

文章编号: 2095-4980(2017)02-0239-04

一种基于 GaAs FET 的 S 波段功率放大和整流双向电路

王洪彬, 刘长军

(四川大学 电子信息学院, 四川 成都 610064)

摘 要: 设计了一种基于砷化镓场效应管(GaAs FETs)的S波段微波功率放大和整流双向电路, 分析了微波功率放大电路与整流电路之间的类似性。利用ADS对其进行仿真, 并进行实验验证。该电路具有微波功率放大功能, 增益和功率附加效率分别为 11.9 dB 和 55%, 输出功率达 28.9 dBm。该电路同时具有将微波转换为直流的功能。当电路偏置在C类状态下, 微波输入功率为 30 dBm, 且直流负载为 55 Ω 时, 获得了 75.6% 的整流效率。电路正向放大反向整流的特性可望应用到双向微波无线能量传输系统中。

关键词: 微波功率放大器; 整流器; 双向性

中图分类号: TN455

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201702.0239

An S-band microwave amplifier and rectifier bi-directional circuit based on GaAs FET

WANG Hongbin, LIU Changjun

(School of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu Sichuan 610064, China)

Abstract: An S-band GaAs Field Effect Tube(FET) microwave bi-directional circuit is designed as a power amplifier and a rectifier. The similarity between a power amplifier and a rectifier is discussed. The circuit is simulated by ADS and measured. In the amplifying mode, the circuit receives a high DC-MWP AE(Power Added Efficiency) as 55% with an output power of 28.9 dBm and a gain of 11.9 dB. The circuit is able to work in rectifying mode as well. It is biased in the class-C mode and shows an efficiency of 75.6% as the microwave input power is 30 dBm with a DC load of 55 Ω . The characteristics that the circuit can be an amplifier forward and a rectifier reverse would be applied to the bi-directional system of microwave wireless power transmissions.

Keywords: microwave power amplifier; rectifier; bi-directional

近年来, 能源需求促进了微波无线能量传输的快速发展。微波无线能量传输技术可望在太阳能卫星电站^[1]、无线充电、微波驱动飞行器等领域得到应用。国外对微波无线能量传输技术的研究开展较早, 在国内 1994 年林为干院士首次介绍了微波无线输能技术^[2]。微波整流电路是微波无线能量传输系统中至关重要的一部分。一般微波整流电路均基于肖特基二极管, 但肖特基二极管功率容量低, 无法满足大功率应用^[3-4]。K. Chang 利用 GaAs 场效应管(FET)进行微波整流, 兼顾了整流效率和功率容量^[5]。

经过研究发现, 微波功率放大电路具有双向功能, 既能作为放大器放大微波信号, 又能作为整流电路将微波信号转换为直流信号^[6]。本文面向大功率微波整流电路的需求, 设计了一种 S 波段基于 GaAs FET 的微波放大和微波整流电路, 实现了正向微波功率放大和反向微波整流的功能。

1 基本理论

微波功率放大电路可分为 A,B,C 等类型, 其中 A 类线性度最好, 但效率低, 理论最高效率仅为 50%。C 类功率放大电路具有更高的效率, 通常能达到 60%以上^[7]。微波功率放大器的核心器件一般是微波晶体管, 包括微波

收稿日期: 2015-11-28; 修回日期: 2016-01-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61271074)

双极型晶体管、肖特基势垒栅极场效应晶体管(Metal Epitaxial-Semiconductor Field Effect Transistor, MESFET)、高电子迁移率晶体管(High Electron Mobility Transistor, HEMT)和异质结型双极晶体管(Heterojunction Bipolar Transistor, HBT)等。本文使用 GaAs MESFET 实现微波功率放大和整流。

微波整流电路通常由输入滤波器、匹配电路、整流器件、输出低通滤波器和直流负载组成^[8]。整流电路一般使用肖特基二极管进行整流。然而肖特基二极管整流功率容量低,如 HSMS 286 肖特基二极管仅为 100 mW 左右。为了能够对更高功率的微波进行整流,可使用 MESFET 替代肖特基二极管^[9]。

微波放大电路具有将直流转化为微波的功能,而微波整流电路则是将微波转化为直流。这 2 个物理过程互为逆过程,就如同压电陶瓷片既可以作为扬声器,也可以作为麦克风。实际上,微波功率放大器也是一个双向性电路,正向使用时能够实现功率放大,具有大功率和高附加效率;反向使用时,能够实现高效率大功率微波整流。微波功率放大电路的双向性通常由微波放大器件,如场效应管,具有的非线性特性引起^[5]。

