

一种新型波导基 C 波段空间功率合成器的设计和实现

武 锦, 欧阳思华, 李艳奎, 阎跃鹏, 刘新宇

(中国科学院微电子研究所, 北京 100029)

摘 要: 介绍了一种新型波导基空间功率合成器的结构设计. 采用优化的 Klopfenstein 型鳍状天线阵, 制作实现了 C 波段(3.2~4.9GHz) 2×3 层空间功率合成器. 器件的外部结构尺寸为 $70.12\text{mm} \times 98.44\text{mm} \times 160\text{mm}$, 内部集成了 6 只内匹配的砷化镓微波单片功率管. 对该器件进行了功率合成特性的测试, 实测性能指标为: 在 4.2GHz, 该器件在连续波输入下线性增益为 8.5dB, 饱和输出功率为 42.82dBm(19.1W), 功率附加效率为 25.3%, 功率合成效率达到 72.3%.

关键词: 波导基空间功率合成器; Klopfenstein 鳍线阵; 微波单片功率管

中图分类号: TN73 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2009)08-1686-04

Design and Realization of a Novel C-Band Spatial Power Combiner in Waveguide

WU Jin, OUYANG Si-hua, LI Yan-kui, YAN Yue-peng, LIU Xin-yu

(Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: The configuration of a novel spatial power combiner in waveguide was introduced. Employing the optimized Klopfenstein tapered fin line arrays, the waveguide-based power combiner based on 2×3 arrays at C band was realized. Its size is $70.12\text{mm} \times 98.44\text{mm} \times 160\text{mm}$ and it was implemented by using six commercial GaAs MMIC amplifiers. CW power combiner measurements were performed, the linear gain is about 8.5dB, the saturation output power is 42.82dBm(19.1W) at 4.2GHz, the PAE is 25.3% and the efficiency is about 72.3%.

Key words: spatial power combiners; klopfenstein taped fin line arrays; MMIC PA

1 引言

功率放大器是微波和毫米波发射机所必不可少的部件, 目前虽然单个微波和毫米波固态功率放大器器件(包括芯片级功率合成器件和单片微波集成电路 MMIC)的输出功率有了很大程度的提高, 但是仍满足不了大功率系统的要求, 不得不采用平面功率合成技术来提高输出功率. 然而平面功率合成技术存在固有缺点即随着有源器件数目的增加, 其合成损耗也随之增加, 从而导致合成效率的降低, 除此以外, 平面功率合成技术很难同时兼顾宽的带宽和高的效率.

基于波导技术的空间功率合成模块不仅可克服平面功率合成技术的固有缺点, 而且还易于实现高的功率输出、好的散热、宽的带宽及小的体积. 这种结构的一个突出优点在于随着功率管合成数目的增加其合成效率

不会降低. 正是这些优势使得该技术极有希望同传统的行波管放大器和平面固态功率合成器展开强有力的竞争. 国外很多机构从 1997 年以后陆续开展了该技术相关方面的研究, 美国加州大学圣巴巴拉分校(UCSB)电子工程系率先研究了基于波导技术的空间功率合成技术, 先后报道了利用该技术在 X 波段(8~11GHz)实现输出功率为 2.4W~120W 的方波导空间功率合成器^[1~4]. 2002 年他们用改进的圆波导技术采用 32 只 MMIC PA 管实现了 3~16GHz 超宽带频率范围内的功率输出^[5]. 可看到, 随着研究的进一步深入, 基于波导技术的空间功率合成技术必将成为微波研究的热点领域.

中国科学院微电子所前期的研究中曾经报道了 C 波段 6W 的功率输出^[6]. 在此基础上, 通过进一步优化输入输出鳍状天线结构以及采用阻抗变换线等改进方式, 最终制作实现了 2×3 层的波导基空间功率合成器,

收稿日期: 2008-01-30; 修回日期: 2009-04-20

基金项目: 国家 973 重点基础研究发展规划(No. 2002CB311906); 中国科学院国防科技创新(No. CXJJ-150)

实测性能指标为:在 4.2GHz 下,器件的线性增益为 8.5dB,最大饱和输出功率为 42.82dBm(约为 19.1W),功率附加效率(PAE)为 25.3%,功率合成效率达到 72.3%.

