

文章编号: 2095-4980(2017)02-0243-04

Ka 频段宽带微带-波导转换

林 勇¹, 韩少博²

(1.中国电子科技集团公司 第13研究所, 河北 石家庄 050051; 2.吉林大学 电子科学与工程学院, 吉林 长春 130431)

摘要:研究了在Ka频段上, 宽带微带到波导的转换技术。转换通过波导-脊波导-绝缘子探针-微带线的方式实现。这样的实现方式具有插入损耗小、可密封、装配一致性好、可靠性高的优点。文中给出了转换的设计方法及脊波导参数的计算公式以计算转换的各项参数。设计完成后采用电磁场软件进行优化仿真, 并根据仿真结果制作实物进行测试。最后给出了转换实物的测试数据。从测试数据可以看到, 转换在整个Ka频段内具有良好的性能, 插入损耗小于0.3 dB, 驻波小于1.5。还可针对具体使用频段进行优化, 以进一步提高性能。文中提出的转换完全能够满足实际工程应用, 具有良好的应用前景。

关键词: Ka 频段; 宽带; 微带线; 脊波导; 绝缘子; 阻抗匹配

中图分类号: TN814

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201702.0243

Wide band microstrip to waveguide transform at Ka band

LIN Yong¹, HAN Shaobo²

(1.The 13th Research Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang Hebei 050051, China;
2.College of Electronic Science and Engineering, Jilin University, Jilin Changchun130431, China)

Abstract: The technology of transform from microstrip to waveguide at Ka band is researched. The transform is achieved by ridge waveguide and glass seal. The structure has the advantages of low insert loss, high reliability and coherence. The design method of transform and the expressions of the ridge waveguide's impedance are presented. The result of electromagnetic simulation is also given in this paper. According to the optimum result, the test on the practical transform is carried out. The insert loss is less than 0.3 dB, and the standing wave ratio is below 1.5 dB. Better results can be obtained if the transform is optimized for specified bands. The results can satisfy the engineering requirements.

Keywords: Ka band; wide band; microstrip; ridge waveguide; glass seal; impedance matching

随着微波器件的飞速发展, 微波集成电路得到了越来越广泛的应用。微带线由于其加工简单, 传输特性好, 易于与微波集成电路互连, 成为了微波集成电路最为常用的传输线。而波导由于其低损耗特性在微波及毫米波频段也得到广泛应用。因此波导-微带转换成为微波系统中最为常用的转换。波导-微带转换应具有插入损耗小、驻波好、易于装配且装配一致性高的特点。目前常用的波导-微带转换有阶梯脊波导过渡、对脊鳍线过渡、绝缘子探针过渡、微带探针过渡、磁环耦合过渡等一系列过渡方式^[1-2]。本文所讨论的脊波导-绝缘子探针-微带线过渡方式除具有工作频带宽、带内特性好的特点外, 还具有良好的气密特性, 更适用于恶劣环境下的应用。

1 基本原理

微带-同轴线-脊波导-波导过渡结构是以阻抗渐变的形式由微带线向波导转换。与矩形波导相比, 脊波导由于凸缘电容的作用, TE_{10} 波的截止波长比相同横截面尺寸矩形波导中 TE_{10} 波的截止波长更长, TE_{20} 模式的截止波长相差则更大, 因此脊波导单模工作频段更宽, 更适用于宽带应用^[3]。且脊波导特性阻抗更低, 适用于微带-波导转换中与低阻抗微带系统的互连。本文提出的转换结构主要有以下几个优点: 整体尺寸小, 便于加工制作; 脊波导过渡无电路谐振问题; 转换具有密封性, 能在恶劣环境条件下使用。在波导-微带转换中具有广泛的应用前景。脊波导截面示意图如图1所示。其中 a, b 分别为波导的宽边及窄边尺寸, s, d 分别为脊宽度及高度。单脊