2 基本设计方法

基于 MESFET 的微波功率放大器和整流电路的原理示意图如图 1 所示。

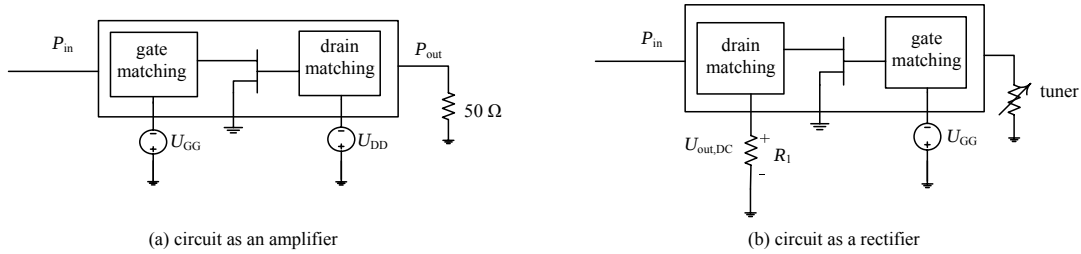


Fig.1 Principle schematic diagram
图 1 原理示意图

图 1(a)为微波功率放大器的原理示意图,图 1(b)则为该放大器作为整流电路时的基本原理示意图。图 1(b)中微波功率从漏极注入,漏极偏置电路则接上负载,通过调节栅极偏置电压使微波整流电路工作在 C 类,而栅极微波端口则接可调谐负载,此时整流电路栅极不需要注入微波功率。

微波功率放大器中,微波功率通过栅极输入,漏极输出。微波功率放大电路从直流功率到微波的转换效率为:

$$\eta_{PA} = P_{out,RF} / P_{DC} \quad (1)$$

式中: P_{DC} 为直流功率; $P_{out,RF}$ 为功率放大器的微波输出功率。微波功率放大电路的附加效率 η_{PAE} 为:

$$\eta_{PAE} = \frac{P_{out,MW} - P_{in,MW}}{P_{DC}} \quad (2)$$

式中 $P_{in,MW}$ 为放大电路的微波输入功率。

该电路作为整流电路时,漏极偏置直流端作为整流电路直流负载端,连接可变直流负载。整流电路的输入功率由漏极注入。此时栅极偏置决定整流电路工作的类别。由于栅极输入阻抗高,通常栅极的偏置电流可以忽略,则整流电路的整流效率为:

$$\eta_R = \frac{P_{DC}}{P_{MW}} = \frac{2|U_{DC}|^2}{R_{DC}R\{U_{drain}(f_0)I_{drain}^*(f_0)\}} \quad (3)$$

式中: U_{DC} 为直流输出电压; R_{DC} 为直流负载; $U_{drain}(f_0)$ 为漏极的微波电压; $I_{drain}^*(f_0)$ 为漏极的电流。由于在微波整流过程中会生成高次谐波,所以在计算微波输入功率的时候仅考虑基频 f_0 的电压和电流。

利用 ADS 软件进行电路设计,采用 Roger4350B 板材。偏置电路采用 $\frac{\lambda}{4}$ 微带线和电容构成,输入输出匹配则采用 Smith 原图进行匹配,经过版图优化,确定电路版图如图 2 所示。

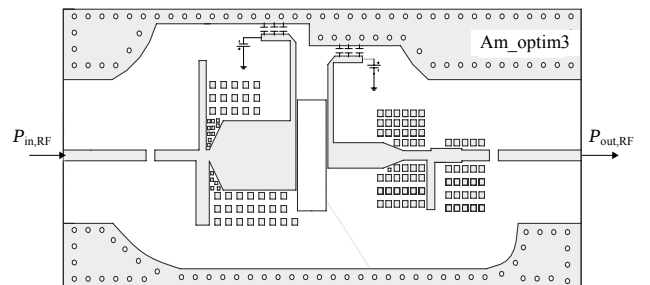


Fig.2 Layout of the circuit
图 2 电路版图

仿真微波整流电路时,微波输入功率从微波功率放大电路的输出功率处注入。栅极偏置端口依旧控制电路的工作类型,微波栅极的阻抗则由设计功放时的 Load-Pull 技术来确定,以保证电路能够实现电路最佳整流效率。

3 测量结果

3.1 微波功率放大电路测量结果

经过仿真优化以及电路的调节后,S 波段微波功放和整流双向电路加工实物图如图 3 所示。

测量微波功率放大器时,首先调节栅极偏置,测量漏极电流和漏极输出电压,如图 4 所示。从图 4 可以看出,当栅极偏置为 -2.7 V 时,能够达到最佳功率附加效率。

