文章编号: 2095-4980(2025)01-0012-07

D波段功率放大模块研制

张宜明,朱华利,张 勇

(电子科技大学 电子科学与工程学院, 四川 成都 611731)

摘 要:研制了一款工作在D波段的功率放大器模块。对射频输入输出过渡结构和直流稳压时序电路进行了设计。射频输入输出过渡结构采用基于楔形波导膜片的波导-接地共面波导过渡实现了同向转换,通过类共面波导的金丝键合方式降低了功放芯片与腔体之间缝隙对模块性能的影响。漏极偏置电路通过并联两个稳压芯片提高了直流稳压时序电路的稳定性。设计扼流槽结构有效降低了模块级联的传输损耗。测试结果表明,模块在144~166 CHz范围内小信号增益大于10 dB,最大增益大于17 dB;输出功率大于27 dBm,最大输出功率大于31 dBm。

关键词:功率放大器模块;D波段;波导-接地共面波导同向转换;扼流槽

中图分类号: TN911 文献标志码: A doi: 10.11805/TKYDA2024388

Development of D-band Power Amplifier module

ZHANG Yiming, ZHU Huali, ZHANG Yong

(College of Electronics Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu Sichuan 611731, China)

Abstract: A Power Amplifier(PA) module operating in the D-band has been developed. The design includes a Radio Frequency(RF) input/output transition structure and a Direct Current(DC) voltage regulation timing circuit. The RF input/output transition structure utilizes a waveguide-coplanar waveguide transition based on wedge-shaped waveguide film, achieving co-directional conversion and reducing the impact of the gap between the power amplifier chip and the cavity on module performance through a gold wire bonding method similar to coplanar waveguides. The drain bias circuit enhances the stability of the DC voltage regulation timing circuit by paralleling two voltage regulation chips. The design of the choke slot structure effectively reduces the transmission loss when modules are cascaded. Test results indicate that the module has a small-signal gain greater than 10 dB and a maximum gain greater than 17 dB within the 144~166 GHz range; the output power is greater than 27 dBm, with a maximum output power greater than 31 dBm.

Keywords: Power Amplifier(PA) module; D-band; waveguide-Grounded Coplanar Waveguide (GCPW) co-directional conversion; choke slot

近年来,随着微波频谱资源占用率的日益提高,无线通信系统的工作频率已经逐渐从微波频段扩展到了毫 米波及太赫兹频段^[1]。目前,毫米波及太赫兹收发前端系统主要还是采用模块化集成和腔体集成的方式^[2-4],而 功率放大模块作为毫米波收发组件的重要部分,主要用于发射端放大发射功率以及作为倍频链路和本振链路的 前级驱动,因此,研制功率放大模块具有重要意义。

2017年,中电十三所林勇等基于 GaN 功放芯片研制了一款 108 GHz 功率放大模块,在 105~108 GHz 频段内小信号增益大于 13 dB,输出功率大于 200 mW^[5]。2018年电子科技大学郭栋等基于 GaAs 功放芯片研制的 W 波段功 放模块在 85~95 GHz 范围内小信号增益大于 8 dB,最大饱和输出功率大于 19 dBm^[6]。2021年,何寒冰基于 GaN 功放芯片研制了一款 W 波段功率放大模块,在 90~98.8 GHz 范围内饱和输出功率大于 29.5 dBm^[7]。2023年,D Schwantuschke 等基于 GaN 功放芯片研制了一款 D 波段功率放大模块,在 129 GHz 获得最大小信号增益 22.7 dB,3 dB 带宽为 126~140 GHz,在 130~150 GHz 内输出功率大于 10 dBm,在 135 GHz 获得最大输出功率 19 dBm^[8]。2023年,电子科技大学张博等对太赫兹功率放大单片封装技术进行研究,提出了适用于多层电路排

收稿日期: 2024-08-21; 修回日期: 2024-10-03

布系统、模块封装的基于分叉探针的垂直过渡结构,通过开口谐振环结构来抑制不良接触导致的电磁泄漏, 提出将电磁带隙结构设置在平面传输线的上腔来抑制高次模的激励、传输和谐振,在此基础上对工作于210~ 230 GHz的功率放大单片进行封装及测试。在210 GHz获得最大小信号增益20.75 dB,在217 GHz达到最大输 出功率15.6 dBm^[9]。2024年,Teruo Jyo等基于250 nm InP DHBT的超宽带放大芯片研制了两款超宽带放大模 块,输入输出分别采用1 nm 和0.8 nm 同轴接头,1 nm 同轴接头模块小信号增益在0.1~130 GHz大于7.5 dB, 0.8 nm 同轴接头模块小信号增益在0.1~165 GHz大于8.3 dB,但2个模块的饱和输出功率只有大约10 dBm^[10]。