波导特性阻抗^[4]可以定义为:

$$Z(\omega) = Z(\infty) \frac{\lambda_g g}{\lambda_c} = \frac{Z(\infty)}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_c}\right)^2}} \quad (1)$$

式中: $Z(\infty)$ 为波导在无穷远频率处的特性阻抗; λ_0 是自由空间的波长; λ_c 是脊波导的截止波长, 可以通过图 2^[5]估算。

$Z(\infty)$ 可以通过式(2)及式(3)计算^[6]:

$$Z_{vi}(\infty) = \frac{\pi \eta_0 \left(\frac{b}{a}\right) \left(\frac{d}{b}\right) \left(\frac{a}{\lambda_c}\right)}{\sin \theta_2 + \left(\frac{b}{d}\right) \left[\frac{B}{Y_{01}} + \tan \frac{\theta_1}{2} \right] \cos \theta_2} \quad (2)$$

$$Z_{pv}(\infty) = \frac{\pi \eta_0 \left(\frac{b}{a}\right) \left(\frac{d}{b}\right) \left(\frac{a}{\lambda_c}\right)}{\left\{ \left(\frac{d}{b}\right) \left(\frac{b}{a}\right) \left(\frac{2a}{\lambda_c}\right) \ln \operatorname{cosec} \left(\frac{\pi d}{2b} \right) \cos^2 \theta_2 + \frac{\theta_2}{2} + \frac{\sin 2\theta_2}{4} + \left(\frac{d}{b}\right) \left(\frac{\cos \theta_2}{\sin \theta_1}\right)^2 \left(\frac{\theta_1}{2} - \frac{\sin 2\theta_2}{4}\right) \right\}} \quad (3)$$

$$Z_{pi}(\infty) = \frac{Z_{vi}^2}{Z_{pv}} \quad (4)$$

式(2~4)中: $Z_{vi}(\infty)$, $Z_{pv}(\infty)$, $Z_{pi}(\infty)$ 分别为使用电压-电流、功率-电压、功率-电流定义的特性阻抗; η_0 为空间波阻抗 120π ; μ_0 为真空磁导率; a 为波导宽度; b 为波导高度; d 为脊高度; s 为脊宽度。式(2)中:

$$B = Y_{01} \cot \theta_1 - Y_{02} \tan \theta_2 \quad (5)$$

式(5)中: $Y_{01} = \frac{k_c}{\omega \mu_0} \left(\frac{1}{d}\right)$; $Y_{02} = \frac{k_c}{\omega \mu_0} \left(\frac{1}{b}\right)$; $\theta_1 = \frac{\pi(a-s)}{\lambda_c} = \pi \frac{a}{\lambda_c} \left(1 - \frac{s}{a}\right)$; $\theta_2 = \frac{\pi s}{\lambda_c}$ 。

$$k_c = \frac{2\pi}{\lambda_c} \quad (6)$$

式中 k_c 为截止波数。

为与下文的波导特性阻抗定义保持一致, 本文采用功率-电流即 $Z_{pi}(\infty)$ 定义脊波导特性阻抗。通过公式, 可以计算出脊波导的特性阻抗。反之, 当确定脊波导特性阻抗后, 可以反推出脊波导的各项参数, 确定脊波导尺寸。

阶梯脊结构是把波导的主模 TE_{10} 模波阻抗变换至微带线 50Ω 阻抗。由于转换中间采用微波绝缘子过渡, 而微波绝缘子微波阻抗为 50Ω , 可以和 50Ω 微带线直连。因此设计任务是将波导的主模波阻抗变换至微波绝缘子 50Ω 阻抗。实现方式是通过多级脊波导逐渐过渡实现。本文采用的转换结构见图 3。 l, d 分别为脊长度及高度。

从转换示意图可见, 为完成波导至同轴绝缘子转换, 采用四级脊波导实现。采用四级的原因是转换频段较宽, 为在全频段内实现良好的匹配而采用多级渐变^[7]。如果频段较窄, 级数可以相应缩减。

