



基于低温共烧陶瓷的毫米波-太赫兹基板集成波导过渡结构

滕鲁 喻忠军 朱大立

Millimeter wave-terahertz substrate integrated waveguide transition structure based on low temperature co-fired ceramic

Teng Lu Yu Zhong-Jun Zhu Da-Li

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 118401 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20220072

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220072>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

双共焦波导结构二次谐波太赫兹回旋管谐振腔设计

Design of second harmonic terahertz gyrotron cavity based on double confocal waveguide

物理学报. 2020, 69(6): 068401 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191222>

基于场变换的毫米波半波片设计

Millimeter-wave half-waveplate based on field transformation

物理学报. 2018, 67(7): 070201 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20171774>

基于超材料的可调谐的太赫兹波宽频吸收器

Tunable terahertz wave broadband absorber based on metamaterial

物理学报. 2019, 68(24): 247802 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191216>

太赫兹波生物效应

Biological effects of terahertz waves

物理学报. 2021, 70(24): 240701 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20211996>

高温等离子体中太赫兹波的传输特性

Transmission characteristics of terahertz wave in high temperature plasma

物理学报. 2018, 67(17): 174101 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180647>

钛圆盘阵列增强微测辐射热计太赫兹波吸收特性

Absorption enhancement of terahertz wave in microbolometers by titanium disk array

物理学报. 2019, 68(20): 208501 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190902>

基于低温共烧陶瓷的毫米波-太赫兹 基片集成波导过渡结构

滕鲁^{1)2)3)†} 喻忠军¹⁾³⁾ 朱大立²⁾³⁾

1) (中国科学院空天信息创新研究院微波微系统研发部, 北京 100094)

2) (中国科学院信息工程研究所第四研究室, 北京 100093)

3) (中国科学院大学, 北京 100049)

(2022年1月10日收到; 2022年2月7日收到修改稿)

在微波电路系统中, 电磁波由一种传输介质进入另一种传输介质所带来的不连续性问题会极大地影响系统的传输性能, 这一直是设计微波电路所要关注的重点问题. 当电磁波频段进入毫米波和太赫兹频段之后, 如何实现电磁波从金属矩形波导接口到介质基板的高效、低损耗传输, 是实现毫米波太赫兹通信系统的关键所在. 本文设计了一种基于低温共烧陶瓷的基片集成波导-矩形波导过渡结构, 通过阶梯渐变结构来改善传输性能、拓展带宽, 并在此基础上设计了用于馈电网络的一分二过渡结构, 引入空腔结构来降低损耗并拓展带宽. 这两种结构都具有结构简单、易于加工的特点, 可在 W 波段或 D 波段实现良好的传输特性, 具备一定的频带普适性. 在频率较高的 D 波段加工制作了测试基板, 测量了其传输特性以验证该结构的实用性, 其测试结果表明: 该基片集成波导过渡结构可在 126—149 GHz 或 112—139 GHz 的频带内实现良好的传输特性; 一分二过渡结构可在 132—155 GHz 的频带内实现良好的传输特性.

关键词: 基片集成波导, 过渡结构, 毫米波太赫兹, 低温共烧陶瓷

PACS: 84.40.-x, 84.40.Az, 84.40.Lj

DOI: 10.7498/aps.71.20220072

1 引言

随着毫米波、太赫兹技术的发展, 通信技术的应用频率正在向更高频段拓展. 传统的微带传输线在毫米波、太赫兹频段的损耗显著增大, 寄生效应也更加明显, 因此微带线在毫米波、太赫兹频段的应用受到了很大限制^[1-3]. 目前毫米波、太赫兹通信系统和测试仪器接口, 以及系统内各个模块、单元间的连接主要使用损耗更小的波导, 然而传统的金属矩形波导 (rectangular waveguide, RWG) 的尺寸过大、不易于集成, 在平面电路中难以应用. 基片集成波导 (substrate integrated waveguide, SIW)

是一种制作在介质基片中的波导结构, 具有便于集成、损耗低、功率容量高等优势, 在毫米波、太赫兹频段得到了较为广泛的应用^[4-6]. 因此, SIW 与标准 RWG 之间的过渡互联结构是毫米波、太赫兹通信系统中的关键技术, 尤其在低集成度的平面天线阵列方面, 具有重要意义.

近几年国内外的研究成果主要集中在 W 波段及频率更低的 Ka 波段或 V 波段, 所设计的过渡结构模型复杂, 对工艺要求较高, 且频带较窄, 应用场景有限^[7-15]. Zhang 等^[11] 采用贴片加耦合槽的结构, 使用印刷电路板 (printed circuit board, PCB) 工艺制作了一种 SIW 到 RWG 的过渡结构, 在 85.7—104.5 GHz 频带内实现了 -10 dB 以内的回波损耗; Cao 等^[13] 使用阶梯结构, 使用低温共烧陶

† 通信作者. E-mail: tengl16@mails.ucas.edu.cn

瓷 (low temperature co-fired ceramics, LTCC) 工艺制作了一种 RWG 到微带线的过渡结构, 在 86—97 GHz 的频带内实现了 -15 dB 以内的回波损耗. 这两个研究成果是比较具有代表性的 W 波段过渡结构, 且性能较好, 其他成果频带较低或大量使用金属化工艺, 参考价值有限.

本文基于 LTCC 技术, 对 SIW 到 RWG 的过渡结构开展了研究设计, 得到了一种结构简单、易于设计和加工、可靠性高且装配简便的 SIW-RWG 的过渡结构, 可分别在 W 波段和 D 波段实现 SIW-金属波导的低损耗宽频带互联. 在此基础上, 针对后续 LTCC 阵列天线设计的需求, 进一步设计了一种一分二的过渡结构, 可用于 SIW 组成的馈电网络输入端, 并通过引入空腔结构与原有的阶梯结构相结合, 来进一步延展带宽. 该一分二过渡结构也能在 W 波段和 D 波段得到良好的传输特性, 证明本文所提出的模型具有一定的频带普适性, 通过调整模型参数可在毫米波和太赫兹频带内具有良好的适用性. 为了验证本文所提出的两种过渡结构模型, 选取了频段较高的 D 波段进行了实际的加工制板测试, 得到了与仿真结果较为吻合的测试结果, 证明了两种过渡结构的实用性.

