

一种小型化的 2.45GHz 高效微波整流电路设计与实现

张 彪 刘长军 黄卡玛

(四川大学电子信息学院, 成都 610064)

摘 要: 本文通过 HSMS-282 型肖特基二极管构造了 2.45GHz 微波整流电路。文章首先利用 ADS 对电路进行了原理图和版图的仿真, 分析了所设计的电路在不同负载, 不同输入功率下对于整流效率的影响, 然后对实际加工的电路进行了测试, 验证了设计的正确性和准确性。仿真和实验结果表明, 在一定微波输入功率的条件下, 整流电路在负载较大范围内变化时保持了高整流效率。通过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 17~20 dBm 之间变化时, 最高整流效率均达到了 80% 以上。
关键词: 微波整流; 微波输能; 小型化; 太阳能卫星电站

Design and Realization of a Miniaturized High Efficiency 2.45 GHz Microwave Rectifier

Zhang Biao Liu Changjun and Huang Kama

(School of Electronics and Information Engineering, Sichuan University of China, Chengdu 610064)¹

Abstract: In this paper, a 2.45GHz microwave rectifier based on HSMS-282 Schottky diode is constructed. ADS software is applied to simulating the schematic and layout of the rectifier, and to analyzing the rectifying efficiency at given input microwave power, while the load varies within a certain range. Then, the measurements of the microwave rectifier verified the correctness and accurateness of the simulation. The measured rectifying efficiency is higher than 80% when the input microwave power is between 17 dBm to 20 dBm.
Keywords: Microwave rectification, Microwave power transmission, Miniaturized, Solar satellite power station

1 引言

微波输能作为太阳能产业的一个重要发展方向, 其技术早已在国外进行了相关的理论和实验研究^[1-2], 国内是由林为干教授首先做了相关探讨^[3]。如今, 这一技术已经在国内和国外取得了很大的发展^[4-9], 本文重点对微波整流电路进行了相关的研究和探索。

文中采用微带结构来构造整流电路。微带电路具有重量轻, 体积小等优点, 并且和接收天线之间连接方便。整流电路的核心是微波二极管, 大多数的电路设计多采用单管并联或者双管倍压整流的方

式^[7-9], 文中采用肖特基二极管作为整流二极管, 单管串联方式, 并在最大程度上减少集总元件的数量, 用分布元件代替。既保证整流电路的具有较高的效率, 又实现小型化的目的。

2 微波整流电路原理及设计

2.1 整流电路原理

微波整流电路一般组成有: 输入滤波器、整流二极管、输出低通滤波器、直流负载和输入输出阻抗匹配电路。由于二极管是一种非线性器件, 在整流时会产生高次谐波分

量，为了能够回收这部分能量，由输入和输出滤波器一起将高次谐波约束在它们之间，最终经过二极管也变为直流输出。

在对电路仿真时，采用整体仿真，整体优化的方式。输入功率一定时，分析不同负载对于整流效率的影响。

2.2 整流二极管

选取整流二极管时，主要考虑的参数有：击穿电压 V_{BR} 、零偏置结电容 C_{j0} 和寄生串联电阻 R_S 。通过二极管模型分析可知：击穿电压会限制整流电路的输入功率；为了获得较高的整流效率，必须选择具有较小的结电容的二极管，但结电容过小之后会导致击穿电压的降低，二极管的结电容同时也限制了微波整流电路的工作频率，通常结电容较小的二极管可以工作在更高的微波频率上；寄生串联电阻在很大程度上影响了二极管整流的效率，电阻值的增大会增加其所带来的功率损耗。综合设计要求的高输入功率和高转换效率较，本文选取 Avago 公司的 HSMS-282C 作为整流二极管，具体参数为： $V_{BR}=15\text{ V}$ ， $C_{j0}=0.7\text{ pF}$ ， $R_S=6\Omega$ 。

2.3 匹配电路和输出滤波器的设计

输入端特征阻抗设计为 50Ω ，便于连接标准的信号源。为了隔离输出端直流电压对信号源的影响，在输入端之后需添加隔直电容。为了保证阻抗匹配，在 50Ω 微带线和隔直电容之间需添加一段微带渐变线。

