

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2016.08.008

引用格式:梁勤金,石小燕,潘文武,等.一种新研制的 W 频段固态 GaN 功率放大器毫米波源[J].电讯技术,2016,56(8):873-878. [LIANG Qinjin,SHI Xiaoyan,PAN Wenwu,et al. A newly-developed W-band solid-state GaN power amplifier millimeter wave source[J]. Telecommunication Engineering,2016,56(8):873-878.]

一种新研制的 W 频段固态 GaN 功率放大器毫米波源*

梁勤金**,石小燕,潘文武,黄吉金

(中国工程物理研究院 应用电子学研究所 高功率微波技术重点实验室,四川 绵阳 621900)

摘 要:介绍了一种新研制的 W 频段固态 GaN 功率放大器毫米波源,给出了系统组成与工作原理,提供了其主要部件 W 频段固态 Gunn 驱动源、W 频段波导-微带转换器、主放大器芯片基本性能及实验测试结果。该固态毫米波源工作频率 94 GHz,输出连续波功率大于 300 mW,线性增益 10 dB,附加效率(PAE)大于 16%。在 W 频段固态毫米波源研制过程中,其单片微波集成电路(MMIC)功率放大器半导体材料选择经历了 GaAs、InP 到 GaN 演变,结果清楚表明,W 频段毫米波源的 GaN MMIC 功率放大器输出功率、增益、效率、高温性能要优于其他固态 MMIC 功率放大器性能。W 频段大功率固态 GaN MMIC 技术将在毫米波领域带来新的技术革命和应用。

关键词:毫米波源;GaN 功率放大器;W 频段;单片微波集成电路;连续波

中图分类号:TN73 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2016)08-0873-06

A Newly-developed W-band Solid-state GaN Power Amplifier Millimeter Wave Source

LIANG Qinjin,SHI Xiaoyan,PAN Wenwu,HUANG Jijin

(Science and Technology on High Power Microwave Laboratory,Institute of Applied Electronics,China Academy of Engineering Physics,Mianyang 621900,China)

Abstract: This paper introduces a newly-developed W-band solid-state GaN power amplifier millimeter wave(MMW) source,gives its system composition and operational principle,and provides the basic performance and experimental results of primary components including W-band solid-state Gunn driving source,W-band guide-microstrip line transposition and main amplifier chip. The MMW source operates at 94 GHz,its continuous wave power output is larger than 300 mW,linear gain is 10 dB,power-added efficiency(PAE) is greater than 16%. During the development of W-band solid-state MMW source,the choice of its monolithic microwave integrated circuit(MMIC) power amplifier of semiconductor material has undergone GaN,GaAs and InP,which clearly demonstrates that the output power,gain,efficiency and high temperature performance of W-band GaN MMIC power amplifier is superior to that of other solid-state MMIC power amplifiers. The high power technology of W-band solid-state GaN MMIC is likely to result in new revolutionized technology and application in the MMW field.

Key words: millimeter wave source;GaN power amplifier;W-band;MMIC;continous wave

* 收稿日期:2016-02-24;修回日期:2016-06-15 Received date:2016-02-24;Revised date:2016-06-15
基金项目:国家高技术研究发展计划(863 计划)项目
Foundation Item:The National High-tech R&D Program of China(863 Program)

** 通信作者:liang2489623@163.com Corresponding author:liang2489623@163.com

1 引 言

目前及未来军民两用设备都需要几瓦、几十瓦 W 频段(75 ~ 110 GHz)固态功率源。W 频段固态毫米波源以 W 频段固态功率放大器(Solid-state Power Amplifier, SSPA)为基础,因具有高可靠、低成本、宽频宽、长寿命、调试简便等特点而优于其他真空器件。使用传统的 GaAs 和 InP 单片微波集成电路(Monolithic Microwave Integrated Circuit, MMIC)技术,其输出连续波功率目前受限于百毫瓦水平^[1]。近来发展迅速的宽禁带 GaN 技术已经实现 W 频段 MMIC 输出功率达到数百毫瓦^[2-5]。要实现 W 频段固态化更高功率的输出,满足目前重大任务的应用需求,拟采用高效率的功率合成技术,其单元 W 频段功率放大器设计技术是基础。本文采用国内最新研制的 W 频段固态输出功率400 mW GaN 功放芯片,实现了附加效率 16%、320 mW 连续波功率输出,达到了预期研究目的,以此完成的研究工作为基础,下一步开展大功率高效功率合成技术研究。