2 SIW-RWG 过渡结构设计

2.1 理论模型

SIW 是用周期排布的金属通孔在介质基板中实现波导的场传播模式, 其结构示意图如图 1 所示. 介质基板的上下表面为金属层, 结合介质基板中的两排金属通孔, 构造出一种类似于 RWG 的结构 [4-6]. 在满足一定前提条件的情况下, 可以认为

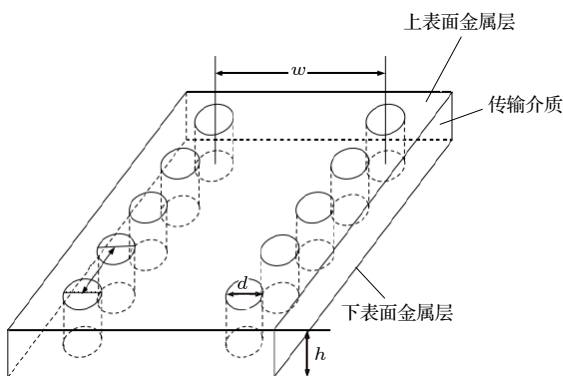


图 1 SIW 的典型结构

Fig. 1. Typical structure of SIW.

SIW 与标准 RWG 的主要区别在于传输介质不同. SIW 的主要设计参数包括: 通孔直径 d ; 相邻通孔的间距 s ; SIW 的宽度 w ; 介质基片的厚度 h 和介质介电常数 ϵ_r , 这些参数可以决定 SIW 的传输特性.

出于为平面天线阵列馈电的需求, 本文所要设计的是垂直方向传输的 RWG 到水平方向传输的 SIW 的过渡结构, 属于垂直过渡. 具体的连接方式为: RWG 的一端与 SIW 的底面相连接, 在连接处 SIW 底面金属层开窗, 使 RWG 中传输的电磁波能够进入到 SIW 中, 如图 2 所示.

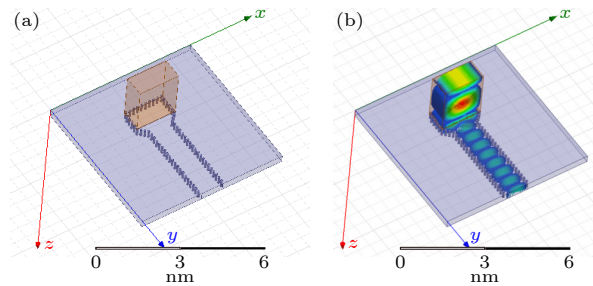


图 2 SIW-RWG 的垂直过渡结构 (a) 结构模型; (b) 电场传输示意图

Fig. 2. Schematic diagram of vertical transition structure of SIW-RWG: (a) Structural model; (b) schematic diagram of electric field transmission.

2.2 阶梯结构设计

由其他研究成果不难看出, SIW 与 RWG 接触面上所开的窗口尺寸和形状会影响该类型过渡结构的传输特性 [7-11], 而为了减小传播方向的突变带来的影响, 同时构成渐变过渡, 可以在 SIW 内部构造阶梯结构来实现更好的传输性能 [12-14].

接下来从实际制作工艺的角度考虑带有阶梯结构的 SIW-RWG 过渡结构的设计. SIW 的传输模式与 RWG 近似, 因此传输截面的厚度和宽度对 SIW 传输特性的影响也与 RWG 的截面尺寸对其传输特性的影响相似. 本设计所采用的 LTCC 工艺的每层生瓷带厚度固定, 因此, SIW 结构的整体厚度只能取单层生瓷带厚度的整数倍. 考虑到电磁波由 RWG 内的垂直传播过渡为 LTCC 基板内的水平传播, 可将 SIW-RWG 的连接处等效为垂直方向传播的 RWG-介质填充波导-水平方向传播的 SIW 的过渡, 因此在中间的等效介质填充波导部分, 应使介质填充波导的垂直厚度尽可能接近 $1/4\lambda_g$ (导波长), 以实现更高的传输效率 [15]. 经过计算并结合建模仿真结果, 选用烧结后厚度为

0.094 mm 的 Ferro A6 m 生瓷带时, W 波段的 SIW 过渡结构使用 5 层较为合适, D 波段的 SIW 过渡结构使用 3 层较为合适.

确定了本设计中采用的 SIW 的厚度 h 之后, 还需要确定其宽度 w . 考虑到金属通孔的直径 d 和通孔间距 s 是由制作工艺决定的, 因此, 在 h 一定的情况下, 需要从 SIW 的传输特性和传输模式的角度来确定宽度 w . 之前学者们对于 SIW 与 RWG 的传输模式、传输特性、等效条件等做了较为丰富的研究, 由文献 [6] 中的公式可知, SIW 可以等效为 RWG 的前提条件是

$$\frac{s}{d} < 2, \quad \frac{d}{w} < 0.2. \quad (1)$$

满足 (1) 式的情况下, 可以认为 SIW 的损耗较小, 其传输特性与 RWG 类似.

为保证等效 RWG 的传输模式为单模传输, 即只采用主模 TE_{10} 模工作, 频率 f 需要满足

$$f > \frac{c}{2w_e\sqrt{\mu_r\epsilon_r}}, \quad (2)$$

其中 c 为光速, w_e 为等效宽度, μ_r 为相对磁导率. 另一方面, 为保证只有主模 TE_{10} 模传输, 还需要抑制最靠近 TE_{10} 模的高次模, 即 TE_{20} 模与 TE_{01} 模. 而 SIW 中只能传输 TE_{m0} 模, 所以需要抑制的只有 TE_{20} 模, 为此要满足

$$f < \frac{c}{w_e\sqrt{\mu_r\epsilon_r}}. \quad (3)$$

结合 (2) 式和 (3) 式, 可以得到单模传输的条件

$$\frac{c}{2w_e\sqrt{\mu_r\epsilon_r}} < f < \frac{c}{w_e\sqrt{\mu_r\epsilon_r}}, \quad (4)$$

其中 w_e 可由 SIW 与等效 RWG 之间的等效宽度公式得到:

$$w_e = w - 1.08\frac{d^2}{s} + 0.1\frac{d^2}{w}. \quad (5)$$

由 LTCC 的制作工艺规范可知, 金属通孔的直径 d 只能取特定的数值, 而通孔间距 s 与通孔直径 d 相关, 出于工艺可靠性的考虑, 要求 $s \geq 2d$. 经过对 SIW 通孔排布方式的仿真发现, 通孔排布越密集, SIW 的侧壁越接近于理想电平面, SIW 的传输损耗越小. 因此, 在过渡结构的设计中, 金属通孔直径 d 和通孔间距 s 都应取最小值, 在本设计采用的 LTCC 工艺中 d 的最小值为 0.085 mm (烧结后), 相应地, s 也取最小值 0.17 mm. 结合 (1), (4), (5) 式, 通过计算得出 SIW 的宽度 w 的取值范围,

经过仿真验证, w 在该范围内可以保证 SIW 的传输特性良好, 且传输模式为单模传输.