D 波段(110~170 GHz)包含了一个 120 GHz 的大气衰减极值和一个 140 GHz 的大气窗口。大气窗口频段,可用 于远距离通信;而大气衰减极值频段,可发展短距离保密通信以及卫星之间的宽带链路通信^[11]。

基于上述背景,本文针对国产的一款D波段功放芯片研制了一款D波段功率放大模块,主要内容包括波导-接地共面波导过渡结构设计、直流稳压时序电路设计和腔体设计。最终测试结果表明:在144~166 GHz范围内小 信号增益大于10 dB,饱和输出功率大于27 dBm。

1 功率放大模块设计

1.1 整体方案

本文使用的功放芯片是一款国产的GaN功放芯片。功率放大模块主要包括: GaN功放芯片、馈电电路、射频输入输出过渡结构和过渡结构与芯片互联。

目前普遍的互联方式主要有金丝键合、倒置过渡和集成天线3种^[3]。集成天线需要在设计芯片时将偶极子天 线一同设计在芯片上;倒置过渡将共面波导基片倒扣在芯片的接地信号接地垫(Ground-Signal-Ground pad,GSG pad)上,通过导电胶或植球方式相连,对装配工艺要求较高;而金丝键合方式工艺成熟,装配简单。因此,本设 计采用金丝键合方式实现过渡结构与芯片互联。

为了更好地实现散热,将功放芯片共晶烧结到高热导率的载体上,将其嵌入到腔体中,功放芯片和腔体之间存在一个缝隙,为减小该缝隙的影响,采用类共面波导金丝键合方式实现互连^[12]。另外,为了避免传统*E*面探针由于输入输出正交而导致模块体积较大,而且不便于与其他模块连接的问题,采用了基于楔形波导膜片的同向转换结构^[13]。整体设计方案如图1所示。



图1 D波段功放模块设计方案

1.2 WR6-GCPW 同向转换结构设计

考虑到该过渡结构工作在D波段,介质基片选用50μm厚的石英基片,矩形波导-接地共面波导(WR6-GCPW)同向转换结构如图2所示。引入增高波导和楔形膜片将矩形波导WR6中的场方向旋转90°,在距离波导终端约四分之一波长(电场强度最大)的位置插入E面探针,再通过一段高阻抗线过渡到特性阻抗为50Ω的接地共面波导传输线。该结构能够实现输入和输出端口在同一中心线上,使得最终整体模块的射频输入输出端口在同一中心线上,便于与其他模块互连。调节增高波导和楔形波导膜片的尺寸,避免产生谐振,完成优化后的WR6-GCPW同向转换结构的参数如表1所示,其S参数仿真结果如图3所示,在110~170 GHz范围内,回波损耗优于20 dB,插入损耗优于0.1 dB。

表1 WR6-GCPW 同向转换结构尺寸

Table1 Dimensions of WR6-GCPW co-directional conversion structure

_									
	parameters	b	b_1	b_2	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5
_	value/µm	825.5	461	470	1282	529	773	510	600





1.3 类共面波导金丝键合

为保证载体和芯片能够装配到腔体中,芯片腔大小通常会留一定的余量,最终导致芯片与腔体之间存在一个缝隙,如图4所示,该缝隙会切断传统的微带金丝互连结构的地平面电流,恶化传输性能^[12]。采用GCPW电路,将芯片的接地信号接地垫(GSG pad)的2个地线与GCPW的2个地线通过金丝键合形成类共面波导结构,能够降低该缝隙对传输性能的影响。图5对比了采用GCPW和微带线(Microstrip Line, MS)金丝键合的传输损耗仿真结果,可以看到类共面波导金丝键合结构具有更小的传输损耗。图4中MMIC(Monolithic Microwave Integrated Circuits)为单片微波集成电路。



