

# 一种微带-同轴-波导变换气密型射频传输结构研究

杨志雄

中国电子科技集团公司第五十四研究所 河北 石家庄 050081

**摘要:**介绍了一种基于微带-同轴-波导变换气密型射频传输结构的工作原理以及结构特性。使用仿真设计软件HFSS进行了建模仿真,微带-同轴-波导传输结构同轴线的一端连接微带电路,另一端延伸到波导的内腔中,从而实现波导能量和同轴能量的转换,并使用HFSS仿真软件进行仿真优化;这种转换结构有效降低了微带-同轴-波导变换结构驻波比和插入损耗设计指标,并且提高整体结构的稳定可靠性。

**关键词:**微带-同轴-波导;气密;射频传输;Ka频段

## 引言

毫米波集成电路的显著优势主要有体积小、可靠性高、适合规模生产以及出色的一致性,因此它的使用领域正在逐渐扩大。在平面传输线结构的毫米波集成电路中,微带线结构被广泛认为是最常见的形式。但是在毫米波的检测和传输系统里,矩形波导依旧是主要的传输方式。矩形金属波导具有高功率容量、Q值特性非常好,此外它适用于高频段传输,因此在毫米波功率放大器、测量系统以及天线馈源等低损耗传输部件中得到广泛应用<sup>[1]</sup>。研究如何在毫米波工程应用中实现矩形波导接口到微带线转换,这个方向就变得很有价值。

在工程实践中经常需要波导-微带转换结构进行变换形式,这是因为功率放大器MMIC单片射频输入输出、供电都需要与平面微带电路互相连接。从而方便功放子模块更好接入电路中。一般情况下,波导-微带转换的波导口是敞开的,在某些特定环境中,开放的波导口可能导致空气中的水蒸气和灰尘等杂质随时间累积,进而对电路性能产生不良影响。不但会缩短电路内器件以及芯片的性能,还会减少它们的工作时间。在这种情况下,就需要一种具有强气密性的微带-同轴-波导转换结构。在微波毫米波的功率放大器里,功率芯片大多是裸芯片,为提升裸芯片在不同环境下的适应能力,通常采用气密性的设计方法<sup>[2]</sup>,这样可以使裸芯片所处腔体和外部环境相互隔离。微带探针式过渡结构的优点虽然包括结构简单,传输损耗小等,但是难以达到功率放大器模块的气密性封装设计。

本文采用了一种微带-绝缘子-波导气密封装射频传输结构,利用HFSS设计仿真的软件对其进行建模与仿真,并且从其基础上设计了过渡结构样件和测试用的夹具。仿真以及测试结果表明,微带-同轴-波导转换结构具备很好的微波性能,密封性测试显示该结构的气密性非

常好。实测结果表明该过渡结构在Ka频段29GHz-31GHz的插入损耗不超过0.5dB、驻波系数小于1.3,达到了预期设计指标要求。

这种过渡结构已在Ka频段功率放大器中得到了广泛使用,实测结果表明该过渡结构能够满足工程实际应用的需求。

## 1 同轴探针型波导-微带过渡的原理

波导-微带变换的工作原理与波导-同轴变换有许多相似之处,它们都是通过向波导腔内插入微带从而构建探针的。根据电磁学的原理,我们可以得知:在探针所处的方向上,所有带有非零电场的波导模都可以在探针的表面产生电流。由于两个模相互垂直并且具有相同的折射率,因此它们能够以共振频率耦合到一起并发生共振作用。这样的交互作用引发了电磁波在微带线与波导间的转化,从而产生了复杂的电磁场布局。本文采用有限元方法模拟了这一过程并分析了不同参数下电磁耦合现象。根据互易原理,当微带线上的准TEM模式被投射到波导中,所产生的电流将激活波导的工作模式。通过改变波导参数就能实现对不同类型波导模进行转换和耦合。当电磁波从矩形波导被输入时,带有非零电场的波导模沿着探针的方向作用于微带探针,并在其上激发电流,进而形成电磁场;如果不具有非零场且沿着探针方向的波导模作用于同一根微带线时,则不会产生磁场。相同的道理,当电磁能量从微带传输到矩形波导时,微带线上的准TEM模式能够在矩形波导内部产生电流,进而触发对应的波导模式。

在微带-同轴-波导的转换结构里,具有同轴探针型波导与微带转换结构的装置,其输出端连接着一根直径标记为d的探针。该装置由一个圆柱形波导和两个矩形谐振器构成。探针的一侧穿越了长方形波导在其宽度的一边向内扩展,而在其对面则与微波电路建立了连接。本文

讨论用矩形波导作为微波集成电路中的插入元件时对传输特性的影响,并给出一个计算实例和实验结果。在假定波导的宽侧中心线与探针存在重叠的前提下,波导与其短路面的距离被设定为 $t$ ,而波导的嵌入深度则被确定为 $h$ 。然后假定探针有十分小的直径,并且其上方的电流分布服从正弦分布曲线规律<sup>[7]</sup>,那么波导里探针的辐射阻抗以及各个参量间的关系为<sup>[8-10]</sup>:

$$Z = R + jX \quad (1)$$

其中,

$$R = \frac{60\lambda_g}{ab\pi} \tan^2\left(\frac{\pi h}{\lambda}\right) \sin^2\left(\frac{2\pi t}{\lambda_g}\right)$$

$$X = \frac{30\lambda_g}{ab\pi} \tan\left(\frac{\pi h}{\lambda}\right) \sin\left(\frac{4\pi t}{\lambda_g}\right)$$

