

文章编号: 1672-2892(2012)01-0064-04

一种 915MHz 紧凑型肖特基二极管微波整流电路

陈彦龙, 李 凯, 刘长军*

(四川大学 电子信息学院, 四川 成都 610065)

摘 要: 为了提高射频标签(RFID)中基于肖特基二极管微波整流电路的效率, 采用微带结构实现了一种 915 MHz 紧凑型的整流电路。该微波整流电路具有质量轻、尺寸小、整流输入功率动态范围大等特点, 设计的仿真和实验结果显示: 输入微波功率在 13 dBm~22 dBm 的情况下, 均获得了高于 60%的整流效率。通过完善改进电路, 可以进一步提高整流的效率, 并应用于微波无线能量传输或大型 RFID 的微波整流天线。

关键词: 微波整流; 微波无线输能; 二极管整流器; 射频标签

中图分类号: TN313⁺.8; TP317.4

文献标识码: A

A 915 MHz compact Schottky diode microwave rectifier

CHEN Yan-long, LI Kai, LIU Chang-jun

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

Abstract: In order to improve the performance of Radio Frequency Identification(RFID) microwave rectifiers with microwave Schottky diodes, a compact microwave rectifier at 915 MHz was designed based on microstrip transmission lines in this study. The measured results show that the rectification efficiency is above 60% over the range of input microwave power from 13 dBm to 22 dBm. In the future, the performance of the rectifier can be further improved with better circuit designs, and it can be applied to microwave wireless power transmission systems and RFID rectennas.

Key words: microwave rectification; microwave wireless power transmission; diode rectifier; Radio Frequency Identification

近年来射频标签(RFID)技术发展迅速, 在供应链管理、物流、访问控制等诸多领域得到广泛的应用^[1-2]。由于经济型或者小型化的射频标签都不自带电源, 属于无源标签, 需要通过标签识别器发射的射频信号来驱动, 这就需要射频/微波整流电路将射频/微波功率转换成直流。RFID 使用的标准频率为 915 MHz, 有逐渐由射频向微波频段发展的趋势。目前绝大部分用于 RFID 的整流电路都是基于 CMOS 的集成化电路模式^[3-4], 该模式虽然有集成化的优势, 但是在整流效率方面却存在不足。目前可以查到的 CMOS 集成化 RFID 整流电路效率基本都在 70%以下, 且均需要数千欧姆的负载。

近几年在微波无线输能领域应用较广的是肖特基二极管微波微带整流电路。该电路具有体积小, 结构简单, 实现容易和整流效率高等优点。1964 年, Brown W C 首次成功实现了微波转换成直流的硅整流二极管天线^[5]。目前, 国外相关研究取得较多的进展, 在 2.45 GHz 和 5.8 GHz 频段上 $0.2\lambda_g \sim 0.8\lambda_g$ 范围内实现了 75%甚至更高的整流效率, 然而国内的相关研究才处于起步阶段^[6-8]。本文设计实现一个工作在 915 MHz 的二极管倍压式微波整流电路, 经过实际测试, 当输入功率在 13 dBm 至 22 dBm 的情况下, 均获得了大于 60%的整流效率, 其中在微波输入功率 20 dBm 时, 该电路的整流效率超过了 70%, 实现了在较大的输入功率动态范围内的较高整流效率, 验证了该整流电路拥有动态范围大的优点。

收稿日期: 2011-05-05; 修回日期: 2011-06-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(NFSC 60971051)

*通信作者: 刘长军, email:cjliu.cn@gmail.com

1 倍压整流原理与设计

1.1 倍压整流电路原理

倍压整流电路通常使用在需要高电压、小电流的电路中^[9]。倍压整流就是利用耐压较低的整流二极管和电容器，将电压较低的交流电整流成电压较高的直流电。倍压整流电路一般根据输出电压是输入电压的多少倍，分为二倍压、三倍压以及多倍压整流电路。

本文的整流电路设计过程应用了二倍压整流电路的原理，二倍压整流电路原理如图 1 所示。电路的基本原理与低频倍压整流电路一致。在微波波段，使用双管的结构可以提高电路阻抗匹配的范围，扩大整流电路对输入微波功率的动态范围。

