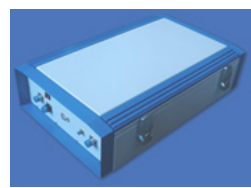
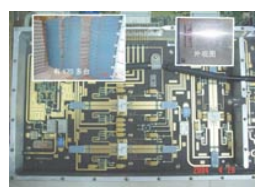


北京琅拓科电子设备有限公司

射频室技术文档 RF0907004

- 功率放大器芯片
- 功率放大器模块
- 功率放大器整机
- 功率放大器测试组件



地址：北京市海淀区中关村南三街8号（中国科学院基础科学园区）
传真：010-82640385
电话：010-82640385
企业邮箱：service@lottak.com
网址：http://www.lottak.com



AlGaIn/GaN HEMT 功率放大器设计

林锡贵, 郝跃, 冯倩, 张进城

(西安电子科技大学微电子研究所, 宽禁带半导体材料与器件教育部重点实验室,
西安 710071)

摘要: 在小信号 S 参数不适于微波功率放大器的设计而大信号 S 参数不易获得的情况下, 利用 ADS 软件, 采用负载牵引法和输入端共轭匹配, 成功的设计出 AlGaIn/GaN HEMT 微波功率放大器。为了解决晶体管端口出现负阻的问题, 设计了输入输出端并联电阻和反馈网络两种方法, 最后得到理想的结果为: 工作绝对稳定, 带宽 3.6GHz~8.0GHz, 最高增益 11.04dB, 最大输出功率 33dBm, 最大 PAE 达到 29.2%, 电压驻波比较小。

关键词: 高电子迁移率场效应晶体管; 功率放大器; ADS 负载牵引; 共轭匹配

中图分类号: TN386; TN722.7*5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-353X(2006)01-0052-04

Design of AlGaIn/GaN HEMT Power Amplifier

LIN Xi-gui, HAO Yue, FENG Qian, Zhang Jin-cheng

(Key Lab of Ministry of Education for Wide Gap Semiconductor Materials and Devices, Institute of Microelectronics, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: An AlGaIn/GaN HEMT microwave power amplifier was designed successfully by load-pull method and conjugate match in input port using ADS, when small-signal S -parameters can't be used for design of microwave power amplifier and large-signal S -parameters were difficult to achieve. For the stability of the circuit, a comparison between shunt resistors method and feedback method was shown. Perfect results of 11.04dB gain, 33dBm output power and 29.2% PAE at 3.6GHz~8.0GHz bandwidth were achieved.

Key words: HEMT; power amplifier; ADS load-pull; conjugate match

1 引言

微波功率放大器是微波通信系统、广播电视发射、雷达、导航系统的核心部件之一。在所有微波发射系统中, 都需要功率放大器将信号放大到足够的功率电平, 以实现信号的发射, 实现信号的远距离传输和保障可靠的接收, 因此功率放大器是制约系统性能和技术水平的关键部件。

GaN 由于具有较宽的禁带宽度、较高的击穿电场和较高的电子饱和速率, 使得 AlGaIn/GaN HEMT

(高电子迁移率晶体管) 在微波波段的大功率、高频率、低噪声性能方面超过 GaAs 基 HEMT 和 InP 基 HEMT。据报道^[1], AlGaIn/GaN HEMT 的截止频率 f_T 和最高振荡频率 f_{max} 分别可达到 121 GHz 和 162GHz。在 8GHz 下, 连续波 (CW) 功率密度可达到 30W/mm。正是由于这些优越的性能, 将使 AlGaIn/GaN HEMT 成为单片微波集成电路 (MMIC) 中功率放大器 (PA) 和低噪声放大器 (LNA) 发展方向。

目前, 国际上已经研制出多种 AlGaIn/GaN HEMT 的微波功率放大器, 有 L-C-R 匹配结构^[2]、双倍 f_T 电阻反馈结构^[3]、损耗匹配共源共栅结

基金项目: 国家重大基础研究项目 (51327020301)

构^[4]、非均匀分布结构^[4]、推挽联结结构^[5]等。本文给出的是AlGaIn/GaN HEMT 反馈结构功率放大器及其相关设计方法。

2 基本设计考虑

2.1 稳定性设计^[6]