SIW 可以等效为介质填充波导, 而介质填充波导由于填充介质的存在, 其尺寸小于标准 RWG 的尺寸, 由此决定了阶梯渐变方向为沿远离 RWG 口的方向阶梯长度递减. 前面已经确定了 W 波段和 D 波段应使用的 LTCC 介质层数, 阶梯最高阶数应小于所用层数. 其余设计变量, 如每级阶梯宽度、长度, 还有 SIW 与 RWG 接触面上所开的窗口尺寸等参数, 还需要通过仿真优化来确定合适的取值.

经过一系列的仿真优化和参数调整, 最终得到的 SIW-RWG 过渡结构如图 3 所示 (以 D 波段的模型为例). 该结构包含了三层 LTCC 介质层, 过渡端的上下层通孔之间存在递进排布以构成阶梯渐变结构, 同时每层之间的印刷金属层为金属地, 负责连通上下层的金属通孔. 两级阶梯长度分别为 0.06 mm 和 0.32 mm, 仿真模型的两个端口分别设置在 RWG 波导口和 LTCC 基板的侧面.

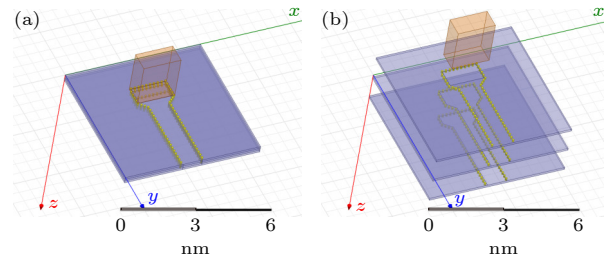


图 3 D 波段 SIW-RWG 过渡结构 (a) 仿真模型; (b) 展开视图

Fig. 3. D-band SIW-RWG transition structure: (a) Simulation model; (b) expanded view.

D 波段 SIW-RWG 过渡结构模型的仿真结果如图 4 所示, 该结果是一个初步的定性描述, 通过改变阶梯结构的参数和 SIW 表面金属层的开窗参数, 可以得到与该结果较为相近的结果: 从回波损耗 S_{11} 的角度, 以 -15 dB 为基准, 可得到 20 GHz 以上的带宽; 从插入损耗 S_{21} 的角度, 带内损耗约为 0.5—0.7 dB. 在 2.4 节中会根据装配和测试的需求将该模型向着更贴合实际的方向进行修改, 并得到更具有参考意义的仿真结果.

W 波段的过渡结构与 D 波段相似, 其模型和仿真结果如图 5 所示. 该结构包含 5 层 LTCC 介质, 四级阶梯结构, 阶梯长度分别为 0, 0.09, 0.30, 0.30 mm, 可在 87.8—98.7 GHz 的频带内实现

-20 dB 以下的回波损耗, 在 W 波段阵列天线中有较好的实用性, 在后续的天线阵列中将使用该结构进行馈电, 因此没有为其制作专用的测试基板.

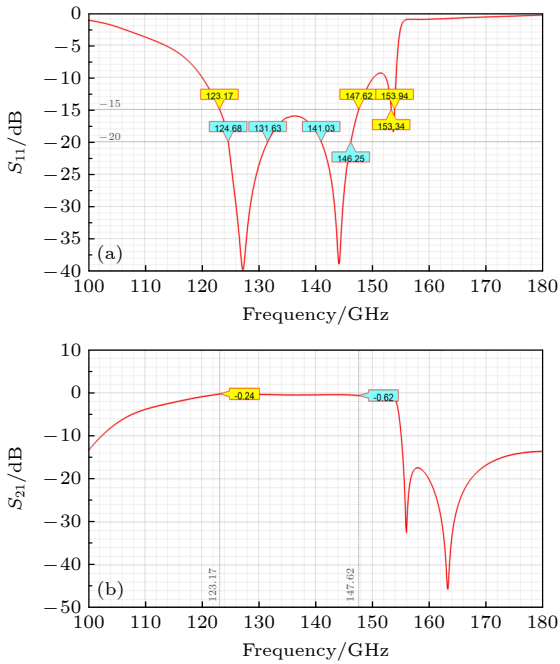


图 4 D 波段 SIW-RWG 过渡结构的仿真结果 (a) 回波损耗 S_{11} ; (b) 插入损耗 S_{21}
 Fig. 4. Simulation results of D-band SIW-RWG transition structure: (a) Return loss S_{11} ; (b) insertion loss S_{21} .

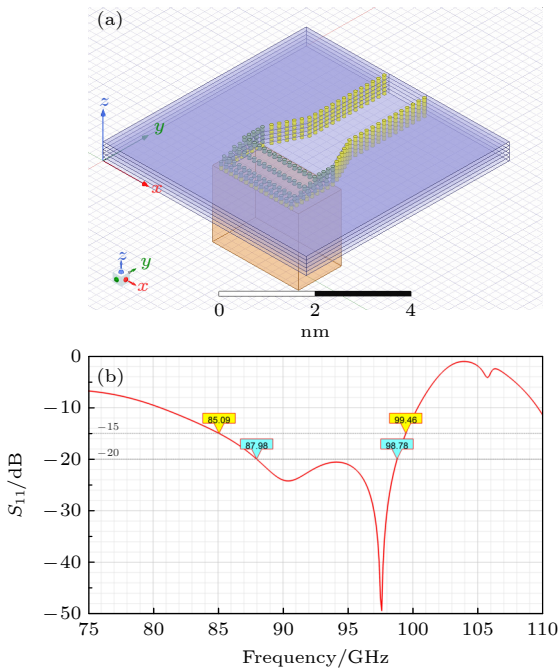


图 5 W 波段 SIW-RWG 过渡结构 (a) 结构模型; (b) 回波损耗 S_{11} 仿真结果
 Fig. 5. W-band SIW-RWG transition structure: (a) Structural model; (b) simulation results of return loss S_{11} .

2.3 一分二过渡结构设计

设计 RWG 到 SIW 过渡结构的目的是用于馈电网络的前端部分, 将电磁波由 RWG 传输到 SIW 中, 再在 SIW 内制作一分二、二分四、四分八等逐级功率分配的馈网结构, 用于平面天线阵列的馈电 [16-18]. 因此, 在 2.2 节的 SIW-RWG 过渡结构的基础上, 进一步设计了一分二过渡结构, 将馈电网络功率分配的第一级与过渡结构相结合. 这种一分二过渡结构的优点在于可以缩短传输路径, 减小传输损耗. 同时, 由于过渡结构位于 SIW 的初始段, 便于添加一些特殊结构以获得更好的功率分配传输性能.

