

太赫兹功率放大单片封装技术研究

张 博, 张 勇, 江伟佳, 刘广儒, 徐锐敏, 延 波

(电子科技大学电子科学与工程学院, 四川成都 611731)

摘要: 本文对太赫兹功率放大单片封装技术进行研究, 主要包括波导-微带垂直过渡和模块内的模式谐振抑制技术. 不同于常规的矩形探针平面过渡, 本文提出了一种基于分叉探针的垂直过渡结构, 适用于多层电路排布的系统/模块封装, 并在 WR-4 波导频段 (170~260 GHz) 进行了背靠背结构的实验验证, 在整个波导频段内, 回波损耗优于 16 dB, 单个过渡的插入损耗约 0.42 dB, 这包括了波导模块接触不良造成的额外的损耗. 为进一步降低过渡损耗, 提出了一种开口谐振环结构, 用来抑制不良接触导致的电磁泄漏, 使过渡损耗降低为原来的一半. 此外, 为避免功率放大模块内部发生模式谐振, 提出将电磁带隙结构设置在平面传输线的上腔来抑制高次模的激励、传输和谐振. 应用上述技术对工作于 210~230 GHz 的功率放大单片进行封装及测试. 在 210 GHz, 小信号增益达到最大值 20.75 dB, 单端封装损耗约 0.8 dB; 在 217 GHz 达到最大输出功率 15.6 dBm, 与芯片手册数据吻合较好.

关键词: 波导探针过渡; 模式谐振; 电磁带隙结构; 低损耗封装; 功率放大器; 毫米波与太赫兹

基金项目: 微波毫米波单片集成和模块电路重点实验室开放基金项目 (No.61428032204)

中图分类号: TN454 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2023)10-2724-09

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20221317

Research on Terahertz Monolithic Integrated Power Amplifier Package

ZHANG Bo, ZHANG Yong, JIANG Wei-jia, LIU Guang-ru, XU Rui-min, YAN Bo

(School of Electronic Science and Engineering, University of Electronics Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 611731, China)

Abstract: In this paper, the packaging technique of terahertz monolithic integrated power amplifier is studied, i. e. waveguide-to-microstrip vertical transition and mode-resonance suppression techniques. Different from the conventional horizontal transition based on rectangular probes, a vertical transition based on a bifurcated probe is proposed, which is suitable for multilayer circuits. To verify the performance, a back-to-back transition is fabricated and measured. In the range of 170~260 GHz, the measured return loss is better than 16 dB, while the single insertion loss, including the loss caused by non-ideal metallic contact, is around 0.42 dB. To further reduce the transition loss, a resonance ring with a slot is proposed to avoid the electromagnetic leakage. As a result, the simulated insertion loss is reduced by half. Moreover, the issue of mode resonance in the amplifier cavity is studied, and electromagnetic band gap structures are set above the plane transmission line to suppress the excitation, transmission and resonance of higher modes. The above techniques are applied to a power amplifier which is operated at 210~230 GHz. In the measurement, the maximum small-signal gain of 20.75 dB and the single packaging loss of 0.8 dB are observed at 210 GHz. At 217 GHz, the maximum output power of higher than 15.6 dBm is achieved, which is consistent with the manual.

Key words: waveguide probe transition; mode resonance; electromagnetic band gap; low-loss packaging; power amplifier; millimeter waves and terahertz

Foundation Item(s): Science and Technology on Monolithic Integrated Circuits and Modules Laboratory (No.61428032204)

1 引言

太赫兹波介于微波与红外之间, 具有频率高、波长短、频带宽等特点, 是无线电频谱的制高点. 在太赫兹

通信、安检、成像、探测等多个领域具有较大的应用潜力^[1-4]. 随着晶体管技术的发展, 晶体管的尺寸不断缩小, 其最大振荡频率已经超过 1 THz, 单片集成电路

(Monolithic Integrated Circuit, MIC)的工作频率也进入了太赫兹的低频段^[5,6]。然而,工作频率的提高增加了太赫兹单片集成电路(Terahertz Monolithic Integrated Circuit, TMIC)封装的挑战性,如 TMIC 到矩形波导的过渡。目前,大多数过渡是利用天线辐射/耦合实现的,在平面传输线到矩形波导的过渡中常用单极天线/探针^[7,8]、偶极子天线^[9,10]、缝隙馈电微带天线^[11,12]和准八木天线^[13,14]。其中,由于设计简单、工作频段宽等特点,基于单极子天线的波导探针最为常用。基于偶极天线和缝隙馈电微带天线的过渡的缺点是带宽有限,虽然文献[10]通过增加谐振点数目扩大了工作带宽,但其仍无法与单极探针相媲美。基于准八木天线过渡的工作带宽介于单极天线和偶极天线之间,但设计相对复杂。矩形探针由于形状简单和工作频带宽的优点最受欢迎,一般其输入阻抗受探针尺寸的影响,常使用四分之一波长阻抗变换器进行匹配,以实现宽带转换^[7]。但是,这种宽带性能仅能在小范围的探针宽度实现。当探针宽度超出范围时,阻抗匹配变得困难,并进一步影响工作带宽。

此外,对于功率放大器,受放大器单片性能和封装技术的影响,功率放大器的腔体内容易发生谐振,从而使其无法正常工作。一种常规的做法是在功率放大单片的上腔体粘贴吸波材料,用来吸收谐振模式的功率,但该过程需要人工操作,吸收效果无法保证,且黏合剂容易老化,导致吸波材料脱落等。