目前,国内外大功率固态高功率毫米波源技术及其应用发展迅速,频率在40 GHz以内的各种毫米波组件(固态频率源、开关、混频器、功率放大器等)国内外技术发展相对成熟。但 W 频段(75 ~ 110 GHz)及其更高频率 D 频段(75 ~ 110 GHz)、F 频段(90 ~ 140 GHz)、G 频段(140 ~ 220 GHz)高功率固态毫米波技术^[6-8],其核心技术国外一直对华限制。固态高功率高频段毫米波技术门槛高,研制难度大,由于其波长短、工程实现复杂、技术难度大,工艺、材料等要求远远超过传统的低频端毫米波技术。国内探索 W 频段(75 ~ 110 GHz)大功率固态毫米波源技术的工程实现一直进展缓慢,芯片可靠性较差,研制成本高。

为了进一步提高高端 W 频段固态毫米波源综合性能,许多研究人员已经开始寻找 GaAs 材料之外的其他固态半导体材料,如 InP 和 GaN 都比 GaAs 有较大带隙的材料,期望通过这些材料开发出高功率毫米波固态功率芯片,其在高端毫米波频段(W、D、F、G)获得更高的连续波功率输出^[1-2]。到目前为止,W 频段固态 GaN 功率放大器毫米波源 MMIC 功率放大器半导体材料选择经历了 GaAs、InP 到 GaN 演变,演变历史表明,W 频段 GaN 功率高电子迁移率晶体管(High Electron Mobility Transistor, HEMT)输出功率是 InP 的 5 倍,而且 InP 材料商业成本很高。2010 年至今,以 GaN 半导体材料为基础

的固态 W 频段毫米波 MMIC 芯片研制取得了显著进展^[9-11]。

国内外全固态大功率 W 频段毫米波功率源存在巨大应用牵引需求,例如美国研制拒止武器采用 W 频段全固态化大规模功率合成毫米波源与真空管实现双重技术路线,而该两条技术路线国内研究基础都十分薄弱。早期应用天文观测 W 频段小功率固态毫米波源采用 W 频段固态 Gunn 管振荡型技术路线实现,结果是 W 频段毫米波固态源输出连续波(Continuous Wave, CW)功率相对较低,一般都在 30 ~ 50 mW。要扩大更广泛技术应用需求,需要进一步提高 W 频段固态毫米波源输出 CW 功率达到瓦级,需要选择更好空间功率合成技术路线和方法^[12-14],研制更优良 W 频段 MMIC 固态功率放大器芯片和更高性能的单元 W 频段固态毫米波源,使其功率、增益、效率、高温性能等综合技术取得显著技术进步与突破,从目前国内外 W 频段 MMIC 功率放大器毫米波源研制情况看基本可行^[9-11]。

2 94 GHz 固态毫米波源系统组成及工作原理

一种工作频率94 GHz、输出功率300 mW、效率16%的固态毫米波源系统主要由 W 频段固态 Gunn 驱动源(频率94 GHz,功率25 mW)、固态功率放大器1(频率94 GHz,功率60 mW)、固态功率放大器2(频率94 GHz,功率150 mW)、4 路并联主放大器 PA1 ~ PA4(频率94 GHz,4 路并联功率放大)、W 频段波导-微带转换器、W 频段波导(WR-10)输出组成,如图 1 所示。

