2008年2月

文章编号:1672-2892(2008)01-0014-04

# 一种 2.45 GHz 微波二极管整流电路

## 罗 俊,何其娟,刘长军

(四川大学 电子信息学院,四川 成都 610064)

摘 要:为了提高用于微波无线功率传输的微波整流效率,本文采用微带结构实现了一个 2.45 GHz 的微波二极管整流电路。仿真实验结果证明在输入功率约为 20 dBm 的情况下,获得了大 于 50%的整流效率。通过完善和改进电路,可以进一步提高整流的效率,并应用于微波整流天线。

关键词:微波整流;整流天线;微波输能 中图分类号:TN313<sup>+</sup>.5 文献标

文献标识码:A

## Experiments on a 2.45 GHz Microwave Diode Rectifier

LUO Jun , HE Qi-juan , LIU Chang-jun

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

**Abstract:** Recently the research on microwave wireless power transmission has attracted more and more interests. As an essential part of a microwave wireless power transmission system, the microwave rectifier has been well studied. In this paper, a 2.45 GHz microwave diode rectifier based on microstrip transmission line structures is implemented. The measured microwave rectification efficiency is higher than 50% when the input microwave power is about 20 dBm. In future, the microwave rectification efficiency can be further improved with better circuit designs.

Key words : microwave rectification ; rectenna ; microwave power transmission

近年来,微波无线功率传输(也称为微波输能)引起了人们越来越多的关注<sup>[1-3]</sup>。早在 1899 年,Tesla 在 Wardenclyffe 进行了无线功率传输的实验。20 世纪 50 年代起,各国研究者对微波输能进行了大量的实验研究。 1964 年,Brown 成功设计了一个把微波转换成直流的硅整流二极管天线<sup>[4]</sup>。目前,国外对此已经开展了大量研究 工作;在国内微波整流研究工作还处于起步阶段。

采用微带结构实现微波二极管整流电路具有体积小,重量轻,易于实现与天线整合的优势。作为微波无线功 率传输系统中的关键部分,微波整流电路得到了迅速发展。国外微波整流电路已经取得了很好的效果,转换效率 已经可以达到 70%。本文设计实现了一个工作在 2.45 GHz 的微波二极管整流微带电路。通过实验测试,在输入 微波功率约为 20 dBm 的情况下,获得了大于 50%的整流效率。在今后的研究工作中,通过进一步完善电路设计, 可以继续提高微波整流的效率。

1 微波整流原理和设计

微波整流系统一般包括:输入滤波器、微波整流二极管、输出低通滤波器、阻抗匹配电路和负载,系统结构 如图1所示。由于微波二极管是非线性器件,在微波整流中将产生高次谐波分量。通过对高次谐波的回收和利用, 可以提高微波整流的效率。输入低通滤波器用于反射二极管整流产生的高次谐波。阻抗调节及隔直电路将直流隔 离并将滤波器阻抗调节到与输入阻抗匹配。输出端滤波抑制整流电路产生的谐波分量,隔离来自输入端的微波, 并且输出直流功率到负载。



收稿日期:2007-10-15;修回日期:2007-12-22

#### 1.1 二极管的选择

在整个微波整流系统中,微波二极管是最关键的元件。二极管的参数影响着电路的尺寸和系统的总体转换效率。二极管整流电路的转换效率与二极管的参数、电路中的基频和直流损耗有关<sup>[1]</sup>。通过对转换效率和二极管输入阻抗的分析,可以得到:1)减小二极管的零偏置结电容 *C<sub>j0</sub>*,可以增大二极管的整流效率;2)适当增大二极管串联电阻 *R<sub>s</sub>*,可以一定程度上提高整流效率,但是同时也增大了二极管输入阻抗,增大了二极管的电阻损耗。所以在选择二极管时,主要考虑它的零偏置结电容 *C<sub>j0</sub>*和串联电阻 *R<sub>s</sub>*。

本文选用检波灵敏度较高的 Agilent HSMS-286C 硅肖特基势垒二极管组建微波整流电路<sup>[5]</sup>。该二极管封装形式为 SOT-323,内部为 2 支二极管串联的结构。二极管的主要 SPICE 参数为 : $B_v$ =7.0 V, $C_{j0}$ =0.18 pF, $R_s$ =6.0  $\Omega$ , $I_{Bv}$ =10  $\mu$ A。将二极管参数代入电路模型中,仿真得到它在 2.45 GHz 时的输入阻抗为 80  $\Omega_o$ 