由 2.2 节中的 SIW-RWG 过渡结构直接做图形对称得到的一分二过渡结构的性能并不好, 其主要问题在于这种 T 型结构会导致回波较强, 因而使中心频点外的可用带宽过窄. 参考微波电路中的 T 型结构功率分配器, 可以在三个端口的连接点处增加特殊结构来改善传输性能. 在对 SIW 的特性进行调研的过程中, 从空心基片集成波导 (empty substrate integrated waveguide, ESIW) 与 SIW 的特性对比中得到启发 [19-21], 结合 LTCC 工艺所支持的特殊结构, 决定在与过渡端相连的 SIW 处做挖腔处理来改善一分二过渡结构的传输性能 [22,23].

ESIW 的典型结构如图 6 所示 [24], 是通过保留 SIW 金属化通孔附近的介质, 将其余部分的介质移除而得到的, 其本质是以空气为传输介质的 SIW. 在对 ESIW 的特性进行研究时, 引入了等效介电常数的概念, 即根据空气介质占整体介质的比例 (w_1/w) 和基片介质的相对介电常数得出对于整体 ESIW 结构而言的等效介电常数. 由 (1) 式可

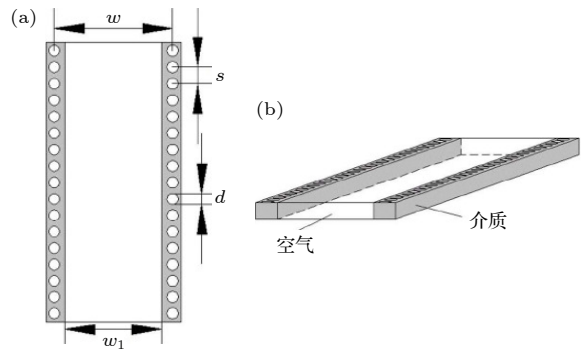


图 6 ESIW 的典型结构 [24] (a) 俯视图; (b) 结构图
 Fig. 6. Typical structure of ESIW [24]: (a) Top view; (b) structural view.

知,引入空气介质之后,介质集成波导的截止频率会升高,且根据等效介电常数的概念,可以通过改变空气介质的宽度 w_1 来改变介质集成波导的截止频率,因而可以通过挖腔引入空气介质的方式来改进一分二过渡结构的带宽.

经过挖腔改良过的一分二过渡结构如图 7 所示(以 D 波段的模型为例),该结构使用了 4 层 LTCC 介质层,并在与 RWG 过渡位置制作了深度为 3 层的空腔.空腔的长度与 LTCC 基板表面金属层开窗的宽度一致,空腔宽度应小于长度的 1/2 以实现良好的横向传输性能,宽度的具体取值可以通过仿真优化来确定.同时,在未挖腔的介质层上也制作了阶梯结构来改善传输性能,空腔宽度为 0.3 mm,阶梯长度为 0.3 mm,这种狭长的挖腔方式能在一定程度上改善电磁波进入 LTCC 基板后传播的方向性,加上引入空气介质带来的谐振频率变化,可以极大地提升一分二过渡结构的传输性能.理想情况下,每层 LTCC 基板的挖腔尺寸应该是逐层渐变的,这样能起到等效介电常数逐层渐变的效果,使得挖腔对于一分二过渡结构的带宽改良效果达到最优 [22,23].但是由于工艺实现难度的限制,在本设计中各层 LTCC 基板的挖腔尺寸一致.

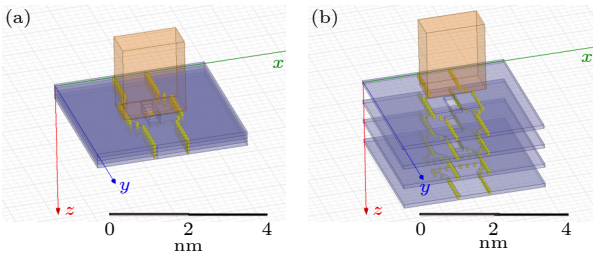


图 7 D 波段一分二过渡结构 (a) 仿真模型; (b) 展开视图
Fig. 7. D-band one to two divider transition structure: (a) Simulation model; (b) expanded view.

D 波段一分二过渡结构的仿真结果如图 8 所示,此仿真结果也是一个初步的定性描述,通过挖腔引入空气介质,使得一分二过渡结构的带宽也可扩展到 25 GHz 以上.同时,SIW-RWG 过渡结构的插入损耗与 2.1 节相比,也有一定程度的降低(一分二功率分配自带 3 dB 的衰减).至此,可以认为这种将 2.1 节中的 SIW-RWG 过渡结构和功率分配结构融合在一起的一分二过渡结构是可行的,其性能将在后续的实际测试中来验证.

W 波段的一分二过渡结构模型和仿真结果如图 9 所示,该结构使用了 5 层 LTCC 介质,空腔深度也为 3 层,剩余两层做了对称的阶梯结构,空腔

宽度为 0.668 mm,第一级阶梯长度为 0.0425 mm (这一级阶梯通过一排金属通孔来实现),第二级阶梯长度为 0.1675 mm.可在 84.3—98.4 GHz 的频

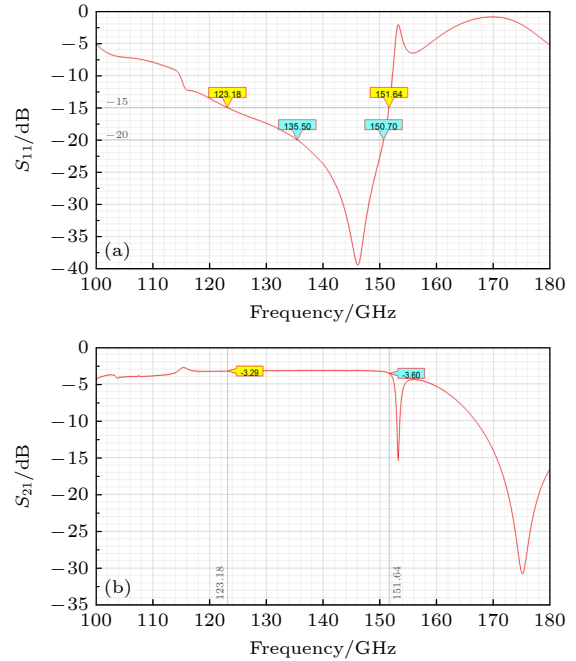


图 8 D 波段一分二过渡结构的仿真结果 (a) 回波损耗 S_{11} ; (b) 插入损耗 S_{21}

Fig. 8. Simulation results of D-band one to two divider transition structure: (a) Return loss S_{11} ; (b) insertion loss S_{21} .

