

文章编号: 1001-9014(2010)03-0180-05

基于柔性基片集成波导技术的 Ka 波段功率放大器的设计和制作

朱红兵^{1,2}, 洪伟¹, 田玲¹, 汤红军¹, 陈继新¹, 何繁繁¹

(1. 东南大学信息科学与工程学院毫米波国家重点实验室, 江苏南京 210096;

2. 南京电讯技术研究所, 江苏南京 210007)

摘要: 设计、制作并测试了一个 Ka 波段八路合成宽带功率放大器。测试结果表明在 26.5GHz 上最大输出功率约为 4.2W(连续波), 在 26.4GHz 上最大合成效率约为 72.5%, 在 25.1~28.4GHz 范围内合成效率大于 60%。这种功率放大器的基本组成单元是一对含对称尖劈过渡结构的柔性基片集成波导(FSIW)。将一组该单元上的对称尖劈沿波导窄壁分别插入相应的输入和输出矩形金属波导, 就可在波导内实现宽带、高效率的功率分配和功率合成。结果表明这项技术可方便地用于宽带毫米波固态功率放大器设计。

关键词: 功率合成; 毫米波功率放大器; 基片集成波导; 柔性基片集成波导

中图分类号: TN73 文献标识码: A

DESIGN AND FABRICATION OF Ka-BAND BROADBAND COMBINED POWER AMPLIFIER BASED ON FLEXIBLE SUBSTRATE INTEGRATED WAVEGUIDE TECHNOLOGY

ZHU Hong-Bing^{1,2}, HONG Wei¹, TIAN Ling¹, TANG Hong-Jun¹,
CHEN Ji-Xin¹, HE Fan-Fan¹

(1. State Key Laboratory of Millimeter Waves, School of Information Science and Engineering

Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. Telecommunication Technology Institute, Nanjing 210007, China)

Abstract: An eight-way power amplifier at Ka-band was designed, fabricated and measured. Measured results show that the maximum combined output power is 4.2W (continuous wave) at 26.5GHz. The power combining efficiency is higher than 60% over the interested frequency range (25.1~28.4GHz) and it can reach to 72.5% at 26.4GHz. The foundational cell of this amplifier is a double antipodal flexible substrate integrated waveguide (FSIW) including symmetrical dove-tail taper transition structure. A number of dove-tail tapers of these cells are stacked together and plugged along narrow wall into a couple of normal waveguides, a broadband power divider/combiner is then simply implemented with low insertion loss. The results demonstrate that this technique can be applied in broadband power combining amplifiers at millimeter-wave frequencies.

Key words: power combining; millimeter-wave power amplifier; substrate integrated waveguide (SIW); flexible substrate integrated waveguide (FSIW)

引言

在毫米波频段, 由于受微波单片集成电路(MMIC)工艺水平的限制, 单个 MMIC 功放芯片所能提供的最大输出功率往往不能满足系统设计要求, 需采用功率合成技术来构建发射机的末级功率

放大器。以往的研究表明, 随着功率放大器中 MMIC 器件个数的增加, 空间功率合成比平面功率合成具有更高的合成效率^[1]。国内外已有不少关于空间功率合成技术方面的研究报道^[2-4]。

基片集成波导(SIW)传播主模为类 TE_{10} 模^[5], 与矩形金属波导(简称波导)传播主模 TE_{10} 模相近,

收稿日期: 2009-01-09, 修回日期: 2009-09-09

基金项目: 国家自然科学基金委创新群体基金资助(60621002)

作者简介: 朱红兵(1967-), 男, 江苏南京人, 高级工程师, 博士研究生, 主要研究方向为通信系统中射频技术, E-mail: hbzhu@emfield.org.

Received date: 2009-01-09, revised date: 2009-09-09

具有低损耗、低辐射、抗干扰等特性. 由于 SIW 可以采用传统的印制板工艺制作或生产, 与波导比较则具有设计灵活、加工成本低、体积小、重量轻、易于与平面电路连接等优点. 因此, 近年来采用 SIW 技术实现功率合成正逐渐受到人们的重视^[6,7].