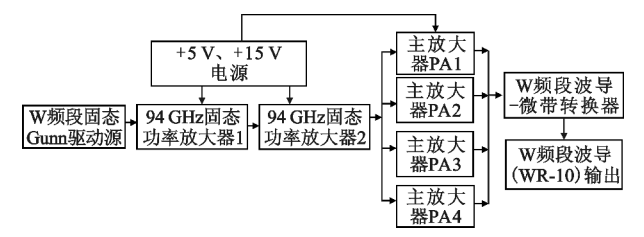


图 1 94 GHz 固态毫米波源系统原理图
Fig. 1 The system principle diagram of 94 GHz solid-state millimeter wave source

图 1 中主放大器 PA1 ~ PA4 采用双级电路设计,第一级由两个 GaN FET 驱动放大器构成,用作驱动放大器;第二级由 4 个并联 GaN FET 放大器构成主路功率放大器。芯片尺寸仅2.3 mm×1.8 mm。第一级与第二级之间采用带电抗匹配单元最佳射频性能结构,微带-棱性耦合线在双级间提供相应阻抗变换,

以实现宽频带匹配设计和确保性能的重复性。

图 1 中供电电源为+5 V和+15 V两组,自带 RC (Resistance–Capacitance) 滤波电路,以避免对放大器低频端性能影响,确保固态功率放大器工作稳定。94 GHz固态功率放大器 1、94 GHz固态功率放大器 2 主要是放大 W 频段 Gunn 驱动源功率,给主放大器 PA1 ~ PA4 提供良好的驱动性能。输入输出波导–微带转换器与其组成一个完整的 W 频段固态功率放大器。

图 1 中 W 频段94 GHz固态功率放大器设计时,1/4 波长短路柱被放置在输入输出匹配网络之间,滤除了不要求的带外杂散,阻止了由于器件高跨导而带来的自激振荡可能性。

2.1 W 频段固态 Gunn 驱动源

Gunn 二极管振荡器组件主要由 W 频段波导、Gunn 支架、短路活塞支架、短路活塞组成,如图 2

所示。

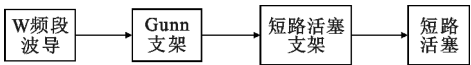


图 2 W 频段固态 Gunn 驱动源原理框图
Fig. 2 Principle diagram of W–band solid–state Gunn driving source

稳态振荡时半导体器件中的电流为

$$i(t)=A\cos(\omega t+\varphi)。$$
 (1)

式中: A 为振幅; φ 为相位; $\omega=2\pi f$ 为以弧度 (rad) 表示的基波角频率。

$$[Z(\omega)-\bar{Z}(A)]A\exp(j(\omega t+\varphi))=0。$$
 (2)

对于一个稳定的自由振荡器来说, $Z(\omega)$ 必须等于 $\bar{Z}(A)$ 。通过分别改变 ω 和 A 值所获得的电路阻抗 $Z(\omega)$ 与器件阻抗 $\bar{Z}(A)$ 负值的轨迹交点,就可用来确定振荡器的工作频率和振幅,其 W 频段固态 Gunn 驱动源结构及实物图如图 3 所示。

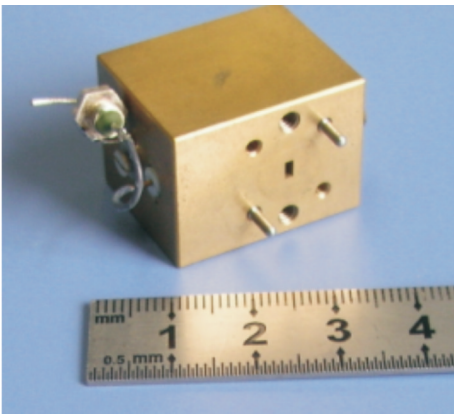
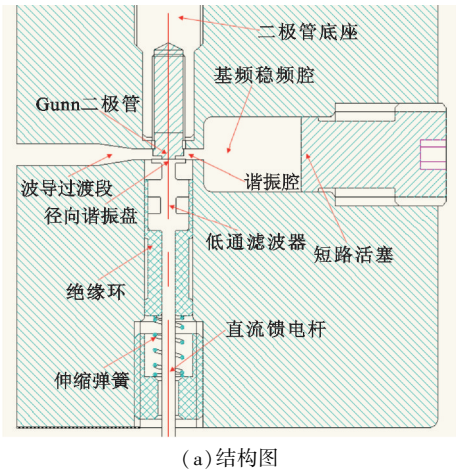


