

文章编号: 2095-4980(2017)01-0011-04

一种 220 GHz 波导-悬置微带线过渡电路设计

刘高见, 李 军, 徐 辉, 张晓阳

(中国空间技术研究院 西安分院, 陕西 西安 710100)

摘 要: 波导-微带过渡电路是连接毫米波、太赫兹系统中平面电路与波导的重要结构, 直接影响系统性能。设计了一种中心频率 220 GHz 的矩形波导-悬置微带线过渡电路。过渡采用探针耦合的形式, 并使用渐变线结构实现宽带阻抗匹配, 这种结构具有结构紧凑, 易于加工, 宽带和插入损耗低等优点。最终的仿真结果表明: 在 180~255 GHz 的频带内回波损耗优于 20 dB, 插入损耗小于 0.18 dB。这种结构可广泛应用于毫米波、太赫兹平面电路中。

关键词: 太赫兹; 悬置微带线探针; 宽带; 低损耗

中图分类号: TN124

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201701.0011

A design of waveguide to suspended substrate microstrip line transition at 220 GHz

LIU Gaojian, LI Jun, XU Hui, ZHANG Xiaoyang

(China Academy of Space Technology(Xi'an), Xi'an Shaanxi 710100, China)

Abstract: Waveguide-to-microstrip transitions are indispensable in millimeter and terahertz system to combine planar integrated circuits with waveguide transmission elements, which show great impacts on system performance. A rectangular waveguide to suspended substrate microstrip line transition at 220 GHz is proposed. The transition uses probe coupling and continuously tapered line to achieve broadband impedance match. This structure is compact, easy to process, broadband and has low insertion loss. The simulated results show that its return loss is better than 20 dB and insertion loss is less than 0.18 dB from 180 GHz to 255 GHz. This structure can be widely used in the planar circuits in millimeter wave and terahertz realm.

Keywords: terahertz; suspended microstrip probe; broadband; low-loss

随着毫米波、太赫兹科学技术的飞速发展, 各种毫米波、太赫兹集成电路的需求日趋增加。微带线是毫米波、太赫兹集成电路中一种重要的传输线, 各个单片微波集成电路(Monolithic Microwave Integrated Circuit, MMIC)单片主要采用微带线进行连接。随着平面电路工作频率的上升, 悬置微带线因其 Q 值更高, 损耗更小而得到了比标准微带线更多的关注和应用^[1-2]。然而, 目前毫米波、太赫兹测试系统和诸多仪器的接口, 以及各个毫米波、太赫兹集成系统间的连接大多使用损耗更小的波导。为了使 2 种传输线很好地匹配, 必须设计相应的过渡电路。因此, 波导-悬置微带线过渡电路成为系统实现的一个关键所在。

波导-微带过渡结构主要有阶梯脊波导过渡^[3]、对脊鳍线过渡^[4]和耦合探针过渡^[5-10]。综合考虑过渡电路低插损、高回波损耗、宽带、结构简单、便于加工和易于与系统集成要求, 由同轴探针发展而来的微带耦合探针过渡在毫米波、太赫兹电路设计中得到了广泛的应用。1988 年, Yi-Chi Shih 等设计出一种 H 面探针过渡结构, 在 W 波段插入损耗小于 2 dB, 回波损耗优于 15 dB^[5]。1999 年 Yoke-Choy Leong 等分别设计了使用不同基片材料的 H 面和 E 面探针过渡, 扣除波导和传输线损耗, 在 85~110 GHz 范围内插入损耗小于 0.68 dB^[6]。2011 年, 杨晓帆等设计了一种悬置微带探针过渡, 探针采用扇形结构, 仿真结果表明在 200~240 GHz 范围内插入损耗小于 0.2 dB, 回波损耗优于 15 dB^[11]。2012 年, 李可等设计了一种使用渐变线进行阻抗匹配的 E 面微带探针过渡, 仿真结果表明在 80~105 GHz 范围内插入损耗小于 0.16 dB, 回波损耗优于 34 dB^[9]。