本文提出了一种基于柔性基片集成波导 (FSIW) 技术的空间功率合成方案. 将一对含对称尖劈过渡结构的 FSIW 作为功率放大器的基本组成单元 (简称 SIW 功分/合成单元), 利用 SIW 与波导在传播主模上的相似性特点, 通过一组等厚度 SIW 功分/合成单元和一对波导来共同实现宽带信号的功率分配和功率合成. 同时, 由于信号经 FSIW 被引入到波导外进行放大, 方便了放大器安装、调试和散热. 采用 FSIW 技术, 在 Ka 波段上设计并制作了一个八路功分/合成器, 仿真结果和测试结果基本一致. 在此基础上, 研制了一个 Ka 波段八路宽带功率放大器.

1 设计方法

1.1 基于 SIW 技术的功率分配

一般来说, 影响功率放大器带宽和合成效率的主要因素是信号的功率分配和功率合成, 而且, 功率分配器和功率合成器的结构是对称的. 因此, 我们的关注点是如何设计宽带、低回波损耗和低传输损耗的功率分配器. 本文中如图 1 所示, 功率放大器的基本组成单元是 SIW 功分/合成单元. 图 2 给出了 n 个等厚度 SIW 功分/合成单元与输入波导共同构成 n 路功率分配器的结构示意图. 可以看出, 单元上的对称尖劈过渡结构层叠在一起, 并沿波导窄壁被紧密插入到输入波导中. 由于波导的传播主模为 TE_{10} 模, 其沿波导窄壁的电场分量为 0. 而且, SIW 的传播主模为类 TE_{10} 模. 因此, 在不改变场分布的情况下, 来自波导的输入信号可以通过对称尖劈过渡结构均匀传递到每个 SIW 功分/合成单元中, 从而方便地实现 n 路信号的功率分配或功率合成.

在图 2 中, 对称尖劈过渡结构的作用是使波导与 SIW 这两种不同传输线之间获得良好匹配, 从而减小由于信号传输不连续性所引起的回波损耗. 对于图 1 中的 SIW 功分/合成单元, a 为尖劈的宽度, 与波导的宽壁尺寸相同; L_{trans} 为尖劈的长度; L_{cop} 为尖劈留有的上下敷铜部分长度; L_{dove} 为尖劈开口部分长度; W_{siw0} 为波导衔接处 SIW 宽度; W_{siw1} 为 Ka 波段 SIW 宽度; R_{via} 为金属通孔半径; L_{vsp} 为金属通孔间距. 随着尖劈长度的增加, 信号的

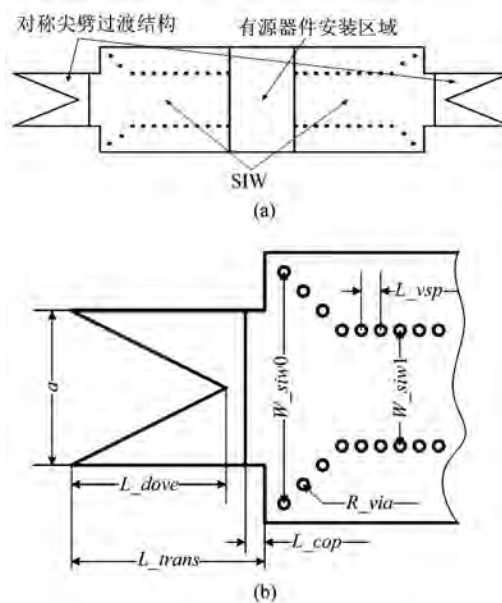


图 1 (a) SIW 功分/合成单元结构示意图 (b) 对称尖劈过渡结构

Fig. 1 (a) Configuration of the SIW divider/combiner structure (b) the transition structure of symmetrical dove-tail taper

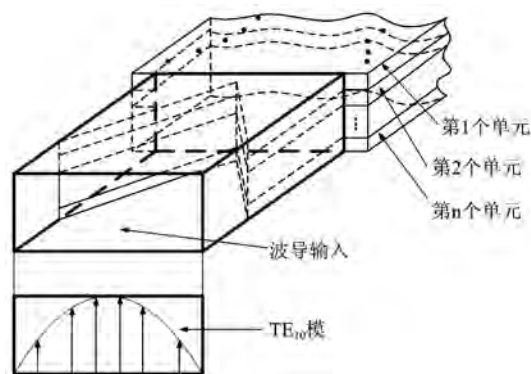


图 2 基于 SIW 技术的功率分配器结构示意图

Fig. 2 Configuration of the power divider structure based on SIW

回波损耗就会减小, 但是信号的传输损耗就会变大. 而且, 该结构的其它参数也会对信号的传输特性产生影响. 因此, 需采用折衷方案来优化设计对称尖劈过渡结构的所有尺寸.