因此,本文针对波导-平面传输线过渡和腔体模式谐振抑制技术展开研究。一方面,提出了一种分叉探针用于从矩形波导到微带线的垂直过渡。与矩形探针相比,分叉探针非常细,其中的弯曲枝节有助于阻抗匹配,使分叉探针的分叉间距几乎不受限制,降低了尺寸敏感度和优化难度,更容易实现宽带低损耗过渡。此外,为进一步降低太赫兹频段因模块连接不紧密导致的电磁泄漏,提出了一种开口谐振环结构用于波导-微带垂直过渡,使过渡损耗降低为原来一半。另一方面,为抑制功率放大器腔体发生模式谐振,在上腔体设置电磁带隙(Electromagnetic Band Gap, EBG)结构,抑制了高次模激励和传输。应用上述技术对 220 GHz 的功率放大单片进行了封装测试,为 TMIC 封装奠定了基础。

2 矩形波导-微带线过渡研究

2.1 波导-微带探针垂直过渡

为了在宽带范围内实现垂直矩形波导与水平微带电路之间的高效耦合,并降低波导探针的尺寸敏感性和设计难度,我们先前设计了一种分叉探针过渡结构^[15],该过渡的结构如图 1 所示,它由上下两个金属块

和一个微带电路组成。两个 WR-4 型号的标准矩形波导被制作在上下两个金属块中,微带电路夹在两金属块之间。矩形波导是封闭的,避免了波导 E/H 面剖分。微带电路的介质基板选择低损耗的石英玻璃,其介电常数为 3.8,厚度为 50 μm 。微带电路主要由分叉探针、匹配线和 50 Ω 微带线三部分组成。分叉探针由一对对称平行的 E 面探针和弯曲枝节组成。这两个弯曲枝节在分叉探针的根部会聚,然后通过匹配线连接到 50 Ω 微带线。

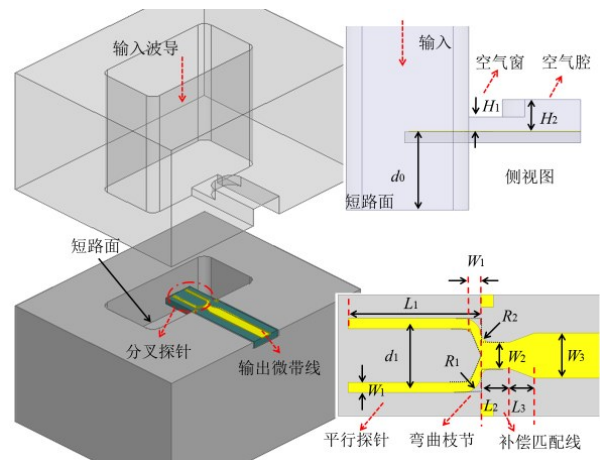


图 1 提出的分叉探针过渡模型和参数标记

和一个微带电路组成。对于常规的矩形探针,波导-微带过渡的性能对探针的尺寸变化敏感。根据电流分布,从波导耦合的能量大多分布在矩形探针边缘和根部。为了降低探针尺寸敏感度,我们将探针内部多余的导体挖空,保留探针两侧的边缘部分,形成了具有平行探针和弯曲枝节的分叉探针,提高了电流密度,并有效降低了探针尺寸敏感度。在设计中,短路面的距离为 1/4 波长,平行探针的宽度远小于波长,其长度约为标准矩形波导高度的一半。将梯形连接分支倒圆角即可得到弯曲枝节,倒圆角操作既可以降低电磁反射,又能避免出现难以制造的窄线。弯曲枝节除了实现平行探针与微带的连接,还具有阻抗匹配的功能,由于其结构受限于探针尺寸,不能完全实现阻抗自匹配,因此需要额外的高阻匹配线进行阻抗补偿,高阻匹配线的长度小于 1/4 波长。

当 $d_0 = 0.362 \text{ mm}$, $L_1 = 0.266 \text{ mm}$, $W_2 = 0.055 \text{ mm}$, $L_2 = 0.058 \text{ mm}$, $L_3 = 0.05 \text{ mm}$ 时,平行探针的间距(d_1)与 S 参数的关系如图 2 所示,可以看出,探针宽度和距离对工作带宽不敏感。参数扫描引起的性能下降是阻抗失配造成的,但通过重新优化可以再次轻易地达到最佳性能。这里, d_1 的取值范围应小于传输线波长的一半,即 0.35 mm,才能覆盖整个波导频率范围。当 d_1 增加到在传输线波长的一半时,该过渡仍然具有较好的性能,

这对矩形探针来说不可能实现,因此分叉探针具有更灵活的设计和阻抗匹配能力.最后选择 $d_1 = 0.02 \text{ mm}$ 进行最终验证.

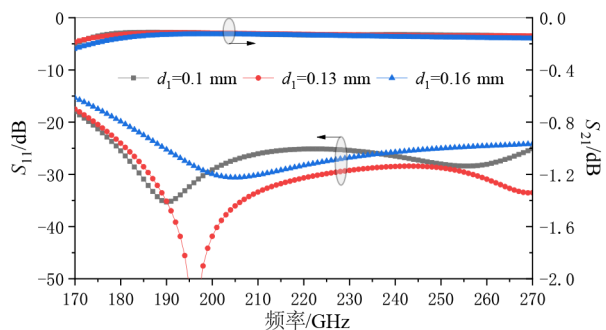


图2 仿真的S参数与分叉间距 d_1 的关系

该过渡使用计算机数控铣削工艺制造,分块波导由硬铝制成,表面镀金处理以防止氧化.石英电路是由 $4 \mu\text{m}$ 厚的金电镀而成,背靠背的探针结构如图3所示.使用矢量网络分析仪 ROHDE & SCHWARZ ZVA-67 (10 MHz ~ 67 GHz)和覆盖170~260 GHz的扩频模块3643R进行测试.仿真与测试的S参数对比如图4所示.在整个WR-4波导频段,测得该过渡的回波损耗优于16 dB,总插入损耗约为0.84 dB,单个过渡损耗约为0.42 dB.注意,该仿真结果中包含了实际装配中波导缝隙(缝隙厚度为 $10 \mu\text{m}$)产生的电磁泄漏损耗,相比理想的封闭波导过渡,与实测结果更接近.测量与仿真结果间的偏差主要归因于 $\pm 5 \mu\text{m}$ 的制造误差、组装错位以及金属块的不均匀接触.此外,实测曲线的波动较多,这是因为该过渡结构的运行频率较高,测量设备的精度和校准结果不够理想.

