

# 一种基于肖特基二极管的大功率微波整流电路

张 彪,刘长军,江 婉,郁成阳

(四川大学电子信息学院,四川成都 610064)

**摘 要:** 为满足微波输能的大功率整流要求,提出了一种结合功分器和二极管阵列的整流电路,来提升微波整流电路的功率容量.该方法保持了较高整流效率,提升了整流电路的功率容量.根据需要调节功分器的分支数量,扩展了功率容量的覆盖范围.该电路结构紧凑,形式灵活,简捷高效.依此方法设计的整流电路,当输入功率在 36dBm ~ 42dBm 时,均取得了大于 60% 的实测整流效率.在输入功率为 41dBm 时,整流效率达到了 68%.电路的最高功率容量达到了 43dBm.

**关键词:** 微波输能;微波整流;功分器

**中图分类号:** TN455      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2013) 09-1854-04

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>

**DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2013.09.030

## A Large Power Microwave Rectifier Based on Schottky Diodes

ZHANG Biao, LIU Chang-jun, JIANG Wan, YU Cheng-yang

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

**Abstract:** A novel microwave rectifier based on Schottky diodes, which applies power divider and diodes array to maintain high rectifying efficiency and large power capacitance, is presented. The proposed structure flexibly reaches different power capacitance requirements with a variation of the branch number of the power divider. The rectifier is compact, simple and high efficient. The microwave rectifying efficiency is higher than 60% when the input microwave power is between 36dBm to 42dBm at 2.45GHz. The highest microwave rectifying efficiency reaches 68% at 41dBm input microwave power. The maximum power capacitance achieves 43dBm.

**Key words:** microwave power transmission (MPT); microwave rectifying; power divider

## 1 引言

微波输能成为新能源领域的一个重要研究方向,与其相关的科学研究已经广泛开展<sup>[1,2]</sup>.微波输能以微波为载体可以实现能量的无线传输,拓展了微波作为信息载体的功能,可望在航空航天领域首先得到应用.上世纪 50 年代至今,国外已经做了大量的理论研究和实验验证<sup>[3~5]</sup>,而国内是近年来才开展了这项工作,属研究起步阶段.

整流电路作为微波输能的重要组成部分,国内外均对此开展了研究.基于肖特基二极管的微波整流电路功率容量一直处于 30dBm 以内,无法满足一些大功率应用的需要<sup>[2~9]</sup>.同时,整流电路功率容量的提高可以使整流天线在有限的面积上接收转化更多的能量.

本文提出了一种具有普遍适用性的大功率微波整

流电路的方法,并在 2.45GHz 设计实现了大功率微波整流电路.通过测试发现,整流电路的最大功率容量达到了 43dBm,最高效率出现在输入功率 41dBm 时,微波整流效率达到了 68%.

## 2 大功率整流电路的基本原理与设计

大功率整流电路的基本原理是采用功分器对输入功率进行分配,在每一路微波整流电路上采用肖特基二极管阵列,使每一个支路的整流电路都能安全高效的工作.在不降低整流效率的前提下大幅度的提升整流电路的功率容量,实现大功率微波整流.

大功率整流电路的原理框图如图 1 所示,可根据实际所需的功率容量和电路尺寸的要求对功分器的分支数量进行调整.选择不同功率容量的小功率整流电路,在整流电路的输出端直接进行直流合成.该方法具有广泛

的适用性和良好的可拓展性。

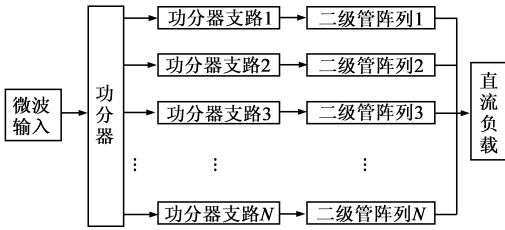
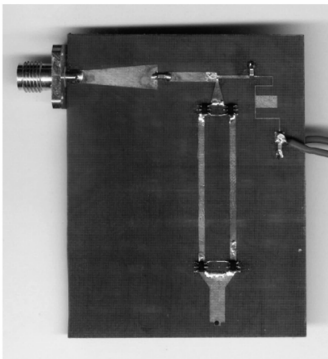


