

基于肖特基二极管的 S 波段微波整流电路研究

刘长军 张彪

(四川大学电子信息学院, 成都 610064)

cjliu@scu.edu.cn zhb-365@163.com

摘要: 通过对肖特基二极管理论模型的分析, 设计了小功率微波整流电路。在此电路基础上, 为了扩展整流电路的功率容量, 提出了二极管阵列的设计, 并完成了中小功率的微波整流电路。在 S 波段基于单只二极管的微波整流电路最高效率为 83.3%, 基于二极管阵列的中小功率微波整流电路最高效率分别为 69.4% 和 68%。微波整流电路实现 10 dBm 至 43 dBm 的功率覆盖范围, 提升了微波整流电路的应用价值。

关键词: 肖特基二极管, 微波整流电路, 二极管阵列

Research on S-Band Microwave Rectifiers Based on Schottky Diodes

Liu Changjun, Zhang Biao

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

Abstract: In this paper, a Schottky diode equivalent circuit model is constructed and analyzed to design microwave rectifiers. A low power rectifier, two medium power rectifiers are designed based on the circuit model. The maximum conversion efficiencies of these rectifiers are 83.3%, 69.4% and 68% at different power level, respectively. The three rectifying circuits achieved 10dBm ~ 43dBm power capacitance, and enhanced the applications of microwave rectifiers.

Keywords: Schottky diode, Microwave rectifier, Diode array

1 引言

微波整流电路是微波无线能量传输^[1]的关键部件, 用于将微波能量转化为直流能量以供后端系统直接使用。目前, 微波整流电路的研究主要集中在ISM 频段, 包括 915 MHz^[2], 2.45 GHz^[3-5]以及 5.8 GHz^[6]。其中, 2.45 GHz 微波整流电路能够提供更为实用的直流输出电压以及更大的功率容量^[7]。

目前, 微波整流电路的研究大多数是基于小功率情况, 但是实际应用通常要求功率容量具有较大的功率容量和动态范围。因此, 本文从基于单只二极管的微波整流电路出发, 通过对单管理论模型的分析, 设计出高效率的小功率微波整流电路。以此为基础, 提出二极管阵列的设计思路, 并成功设计

了中小功率微波整流电路。

2 肖特基二极管模型及理论分析

图 1 为单只肖特基二极管的等效电路模型。其中结电容 C_j 和结电阻 R_j 均为非线性器件, 当二极管的直流偏置建立, 在二极管上的结电压如公式(1)所示。

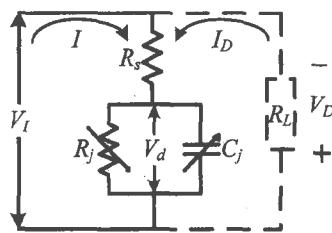


图 1 二极管等效电路模型

基金项目: 国家自然科学基金 61271074 和民用航天预研项目资助

$$V_j = \begin{cases} -V_{j0} + V_{j1} \cos(\omega t - \varphi), & V_j < V_{bi} \\ V_{bi}, & V_j > V_{bi} \end{cases} \quad (1)$$

$$Z_d = \frac{\pi R_s}{\cos \theta_{on} \left(\frac{\theta_{on}}{\cos \theta_{on}} - \sin \theta_{on} \right) + j \omega R_s C_j \left(\frac{\pi - \theta_{on}}{\cos \theta_{on}} + \sin \theta_{on} \right)} \quad (2)$$

^[6] V_{j1} 和 V_{j0} 分别为二极管结电压的基频和直流成分, V_{bi} 为二极管自偏置导通电压。当二极管结电压大于 V_{bi} , 二极管正向导通, 导通角为 θ_{on} 。二极管结电压与入射波的相位差为 φ 。

二极管的输入阻抗为如公式(2)所示。为了提升整流效率, 需要匹配二极管的阻抗。二极管虚部为容性, 因此可以通过电感或等效微带线来抵消。

$$j \frac{\pi R_s}{\omega R_s C_j \left(\frac{\pi - \theta_{on}}{\cos \theta_{on}} + \sin \theta_{on} \right)} = j \omega L \quad (3)$$

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。通过微带线理论, 可以计算出等效微带线的宽度。经过仿真优化, 二极管得到良好的匹配, 取得高整流效率。

3 微波整流电路设计与测试结果

电路板设计与加工的基板均采用的 F4B-2 聚四氟乙烯玻璃纤维双面覆铜板。基板厚度 1 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为 18 μm 。电路中的二极管为 HSMS-282 型肖特基二极管。