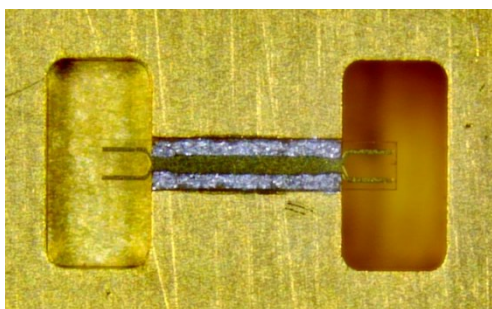


图3 分叉探针过渡结构的内部装配图

2.2 基于开口谐振环的电磁泄漏抑制结构

从上节波导-微带过渡的测试结果来看,尽管该过渡取得了宽带、低回波损耗的良好指标,但插入损耗偏大.由于在高频段使用传统的制造技术来制造高精度的无源器件具有很大的挑战性,非理想的波导接触将导致电磁泄漏,这在毫米波和太赫兹频段会更加严重.因此,本节考虑到实际加工装配情况,对上节所提出的

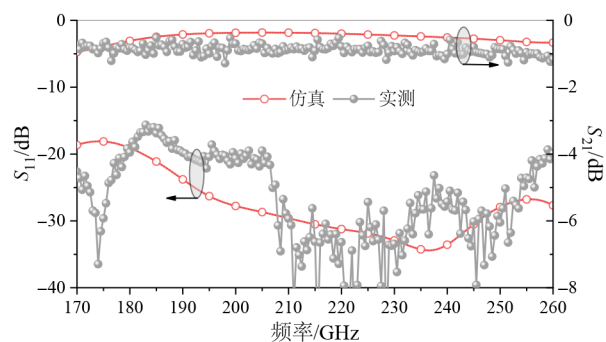


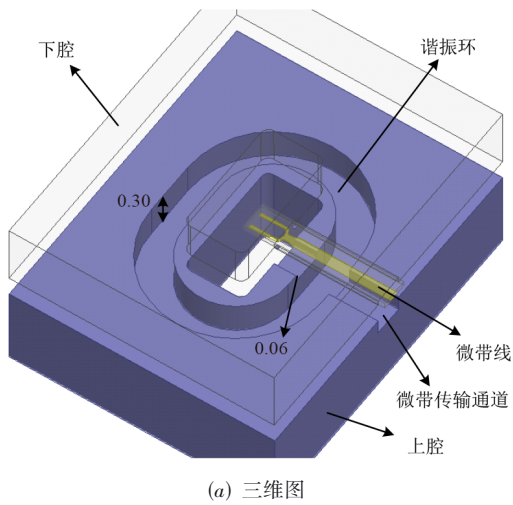
图4 背靠背过渡的测试与仿真结果对比

波导-微带过渡结构进行了电磁泄漏抑制设计,通过引入开口谐振环结构,将泄漏的电场以谐振的形式束缚在谐振环中,从而抑制电场继续向四周传播,进一步降低过渡损耗.

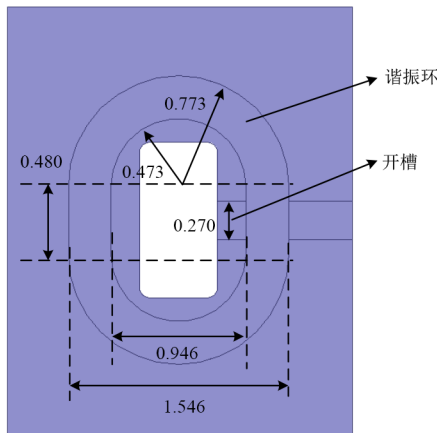
本节提出的基于开口谐振环的过渡模型如图5所示.该过渡分为上、下两个腔体和石英微带探针,基本配置与上节提出的波导探针过渡结构类似,对应结构的尺寸相同.不过,这里额外引入了一个开口谐振环结构,位于波导上腔体,该谐振环结构包括由两个半圆环和两个直槽交替连接而成的环形槽,以及位于微带线一侧的浅直槽,整个结构上下对称,将波导口包围.

当电场从输入波导输入至微带探针平面时,由于上下腔体非理想的表面接触,该平面存在约 $10 \mu\text{m}$ 的空气缝隙.在过渡中,大部分电场被探针耦合至微带传输线,少量电场从缝隙中泄漏,泄漏的能量传播到谐振环中发生模式谐振,从而阻止能量向四周进一步逸散.泄漏的电场大多从矩形波导的四角方向向外扩散,因此模式谐振发生在谐振环的四角位置,而左右直槽的电场分布较少,因此侧面浅直槽的引入不会破坏模式谐振.为了保证良好的泄漏抑制效果,半圆环的内壁与波导壁的距离、谐振环的深度和宽度均约为 $1/4$ 波长.由于浅直槽位于微带探针的正上方,其深度影响了波导探针的输入阻抗,因此其深度不能过大,为了保证准TEM的传输,将其深度定为 0.06 mm ,宽度略大于微带线宽度.