微波整流电路中一个至关重要的部分是微波整流二极管。微波整流电路整体效率与二极管参数、工作频率以及电路损耗等诸多方面因素有关。微波二极管作为微波整流电路中最重要部件，它的相关参数将很大程度上影响电路的阻抗匹配，从而决定整流电路的尺寸以及系统整体的整流效率。美国 MA-COM 公司的 MA4E131X 系列是目前已知微波整流领域性能最好的二极管，但其价格较高，出于 RFID 应用的成本考虑，本文的整流电路选用 Agilent HSMS-286C 硅肖特基二极管^[10]，利用微带传输线实现了工作在 915 MHz 的倍压微波整流电路。所选用的 Agilent HSMS-286C 硅肖特基二极管为 2 支 SOT-323 封装，其主要 SPICE 参数为： $B_v=7.0\text{ V}$ ， $C_{j0}=0.18\text{ pF}$ ， $E_G=0.69\text{ eV}$ ， $R_s=6.0\ \Omega$ ， $I_{BV}=10^{-5}\text{ A}$ ， $P_B(\text{VJ})=0.65\text{ V}$ 。

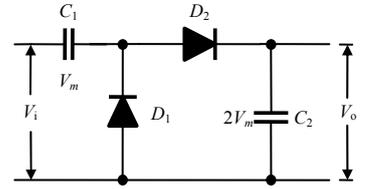


Fig.1 Diagram of voltage coupling rectifier circuit
图 1 倍压整流电路

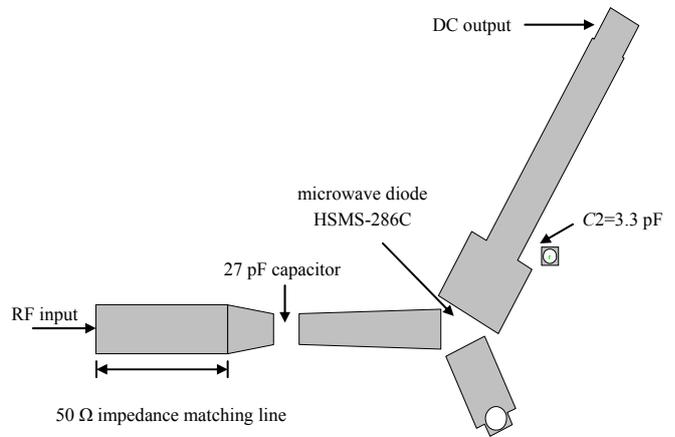


Fig.2 Optimized rectifier circuit
图 2 整流电路仿真优化结果

1.2 微带整流电路设计

为了方便整流电路的测试，本文选择 50 Ω 的输入阻抗进行整体设计。利用微带线连接电容和二极管的方式，实现倍压式整流电路。整流电路部分由 1 支微波二极管、2 支电容和 3 段微带传输线组成。电路前端为 50 Ω 阻抗匹配线，其后的电容为 27 pF(0603 封装)，该电容在实现倍压整流电路的同时还充当了隔直电容的作用，防止直流回流至信号源，影响信号源的功率输出。微波二极管由 1 段微带传输线接地，减小二极管的损耗，并将二次谐波反射回二极管进行二次整流，提高总体整流效率。

经过电路模型仿真、优化得到最终的电路形式如图 2 所示。整个电路包括了匹配到 50 Ω 的阻抗变换线和整流电路 2 部分。如图所示，整流电路由 27 pF 的前端电容、3 段微带传输线、微波二极管以及 3.3 pF(0603 封装)电容组成。电路系统在仿真环境下实现了与信号源的良好阻抗匹配以及较为理想的整体效率。

2 实验及结果分析

经过仿真、优化后的微波整流电路在介电常数为 $\epsilon_r=2.65$ 的聚四氟乙烯玻璃纤维板 F4B-2 上进行整体加工，电路整体尺寸为 4 cm × 4 cm。聚四氟乙烯玻璃纤维介质基板厚度 $H=1\text{ mm}$ ，损耗正切值 $\tan \delta=0.002$ ，覆铜板厚度为 0.018 mm。加工实现的实际电路板如图 3 所示。

测试试验系统选用 Agilent E8267C 矢量信号发生器作为微波功率源，产生 915 MHz 的微波信号；Agilent 34970A 数据采集器作为测量工具，检测并显示直流输出电压；普通标准电阻箱作为电路负载。测试实验系统的转换效率定义为：

