

文章编号: 1672-2892(2011)06-0722-03

基于薄膜电路工艺的毫米波功分器设计

伍 星, 李中云, 邓 磊

(中国工程物理研究院 电子工程研究所, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 为实现毫米波多级固态功放小型化设计, 根据传统 Wilkinson 功分器的设计原理, 以新型材料以及薄膜电路加工工艺为基础, 在 HFSS 中仿真设计了一款集成薄膜电阻的 Ka 波段 Wilkinson 功分器, 其在 10 GHz 带宽内具有插损低, 驻波小和隔离度高等特点, 且尺寸小, 结构简单, 易于生产, 适合于芯片功率合成或其他毫米波电路小型化设计应用。

关键词: 薄膜电路; Wilkinson 功分器; 毫米波; 仿真

中图分类号: TN626

文献标识码: A

Design of a millimeter-wave power divider based on thin-film technique

WU Xing, LI Zhong-yun, DENG Lei

(Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621900, China)

Abstract: In order to realize the Miniaturization of Millimeter Wave(MMW) multilevel solid-state power amplifier, according to the traditional design principles of Wilkinson power divider, this paper presents a Ka-band Wilkinson power divider with chip resistor integrated. The highlight of this design is the use of high precision materials and thin-film technique. Simulation results show that it bears the attributes of low insertion loss, low standing wave, and high isolation in 10 GHz bandwidth. The divider is very small and easy to be fabricated for its simple structure, which is very suitable for the chip-level power synthesis and other miniaturized design of MMW circuit.

Key words: film circuit; Wilkinson power divider; Millimeter Wave; simulation

Wilkinson 功分器是一种在 X 波段以下技术成熟且运用较为广泛的功分器, 在毫米波以及更高频段, 由于输出端的互耦严重, 且性能受生产精度影响较大, 其应用效果不是很理想, 尤其在芯片固态功率合成等应用场合受到较大的使用限制^[1]。近年来, 随着平面电路设计水平提高, 以及薄膜电路工艺在毫米波段的成功应用, Wilkinson 功分器在小型化、中小功率芯片固态功率合成场合中具有很强的应用优势。本文所设计 Wilkinson 功分器主要应用于小型化芯片固态功率合成场合, 虽然芯片的应用可较显著地减小系统尺寸, 但如果配合传统的波导功分网络, 其尺寸依然较大, 无法体现芯片功率合成小型化设计的优势。如果在功率合成初级采用 Wilkinson 功分器作为功率分配/合成网络, 则可大幅度减小系统尺寸。本设计采用 99.6%Al₂O₃ 作为基板, 利用薄膜电路工艺制作集成薄膜电阻 Wilkinson 功分器, 仿真结果显示, 在 25 GHz~35 GHz 频段内, 其插损小于 0.26 dB, 反射系数优于 -15 dB, 隔离度优于 -15 dB, 其中在 27.5 GHz~32.5 GHz 范围内, 插损小于 0.13 dB, 反射系数与隔离度均优于 -25 dB。

1 原理与设计流程

图 1 为标准的 Wilkinson 功分器电路原理图^[2], 其可满足同相、不同功分比的功率分配, 两分支 Z_1 和 Z_2 的取值决定功分比, Z_3 和 Z_4 为四分之一阻抗变换段, 使输出端与 Z_0 匹配, 两分支与阻抗变换段长度均为 90° 电长度。位于两分支之间的电阻 R , 即为隔离电阻, 用以提高隔离度。

通常情况下, Wilkinson 功分器在 X 波段或者更低的频段应用比较广泛, 如果应用在 X 波段以上就要考虑以下问题^[3]:

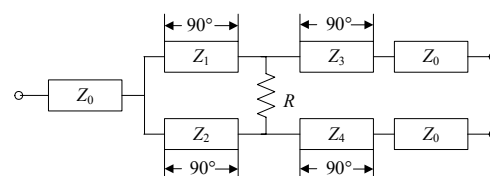


Fig.1 Wilkinson power divider
图 1 Wilkinson 功分器

a) 对于隔离电阻, 其应该具有与工作频率相当的谐振频率, 因此不能再将其当作集总参数元件。

b) 要使隔离电阻具有很高的谐振频率, 则其尺寸必须非常小, 这样两分支就靠得非常近, 导致输出端互耦严重, 影响功分比。

针对以上问题, 一个有效解决办法是, 将两分支的电长度取为 270° , 而不是 90° , 两分支间距加大, 同时隔离电阻尺寸选取也比较自由, 不过这也会使带宽减少, 损耗增加。

根据以上分析, 要实现 3 dB 功分, 则 $Z_1=Z_2$, $Z_3=Z_4$, 为简化设计, 取 $Z_3=Z_4=Z_0$, 这样得到的简化模型见图 2。

由于结构对称, 可利用奇偶模分析法得出所需参数^[4]。电路可由对称线一分为二, 见图 3。图 3 中奇偶模阻抗为:

$$Z_{\text{even}} = \frac{Z_1^2}{2Z_0} \quad (1)$$

$$Z_{\text{odd}} = R/2 \quad (2)$$

由式(1)和式(2)可得奇偶模的反射系数:

$$\Gamma_{\text{even}} = \frac{Z_{\text{even}} - Z_0}{Z_{\text{even}} + Z_0} = \frac{Z_1^2 - 2Z_0^2}{Z_1^2 + 2Z_0^2} \quad (3)$$

$$\Gamma_{\text{odd}} = \frac{Z_{\text{odd}} - Z_0}{Z_{\text{odd}} + Z_0} = \frac{R - 2Z_0}{R + 2Z_0} \quad (4)$$

由此可得输出端的反射系数与隔离度:

$$S_{22} = S_{33} = \frac{1}{2}(\Gamma_{\text{even}} + \Gamma_{\text{odd}}) = \frac{RZ_1^2 - 4Z_0^3}{(Z_1^2 + 2Z_0^2)(R + 2Z_0)} \quad (5)$$

$$S_{23} = S_{32} = \frac{1}{2}(\Gamma_{\text{even}} - \Gamma_{\text{odd}}) = \frac{2(Z_1^2 - RZ_0)}{3Z_0(R + 2Z_0)} \quad (6)$$

对于理想的 3 dB Wilkinson 功分器:

$$S_{22}=S_{33}=S_{23}=S_{32}=0 \quad (7)$$

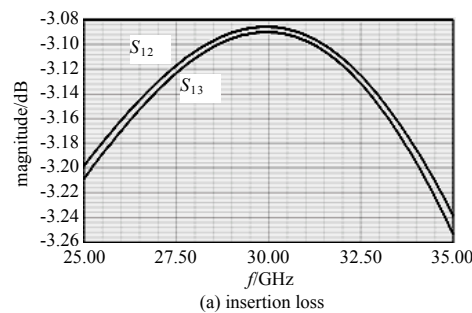
利用式(5)~式(7)可得:

$$R=2Z_0 \quad (8)$$

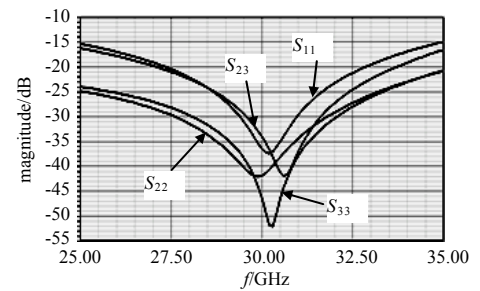
$$Z_1^2 = RZ_0 \quad (9)$$

2 建模及仿真

根据国外产品的使用情况, 95%以上的薄膜产品基片材料选用介电常数为 9.9 的 99.6% Al_2O_3 , 相比其他材料, 它的损耗低, 弯曲强度高, 热导率高, 特别是工艺的进步, 厚度 0.254 mm 和 0.381 mm 的基片质量稳定, 所以大量使用, 加之稳定的共晶工艺, 可以与氧化铍材料的优良散热性能媲美。在同等条件下, 根据微带宽度与基片厚度成正比的关系, 本设计选用 0.381 mm 厚度的基片, 因为更宽的微带在相同加工精度条件下所引入的相对误差更小。电阻材料采用方阻为 50 Ω /方的 TaN, 长宽为 0.29 mm $\times$ 0.145 mm。采用 HFSS 设计的三维电磁仿真模型见图 4。其中端口 1 为输入端口, 端口 2 和 3 为输出端口, 仿真结果见图 5。由仿真结果可以看出, 在 25 GHz~35 GHz 范围内, 两路功分不平衡度约为 0.005 dB; 插损小于 0.26 dB, 各端口反射及输出端隔离度均大于 15 dB, 在 27.5 GHz~32.5 GHz 范围内, 插损小于 0.13 dB, 各端口反射及输出端隔离度均大于 20 dB。



(a) insertion loss



(b) reflection and isolation

Fig.5 Simulation results of Wilkinson power divider

图 5 Wilkinson 功分器仿真结果

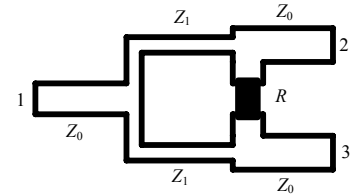
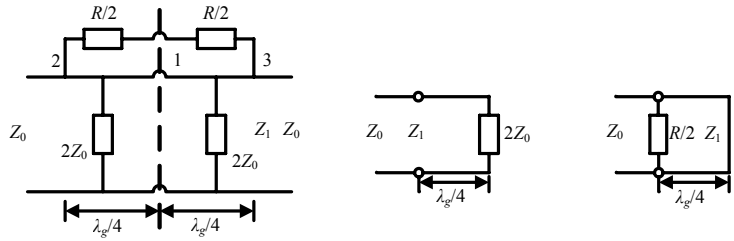


Fig.2 Simplified model of Wilkinson power divider
图 2 Wilkinson 功分器简化模型



(a) equivalent circuit of Wilkinson divider (b) even mode equivalent circuit (c) odd mode equivalent circuit

Fig.3 Equivalent circuit of Wilkinson divider

图 3 Wilkinson 功分器奇偶模等效电路

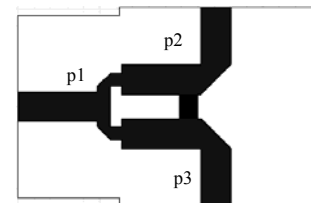


Fig.4 Simulation model of Wilkinson power divider
图 4 Wilkinson 功分器仿真模型

3 测试结果及分析

图6为Wilkinson电桥实物图,由于选用的基板介电常数较高,实际Wilkinson电桥尺寸仅为 $3.6\text{ mm}\times 2.2\text{ mm}$,为便于测量,需利用槽线延长输出端至2.92 mm连接器。

图7为矢量网络分析仪测试结果,在25 GHz~35 GHz范围内,输入端反射大于10 dB,隔离度大于15 dB,插入损耗约为4.1 dB,其中在29 GHz~30 GHz范围内,反射及

损耗都大于20 dB。插损主要分为3部分:3 dB的功分;线路损耗及辐射损耗,毫米波段,此损耗约为0.3 dB;两个2.92 mm连接器的损耗,每个损耗约为0.3 dB。

根据以上的估算,除去连接器的损耗,在毫米波段该Wilkinson功分器每路插损约为3.5 dB,将其应用于功率

合成的初级,特别是采用输出功率较小的功率芯片时,可大大减小系统的尺寸。此外,薄膜电阻虽然可以使各端口得到匹配,并且能明显提高输出端隔离度,但是其能够承受的功率密度限制了其在大功率场合的应用。TaN材料能承受的最大功率密度约为 $2\ 300\text{ W/cm}^2$,按照本设计中薄膜电阻的尺寸,其最大能承受0.97 W的功率,所以在选用该元件作为功分器时,应尽量避免各端口的输入功率高于1 W。

