

基于径向波导合成技术的 W 波段功率放大器设计

黄昭宇^{1*}, 徐军¹, 冉东¹, 祁云飞²

(1. 电子科技大学 物理学院, 四川 成都 610054;

2. 河北半导体研究所, 河北 石家庄 050051)

摘要: 基于径向波导合成技术, 设计了一款 W 波段功率放大器。功放采用 4 路氮化镓单片微波集成电路 (MMIC) 单片合成设计, 在 90 GHz 处输出功率为 3.7 W, 合成效率为 94.3%, 具有较好的工程应用价值。

关键词: W 波段; 径向波导; 功率分配/合成器; 功率放大器; 氮化镓单片微波集成电路 (MMIC); 固态电路

中图分类号: TN73 **文献标识码:** A

Design of a W-band power amplifier/combiner based on spatial power-combining technique

HUANG Zhao-Yu^{1*}, XU Jun¹, RAN Dong¹, QI Yun-Fei²

(1. School of Physics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China;

2. Hebei Semiconductor Research Institute, Shijiazhuang 050051, China)

Abstract: In this paper, basing on the radial-line waveguide combining technology, the W-band power amplifier is designed. The design of amplifier uses 4-way GaN MMIC combination. The output power is 3.7 W at 90 GHz and the combining efficiency is 94.3%. This structure has a good engineering application value.

Key words: W-band, radial-line waveguide, power combiner/divider, power amplifier, GaN monolithic millimeter-wave integrated circuit (MMIC), solid-state circuit.

PACS: 84.30.Le, 84.40.-x

引言

随着无线通信技术的快速发展,人们对提高无线传输速率的需求日益增长。由于带宽有限,现有的无线通信技术无法满足实际的应用需求,所以毫米波通信系统的发展已经成为一种趋势^[1-2]。W 波段(75~110 GHz)作为“大气窗口”之一,在传播过程中衰减较小,是毫米波中一个重要的频段。该频段电磁波的穿透性远远优于红外线和可见光,这就减小了由于气候变化对它的干扰,使其相关器件可以全天候工作。在电子对抗、微波散射、卫星通信、遥感、雷达等领域,随着人们对分辨率、带宽等需求的不断提高,各国对 W 波段毫米波器件、放大器及相关组件的研制高度重视。

在现代通信系统中,系统的作用距离、作用能效、通信质量和抗干扰能力很大程度上由发射系统的输出功率和频宽决定。当频率和带宽一定时,功率放大器决定了发射系统的输出功率。功率放大器主要有固态功率放大器和电真空放大器两种。在 W 波段,电真空放大器有较高的输出功率,能够达到百瓦以上,但是它有体积庞大、使用寿命短、带宽小、难以批量生产等缺点;而固态半导体器件具有使用周期长、供电电压低、功耗相对较小、加工技术成熟和便于集成化等优点。随着氮化镓(GaN)单片微波集成电路(MMIC)技术的快速发展,固态微波电路的应用更加广泛。在现有技术中,W 波段 GaN MMIC 单片的输出功率十分有限,通常在几百毫瓦到几瓦之间^[3-4]。如果要得到更高的输出功率,需要

使用功率合成技术将多个 MMIC 单片合成为一个功率放大器。由于微带合成器在 W 波段的插损较大,会直接影响功率放大器的性能,所以本文选用插损较小的径向波导合成器。

结合现有的 GaN MMIC 单片设计水平和加工工艺,本文研制了一款 W 波段基于径向波导合成技术的功率放大器。该功放在 90 GHz 处输出功率达到 3.7 W,合成效率为 94.3%,且整体结构较为紧凑,散热性能良好,能够实现芯片上电保护、上电电压可调等功能,使用简单,整体性能优良。

1 合成网络的设计

矩形波导功率分配/合成器已经广泛应用在微波器件中,主要有 3 dB 功分/合成器和径向波导功分/合成器等。前者为二进制功分/合成器,若实现较多路数的功率合成,需要多级网络,这将会占用较大的空间,不利于系统的集成化。为满足目标需求,本文设计了四路径向波导功分/合成器。设计使用电磁仿真软件 HFSS,结构如图 1 所示。四路功分/合成器采用 WR-10 标准化波导,电磁信号直接由波导进入径向波导部分。径向波导部分中心有一个突出的圆柱作为匹配部分。功分/合成器的四路通道呈 90°分布。电磁信号被分成四路后通过拐角处的阶梯渐变结构改变传输方向,从而配合整个放大器的构成。功分/合成器的具体尺寸如图 2 所示。这种设计比传统的同轴输入径向波导结构更为简单,且同样具有良好的性能。设计也充分考虑现有加工工艺水平,对一些直角部分进行倒角处理。由于 W 波段微波器件的尺寸通常偏小,对加工的精准度要求偏高,所以较为简单的结构更易加工,更能提高成品率。