1.2 八路 FSIW 功率分配器设计

在构成功率分配器或功率合成器时, 每个 SIW 功分/合成单元的对称尖劈过渡结构在波导内是层叠在一起的. 然而, 它们处于波导外的部分需设法分隔开, 以便腾出空间来安装功放芯片及其供电、滤波和散热部件. 本文采用弯曲 SIW 的方式来解决这个问题. 将薄 SIW 作为柔性波导来使用, 通过适当折弯 SIW 使各单元彼此分开. SIW 折弯后, 其导波特

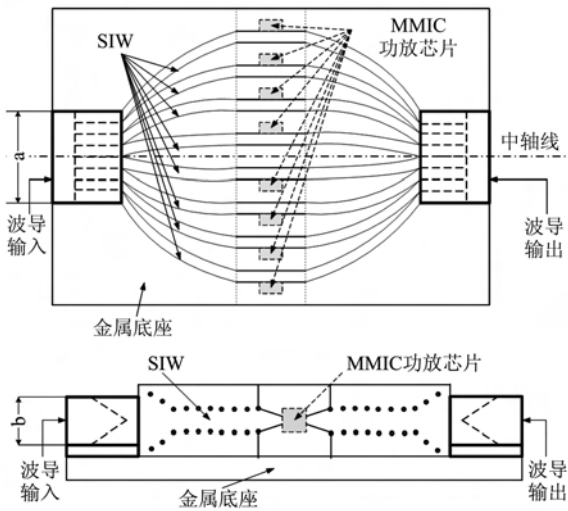


图3 (a) 八路 FSIW 功分/合成器结构顶视图 (b) 八路 FSIW 功分/合成器结构侧视图
Fig. 3 (a) Topology of the eight-way FSIW divider/combiner (top view) (b) topology of the eight-way FSIW divider/combiner (side view)

性基本不发生变化^[8]. 图3给出了八路 FSIW 功分/合成器的结构示意图. 该结构的左右部分分别为功率分配器和功率合成器, 功放芯片及其附件位于此结构的中部, 可分别被安装在每个 SIW 功分/合成单元上.

由图3(a)可以看出, 八个 SIW 功分/合成单元依中轴线对称分布. 靠近中轴线的单元长度最短, 远离中轴线的单元长度较长. 由于单元长度各不相同, 如采用等宽设计这些 SIW 单元, 则会导致信号在功率分配器输出端口上相位不一致, 不利于信号放大后进行功率合成. 本文采用不等宽方案来设计 SIW 单元, 通过调节 SIW 宽度来改变信号的相位特性^[9], 从而满足功率分配器输出信号的同相要求.

图4给出了这种八路功率分配器(图3中的左半部分)采用 FEM 方法优化设计后的 S 参数仿真结果, W_{siw1} 的值由内向外依次为: 6.9mm、6.5mm、6.3mm、5.9mm. 整个仿真设计过程考虑了基片介质和金属敷铜的损耗. 由图4(a)可以看出, 在 25 ~ 29GHz 范围内输入回波损耗(S11) 低于 -16dB, 传输损耗(S21, S31, ..., S91) 均处于 $-10 \pm 0.2\text{dB}$ 范围内. 由图4(b)可以看出, 在 25.8 ~ 28.6GHz 范围内输出信号的相位误差均小于 $\pm 5\%$. 说明这种结构具有理想的宽带功分特性.