在公式(1)里, $\lambda$ :自由空间里的工作波长, $\lambda_g$ :波导的波长, $a$ :波导内表面的宽度, $b$ :波导内表面的高度。根据上述方程,探针在波导中的嵌入深度与其辐射阻抗 $Z$ 之间存在着密切的联系,同时也与其在波导中的相对位置有紧密联系。如果将探针插入到适当的位置后,它能有效降低探针对信号传输所产生的损耗。因此,为了获得最佳的阻抗匹配效果,我们可以选择 $h$ 和 $t$ 的特定尺寸来达到这一目的。本文介绍了如何确定最佳插入参数以达到最大谐振频率时所需的最小直径以及相应的厚度等问题。在微带探针的设计过程中,输入的阻抗与探针的宽度、长度以及波导末端的短路状况有着紧密的联系,间距以及工作频率等参数的呈现一种函数关系,由于微带探针具有容性电抗的特点,通常会选择一段高度感抗的微带线抵消其电容效应,这样做通过牺牲频带宽度来实现低插入损耗,再利用1/4阻抗变换器实现与50Ω标准微带线的阻抗进行匹配。例如,在标准的选择过程中,我们可以将 $Z$ 的虚部设置为零,这样可以消除电抗部分,最终得到 $R = 50\Omega$ (微带线的特性阻抗)。通过深入研究微带线的特性阻抗,我们可以准确地确定探针的长度 $h$ 。

## 2 在同轴探针型波导和微带之间,存在一种过渡性的结构

在图2中,我们能够观察到同轴探针型波导的转换结构。为了得到较高的效率,我们将这种结构应用到了微波集成电路中去。这个设备的输入部分是由一个矩形的波导段构成的,宽的边被标记为 $a$ ,而窄的边被标记为 $b$ 。为了保证信号传输过程的稳定性,需要将这个结构进行适当地设计以使它们都处于理想状态下工作。波导的输入接口是由一个固定的法兰盘座组成的,而波导的另一侧则是一个密封的短路表面。为了实现这个系统,需要将两个不同尺寸的探针放置在同一个端口处。在这

样的情境下,转换器的输出端与一个直径为 $d$ 的检测器相连。这个传感器具有两个不同尺寸和形状的探针,分别用来检测从波导通过的电流信号和电压信号。各个探针都与波导的两边连接在一起。当探针插入时,它们之间产生一个电场以将能量传递给信号接收器。探针的一个端口与波导的端口相连的宽边延伸至波导的内部,探针的另一端和微带电路建立了连接。矩形波导通过过渡腔与之后的电路腔体相互连接,因此过渡腔的大小尺寸需要有一个合适的结构,以实现在微带线上约束在保证腔体高度不受损害的前提下,电磁场的能量也应受到限制,以防止对微带线的准TEM模式的场结构造成不利影响。为了实现这种功能,必须采用合适的过渡方法。波导和微带之间的转换性能受到插入波导的微带探针尺寸、与波导末端的短路距离、阻抗转换微带线的尺寸以及过渡腔的尺寸的影响,这些因素是波导-微带过渡设计的核心关注点。

通过调节短路面的具体位置,在矩形波导的电场最强处放置探针,由此能够激励出波导主模 $TE_{10}$ 模,并且能够避免其它的模式被激励<sup>[3]</sup>。同轴探针的耦合程度与其尺寸、直径等多种因素有着紧密的联系。在优化探针的相关变量时,我们发现微调直径对耦合度的影响尤为显著。通过微调相关变量和精确定位探针,我们可以确保转换结构具有更低的驻波系数、更小的插损和更广的频带范围。

## 3 同轴探针型波导-微带过渡仿真设计

鉴于该设备主要在Ka波段上运行,我们选择使用BJ-320标准波导,其尺寸定为7.112×3.556mm。在这个设计中,我们还引入了一种创新的薄膜技术,覆盖在波导表面,以提高整体的电磁性能。其主要微带线的值高达50Ω,基片为Durioid 5880,厚度 $h$ 为0.254mm,同时其相对介电常数 $\epsilon_r$ 为2.2。我们决定使用专门设计的玻璃绝缘子作为过渡的同轴探针。用于过渡的同轴探针可以选择0.3mm的毫米波玻璃珠,或者使用专门设计的玻璃绝缘子。

基于理论分析,我们考虑了加工的能力和准确性,本文设计的气密型微带-同轴-波导过渡结构同轴线采用玻璃绝缘子。仿真模型如图3所示,该玻璃绝缘子的一端接有微带电路,而其另一端则插入波导内部的腔体中,这样就可以在绝缘子上传输同轴线中通常使用的TEM模。绝缘子一端伸入到波导宽边,能够实现一种波导能量和同轴能量的转换。

