

基于 90 nm InP HEMT 工艺的 220 GHz 功率放大器设计

陈艳¹, 孟范忠¹, 方园¹, 张傲^{2*}, 高建军²

(1. 中国电子科技集团公司第十三研究所, 河北 石家庄 050051;
2. 华东师范大学 物理与电子科学学院, 上海 200241)

摘要: 基于 90 nm InP HEMT 工艺, 设计了一款 220 GHz 功率放大器太赫兹单片集成电路, 该放大器采用片上威尔金森功分器结构实现了两路五级共源放大器的功率合成。在片测试结果表明, 200~230 GHz 频率范围内, 功率放大器小信号增益平均值 18 dB。频率为 210~230 GHz 范围内该 MMIC 放大器饱和输出功率优于 15.8 mW, 在 223 GHz 时最高输出功率达到 20.9 mW, 放大器芯片尺寸为 2.18 mm×2.40 mm。

关键词: 砷磷高电子迁移率晶体管(InP HEMT); 功率放大器(PA); 太赫兹集成电路(TMIC)
中图分类号: O43 文献标识码: A

Design of 220 GHz power amplifier based on 90 nm InP HEMT process

CHEN Yan¹, MENG Fan-Zhong¹, FANG Yuan¹, ZHANG Ao^{2*}, GAO Jian-Jun²

(1. The 13th Research Institute, CETC, Shijiazhuang 050051, China;
2. School of Physics and Electronic Science, East China Normal University, Shanghai 200241, China)

Abstract: Based on the 90 nm InP HEMT process, a 220 GHz power amplifier terahertz integrated circuit design (TMIC) is designed. The amplifier adopts the on-chip Wilkinson power divider structure to realize the power synthesis of two-way five stage common-source amplifiers. The on-wafer measurement results show that the average small signal gain of the power amplifier is 18 dB. The power test results show that the saturated output power of the power amplifier is better than 15.8 mW from 210 GHz to 230 GHz, with a maximum output power of 20.9 mW at 223 GHz. The size of the TMIC chip is 2.18 mm×2.40 mm.

Key words: InP high electron mobility transistor (InP HEMT), power amplifier (PA), terahertz integrated circuit (TMIC)

引言

现代电子系统对更高传输速率、更高成像分辨率的需求推动器件向亚毫米波及太赫兹等超高频方向发展。尽管在这些频段可以获得极宽的信号带宽或极高的成像精度,但是大气损耗的显著增加对射频前端输出功率提出了更高的要求。

近年来,随着 InP、GaAs 等半导体器件高频特性的不断开发,国外研究机构开展功率放大器研究取

得了迅速的发展。V. Radisic 等人采用 50 nm InP HEMT 工艺在 217.5~220 GHz 范围内通过八路合成实现了 50 mW 的饱和功率输出和 11.5 dB 以上的小信号增益^[1];该团队采用该放大器单片通过四路空间功率合成的方式,在 210 GHz 获得了 185 mW 的固态功率放大器模块^[2];Y. Campos-Roca 等人采用 35 nm InAlAs/InGaAs 工艺在 200 GHz 获得了 14 mW 饱和功率和 11.4 dB 的功率增益^[3];D. Gritters 等人采用 250 nm InP HBT 工艺在 220~260 GHz 范围内通过

收稿日期: 2022-05-11, 修回日期: 2022-09-02

基金项目: 国家自然科学基金(62034003)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China (62034003)

作者简介(Biography): 陈艳(1987-), 女, 河北石家庄人, 工程师, 主要研究方向为毫米波及亚毫米波单片微波集成电路设计开发
E-mail: 18392406093@163.com

*通讯作者(Corresponding author): E-mail: aozhang@ntu.edu.cn

Received date: 2022-05-11, Revised date: 2022-09-02

片上四路合成结构实现了45 mW以上的功率输出,并采用该单片通过32路空间功率合成的方式,实现了220 GHz频段700 mW固态功率放大器^[4],是当前该频段输出功率最高的固态放大器。