为了评估图3所示的八路功分/合成器结构在功率合成中的应用效果, 将每个 SIW 功分/合成单元中的 MMIC 功放芯片用微带线来代替, 作为该无

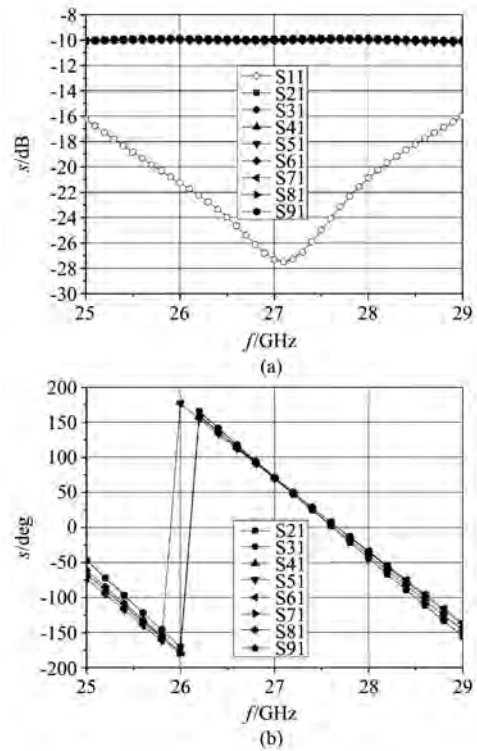


图4 (a) 八路 FSIW 功率分配器仿真结果 (幅频特性) (b) 八路 FSIW 功率分配器仿真结果 (相频特性)
Fig. 4 (a) Simulated results of the eight-way FSIW divider (amplitude-frequency response characteristic) (b) simulated results of the eight-way FSIW divider (phase-frequency response characteristic)

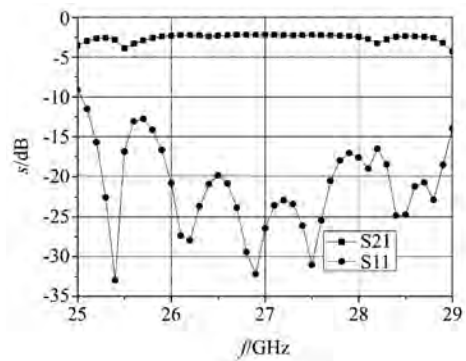


图5 八路 FSIW 功分/合成器仿真结果
Fig. 5 Simulated results of the eight-way FSIW divider/combiner

源结构的 SIW 测试单元. 采用 FEM 方法进行仿真设计, 考虑了基片介质和金属敷铜损耗的仿真结果如图5所示. 可以看出, 在 25.9 ~ 28.9GHz 范围内输入回波损耗低于 -15dB. 在 26.9GHz 上, 传输损耗为 -2.2dB, 在 25.8 ~ 28.8GHz 范围内传输损耗优于 -2.8dB.

2 试验结果

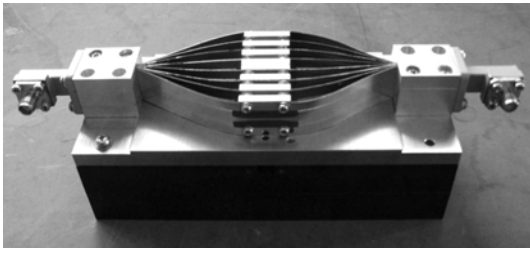


图6 八路 FSIW 功分/合成器实物照片
Fig.6 Photograph of the eight-way FSIW divider/combiner

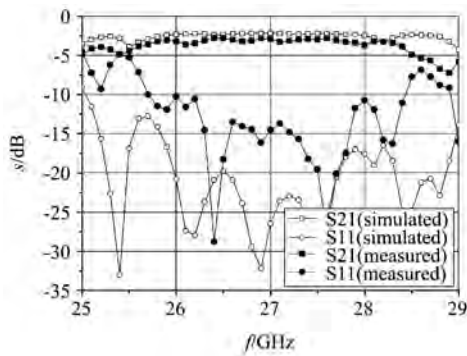


图7 八路 FSIW 功分/合成器测试结果
Fig.7 Measured results of the eight-way FSIW divider/combiner

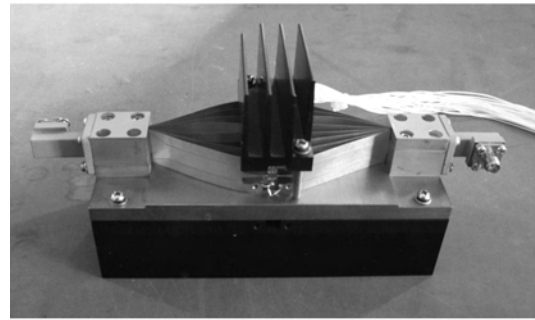
2.1 八路 FSIW 功分/合成器测试

设计并制作了一个 Ka 波段八路 FSIW 功分/合成器,如图 6 所示. SIW 测试单元采用标准印刷电路板(PCB)工艺制作,介质材料为 Rogers RT/duroid 5880,基片厚度为 0.254mm.