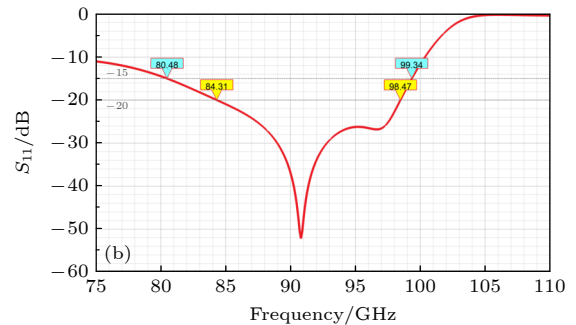
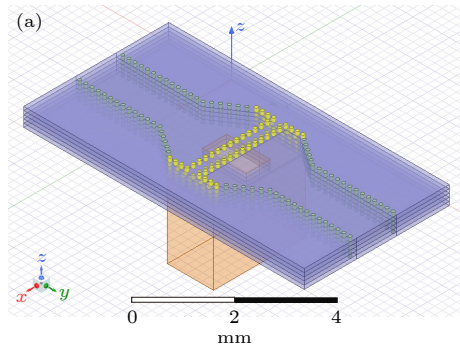


图 9 W 波段一分二过渡结构 (a) 仿真结构模型; (b) 仿真结果回波损耗 S_{11}

Fig. 9. W-band one to two divider transition structure: (a) Structural model of simulation; (b) simulation results of return loss S_{11} .

带内实现-20 dB 以下的回波损耗, 也会在后续的天线阵列中应用.

2.4 用于实测的过渡结构设计

在 2.2 节和 2.3 节中, 分别设计了 SIW-RWG 过渡结构和融入功率分配功能的一分二过渡结构, 都得到了不错的仿真结果, 但它们的实用性还需要进行实际的制作、装配和测试来进行验证. 为此, 本节将在 2.2 节和 2.3 节的基础上, 从实际测试的需求出发, 对 D 波段的模型进行调整, 做版图设计, 并为后面的装配测试准备相关的转接结构.

对于 2.2 节中基础的 SIW-RWG 过渡结构, 可通过构成背靠背结构来测试其实际的传输性能, 但由于该结构只使用了 3 层 LTCC 介质, 而在 LTCC 工艺中, 使用厚度为 0.094 mm 的生瓷带时, 出于基板整体机械强度的考虑, 要求其堆叠层数不少于 8 层. 因此, 为了避免在垂直方向上添加额外的传输结构而引入额外的损耗和传输特性畸变, 需将测试基板的输入和输出端口都设置在基板的正面, 在基板的背面堆叠 5 层空白 LTCC 介质层以保证测试基板的机械强度.

图 10 给出了 SIW-RWG 过渡结构的测试基板模型, 该测试基板的仿真结果如图 11 所示. 该背靠背测试结构的回波损耗-15 dB 以下的带宽可达 20 GHz, 由于包含了两个 SIW-RWG 过渡, 插入损耗也相应地增加了约 2 倍. 需要注意的是, 该模型仍可以通过调整阶梯结构的参数和 SIW 表面开窗尺寸等参数来调节此过渡结构的中心频率、带宽和插入损耗等特性. 因此, 在制作 LTCC 基板时采用了不同的参数取值, 设计了几种中心频率不同的测试基板. 与测试结果吻合较好且具备实用价值的仿真结果还有一种, 如图 12 所示.

同理, 一分二过渡结构也需要考虑基板机械强度和避免添加额外的垂直结构的问题, 此外, 在一分二过渡结构的两个输出端口需要使用前面的 SIW-RWG 过渡结构, 以实现输出信号与测试仪器的波导接口之间的连通. 一分二过渡结构的测试基板模型如图 13 所示, 端口 1 为输入端口, 设置在中间的 RWG 处, 端口 2、3 为输出端口, 位于两侧. 该测试基板的仿真结果如图 14 所示, 一分二测试结构回波损耗-15 dB 以下的带宽约为 20 GHz, 由于两个输出端口添加了 SIW-RWG 过渡结构, 插入损耗也有相应地增加.

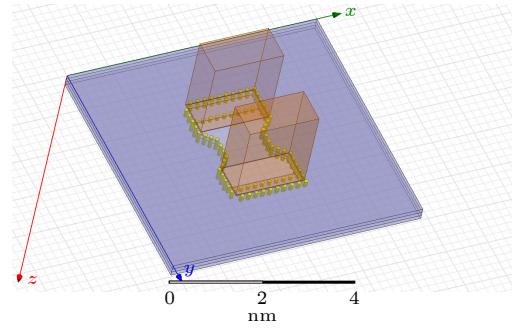


图 10 SIW-RWG 过渡结构的测试基板模型

Fig. 10. Test substrate model of SIW-RWG transition structure.

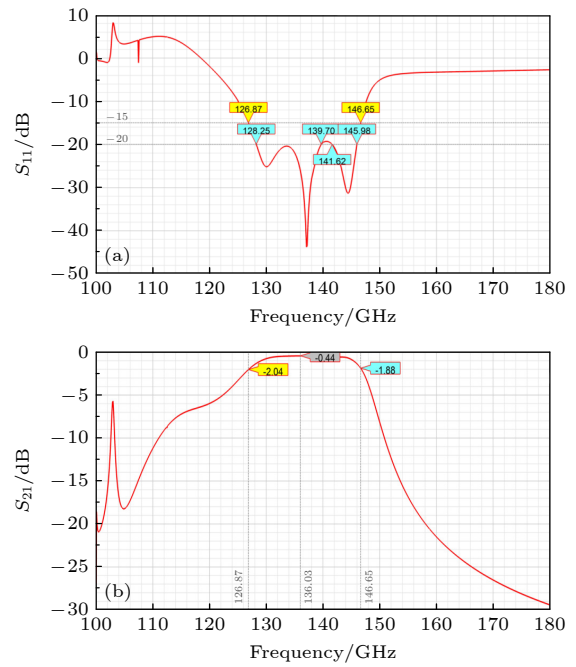


图 11 SIW-RWG 过渡结构测试基板模型的仿真结果 (a) 回波损耗 S_{11} ; (b) 插入损耗 S_{21}

Fig. 11. Simulation results of test substrate model of SIW-RWG transition structure: (a) Return loss S_{11} ; (b) insertion loss S_{21} .

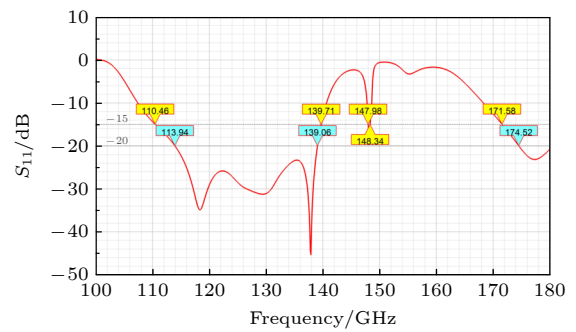


图 12 另一组参数得到的测试基板模型的仿真结果

Fig. 12. Simulation results of the test substrate model with another set of parameters.

