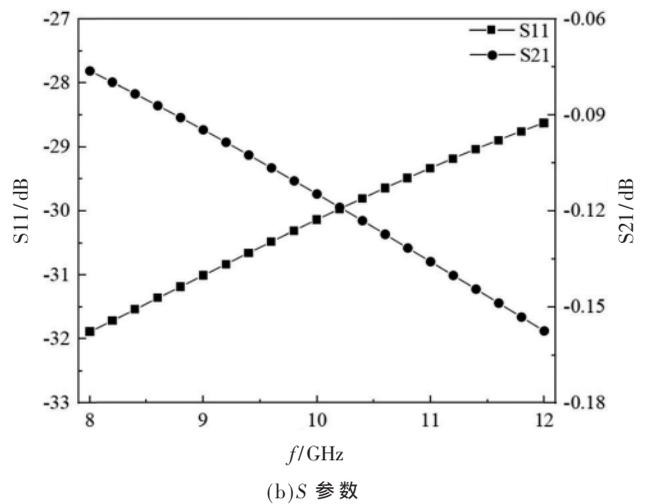
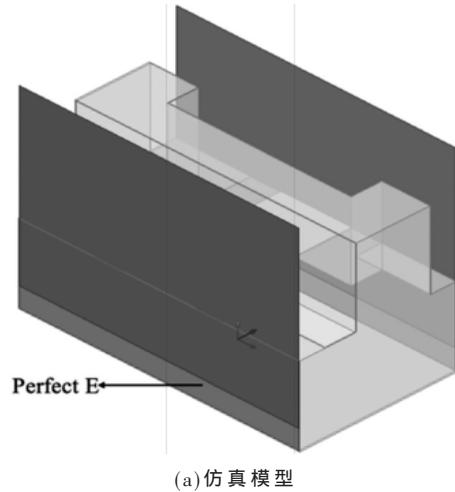


图7 添加理想导体边界条件的射频端口仿真

表2 3款样品电磁屏蔽的程度

样品编号	信号输入/输出端电磁屏蔽程度
样品1	镀上0.3 mm高度的金属层
样品2	镀上1 mm的金属层
样品3	将上筋处也镀上金属层

3款优化后端口与原始端口如图8所示,通过对样品的测试分析得到金属层高度与辐射损耗改善程度的关系。测试结果如图9所示。

在信号输入输出端镀上不同面积的金属层,即对接地共面波导结构的大功率器件封装外壳端口做出不同程度的电磁屏蔽。可以从表3中的测试结果发现,在不影响S11的情况下可以对S21结果进行相应的优化,其中金属层面积越大,电磁屏蔽效果越好,S21结果也越接近理想情况。当金属层高度为1 mm时,S21明显接近理想结果,表明辐射损耗得到了良好改善,金属层起到了电磁屏蔽的作用;当在输入输出端和上筋处均镀上金属层后,S21 ≥ -0.31 dB,与理想条件下相比的偏差是在可接受范围内的,表明此时基本可以实现电磁屏蔽效果。

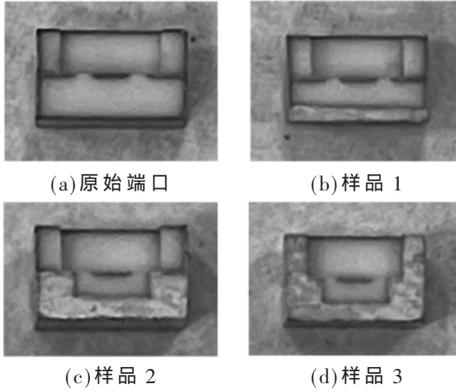
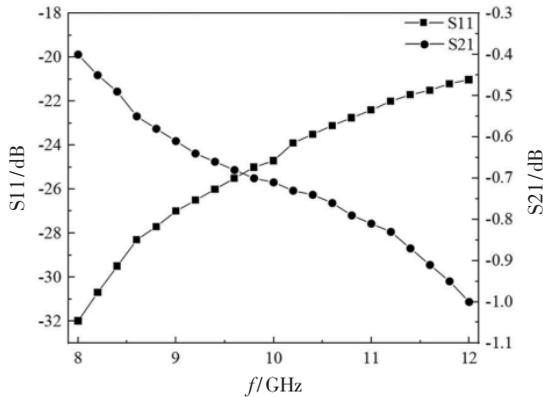
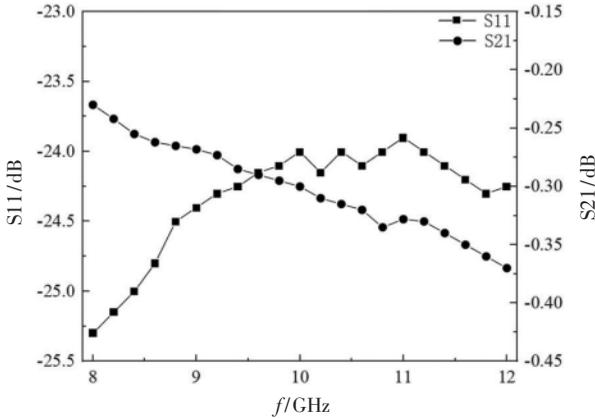