4 结论

本文根据传统Wilkinson功分器的设计理论,利用最新薄膜电路工艺,以99.6% Al_2O_3 陶瓷作基板,TaN材料作薄膜电阻,设计了一种集成薄膜隔离电阻在内的Ka波段Wilkinson功分器。整个电路尺寸仅为 $3.6\text{ mm}\times 2.2\text{ mm}$,完全满足小型化芯片功率合成的应用需求。实测结果表明,在25 GHz~35 GHz范围内,其插损约为4.1 dB,各端口反射大于15 dB,输出端隔离度大于15 dB。与传统的采用软基片的Wilkinson功分器相比较,新材料的运用明显减小了功分器的损耗,并且由于加工精度的极大提高以及新材料的稳定性,在较大带宽范围内,该Wilkinson功分器的S参数波动较小,与仿真结果非常吻合。

参考文献:

- [1] Wilkinson E J. An N-Way Hybrid Power Divider[J]. IRE Trans. Microwave Theory Tech., 1960, MTT-8:116-118.
- [2] Mazen Hamadallah. Microstrip Power Dividers at mm-Wave Frequencies[J]. Microwave Journal, 1988, 31(7):115-127.
- [3] Demitrios Antsos, Rick Crist, Lin Sukamto. A novel Wilkinson power divider with predictable performance at K and Ka-band [C]// Microwave Symposium Digest, IEEE MTT-S International. San Diego, CA, USA: [s.n.], 1994:907-910.
- [4] XU Hongjie, ZHANG Yonghong, FAN Yong. Ka-band Wilkinson power divider based on chip resistor [C]// 2007 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology. Builin: [s.n.], 2007:1-4.

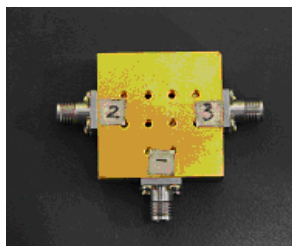
作者简介:



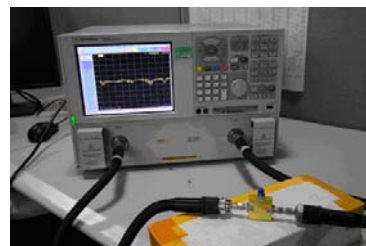
伍 星(1985-),男,四川省眉山市人,在读硕士研究生,主要从事微波毫米波电路设计.email:373113483@qq.com.

李中云(1971-),男,四川省泸州市人,研究员,主要从事微波电路和雷达系统研究。

邓 磊(1979-),男,四川省简阳市人,理学硕士,主要从事微波毫米波电路设计和仿真研究。



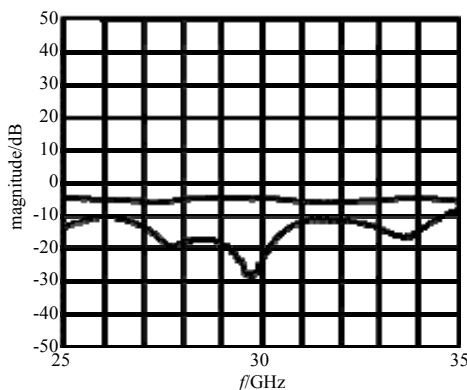
(a) prototype of the divider



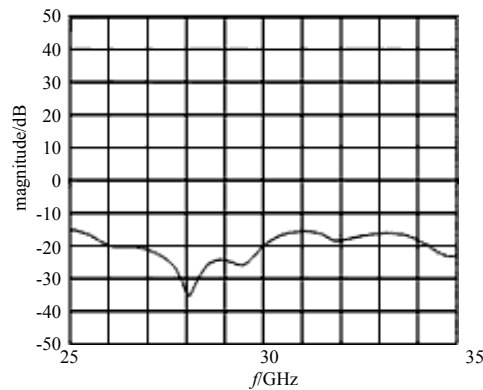
(b) measurement platform

Fig.6 Photographs of the divider and the test platform

图6 Wilkinson 功分器实物图及测试平台



(a) insertion loss and reflection of power divider



(b) isolation of power divider

Fig.7 Measurement results

图7 测试结果