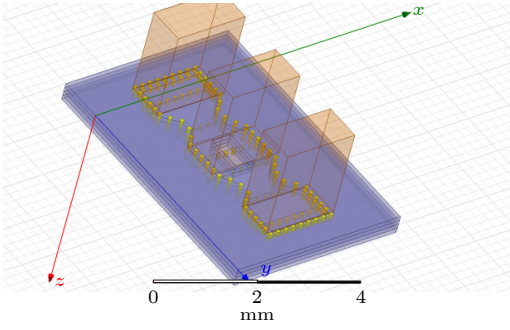


图 13 一分二过渡结构的测试基板模型

Fig. 13. Test substrate model of one to two divider transition structure.

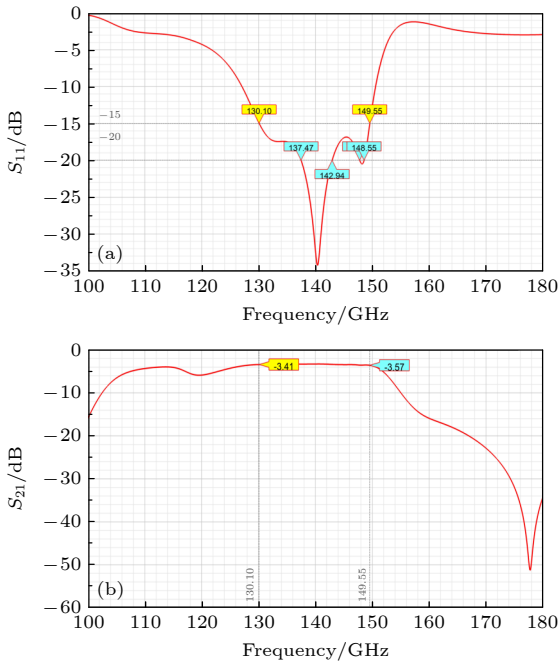


图 14 一分二过渡结构测试基板模型的仿真结果 (a) 回波损耗 S_{11} ; (b) 插入损耗 S_{21}

Fig. 14. Simulation results of test substrate model of one to two divider transition structure: (a) Return loss S_{11} ; (b) insertion loss S_{21} .

测试基板设计完成之后, 还需要考虑实际测试中, 仪器的波导接口与基板之间的转接结构. 测试过渡所用的矢量网络分析仪在 D 波段的接口为 WR06 的标准接口, 法兰盘为 UG-387, 结合 LTCC 基板尺寸, 设计了如图 15 所示的波导转接件. 该转接件是针对 SIW-RWG 过渡结构设计的, 包含两个 WR06 尺寸的波导腔. 由于该结构中包含了弯曲的波导腔, 所以需要分成两部分进行制作, 以保证波导腔内部的光洁度. 图中银灰色部分为 LTCC 基板, 在转接件上设计了与基板尺寸一致的凸台结构, 以便与 LTCC 基板进行对准. 针对一分

二过渡结构也制作了相应的转接件, 结构与图 15 类似, 包含三个波导腔, 此处就不详细介绍了.

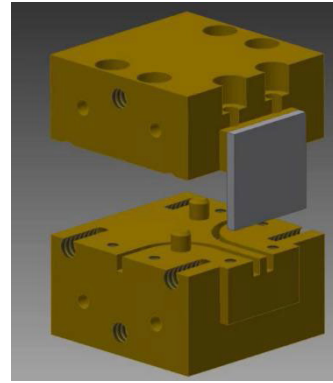


图 15 为实际测试所设计的波导转接件
Fig. 15. Waveguide adapter designed for practical test.

3 装配和测试

LTCC 测试基板 (图 16) 与波导转接件 (图 17) 的装配方式有三种, 分别为使用锡膏进行焊接, 使用导电胶粘接, 使用导电胶膜粘接. 从实际的测试效果来看, 使用锡膏和导电胶的装配效果都不好, 推测可能的原因是其厚度过大 (锡膏和导电胶在固化前都具有流动性, 为了防止粘接剂进入波导口, 无法通过按压 LTCC 基板来降低粘接剂厚度), 带来的寄生效应较为明显, 导致 LTCC 基板与转接件的连接处损耗较大. 最终决定使用导电胶膜进行装配, 型号为 3M 公司的 9766B, 厚度为 50 μm . 将胶膜按照 LTCC 基板尺寸进行裁剪, 并将波导口对应的部分切除, 先粘接在波导转接件上, 再与 LTCC 基板进行粘接即可, 如图 18 所示.

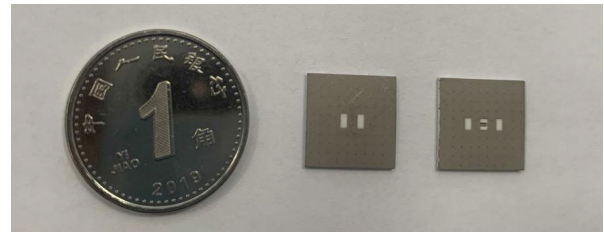


图 16 测试所用的 LTCC 基板
Fig. 16. LTCC substrate for test.

测试需要用到仪器为矢量网络分析仪和扩频模块, 扩频模块型号为 Farran Technology 的 FEV-06-TR Frequency Extender T/R 110—170 GHz. SIW-RWG 过渡结构和一分二过渡结构的测试场景如图 19 所示.

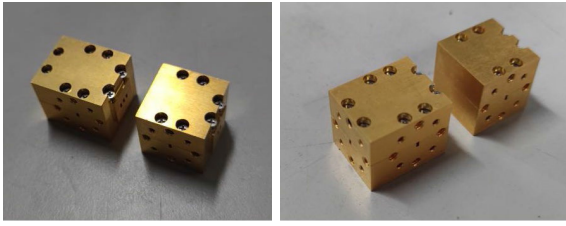


图 17 波导转接件实物图
Fig. 17. Actual diagram of waveguide adapter.

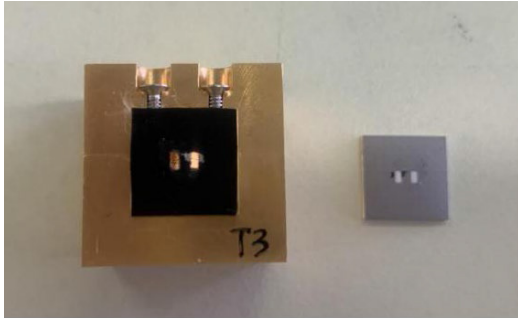


图 18 粘接了导电胶膜的波导转接件和待粘接的 LTCC 基板
Fig. 18. Waveguide adapter bonded with conductive adhesive film and LTCC substrate.



图 19 SIW-RWG 过渡结构和一分二过渡结构实测场景
Fig. 19. Measured scenes of SIW-RWG transition structure and one to two divider transition structure.