放大器的稳定性,是放大器设计中需要考虑的非常重要的因素,它一般取决于晶体管的S参数和置端条件。

稳定性因子

$$k = (1 - |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2 + |\Delta|^2) / (2 \times |S_{12}S_{21}|),$$

$$\Delta = S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21},$$

只有当 $k > 1$, $|\Delta| < 1$, 器件才是绝对稳定的。

二端口网络中,当输入或输出端口出现负阻时,就可能发生振荡,须对器件采取稳定措施,一般有图1所示的四种方法。

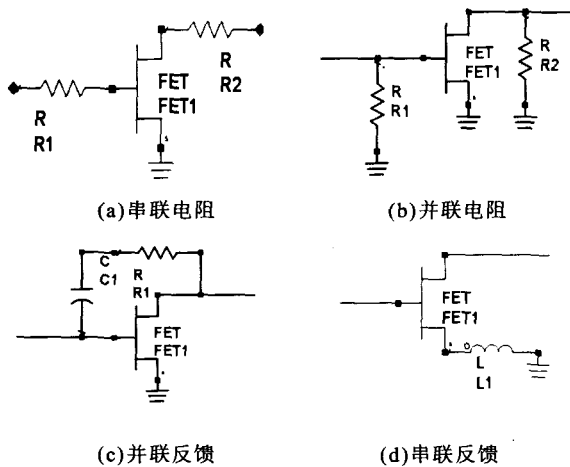


图1 稳定措施

(a)和(b)是串联和并联电阻,使 $k > 1$,但会使电路的噪声系数恶化;(c)利用并联反馈,不仅能使电路稳定,而且对输入输出匹配也起了非常大的作用;(d)一般用于低频电路。

2.2 匹配网络设计^[7]

阻抗匹配是使微波电路或系统无反射、载行波或尽量接近行波状态的技术措施,在微波功率放大器的设计中占有十分重要的地位,它制约着放大器的驻波比、功率增益、输出功率、功率附加效率等特性。同时不仅匹配网络的基波反射系数影响功

率放大器的性能,匹配网络的谐波反射系数对电路的性能也有很大的影响,尤其是在饱和输出功率和功率附加效率上。

小信号的S参数可以用于工作在甲类的小信号放大器(即线性功率输出),然而,微波功率放大器一般都在大信号下,工作于非线性区。此时,小信号的S参数就不适于设计目的了。

以往功率放大器的设计通常采用优化方法,由于这种设计方法在匹配电路的谐波性能对功率放大器性能的影响这一问题上没有一个定量的分析结果,导致了该方法在设计功率放大器时常常不容易得到最佳的设计结果。

阻抗牵引法是通过分析整个阻抗圆图平面内的电路性能,找出谐波的最佳负载,得到最优的性能所需要的匹配电路特性,进而得到最优的设计结果。这种分析方法可对匹配电路在谐波频率上进行分析,可得到匹配电路谐波特性对电路性能影响的定量分析结果。该方法为非线性微波电路特别是微波功率放大器的设计提供了一种有效的手段。

Agilent ADS软件提供了对电路进行阻抗牵引的方法,利用ADS软件不仅可对电路进行基波频率负载牵引,而且可在不同的谐波频率上进行负载牵引。

3 PA设计与分析

利用Agilent ADS对PA进行设计,采用的有源器件是在蓝宝石衬底上生长栅宽1mm、栅长0.7 μ m的AlGaIn/GaN HEMT器件^[8]。该HEMT膝点电压为4.8V,饱和电流为511mA。由于AlGaIn/GaN HEMT器件与GaAs基HEMT器件源漏工作和膝点电压有很大的差别,它们之间的设计和负载匹配也不相同。由于该AlGaIn/GaN HEMT器件的输入输出端口均出现负阻,所以必须对电路采用稳定措施。

采用图1(b)的方法,在输入输出端并联电阻,使得 $k > 1$, $|\Delta| < 1$,电路绝对稳定,进行匹配设计,完整电路及仿真结果如图2和图3所示。