2 空间功率合成器的工作原理

空间功率合成器的拓扑结构如图 1 所示,最早由 Alexanian 和 York 在 1997 年提出^[1].一般采用立体多层结构,图 1(a)给出了测试腔体的结构,在上下两个半封闭波导块内连接多个 H 型波导块,所有波导块的相关面构成封闭的方波导.图 1(b)是每一层的电路图,在每个 H 型波导块上集成了输入输出鳍状天线阵、微带阻抗变换线阵和微波单片集成功率管(MMIC PA).当空间功率合成器工作时,从输入波导入射的电磁波耦合进入鳍状天线阵,总能量被鳍状天线阵所分割,每一份沿着鳍状传播,经过输入微带阻抗变换线阵传输到对应的微波单片集成功率管(MMIC PA)上,输入功率得以放大,被放大后的每一路电磁波信号又通过输出阻抗变换线阵和输出鳍状阵传输,并且辐射到输出波导空间,从而最终实现功率的合成.本结构设计简单,组合方便,波导块采用散热良好的铜材料,MMIC PA 管直接固定在波导块上,解决了功率管的散热问题,易于实现宽频带、大功率、高效率的功率合成.

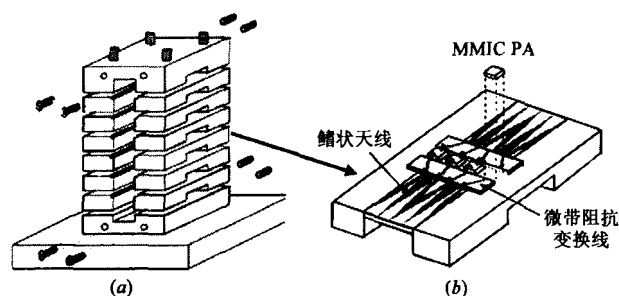


图1 空间功率合成器的拓扑结构图

3 空间功率合成器的结构设计

3.1 鳍状天线阵的设计、优化和制作

鳍状天线阵一般放置在波导的 E 面上,起到了耦合功率和分配功率的作用,因此鳍状天线阵性能的好坏对于整个器件的实现具有非常重要的作用.在前期的研究中曾经报道过有关鳍状阵的设计和优化^[7],通过小波反射理论来分析 Klopfenstein 结构鳍状天线阵的传播特性,采用数值计算和商用高频电磁场仿真软件相结合的方法设计优化了应用于空间功率合成器的输入输出双鳍状天线阵.其结构实物图如图 2 所示,将优化后的鳍状天线制作在 Rogers UL2000 的介质基片上,其对应的参数为 $\epsilon_r = 2.55$,基片厚度 $h = 1\text{mm}$,鳍线总长 51mm,输出缝隙宽为 0.5mm.采用 agilent E8363B 矢

量网络分析仪测量鳍状天线阵,得到其输出阻抗为 120 Ω 时.当 2×2 鳍状阵端接 120 Ω 负载时在 C 波段(3 ~ 4.9GHz)内其回波损耗大于 20dB,驻波比小于 1.25.

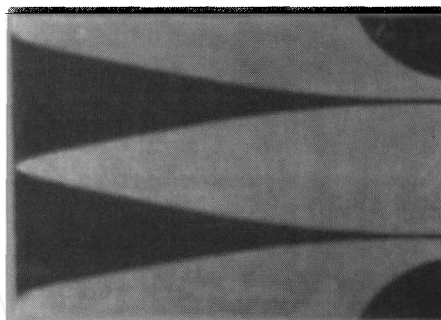


图2 优化后的Klopfenstein型鳍状天线实物图

3.2 阻抗变换线的设计实现

实验中采用的功率管是商用内匹配的 MMIC PA 管,而鳍状天线的输出阻抗为 120 Ω ,因此需要在鳍状天线和 PA 管之间加入阻抗变换线.采用多级的四分之一波长阻抗变换线,根据输入输出阻抗数值以及放置在 H 型波导块上的电路尺寸要求,设计实现了从 120 ~ 50 Ω 的阻抗变换线.其结构示意图如图 3 所示.阻抗变换线的长度为 13mm,制作在 F4B 高频介质基板上,基板厚度为 0.8mm.

