

文章编号: 2095-4980(2019)01-0169-05

31~38 GHz 宽带高效率 GaAs 中功率放大器芯片

韩 芹, 刘永强, 刘会东, 魏洪涛

(中国电子科技集团有限公司 第十三研究所, 河北 石家庄 050051)

摘 要: 为实现毫米波放大器芯片的宽带、高增益和高效率, 基于 GaAs pHEMT 工艺实现高增益, 采用四级级联拓扑结构拓展带宽, 利用电流复用结构降低直流功耗, 采用 T 型电抗匹配技术实现最佳输出功率和效率匹配, 成功实现了一款 31~38 GHz 频段的毫米波宽带高效率功率放大器芯片。测试结果表明, 该功率放大器芯片在 31~38 GHz 宽带范围内, 线性增益为 26~29 dB, 饱和输出功率为 21.5 dBm, 动态电流低于 100 mA, 饱和效率 $\geq 37\%$, 在 32~35 GHz 内最高效率达 45%。

关键词: 功率放大器; 毫米波; 砷化镓; 宽带; 高效率; 单片集成电路

中图分类号: TN43

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201901.0169

31–38 GHz broadband high efficiency GaAs medium power amplifier MMIC

HAN Qin, LIU Yongqiang, LIU Huidong, WEI Hongtao

(The 13th Research Institute of CETC, Shijiazhuang Hebei 050051, China)

Abstract: In order to achieve broadband millimeter-wave amplifier with high gain and efficiency, GaAs pHEMT technology is employed for obtaining high gain; four-stage circuit topology is utilized for expanding bandwidth; current reuse technology is adopted for reducing DC power consumption; and reactance matching technology is implemented for optimizing output power and efficiency. As result, 31–38 GHz GaAs medium power amplifier Monolithic Microwave Integrated Circuit(MMIC) is successfully realized with broadband and high efficiency. In the frequency form 31 GHz to 38 GHz, the test results show excellent performances with 26–29 dB gain, 21.5 dBm output power, more than 37% Power Added Efficiency(PAE) and only 100 mA dynamic current. Especially, the efficiency of power amplifier has reached 45% at frequency from 32 GHz to 35 GHz.

Keywords: power amplifier; millimeter wave; GaAs; broadband; high efficiency; Monolithic Microwave Integrated Circuit

随着单片微波集成电路(MMIC)技术的飞速发展, MMIC 逐渐向宽带、高频率、高性能方向发展。毫米波功率放大器单片具有性能好、集成度高、可靠性高等特点, 是雷达、无线通信、微波测量等系统的关键器件。尤其是近年来高速、大容量无线通信系统的技术发展, 使得 30 GHz 以上毫米波频段高性能放大器芯片研制变得日益重要。

目前, 对于宽带毫米波功率放大器, 效率较高($\geq 30\%$)的 Ka 波段功率放大器研究多基于 GaN HEMT 工艺。这些 Ka 波段 GaN 功率放大器, 尽管输出功率较大(1 W 以上), 但增益较低, 功率附加效率一般低于 35%^[1–4]。如 S Chen 等设计的 2 种 Ka 波段放大器: 一种两级放大器电路在 32~38 GHz 时, 小信号增益 17.5 dB, 输出功率 5 W, 功率附加效率 25%~34%; 另一种放大器采用平衡式合成技术, 小信号增益 25 dB, 输出功率 10 W, 功率附加效率 30%~35%。基于 GaAs pHEMT 工艺的宽带放大器, 国内外研究多集中在低噪声放大器, 如王雨桐等研制的 25~45 GHz 宽带 MMIC 低噪声放大器^[5]。而基于 GaAs pHEMT 工艺的现有 Ka 波段功率放大器, 主要不足体现在带宽较窄、增益较低(基本低于 20 dB)或是效率较低(基本低于 35%)^[6–10]。如 D P Nguyen 等设计的放大器在 26~31 GHz 范围内增益仅为 17 dB, 功率附加效率不足 33%。目前, 效率高于 40% 的 Ka 波段宽带高增益中功率放大器芯片还未有报道。该类放大器的研制难点在于: 一方面频率越高时, 晶体管的最大增益越低, 导致放大器的增益越低; 另一方面带宽增加时, 放大器的效率会随之变差。因此, 很难实现宽带、高增益和高效率的同时兼顾。