为确定脊波导的尺寸参数, 必须首先确定脊波导的特性阻抗。在转换中, 为将波导阻抗与绝缘子阻抗进行匹配, 采用了四级脊波导。波导 TE_{10} 模的阻抗为^[8]:

$$Z_{pi} = \frac{\eta_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{2a}\right)^2}} \frac{\pi^2 b}{8 a} \quad (7)$$

式中 λ_0 为自由空间波长。

取 Ka 频段中心 33.25 GHz 处, 波导阻抗约为 300.52Ω , 绝缘子阻抗为 50Ω 。为获得良好的带内驻波特性, 采用切比雪夫渐变阻抗变换。选取四节变换段, 通过查表可以确定各节脊波导的特性阻抗^[9]。四级脊波导特性阻抗计算如下:

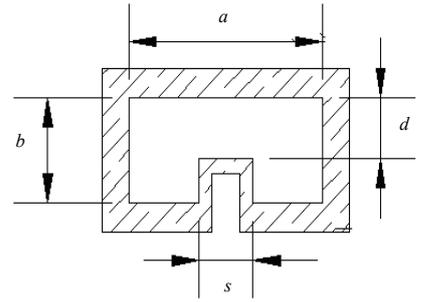


Fig.1 Section of ridge waveguide
图 1 脊波导截面示意图

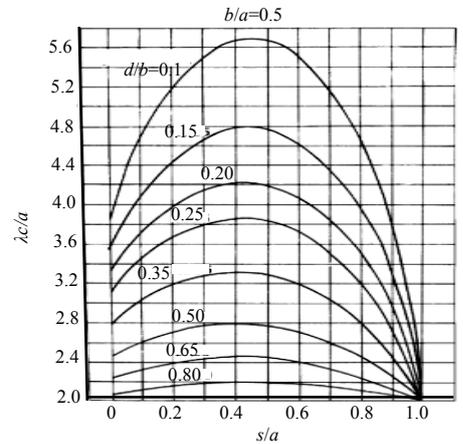


Fig.2 Cut-off wavelength of ridge waveguide
图 2 脊波导截止波长估算

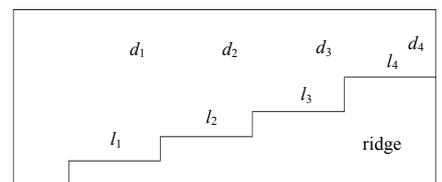


Fig.3 Impedance transform of ridge waveguide
图 3 多级脊波导渐变阻抗转换

$$\overline{Z}_4 = 1.132 \tag{8}$$

$$\overline{Z}_3 = 1.771 \tag{9}$$

$$\overline{Z}_2 = R / \overline{Z}_3 \tag{10}$$

$$\overline{Z}_1 = R / \overline{Z}_4 \tag{11}$$

式中: $\overline{Z}_1, \overline{Z}_2, \overline{Z}_3, \overline{Z}_4$ 为归一化阻抗; R 为阻抗变换比, 即 $300.52/50 \approx 6.01$ 。通过式(8)~式(11), 计算出四级脊波导的特性阻抗如表 1 所示。

确定脊波导特性阻抗后, 可以反推出脊波导的宽度及高度, 为设计提供初值参考。脊波导长度初值选取为工作频率波长的 1/4, 即 $\lambda_g/4$, 约 1.8 mm。

转换中波导采用标准 BJ320 波导口, 微带线采用厚度为 0.254 mm 的 ROGES5880 板材制作。为实现脊波导与绝缘子的互连, 在脊上打孔, 将绝缘子探针探入脊波导孔内。绝缘子采用 SOUTHWEST 公司的 290-06G, 尺寸为 $\phi 1.93 \times 1.4 \times 0.3$ 。即绝缘子外径为 1.93 mm, 长 1.4 mm, 内针直径 0.3 mm。脊波导上小孔直径为 0.35 mm, 负公差加工, 可以保证绝缘子内针与小孔的紧密配合。为在转换中增加调节手段, 同时改善带内转换性能, 在微带线与绝缘子之间增加一段空气同轴。通过调节空气同轴的直径和长度能对转换性能进行微调^[10]。整个波导-微带转换示意图见图 4。