该电路在3GHz~8GHz频段内是绝对稳定的,最高增益为13.937dB,但其3dB带宽只有1GHz。

采用输入输出并联电阻虽然使电路在工作频段内绝对稳定,增益也达到13.937dB,但其工作带宽只

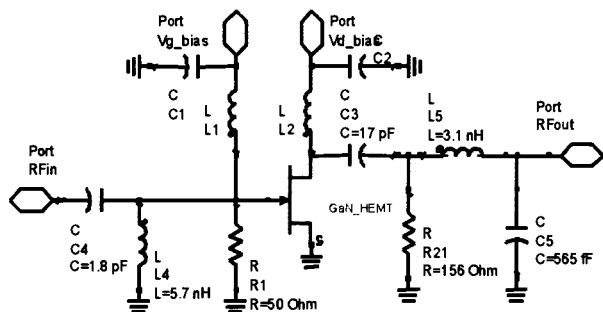


图2 使用并联电阻方法的完整电路图

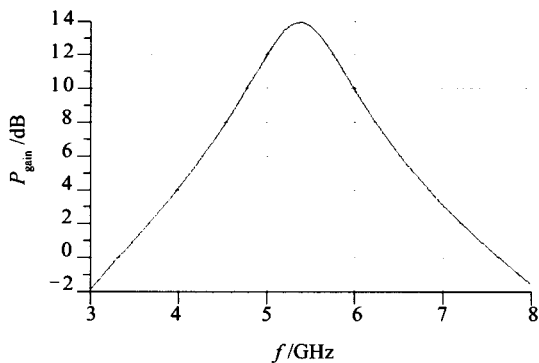


图3 使用并联电阻方法的PA增益图

有1GHz,不是理想值。为了兼顾稳定性、增益、VSWR及工作带宽,我们采用反馈网络这种稳定方法。

在AlGaIn/GaN HEMT的漏-栅加一个反馈网络,使得 $k > 1$, $|\Delta| < 1$,电路绝对稳定。在 $V_{DS}=20V$, $V_{GS}=-1.75V$ 偏置下,对电路进行负载牵引测试,如图4所示。折中考虑功率增益和功率附加效率,选定负载阻抗为

$$Z_{Lopt} = 80.452 - j45.198$$

对输出网络进行匹配设计。

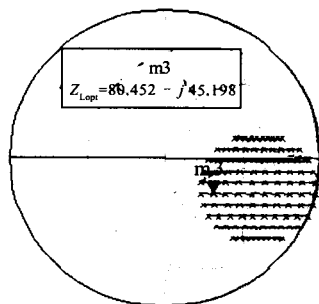


图4 负载牵引图

为了得到理想的输出功率,输入端必须共轭匹配。输入共轭匹配可由下式得到

$$\Gamma_{SP} = (\Gamma_{IN})' = [S_{11} + \frac{S_{12}S_{21}\Gamma_L}{1 - S_{11}\Gamma_L}]'$$

式中, Γ_L 为负载反射系数。

最后得到完整的微波功率放大器电路如图5所示。

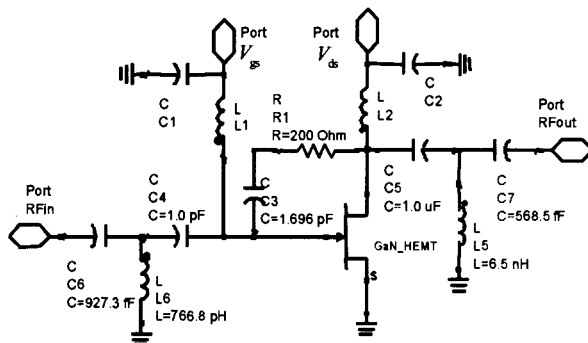


图5 使用并联反馈法的PA完整电路图

进行仿真后的结果如图6,7,8和9所示。

从稳定性因子曲线图(图6)可以看出,在工作频段内, $k > 1$, $|\Delta| < 1$,电路是绝对稳定的,不会产生振荡。图7是在 $V_{DS}=20V$, $V_{GS}=-1.75V$ 偏置,输入功率为10dBm下的功率增益曲线。从该

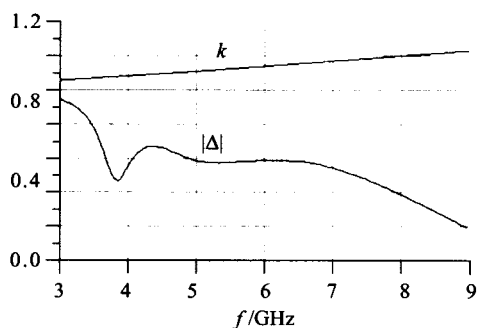


图6 使用并联反馈方法的PA稳定曲线图

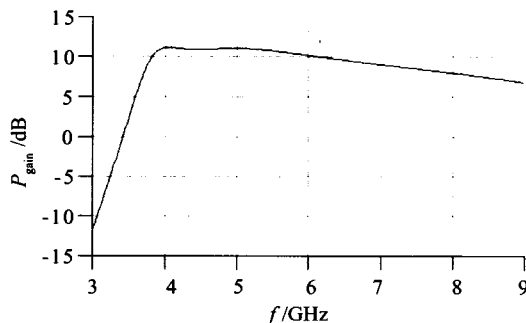


图7 使用并联反馈方法的PA增益曲线图

图可以看出电路的3dB工作带宽为3.6GHz~8.0GHz,最高增益为11.04dB,增益曲线还算平坦。图8是 $V_{DS}=20V$, $V_{GS}=-1.75V$ 偏置, $f=4.5GHz$ 的输出功率、功率增益、 PAE 曲线图。从该图可知, $V_{DS}=20V$, $V_{GS}=-1.75V$ 偏置, $f=4.5GHz$ 时, 该电路的功率增益为11.04dB, 输出功率最大达到33dBm, PAE 最大可以达到29.2%。图9是输入输出电压驻波比曲线图, 曲线还比较理想。由于输入网络采用共轭匹配设计, 所以 $VSWR_{in}$ 总体比 $VSWR_{out}$ 小。在 $f=5.305GHz$, $VSWR_{in}=1.014$, 接近于1。说明此点的反射系数约等于0, 几乎没有反射。