本文基于中国电科十三所标准的毫米波InP HEMT工艺,开发了一款工作频率220 GHz输出功率高于15 mW的功率放大器芯片,论文中详细论述了该功率放大器MMIC的分析、设计与测试结果。

1 工艺与器件

本文采用InP HEMT工艺,器件外延结构包括InP衬底上的 $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ 缓冲层、 $\text{In}_{0.65}\text{Ga}_{0.35}\text{As}$ 沟道层、 $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ 掺杂势垒层以及制作在势垒层上的肖特基接触和最上层的InGaAs帽层等,帽层需要重掺杂,以便与栅极金属形成良好的欧姆接触,减小栅极寄生电阻,改善高频效应^[5]。与参考文献^[5]中有所不同的是,沟道层中In组分由0.53提高到0.65,以提高载流子迁移率,改善器件高频特性。器件制作采用成熟的InP HEMT工艺,并采用SiN完成了器件的表面钝化和平坦化。深亚微米HEMT器件T型栅的制作采用电子束光刻和三层胶工艺,通过优化栅形貌可以得到比较陡直的栅根。图1给出了90 nm工艺T型栅扫描电镜(Scanning Electron Microscopy, SEM)照片,工艺采用背面通孔接地,通孔的腐蚀采用感应耦合等离子体干法腐蚀技术,最后采用5 μm 厚度镀金进行背面金属接地。

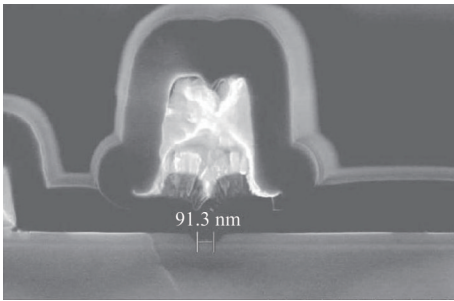


图1 HEMT器件T型栅扫描电镜图片

Fig. 1 Scanning electron microscope picture of the T-gate

功率放大器设计中采用栅宽为 $2\times 25\ \mu\text{m}$ 的HEMT器件,漏极电压为2 V时候的转移特性曲线如图2所示,从图中可以看到其峰值跨导密度为916 mS/mm。图3给出了短路电路增益 H_{21} 和向功率增益U随频率变化曲线,由于器件的在片S参数测试频率范围为1~110 GHz,要获得截止频率和最大振荡频率需要外推。根据20 dB/倍频程进行外推以

后,从图中可以看出截止频率超过200 GHz,而最大振荡频率超过400 GHz。

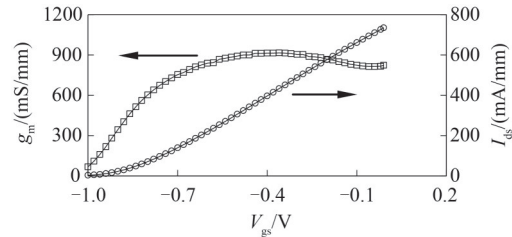


图2 $2\times 25\ \mu\text{m}$ InP HEMT 器件转移特性曲线

Fig. 2 Transfer characteristics of the $2\times 25\ \mu\text{m}$ InP HEMT device

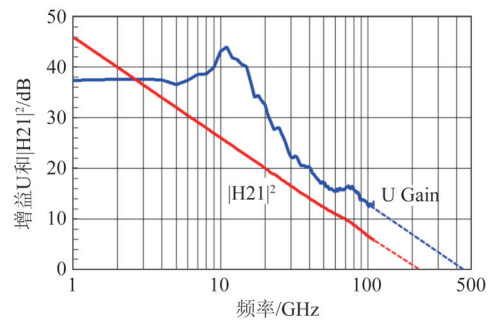


图3 $2\times 25\ \mu\text{m}$ InP HEMT 器件短路电路增益 H_{21} 和向功率增益U随频率变化曲线(偏置: $V_g=-0.4\ \text{V}$, $V_d=2\ \text{V}$)