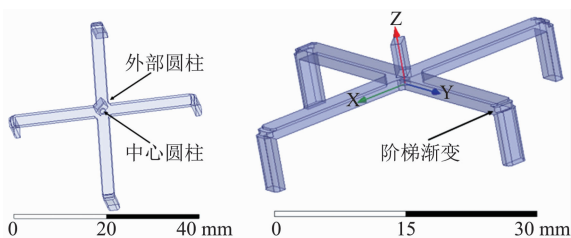


图 1 径向波导功分/合成器模型
Fig. 1 Model of the radial-line waveguide divider/combiner

径向波导功分/合成器的加工实物如图 3 所示。功率分配器和合成器结构相同,在使用时采用背靠背的方式先将电磁信号的功率等分,然后将每路信号放大后再合成。仿真结果和测试结果如图 4

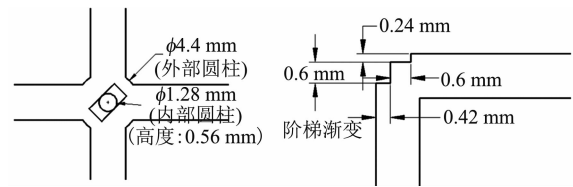


图 2 功分/合成器具体结构
Fig. 2 The specific structure of divider/combiner

所示。



图 3 径向波导功分/合成器实物图
Fig. 3 Fabricated radial-line waveguide divider/combiner

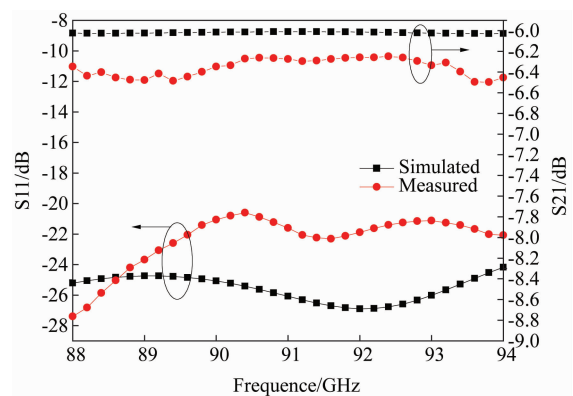


图 4 功分/合成器的插入损耗和回波损耗
Fig. 4 The insertion and return losses of divider/combiner

仿真结果显示,在 88 ~ 94 GHz 频段内, S11 小于 -24 dB; S21 大于 -6.1 dB。测试结果显示,在放大器工作频段内, S11 小于 -20 dB; S21 大于 -6.5 dB。测试结果比仿真结果略有恶化,这主要是由加工误差造成的。

2 单个功率放大模块的设计

在整个功率放大器中, GaN MMIC 单片的使用涉及到矩形波导-微带线的过渡。GaN MMIC 单片的信号输入需由微带线和单片通过金丝线键合的方式实现。矩形波导-微带线的过渡方式有很多, 这里选择对极鳍线的过渡方式。鳍线过渡相比探针过渡更加便于装配, 因为探针过渡需要特别注意其伸入矩形波导的长度, 尤其是在 W 频段等高频段, 装配稍有偏差将直接造成系统性能的下降。鳍线设计模型如图 5 所示。鳍线使用的介质基板为 Rogers 5880, 它上下两边设计了接地过孔, 在装配时导电胶填满过孔, 增强了鳍线的接地性能, 减小了由于过渡带来的插入损耗。

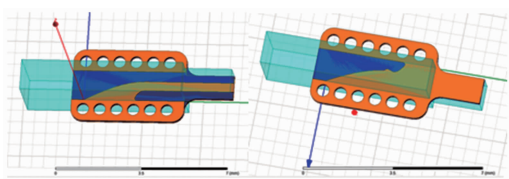


图 5 鳍线设计模型
Fig. 5 Fins design model

设计所使用的是基于第三代半导体 GaN 工艺的 MMIC 功放单片, 其测试数据见表 1。测试条件为栅极电压 -2.1 V , 漏极电压 18 V 。

表 1 氮化镓 MMIC 测试数据
Table 1 The measured results of GaN MMIC

频率/GHz	输入功率/dBm	输出功率/dBm	漏极电流/A
88	20	30.54	0.39
89	20	31.19	0.43
90	20	31.27	0.43
91	20	31.05	0.44
92	20	30.87	0.45
93	20	30.42	0.44
94	20	29.74	0.44