3.1 基于单只二极管小功率整流电路设计

图 2 为小功率整流电路实物图。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。图 3 给出了当输入微波功率 10 dBm~20 dBm, 负载 100Ω ~ 1500Ω 时的整流效率的测量结果。当输入功率在 13 dBm~20 dBm 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 dBm~20 dBm 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 20 dBm, 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。

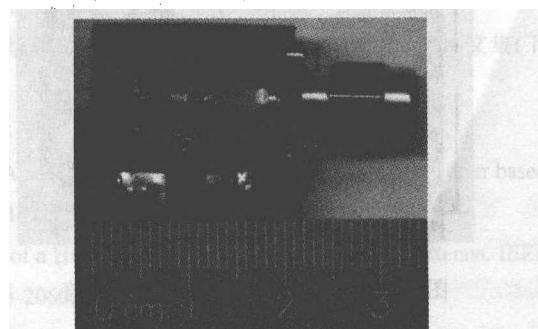


图 2 小功率微波整流电路实物图

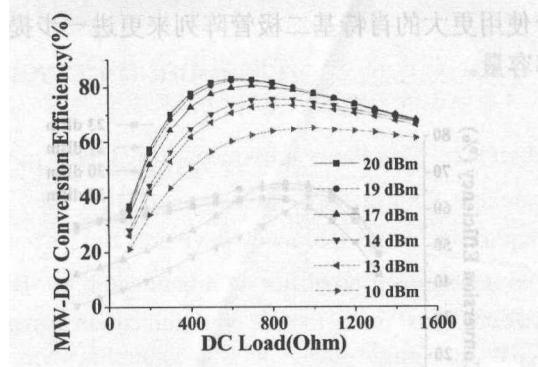


图 3 不同输入功率下整流效率随负载的变化曲线

3.2 基于二极管阵列的中小功率整流电路设计

二极管整流阵列如图 4 所示, 阵列包括 16 只 HSMS-282 肖特基二极管和两根 $\lambda_g/2$ 微带线。在基频时, 微带线两端的阻抗特性一致, 不影响阵列在基频的性能, 又有利于阵列的散热。

图 5 为基于此阵列的微波整流电路, 电路具有功率容量较大, 整流效率高, 电路紧凑的特点。电路的测试结果如图 6 所示。单个整流电路的功率容量为 33 dBm, 此功率下能够实现的最高整流效率为 66.8%, 电路在较大的功率范围内和较宽的负载范围内, 均能保持 60% 以上的整流效率。最高效率为 69.4%, 此时输入功率 30 dBm, 负载 600Ω 。当输入功率增大时, 最高效率时的最佳负载在不断减小, 同时, 效率和负载的关系曲线也更加尖锐。

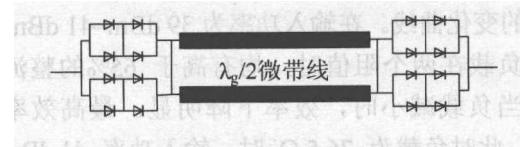


图 4 肖特基二极管阵列^[5]