Fig. 3 Current gain H_{21} and U gain of $2\times 25\ \mu\text{m}$ InP HEMT device (Bias: $V_g=-0.4\ \text{V}$, $V_d=2\ \text{V}$)

2 电路设计

本文设计的功率放大器电路采用共源极放大结构,由于工作频率在太赫兹频段,单级功率增益较低,因此,设计中采用五级共源极器件级联的结构来实现较高的增益和足够的带宽。单级放大器的拓扑结构如图4所示,微带传输线TL1~TL5与隔直电容C1、C2一起构成级间匹配网络,传输线为高低阻抗线,与隔直电容一起将每级放大器匹配到最佳工作状态,隔直电容采用MIM电容,设计中采用 $20\ \mu\text{m}\times 20\ \mu\text{m}$ 电容,并将其电磁场模型将纳入到阻抗匹配网络中^[6-12];栅极和漏极直流偏置枝节为 $\lambda/4$ 微带线与扇形节的组合,同时采用R-C(R2与C3、R4与C4)电路,C3与C4的尺寸采用 $100\ \mu\text{m}\times 100\ \mu\text{m}$ 电容,R2与R4为 $25\ \mu\text{m}\times 50\ \mu\text{m}$ 的薄膜电阻,实现直流供电端引入的低频分量,提高放大器电路的低频供电稳定性。

偏置电路是单片电路的重要部分,合适的偏置网络设计是电路能达到恒流、稳压、防止振荡的关键。在设计偏置网络时,加入 $\lambda/4$ 阻抗线、并联RC

网络、串联电阻使电路达到通直流、阻高频、提高稳定性的效果。这里四分之一波长微带线用于射频旁路,以将偏置电路与射频匹配网络隔离,在栅极和漏极偏置中互连大型去耦电容,以抑制不需要的偏置反馈并增强带外稳定性。四分之一波长线与扇形节的组合主要为更好的实现射频匹配网络与偏置电路的隔离,提高扼流效果。

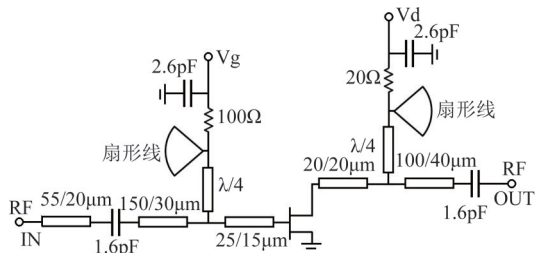


图4 单级共源极放大器结构

Fig. 4 Single stage common source amplifier

本设计中采用两路片上功率合成的方式,单路末级器件栅宽 $50 \mu\text{m}$,两路总栅宽 $100 \mu\text{m}$ 。片上功率分配和合成电路的形式有很多,常用的有威尔金森结构和兰格耦合器结构等,前者为同相合成器,可以在较宽的频带内获得较好的合成效率,对幅度和相位误差要求较小;后者为正交合成器,较多应用于平衡式放大结构中,可在实现功率合成的同时,对端口回波损耗起到较好的改善作用。