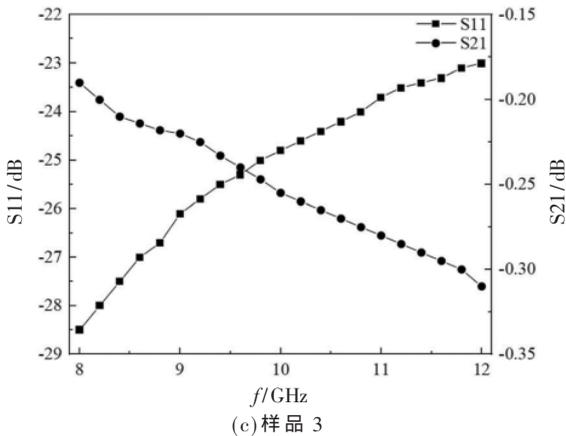
图8 各端口实物图



(a) 样品 1



(b) 样品 2



(c) 样品 3

图9 各端口测试结果

表3 各端口的S参数测试结果

金属层高度/mm	S11(Max)/dB	S21(Min)/dB
0	-22	-1.1
0.3	-21	-1
1	-23.9	-0.37
1+上筋	-23	-0.31

不过在仿真与测试中仍旧存在着差异,仿真中将波端口上移 0.3 mm 时 S21 就发生明显的恶化,说明此时已经存在辐射损耗,电磁场从 GND 与波端口底部中发生电磁泄露;在中间加上 0.3 mm 的金属层后能够避免辐射损耗,改善 S21。而在矢量网络分析仪中使用 GSG 探针进行测试时,在 GND 镀覆 0.3 mm 高度的金属层后 S21 并未得到明显改善,说明辐射损耗相较于未镀覆金属层时改善不大,电磁场从共面波导与金属层间发生了电磁泄露。原因在于探针只能传输准 2D 的电磁波,部分电磁场从探针与金属层间的介质和空气中泄露,发生辐射损耗。如图 10 所示,在信号传输中,信号传输线两侧和 GND 作为返回路径与信号线构成一个信号传输的回路。

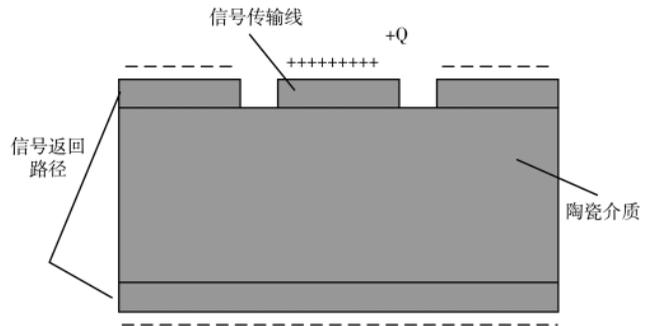


图10 带地共面波导的信号传输模式

要使得 S21 结果接近于理想情况,需要保证信号传输时的返回路径覆盖面尽可能广,信号的传输完整性也能够随之提升^[8]。

故当进行大功率器件封装外壳的设计时,由于大功率集成电路的尺寸要求导致外壳的高度较高,往往会导测试和实际使用时发生辐射损耗,导致 S21 与仿真的理想情况下出入过大。在排除工艺导致的影响外,需要完善返回路径,保证信号传输的完整性,减小辐射损耗所导致的电磁泄露,可以优化 S21 的结果。其中在信号输入输出平面镀覆较高的金属层,或者在信号线旁边的地线与 GND 间设计过孔结构或者侧孔孔壁金属化结构,都能起到较好的电磁屏蔽作用。同时改良测试方法,例如使用金属夹具将电磁场从共面波导经过微带过渡转到同轴波导中,可以有效地解决 S21 仿真与测试间存在较大差异的问题。