1.4 馈电电路设计

为了使功放芯片能够稳定工作,需要设计直流稳压电路为功放芯片提供稳定的偏置电压。直流稳压时序电路原理图如图6所示,图中符号解释如下:低压电(Low Voltage,LV),振荡器(Oscillator,OSC),电容器(Capacitance,CAP),地线(Ground,GND),穿越频率(Crossover Frequency,CF)。

对于-0.4 V 栅压,使用固定输出 3.3 V 的稳压芯片 LM1117-3.3 V 得到 3.3 V 电压,再通过正压转负压芯片 MAX660 得到-3.3 V 电压,由于功放芯片是基于高电子迁移率晶体管(High Electron Mobility Transistor, HEMT)器 件的芯片,栅极没有电流,因此最后通过电阻分压得到-0.4 V 电压。

对于8V漏压,使用LM1084-ADJ稳压芯片,通过调节电阻获得8V电压。另外,因为功放芯片正常工作时 电流较大,其动态电流大约3A,为了降低稳压芯片的功耗以提高直流稳压电路的稳定性,通过并联2个稳压芯 片来降低单个稳压芯片的电流,从而降低其功耗,提高稳定性。

功放芯片是基于HEMT器件设计的,加电时需要先加栅压,后加漏压;去电时需要先去漏压,后去栅压。使

第23卷

用三极管 s9014 和金属氧化物半导体型场效应管(Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor, MOSFET) sqs401来实现时序控制:加电时,当MAX660输出-3.3 V电压后,三极管 s9014的基极和发射极产生压差,集电 极和发射极导通,从而使得 MOS 管的源极和栅极产生压差,源极和漏极导通,实现先加栅压,后加漏压;去电 时,由于漏极在吸收电流,而栅极处于开路状态,栅极的电容释放电荷时间会更长,实现先去漏压,后去栅压。 完成的直流稳压时序电路的时序测试结果如图7所示,满足设计要求:加电时先加栅压,后加漏压;去电时先去 漏压,后去栅压。



Fig.6 Schematic diagram of the DC voltage regulator timing circuit 图6 直流稳压时序电路原理图

1.5 腔体设计

根据芯片手册,功放芯片的漏极电压为8V,动态 电流约3A, 典型输出功率为27dBm, 说明有超过20W 的功率会转化成热量的形式消耗。为实现更好的散热效 果,将功放芯片共晶烧结到高热导率的钼铜载体上,再 一起嵌入下腔体中,如图 8(a)所示;在上腔体切割散热 齿来增大与空气的接触面积,如图8(b)所示。

完成加工的腔体会存在一定的表面粗糙度,导致模 块与模块之间通过法兰盘级联会存在微小的缝隙,在太 赫兹频段,由于工作波长短,微小的缝隙会导致电磁能 量泄露。



Fig.7 Timing diagram of the DC voltage regulator circuit 图7 直流稳压时序电路时序图



Fig.8 Schematic diagram of the cavity 图8 腔体示意图

因此,在输入输出法兰盘的波导口设计扼流槽结构,用于抑制能量泄露^[9,14],如图8(c)所示。在2个矩形波导 之间设置30μm的空气间隙,边界条件设置为辐射边界条件,有/无扼流槽结构的仿真结果如图9所示。结果表 明,扼流槽的引入能够有效降低波导级联的传输损耗。



图 9 有/无扼流槽结构传输损耗仿真结果

2 功放模块加工测试

功放模块由上腔体、下腔体和直流盖板3部 分组成,腔体材料为紫铜表面镀金,下腔体包 括直流腔和芯片腔,上腔体包括空气腔和散热 齿,同时固定销钉在下腔体,方便上下腔体对 准。直流稳压时序电路输入接口设计在侧面, 采用穿心电容连接,能够有效地将交流信号短 路。最终完成的功放模块如图10所示。

对功放模块的小信号增益和输出功率进行测试。小信号增益测试框图如图 11 所示,图中 DUT(Device Under Test)为被测器件。为防止模块输出功率过大而损坏矢量网络分析仪,在模块的输出端级联 30 dB 衰减量的衰减器。