图 3 W 频段固态 Gunn 驱动源结构及实物图
Fig. 3 Block diagram and product photo of W–band solid–state Gunn driving source

基频稳频腔用于稳定基频信号,进而更好地稳定二次谐波信号,同时为了方便加工和移动调节位置,选用圆波导结构作为稳频腔,由圆波导的单模传输条件可知 $1.5\text{ mm}<R<3.0\text{ mm}$ 。

W 频段固态 Gunn 驱动源独特优点是整体结构一体化设计、一体化精密加工,加工精度 $\pm 0.01\text{ mm}$ 。总体设计与加工难度优于国内外包括美国 HRL Laborator 等在内的传统 W 频段固态 Gunn 振荡器的分离加工再组装设计方法与加工方法^[15–16],其结果是杂散及相位噪声性能显著提高,后续将以单独论文发表以供读者参考,在此不再赘述。

2.2 W 频段固态功率放大器输入/输出波导–微带转换器

在毫米波混合集成电路中,需要将微带电路输

入、输出端口通过转换结构过渡到波导,将微带电路转换至波导,以降低传输损耗,其平面结构及模拟仿真结果分别如图 4 和图 5 所示。

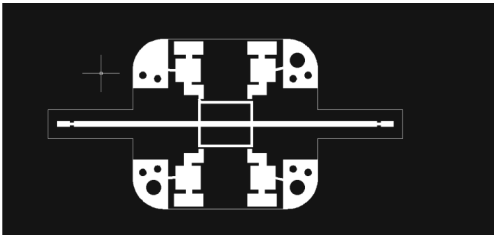


图 4 W 频段固态功率放大器输入/输出波导–微带转换器平面结构
Fig. 4 Planar architecture of input and output waveguide–microstrip line on the W–band solid–state power amplifier

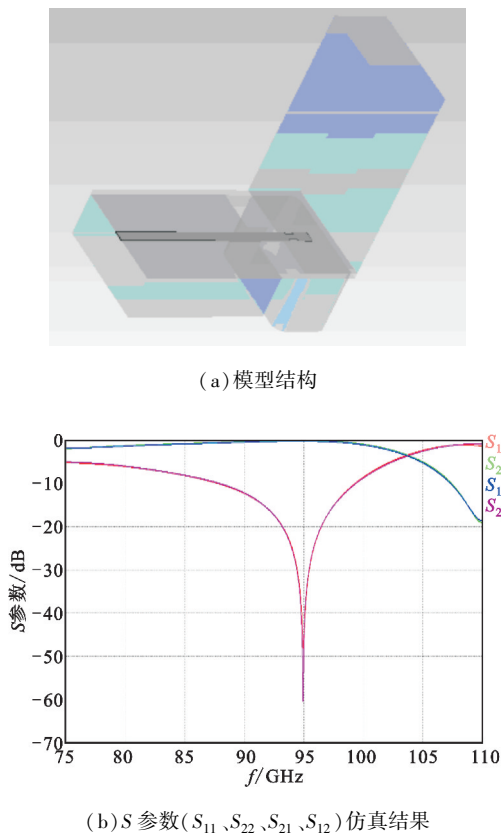


图 5 W 频段固态功率放大器输入/输出波导-微带转换器模型结构及其 EI 仿真结果

Fig. 5 Module architecture and EI simulation result of input and output waveguide-microstrip line on the W-band solid-state power amplifier

探针型波导-微带过渡结构直接利用微带线作为探针伸入波导内,延伸部分为介质及其上金属导带线,微带线插入波导形成电探针,任一个沿探针方向具有非零电场的波导模将在探针上激励起电流。根据互易原理,当微带线上准 TEM 模向波导入射时产生的探针电流也将激励起同样的波导模。在探针部分与微带传输线间经常应用四分之一波长阻抗变换器以实现阻抗匹配。设计时选用 E 面探针式波导-微带转换结构。波导的尺寸采用 W 频段 WR-10 标准矩形波导(2.54 mm×1.27 mm),微带介质基板选用相对介电常数 2.2 的 Rogers 5880 材料,厚度为0.127 mm。