对放大器的栅极偏置进行扫描后,确定栅极电压为 -2.7 V 。此时微波功率放大器实现了 55% 的功率附加效率和 60.3% 的漏极效率。微波输入功率为 18 dBm,输出功率为 29.08 dBm,如图 5 所示。在测量过程中,经过优化测量,栅极偏压 $U_{\text{GG}}=-2.7\text{ V}$,漏极偏压 $U_{\text{DD}}=10\text{ V}$,电路工作在 C 类。

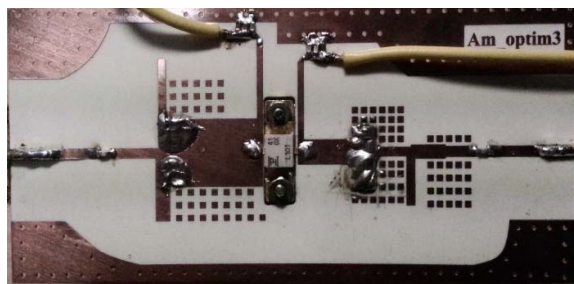


Fig.3 Photo of the practical circuit
图 3 电路加工实物图

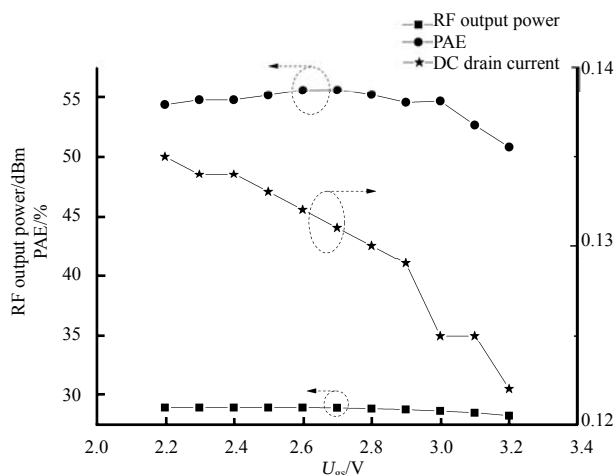


Fig.4 Results of the measurement by varying gate bias voltage
图 4 扫描栅极偏置电压

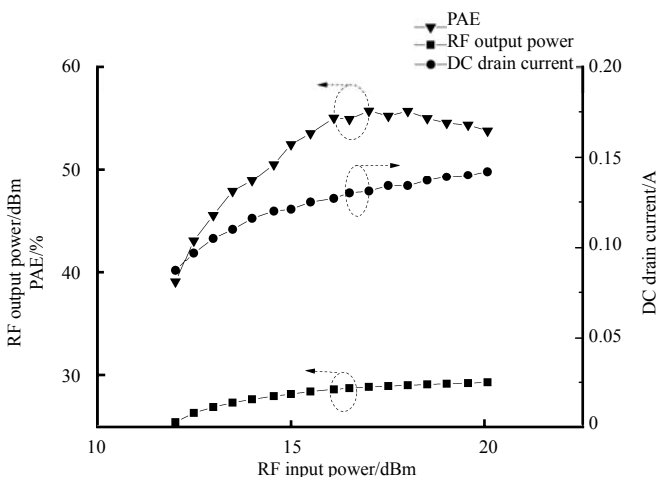


Fig.5 Results of measurement, gate bias voltage is -2.7 V and drain bias voltage is 10 V
图 5 栅极偏压为 -2.7 V ,漏极偏压为 10 V 时的测量结果

3.2 整流电路测量结果

为得到最佳整流效率,在测量过程中需要选择合适的栅极偏置电压(U_{GG})、漏极的直流负载(R_{L})以及栅极的负载 Z_{load} 。

栅极偏置电压保证整流电路工作在 B 类或者 C 类。本论文中栅极偏置电压为 -2.9 V ,整流电路工作在 C 类。经过调试,最终确定,当栅极微波端口电阻为无穷大时,所得整流效率最佳。如图 6 所示,当输入功率为 30 dBm 时,整流效率为 75.6%,此时直流负载为 $55\ \Omega$;当输入功率为 31 dBm 时,整流效率为 71.4%,此时直流负载为 $48\ \Omega$ 。当该电路作为微波整流电路使用时,栅极偏置电压确保了整流电路工作类型,栅极和漏极匹配电路使得高次谐波反射回晶体管完成谐波能量回收,实现了高微波整流效率。