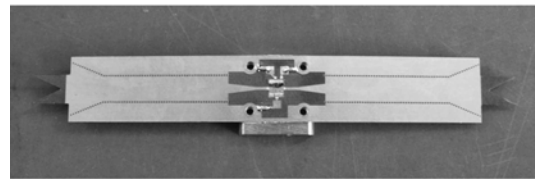
图 7 给出了 S 参数测试结果.可以看出,在 25.7 ~ 28.4GHz 范围内输入回波损耗低于 -10dB. 在 26.5GHz 上,传输损耗约为 -2.8dB;在 25.7 ~ 28.3GHz 范围内,传输损耗优于 -3.7dB. 与仿真结果相比,测试的回波损耗和传输损耗都有稍许增大. 经分析,其主要原因是由实物样品制造工艺上的缺陷所带来的影响,包括诸如印刷电路板制作工艺的偏差和波导腔体加工精度及光洁度的不够精细等. 尽管如此,测试结果与仿真结果基本一致.

2.2 功率放大器测试

实际研制了一个 Ka 波段八路功率放大器,如图 8 所示. 图 8(a)为实验样品照片,图 8(b)为单个 SIW 功分/合成单元照片. 该功放主要由一对 Ka 波段波导、一个金属底座、一个上盖散热器、一个底座散热器和八个 SIW 功分/合成单元组成. 每个 SIW 功分/合成单元的接地背面均焊接有一块金属衬底,其对称尖劈分别插入输入或输出 Ka 波段波导内,而它们的金属衬底下端部分则依次插入到金属底座



(a)



(b)

图8 (a) Ka 波段功率放大器实物照片 (b) SIW 功分/合成单元照片

Fig.8 (a) Photograph of the Ka-band power amplifier (b) photograph of the SIW divider/combiner cell

对应的刻槽中,并通过螺钉固定. 金属底座安装在底座散热器上,通过底座散热器为功放散热. 同时,上盖散热器通过螺钉与金属衬底上端部分紧密连接,具有辅助散热作用.

功放电路所采用的功率器件是 Eudyna 公司生产的商用 MMIC 芯片 FMM5807X,其单片所能提供的最大功率约为 0.8W(典型值). 按使用要求,这些芯片的背部接地面被焊接在金属衬底上,芯片的信号接口和电源接口则通过键合工艺与外部相连. 金属衬底可以将芯片产生的热量传导到金属底座和上盖散热器. 芯片工作时,漏极供电电压选择为 +6V,栅极偏置电压约为 -0.13V,此时漏极电流约为 620mA,因此八路功放的直流功耗约为 30W. 为保证功率合成电路能稳定工作,需对每个芯片的直流偏置做高、低频滤波处理.

图 9 给出了该八路功率放大器在连续波(CW)工作方式下输入和输出功率的测试结果,可以看出,在 26.5GHz 上该功率放大器的最大输出功率约为 4.2W. 在 25.6 ~ 28.2GHz 范围内,功率增益均大于 13dB.

由该功放无源结构(八路 FSIW 功分/合成器)的 S21 参数测试结果可推算出其合成效率^[10]. 图 10 给出了计算所得到的合成效率曲线,在 26.4GHz 上其最大合成效率约为 72.5%,在 25.1 ~ 28.4GHz 范围内,合成效率大于 60%.