2.3 W 频段主放大器

图 6 所示为3 mm主放大器实物芯片结构及其实物放大器,其芯片结构外形尺寸为 2.3 mm×1.8 mm,实物放大器外形尺寸为 35 mm×20 mm×20 mm。图 6 中主放大器芯片工艺采用0.12 μm栅长、HEMT 实现功率放大及 0.05 mm 薄介质材料,薄介质材料允许实现小过孔和较小热阻,较小过孔能够

实现接地良好和低电感,有利调谐增益,改进增益特性和功率密度。

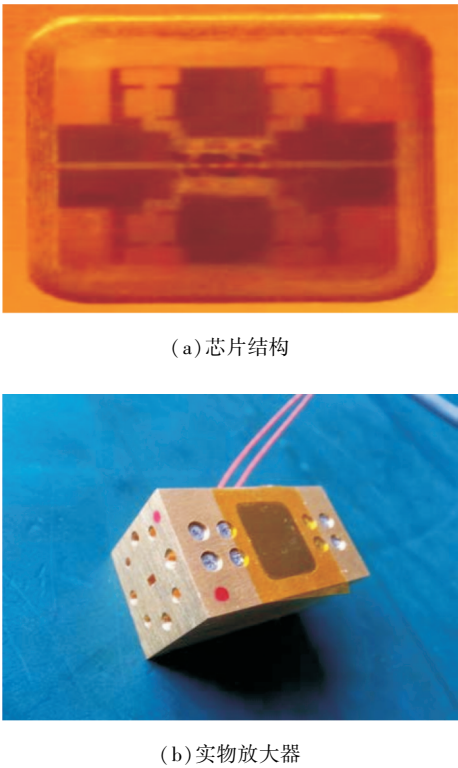


图 6 W 频段主放大器芯片结构及其实物放大器

Fig. 6 Chip architecture and product photo of the W-band main power amplifier

W 频段主放大器芯片主要技术参数如表 1 所列。

表 1 主放大器芯片主要技术参数	
Tab. 1 The primary technical parameters of main amplifier chip	
参数名称	参数数值
频率/GHz	90 ~ 95
主放大器芯片输出功率/mW	400
增益/dB	7 ~ 10
附加效率/%	16
工作电压/V	5/1
电流/mA	15/120
输入/输出	WR-10 波导

3 94 GHz 固态毫米波源系统主要性能

调节 94 GHz 固态毫米波源固态驱动 Gunn 源的偏置电压,使固态驱动 Gunn 源输出频率在 90 ~ 95 GHz范围内达到要求的输出功率。按图 7 测试框图连接测试系统,直接测出输出功率及频率。其频率-增益特性测试用网络分析仪测试 S_{21} 参数,读出其固态功率放大器频率-增益,如图 8 所示。

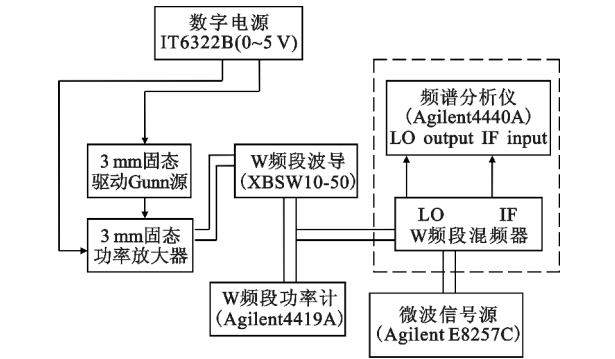


图 7 94 GHz 固态功率放大器输出频率、功率测试框图
Fig. 7 Block diagram of testing the output frequency and output power of 94 GHz solid-state power amplifier