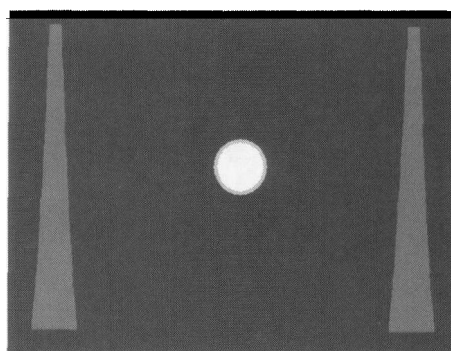


图3 阻抗变换线的结构示意图

3.3 MMIC PA 管直流供电保护电路的实现

图 4 是所设计的商用 PA 管的直流供电保护电路实物图.本电路的突出特点是将直流供电电路和保护电路合二为一.

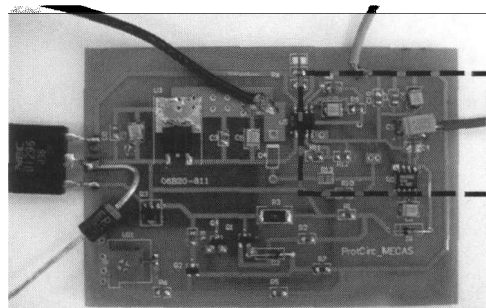


图4 微波单片功率管的直流供电和保护电路实物图

该电路的主要功能为:

- (1)单电压输入,双电压输出.
- (2)电源开启时,先产生栅压,后产生漏压;电源关闭时,先关闭漏压,再关闭栅压.
- (3)电源保护(防止过流、短路和电源反接发生时烧毁电源).
- (4)过流保护(图4中虚线方框所示).

4 空间功率合成器的实现

在制作完成了空间功率合成器的各个组成部分之后,采用商用内匹配的 MMIC PA 管搭建实现了 2×3 层的空间功率合成器.图5给出了 2×3 层空间功率合成器实物图以及每一层 H 型波导块上电路的实物图.如图5(a)所示,四个波导块和上下两个开口波导块通过四个定位销钉使其内表面组装成标准 C 波段方波导,波导对应的截面尺寸为: $29.1\text{mm} \times 58.2\text{mm}$.如图5(b)所示,在每一层 H 型波导块上集成了输入输出双鳍状天线阵、输入输出阻抗变换线、商用的 MMIC PA 管以及其对应的偏置电路.其中双鳍天线同阻抗变换线之间通过直径为 $25\mu\text{m}$ 的金丝键合线连接.另外考虑到 MMIC PA 管的散热,实验中将功率管及其偏置电路通过接地通孔直接固定在波导块上.

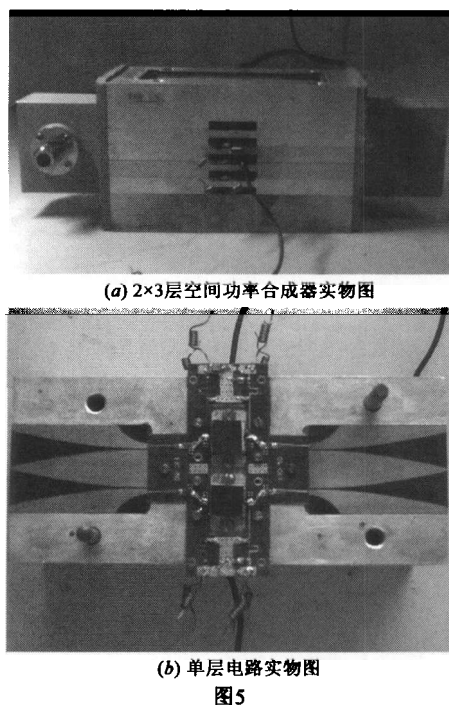


图5

该 2×3 层空间功率合成器采用波导块的组合结构,功率管直接固定在散热良好的波导块上,可以解决功率器件的散热问题.此外,每层的单只功率管可以通过独立的路径实现功率放大合成,使得即使单只功率管不能正常工作也并不影响整个器件的功率合成效率.