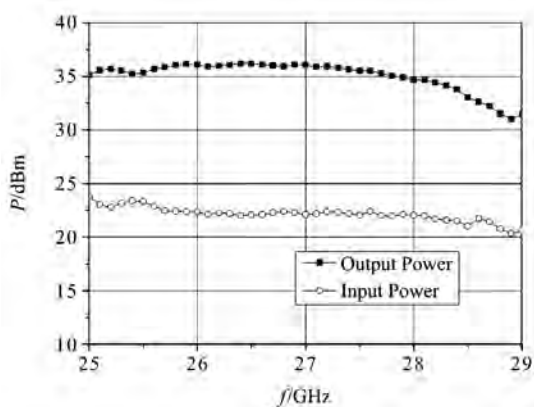


图9 功率放大器测试结果

Fig.9 Measured results of the eight-way FSIW divider/combiner

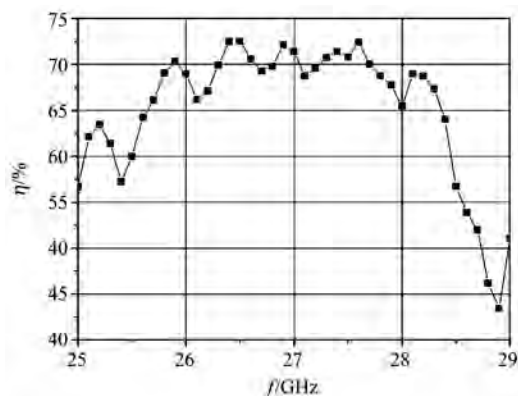


图10 功率合成效率曲线

Fig.10 Power combining efficiency of the amplifier

3 结论

现在随着毫米波通信系统的发展,毫米波功率合成放大器受到人们越来越多的关注.基于 FSIW 技术,利用 SIW 与波导在传播主模上相似性的特点,设计、制作了一个 Ka 波段八路功分/合成器.并在此基础上,研制了一个宽带宽、低损耗、体积小、制

作和散热方便的毫米波功率放大器.说明这项技术可有效地用于宽带毫米波功率合成器设计.

REFERENCES

- [1] KENNETH J Russell. Microwave power combining techniques[J]. *IEEE Trans. on MTT*, 1979, **27** (5): 472—478.
- [2] ZHAO Chen-Xi, XIE Xiao-Qiang, XUE Rui-Ming. Study on a 10W millimeter-wave power amplifier based on spatial combination structure[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (赵晨曦, 谢小强, 徐锐敏. 毫米波 10W 空间功率合成放大器研制. *红外与毫米波学报*), 2008, **27** (6): 434—436.
- [3] WU Jin, OUYANG Si-Hua, YAN Yue-Peng, *et al.* Analysis and design of finline arrays for spatial power combiner[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (武锦, 欧阳思华, 阎跃鹏, 等. 空间功率合成模块中鳍状天线阵的分析和设计. *红外与毫米波学报*), 2008, **27** (2): 157—160.
- [4] MEKKI Belaid, RAQUEL Martínez, WU Ke. A Mode transformer using fin-line array for spatial power-combiner applications [J]. *IEEE Trans. on MTT*, 2004, **52** (4): 1191—1198.
- [5] YAN Li, HONG Wei. Investigations on the propagation characteristics of the Substrate Integrated Waveguide based on the Method of Lines[C]. *IEE Proceedings-H: Microw. Antennas and Propag.*, 2005, **152** (1): 35—42.
- [6] JIN Hai-Yan, WEN Guang-Jun. A novel four-way ka-band spatial power combiner based on HMSIW[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2008, **18** (8): 515—517.
- [7] ZHANG Zhen-Yu, WU Ke. Broadband Half-Mode Substrate Integrated Waveguide (HMSIW) Wilkinson Power Divider [C]. *IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig.*, 2008: 879—882.
- [8] ZHU Hong-Bing, Hong Wei, Tian Ling, *et al.* Experimental Investigations on Substrate Integrated Flexible Waveguide [C]. *IEEE Proceedings of Asia-Pacific Microwave Conference*, DEC 11-14, 2007 Bangkok, THAILAND: 2329—2332.
- [9] CHENG Yu-Jian, WU Ke, Hong Wei. Substrate integrated waveguide (SIW) broadband compensating phase shifter [C]. *IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig.*, Boston, USA, June 2009: 845—848.
- [10] ELLIOTT R Brown, JAMES F Harvey. System characteristics of quasi-optical power amplifiers[J]. *IEEE Circuits and Systems Magazine*, 2001, **1** (4): 23—36.