### 1.2 输入输出滤波器设计

由于二极管的输入阻抗为 80 Ω, 所以输入滤波器的匹配阻抗也需要按照 80 Ω 进行设计。为此本文设计了一 个阻抗阶跃低通滤波器<sup>[6]</sup>,该滤波器通带损耗小,过渡带较为陡峭。该滤波器在 2.45 GHz,4.9 GHz,7.35 GHz 时的 |*S*<sub>21</sub>|参数分别为:-0.11 dB,-36.1 dB,-12.4 dB。2.45 GHz 时的|*S*<sub>11</sub>|参数为-37 dB,其电压驻波比在 1 GHz 到 2.8 GHz 范围内均小于 1.1。因此,该滤波器可以达到尽可能减小基频损耗并抑制高次谐波的要求。当输入滤波器的插入 损耗为 0.1 dB 时,对应的微波功率损耗约为 2.3%。

输出低通滤波器由一段长为 24 mm, 宽为 0.4 mm 的微带线和一个 470 pF 的贴片电容(型号为 0603)组成。采 用这样的结构,一方面能够不影响直流导通并抑制二极管产生的高次谐波通过;另一方面它与输入端滤波器一起, 把微波整流产生的高次谐波约束在两者中间,以提高整流效率。

为了便于输入端滤波器的设计和实现,改变输出端传输线 的长度,可以使二极管输入端的阻抗为纯电阻。通过仿真优化 得到该传输线的长度,实现微波二极管的输入阻抗为 80 Ω。由 于并联 470 pF 电容的作用,当负载阻抗较高时,二极管等效输 入阻抗基本不因负载阻抗变化而变化,如图 2 所示。

## 1.3 阻抗匹配和隔直电路设计

本设计中并没有加入微波接收天线,整流电路直接与 50 Ω 内阻的信号源连接,所以在滤波器输入端增加一个隔直电容, 防止直流功率流入信号源,影响直流的输出功率。本文选择 470 pF 贴片电容(规格 0603),电容尺寸为 1.6 mm×0.8 mm。在隔直 电容与信号源之间加入一段传输线,通过调整传输线长度和宽 度,达到和信号源的阻抗匹配。

2 实验及结果分析

经过仿真和优化后,整个微波整流电路加工在聚四氟乙烯玻 璃纤维板上。介质厚度为 H=1 mm,相对介电常数为  $\varepsilon_r=2.65$ ,损 耗正切值为 0.002,覆铜板厚度为 0.017 mm。实际加工的微波整流 电路如图 3 所示。

测试实验使用 Agilent E8267C 信号发生器,产生 2.45 GHz 的 微波。选用 2.45 GHz 的双定向耦合器(耦合度为 10.8 dB,插入损 耗为 0.6 dB)和双通道 AV2433 微波功率计进行输入和反射微波功 率的测量。系统的转换效率定义为 $\eta=P_{DC}/P-P_1$ ,其中  $P_{DC}$ 为微波整 流电路输出端口负载得到的直流功率; P为功率源输出功率, $P_1$ 



Fig.2 Input impedance dependent on the load 图 2 二极管输入阻抗随负载变化关系



Fig.3 Microwave diode rectifier 图 3 微波二极管微带整流电路

为微波整流电路输入端口的反射功率。 实验中将微波功率计的两个探头分别接在双定向耦合器上,记录来自信号 源的入射功率和微波整流电路输入端口的反射功率,取其功率之差得出输入微波整流系统的功率。

当负载为 200 Ω,功率源输出功率从-10 dBm 递增到 20 dBm 时转换效率与输入功率的关系曲线,如图 4(a) 所示。从图中可以看出,仿真曲线中随着微波输入功率的增大,效率也逐渐升高,到输入功率为 13 dBm 时效率 最大达到 60%,测量结果与我们的仿真结果有一定的偏差,但是和实验结果基本吻合,两者的变化趋势一致。 当信号源输出功率为 20 dBm 时,负载从 20 Ω 到 500 Ω 变化时,系统效率与负载的关系曲线,如图 4(b)所示。 如前所述,实验结果与仿真存在一定的偏差。在负载阻抗为 300 Ω 时,测量得到最大输出功率为 46.6 mW,测量 得到微波整流系统的效率为 51%。从输出直流功率的角度来看,希望输入功率越大越好,但是随着输入功率的增 大,二极管承受的最大反向电压和正向电流升高,如果电压超过二极管的容许值,会造成二极管的损坏<sup>[7]</sup>。



## 3 结论

本文设计了一个工作在 2.45 GHz 的硅肖特基二极管整流电路,采用微带结构具有体积小(70 mm×40 mm×1 mm), 重量轻和易于与天线整合的优点。实验测量在输入功率为 20 dBm 的条件下,获得了 46.6 mW 的直流功率输出, 扣除输入端口反射功率后,微波整流效率达到 51%。该微波整流电路设计可以运用于整流天线中,获得理想的直 流功率。

