

文章编号 : 2095-4980(2013)04-0591-04

## 基于 GaAs 晶体管 2.45 GHz 大功率微波整流电路

叶力群, 郁成阳, 张 彪, 刘长军

(四川大学 电子信息学院, 四川 成都 610065)

**摘 要 :**针对基于 GaAs 晶体管的大功率微波整流电路,设计了一种应用于大功率微波无线输能系统的整流电路。该大功率微波整流电路基于微带结构,工作频率为 2.45 GHz,具有质量轻,整流输出功率大的特点。在不同微波输入功率和负载下进行测量,发现当输入微波功率为 30 dBm,负载为 38  $\Omega$  时,整流电路获得了测量过程中最大整流效率的 41%;当输入微波功率为 34 dBm,负载为 23  $\Omega$  时整流电路得到测量过程中获得的最高直流功率输出 28.7 dBm。通过完善和改进电路,可以进一步提高整流的效率,并应用于高功质比的微波整流天线。

**关键词 :**微波整流;微波输能;GaAs 晶体管

中图分类号:TN455

文献标识码:A

doi :10.11805/TKYDA201304.0591

## A large power 2.45 GHz microwave rectifier based on GaAs transistor

YE Li-qun, YU Cheng-yang, ZHANG Biao, LIU Chang-jun

(School of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu Sichuan 610065, China)

**Abstract :**A microwave GaAs transistor rectifier at 2.45 GHz based on microstrip lines is presented in this paper. The GaAs transistor has enhanced the rectifier power capacitance greatly. The proposed rectifier bears a power to weight ratio much higher than conventional rectifiers based on Schottky diodes. The measured results show that the rectifier achieves 41% of its highest rectifying efficiency when the input microwave power reaches 30 dBm and the DC load is 38  $\Omega$ ; the rectifier reaches its highest DC output power 28.7 dBm with an input microwave power at 34 dBm and a DC load of 23  $\Omega$ . The GaAs transistor rectifiers will be applied to microwave power transmission systems with strict power to weight ratio requirements. The rectifiers may own higher conversion efficiency with improved circuit design and can be applied to high power to weight rectennas.

**Key words :** microwave rectification; microwave wireless power transmission; GaAs transistor

20 世纪 60 年代国外就展开了关于微波输能技术<sup>[1]</sup>的研究,欧洲和美国在过去的几十年内进行了大量关于微波输能的实验,国内电子科大的林为干教授 1994 年首次介绍了微波输能技术<sup>[2]</sup>。微波输能技术在卫星太阳能发电站<sup>[3-5]</sup>、RFID(Radio Frequency Identification)、浮空平台等系统中起着非常重要的作用。其中微波整流电路<sup>[6]</sup>是微波输能技术中的关键。目前对于微波整流电路的研究,大多数整流电路都使用肖特基二极管进行设计,单只较大功率容量的肖特基二极管功率容量为 20 dBm 左右,且肖特基二极管在大功率整流时效率会有明显下降<sup>[7-9]</sup>。在国外的整流电路研究中,Kai Chang 等人的研究团队已经以肖特基二极管为基础对整流电路做了详细的理论与实验验证<sup>[10]</sup>,并已获得了 70% 以上的整流效率<sup>[11]</sup>,但在功率容量上没有取得较理想的成果。为了能够在更小的电路上,对更大的微波功率进行整流,需要更大功率容量的整流部件。本文采用 GaAs 晶体管替代肖特基二极管作为整流电路中的整流器件,设计了一款具有大功率、轻质量特性的微带结构的微波整流电路。文献[12]中采用砷化镓晶体管整流最大的直流功率输出达到 600 mW。本文采用砷化镓晶体管的微波整流电路输出最大的直流功率达到了 740 mW。

收稿日期:2012-12-27;修回日期:2013-03-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61271074);国家“863”高技术资助项目(2012AA120605)