输出滤波器位于二极管之后，由微带线和并联到地的电容组成。实现了不影响直流通过而只反射射频信号的目的。同时通过微带线尺寸的调整，达到二极管输出端与并联电容的阻抗匹配。

2.4 二极管输入阻抗和并联微带线

由于所选用的二极管为 HSMS-282C，其输入阻抗为复阻抗。当微波输入功率增大时，二极管的输入阻抗的实部基本不变而虚部则变化明显，因此有必要在基频时消除虚部的影响，可以在二极管前面并联一段等效为电感的微带线来实现。

当传输线的长度为基频波长的 $1/8$ ，其输入阻抗等效为一个电感。终端短路传输线的输入阻抗和

等效电感的感抗为^[10]

$$jX_L = j2\pi f_0 L = jZ_0 \tan(\beta l) \tag{1}$$

式中： j 为虚数符号； L 为等效电感； f_0 为微波基波频率； Z_0 为传输线特征阻抗； β 为波常数； l 为微带线长度。当 $l=\frac{\lambda_g}{8}$ 时， $L=\frac{Z_0}{2\pi f_0}$ 。通过调节微带传输线的宽度，就可以改变串联的等效电感。

2.5 小型化设计

电路整流电路的面积主要体现在印制板的占用面积上，为了实现电路的小型化，对电路中的微带线进行适当的弯曲，从而实现效果不变差而占用面积大为缩小。本文设计的整流电路的面积仅为 $2\text{cm}\times 2\text{cm}$ 。

2.6 电路的整体仿真

电路仿真采用的是 Agilent 公司的 Advanced Design System 2009 仿真程序。仿真分为原理图仿真与 Momentum 仿真两部分。先在原理图下进行设计与优化，再生成版图进行 Momentum 仿真，最后是联合仿真的设计与优化。在此过程中，整个电路作为一个整体，对所有相关的变量均同时进行优化，使整个电路达到最佳整流效率。

3 实验结果及分析

电路板实物图如图 1 所示，加工采用的介质基板为 F4B-2 聚四氟乙烯玻璃纤维双面覆铜板。基板厚度 1mm ，介电常数 $\epsilon_r=2.65$ ，损耗角正切值为 0.002 ，表面覆盖的铜板厚度为 $18\mu\text{m}$ 。

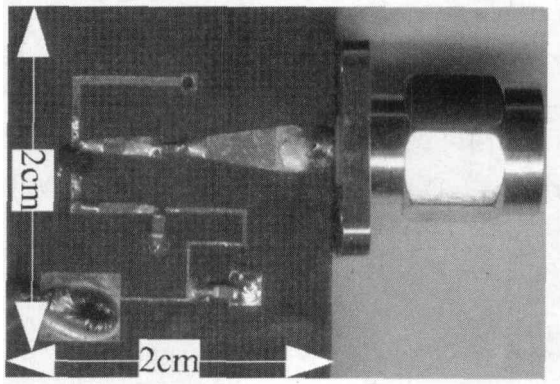


图 1 整流电路实物图

电路测试中，功率源采用的是 Agilent E8267C 矢量信号源，直流电压测量采用的是 Agilent 34970A 数据采集器。整流电路负载采用可调电阻箱。整流电路的整流效率为

$$\eta = \frac{P_{DC}}{P_{MW}} \times 100\% = \frac{V^2}{P_{MW} R} \times 100\% \quad (2)$$

式中： P_{DC} 为直流输出功率； P_{MW} 为微波输入功率； V 为直流输出电压； R 为直流负载。

图 2(a)给出了当输入功率为 20dBm 时不同负载下的仿真和测量的整流效率变化曲线。可以看出，当负载在一定的范围内增加时，整流效率会随之增加。在此功率下，仿真和实测的整流效率随负载的变化趋势一致，说明了仿真的正确性，同时可以看出，实测结果明显优于仿真结果，证明了仿真对于电路设计具有一定的参考价值。