GaN MMIC 单片的装配需要使用微组工艺。由于功率单片的输入输出已经做到 $50\ \Omega$ 匹配, 可以直接将它的输入输出端与微带线用金丝线键合。MMIC 单片需要先焊接到钼铜载片上, 然后再焊接在功放模块上。这是由于 MMIC 单片和功放模块盒体的热膨胀系数差异较大, 而 MMIC 单片在工作时会发热, 如果不使用钼铜载片, 可能会导致单片的胀裂。单片的装配电路如图 6 所示。装配好的单个功放模块如图 7 所示。

功放模块外面所加的 PCB 电路为供电控制电

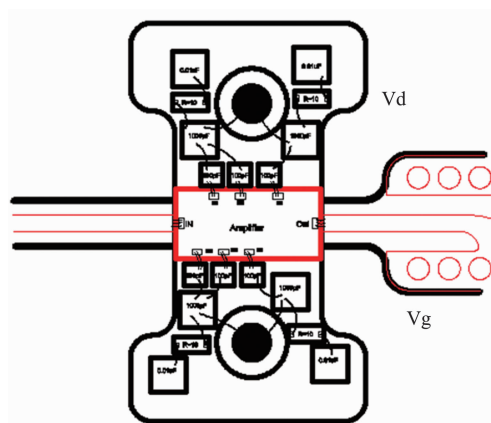


图 6 GaN MMIC 装配图
Fig. 6 GaN MMIC assembly drawing

路。它主要为功率单片提供稳定的输入电压和上电保护, 即在栅极电压没有输入时, 漏极的电压不会输入, 这样可以有效防止因操作失误等原因造成的 MMIC 单片损坏。供电电路采用电阻分压的方式提供输入电压, 其优点是可以根据不同 MMIC 的具体情况调整合适的栅压, 使整个功率放大器工作在更好的状态。

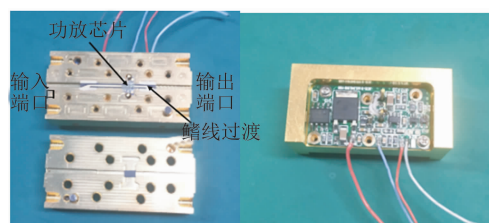


图 7 单个功放模块
Fig. 7 Single power amplifier module

表 2 是功率放大器使用的 4 个功放模块在 88 ~ 94 GHz 频段的测试数据。测试时, 输入功率为 21 dBm。输出功率单位为 dBm。

表 2 单个模块输出功率
Table 2 The output power of single module

	88 GHz	89 GHz	90 GHz	91 GHz	92 GHz	93 GHz	94 GHz
1	29.63	29.67	29.81	28.94	28.62	28.57	28.39
2	29.65	29.61	30.22	29.09	28.66	28.50	28.36
3	29.51	29.72	29.85	29.13	28.84	28.51	28.13
4	29.48	29.90	29.85	29.18	28.77	28.64	28.29

数据表明, 测试的 4 个功放模块在 90 GHz 处的输出功率均高于 29.81 dBm。这些测试数据为功放合成器的合成效率计算提供依据。为了最大程度保证功率单片输出信号的相位一致性, 本文四个模块

使用的 GaN MMIC 单片为同一批次生产的。在实际的调试过程中,可以通过改变供电板上的电阻来调整芯片的供电电压,从而最大程度的保证各模块在相同频点的输出功率一致。幅相一致性的好坏直接影响了功率合成器的合成效率。

3 功率放大器的实现

在将 4 个功率放大模块分别和功率分配/合成器连接时,需要结合法兰盘上的定位销钉将波导口对准并连接紧密,这能减小电磁波的泄露和不必要的插损。装配好的功率放大器如图 8 所示,其尺寸为 55 mm × 55 mm × 60 mm。



图 8 W 波段功率合成放大器
Fig. 8 W band combining power amplifier

为了使功率放大器达到饱和输出,需要使用前级驱动电路。这里所使用的前级驱动电路为一个功放模块,它是两级放大电路,由两个 GaN 功率单片级联而成,其输出功率在 88 ~ 94 GHz 频段内可以达到 27 dBm,满足驱动电路的要求。由于设计较为简单,这里就不再赘述。整个测试系统如图 9 所示。测试结果如表 3 所示,输出功率的单位为 dBm。