4 测试结果和结论

4.1 测试结果

SIW-RWG 过渡结构的测试结果如图 20 和图 21 所示, 分别与 2.4 节中图 11 和图 12 的模型参数取值相对应。

对于 D 波段的实物测试结果, 一般要求回波损耗在 -10 dB 以下. 对于插入损耗, 考虑到该测试基板为包含两个 SIW-RWG 过渡的背靠背结构, 且在基板测试过程中, 波导转接件中两个弯曲波导腔带来的损耗无法通过矢量网络分析仪的校准来去除; 用于粘接的导电胶膜为胶质与金属丝网的混合结构, 因而粘接带来的损耗难以用仿真建模的方

式进行量化分析; LTCC 基板加工过程中打孔和印刷都存在一定误差, 且本次使用的 Ferro A6 m 生瓷带未曾用于 100 GHz 以上的频段, 材料特性参数带来的不确定性也难以估量; 此外, 需要考虑铜、银等金属在高频情况下的有效电导率和损耗的变化, 根据 Tran 等^[25]对于铜在 40 GHz 频率下的有效电导率和损耗的测量, 以及金属有效电导率随频率升高而降低, 损耗随频率升高而增加的结论, 可知在使用 HFSS 等软件进行仿真建模时的金属材料参数在高频条件下并不可靠, 因此, 测试结果的插入损耗较大是在预期之内且合理的。

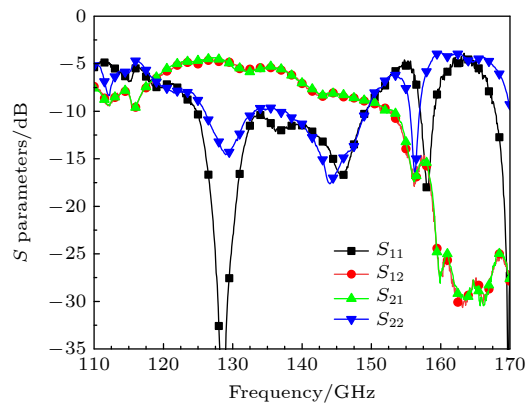


图 20 SIW-RWG 过渡结构测试结果 (模型参数取值与图 11 相对应)
Fig. 20. Test results of SIW-RWG transition structure (Values of the model parameters correspond to Fig. 11).

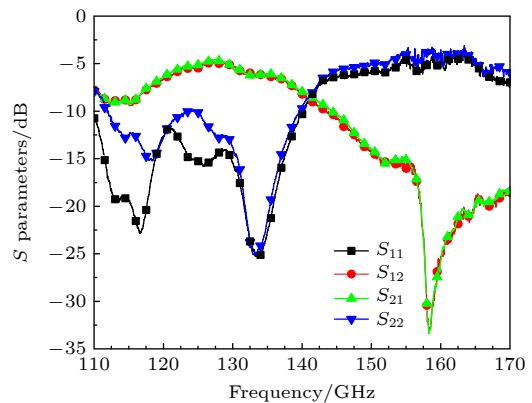


图 21 SIW-RWG 过渡结构测试结果 (模型参数取值与图 12 相对应)
Fig. 21. Test results of SIW-RWG transition structure (Values of the model parameters correspond to Fig. 12).

为了对实测结果的插入损耗进行一个量化的分析, 可通过仿真得到波导转接件同尺寸的弯曲波导腔的插入损耗, 而厚度为 50 μm 的导电胶膜在

粘接处带来的损耗则通过与未粘接导电胶膜测得的插入损耗进行对比来估计. 经过仿真得到单个弯曲波导腔的插损约为 0.4 dB, 导电胶膜的插损约为 1.5 dB(折合为单端后). 对于图 20, 在 126—149 GHz 的频带内, 测得的插入损耗在 -4.4—-9 dB 之间(折合为单端在 -0.3—-2.6 dB 之间); 在 126—140 GHz 的频带内, 测得的插入损耗在 -4.4—-7 dB 之间(折合为单端在 -0.3—-1.6 dB 之间). 对于图 21, 在 112—139 GHz 的频带内, 测得的插入损耗在 -4.6—-9 dB 之间(折合为单端在 -0.4—-2.6 dB 之间); 在 119—137 GHz 的频带内, 测得的插入损耗在 -4.6—-7 dB 之间(折合为单端在 -0.4—-1.6 dB 之间).

图 22 给出了一分二过渡结构的测试结果. 在一分二过渡结构的实际测试中, 1 端口作为输入端口接入矢量网络分析仪, 2 端口作为输出端口接入, 而 3 端口则接入负载. 从测试结果来看, 在 132—155 GHz 的频带内, 除 142—143 GHz 附近损耗稍大, 插入损耗在 -8—-10 dB 之间(排除波导腔和导电胶膜的损耗, 可认为测得的 S_{21} 在 -4.2—-6.2 dB 之间). 考虑到二等分功率分配结构自带的 3 dB 衰减和输出端的 SIW-RWG 过渡结构带来的损耗, 可以认为图 22 的测试结果体现了一分二过渡结构具备的实用性.

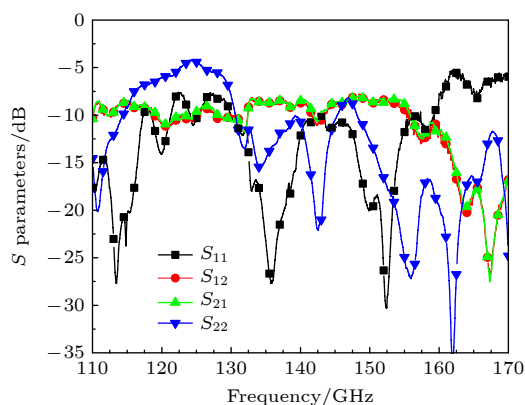


图 22 一分二过渡结构测试结果

Fig. 22. Test results of one to two divider transition structure.

4.2 结论

通过对设计的 SIW-RWG 过渡结构和一分二过渡结构的实际测试, 得到了与仿真结果较为吻合的 S 参数曲线, 证明了两种过渡结构的性能和实用性. 此外, 关于本次加工测试所用的 LTCC 工艺和

装配工艺, 有两点结论.

1) 对采用不同设计参数制作的 LTCC 基板进行测试时发现, 在 150 GHz 以上的频带内, 插入损耗急剧增加(虽然给出的几个仿真结果中 S_{21} 在 150 GHz 或 160 GHz 以上都有较大的恶化, 但选取其他参数使中心频率靠近 150 GHz 时可以保证仿真得到的 S_{21} 曲线正常, 但在实际测试中仍会恶化), 推测这可能与 Ferro A6m 生瓷带在高频段的材料特性有关, 但足以证明其在 150 GHz 以下的频带是可以使用的.