表 1 四级脊波导特性阻抗
Table 1 Impedance of each ridge waveguide

	1st level	2nd level	3rd level	4th level
impedance/ Ω	265.46	169.68	88.55	56.60

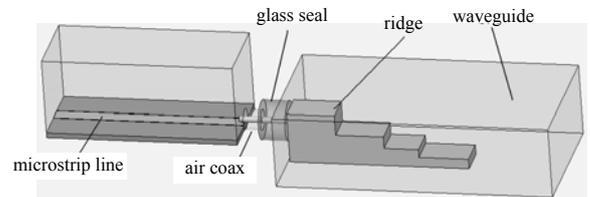


Fig.4 Transform of microstrip to ridge waveguide
图 4 转换示意图

2 仿真结果

对转换进行设计得出初值后, 通过电磁场仿真进行验证, 并对各参数进行优化。仿真采用的是 HFSS 电磁场仿真软件, 建模完成后对各参数进行优化, 以得到最好的结果。仿真结果见图 5。从仿真结果可见, 在整个 Ka 频段内, 转换插入损耗小于 0.14 dB, 回波损耗小于 -15 dB, 能够满足实际应用。

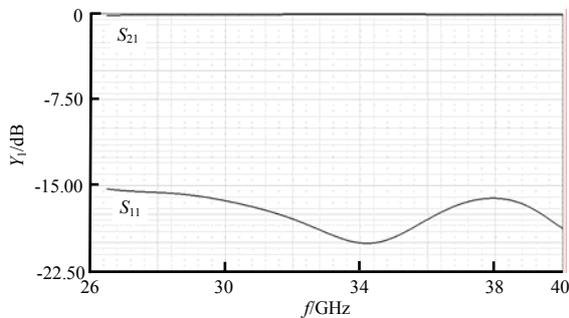


Fig.5 Simulation results
图 5 仿真结果

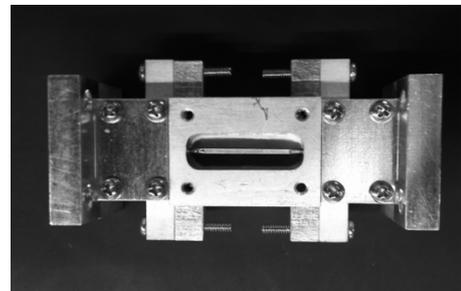


Fig.6 Model of transform
图 6 转换实物图

3 实测结果

按仿真参数加工出实物进行测试。为方便测试, 转换采用了背靠背方式实现。输入输出均为波导口。微带线采用导电胶粘接至箱体, 左右脊波导均采用螺钉紧固至箱体。转换实物见图 6。

完成装配后, 对转换性能进行实测, 测试仪器采用 Agilent 公司的 E8364B, 测试结果见图 7 及图 8。由测试结果可见, 背靠背转换损耗小于 0.6 dB, 测试已扣除两端连接波导损耗, 故转换单级损耗小于 0.3 dB。驻波最大处小于 1.5, 能够满足实际应用。由于转换是针对宽带设计, 为满足带宽要求, 对带内转换性能做出了一定妥协, 如果是较窄带宽使用, 还能进一步优化, 提高带内指标。

4 结论

为实现毫米波全频段的低损耗波导-微带转换, 本文提出了脊波导-微波绝缘子-微带线转换形式。新转换形式具有工作频段宽、插入损耗低、可密封、易装配等一系列优点。本文分析了转换的设计方法并建模仿真, 最后