表 3 输出功率与合成效率

Table 3 The measured output power and power combining efficiency

	88 GHz	89 GHz	90 GHz	91 GHz	92 GHz	93 GHz	94 GHz
输出功率	35.23	35.44	35.70	34.78	34.42	34.22	33.87
合成效率	92.1%	93.2%	94.3%	92.8%	92.8%	92.1%	90.3%

由测试结果可知,在 90 GHz 处,输出功率为 3.7 W,合成效率为 94.3%。在 88 ~ 91 GHz 内,输出功率大于 3 W,在 91 ~ 94 GHz 内输出功率大于 2.4 W,且在测试频段内合成效率大于 90%。

4 结论

本文详细介绍了一款基于径向波导合成技术的

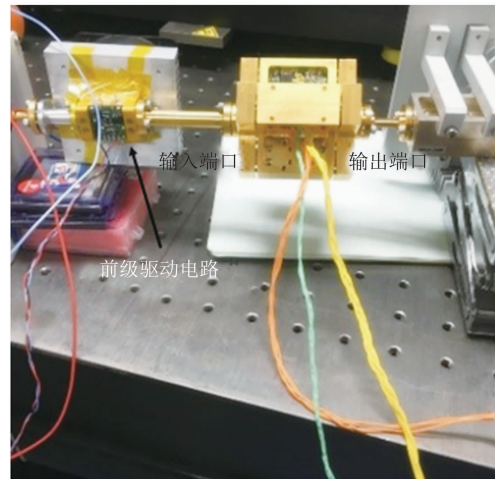


图 9 功率放大器测试系统
Fig. 9 The test platform of the power amplifier

W 波段功率放大器。该放大器在 88 ~ 94 GHz 频段内表现出优异的性能。测试结果和仿真结果存在差异主要因为微波器件的加工工艺水平有限和微组装工艺水平的不一致。在 W 波段微波器件的尺寸都相对较小,一些细微结构的尺寸在 1 mm 以下,有较大的加工难度;本次设计使用的波导器件都采用黄铜镀金的加工方式,对于镀金后的表面平整度也有很高的要求。W 波段电磁波对加工误差的敏感度很高,很小的偏差也会造成较大的性能下降。功放单片和鳍线电路的装配使用到了微组装工艺,金丝键合线的长短和鳍线电路的装配误差都是导致功率放大器性能恶化的原因。

常用的径向波导结构都是使用同轴输入,但是在 W 波段,同轴中心结构的尺寸将会变得很小,这给实际的加工和装配带来很大的困难。本文设计的结构为标准波导输入,便于加工,且性能良好。结构采用一分四的方式是考虑到实际的加工和模块的装配。四个输出端口成“十”字分配有利于模块的设计和装配。如果增加信号输出通道,由于现有加工工艺水平的限制,很多细微结构将难以加工。

有关 W 波段功率合成放大器的可查文献较少,常见的方式如参考文献[5]。它采用径向波导 12 路合成的方式,在 94 ~ 98.5 GHz 频段内,输出功率大于 3 W,合成效率高于 87.5%。它的整体结构紧凑,但与此同时会存在散热问题。现阶段,W 波段功放单片的效率普遍不高,在使用时会放出较多的热量。GaN 功放单片的输出功率会随温度的升高有明显的下降,所以良好的散热可以有效保证功率放大器的稳定工作。本文设计的功率放大器结构相对

宽松,具有良好的散热性能,为以后更高功率 MMIC 单片的使用提供参考;同时加入供电控制电路,提升整个功率放大器的可靠性。它的可拆解性也相对较强,如果在使用过程中出现损坏,能够简单快速的替换损坏模块,具有较高的工程应用价值。

References

- [1] Takahashi H, Kosugi T, Hirata A, et al. 120-GHz-band fully integrated wireless link using QSPK for realtime 10-Gbit/s transmission [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2013, **61**(12):4745-4753.
- [2] Boone J, Krishnan S, Stefanakos E, et al. Coplanar-waveguide-fed folded dipole slot antenna for wireless local area network applications and V-band frequency operations [J]. *Microwaves, Antennas & Propagation, IET*, 2012, **6**(5):583-587.
- [3] Micovic M, Kurdoghlian A, Moyer H P, et al. GaN MMIC technology for microwave and millimeter-wave applications [C]. *IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium*, 30 Oct. -2 Nov. 2005.
- [4] Herrick K J, Brown K W, Rose F A, et al. W-band metamorphic HEMT with 267 mW output power [C]. *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, June 2005.
- [5] Schellenberg J, Watkins E, Micovic M, et al. W-band, 5W solid-state power amplifier/combiner [C]. 2010 *IEEE MTT-S International Microwave Symposium*, July 2010.