## 1 微波晶体管整流电路原理与设计

### 1.1 晶体管的选择

GaAs 晶体管是一种由肖特基势垒栅极构成的场效应晶体管。在栅极和源极之间是一个金属—半导体结，栅极和源极之间可以等效为一个肖特基二极管。与肖特基二极管类似，GaAs 晶体管同样具有将微波整流为直流的功能。相比现有的微波二极管型号，GaAs 晶体管拥有更高的功率量级。单个 GaAs 晶体管的功率容量可以达到瓦特量级，这是常规微波二极管无法比拟的。新型的 GaN 晶体管在 S 波段的功率容量可以达到 100 W 量级，具有良好的微波整流应用前景。

本文选用三菱半导体公司生产的 MGF1801 型号晶体管，利用微带结构实现了工作在 2.45 GHz 的晶体管大功率微波整流电路。MGF1801 晶体管应用于整流电路的主要参数有  $V_{GSO} = -8 \text{ V}$ ， $P_{\text{diss}} = 1.2 \text{ W}$ 。 $V_{GSO}$  为源极和基极之间能承受的最大电压， $P_{\text{diss}}$  为最大耗散功率。

### 1.2 整流电路的设计

为了使整流电路输入端与测试仪器匹配，本文采用  $50 \Omega$  的源阻抗进行匹配设计。整流电路的整体原理框图如图 1 所示。为了隔离整流输出直流电压对信号源的影响，在晶体管的微波输入端添加隔直电容，采用 27 pF 的贴片电容。其中使用一段小于  $1/4$  波长的短路枝节来实现阻抗匹配<sup>[13]</sup>。在 ADS 中对隔直电容和匹配枝节组成的结构进行仿真和优化，使其在高次谐波的频点具有较好的滤波效果<sup>[14]</sup>，电路在晶体管前端对高次谐波的能量得到了回收。

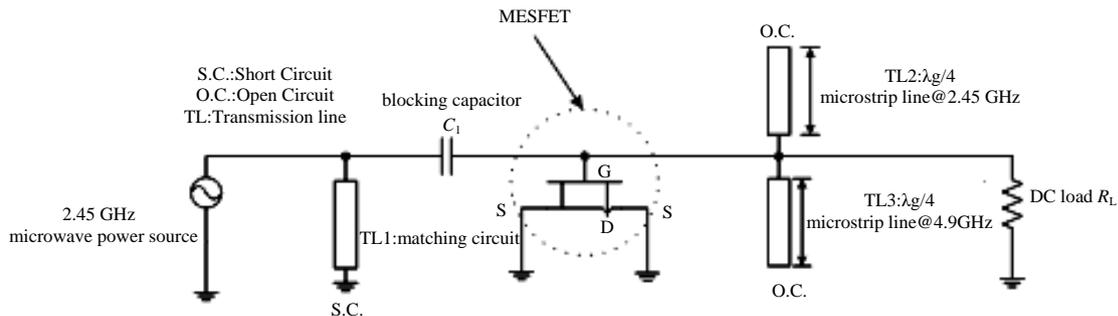


Fig.1 Principle diagram of the transistor rectifier  
图 1 晶体管整流电路原理图

输出阻带滤波器分别通过并联在 2.45 GHz 和 4.9 GHz 频率下的  $1/4$  波长的开路枝节。如式(1)所示，其中  $\beta$  为传输线相位传播常数，当  $l = \lambda_g/4$  时  $Z_L = 0$  对应于短路点，使整流电路后端对应于 2.45 GHz, 4.9 GHz 和 7.35 GHz，构成了阻带滤波的特性，在晶体管的后端基频和高次谐波的能量得到了回收，以提高电路的整流效率。

$$Z_L = \frac{Z_0}{j \tan(\beta l)} \quad (1)$$

经过电路在 ADS 中的模型仿真、优化得到最终的电路形式如图 2 所示。整个电路包括匹配到  $50 \Omega$  的阻抗变换线、整流电路和阻带滤波 3 部分。电路在仿真环境下得到输入阻抗的模值  $|Z_{\text{in}}| = 49.414 \Omega$ ，实现了与信号源的良好匹配。在输出端也得到了对基频和高次谐波较理想抑制的直流输出电压。