制作出实物进行验证。实测与设计结果较为符合，完全能满足工程实用的要求，具有广泛的应用前景。

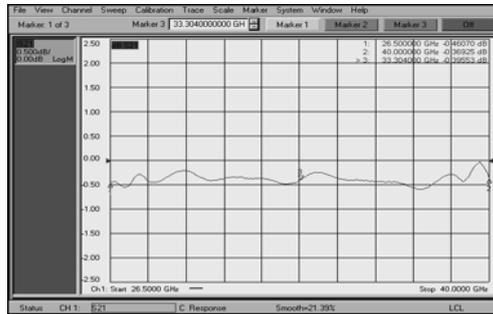


Fig.7 Insert loss of transform
图 7 实测转换损耗

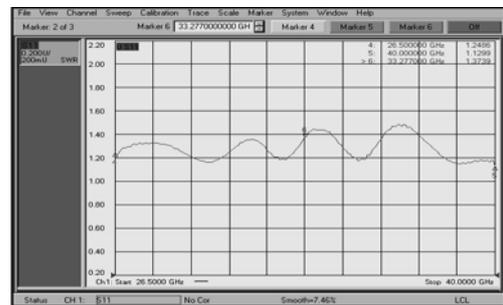


Fig.8 Standing wave ratio of transform
图 8 实测驻波

参考文献:

- [1] YAO Huiwen, ABDELMONEM Amr, LIANG J F. A full wave analysis of microstrip-to-waveguide transition[C]// IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 1994. San Diego:[s.n.], 1994:213-216.
- [2] LI Eric S, TONG Guixiang, NIU Dow Chih. Full W-band waveguide-to-microstrip transition with new E-plane probe[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2013, 23(1):4-6.
- [3] 甘体国. 毫米波工程[M]. 成都:电子科技大学出版社, 2006:63-64. (GAN Tigu. Millimetre Wave Engineering[M]. Chengdu, China:University of Electronic Science and Technology Press, 2006:63-64.)
- [4] 闫润卿, 李英惠. 微波技术基础[M]. 北京:北京理工大学出版社, 2012:134-138. (YAN Ruiqing, LI Yinghui. Microwave Technology[M]. Beijing:Beijing Institute of Technology Press, 2012:134-138.)
- [5] 周扬, 李恩. 宽带脊波导到同轴转换器的研制[J]. 电子科技大学学报, 2011, 40(6):835-838. (ZHOU Yang, LI En. Research of transform from ridge waveguide to coaxial line[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology, 2011, 40(6): 835-838.)
- [6] ZHOU Yang, LIU Hongxiu, LI En, et al. Design of a wideband transition from double-ridge waveguide to microstrip line[C]// IEEE International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology. Chengdu, China:[s.n.], 2010:737-740.
- [7] 吕芳, 辛利. 微波技术[M]. 南京:东南大学出版社, 2011. (LYU Fang, XIN Li. Microwave Technology[M]. Nanjing, China: Southeast University Press, 2011.)
- [8] 宋志东, 康颖. 一种 Ku 波段波导-微带转换器的研制[J]. 火控雷达技术, 2011, 40(4):78-80. (SONG Zhidong, KANG Ying. Transform of waveguide to microstrip at Ku band[J]. Fire Control Radar Technology, 2011, 40(4):78-80.)
- [9] 顾其铮, 项家桢, 彭孝康. 微波集成电路设计[M]. 北京:人民邮电出版社, 1978:247-255. (GU Qizheng, XIANG Jiazhen, PENG Xiaokang. Microwave Integrate Circuit[M]. Beijing:Posts & Telecom Press, 1978:247-255.)
- [10] YAO H W, ZAKI K A. Modeling generalized coaxial probes in rectangular waveguides[C]// IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 1995. San Diego:[s.n.], 1995:979-982.

作者简介:



林 勇(1982-), 男, 四川省资阳市人, 工程师, 主要从事微波毫米波电路方面的研究.
email:starsix04@126.com.

韩少博(1993-), 男, 长春市人, 助理工程师, 主要从事微波毫米波电路方面的研究.