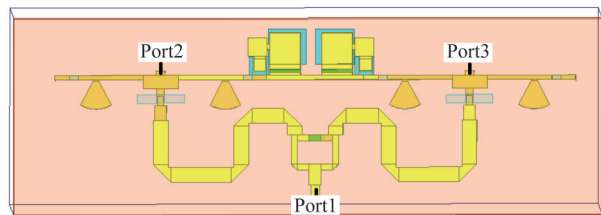


图5 威尔金森功分器版图

Fig. 5 The Wilkinson power divider layout

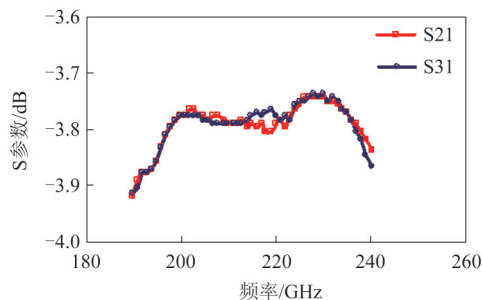


图6 功分器仿真曲线

Fig. 6 Simulation curve of the power divider

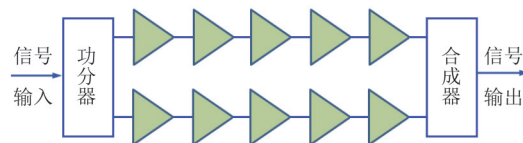


图7 功率放大器原理图

Fig. 7 Schematic diagram of the PA

考虑到兰格耦合器在实现时需要空气桥实现带线之间的跨接,在220 GHz频段,空气桥的特性会对耦合器的幅度和相位产生较大影响,而受工艺加工限制,空气桥极限长度、宽度和高度等尺寸难以达到最优化,且器件精确建模难度较大,这些因素给兰格耦合电路的设计精度带来了极大的不确定性,因此,本设计中采用更易加工和建模的威尔金森结构。采用三维电磁场仿真软件对威尔金森功分/合成器进行了设计和仿真,其中,输入功分器的三维模型如图5所示。除了功分器主体结构外,还同时对功率放大器第一级栅极射频匹配网络以及两者之间的过渡转弯带线等进行了一体设计,模型中,三个射频端口均采用集总端口模型,其中,Port1端口特征阻抗设置为 50Ω ,Port2和Port3端口阻抗设置为第一级放大器器件栅极输入阻抗的复共轭阻抗。仿真结果如图6所示。可见,该功分电路在190~240 GHz内插损约0.8~1 dB,考虑到工作频率较高,该结果在设计上是可以接受的。

由于单级放大器在220 GHz频段的增益小于5 dB,为了设计功率增益高于20 dB的功率放大器,电路采用5级级联放大,末级采用功率合成器进行功率合成。多级级联技术的应用能够提高功率放大器的增益,输出匹配应该起到功率传输最大化的目的,依据所提出的输出功率指标来选择合适的晶体管规格,完成输出匹配设计后再根据输出功率和功率附加效率进行输入匹配的设计,如此逐级往前设计。提高输出功率最为有效的方法是利用功率合成和功率分配技术将多路功率单元并联输出,使得输出功率同相叠加,电路拓扑采用对称结构,最终实现的功率放大器整体结构如图7所示。

图8给出了放大器第一级至第五级的增益随频率变化曲线,从图中可以看到,每一级增益在频带内均比较平坦,但是第一级和第二级增益在高频有所下降,那么需要在第三级和第四级电路考虑高频补偿,以期获得较大的3 dB带宽。图9给出了输出功率随输入功率的仿真变化曲线,从图中可以看出,1 dB压缩点可以达到8 dBm。