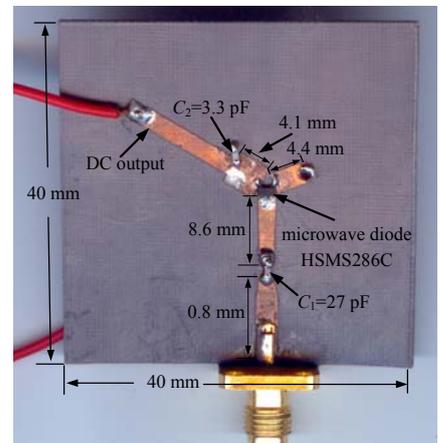


Fig.3 Microwave diode rectifier
图 3. 微波二极管整流电路

$$\eta = (U^2 / R_L) / P_{in} \times 100\% \quad (1)$$

式中： U 为数据采集器测得的直流输出电压值； R_L 为电路系统的负载电阻值； P_{in} 则为矢量信号源的输出功率。为保证实验记录数据的准确性，在实际测试开始之前，使用AV2433双通道微波功率计对微波信号源进行了信号输出功率准确度校准，记录了微波源在各个输出功率与功率计示数间的差值，用于实际计算中的源功率数值修正。在测试的0~23dBm范围内，功率源具有较好的输出功率稳定性和准确性，源功率修正值约为-0.02 dBm。

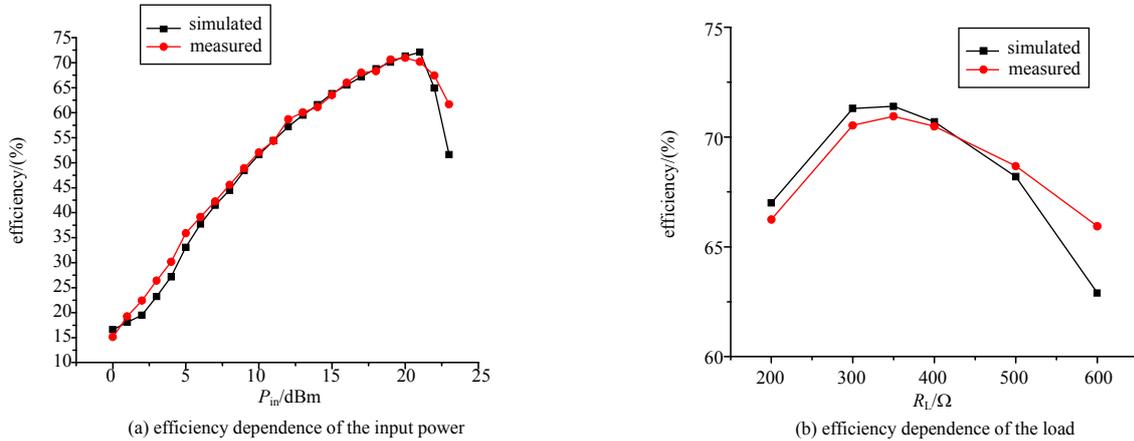


Fig4. Measured results of the microwave rectifier

图4 微波整流电路实验测试结果

经过测试实验测得该整流电路的系统效率如图4所示。当负载 $R_L=350\ \Omega$ 时，微波源输出功率从0逐渐递增至23 dBm，系统整流效率与微波源输出功率的关系曲线如图4(a)所示。从图中可以看出随着系统输入功率的增加，系统的直流转化效率也随之提高；当系统输入功率为20 dBm时，系统取得了最大的转化效率为70.9%；此后随着输入功率的增加，系统转化效率有所下降。实验测试结果与仿真结果基本吻合，虽然数值上有一定的差异，但两者的变化趋势保持了较好的一致性。

当系统输入功率为 $P_{in}=20\ \text{dBm}$ ，负载阻值由 $200\ \Omega\sim 600\ \Omega$ 变化，系统的转化效率与负载阻值之间的关系曲线如图4(b)所示。系统在负载阻值为 $R_L=350\ \Omega$ 时获得了70.9%的最大直流转化效率，此时二极管上的直流偏置电压使得二极管工作在最佳工作点，二极管达到最佳性能，产生最大的整流效率。实验结果与仿真结果依旧基本吻合，负载阻值大于 $400\ \Omega$ 时，实测结果略优于仿真的整流效率。实验中为获得更大的直流输出功率，希望系统的输入功率越大越好，但是随着输入功率和输出直流电压的不断增大，二极管需要承受更大的正向电流和反向电压，从而影响二极管的工作状态，降低系统的整体效率。若一味地增大输入功率，使得二极管承载的电压超过耐压容限，则会造成二极管击穿而损坏。

为确保该电路在RFID频段的应用，对该整流电路在902 MHz和928 MHz的整流效率进行了测试。实验结果显示该二极管整流电路在902 MHz和928 MHz两个频点，当输入功率为20 dBm，负载为 $350\ \Omega$ 时分别达到了69.44%和68.52%的最高整流效率。实验测试结果与仿真的结果依旧保持了较好的一致性，达到了预期效果。