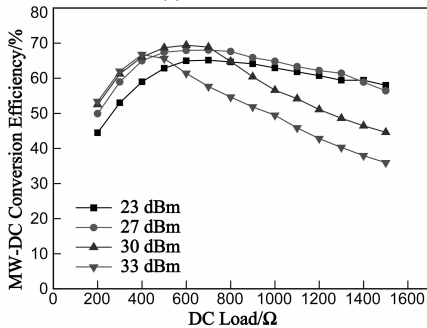
图1 大功率整流的基本原理

## 2.1 整流电路设计

整流单元我们选用较为成熟的整流电路设计<sup>[10]</sup>，如图 2(a)所示。这一电路具有功率容量较大，整流效率高，电路紧凑的特点。该电路基于 4 支单片肖特基二极管桥 HSMS-282P 来实现整流，其中每片肖特基二极管桥 HSMS-282P 的内部封装 4 个肖特基二极管。因此，整个整流阵列包含 16 个肖特基二极管，提升了整流电路功率容量。



(a) 整流电路单元



(b) 整流效率随负载的变化

图2 整流电路单元及测量结果

单个整流电路的功率容量为 33dBm，整流效率在较大范围内保持在 60% 以上，如图 2(b)所示。当输入功率在 23dBm ~ 27dBm 时，整流效率随负载的变化较为平坦，但输入功率增加至 30dBm 及 33dBm 时，整流效率在最高点后迅速下降。随着输入功率的增加，整流电路输出电压和二极管上的电流随之增大。二极管的直流偏压偏离了最佳值，二极管自身的功率损耗增加，导致温

度升高，引起整流电路效率快速下降。此现象在较高输入微波功率时更为明显。

基于二极管阵列的整流电路由于受寄生参数的影响，不适合使用更多的肖特基二极管组成阵列进一步提升功率容量。

通过与功分器的级联，可以将大功率整流电路的整体功率容量提升至 43dBm。由于功分单元和整流单元都是共用地的微带结构，8 个整流单元的直流输出可以直接并联。单个整流单元的最佳负载阻抗为 600Ω，8 路并联后理论最佳负载阻抗为 75Ω 左右。

## 2.2 9dB 功分器的设计

为了提升整体功率容量同时兼顾电路的排布，本文采用 9dB 的微带功分器，共 8 路输出。由于功分器的分路较多，输入和输出都需要匹配到 50Ω，考虑到整流电路的面积，选用“米”字型排布的方式，具体设计图如 3 所示。中心为功分器的输入端，采用同轴接口从背面馈入。中间的八条微带线的特征阻抗为 141Ω，长度为  $\lambda/4$ ，最外面的微带线特征阻抗为 50Ω，通过仿真设计及实验验证，实现了良好的阻抗匹配和功率分配。

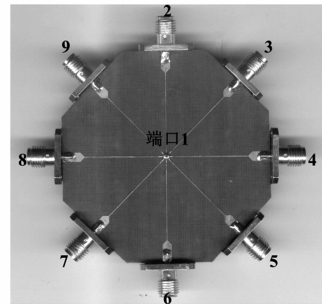


图3 9dB功分器

图 4 和图 5 是功分器的测量结果。该结构很好的实现了功率的等幅分配。图 4 中，输出端口 2 ~ 9 到输入端口 1 的传输系数均在 -9dB 附近，最大插入损耗小于 0.18dB。图 5 可以看出，在 2.45GHz 时，输入端口 1 的反射系数小于 -25dB，端口 3 ~ 9 到端口 2 之间的隔离度均高于 18dB，其余任意两个输出端口之间的隔离度也均在 18dB 以上，实现了很好的端口之间的隔离。

