

一种高效的 2.45 GHz 二极管阵列微波整流电路^{*}

张 彪, 刘长军

(四川大学 电子信息学院, 成都 610064)

摘 要: 采用 4 只 HSMS 282 肖特基二极管阵列, 对大功率微波整流电路进行了研究。构造了基于微带线结构的 2.45 GHz 高效微波整流电路, 将微波整流单元电路的输入功率提升到 33 dBm。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 27.0~31.7 dBm 之间变化时, 最高整流效率均达到了 60% 以上, 当微波输入功率为 30 dBm 时, 微波整流电路效率达到了 63.3%。

关键词: 微波整流; 微波输能; 二极管阵列; 太阳能卫星电站

中图分类号: TN455

文献标志码: A

doi: 10.3788/HPLPB20112309.2443

微波输能技术在国外已经开始了相关理论和实验研究^[1-2], 而林为干教授则在国内首先探讨了该技术^[3]。目前, 微波输能技术在国外得到了快速发展^[4-6], 国内也开展了相关工作的研究^[7-9]。微带电路具有重量轻、体积小等优点, 且易于和微带天线整合。本文所设计的微波整流电路就采用了微带结构, 其中整流的核心是微波二极管。在以往的基于固态二极管的整流电路的设计中, 输入功率都小于 20 dBm, 所以大多数电路采用的都是单管并联或双管倍压整流的方式^[7-9]。为了适应更大的微波功率输入的要求, 本文采用了 4 只二极管构成阵列的方式, 在提升微波输入功率的条件下实现了高效率的微波整流。

1 微波整流电路的原理及设计

1.1 微波整流电路原理

微波整流电路通常由输入滤波器、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组成。二极管是一种非线性器件^[10-11], 在整流时会产生高次谐波分量。为了使这部分能量不丢失, 输入和输出滤波器一起将高次谐波约束在它们之间, 回收谐波的能量, 最终也变为直流输出。输入滤波器主要作用是滤反射二极管整流产生的高次谐波。

在仿真时, 可以在整个电路搭建好以后整体进行仿真, 也可以对其中的线性部分单独进行优化仿真, 以达到更好的效果。通过整体仿真研究, 在输入微波功率一定的条件下, 对输入和输出阻抗匹配电路进行优化设计, 就可使微波整流电路具有较高的整流效率。

1.2 微波二极管的选择

对于一个整流电路中的核心器件来说, 选取二极管时主要考虑的参数为击穿电压 V_{BR} 、零偏置结电容 C_{j0} 和寄生串联电阻 R_S 。击穿电压限制了整流电路的输入功率, 为了获得较高的整流效率, 则必须选择具有较小的结电容的二极管, 但结电容过小又会导致击穿电压的降低, 结电容还会限制微波整流电路的工作频率。通常, 结电容较小的二极管可以在更高的微波频率上工作, 而寄生串联电阻对二极管整流的效率影响很大, 电阻值增加会导致功率损耗增大。考虑设计所要求的输入功率和转换效率较高等因素, 本文选取 Avago 公司的 HSMS-282C 作为整流二极管, 具体参数为 $V_{BR}=15\text{ V}$, $C_{j0}=0.7\text{ pF}$, $R_S=6\text{ }\Omega$ 。

HSMS-282C 的封装为 SOT-323, 内部为 2 只二极管串联结构。为实现较大微波功率输入, 在设计时将 2 只 HSMS-282C 并联, 这样在增加其耐压能力的同时, 又使串联电阻不会明显增大, 从而达到在效率不下降的情况下提升输入功率的目的。采用 4 只二极管构成的阵列阻抗与单支二极管接近, 因此可以利用单管微波整流电路原型进行进一步优化设计。

^{*} 收稿日期: 2010-09-10; 修订日期: 2011-02-25

基金项目: 国家自然科学基金项目 (60971051)

作者简介: 张 彪 (1987—), 男, 硕士研究生, 主要从事微波整流天线研究; zhb-365@163.com。

通信作者: 刘长军 (1973—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电磁场与微波技术研究; cjliu@scu.edu.cn。