## 2 实验结果及分析

在电路整体设计完成以后，采用 F4B-2 聚四氟乙烯玻璃纤维双面覆铜板加工。基板厚度 1 mm，介电常数  $\epsilon_r = 2.65$ ，损耗角正切值为 0.003，覆铜板厚度  $18 \mu\text{m}$ ，电路尺寸为  $40 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ 。电路设计版图及实物如图 2 所示。

实验测试中采用 2.45 GHz 固态微波功率源，微波源输出端采用 20 dB 的双定向耦合器和 Agilent U2 000 A 功率计监测输入微波功率。使用标准的电

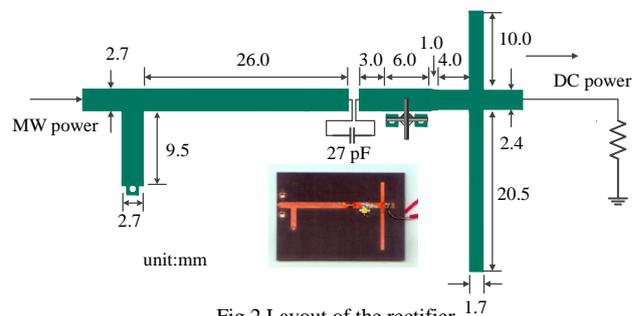


Fig.2 Layout of the rectifier  
图 2 电路设计版图

阻箱和 Agilent34 970 A 数据采集器,测量在不同负载下的直流输出功率。晶体管整流电路的整流效率为:

$$\eta = \frac{V_{DC}^2}{R_L P_{MW}} \quad (2)$$

式中:  $V_{DC}$  为数据采集器测得的直流负载两端的电压;  $R_L$  为直流负载;  $P_{MW}$  为通过功率计测量计算得到的微波输入功率。

图 3(a)给出了当输入功率为 30 dBm 时不同负载下的仿真和测量的整流效率变化曲线。从曲线中可以看出当负载阻抗在  $38 \Omega$  时得到了最大整流效率的 41%,此时获得了 26.13 dBm 的直流功率输出。当负载在  $10 \Omega \sim 90 \Omega$  范围内变化时,电路的整流效率保持在 30%以上。虽然测量结果与仿真结果有一定差距,但测量结果与仿真结果在整体的变化趋势上一致。误差的出现可能主要由于晶体管在 ADS 中的非线性模型,在进行整流仿真时参数的不准确性导致。在以后的研究中可以对晶体管的部分参数进行测量或估算,建立晶体管的仿真模型,使仿真结果与实验结果更加接近。图 3(b)给出了当输入微波功率分别为 30 dBm,33 dBm,34 dBm 时,整流效率随负载变化的曲线。由于晶体管的非线性特性,提高微波输入功率会导致晶体管的阻抗特性发生变化,使得电路的匹配性能变差,整流效率降低。因此,当整流电路输入功率增大时,效率下降更加明显。整流电路的直流输出功率依然随着输入微波功率的增加而缓慢增加。当输入微波功率为 34 dBm,直流负载为  $24 \Omega$  时,整流电路获得了最大 28.7 dBm 的直流输出。