在2.55 A 的静态电流偏置条件下其测试结果如图 12 所示,可以看到,功放模块在 144~166 GHz 范围内小信 号增益大于 10 dB,最大小信号增益大于 17 dB,输入端 回波损耗基本优于 10 dB。虽然模块小信号增益测试时的 静态电流比在片测试时的静态电流(2.5 A)稍大,此时芯 片的增益会有所增大,但是模块的小信号增益还包含了 过渡结构和金丝键合的传输损耗,因此模块的小信号增 益曲线与在片测试基本一致。



Fig.10 Photograph of the D-band power amplifier module 图 10 D波段功率放大模块实物图



输出功率测试框图如图 13 所示,140~166 GHz 信号通过信号源 Agilent E83732B、W 波段 6 倍频放大模块、W 波段放大驱动、二倍频器和D 波段放大驱动获得,测试结果如图 14 所示。

可以看到,功放模块在144~166 GHz范围内输出功率大于27 dBm,最大输出功率大于31 dBm,对应的输入 功率在19~25 dBm之间,功率增益基本大于6 dB。由于模块的静态电流比在片测试时的静态电流大,而且输入 功率较高,导致模块的动态电流有所提高(≈2.9 A),饱和输出功率随之提高。

表2对近年来报道的D波段放大器模块进行了性能对比,从表中可以看出本文所设计功率放大模块具有较高的输出功率,最大输出功率大于1W。



Fig.13 Test block diagram of the output power 图 13 输出功率测试框图

表 2 D 波段放大器模块性能对比

Fable2 Performance	comparison	of D-band	amplifier	modules
autorez i errormanee	comparison	01 D Uunu	ampinier	modules

technology	frequency/GHz	gain/dB	$P_{\rm out,max}/\rm dBm$	Ref.
GaN	125~150	10.0~22.7	19.0	[8]
GaN	140~150	8.7@149 GHz	18.2	[15]
InP HBT	120~140	20.0~24.6	12.3	[16]
_	110~170	16.0~20.0	_	[17]
GaN	144~166	10.0~17.0	31.0	this work

3 结论

本文基于国产功放芯片研制了一款 D 波段功率放大 模块。射频输入输出过渡结构采用基于楔形波导膜片的 同向转换结构,采用类共面波导金丝键合的方式降低功 放芯片与腔体之间的缝隙的影响。对于漏极电压供电电 路,通过2个稳压芯片并联降低单个稳压芯片的功耗,从 而提高直流稳压电路的稳定性。将功放芯片共晶烧结到 高热导率的钼铜载体上改善模块的散热能力,引入扼流 槽结构降低模块级联的传输损耗。测试结果表明:该功 放模块在144~166 GHz范围内小信号增益大于10 dB,最 大增益大于17 dB,输出功率大于27 dBm,最大输出功 率大于31 dBm。整体性能优良。



Fig.14 Test results of the output power 图 14 输出功率测试结果

参考文献:

- [1] 洪伟,余超,陈继新,等. 毫米波与太赫兹技术[J]. 中国科学(信息科学), 2016,46(8):1086-1107. (HONG Wei,YU Chao,CHEN Jixin,et al. Millimeter wave and terahertz technology[J]. Science in China(Information Sciences), 2016,46(8):1086-1107.) doi:10. 1360/N112016-00069.
- [2] TREUTTEL J,GATILOVA L,MAESTRINI A,et al. A 520~620 GHz Schottky receiver front-end for planetary science and remote sensing with 1 070 K~1 500 K DSB noise temperature at room temperature[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2016,6(1):148-155.
- [3] 曹天豪. 短毫米波收发组件关键技术研究[D]. 成都:电子科技大学, 2023. (CAO Tianhao. Research on key technologies of short millimeter wave transceiver component[D]. Chengdu, China: University of Electronic Science and Technology of China, 2023.)
- [4] 邓乐. 500 GHz+收发组件关键技术研究[D]. 成都:电子科技大学, 2023. (DENG Le. Research on key technology of 500 GHz+ transceiver components[D]. Chengdu, China: University of Electronic Science and Technology of China, 2023.)
- [5] 林勇,乔明昌,王宗成,等. 108 GHz 功率放大器模块研制[J]. 微波学报, 2017,33(6):48-51. (LIN Yong,QIAO Mingchang, WANG Zongcheng, et al. 108 GHz power amplifier module[J]. Journal of Microwaves, 2017,33(6):48-51.) doi:10.14183/j.cnki. 1005-6122.201706011.
- [6] 郭栋,刘晓宇,王溪,等.一种W波段高输出功率放大器模块[J]. 微电子学, 2018,48(3):321-325. (GUO Dong,LIU Xiaoyu, WANG Xi,et al. A W-band high output power amplifier module[J]. Microelectronics, 2018,48(3):321-325.) doi:10.13911/j.cnki. 1004-3365.170414.
- [7] 何寒冰. 一种W波段1W功率放大模块设计[J]. 电子技术与软件工程, 2021(3):83-84. (HE Hanbing. Design of a W-band 1W power amplifier module[J]. Electronic Technology & Software Engineering, 2021(3):83-84.)
- [8] SCHWANTUSCHKE D, TURE E, BRUCKNER P, et al GaN-based power amplifier MMIC and module for D-band