本文基于 GaAs pHEMT 工艺, 采用四级级联电抗匹配拓扑结构及电流复用技术设计了一款高性能的 31~

38 GHz 宽带高效率中功率放大器单片。该芯片频段宽, 线性增益高, 饱和输出功率大, 动态电流小, 饱和效率达到现有公开报道最高, 为今后其他 Ka 波段功率放大器芯片设计提供了有益借鉴。

1 器件特性

设计的放大器芯片采用 GaAs pHEMT 工艺实现。该工艺采用电子束三层胶工艺制作 T 型栅, 利用干法刻蚀和湿法腐蚀相结合实现双凹槽栅结构。所开发器件具有击穿电压高、频率高、增益高、噪声小及效率高等特点^[11]。表 1 为该工艺的 $8\ \mu\text{m} \times 45\ \mu\text{m}$ 晶体管在 $U_d=4\ \text{V}$, $U_g=-0.5\ \text{V}$ 偏置电压下最大输出功率和最佳效率指标。表中 $P_{\text{sat_max}}$ 为最大饱和输出功率, PAE_{max} 为最大功率附加效率, $P_{\text{sat_max}@PAE_{\text{max}}}$ 表示实现最大功率附加效率时的最大饱和输出功率。

晶体管器件最大可用增益(Maximum Available Gain, MAG)随频率的提高而降低。在 Ka 波段, 单个器件增益降低更多, 如 $4\ \mu\text{m} \times 50\ \mu\text{m}$ 晶体管在 35 GHz 的 MAG 仅为 9.7 dB, 见图 1。器件的这种特性也正是高频段高增益功率放大器电路设计难点。

2 电路设计

2.1 电路拓扑结构

毫米波功率放大器需要根据增益指标和带宽要求确定功率放大器采用的级联数目和拓扑结构^[12]。根据研制目标和器件增益特性, 同时考虑到输入输出匹配和级间匹配网络的损耗, 采用四级级联结构来实现所需的增益及带宽, 如图 2 所示。四级级联结构能够提供更高的增益以及更宽的带宽, 但同时由于晶体管数目的增加, 消耗在晶体管上的静态功耗也会增加, 同时电路匹配结构更加复杂, 导致功率附加效率严重下降, 从而使整体功率放大器性能下降。因此, 匹配设计优化及关键参数设计对最终电路性能至关重要。

2.2 最佳功率与效率匹配设计

2.2.1 基本原理

晶体管传送到负载的功率 P_L 为^[13]:

$$P_L = \frac{|U_S|^2}{8Z_0} \times \frac{|S_{21}|^2(1-|\Gamma_L|^2)|1-\Gamma_S|^2}{|1-S_{22}\Gamma_L|^2|1-\Gamma_S\Gamma_{in}|^2} \quad (1)$$

$$\Gamma_{in} = S_{11} + \frac{S_{12}S_{21}\Gamma_L}{1-S_{22}\Gamma_L} \quad (2)$$

$$\Gamma_{out} = S_{22} + \frac{S_{12}S_{21}\Gamma_S}{1-S_{11}\Gamma_S} \quad (3)$$

式中: U_S 为源电压, 它与输入或负载阻抗无关; S_{11} 和 S_{22} 为晶体管的散射函数; Z_0 为特征阻抗; Γ_S 为从输入匹配网络看进去的源反射系数; Γ_L 为从输出匹配网络看进去的反射系数; Γ_{in} 为晶体管输入端的反射系数; Γ_{out} 为晶体管输出端的反射系数。将式(2)和式(3)代入式(1), 可推算得:

$$P_L = \frac{|U_S|^2}{8Z_0} \times \frac{|S_{21}|^2|1-\Gamma_S|^2}{|1-S_{11}\Gamma_S|^2} \times \frac{(1-|\Gamma_L|^2)}{|1-\Gamma_L\Gamma_{out}|^2} \quad (4)$$