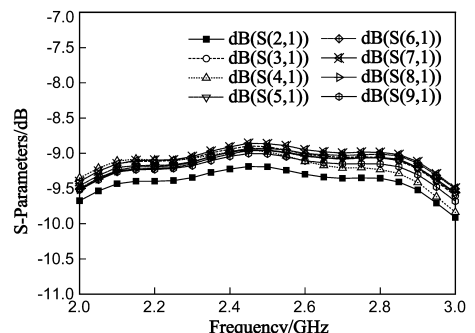


图4 功分器传输系数

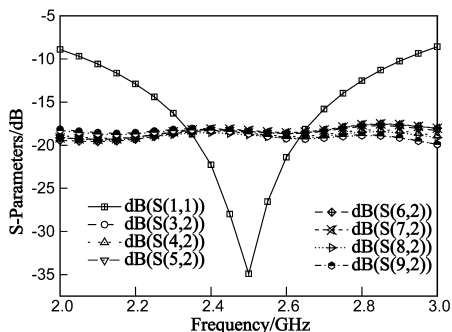


图5 功分器反射系数和隔离度

### 3 测试结果及分析

功分单元和整流单元设计完成后进行加工. 采用 F4B-2 聚四氟乙烯玻璃纤维板, 基板厚度 1mm, 介电常数  $\epsilon_r = 2.65$ , 损耗角正切值为 0.002. 最终整体的电路设计版图及电路尺寸如图 6 所示.

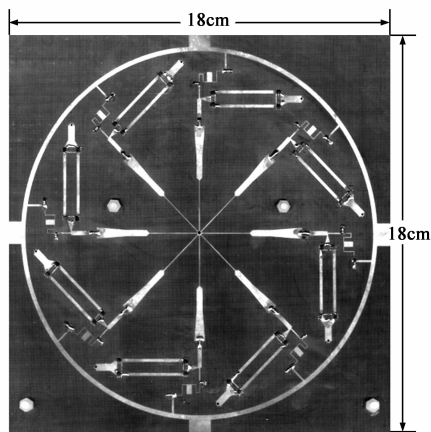


图6 整流电路

#### 3.1 整流电路的温度分布

整流电路中的二极管在工作的时候温度升高. 为了检测二极管在电路中是否正常工作, 在输入功率为 30dBm 的时候对电路的温度进行监测. 工作 30 分钟后的温度分布图像, 如图 7 所示. 图中的白色部分为高温

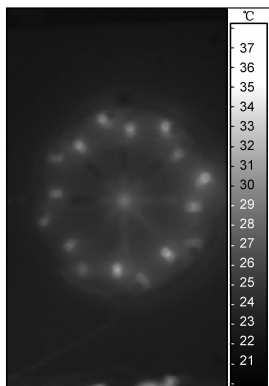


图7 温度分布

区域, 对比实物图, 热源为二极管. 温度在二极管上的分布近似均匀, 说明二极管工作状态近似, 最高温度为 32.8°C, 此时对二极管的性能影响很小, 二极管工作正常.

#### 3.2 整流电路的效率

电路测试采用 2.45GHz 标准微波功率源, 最大输出功率 100W, 微波源输出功率测量采用 AV2433 功率计通过 20dB 定向耦合器进行实时监测. 整流电路负载采用大功率电阻, 输出直流电压 Agilent 34970A 数据采集器进行记录. 整流电路的整流效率为

$$\eta = \frac{P_{DC}}{P_{MW}} \times 100\% = \frac{(V_{DC})^2}{R_{Load}} \times \frac{1}{P_{MW}} \times 100\% \quad (1)$$

式中:  $P_{DC}$  为输出直流功率;  $P_{MW}$  为输入微波功率;  $V_{DC}$  为输出直流电压;  $R_{Load}$  为负载电阻.