本文设计了一种中心频率为 220 GHz 的波导-悬置微带线过渡电路,采用 E 面探针耦合方式,并用渐变线进行阻抗匹配以拓展带宽。最终仿真结果表明,在 180~255 GHz 范围内回波损耗优于 20 dB,插入损耗小于 0.18 dB,相对带宽 34.1%。该波导-悬置微带过渡电路可应用于 220 GHz 高速无线通信系统中。

1 探针过渡拓扑设计

波导-悬置微带线过渡结构与波导-微带线过渡结构类似。目前常用结构主要有 2 种:一种介质面垂直于波导传输方向,称为 H 面探针;另一种介质面平行于波导传输方向,称为 E 面探针。这 2 种结构都是在波导宽边中心开一个小窗口,将一段微带线伸入波导腔中,把波导电场耦合到微带线上,将波导中传播的 TE_{10} 模转换为微带线中传播的准 TEM 模。探针到波导短路面的距离一般为 $\lambda_g/4$,以保证探针在波导内处于电压最大处,即电场最强处,以实现较高的能量耦合效率。值得注意的是波导壁上开的窗口尺寸必须足够小,以避免扰乱波导中的场分布^[7]。本文选用 E 面探针,波导侧壁窗口尺寸 $0.44\text{ mm} \times 0.28\text{ mm}$ 。

探针过渡设计的主要目标是实现波导与微带线间的最大效率电磁能量传输,这可以通过波导与微带线在设计频段内的良好阻抗匹配实现。因此,设计的第 1 步是确定探针尺寸和放置位置,使探针阻抗在较宽的频带范围内随频率变化较小。这与探针宽度 W_p 、探针伸入波导长度 L_p 和探针距离波导短路面的距离 D 有关,如图 1 所示。然后,在优化后的探针后放置一段长 L_{ind} 、宽 W_{ind} 的高阻抗线以抵消探针的容性电抗,将阻抗变换为实数。最后将探针阻抗变换到平面电路设计所需的阻抗值(本文为 $50\ \Omega$)^[7]。

通常采用 $\lambda_g/4$ 阻抗变换线将探针与 $50\ \Omega$ 微带线进行匹配。它的缺点在于匹配带宽窄,为了拓展匹配带宽,可以采用多级 $\lambda_g/4$ 阻抗变换线级联进行匹配。但这大大增加了匹配结构的尺寸,会增加电路损耗,同时也增加了加工难度。本文采用连续渐变线进行探针与 $50\ \Omega$ 悬置微带线的匹配,实现了宽带、低损耗的匹配。