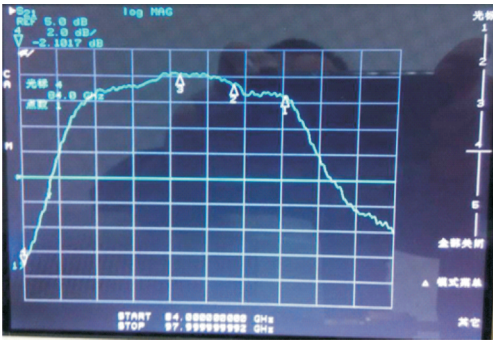


图 8 94 GHz 固态功率放大器频率-增益特性
Fig. 8 The frequency-gain characteristic of 94 GHz solid-state power amplifier

测试 W 频段固态 Gunn 驱动功率源主要技术指标见表 2,94 GHz 固态毫米波源系统主要技术指标性能如表 3 所列。

表 2 W 频段固态 Gunn 驱动功率源测试项目
Tab. 2 Tested items of W-band solid-state Gunn driving source

参数名称	参数测试结果
频率/GHz	90 ~ 95
输出功率/mW	25
效率/%	1
工作电压/V	5
电流/mA	500

表 3 94 GHz 固态毫米波源系统测试项目
Tab. 3 Tested items of 94 GHz solid-state millimeter source

参数名称	参数测试结果
频率/GHz	90 ~ 95
输出功率/mW	320
增益/dB	7 ~ 10
附加效率/%	16
工作电压/V	5/1
电流/mA	15/120
输入/输出	WR-10 波导

根据测试结果,在 90 ~ 95 GHz 频率下,功率放大器线性增益范围 7 ~ 10 dB,其漏级和栅级偏置电压分别为 15 V 和 5 V。功率放大器输出功率在同一偏置电压下,使用固定波导 WR-10 进行测试,其主放大器芯片输出连续波功率典型值可达 400 mW,但由于输入-输出微带波导转换损耗,实测功率值低于其典型值。测试该功率放大器在 95 GHz 频率下输出功率 320 mW,附加效率大于 16%。

4 结 论

经过一年多的研究与实验测试,一种输出连续波功率大于 300 mW 的 W 频段 94 GHz 固态毫米波源已经研制成功。该 W 频段固态毫米波源输出功率放大器芯片使用 0.12 μm GaN 功率 HEMT 工艺技术,对一个 0.05 mm 厚度 GaN 介质基片上进行工艺技术处理的主放大器芯片,在频率 94 GHz 获得了连续波输出功率 320 mW、附加效率大于 16% 的测试结果,符合设计研制预期,使得国产 W 频段功率放大器从芯片设计到放大器自主设计都达到一个新的技术水平。实验过程中可进一步通过改进输入输出微带-波导转换器镀膜工艺减小插损、优化电路及匹配结构,使主放大器连续波输出功率接近主放大器芯片典型功率。这一实验测试结果显示并代表了一种新的输出连续波功率大于 300 mW 的 W 频段 94 GHz 固态毫米波源设计研制成功,同时展示了 W 频段 94 GHz 固态毫米波源设计研制获得了技术突破。

参考文献:

[1] Fujitsu Limited. Fujitsu develops GaN power amplifier with world's highest output performance for W-band wireless transmissions-Fujitsu global [EB/OL]. 2016-01-25 [2016-02-12]. <http://www.fujitsu.com/global/about/resources/news/press-releases/2016/0125-01.html>.

[2] MACDONALD M E, ANDERSON J P, LEE R K, et al. The HUSIR W-band transmitter [J]. Lincoln Laboratory Journal, 2014, 11 (21): 1-2.

[3] SRIVASTAVA A. Particle-in-cell simulation for W-band power combiner multi-beam planar coupled-cavity backward wave oscillator [J]. European Journal of Advances in Engineering and Technology, 2015, 2 (10): 66-69.

[4] REED T B, GRIFFITH Z, ROWELL P, et al. A 180mW InP HBT power amplifier MMIC at 214 GHz [C]//Proceedings of 2013 IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium (CSICS). Monterey, CA: IEEE, 2013: 1-4.