- [6] Liu J, Chen W H, Zhenghe Feng. Design of a V-band power amplifier/combiner based on spatial power-combining technique [C]. *Proceedings of 2014 3rd Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation*, July 2014.
- [7] XIE Xiao-Qiang, LIU Xiao, XU Rui-Min. 25 W solid power combining amplifier in Ka-band [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (谢小强, 刘晓, 徐锐敏. Ka 波段 25 W 固态功率合成放大器. *红外与毫米波学报*), 2011, **30**(04):347-349.
- [8] ZHAO Chen-Xi, XIE Xiao-Qiang, XU Rui-Min. Study on a 10 W 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 10 W 空间功率合成放大器研制. *红外与毫米波学报*), 2008, **27**(06):433-436.
- [9] YUAN Ye, Research on sub-harmonic mixer at W band [D]. University of Electronics Science and Technology (袁野. W 波段分谐波混频器研究. 电子科技大学), 2006.
- [10] CUI Yan, TIAN Bing. Design on millimeter wave broadband waveguide power combiner [J]. *Radio Engineering of China* (崔焱, 田兵. 毫米波宽带波导功率合成器设计. *无线电工程*), 2011, **41**(6):54-57.
- [11] Song K J, Zhang F, Hu S Y, et al. Ku-band 200-W pulsed power amplifier based on waveguide spatially power-combining technique for industrial applications [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2014, **61**(8):4274-4280.
- [12] Li X, Chen G J, Zhan M Z, et al. A new planar compatible power combiner based on radial waveguide [C]. 2014 *IEEE International Conference on Communication Problem-solving*, Dec 2014.

(上接第 453 页)

- [5] Goloub P, Deuze J L, Herman M, et al. Analysis of the POLDER polarization measurements performed over cloud covers [J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 1994, **32**(1):78-88.
- [6] He X, Pan D, Yan B, et al. Cloud-top height retrieval from polarizing remote sensor POLDER [J]. *Geoinformatics Remotely Sensed Data & Information*, 2006, **6419**:641922-641922-11.
- [7] C.-Labonnote L, Brogniez G, Buriez J C, et al. Polarized light scattering by inhomogeneous hexagonal monocrystals: Validation with ADEOS-POLDER measurements [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, **106**(D11):12139-12153.
- [8] Yang P, Bi L, Baum B A, et al. Spectrally consistent scattering, absorption, and polarization properties of atmospheric ice crystals at wavelengths from 0.2 μm to 100 μm [J]. *J Atmos Sci*, 2013, **70**:330-47.
- [9] Cole B H, Yang P, Baum B A, et al. Comparison of PARASOL observations with polarized reflectances simulated using different ice habit mixtures [J]. *Journal of Applied Meteorology & Climatology*, 2013, **52**(1):186-196.
- [10] Baum B A, Yang P, Heymsfield A J, et al. Ice cloud single-scattering property models with the full phase matrix at wavelengths from 0.2 to 100 μm [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2014, **146**(2014):

123-139.

- [11] GU Xing-Fa, CHENG Tian-Hai, LI Zheng-Qiang, et al. *Atmospheric aerosol polarized remote sensing* [M]. Beijing: Higher Education Press (顾行发, 程天海, 李正强等. *大气气溶胶偏振遥感* [M]. 北京: 高等教育出版社), 2015: 1-18.
- [12] Liou K N. *An Introduction to Atmospheric Radiation* [M]. California: Academic Press, 2002:275-346.
- [13] CHENG Tian-Hai, GU Xing-Fa, YU Tao, et al. Multi-angle polarized radiation characteristics of water clouds [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (程天海, 顾行发, 余涛, 等. 水云多角度偏振辐射特性研究. *红外与毫米波学报*), 2009, **28**(4):267-271.
- [14] CHEN Xing-Feng, GU Xing-Fa, CHENG Tian-Hai, et al. Simulation and analysis of polarization characteristics for real sea surface sunglint [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis* (陈兴峰, 顾行发, 程天海, 等. 真实海洋表面的太阳耀光偏振辐射特性仿真与分析. *光谱学与光谱分析*), 2011, **31**(6):1648-1653.
- [15] Evans K F, Stephens G L. A new polarized atmospheric radiative transfer model [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 1991, **46**(5):413-423.
- [16] Fougnie B, Lafrance B, Ruffel C, et al. PARASOL in-flight calibration and performance [J]. *Applied Optics*, 2007, **46**(22):5435-5451.