在微组装过程中,绝缘子必须满足气密性和接地钎透性的相关要求。在这种要求下,工程师们通过引入高效的封装材料,有效隔绝了微波电路与外部条件的直接

接触。通过采用由壳体和连接器组成的气密封装技术,成功地确保了内部电路与外界环境能够完全隔离。因此,在微波电路设计中,除了维持绝缘子的气密性外,对于裸露芯片的保护显得尤为重要。特别是在设计那些含有大量裸露芯片的微波电路时,必须确保这些电路不会因为恶劣的环境条件而受损;因此,在绝缘子的设计中,我们需要精准控制气密封装技术,确保其不仅能够阻隔外部恶劣环境,同时在高频微波电路中能够保持稳定的插入损耗和电压驻波比。在保证接地效果的实施过程中,必须保持极高的钎透率,以确保插入损耗和电压驻波比保持稳定。

考虑到上述因素,我们需要采纳整体控温加热策略,以提升绝缘子焊接的质量。在此基础上,对绝缘子进行局部升温处理。采用全面的温度控制策略来调节温度曲线,从而减少焊料的融解时长,并避免氧化和孔隙的形成。经过实验探索,我们发现通过使用热风回流炉来处理钎焊绝缘子,我们可以实现均匀的加热效果,从而缩短钎料回流所需的时间。这种方法具有丰富的温度曲线、多个温区和良好的加热温度均匀性。通过对不同温度区域的温度进行恰当的配置和调节,我们能够制定出适用于腔体焊接的最佳回流曲线。

我们采用了INFICON UL100型氦质谱检漏仪,对新研发的波导-微带转换结构进行了详细的漏气率检测。在实验过程中,我们精密调控了波导与微带的结合工艺,采用先进的密封材料进行封装。经过测试,我们发现漏率低于 $1 \times 10^{-9} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ ,这表明我们设计的波导-微带转换结构具备出色的密封性能。

经过仿真优化设计,玻璃绝缘子外导体直径为1.92mm,长度为1.6mm。绝缘子内导体插入波导腔体内的长度为1.9mm,波导壁厚为0.8mm,波导短路面距离为2.5mm。仿真结果如图4、图5所示,根据仿真结果可以看出,在26GHz~40 GHz频率范围内,同轴探针型波导微带过渡结构仿真传输参数 $S_{21}$ 优于0.22dB,反射参数 $S_{11} \leq -14\text{dB}$ ,性能较为理想,且优化变量数值满足加工精度要求。

#### 4 样件制作及测试

通过仿真结构中可知对波导转换的性能影响最大的因素为伸入波导中探针的长度以及探针距波导短路面的

距离。可见,制造高精度尺寸波导对过渡的性能具有很大的影响。

结合项目实际应用,该过渡结构应用于Ka频段功率放大器中,为测试该结构的性能指标还设计了一种微带-绝缘子-波导气密封装背靠背测试工装结构。

样件测试结果如图1所示。

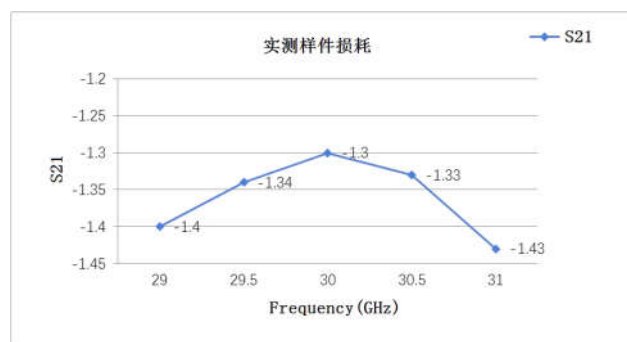


图1 样件实测损耗

用矢量网络分析仪8363B对样件在29GHz~31GHz频段范围内进行测试,图7为背靠背结构的测试结果,扣除一对波导同轴转换器损耗为0.2dB及微带线传输损耗约为0.5dB,那么两个转换结构的总的插损低于0.8dB,单个转换结构的插损低于0.4dB,测试结果符合设计目标,满足实际工程应用要求。

#### 5 结束语

本文提出的一种基于微带-同轴-波导变换气密型射频传输结构的结构特点与工作机理,利用模拟仿真软件HFSS对其进行相应的建模以及仿真,并据此设计完成了过渡结构样件与试验夹具。实际测试的结果显示该转换结构在Ka频段29GHz-31GHz的插入损耗小于0.4dB,驻波系数小于1.3,达到了预期设计指标。该过渡结构已经在Ka频段功率放大器中得到了应用,实测结果表明该过渡结构满足工程应用的要求。

#### 参考文献

- [1]薛良金.毫米波工程基础[M].北京:国防工业出版社,1998.
- [2]《中国集成电路大全》编委会.微波集成电路.北京:国防工业出版社,2003,2-124.
- [3]凌峰,方大纲,李思放.微带波导过渡接头的谱域线积分法分析[J].微波学报.1997,12(13):291-295.