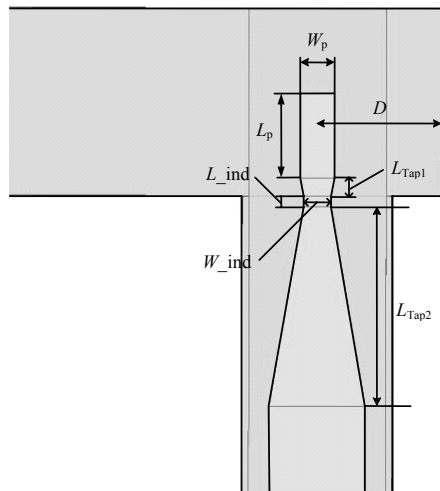


Fig.1 Configuration of the probe transition
图 1 过渡探针结构

2 探针过渡仿真设计

设计和仿真过程用三维电磁仿真软件 HFSS(High Frequency Structure Simulator)来进行。波导尺寸采用 WR-4 标准矩形波导($1.092\text{ mm} \times 0.546\text{ mm}$),材料选用电导率为 $5.8 \times 10^7\text{ S/m}$ 的铜。悬置微带线介质基片选用相对介电常数 3.78 的石英基片,损耗角正切值为 0.002 5,厚度为 $50\ \mu\text{m}$ 。探针的电路结构如图 1 所示,其中有 2 段渐变线(Tap1 和 Tap2)代替 $\lambda_g/4$ 阻抗变换线实现阻抗匹配,以达到扩展带宽和降低加工难度的目的。Tap1 和其后的的高阻抗线用来在较宽的带宽内将探针的阻抗变成实数。Tap2 用来将实数阻抗与 $50\ \Omega$ 悬置微带线进行匹配。电路仿真模型如图 2 所示。其中波导长度为 2 mm , $50\ \Omega$ 悬置微带线长 1 mm 。仿真优化后得到的电路结构参数如表 1 所示,表 1 中各变量的含义已在图 1 中标注出。

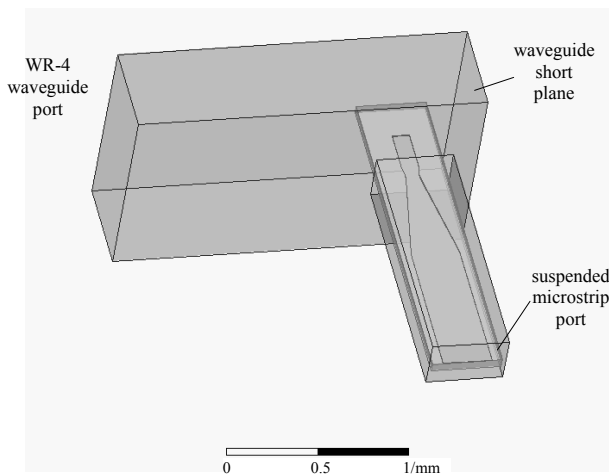


Fig.2 Simulation model of the E -plane probe transition
图 2 E 面探针过渡仿真模型

表 1 尺寸参数

Table 1 Dimension parameters(mm)

variables	D	W_p	L_p	L_{Tap1}	L_{Tap2}	L_{ind}	W_{ind}
values	0.35	0.1	0.25	0.05	0.58	0.03	0.08

3 仿真结果分析

电路模型的仿真结果如图 3 所示。仿真结果表明,在 180~255 GHz 范围内,该过渡电路的回波损耗优于 20 dB,插入损耗小于 0.18 dB,性能优良,验证了本设计的可行性。

在太赫兹频段，波导和悬置微带线的损耗较大，因此，有必要对传输线损耗进行分析。波导损耗主要由波导壁金属损耗和填充介质损耗 2 部分组成。仿真中波导壁材料设为铜，填充材料为空气，波导损耗大约为 9.2×10^{-3} dB/mm。悬置微带线损耗包括导体损耗、介质损耗和辐射损耗 3 部分。由于悬置微带线被封闭在金属腔体内，故辐射损耗可以忽略不计。导体损耗可由式(1)计算。

$$\alpha_c = \frac{R_s}{Z_0 W} \quad (1)$$

式中： R_s 是导体的表面电阻； Z_0 为特性阻抗； W 为导体宽度。

介质损耗可由式(2)计算，经仿真得到悬置微带线的损耗大约为 0.06 dB/mm。

$$\alpha_d = \frac{\pi \tan \delta}{\lambda_g} \quad (2)$$

式中： $\tan \delta$ 为介质的损耗角正切； λ_g 为波导波长。

本文对加工装配误差进行了容差分析。图 4 和图 5 分别为微带探针宽度和长度变化 ± 0.01 mm 引起过渡结构回波损耗的变化。图 6 为基片安装位置横向偏离 ± 0.01 mm 引起回波损耗的变化。