5 空间功率合成器功率合成特性的测试

图6给出了单只 MMIC PA 管和空间功率合成器功率特性的测试系统示意图.实验中采用了 22dB 双通道定向耦合器1和 20dB 的双通道定向耦合器2.功率探头A和功率探头B分别探测被测器件的输入和输出功率,考虑到功率计的动态范围,在功率探头B之前加上了一个 30dB 的大功率衰减器.输出端通过连接频谱分析仪来检测被测件是否存在震荡.

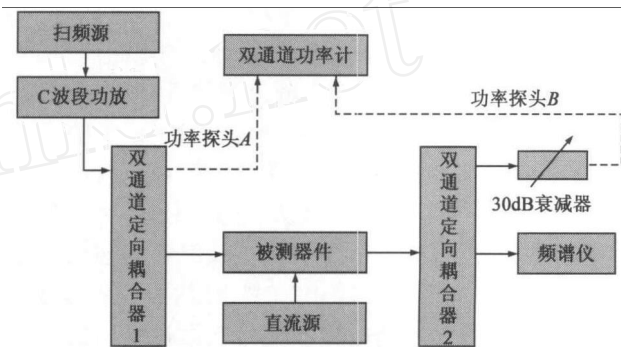


图6 功率测试系统搭建图

利用该套测试系统首先进行了单管的测试和筛选,MMIC PA 管的频率范围为 $3.7 \sim 4.2\text{GHz}$,通过对比测试单管的直流和功率特性,筛选出六只性能比较一致的功率管,其直流工作条件为: $V_{ds} = 10\text{V}$, $V_{gs} = -1.5\text{V}$.图7给出了单只功率管在 4.2GHz 下的功率测试曲线,从测试结果可以得到:功率单管的线性增益约为 11.5dB ,最大饱和输出功率约为 36.5dBm (4.4W),在 $P_{in} = 26.2\text{dBm}$ 时,对应的功率附加效率为 34.6% .

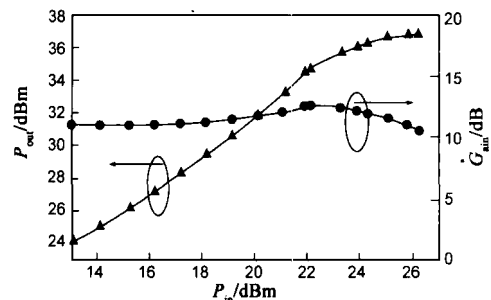


图7 单只功率管在 4.2GHz 下的输出功率和增益随输入功率的测试曲线

随后我们开展了 2×3 层空间功率合成器的功率特性测试.图8给出当 $P_{in} = 35\text{dBm}$ 时, 2×3 层空间功率合成器在 $3.7 \sim 4.2\text{GHz}$ 范围内的输出功率和增益曲线.从图中可以看到,该空间功率合成器在 4.2GHz 下的输出功率为 42.18dBm (16.5W),对应的增益为 7.18dB .在 $3.7 \sim 4.2\text{GHz}$ 频率范围内增益从 5.83dB 到 7.18dB ,最大增益平坦度小于 $\pm 0.7\text{dB}$.图9显示了 2×3 层空间功率合成模块在 4.2GHz 下的输出功率和增益特性.该空间功率合成器的线性增益大约为 8.5dB ,在 $P_{in} =$

37.82dBm 时对应的最大饱和输出功率为 42.82dBm(约为 19.1W),功率附加效率 PAE 约为 25.3%,功率合成效率达到 72.3%。由于单只功率管的功率附加效率不高,阻抗变换线和双鳍天线组成的无源系统也有一定的损耗,因此合成器的线性增益和功率合成效率都不是很高。研究表明,通过进一步优化阻抗变换线,采用高增益高效率的固态微波功率单管等方法可以提高空间功率合成器的合成效率。