[5] PARK H, DANESGAR S, RODE J C, et al. 30% PAE W-

- band InP power amplifiers using sub-quarter-wavelength baluns for series-connected power-combining [C]//Proceedings of 2013 IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium (CSICS). Monterey, CA: IEEE, 2013:1-4.
- [6] TSAI K J, KUOU J L, WANG H, A W-band power amplifier in 65-nm CMOS with 27 GHz bandwidth and 14.8 dBm saturated output power [C]//Proceedings of 2012 IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium (RFIC). Montreal, QC: IEEE, 2012:69-72.
- [7] ZHAO Y, LONG J R. A wideband, dual-path, millimeter-wave power amplifier with 20 dBm output power and PAE above 15% in 130 nm SiGe-BiCMOS [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2012, 47(9): 1981-1997.
- [8] LUCTENTE M, STALLO C, ROSSI T, et al. Analysis and design of a point-to-point radio-link at W band for future satellite telecommunication experiments [C]//Proceedings of 2011 IEEE Aerospace Conference. Big Sky, MT: IEEE, 2011:1-20.
- [9] MALCA O, DANIELI E, GABAY S, et al. High resolution remote sensing of particles and aerosols in the W-band (92-100 GHz) [C]//Proceedings of 2011 IEEE International Conference on Microwaves, Communications, Antennas and Electronics Systems (COMCAS). Tel Aviv, Israel: IEEE, 2011:1-3.
- [10] BROWN A, CHEN J, HWANG K C, et al. W-band GaN power amplifier MMICs [C]//Proceedings of 2011 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (MTT). Baltimore, MD: IEEE, 2011:1-4.
- [11] MICOVIC M, KURDOGHIAN A, MARGOMENOS A, et al. 92-96 GHz GaN power amplifiers [C]//Proceedings of 2012 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (MTT). Montreal, QC, Canada: IEEE, 2012:1-3.
- [12] GUQ J, XU Z, CHAN M F. Two-way current-combining W-band power amplifier in 65nm CMOS [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory Technology, 2012, 60(5):1365-1374.
- [13] RADISIC V, LEONG K M, MEI X, et al. A 50mW 220GHz power amplifier module [C]//Proceedings of 2010 IEEE MTT-S International Digest. Anaheim, CA: IEEE, 2010:45-48.
- [14] MICOVIC M. W-band GaN MMIC with 842mW output power at 88GHz [C]//Proceedings of 2010 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (MTT). Anaheim, CA: IEEE, 2010:237-239.
- [15] TESSMANN A, HULSMANN W H, HAYDL A, et al. High gain cascode MMICs in coplanar technology at W-band frequencies [J]. IEEE Microwave Guided Wave Letter, 2010, 8(12):430-431.
- [16] DEAL W R. Solid-state amplifiers for terahertz electronics [C]//Proceedings of 2010 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (MTT). Anaheim, CA: IEEE, 2010:1122-1125.

作者简介:



梁勤金(1963—),男,四川蓬溪人,1986年于山东大学获学士学位,现为研究员,主要从事高功率微波产生及应用研究;

LIANG Qinqin was born in Pengxi, Sichuan Province, in 1963. He received the B. S. degree from Shandong University in 1986. He is now a senior engineer of professor. His research concerns high power microwave generating and application.

Email:liang2489623@163.com

石小燕(1971—),女,四川双流人,1996年于四川大学获学士学位,现为高级工程师,主要从事脉冲功率产生及应用研究;

SHI Xiaoyan was born in Shuangliu, Sichuan Province, in 1971. She received the B. S. degree from Sichuan University in 1996. She is now a senior engineer. Her research concerns high power pulse generating and application.

Email:0001sxy@sina.com

潘文武(1975—),男,四川蓬溪人,2002年于燕山大学获硕士学位,现为高级工程师,主要从事机械结构设计及各种力学结构分析。

PAN Wenwu was born in Pengxi, Sichuan Province, in 1975. He received the M. S. degree from Yanshan University in 2002. He is now a senior engineer. His research concerns machine design and mixed mechanical analysis.

Email:2527322@qq.com