该波导-微带过渡结构的尺寸与上节相同,为了降低过渡损耗,对谐振环的尺寸进行优化,包括半圆环的半径、直槽的长度、谐振环的宽度和深度.优化后的参数值如图5所示,仿真结果如图6所示.注意,在仿真中,微带线平面的上方保留了 $10 \mu\text{m}$ 厚的空气缝隙,用来模拟因加工精度不足、模块表面非理想接触引入的缝隙.即便如此,在180~260 GHz的频率范围内,该过渡的输入回波损耗高于25 dB,插入损耗低于0.2 dB,即便在波导频带的边缘172 GHz处发生了谐振,其可用带宽仍几乎覆盖整个波导频段.



(a) 三维图



(b) 俯视图

图5 基于开口谐振环的过渡模型和谐振环尺寸标注

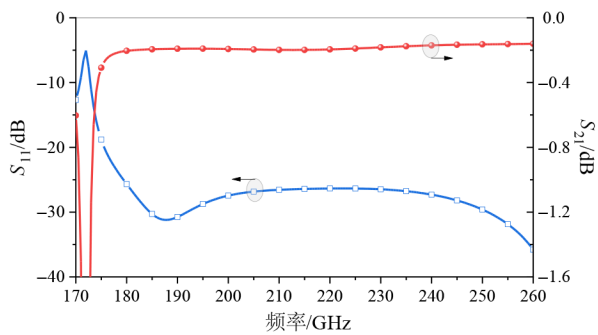
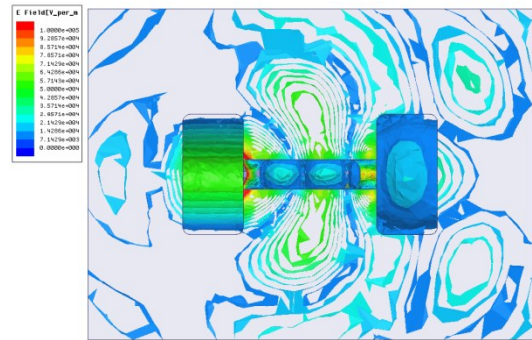


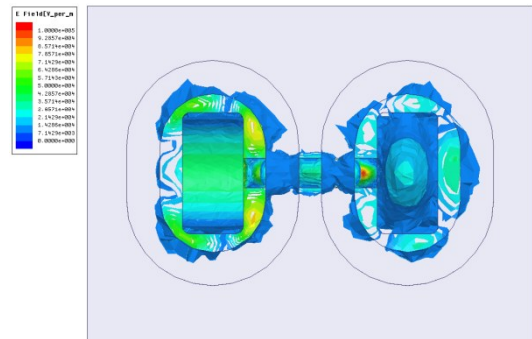
图6 基于开口谐振环的波导-微带过渡的仿真结果

为了与上节仿真测试的背靠背波导-微带过渡结构对比,我们分别对背靠背结构的两个过渡添加了这种开口谐振环结构,并进行了背靠背结构的仿真,仿真的有/无开口谐振环的波导-微带过渡在 220 GHz 频率下的电场分布如图 7 所示. 从电场分布可以看出,当没有谐振环时,除了波导和微带传输通道,电场还大量分布于缝隙中,表明电磁泄漏明显;当存在谐振环时,从缝

隙泄漏的电场则被有效限制在谐振环的内部,电场无法穿过谐振环继续向四周逸散,对电磁泄漏起到了良好的抑制效果. 两个背靠背模型的仿真结果如图 8 所示,在 180~260 GHz,有/无开口谐振环的波导-微带过渡结构的输入回波损耗均超过 20 dB,而无谐振环的过渡的插入损耗超过 0.5 dB,甚至达到 0.8 dB,有谐振环的过渡的插入损耗在 0.2 dB 左右,插入损耗不足前者的一半,带宽几乎覆盖全波导频带,实现了宽带、低损耗的太赫兹波导-微带过渡.



(a) 无谐振环



(b) 有谐振环

图7 当存在 10 μm 的缝隙时,该背靠背过渡在 220 GHz 的电场分布

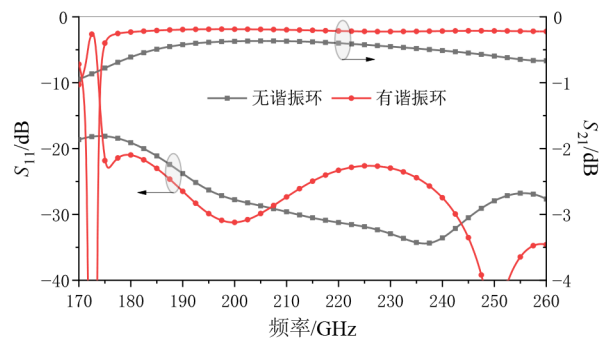


图8 有/无谐振环的背靠背过渡仿真结果对比

3 平面传输线模式谐振研究

功率放大器 TMIC 通常被封装在分块的金属腔体中,采用波导-微带探针过渡实现矩形波导与平面传输

线的模式转换和能量耦合,再利用引线键合技术,将平面传输线与TMIC以键合金丝的方式进行互联,从而实现射频信号的高效传输.前文已经研究了宽带低损耗的波导-微带探针过渡技术,然而,由于芯片直流馈电及射频连接等原因,芯片腔体较大,这给腔体内高次模传输提供了条件.当射频信号在腔体内传输和过渡时,容易因电路不连续性(如金丝键合线)等原因,引起高次模的激励、传输和辐射,从而导致在功率放大器的腔体内部发生模式谐振,影响放大器正常工作.因此,本节针对腔体内模式谐振问题,对不同模式激励下腔体内传输线的高次模传输问题展开研究,提出将EBG结构用于功率放大MMIC的上腔体,抑制腔体内部的高次模谐振.