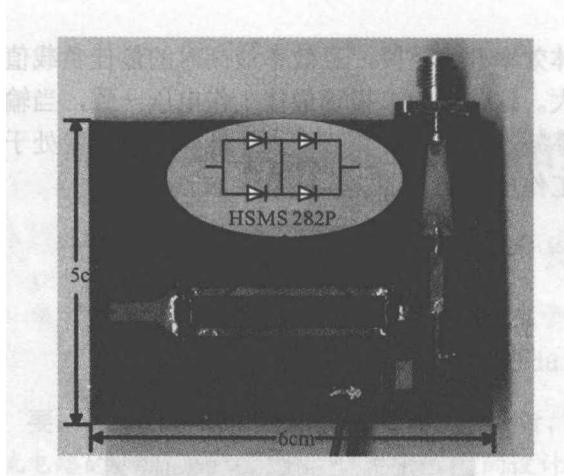


图 5 基于二极管阵列的微波整流电路

二极管阵列在一定程度上提升了整流电路的功率容量，但由于寄生参数的影响和散热问题，不适合使用更大的肖特基二极管阵列来更进一步提升功率容量。

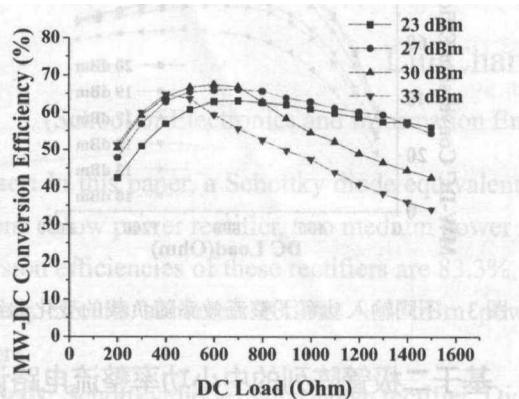


图 6 整流效率随负载的变化曲线

3.3 中功率整流电路设计

在图 5 所示电路的基础上，为了进一步提升电路的功率容量，同时保证电路的高效性，引入了多路功分器，通过功分器和整流电路的级联，实现了功率容量的提升。

图 7 为本文所设计的中功率整流电路实物图，电路由一个 9 dB 功分器和 8 个中小功率整流电路单元组成，整体电路的功率容量相对于单个单元电路提升了 9 dB。

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 39 dBm~41 dBm 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 76.5 Ω 时，输入功率 41 dBm。

当输入功率达到 43 dBm 时，二极管功率容量能够满足，但整流效率已降至 55%。

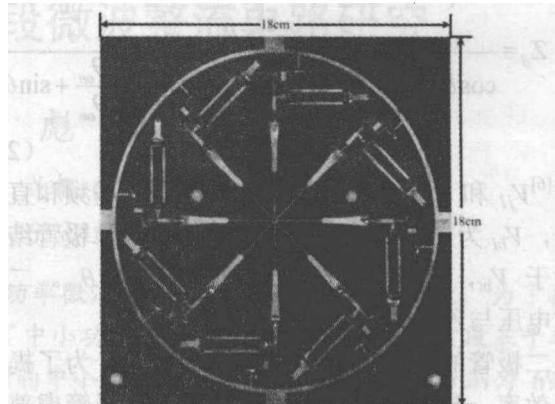


图 7 中功率整流电路实物图

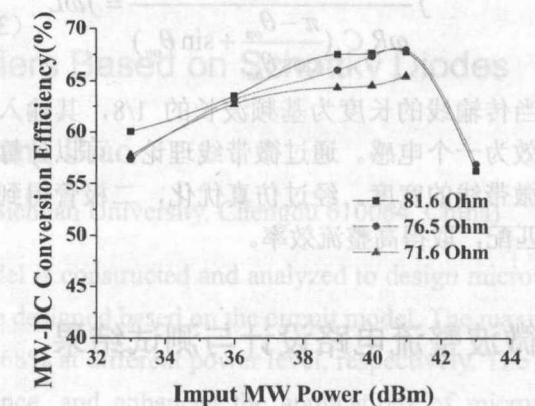


图 8 不同负载时整流效率随输入功率的变化曲线

4 结论

本文从肖特基二极管的理论模型设计出发，设计并实现了小功率的微波整流电路，验证了理论模型和设计方法的正确性及准确性。以此为基础，设计了基于二极管阵列的小功率整流电路，提升功率容量的同时保持了较高的整流效率。为了适应实际应用中更中功率需求，采用多路功分器和整流电路级联的思路，进一步提升了电路的微波输入功率，同时，保持整流效率基本不变。因此，通过三款整流电路，覆盖了 10 dBm~43 dBm 的微波功率范围，能够满足不同情况下的功率需求，为整流电路的实际应用奠定了良好的基础。

参考文献

- [1] William C. Brown. The history of power transmission by radio waves. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. MIT-32, NO.9: 1230- 1242. Sept.1984.
- [2] 陈彦龙,李凯,刘长军.一种 915MHz 紧凑型肖特基二极管微波整流电路.信息与电子工程,2012,10(1):64-67.
- [3] 张彪,刘长军,黄卡玛.一种小型化的 2.45GHz 高效微波整流电路设计与实现.2011 年全国微波毫米波会议论文集(下册) ,1693-1696.
- [4] 张彪,刘长军.一种高效的 2.45GHz 二极管阵列微波整流电路. 强激光与粒子束, 2011, 23(9): 2443-2446.
- [5] Zhang Biao, Zhao Xiang, Yu Chengyang, Huang Kama, Liu Changjun. A power enhanced high efficiency 2.45GHz rectifier based on diode array. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 2011, 25: 765-744.
- [6] James O. McSpadden, Lu Fan and Kai Chang, Design and Experiments of a High Conversion Efficiency 5.8GHz Rectenna. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 46, no. 12: 2053-2060, Dec. 1998.
- [7] Huang Wen, Zhang Biao, Chen Xing, Huang Kama and Liu Changjun. Study on an S-Band Rectenna Array in Microwave Power Transmission. *Progress in Electromagnetics Research*, vol. 135:747-758, 2013.

作者简介:

刘长军, 男, 教授, 从事电磁场与微波技术研究。