4 结论

本文基于 HTCC 工艺,在测试差异性分析与仿真验

证后,推导出大功率器件封装外壳在实际使用和仿真中的 S21 存在着较大偏差的原因主要来自于辐射损耗;制备了相应的样品进行了一系列的对照试验,通过对输入输出端平面镀覆不同高度的金属层来观察 S 参数结果的变化,验证了辐射损耗的存在;辐射损耗会导致信号在返回路径上的信号完整性受到影响,故而针对辐射损耗对设计进行优化,S 参数测试结果达到了 $S_{11} \leq -21$ dB, $S_{21} \geq -0.31$ dB,与仿真结果接近;并提出相应的解决方法来实现电磁屏蔽,包括镀覆金属层和设计过孔、侧孔孔壁金属化等结构以及改良测试方法,避免辐射损耗影响最终的 S 参数。本研究可以为大功率器件类封装外壳的设计、测试和实际使用提供借鉴意义。

参考文献

- [1] 印政,陶洪琪.X 波段 20 W 高效率负载调制平衡放大器 MMIC[J].固体电子学研究与进展,2022,42(1):5-9,21.
- [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] 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.
- [4] CAO B, WANG H, HUANG Y, et al. A W-band low-loss and wideband LTCC transition from waveguide to microstrip[J].

IEEE Microwave & Wireless Components Letters, 2013, 23(11): 572-574.

- [5] 施梦侨,李永彬,龚锦林,等.基于 HTCC 工艺的 X 波段小型化双面多腔体外壳的研制[J].固体电子学研究与进展,2017,38(1):66-69.
- [6] 李永彬,周昊,钱志宇,等.一种应用于 18 GHz 功放模块的陶瓷外壳设计[J].固体电子学研究与进展,2016,36(5):398-401.
- [7] RUMIANYSEV A. On-wafer calibration techniques enabling accurate characterization of high-performance silicon devices at the mm-Wave range and beyond[M]. The Netherlands: River Publishers, 2019: 11-35.
- [8] LEE K, JUNG H K, CHI H J, et al. Serpentine microstrip lines with zero far-end crosstalk for parallel high-speed DRAM interfaces[J]. IEEE Transactions on Advanced Packaging, 2010, 33(2): 552-558.

(收稿日期:2021-11-19)

作者简介:

颜汇程(1997-),男,硕士研究生,主要研究方向:微波、高速外壳。

施梦侨(1993-),女,硕士,工程师,主要研究方向:微波、毫米波外壳的仿真与测试。



扫码下载电子文档

(上接第 97 页)

- Asia-Pacific Microwave Conference (APMC). IEEE, 2019: 1038-1040.
- [9] BELYAEV B A, SERZHANTOV A M, LEKSIKOV A A, et al. Novel high-quality compact microstrip resonator and its application to bandpass filter[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2015, 25(9): 579-581.
 - [10] ZHANG R, PEROULIS D. Mixed lumped and distributed circuits in wideband bandpass filter application for spurious-response suppression[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2018, 28(11): 978-980.
 - [11] ZHANG R, LUO S, ZHU L, et al. Synthesis and design of miniaturized wideband bandpass filters with scaled trans-

mission line for spurious-response suppression[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2017, 65(8): 2878-2885.

(收稿日期:2022-02-24)

作者简介:

马瀚洋(1996-),男,硕士研究生,主要研究方向:射频滤波器技术、可重构接收机。

周雨进(1988-),男,博士研究生,高级工程师,主要研究方向:射频无源集成技术与微系统、可重构射频前端关键技术。

周骏(1982-),男,博士,研究员级高工,主要研究方向:毫米波高密度集成与射频微系统技术。



扫码下载电子文档

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