2) 波导口与 LTCC 基板连接处的粘接剂厚度对于传输结构的损耗影响较大, 需分析使用焊锡膏和导电胶损耗过大的原因, 寻求更薄厚度的焊接、粘接方式, 或探索更适合的装配方式来解决粘接剂的蔓延问题.(锡膏和导电胶可通过按压 LTCC 基板的方式来降低基板与波导转接件间的粘接剂厚度, 但这样会造成粘接剂向波导口内部蔓延, 从而影响测试性能.)

综上所述, 本文设计的 SIW-RWG 过渡结构和一分二过渡结构在一定程度上仍需要改进, 但已具备一定的实用价值, 可以在此基础上进行后续的平面天线阵列的相关研究.

参考文献

- [1] Wang J, Hao Z C, Kui-Kui F 2016 *IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Advanced Materials and Processes for RF and THz Applications (IMWS-AMP)* Chengdu, China, July 20–22, 2016 pp1–3
- [2] Song H J 2017 *Proc. IEEE* **105** 1121
- [3] Xu R, Gao S, Izquierdo B S, Gu C, Reynaert P, Standaert A, Gibbons G J, Bösch W, Gadringer M E, Li D 2020 *IEEE Access* **8** 57615
- [4] Li H 2005 *Ph. D. Dissertation* (Nanjing: Southeast University) (in Chinese) [李皓 2005 博士学位论文(南京:东南大学)]
- [5] Pan J 2018 *M. S. Dissertation* (Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China) (in Chinese) [潘俊 2018 硕士学位论文(成都:电子科技大学)]
- [6] Zhang F 2010 *M. S. Dissertation* (Changsha: National University of Defense Technology) (in Chinese) [张帆 2010 硕士学位论文(长沙:国防科学技术大学)]
- [7] Mohamed I, Sebak A 2018 *IEEE Microw. Wirel. Compon. Lett.* **28** 966
- [8] Abdel-Wahab W, Ehsandar A, Al-Saedi H, Safavi-Naeini S 2016 *Electron. Lett.* **52** 1465
- [9] Abdel-Wahab W M, Safavi-Naeini S 2019 *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting* Atlanta, Georgia, USA, July 7–12, 2019 pp963–964
- [10] Li Y, Luk K 2014 *IEEE Microw. Wirel. Compon. Lett.* **24** 590
- [11] Zhang D, Xu Z, Xiao Y, Sun H 2017 *Sixth Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP)* Xi'an,

- China, October 16–19 2017 pp1–3
- [12] Dai X 2016 *IEEE Microw. Wirel. Compon. Lett.* **26** 897
- [13] Cao B, Wang H, Huang Y, Wang J, Sheng W 2013 *IEEE Microw. Wirel. Compon. Lett.* **23** 572
- [14] Hansen S, Pohl N 2019 *49th European Microwave Conference (EuMC)* Paris, France, October 1–3, 2019 pp352–355
- [15] Karki S K, Ala-Laurinaho J, Zheng J, Lahti M, Viikari V 2019 *16th European Radar Conference (EuRAD)* Paris Expo Porte de Versailles, France, October 2–4, 2019 pp321–324
- [16] Abuzaid H, Doghri A, Wu K, Shamim A 2013 *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (MTT)* Seattle, WA, USA, June 2–7, 2013 pp1–3
- [17] Zhang T, Li L, Zhu Z, Cui T J 2019 *IEEE Microw. Wirel. Compon. Lett.* **29** 532
- [18] Bu S, Jin H, Wang W, Luo G, Chin K S 2019 *IEEE MTT-S International Wireless Symposium (IWS)* Guangzhou, China, May 19–22, 2019 pp1–3
- [19] Esteban H, Belenguer A, Sánchez J R, Bachiller C, Boria V E 2017 *IEEE Microw. Wirel. Compon. Lett.* **27** 685
- [20] Parment F, Ghiotto A, Vuong T P, Carpentier L, Wu K 2017 *IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS)* Honolulu, HI, USA, June 4–9, 2017 pp719–722
- [21] Isapour A, Kouki A 2019 *IEEE Trans. Microw. Theory* **67** 868
- [22] Tajima T, Song H, Yaita M 2016 *IEEE Trans. Microw. Theory* **64** 106
- [23] Hansen S, Kueppers S, Pohl N 2018 *48th European Microwave Conference (EuMC)* Madrid, Spain, September 23–27, 2018 pp117–120
- [24] Zhao F J 2020 *M. S. Dissertation* (Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China) (in Chinese) [赵发举 2020 硕士学位论文 (成都: 电子科技大学)]
- [25] Tran T H, Hirokawa J 2011 *International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC 2011)* Da Nang, Vietnam, August 2–4, 2011 pp187–190

Millimeter wave-terahertz substrate integrated waveguide transition structure based on low temperature co-fired ceramic

Teng Lu^{1)2)3)†} Yu Zhong-Jun¹⁾³⁾ Zhu Da-Li²⁾³⁾

1) (*Microwave Microsystem R&D Department, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China*)

2) (*The Fourth Research Office, Institute of Information Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China*)

3) (*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

(Received 10 January 2022; revised manuscript received 7 February 2022)

Abstract

In a microwave circuit system, the discontinuity caused by electromagnetic wave entering into another transmission medium from one transmission medium will greatly affect the transmission performance of the system, which has always been the focus of microwave circuit design. When the electromagnetic wave band enters into the millimeter wave and terahertz band, how to realize the efficient and low loss transmission of electromagnetic wave from the metal rectangular waveguide interface to the dielectric substrate is the key to the realization of millimeter wave terahertz communication system. Substrate integrated waveguide to rectangular waveguide transition structure is an important structure connecting waveguide interface and planar circuit in millimeter wave and terahertz communication system, and it is the basis of designing planar antenna array. In this paper, a W-band and D-band substrate integrated waveguide to rectangular waveguide transition structure is designed, which improves the transmission performance and expands the bandwidth through the stepped structure. On this basis, a one-in-two divider structure is designed, with an empty cavity structure used to reduce the loss and expand the bandwidth. These two structures have the characteristics of simple structure and easy processing, and their practicalities are verified by simulation optimization and actual low temperature co-fired ceramic substrate processing and assembly test. The actual test results show that the substrate integrated waveguide to rectangular waveguide transition structure can achieve a return loss of less than -10 dB in a frequency ranges of 126–149 GHz and 112–139 GHz, the one-in-two divider structure can achieve a return loss of less than -10 dB in the frequency band of 132–155 GHz.

Keywords: substrate integrated waveguide, transition structure, millimeter wave-terahertz, low temperature co-fired ceramic

PACS: 84.40.-x, 84.40.Az, 84.40.Lj

DOI: 10.7498/aps.71.20220072

† Corresponding author. E-mail: tenglu16@mails.ucas.edu.cn