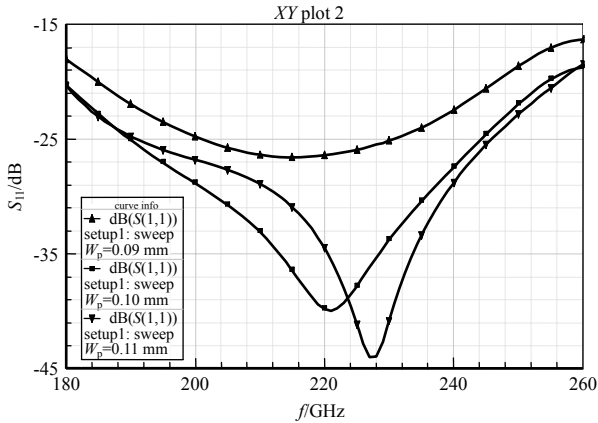


Fig.4 Variation of S_{11} caused by variation of probe width
图 4 探针宽度变化引起 S_{11} 变化曲线

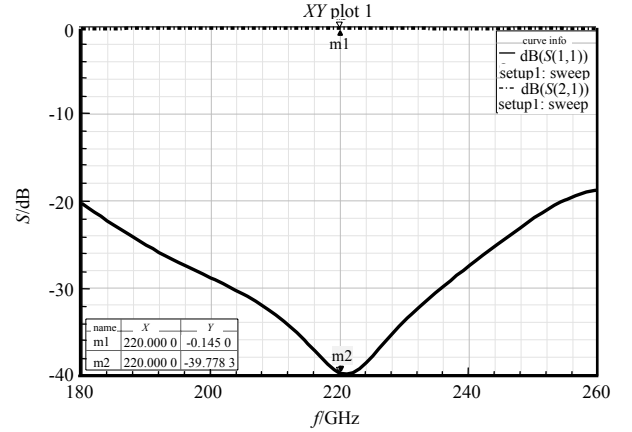


Fig.3 S-parameter of the suspended microstrip probe transition
图 3 悬置微带线探针过渡的 S 参数

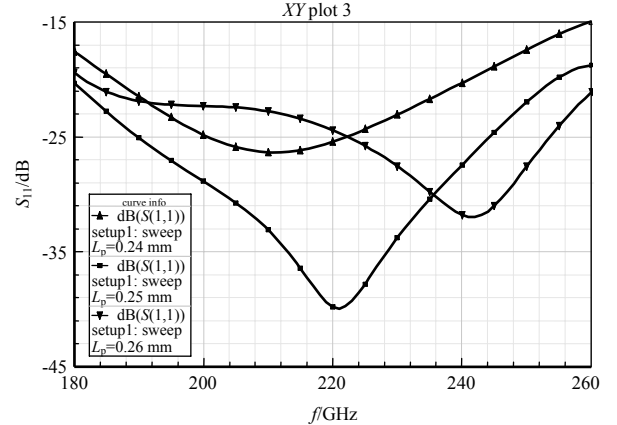


Fig.5 Variation of S_{11} caused by variation of probe length
图 5 探针长度变化引起 S_{11} 变化曲线

图中可以看出由于工作频率高达 220 GHz，电路性能对加工装配误差十分敏感，0.01 mm 的变化都会对电路性能产生较大的影响，但是影响在可接受的范围内，过渡结构仍然能在较宽的范围内保持 S_{11} 小于 -20 dB。在后续设计中还需进一步降低电路性能对电路尺寸的敏感性，给加工装配留出足够的裕量。

4 结论

本文设计了一种太赫兹低端频段波导-悬置微带线探针过渡结构，采用渐变线匹配结构实现宽带匹配，扩展了过渡结构工作带宽，降低了加工难度。仿真结果表明在 180~255 GHz 范围内回波损耗优于 20 dB，插入损耗小于 0.18 dB，相对带宽 34.1%。该过渡探针有工作带宽宽，插损小，结构简单，易于加工的优点，可以在毫米波、太赫兹集成电路中得到广泛应用。