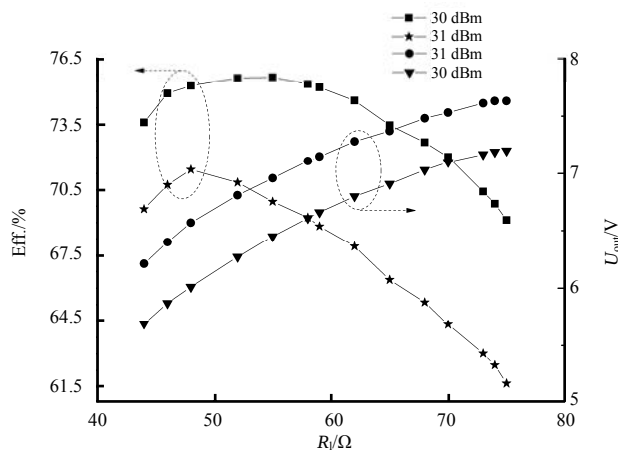


Fig.6 Circuit performance as a rectifier with $P_{\text{in}}=30\text{ dBm}$ and $P_{\text{in}}=31\text{ dBm}$

图 6 当输入功率为 30 dBm 和 31 dBm 时,电路的整流效率和输出的直流电压

4 结论

本文利用 GaAs MESFET 实现了 2.45 GHz 的功率放大和整流双向电路。本文中微波功率放大电路工作在 C 类, 该电路成本低, 结构简洁, 获得 55% 的功率附加效率和 60% 的漏极效率。在整流电路设计仿真过程中, 借鉴了放大器设计的 Load-Pull 负载牵引设计技术, 对整流电路的设计进行优化仿真, 获得了较高整流效率。作为整流电路, 相对于肖特基二极管整流电路, 提高了整流电路的功率容量, 获得了 77% 的整流效率, 验证了 MESFET 器件用于微波整流的可行性。同时相较于一般场效应管微波整流电路^[9], 该电路对双向微波无线能量传输系统的实现具有更大的优势, 同时具有更高的整流效率。相比于同样工作于 C 类功率放大器的功放和双向整流电路^[10], 该电路实现了更高的功放增益和整流效率。

参考文献:

- [1] ODA M, UENO H, MORI M. Study of the solar power satellite in NASDA[R]. Japan, 2003.
- [2] 林为干, 赵愉深, 文炯一, 等. 微波输电, 现代化建设的生力军[J]. 科技导报, 1994(3):31-34. (LIN Weigan, ZHAO Yushen, WEN Geyi, et al. Microwave power transmission, new force of modernization[J]. Technology Review, 1994(3):31-34.)
- [3] 张彪, 刘长军. 一种高效的 2.45 GHz 二极管阵列微波整流电路[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(9):2443-2446. (ZHANG Biao, LIU Changjun. A high efficiency 2.45 GHz microwave rectifier based on diode array[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(9):2443-2446.)
- [4] 吕艳青, 杨雪霞, 周塋. 一种用于微波输能的小型化整流电路[J]. 应用科学学报, 2011, 29(5):508-511. (LYU Yanqing, YANG Xuexia, ZHOU Jun. Miniature rectification circuit for microwave power transmission[J]. Journal of Applied Sciences, 2011, 29(5):508-511.)
- [5] SUH Y H, CHANG K. A novel low-cost high conversion efficiency microwave power detector using GaAs FET[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2005, 44(1):29-31.
- [6] REVEYRAND T, RAMOS I, POPOVIC Z. Time-reversal duality of high efficiency RF power amplifiers[J]. Electronics Letters, 2012, 48(25):1607-1608.
- [7] BAHL I J. 射频与微波晶体管放大器基础[M]. 北京:电子工业出版社, 2013. (BAHL I J. Fundamentals of RF and Microwave Transistor Amplifier[M]. Beijing:Publishing House of Electronics Industry, 2013.)
- [8] 罗俊, 何其娟, 刘长军. 一种 2.45 GHz 微波二极管整流电路[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2008, 6(1):14-16. (LUO Jun, HE Qijuan, LIU ChangJun. Experiments on a 2.45 GHz microwave diode rectifier[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2008, 6(1):14-16.)
- [9] 叶力群, 郁成阳, 张彪, 等. 基于 GaAs 晶体管 2.45 GHz 大功率微波整流电路[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013, 11(4):591-594. (YE Liqun, YU Chengyang, ZHANG Biao, et al. A large power 2.45 GHz microwave rectifier based on GaAs transistor[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013, 11(4):591-594.)
- [10] LITCHFIELD M, SCHAFER S, REVEYRAND T, et al. High-efficiency X-Band MMIC GaN power amplifiers operating as rectifiers[C]// 2014 IEEE MTT-S International Microwave Symposium(IMS). [S.l.]:IEEE, 2014:1-4.

作者简介:



王洪彬(1991-), 女, 四川省广元市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为电磁场与微波技术. email:angela_wang@stu.scu.edu.cn.

刘长军(1973-), 男, 河北省邢台市人, 教授, 博士生导师, 研究方向为微波技术与射频电路.