当 $\Gamma_L = \Gamma_{out}^*$ 时, 由式(4)可得此时传送到负载的功率 P_L 达到最大, 最大功率 P_{avn} 为:

$$P_{\text{avn}} = \frac{|U_S|^2}{8Z_0} \times \frac{|S_{21}|^2(1-|\Gamma_S|^2)}{|1-S_{11}\Gamma_S|^2(1-|\Gamma_{out}|^2)} \quad (5)$$

由以上分析可知, 为得到最佳的输出功率, 需尽量将输出匹配网络与晶体管的输出端反射系数进行共轭匹配。

表 1 $8\ \mu\text{m} \times 45\ \mu\text{m}$ 晶体管性能指标

Table 1 Test performance indexes of $8\ \mu\text{m} \times 45\ \mu\text{m}$ device

indexes	$f=35\ \text{GHz}$		
	$P_{\text{sat_max}}/\text{dBm}$	$PAE_{\text{max}}/\%$	$P_{\text{sat_max}@PAE_{\text{max}}}/\text{dBm}$
indexes	25.9	61	24.5

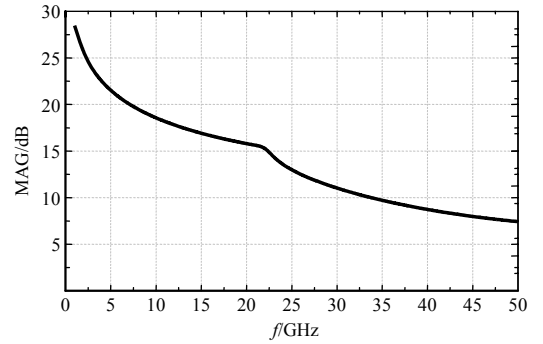


Fig. 1 MAG of the $4\ \mu\text{m} \times 50\ \mu\text{m}$ pHEMT

图 1 $4\ \mu\text{m} \times 50\ \mu\text{m}$ 晶体管最大可用增益

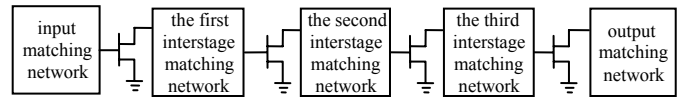


Fig. 2 Schematic diagram of 31~38 GHz power amplifier

图 2 31~38 GHz 功率放大器原理框图

由于晶体管的最大输出功率对应的阻抗点与最佳功率附加效率对应的阻抗点不一致,设计时需要综合输出功率和功率附加效率指标折中考虑。功率放大器的 PAE 为^[13]:

$$PAE = \frac{P_L - P_m}{P_{DC}} = \left(1 - \frac{1}{G}\right) \frac{P_L}{P_{DC}} \quad (6)$$

式中: G 为放大器的功率增益; P_{DC} 为放大器的直流功耗。由式(6)可知,要得到较高的 PAE,需使放大器输出尽量大的输出功率 P_L ,同时需要提高放大器的功率增益,降低直流功耗。

2.2.2 设计实现

电路设计中,对末级 $8\ \mu\text{m} \times 45\ \mu\text{m}$ 器件采用负载牵引方法仿真出等输出功率圆和等功率附加效率圆,得到器件的最大功率附加效率点对应的输出阻抗,如图 3 所示。综合输出功率要求和功率附加效率要求,选取输出功率和附加效率最佳的阻抗点,如图 3 中 m_1 点,采用 T 型电抗匹配网络,将该阻抗点匹配至最佳负载阻抗,以得到最大输出功率和功率附加效率。由于该功率放大器频率高,设计中 T 型匹配网络采用微带线短截线、电容及并联短截线的形式实现。