1.3 匹配电路和输出滤波器的设计

输入端设计成 $50\ \Omega$ 的匹配输入端, 便于连接标准的信号源。为了隔离整流输出直流电压对信号源的影响, 在输入端之后添加隔直电容, 采用 $18\ \text{pF}$ 贴片电容(规格 0603)。在输入端和隔直电容之间添加一段微带线, 通过调整微带线长度和两端的宽度, 达到同输入端的阻抗匹配。

输出低通滤波器由一段微带线和一个并联电容组成, 达到使直流分量通过而将高频谐波分量反射回去的目的。通过调整微带线的尺寸, 使其在组成低通滤波器的同时, 达到二极管输出与电容之间的阻抗匹配。

1.4 二极管输入阻抗和串联微带线

二极管 HSMS-282C 的输入阻抗为复阻抗。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, 一个简单有效的办法就是在二极管之后串联一个射频电感^[9]。

集总射频电感器件在高频时特性会变差, 对高次谐波的影响会比较大, 有鉴于此, 采用一段分布参数的传输线来替代集总参数的电感。传输线长度为基频波长的 $1/8$, 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^[12]

$$jX_L = j2\pi f_0 L = jZ_0 \tan(\beta l) \quad (1)$$

式中: 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 $l = \lambda_g/8$ 时, $L = Z_0/2\pi f_0$ 。通过调节微带传输线的宽度, 就可以改变串联的等效电感。

1.5 整流电路的整体仿真

整流电路仿真采用 Agilent 公司的 Advanced Design System 2009 软件。仿真设计采用原理图仿真与 Momentum 仿真结合的方式。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。设计与优化时, 将整个电路作为一个整体, 对相关变量进行优化, 使整个电路达到最佳整流转换效率。

2 实验结果及分析

在电路整体设计完成以后, 加工采用的是 F4B-2 聚四氟乙烯玻璃纤维双面覆铜板。基板厚度 $1\ \text{mm}$, 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 $18\ \mu\text{m}$ 。电路设计版图及微带尺寸如图 1 所示。

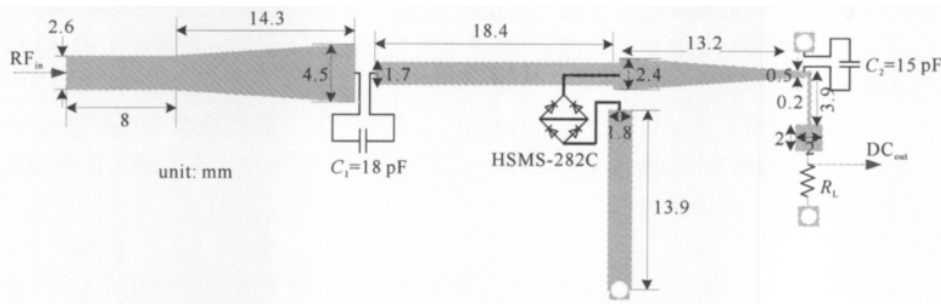


Fig. 1 Layout of proposed rectifier

图 1 微波整流电路设计版图

实际电路的测试采用 $2.45\ \text{GHz}$ 标准微波功率源, 微波源输出端口的频率和功率测量采用 R&S FSP7 频谱分析仪。整流电路负载采用可调电阻箱, 输出电压用直流电压表测量。整流电路的整流效率为

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

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 $30\ \text{dBm}$ 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。虽然仿真结果和实测结果之间还存在着一定的差距, 但仿真基本上反映了整流效率随负载的变化趋势。图 2(b) 给出了输入微波功率为 $26 \sim 33\ \text{dBm}$, 负载为 $100 \sim 700\ \Omega$ 时的整流效率的测量结果。当输入功率为 $26 \sim 33\ \text{dBm}$, 负载为 $200 \sim 500\ \Omega$ 时, 均获得了大于 50% 的整流效率; 当输入功率为 $27.0 \sim 31.7\ \text{dBm}$, 负载为 $350 \sim 550\ \Omega$ 时, 整流效率均大于 60% 。最高整流效率达到了 63.3% , 此时的输入功率为 $30\ \text{dBm}$, 负载为 $450\ \Omega$ 。