为了简化分析过程,本节的平面传输线以常见且结构简单的微带线作为研究对象(共面波导同理).腔体中的微带线模型如图9所示.该模型工作于WR-4波导频段,微带传输线的衬底为 $50\ \mu\text{m}$ 厚的石英,特性阻抗为 $50\ \Omega$,这与多数器件的端口阻抗一致.微带线位于尺寸较大的腔体中,其输入/输出端口设置多模式激

励的波端口,以模拟微带线主模和高次模在腔体内部的传输情况.图9(a)为不采取任何高次模抑制措施的情况,毫无疑问,端口激励的模式都可以畅通无阻地在腔体内部传输,导致主模传输效率降低.图9(b)为采取高次模抑制措施的情况,即在微带线的上腔设置EBG结构,其组成单元为周期性排布的方形钉子.当方钉的周期和高度与 $1/4$ 波长相比拟,且方钉和与微带线的距离小于 $1/4$ 波长时,就能在特定频率下使高次模截止,实现高纯度的TEM模式传输^[16].在图9(b)中,可通过调节方钉的边长、周期、高度及其与微带线的距离,使TEM模式的单模传输频带覆盖目标频段(拟封装的功率放大器MMIC的工作频率为 $210\sim 230\ \text{GHz}$).需要说明的是,方钉与微带线的距离越小,对高次模传输的抑制越强.但考虑到实际组装时,腔体内部通常采用键合金丝的方式实现微带线与MMIC的信号互联,因此方钉的与微带线的距离不能过小,以防止金丝与上腔体短路.最终,方钉与微带线的距离被确定为 $0.15\ \text{mm}$,保证腔体内部有足够的空间进行芯片封装.

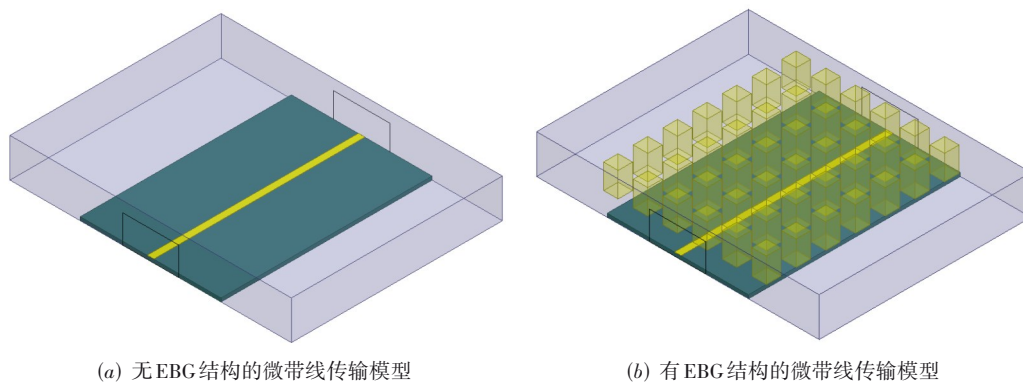


图9 微带线传输模型

图10显示了不同模式激励的微带线在频率为 $220\ \text{GHz}$ 时的电场分布.由电场分布可以看出,当主模TEM模式激励时,微带线能实现高效的电磁传输;当第一、第二高次模激励时,电场传输至第一排方钉便截止,无法进一步传输,保证了平面传输线仅能实现主模传输.此外,在有/无EBG结构时,不同模式的反射、传输和转换系数如图11所示.图11(a)为微带线主模的传输、反射情况,在没有EBG结构时,该模式的 S 参数曲线在 $178\ \text{GHz}$ 附近存在明显的不连续性.图11(b)和(c)分别为微带线腔体第一和第二高次模的传输、反射情况.没有EBG结构时,整个波导频带内均存在严重的模式震荡,导致 S 参数曲线出现大量的尖峰;而存在EBG结构时,在 $170\sim 240\ \text{GHz}$ 的频带,带内 S 参数曲线平稳,且第一、第二高次模的传输系数分别基本在

$-40\ \text{dB}$ 和 $-80\ \text{dB}$ 以下,表明EBG结构对高次模的高抑制效果.尽管在高于 $242\ \text{GHz}$ 的频带出现谐振,但并不影响后续的MMIC封装,另外,也可通过调节EBG结构的方钉尺寸将谐振频带移出目标频段.图11(d)则为微带线主模向第一、第二高次模的转换情况,从对比曲线可以分析出,EBG结构的存在使主模向第一高次模的转换系数降低了 $20\ \text{dB}$ 以上,使2、3模式的转换系数在带内均低于 $-50\ \text{dB}$,保证了微带平面传输线在腔体内部的高纯度传输,证明了腔体内部设置EBG结构的有效性.