四级级联放大器能够提供较高的增益以及较宽的带宽,但会带来更多的直流功耗。由式(6)可知,为了实现最佳效率,电路设计时在保证输出功率的基础上,需要尽量降低直流功耗,本文主要从以下两方面考虑:

1) 选取合适的前后级晶体管总栅宽比,在保证前级能够推动后级的前提下,避免前级直流电流偏大,造成功耗浪费。通过对比分析,电路选取四级栅宽比为 1:1:1.6:3.6。

2) 优化电路拓扑结构,降低前三级电路的总功耗。第三级电路的输出端采用功率匹配,以确保推动末级电路;而第一级和第二级电路则采用电流复用结构,使两级晶体管串联工作,每级晶体管工作在 $1/2$ 倍漏压下,电流与单级电路相同,这样前两级电路功耗降为原来的 $1/2$ ^[14],从而降低整体电路直流功耗,提高电路整体效率。

为获得低的反射损耗,输入端匹配网络应与信号源实现共轭匹配。级间匹配网络采用电抗匹配,电抗匹配不引入电阻,能够减小电路损耗,减小增益波动,增加输出功率和效率。

2.3 稳定性设计

功率放大器设计中,稳定性设计至关重要。在多级放大器中,一个晶体管可能给另一个晶体管提供负电阻,因此随着功率放大器级数的增加,电路自激也可能会增加。尤其是低频段,晶体管增益较高,功率放大器更容易产生不稳定问题。为提高低频段稳定性,前三级电路栅极前串联 RC 并联网络,通过调节电阻和电容,使该网络在中心频率阻值较小、低频段阻值增大,从而降低电路在低频段的增益,保证低频稳定。栅极偏置采用有耗匹配,如图 4 所示。有耗匹配由电阻器和高特征阻抗的短截线串联组成,在低频段,短截线电抗较小,电阻加载晶体管降低了增益,提高低频稳定性;在高频段,短截线具有高阻抗,电阻对晶体管的影响很小^[15]。同时,栅极和漏极偏置电路采用并联小电容,进行带内去耦;并采用并联大电容加电阻接地,消除低频增益。

此外,采用孤立通孔单独接地方式进行设计。因为当 2 个元件共用一个通孔接地时,通孔自身的电感量有可能使 2 个元件发生不希望的耦合作用。尤其是前后级共通孔接地时,会在前后级间形成反馈路径,信号在该路径中不断放大,导致电路不稳定。同时,将第三级漏偏置电路和第四级漏偏置电路分开加电,避免前后级网络间的“耦合”反馈导致的电路不稳定。通过上述措施,保证了功率放大器电路的稳定性。

3 研制结果

图 5 为本文设计的 31~38 GHz 宽带高效率中功率放大器电路图。图 6 为所研制的芯片实物照片,芯片尺寸为 $2.80\ \text{mm} \times 1.17\ \text{mm}$ 。

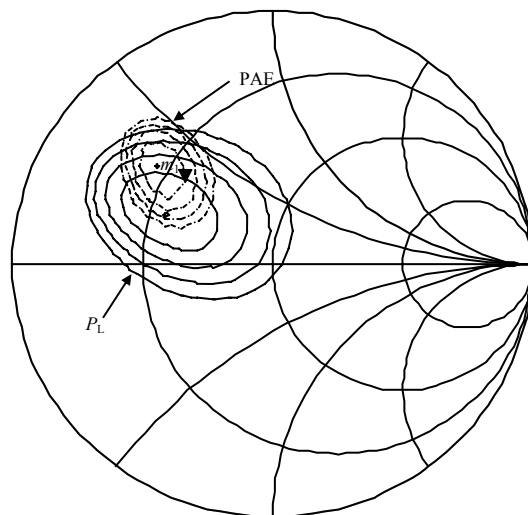


Fig.3 Loadpull simulation result of $8\ \mu\text{m} \times 45\ \mu\text{m}$ devices