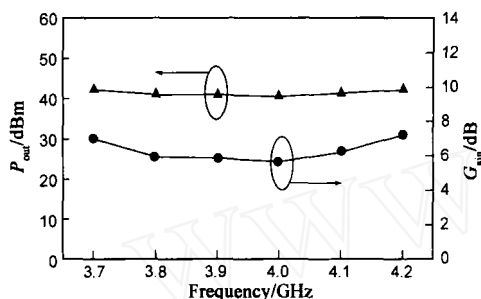


图8 在 $P_{in}=35\text{dBm}$ 下, 2×3 层空间功率合成器在 3.7-4.2GHz 下的输出功率和增益测试曲线

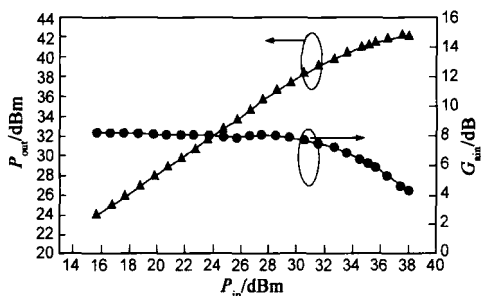


图9 2×3 层空间功率合成模块在 4.2GHz 下的输出功率和增益随输入功率的测试曲线

6 结论

本文通过实验验证了空间功率合成器设计的可行性并研制实现了 2×3 层 C 波段的空间功率合成器,在 3.7~4.2GHz 范围内均具有功率合成放大的作用,其功率特性测试结果基本达到预期的性能指标。若进一步优化合成器的结构,改善功率单管的频率和功率特性,空间功率合成器在频率带宽、功率和合成效率等方面都有望取得更大的突破。

致谢: 作者衷心感谢中国科学院微电子研究所阎跃鹏研究员、刘新宇研究员以及该研究小组其它成员在本项目中给予的帮助。

参考文献:

[1] A Alexanian, York R A. Broadband waveguide-based spatial combiner[A]. IEEE MTT-S Digest[C]. IEEE Press, 1997.

1139 - 1142.

- [2] Nai-Shuo Cheng, A. Alexanian, M. G. Case, et al. 20-W spatial power combiner in waveguide[A]. IEEE MTT-S Digest[C]. IEEE Press, 1998. 1457 - 1462.
- [3] Nai-Shuo Cheng, A. Alexanian, M. G. Case, et al. York. 40-W CW broad-band spatial power combiner using dense finline arrays[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1999, 47(7): 1070 - 1076.
- [4] Nai-Shuo Cheng, Peng Cheng Jia, D B Rensch, et al. A 120-W X-band spatially combined solid-state amplifier [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1999, 47(12): 2557 - 2561.
- [5] Peng-cheng Jia, Lee-Yin Chen, A. Alexanian, et al. Multioctave spatial power combining in oversized coaxial waveguide[J]. IEEE Transactions on Microwave theory and techniques, 2002, 50(5): 1355 - 1360.
- [6] 武锦, 阎跃鹏, 刘新宇, 等. 基于波导技术的 C 波段空间功率合成放大模块研究[A]. 第十四届全国化合物半导体材料、微波器件和光电器件学术会议[C]. 北海, 2006. 706 - 710.
- Wu Jin, Yan Yue-peng, Liu Xin-yu, et al. The research of the spatial power combining module in waveguide at C-band[A]. The Fourteenth Chinese Conference on Compound Semiconductor Materials, Microwave Device and Photovoltaic Device[C]. Bei hai, 2006. 706 - 710. (in Chinese)
- [7] 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[J]. 红外与毫米波学报, 2008, 27(2): 157 - 160.
- Wu Jin, OU-Yang Si-hua, Yan Yue-Peng, et al. Analysis and design of finline arrays for spatial power combiner[J]. J Infrared Millim. Waves, 2008, 27(2): 157 - 160. (in Chinese)

作者简介:



武 锦 女, 1978 年生, 副研究员。2000 年毕业于武汉大学物理与信息工程学院, 2003 年在中国科学院高能物理所获工学硕士学位, 毕业后在中国科学院微电子研究所工作。主要从事微波功率模块的设计和测试等方面的研究, 2005 年担任 973 项目子课题“高性能系统集成模块中的新型互连研究”的课题负责人, 负责项目的整体规划设计, 在国内外主要期刊上先后发表论文

10 多篇。E-mail: wujin@ime.ac.cn

欧阳思华 男, 1980 年生于湖南, 硕士, 工程师, 主要从事微波电磁场计算和微波器件设计等方面的研究工作。