4 太赫兹功率放大模块

为了验证上述技术,对一款工作于 $210\sim 230\ \text{GHz}$ 的功率放大芯片进行有源封装及测试,金属腔体的材质

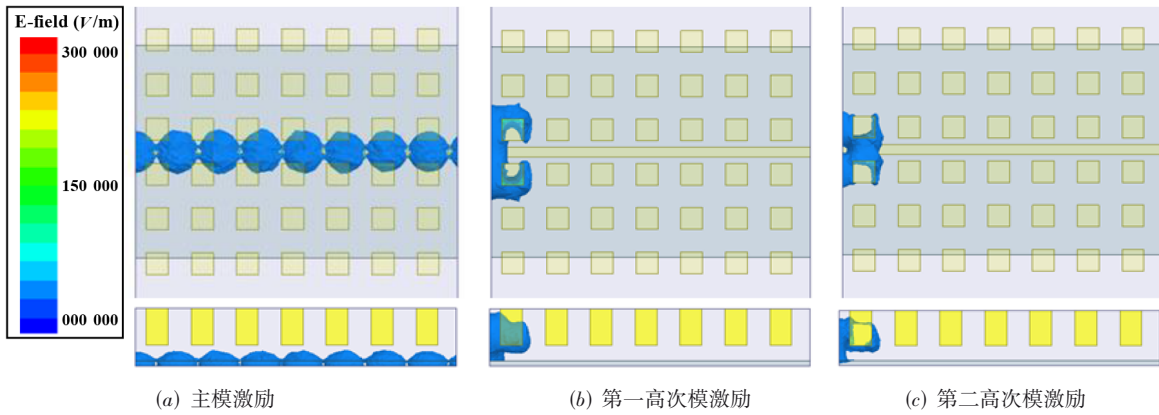


图 10 不同模式激励下微带线电场分布的俯视图和侧视图

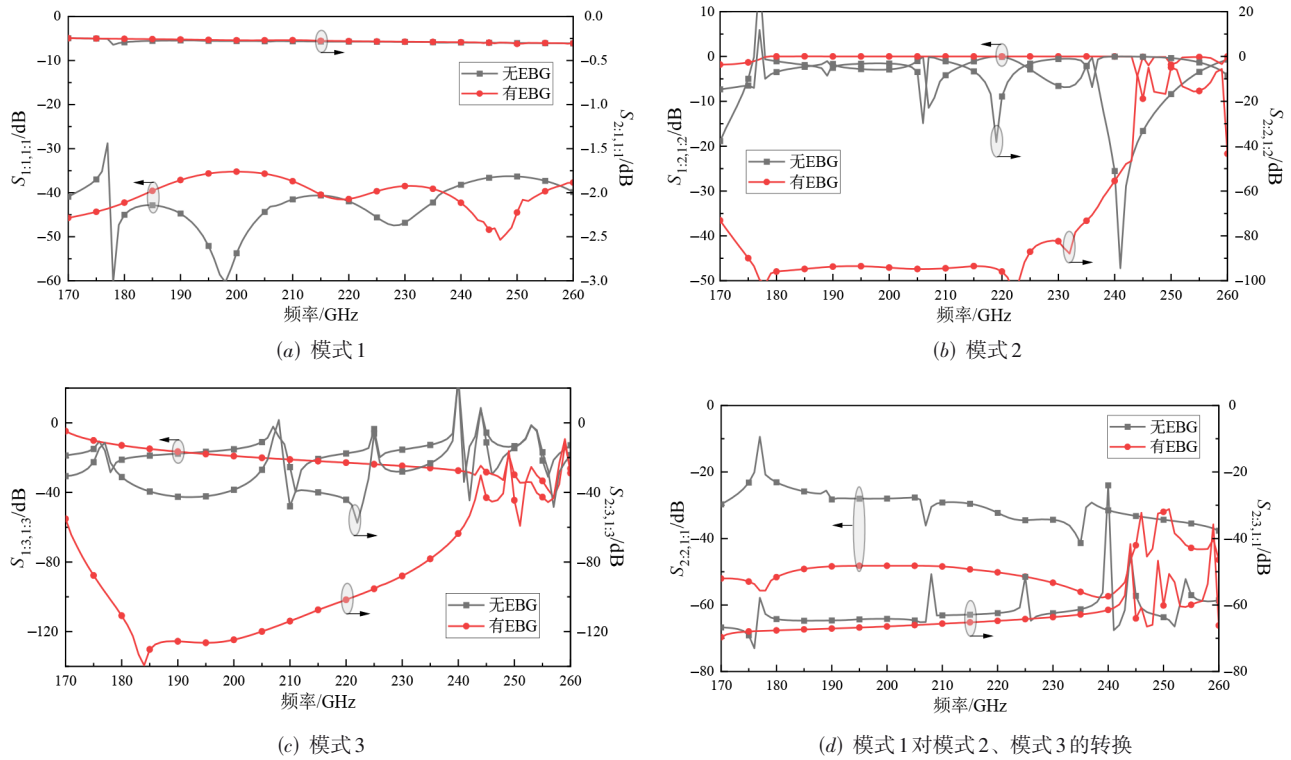
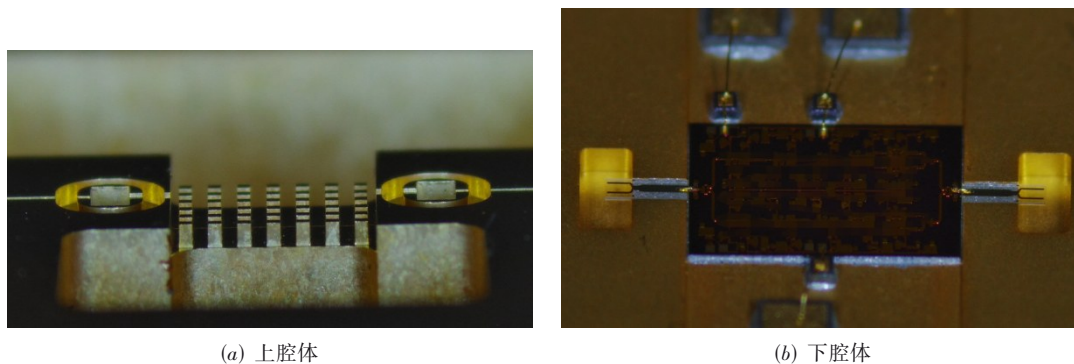


图 11 不同模式的反射、传输和转换系数

为黄铜,使用计算机数控铣削技术制造,并做表面镀金处理.金属腔体分为上腔体1、上腔体2和下腔体三部分,利用销钉对位,螺钉紧固,最终制造装配的功率放大器模块内部图如图12所示.