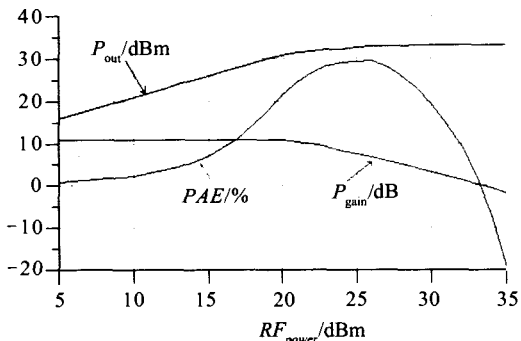


图8 使用并联反馈方法的PA输出功率、功率增益、 PAE 曲线图

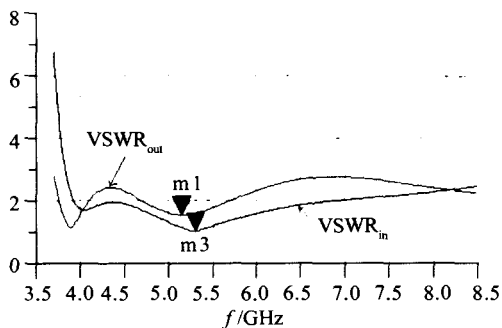


图9 使用并联反馈方法的PA驻波比曲线图

4 结论

本文在小信号 S 参数不适于大信号功率放大器的设计而获取大信号 S 参数困难的情况下, 利用ADS开展了AlGaIn/GaN HEMT功率放大器设计研究, 采用负载牵引法和输入端共轭匹配, 成功的设计出AlGaIn/GaN HEMT微波功率放大器。为了兼顾稳定性、增益、VSWR及工作带宽, 采用反馈

网络这种稳定措施设计电路, 并且注意到了GaN基器件与过去GaAs基器件的主要差别。最后, 得到该电路在其工作带宽内稳定工作, 输入共轭匹配, 工作带宽为3.6GHz~8.0GHz, 最高增益为11.04dB(输入功率为10dBm)和在 $f=4.5GHz$ 时输出功率最大为33dBm, PAE 最大达到29.2%的理想设计结果。该结果为进一步开展AlGaIn/GaN HEMT放大器的研究奠定了基础。

参考文献:

- [1] KUMAR V, LU W, SCHWINDT R, *et al.* AlGaIn/GaN HEMT on SiC with f_T of over 120GHz[J]. IEEE Electron Device Lett, 2002, 23(8):455—457.
- [2] WU Y F, YORK R A, KELLER S, *et al.* 3GHz~9 GHz GaN-based microwave power amplifiers with L-C-R broadband matching[J]. IEEE Microwave and Guided Wave Letters, 1999, 9(8):314—316.
- [3] KRISHNAMURTHY K, VETURY R, KELLER S, *et al.* Broadband GaAs MESFET and GaN HEMT resistive feedback power amplifiers[J]. IEEE J of Solid-State Circuit, 2000, 35(9):1285—1292.
- [4] GREEN B M, TILAK V, LEE S, *et al.* High-power broadband AlGaIn/GaN HEMT MMICs on SiC substrates[J]. IEEE Trans on Microwave Theory and Technique, 2001, 49(12):2486—2488.
- [5] LEE J W, WEBB K J. Broadband GaN HEMT push-pull microwave power amplifier[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2001, 11 (9):2243—2245.
- [6] ROBERTSON J D. MMIC Design[M]. Institution of Electrical Engineers, London, 1995.
- [7] GONZALEZ G. 微波晶体管放大器分析与设计[M]. 白晓东译. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [8] XU J. AlGaIn/GaN High-Electron-Mobility-Transistors Based Flip-Chip Integrated Broadband Power Amplifiers[D]. University of California, Santa Barbara, 2000.

(收稿日期: 20050512)

作者简介:

林锡贵(1979—), 男, 硕士研究生, 研究方向为GaN基HEMT单片微波集成电路;

郝跃(1958—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为超深亚微米VLSI可靠性理论与设计方法、新型宽禁带半导体器件与关键技术, 以及系统集成(SOC)设计与设计方法学等。