在下一步的研究中将引入微带天线,构造完整的微波整流天线。为了提高微波整流的功率容量,获得更大直 流输出,将采用双管结构微波整流电路,并且改进输出端的滤波器。由于本文的电路没有很好地抑制高次谐波, 影响了二极管的整流效率和输出功率,整流效率与国外研究尚有一定差距。在不降低二极管整流效率的基础上, 进一步减小电路的尺寸也是需要考虑的问题。为了减小天线体积,可以将工作频率提升到 5.8 GHz。总之,微波 整流技术拥有良好发展前景,相关研究工作具有重要的应用价值。

## 参考文献:

- [1] McSpadden J, Yoo T, Chang K. Theoretical and Experimental Investigation of a Rectenna Element for Microwave Power Transmission[J]. IEEE Trans. on Microwave Theory Tech., 1992,40(12):2359-2366.
- [2] Suh K, Chang Y. A High-Efficiency Dual-Frequency Rectenna for 2.45- and 5.8-GHz Wireless Power Transmission[J]. IEEE Trans. on Microwave Theory Tech., 2002,50(7):1784-1789.
- [3] Ann Arbor M I. Microwave rectifying circuits and antennas for radio frequency identification and wireless power transmission applications[D]. Graduate thesis, Texas A&M University, 2002.
- [4] Brown W C. The history of power transmission by radio waves[J]. IEEE Trans. on Microwave Theory Tech., 1984,32(9):1230-1242.
- [5] RF Schottky Barrier Diodes HSMS-286X[Z]. Agilent Technologies Aplication Note, 2006.
- [6] 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.
- [7] 古健,刘长军,闫丽萍,等. 大信号射频二极管的时域模拟初步分析[J]. 信息与电子工程, 2004,2(4):310-313.

## 3 结论

上面的实验结果说明,与中粒度并行 CS 算法相比,本文所采取的细粒度并行处理方法有效地降低了通信量, 并具有更好的并行扩展度。同时由于采取了子孔径算法,更有利于高分辨率 SAR 进行并行处理。本文的子孔径 算法为基本子孔径处理,还可以考虑文献[11]提出的改进子孔径算法,甚至 Step 变换,对本文的方法进行改进。 此外,如果具有更好的硬件条件,如 MPP 并行机,应能取得更好的效果。

### 参考文献:

- [1] Curlander J,McDonough R. Synthetic Aperture Radar-Systems and Signal Processing[M]. New York: Wiley, 1991.
- [2] 龙卉,皮亦鸣. 合成孔径雷达并行成像算法研究在曙光 3000 并行计算机上的实现[J]. 电子与信息学报, 2002,24(12): 1990-1993.
- [3] Xu J,Zhu M,Wu Y,et al. Parallel Programming in SAR Imaging Processing[C]// IEEE,IGRASS, 1999,567-568.
- [4] Ma11orqui J,Bar à M,Broquetas A, et al. Parallel algorithms for high speed SAR processing[C]// SPIE, 1998,3497:219-229.
- [5] Inggs M,Bennett T. Parallel SAR processor using PVM on a Beowulf cluster[C]// IEEE IGARSS, 2001,1850-1852.
- [6] Raney R. An exact wide field digital imaging algorithm[J]. Int.Remote Sensing, 1992,13(5):991-998.
- [7] Pi Y,Long H,Huang S. A SAR parallel processing algorithm and its implementation[C]// FIEOS Conf., 2002,211-214.
- [8] 黄铠,徐志伟. 可扩展并行计算技术、结构与编程[M]. 北京:机械工业出版社, 2000.
- [9] Raney R,Runge H,Bamler R,et al. Precision SAR processing using chirp scaling[J]. IEEE Trans.on GRS, 1994,32(4):786-799.
- [10] Moreira A. Real Time Synthetic Aperture Radar Processing with a New Subaperture Approach[J]. IEEE Trans.on GRS, 1992,30(4):714-722.
- [11] Yeo T S,Tan N L,Zhang C B,et al. A New Subaperture Approach to High Squint SAR Processing[J]. IEEE Trans.on GRS, 2001,39(5):954-968.

#### 作者简介:



刘 筱(1983-),女,四川省营山县人,在 读硕士研究生,主要研究方向为合成孔径雷达 并行处理.E-mail:trowaxlau@uestc.edu.cn. 皮亦鸣(1968-),男,贵州省人,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为雷达信号处理、 图像传输和导航定位技术.

冷传航(1980-),男,北京市人,硕士,工 程师,主要研究方向为雷达电子战.

(上接第16页)

## 作者简介:



罗 俊(1982-), 女, 重庆市人, 在读硕士 研究生,主要研究方向为射频无线通信. E-mail: deajun@gmail.com. 何其娟(1983-),女,四川省绵阳市人,在 读硕士研究生,主要研究方向为射频无线通信.

刘长军(1973-),男,河北省邢台市人,博士, 教授,主要研究方向为电磁场与微波技术.