在测试中,一方面,使用上述的矢量网络分析仪 ROHDE & SCHWARZ ZVA-67(10 MHz ~ 67 GHz)结合扩频模块 3643R(170~260 GHz)对功率放大器进行小信号增益测试.测试前,需在扩频模块的输入端连接衰减器,防止放大后的功率过高,超出矢量网络分析仪的功率承受范围,然后对端口进行校准,校准完成后接入待测放大器,得到小信号增益曲线.另一方面,利用倍频放大链路,对待测放大器进行饱和输出功率测试.用于

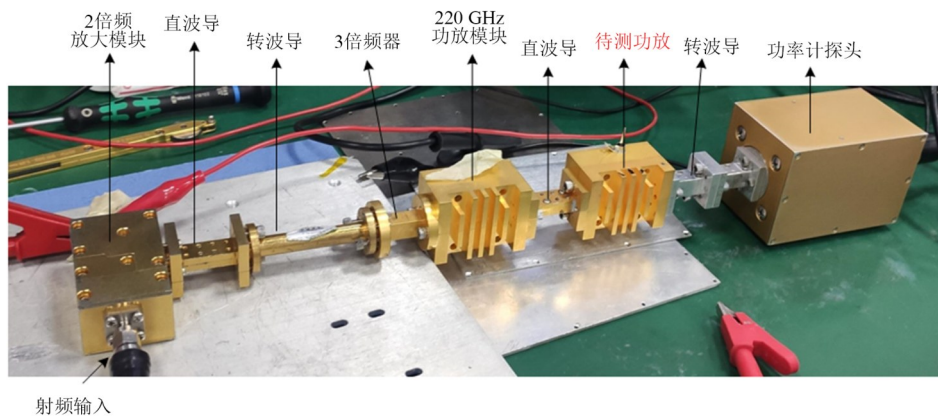
功率放大器测试的倍频放大链路如图13所示.经过六倍频放大链路,将35~38.3 GHz的Ka波段信号倍频至所需的210~230 GHz,使用220 GHz功率放大器进行前级驱动,利用功率计 Erickson PM4 检测待测功率放大器的饱和输出功率.测得的功率放大模块的小信号增益和饱和输出功率如图14所示.测试的频率覆盖200~230 GHz,与厂商提供的芯片手册相比,在210~230 GHz的范围内,测试结果与手册数据的趋势吻合.在210 GHz附近,小信号增益达到最大值,为20.75 dB,背靠背过渡的芯片封装损耗约为1.6 dB,单端损耗为0.8 dB.在217 GHz附近,饱和输出功率达到峰值,超过15.6 dBm.随着工作频率升高,在220~230 GHz频段,功



(a) 上腔体

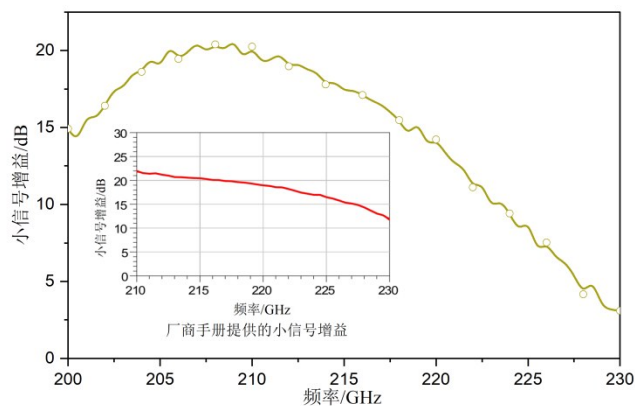
(b) 下腔体

图12 制造装配的功率放大模块内部图

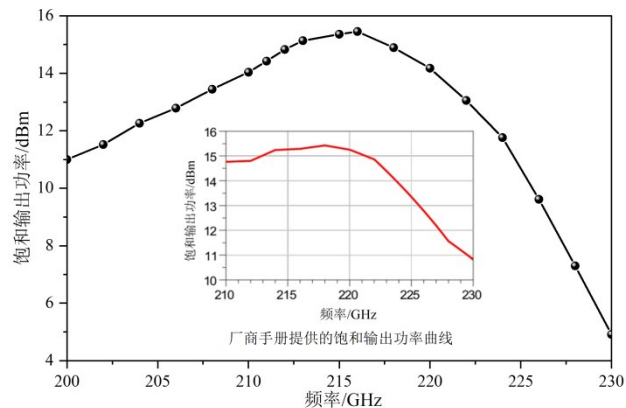


射频输入

图13 功率放大模块测试链路



(a) 小信号增益曲线与手册对比



(b) 饱和输出功率曲线与手册对比

图14 实测的功率放大模块结果

率放大模块的小信号增益和饱和输出功率急剧下降, 实测结果与手册结果的偏差逐渐增大, 这一方面与芯片本身的性能有关, 另一方面是受厂商不同芯片批次的影响. 从整体来看, 测试曲线平滑, 无明显模式谐振发生, 具有良好的封装效果.