图 8 是在不同负载时, 电路的整流效率随输入功率的变化曲线. 在输入功率为 39dBm ~ 41dBm 之间, 负载在两个阻值时, 均有高于 65% 的整流效率. 当负载减小时, 效率下降明显. 最高效率为 68%, 此时负载为 76.5Ω 时, 输入功率 41dBm. 当输入功率达到 43dBm 时, 二极管功率容量能够满足, 整流效率降至 55%.

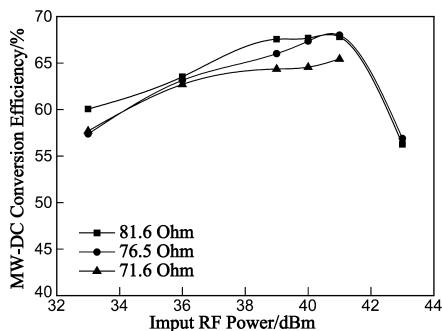


图8 不同负载时整流效率随输入功率的变化

### 4 结论

本文提出了一种通过将功分器和二极管阵列整流电路结合的方法, 来提升微波整流电路功率容量. 文中设计一种 9dB 功分器, 将单个电路的功率容量提升到了 43dBm, 相较以前整流电路的功率容量有了数量级的提升, 验证了该方法的可行性和可靠性. 实验结果显示本文提出的方法具有很高的合成效率, 不仅提升了整流电路的功率容量, 而且对整体效率的影响很小. 该方法是一种提高整流电路性能的有效方法, 可望在大功率微波输能系统中得到良好的应用. 通过改变功分器和整流电路的组合方式, 可以灵活的适用于不同功率要求的系统之中. 下一步的研究中, 将该方法应用于整流天线的设计, 实现更大功率的微波能量传输.

## 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] 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.
- [3] Merabet B, Costa F, Takhedmit H. A 2.45 GHz localized elements rectenna [A]. IEEE International Symposium [C]. Beijing: MAPE, 2009. 419 - 422.
- [4] Takhedmit H, Cirio L, Merabet B, Allard B, Costa F, Vollaie C, Picon O. Efficient 2.45 GHz rectenna design including harmonic rejecting rectifier device [J]. Electronics Letters, 2010, 46(12): 811 - 812.
- [5] Tsunayuki Y, Kazuhiro F, Minoru S, Shigeji N. Design of RF-DC conversion circuit composed of chip devices [A]. Asian Pacific Microwave Conference [C]. Macau: AMPC, 2008. 1 - 4.
- [6] Liu C, Huang K, He Q. A 2.45GHz rectifying circuit with enhanced range of input power and load [A]. Asian Pacific Microwave Conference [C]. Beijing: AMPC, 2008. 1 - 4.
- [7] 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 [J]. Information and Electric Engineering, 2008, 6(1): 14 - 16. (in Chinese)
- [8] He Q, Liu C. An enhanced microwave rectifying circuit using HSMS-282 [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2009, 51(4): 1151 - 1153.
- [9] 张彪, 刘长军. 一种高效的 2.45GHz 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 B, Liu C. A high efficiency 2.45GHz microwave rectifier based on diode array [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(9): 2443 - 2446. (in Chinese)
- [10] Zhang B, Zhao X, Yu C, Huang K, Liu C. A power enhanced high efficiency 2.45GHz rectifier based on diode array [J]. Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 2011, 25(5 - 6): 765 - 744.

## 作者简介



张 彪 男. 1987 年 2 月出生于陕西省西安市. 2009 年 9 月, 进入四川大学电磁场与微波技术专业, 在读博士, 主要研究方向为微波电路与天线技术.

E-mail: zhb-365@163.com



刘长军(通信作者) 男. 1973 年 4 月生于河北省. 教授, 博士生导师. 2000 年, 获得四川大学工学博士学位. 现任教于四川大学电子信息学院, 主要从事电磁场与微波技术方面的研究工作.

E-mail: cjliu@scu.edu.cn