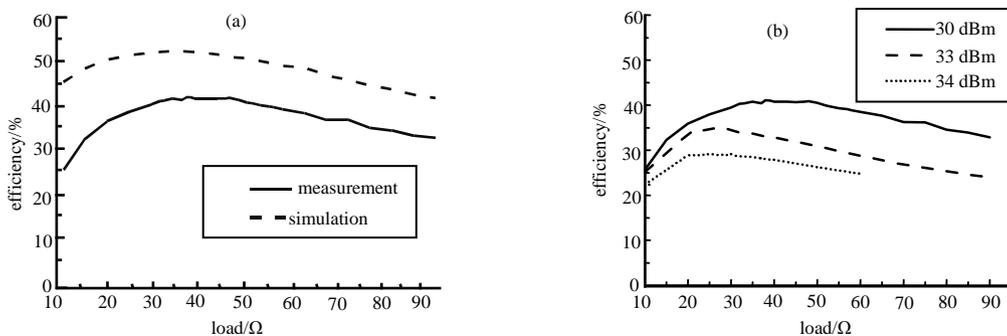


Fig.3 MW-DC efficiency with respect to its load

图 3 整流效率随负载值的变化

### 3 结论

本文使用 GaAs 晶体管设计了一款工作在 2.45 GHz 频率的大功率微波整流电路,在  $40 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$  尺寸电路板上运用微带结构实现瓦特量级的直流功率输出。相比常规的肖特基二极管微波整流电路,使用 GaAs 晶体管设计的微波整流电路尺寸更小,功率容量更高,具有更高的功质比。对于需要高功质比的无线输能系统,晶体管微波整流电路具有许多优势。在进行大功率微波无线能量传输时,采用具有高直流功率输出的微波整流电路,可以减少微波整流电路的数量,便于系统设计与实现,同时减轻系统重量。

参考文献:

- [1] Brown W C. Experiments in the transportation of energy by microwave beam[J]. IRE International Convention Record, 1964,12(2):8-17.
- [2] 林为干,赵愉深,文翰一,等. 微波输能现代化建设的生力军[J]. 科技导报, 1994,15(3):31-41.(LIN Weigan, ZHAO Yushen,WEN Geyi,et al. Microwave power transmission,new force of modernization[J]. Technology Review, 1994,15(3):31-34.)
- [3] GLASER P E. An overview of the solar power satellite option[J]. IEEE Trans. MTT, 1992,40(6):1230-1238.
- [4] McSpadden J O,Mankins J C. Space solar power programs and microwave wireless power transmission technology[J]. Microwave Magazine,IEEE, 2002,3(4):46-57.
- [5] Matsumoto H. Research on solar power satellites and microwave power transmission in Japan[J]. IEEE Microwave Magazine, 2002, 3(4):36-45.
- [6] 罗俊,何其娟,刘长军. 一种2.45 GHz微波二极管整流电路[J]. 信息与电子工程, 2008,6(1):14-16. (LUO Jun,HE Qijuan, LIU Changjun. Experiments on a 2.45 GHz microwave diode rectifier[J]. Information and Electric Engineering, 2008,6(1):

14-16.)

- [7] 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.)
- [8] 陈彦龙,李凯,刘长军. 一种915 MHz紧凑型肖特基二极管微波整流电路[J]. 信息与电子工程, 2012,10(1):64-67. (CHEN Yanlong,LI Kai,LIU Changjun. A 915 MHz compact Schottky diode microwave rectifier[J]. Information and Electric Engineering, 2012,10(1):64-67.)
- [9] Yu C,Liu C,Zhang B,et al. An Intermodulation Recycling Rectifier for microwave Power Transmission at 2.45 GHz[J]. Progress In Electromagnetics Research, 2011(119):435-447.
- [10] Jonathan Hansen,Kai Chang. Diode Modeling for Rectenna Design[C]// IEEE Antennas and Propagation(APSURSI). Spokane, WA:[s.n.], 2011:1077-1080.
- [11] TU Wenhua,HSU Shihhsun,Kai Chang. Compact 5.8-GHz Rectenna Using Stepped-Impedance Dipole Antenna[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2007(6):282-284.
- [12] Suh YoungHo,Kai Chang. A Novel Low-Cost High Conversion Efficiency Microwave Power Detector Using GaAs FET[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2005,44(1):29-31.
- [13] 刘长军,黄卡玛,闫丽萍. 射频通信电路设计[M]. 北京:科学出版社, 2005. (LIU Changjun,HUANG Kama,YAN Liping. RF communication circuit design[J]. Beijing:Science Press, 2005.)
- [14] 张秀华,雷建华. 一种微波滤波器的参数提取方法[J]. 无线电工程, 2009,39(2):43-44. (ZHANG Xiuhua,LEI Jianhua. A Method of Parameter Extraction for Microwave Filters[J]. Radio Engineering, 2009,39(2):43-44.)

#### 作者简介:



叶力群(1988-), 男, 江西省抚州市人, 在读硕士研究生, 研究方向为微波系统与工程.email:yeliqun.ting@163.com.

郁成阳(1988-), 男, 安徽省亳州市人, 在读博士研究生, 研究方向为通信与信息系统.

张彪(1987-), 男, 西安市人, 在读博士研究生, 研究方向为微波电路与电磁兼容.

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