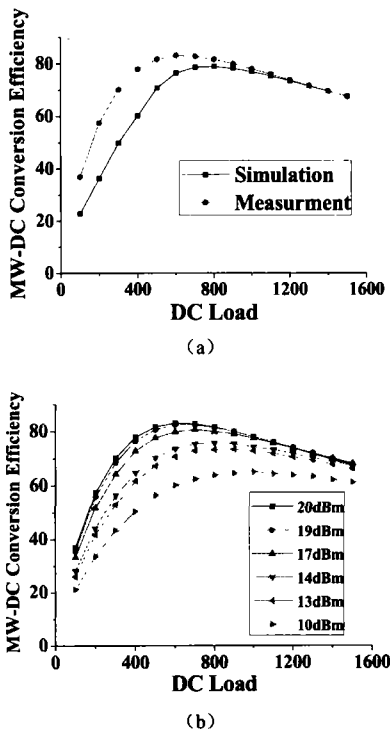


图 2 整流效率随负载的变化曲线

图 2(b)给出了当输入微波功率 10~20dBm，负载 100Ω~1500Ω 时的整流效率的测量结果。当输入功率在 13~20dBm 内，负载在 600Ω~1200Ω 之间时，均获得了大于 70% 的整流效率：当输入功率为 17~20dBm 之间，负载为 500Ω~800Ω 时，整流效率均大于 80%，最高整流效率达到了 83.07%，此时的输入功率为 20dBm，负载为 600Ω。由图中还可以看出，当输入功率变小时，整体效率开始下降，且效率最高时的最佳负载值在增大。这是因为二极管最佳工作电压一致，当输入功率减小时，只有负载增大才能保证二极管处于最佳工作电压。

4 结论

本文采用 HSMS-282 来构造了一个 2.45GHz 的微波整流电路，达到了 83% 以上的最高整流效率，且在多次大量的加工之后验证了这一设计的可重复性，同时进行了多次长时间的实验测试，确保了其稳定性和可靠性。在电路中，采用的是不同于以往的串联二极管的方式，这一改变比相同功率下其他连接方式的电路的整流效率提升了 10% 左右。为了电路能够应用在太阳能卫星电站时，需要考虑大批量加工时的成本问题以及大量应用时的整流电路的自身重量问题，因此，本文对电路做了小型化处理，结果证明是非常成功有效的。

目前，国内的微波输能技术还正处在一个积极探索的过程中，作为未来能源产业的一项重要技术之一，相关的研究工作是极具发展前景和应用价值的。

参考文献

- [1] Brown W C. Experiments in the transportation of energy by microwave beam. *IRE International convention record*, 1964, 12(2) :8-17.
- [2] Brown W C, Kim C K. Recent process in power reception efficiency in a free-space microwave power transmission system. *Microwave symposium digest*, 1974 , 74(1):332-333.
- [3] 林为干,赵愉深,文舸一,等. 微波输能,现代化建设的生力军. 科技导报,1994, 15(3):31-34. (Lin Weigan , Zhao Yushen, Wen Geyi , et al. Microwave power transmission, new force of modernization . *Technology review*, 1994, 15(3):31-34)

- [4] Chi H A, Seong W O, Kai C. A high gain rectifying antenna combined with reflectarray for 8 GHz wireless power transmission. *Antennas and propagation society international symposium*, 2009,1-4.
- [5] Yu J R, Muhammad F F, Kai C. A compact dual-frequency rectifying antenna with high-orders harmonic-rejection. *IEEE trans. antennas propag.*, 2007, 55(7):2110-2113.
- [6] Merabet B, Costa F, Takhedmit H. A 2.45 GHz localized elements rectenna. *IEEE international symposium*, 2009,419-422.
- [7] Liu C, Huang K, He Q. A 2.45 GHz rectifying circuit with enhanced range of input power and load. *Asian pacific microwave conference*, 2008,1-4.
- [8] 罗俊,何其娟,刘长军. 一种 2.45GHz 微波二极管整流电路. 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 , *Information and electric engineering*, 2008, 6(1):14-16)
- [9] He Q, Liu C. An enhanced microwave rectifying circuit using HSMS-282. *Microwave and optical technology letters*, 2009, 51(4):1151-1153.
- [10] 刘长军,黄卡玛,闫丽萍. 射频通信电路设计. 北京:科学出版社, 2005. (Liu Changjun, Huang Kama, Yan Liping. RF communication circuit design . Beijing: Science Press, 2005)

作者简介:

张彪, 男, 硕士研究生, 主要研究领域为微波整流天线, 微波电路等;

刘长军, 男, 教授、博士生导师, 主要研究领域为电磁场与微波技术。