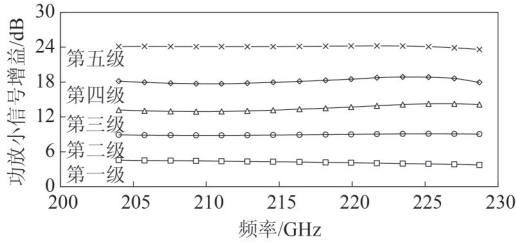


图8 单路放大器增益仿真曲线
Fig. 8 Single-channel amplifier gain simulation curve

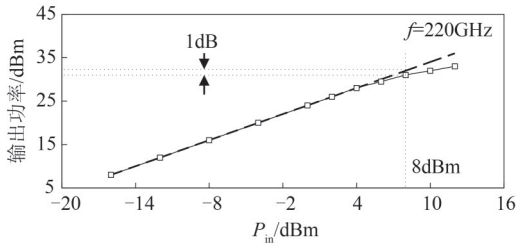


图9 输出功率随输入功率变化曲线
Fig. 9 Output power versus input power

3 电路测试与分析

本文设计的功率放大器 MMIC 采用标准的毫米波 InP HEMT 工艺制作,该工艺为两层金属布线,可以实现 MIM 电容和片式膜电阻 TFR 等无源元件,采用通孔工艺和背面镀金工艺实现良好接地。220 GHz 功率放大器 MMIC 的参数测试包括 S 参数测试和功率测试,均是通过在片测试得到的。图 10 给出了功率放大器 TMIC 显微镜照片,放大器芯片尺寸为 2.18 mm×2.40 mm。

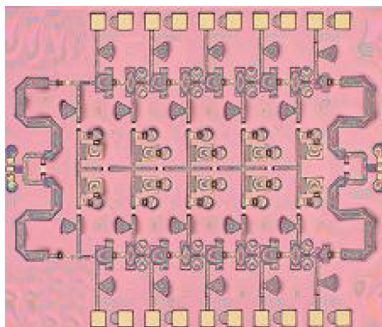


图10 功率放大器 TMIC 照片
Fig. 10 Photograph of the PA MMIC

S 参数在片测试系统包括矢量网络分析仪、170~260 GHz 频率扩展模块和直流电源等,S 参数测试曲线如图 11 所示。在偏置条件为 $V_{ds}=2\text{ V}$, $I_{ds}=254\text{ mA}$ 时,该放大器可以在 230 GHz 以内获得 15 dB 以上的增益,在 210~230 GHz 增益平坦度较好。

片上功率测试系统包括低频信号源、倍频扩展

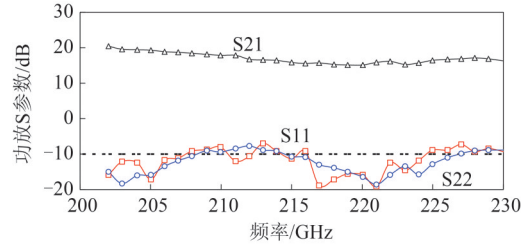


图11 220 GHz 功率放大器 S 参数测试曲线
Fig. 11 Measurement and simulation results for S-parameters of the 220 GHz PA MMIC

模块、推动放大器、功率计和直流电源等,测试系统框图如图 12 所示,图中省略了待测件前后的波导-探针转换。220 GHz 功率放大器输出功率和附加功率效率测试和模拟曲线如图 13 所示,受限于所采用的推动放大器的工作频率,实测频率范围为 210~230GHz,在输入功率为 3 dBm 时,该放大器可以在测试频率范围内获得 12 dBm (约 15.8 mW) 以上的饱和输出功率,在 223 GHz 获得最高输出功率为 13.2 dBm (约 20.9 mW)。功率实测数据与仿真数据相比有所恶化(2~3 dBm),原因可能在于放大器的大信号仿真误差。后续可对器件大信号模型进行进一步修正,以提高设计准确度。

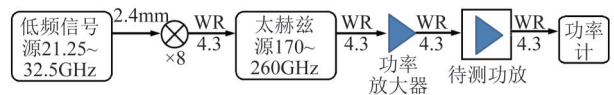


图12 功率测试系统
Fig. 12 Power measurement diagram

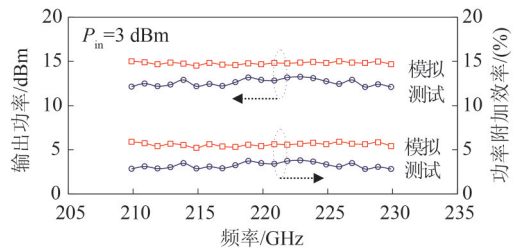


图13 220 GHz 功率放大器输出功率和附加功率效率测试和模拟曲线
Fig. 13 Measurement and simulation results for the saturated output power of the 220 GHz PA MMIC