applications[C]// The 18th European Microwave Integrated Circuits Conference. Berlin, Germany: IEEE, 2023: 129-132. doi: 10.23919/EuMIC58042.2023.10289074.

- [9] 张博,张勇,江伟佳,等. 太赫兹功率放大单片封装技术研究[J]. 电子学报, 2023,51(10):2724-2732. (ZHANG Bo,ZHANG Yong, JIANG Weijia, et al. Research on terahertz monolithic integrated power amplifier package[J]. Acta Electronica Sinica, 2023,51(10):2724-2732.) doi:10.12263/DZXB.20221317.
- [10] JYO T, NAGATANI M, WAKITA H, et al. Over 200 GHz-bandwidth InP DHBT baseband amplifier ICs and ultrabroadband modules with 1-/0.8-mm coaxial connectors[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2024, 72(9): 5297-5308.
- [11] 赵伟. 毫米波及太赫兹混频技术研究[D]. 成都:电子科技大学, 2015. (ZHAO Wei. Research on millimeter-wave and terahertz mixing technology[D]. Chengdu, China: University of Electronic Science and Technology of China, 2015.) doi: 10.7666/d. D665608.
- [12] 张勇,吴成凯,朱华利,等.一种用于毫米波芯片封装的类共面波导金丝键合互连结构:CN202222378068.6[P]. 2022-09-07.
 (ZHANG Yong, WU Chengkai, ZHU Huali, et al. A quasi coplanar waveguide gold wire bonding interconnect structure for millimeter wave chip packaging:CN202222378068.6[P]. 2022-09-07.)
- [13] WU Chengkai, ZHANG Yong, LI Yukun, et al. Millimeter-wave waveguide-to-microstrip inline transition using a wedgewaveguide iris[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2022, 70(2): 1087-1096. doi: 10.1109/TMTT. 2021.3123349.
- [14] 张博,张勇.低损耗太赫兹波导腔体传输结构与互联接口设计技术[J]. 空间电子技术, 2024,21(4):77-85. (ZHANG Bo, ZHANG Yong. Low-loss terahertz waveguide cavity transmission structure and interconnection interface design technology[J]. Space Electronic Technology, 2024,21(4):77-85.) doi:10.3969/j.issn.1674-7135.2024.04.012.
- [15] FUNG A, SAMOSKA L, KANGASLAHTI P, et al. Gallium nitride amplifiers beyond W-band[C]// IEEE Radio and Wireless Symposium. Anaheim, CA, USA: IEEE, 2018:150-153. doi:10.1109/RWS.2018.8304971.
- [16] JEON Y, JEONG J, JANG Y, et al. D-band power amplifier module with medium output power using *E*-plane waveguide transition[C]// The 19th International SoC Design Conference. Gangneung-si, Korea: IEEE, 2022:115-116. doi:10.1109/ISOCC 56007.2022.10031504.
- [17] ZHANG Bo, JIANG Wei, ZHANG Yong, et al. Broadband flip-suspended-microstrip transition for millimeter-wave MMIC package[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2023,65(6):1608-1614. doi:10.1002/mop.33624.

作者简介:

张宜明(1999-),男,在读博士研究生,主要研究 方向为毫米波及太赫兹集成电路.email:yimingzhang@ std.uestc.edu.cn.

朱华利(1995-),男,博士,主要研究方向为毫米 波及太赫兹固态电路. **张 勇**(1975--),男,博士,教授,主要研究方向为 微波与毫米波集成电路、固态太赫兹技术等.