3 结论

本文设计了1个工作频率为915 MHz的肖特基二极管倍压式微波整流电路，利用微带传输线设计方式在尺寸为 $40\ \text{mm}\times 40\ \text{mm}$ ，厚度为1 mm的聚四氟乙烯玻璃纤维板上实现了质量轻、结构紧凑、整流功率动态范围大的整流电路。通过实验测试，整流电路在负载阻值为 $350\ \Omega$ ，输入功率为20 dBm时获得了70.9%的最大直流转化效率，实测结果与设计仿真结果保持了较好的一致性。接下来的研究中将与天线系统进行整合，实现微波整流天线的设计。本文设计电路在高次谐波抑制方面还有一定的提升空间，通过进一步的优化抑制高次谐波，可进一步提高系统的转化效率。另外，为更好地应用于低功率的射频标签(RFID)，还将进一步提高整流电路在低输入功率下的转化效率，争取实现在较宽输入功率范围内的高转化效率，并通过与天线的联合设计有望进一步减小电路尺寸。目前我国在微波整流领域与国外还有一定的差距，将来可以将工作频率进一步提高。微波整流技术拥有在微波输能、无线充电等诸多领域的广泛应用前景，相关的研究工作也极具应用价值。

参考文献:

- [1] Tseng J D,Wang W D,Ko R J. A UHF band RFID vehicle management system[C]// Proc. 2007 IEEE Int. Workshop on Anticounterfeiting,Security,Identification. Xiamen:[s.n.], 2007:390–393.
- [2] Finkenzeller K. RFID Handbook: Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards and Identification[M]. 2nd ed. Chichester,U.K.:Wiley, 2003.
- [3] Koji Kotani,Atsushi Sasaki,Takashi Ito. High-Efficiency Differential-Drive CMOS Rectifier for UHF RFIDs[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2009,44(11):3011–3018.
- [4] Paul T Theilmann,Calogero D Presti,Dylan Kelly,et al. Near Zero Turn-on Voltage High-Efficiency UHF RFID Rectifier in Silicon-on-Sapphire CMOS[C]// IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium,2010. Anaheim,CA,USA:[s.n.], 2010:105–108.
- [5] Brown W C. The history of power transmission by radio waves[J]. IEEE Trans. on Microwave Theory Tech., 1984,32(9): 1230–1242.
- [6] Hansen J,Ahn Chi-Hyung,Chang Kai. A 5.8 GHz high gain, aperture coupled rectenna utilizing a split ring resonator filter[C]// IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium(APSURSI),2010. Toronto,Ontario,Canada: [s.n.], 2010:1–4.
- [7] 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 Electronic Engineering, 2008,6(1):14–16.)
- [8] 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. (GU Jian,LIU Changjun,YAN Lipin,et al. Large Signal Time Domain Simulation and Primary Analysis of RF Diode[J]. Information and Electronic Engineering, 2004,2(4):310–313.)
- [9] Muhammad H Rashid. Microelectronic Circuits: Analysis and Design[M]. Beijing:Science Press, 2002.
- [10] Hewlett Packard. Surface Mount Microwave Schottky Detector Diodes Technical Data:HSMS-286X[R]. [S.l.]:Hewlett Packard Co., 1998.

作者简介:



陈彦龙(1986–), 男, 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。email:cjliu.cn@gmail.com.

李凯(1986–), 男, 河南省商丘市人, 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。

(上接第 63 页)

- [3] Farr E G,Baum C E. Impulse Radiating Antennas,Part III[C]// Ultra-Wideband,Short Pulse Electromagnetics 3. New York: Plenum, 1997:43–56.
- [4] 朱守正,安同一. 天线理论与设计[M]. 北京:人民邮电出版社, 2006. (ZHU S Z,AN T Y. Antenna Theory and Design[M]. Beijing:Post and telecom press, 2006.)
- [5] 黄裕年,任国光. 高功率超宽带电磁脉冲技术[J]. 微波学报, 2002,18(4):90–94. (HUANG Y N,REN G G. High power Ultra-Wideband Electromagnetic pulse technology[J]. Journal of Microwaves, 2002,18(4):90–94.)
- [6] 黎佳. 超宽带 TEM 喇叭天线方向图特性的参数化模拟[C]// 第 3 届全国超宽谱/带、短脉冲电磁学会议论文集. 杭州: [s.n.], 2010:16–19. (LI J. The simulation of the pattern of UWB TEM horn[C]// The third national ultra wide band/strap, short-pulse electromagnetics conference proceedings. Hangzhou:[s.n.], 2010:16–19.)

作者简介:



黎佳(1987–), 男, 湖北省荆门市人, 在读硕士研究生, 研究方向为高功率超宽带电磁脉冲辐射天线。email:lj1987120@yahoo.com.cn.

周海京(1970–), 男, 江苏省盐城人, 博士, 研究员, 主要研究方向为高功率微波。