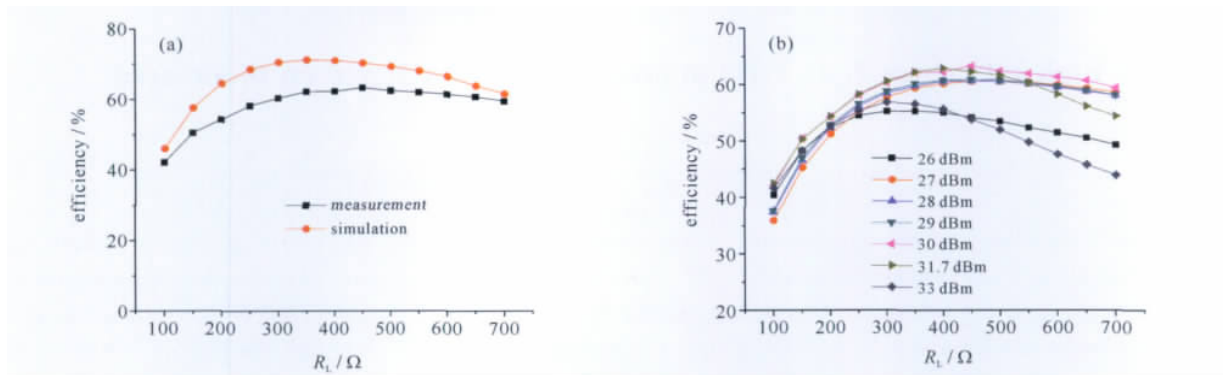


Fig. 2 MW-DC efficiency with respect to the load

图2 整流效率随负载的变化

3 结 论

本文通过构建二极管阵列,成功设计出一种用于较大微波输入功率的高效的整流电路。该整流电路提升了微波输入功率,保持了微波整流高效率。由于二极管阵列等效阻抗与单支二极管阻抗相当,基于二极管阵列的整流电路设计可以沿用成熟的单管整流电路,提高了整流电路设计的可靠性。对微波输能系统而言,当进行大功率能量传输时,使用基于二极管阵列的整流电路可以显著减少整流电路的数量,便于系统设计与实现,同时也能减少由于电路复杂性所引起的功率损耗,提升传输效率。

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] Brown W C, Kim C K. Recent process in power reception efficiency in a free-space microwave power transmission system[J]. *Microwave Symposium Digest*, 1974, **74**(1):332-333.
- [3] 林为干,赵榆深,文炯一,等.微波输能,现代化建设的生力军[J]. *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[C]//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[J]. *IEEE Trans Antennas Propag*, 2007, **55**(7):2110-2113.
- [6] Merabet B, Costa F, Takhedmit H. A 2.45 GHz localized elements rectenna[C]//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[C]//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[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. *Information and Electric Engineering*, 2008, **6**(1):14-16)
- [9] He Q, Liu C. An enhanced microwave rectifying circuit using HSMS-282[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2009, **51**(4):1151-1153.
- [10] 余稳,聂建军,郭杰荣,等. PIN 二极管的高功率微波响应[J]. *强激光与粒子束*, 2000, **14**(2):299-301. (Yu Wen, Nie Jianjun, Guo Jierong, et al. Response of the PIN diode to the high power microwave. *High Power Laser and Particle Beams*, 2000, **14**(2):299-301)
- [11] 黄建仁,王秩雄,陈绳乾,等.肖特基二极管整流的计算与测量[J]. *强激光与粒子束*, 2007, **19**(11):1887-1890. (Huang Jianren, Wang Zhixiong, Chen Shengqian, et al. Theoretical and experimental analysis of Schottky barrier diode rectification. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, **19**(11):1887-1890)
- [12] 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. Beijing: Science Press, 2005)

A high efficiency 2.45 GHz microwave rectifier based on diode array

Zhang Biao, Liu Changjun

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

Abstract: A microwave rectifier is an essential part of a microwave power transmission system. In order to maintain high rectifying efficiency at a high input microwave power level, a novel microstrip microwave rectifier based on diode array is presented in this paper. The microwave input power was enhanced to 33 dBm at 2.45 GHz. The simulated and measured results show the proposed microwave rectifier presents a reasonable efficiency at given input microwave power, while the load varies within a certain range. The rectifying efficiency is higher than 60% when the input microwave power is between 27 dBm to 31.7 dBm. The maximum efficiency of 63.3% is achieved at 30 dBm input microwave power.

Key words: microwave rectification; microwave power transmission; diode array; solar satellite power station