图 3 $8\ \mu\text{m} \times 45\ \mu\text{m}$ 器件负载牵引仿真结果

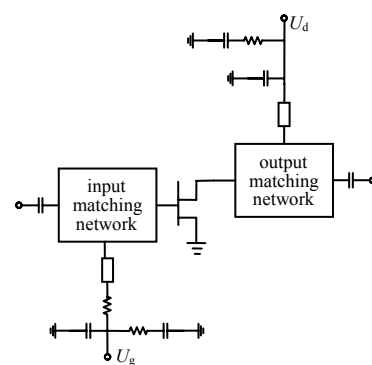


Fig.4 Schematic of the bias circuit

图 4 偏置电路拓扑结构

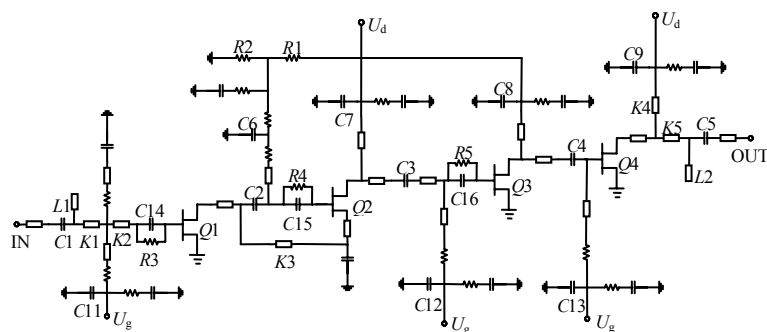


Fig.5 Circuit diagram of the 31~38 GHz power amplifier

图 5 31~38 GHz 功率放大器电路图

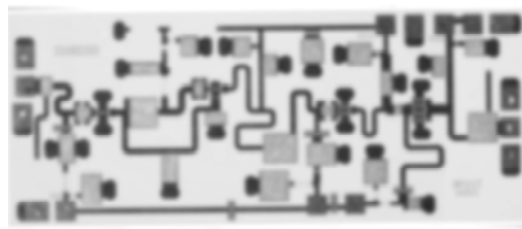


Fig.6 Photograph of the 31~38 GHz power amplifier MMIC

图 6 31~38 GHz 功率放大器电路芯片照片

图 7 为 31~38 GHz 宽带高效率中功率放大器的性能测试曲线。芯片测试条件为 $U_d=4$ V, $U_g=-0.5$ V, 连续波测试。从测试曲线可以看出, 在 31~38 GHz 频带范围内, 增益约为 26~29 dB, 饱和输出功率为 21.5 dBm, 动态电流低于 100 mA, 功率附加效率 $\geq 37\%$ 。在 32~35 GHz 内, 功率附加效率达 44%~45%。测试与仿真误差主要来源于较高频段器件模型的误差、元件之间不连续性造成的测量与建模的误差, 以及探针的寄生参数等带来的测试误差。