5 结论

本文主要针对太赫兹功率放大器单片封装关键技术展开研究. 首先提出了一种分叉探针结构用于波导-微带垂直过渡, 该探针降低了传统探针的尺寸敏感度和优化难度, 具有宽带低损耗的特性. 为进一步降低过

渡损耗,提出了一种开口谐振环结构,用于抑制非理想接触表面导致的电磁泄漏,使过渡损耗降低为原来的一半.然后提出将电磁带隙结构设置在腔体内部,降低了腔体内发生模式谐振的风险.最后应用这些技术对太赫兹功率放大器单片进行封装测试,验证了所提出的封装技术的可行性,为毫米波、太赫兹频段的单片封装设计提供了指导.

参考文献

- [1] 刘松卓,于伟华,邓长江,等.面向通信系统的太赫兹调制技术进展现状[J].无线电通信技术,2021,47(1):44-50.
LIU S Z, YU W H, DENG C J, et al. Recent progress of research on terahertz signal modulation technology for communication systems[J]. Radio Communications Technology, 2021, 47(1): 44-50. (in Chinese)
- [2] HASSANIN A A I M, SHAABAN A S E, ABD. EL-SAMIE Medical applications of image reconstruction using electromagnetic field in terahertz frequency range[C]//2019 International Symposium on Networks, Computers and Communications (ISNCC). Piscataway: IEEE, 2019: 1-4.
- [3] 张开春.太赫兹扩展互作用振荡器的矩形耦合腔特性研究[J].电子学报,2011,39(3):632-635.
ZHANG K C. Study of characteristic of rectangular coupled-cavity slow-wave structure for extended interaction oscillator in terahertz band[J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(3): 632-635. (in Chinese)
- [4] 吴振华,张开春,刘盛纲.折叠波导结构的THz振荡辐射源研究[J].电子学报,2009,37(12):2677-2680.
WU Z H, ZHANG K C, LIU S G. Research of THz folded waveguide oscillator radiation source[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(12): 2677-2680. (in Chinese)
- [5] LI X C, CHEN W H, WANG Y F, et al. A 160 GHz high output power and high efficiency power amplifier in a 130-nm SiGe BiCMOS technology[C]//2020 IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium (RFIC). Piscataway: IEEE, 2020: 199-202.
- [6] CHEN Y, ZHANG L, WANG Y, et al. A 143GHz power amplifier based on over neutralization and power combining technique in 65nm CMOS[C]//2017 International Conference on Electron Devices and Solid-State Circuits (EDSSC). Piscataway: IEEE, 2017: 1-2.
- [7] SHIH Y C, TON T N, BUI L Q. Waveguide-to-microstrip transitions for millimeter-wave applications[C]//1988., IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. Piscataway: IEEE, 2002: 473-475.
- [8] LEONG Y C, WEINREB S. Full band waveguide-to-microstrip probe transitions[C]//1999 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. Piscataway: IEEE, 2002: 1435-1438.
- [9] LEONG K M K H, DEAL W R, RADISIC V, et al. A 340-380 GHz integrated CB-CPW-to-waveguide transition for sub millimeter-wave MMIC packaging[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2009, 19(6): 413-415.
- [10] ZHU H L, ZHANG Y, WU C K, et al. Integrated dipole antenna with bandwidth enhancement for terahertz waveguide-to-CPWG transition[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2020, 19(12): 2433-2436.
- [11] GRABHERR W, HUDER W G B, MENZEL W. Microstrip to waveguide transition compatible with MM-wave integrated circuits[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1994, 42(9): 1842-1843.
- [12] KHANI B, MAKHLOUF S, DIILME S, et al. InP-based grounded coplanar waveguide to WR3 transition for monolithic integration with THz photodiodes[C]//2018 43rd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz). Piscataway: IEEE, 2018: 1-2.
- [13] KANEDA N, QIAN Y, ITOH T. A broad-band microstrip-to-waveguide transition using quasi-Yagi antenna [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1999, 47(12): 2562-2567.
- [14] KIM J, CHOE W, JEONG J. Submillimeter-wave waveguide-to-microstrip transitions for wide circuits/wafers[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2017, 7(4): 440-445.
- [15] ZHANG B, ZHANG Y, WU C K, et al. Millimeter-wave broadband waveguide-to-microstrip transition using a bifurcated probe[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2022, 32(9): 1031-1034.
- [16] RAJO-IGLESIAS E, ZAMAN A U, KILDAL P-S. Parallel plate cavity mode suppression in microstrip circuit packages using a lid of nails[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2010, 20(1): 31-33.

作者简介



张博 男,1995年出生于河北省衡水市.2019年毕业于电子科技大学电磁场与无线技术专业,获学士学位.现为电子科技大学博士研究生,主修电子科学与技术.主要研究方向为微波/毫米波电路理论与技术,以及毫米波和太赫兹固态电路与系统.

E-mail: 2834874954@qq.com



张勇(通讯作者) 男,1975年9月出生于四川省南充市.电子科技大学教授,博士生导师,IEEE高级会员.2004年获电子科技大学博士学位.四川省海外高层次留学人才,入选第十二批电子科技大学“百人计划”,入选第七批国家高层次人才.主要研究方向为微波与毫米波集成电路,以及固态太赫兹技术等.中国电子学会会员编号:E190029499M.

E-mail: yongzhang@uestc.edu.cn



江伟佳 男,1998年4月出生于安徽省滁州市.2020级电子科技大学硕士研究生.主要研究方向为包括毫米波/太赫兹集成电路和系统.

E-mail: 1349257166@qq.com



刘广儒 男,2000年2月出生于山西省晋中市.现为电子科技大学硕士研究生.主要研究方向为包括毫米波/太赫兹集成电路和系统.

E-mail: guangru.liu@qq.com