表 1 总结了 220 GHz 频段功率放大器特性并进行了比较,从表中可以看到要想取得更高的增益,需要增加级联的放大级的数量,否则增益过低^[7];以及采用异质晶体管也是一个很好的选择,可以提高增益。在基于 InP HEMT 工艺的放大器设计中,本文采用工艺为 90 nm,而国际上一般采用 50 nm 以

表 1 220 GHz 频段功率放大器特性比较

Table I Comparison of performance of 220 GHz power amplifier

工艺	频率/GHz	BW /GHz	增益/dB	P_{out} /dBm	P_{1dB} /dBm	PAE /(%)	面积/mm ²	参考文献
50 nm InP HEMT	215	10	16	22	18*	3.7	1.84	[2]
35 nm MHEMT	200	15	16	14	-3	1.9	2.5	[3]
250 nm InP HBT	220	20	33	80	6*	3.8	1.54	[4]
100 nm MHEMT	200	26	12	7.4	-2	2.5	2.25	[7]
35 nm MHEMT	190	20	20	10.2	-7	3.9	1.88	[8]
50 nm MHEMT	220	20	24	7.5	-12	NA	1.87	[9]
250 nm InP HBT	214	19	22	22	2	1.3	5.57	[10]
90nm InP HEMT	220	20	18	21	8*	3.7	5.23	本文

* 仿真数据

下,虽然牺牲了芯片面积,但是成本变低而且功率附加效率保持在一个较高的水平上。值得注意的是效率和线性度是功率放大器的重要性能指标,由于在片测试平台在 220 GHz 的功率输出功率范围不足,因此效率和线性度随输入功率的测试曲线无法提供,在对比表格中共仅仅提供了仿真数据。

4 结论

本文基于标准的 InP HEMT 工艺,设计开发了一款 220 GHz 功率放大器 TMIC,该电路采用了两路合成和多级级联的拓扑结构。实测结果表明,其可以在 190~230 GHz 范围内获得 15 dB 以上的线性增益,在 210~230 GHz 范围内饱和输出功率高于 12 dBm。

References

- [1] Radisic V, Leong K M K H, Mei X B, *et al.* A 50 mW 220 GHz power amplifier module [C]. IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig., 2010:45-48.
- [2] Radisic V. 220-GHz solid-state power amplifier modules [J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2012, **47**(10): 2291-2297.
- [3] Campos-Roca Y. A 200 GHz medium power amplifier MMIC in cascode metamorphic HEMT technology [J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2014, **24**(11):787-789.
- [4] Gritters D, Brown K, Ko E, *et al.* 200~260 GHz solid state amplifier with 700 mw of output power [C]. IEEE MTT-S Int. Microw. Symp., 2015:1-3.
- [5] FENG Wei, LIU Ru-Qing, HU Zhi-Fu, *et al.* W-Band InP HEMT MMIC power amplifier [J]. *Semiconductor Technology* (冯威,刘如青,胡志富,等. W 波段 InP HEMT MMIC 功率放大器. *半导体技术*), 2016, **41**(4): 267-275.
- [6] Matsumura H, Shiba S, Sato M, *et al.* 250~290 GHz Amplifier in 75-nm InP HEMT technology using inverted microstrip transmission line [C]. International Conference on Indium Phosphide and Related Materials, 2013:1-2.
- [7] Kallfass I, Pahl P, Massler H, *et al.* A 200-GHz monolithic integrated power amplifier in metamorphic HEMT technology [J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2009, **19**(6):410-412.
- [8] Campos-Roca Y, Tessmann A, Hurm V, *et al.* A G-band cascode MHEMT medium power amplifier [C]. IEEE International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2013:1-2.
- [9] Laengst J, Diebold S, Massler H, *et al.* Balanced medium power amplifier MMICs from 200 to 270 GHz [C]. IEEE International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2013:1-3.
- [10] Reed T B, Griffith Z, Rowell P, *et al.* A 180-mW InP HBT power amplifier MMIC at 214-GHz [C]. IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium, 2013:1-4.