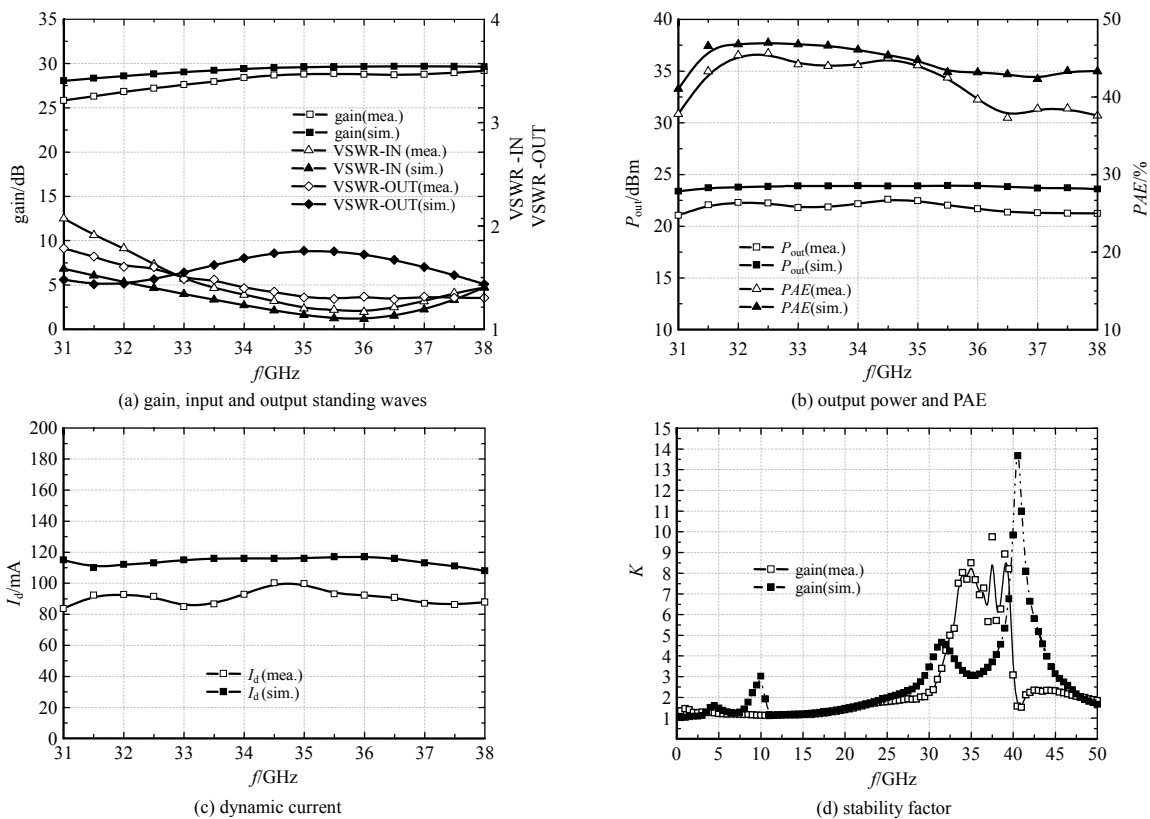


Fig.7 Performance curves of the 31~38 GHz power amplifier(meas. & sim.)

图 7 31~38 GHz 功率放大器性能曲线(测试&模拟)

4 结论

本文基于 GaAs pHEMT 工艺, 利用四级级联电抗匹配拓扑结构拓展带宽, 前两级采用电流复用结构降低了直流功耗, 采用 T 型电抗匹配技术实现最佳输出功率和效率匹配, 成功研制了一款 31~38 GHz 宽带高效率中功率放大器。该放大器芯片具有增益高、频段宽、效率高等特点。在 31~38 GHz 的频率范围内, 线性增益为 26~29 dB, 饱和输出功率为 21.5 dBm, 动态电流低于 100 mA, 饱和效率 $\geq 37\%$, 最高效率达 45%。

参考文献:

- [1] CHEN S, NAYAK S, CAMPBELL C, et al. High efficiency 5 W/10 W 32~38 GHz power amplifier MMICs utilizing advanced