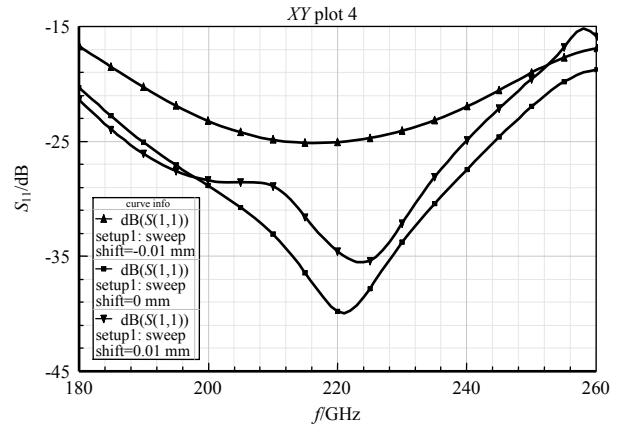


Fig.6 Variation of S_{11} caused by offset of substrate position
图 6 基片安装偏差与 S_{11} 变化曲线

参考文献:

- [1] YANG X,ZHANG B,FAN Y,et al. Design of waveguide to suspended microstrip probe transition at terahertz atmospheric window[C]// 2011 China-Japan Joint Microwave Conference. [S.l.]:IEEE, 2011:1-3.
- [2] 白浩,王平,张晶. 太赫兹用石英基板微带电路制作工艺技术[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2016,14(1):23-25. (BAI Hao,WANG Ping,ZHANG Jing. Process of quartz board microstrip circuit for terahertz[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2016,14(1):23-25.)
- [3] 吴秋生,延波,薛良金. Ka 频段脊波导过渡的仿真与工程应用[J]. 红外与毫米波学报, 2002,21(2):142-144. (WU Qiusheng,YAN Bo,XUE Liangjin. Simulation and project application of Ka-band ridge waveguide transitions[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2002,21(2):142-144.)
- [4] VAN HEUVEN J H C. A new integrated waveguide-microstrip transition[C]// 4th European Microwave Conference. [S.l.]:IEEE, 1974:541-545.
- [5] SHIH Y C,TON T N,BUI L Q. Waveguide-to-microstrip transitions for millimeter-wave applications[C]// IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. [S.l.]:IEEE, 1988:473-475.
- [6] LEONG Y C,WEINREB S. Full band waveguide-to-microstrip probe transitions[C]// IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. [S.l.]:IEEE, 1999:1435-1438.
- [7] LLORENTE-ROMANO S,DORTA-NARANJO B P,PEREZ-MARTINEZ F,et al. Design,implementation and measurements of Ka-band waveguide-to-microstrip transitions[C]// 2002 32nd European Microwave Conference. [S.l.]:IEEE, 2002:1-4.
- [8] 任田昊,张勇. W 波段矩形波导到微带线过渡结构设计[J]. 微波学报, 2014(S1):116-118. (REN Tianhao,ZHANG Yong. Design of a waveguide-to-microstrip line transition at W band[J]. Journal of Microwaves, 2014(S1):116-118.)
- [9] LI K,ZHAO M,FAN Y. A W-band low-loss waveguide-to-microstrip probe transition for millimeter-wave applications[C]// 2012 International Workshop on Microwave and Millimeter Wave Circuits and System Technology(MMW CST). [S.l.]:IEEE, 2012:1-3.
- [10] 李响,于伟华,牟进超,等. W 波段宽带波导-微带探针过渡设计[C]// 2009 年全国微波毫米波会议论文集. 中国,西安:电子工业出版社, 2009:14-17. (LI Xiang,YU Weihua,MOU Jinchao,et al. A design of W-band waveguide to microstrip probe transition[C]// 2009 National Conference on Microwave and Millimeter Wave. Xi'an,China:Publishing House of Electronics Industry, 2009:14-17.)

作者简介:



刘高见(1992-),男,西安市人,在读硕士研究生,主要研究方向为空间微波技术.email: liugaojian92@163.com.

李 军(1968-),男,甘肃省庆阳市人,研究员,主要研究方向为空间有效载荷部组件研制和空间微波理论研究.

徐 辉(1976-),女,浙江省金华市人,高级工程师,主要研究方向为微波与毫米波技术.

张晓阳(1986-),男,陕西省宝鸡市人,工程师,主要研究方向为毫米波电路与系统.