- 0.15 μm GaN HEMT technology[C]// 2016 IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium(CSICS). Austin, TX, USA:IEEE, 2016:1-4.
- [2] 杜鹏博,徐伟,王生国,等. Ka 波段 GaN HEMT 大功率、高效率放大器 MMIC[J]. 半导体技术, 2013,38(5):338-341. (DU Pengbo,XU Wei,WANG Shengguo,et al. Ka-band GaN HEMT high power high efficiency power amplifier MMIC[J]. Semiconductor Technology, 2013,38(5):338-341.)
- [3] DIN S,WOJTOWICZ M,SIDDIQUI M. High power and high efficiency Ka band power amplifier[C]// IEEE International Microwave Symposium. Phoenix,USA:IEEE, 2015:1-4.
- [4] CAMPBELL C F,LIU Y,KAO M Y,et al. High efficiency Ka-band gallium nitride power amplifier MMICs[C]// IEEE International Conference on Microwaves. Tel Aviv,Israel:IEEE, 2013:1-5.
- [5] 王雨桐,吴洪江,刘永强. 一款 25~45 GHz 带宽 MMIC 低噪声放大器[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2017,15(3):446-449. (WANG Yutong,WU Hongjiang,LIU Yongqiang. A 25-45 GHz wideband MMIC Low Noise Amplifier[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2017,15(3):446-449.)
- [6] NGUYEN D P,PHAM A. An ultra compact Watt-level Ka-band stacked-FET power amplifier[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2016,26(7):516-518.
- [7] CURTIS J,PHAM A,ARYANFAR F. Ka-band Doherty power amplifier with 26.9 dBm output power,42% peak PAE and 32% back-off PAE using GaAs PHEMT[J]. Microwaves, Antennas & Propagation, 2016,10(10):1101-1105.
- [8] 李彩红. 一种 Ka 波段 PHEMT 单片集成功率放大器设计[J]. 现代电子技术, 2013,36(4):127-129. (LI Caihong. Design of novel Ka-band PHEMT monolithic integrated power amplifier[J]. Modern Electronics Technology, 2013,36(4):127-129.)
- [9] COLOMB F Y,PLATZKER A. 2 and 4 Watt Ka-band GaAs PHEMT power amplifier MMICs[C]// IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. Philadelphia,PA,USA:IEEE, 2003:843-846.
- [10] CAMPBELL C F,DUMKA D C,KAO M Y,et al. High efficiency Ka-band power amplifier MMIC utilizing a high voltage dual field plate GaAs PHEMT process[C]// IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium. Waikoloa,USA: IEEE, 2011:12-14.
- [11] 孙希国,刘如青,刘永强,等. 90 nm T 型栅工艺在高频 GaAs PHEMT MMIC 中的应用[J]. 半导体制造技术, 2015,40(8):611-615. (SUN Xiguo,LIU Ruqing,LIU Yongqiang,et al. Application of 90 nm T-Gate process in high frequency GaAs PHEMT MMIC[J]. Semiconductor Technology, 2016,40(8):611-615.)
- [12] 高建军. 场效应晶体管射频微波建模技术[M]. 北京:电子工业出版社, 2007. (GAO Jianjun. Modeling technology of RF and microwave FET[M]. Beijing:Publishing House of Electronics Industry, 2007.)
- [13] POZAR D M. 微波工程[M]. 张肇仪,周乐柱,吴德明,等,译. 北京:电子工业出版社, 2008. (POZAR D M. Microwave engineering[M]. Translated by ZHANG Zhaoyi,ZHOU Lezhu,WU Deming,et al. Beijing:Publishing House of Electronics Industry, 2008.)
- [14] 郑远,吴键,艾萱. 采用电流复用技术的 8 mm 频段低噪声放大器[J]. 固体电子学研究与进展, 2013,35(2):124-129. (ZHENG Yuan,WU Jian,AI Xuan. An 8 mm band low noise amplifier using current reuse technology[J]. Research & Progress of SSE, 2013,33(2):124-129.)
- [15] ROBERTSON I,LUCYSZYN S. 单片射频微波集成电路技术与设计[M]. 文光俊,李家胤,译. 北京:电子工业出版社, 2007. (ROBERTSON I,LUCYSZYN S. RFIC and MMIC design and technology[M]. Translated by WEN Guangjun,LI Jiayin. Beijing:Publishing House of Electronics Industry, 2007.)

作者简介:



韩 芹(1982-),女,河北省高碑店市人,工程师,主要研究方向为微波单片集成电路设计.
email:hanqin1998@163.com.

刘永强(1979-),男,河北省肃宁县人,高级工程师,主要研究方向为微波单片集成电路设计.

刘会东(1982-),男,吉林省四平市人,高级工程师,主要研究方向为微波单片集成电路设计.

魏洪涛(1979-),男,辽宁省阜新市人,高级工程师,主要研究方向为微波单片集成电路设计.