

· 基础理论研究 ·

微波无线能量传输中 S 波段整流电路研究

张 彪, 刘长军

(四川大学 电子信息学院, 四川 成都 610064)

A Study of S-Band Rectifier in Microwave Wireless Power Transmission

ZHANG Biao, LIU Chang-jun

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

Abstract: In this work, a Schottky diode equivalent model is constructed to analyze the impedance of the diode and the voltage of the microwave rectifier. Based on the model a small power rectifier is designed, with a maximum conversion efficiency of 83.3%. Then, the diode arrays for medium and large power rectifiers are designed, showing a maximum conversion efficiency of 69.4% and 68%, respectively. These three rectifying circuits achieve a power coverage of 10~43 dBm, which is a big step forward towards the practical application.

Key words: Schottky diode, Microwave rectifier, Diode array

摘要: 本文通过对肖特基二极管等效电路模型的建立,分析了二极管的阻抗和微波整流电路的电压,并依据此模型设计了小功率微波整流电路。在此电路基础上,为了扩展电路的功率容量,提出了二极管阵列的思路并设计完成了中小功率以及大功率的微波整流电路。其中,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和大功率微波整流电路最高效率分别为 69.4% 和 68%。三种电路实现 10~43 dBm 的功率覆盖范围,提升了电路的实用价值。

关键词: 肖特基二极管;微波整流电路;二极管阵列

中图分类号: TN12 文献标识码: A 文章编号: 1002-8935(2013)05-0063-04

微波无线能量传输自 1964 年被 W. C. Brown^[1] 提出至今,已经发展了近 50 年。欧美和日本等国将微波能量传输作为空间太阳能电站的一项关键技术,开展了大量的理论与实验研究。我国的微波输能最早由林为干院士^[2] 引入并进行了相关讨论,如今已有多家高校和科研院所进行研究和探索。

微波整流电路是微波无线能量传输的关键部件,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, 2.45 以及 5.8 GHz^[3-7], 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^[8]。

目前,微波整流电路的研究大多数是基于小功率容量和单支二极管形式的,但是,实际应用通常要求功率容量和电压具有较大的动态范围。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,首先设计出高效率的小功率

微波整流电路,再以此为基础,提出二极管阵列的设计思路,并成功设计了中小功率以及大功率的微波整流电路,提升了整流电路的功率容量和直流电压的范围。

1 肖特基二极管模型及理论分析

图 1 为单支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式(1)所示。

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

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

式中, 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

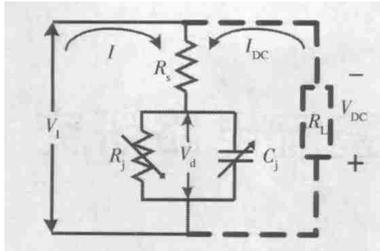


图 1 二极管等效电路模型

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 。

二极管的输入阻抗如式(2)所示。为了提升整流效率，需要在输入端对二极管的阻抗进行匹配。由于二极管的阻抗为实数，且虚部为容性，因此可以通过贴片电感或感性等效微带线来抵消。

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

当终端短路传输线的长度为基频波长的 $1/8$ 时，其输入阻抗等效为一个电感。同时，在二倍频时，此微带线的电长度为二倍频波长的 $1/4$ ，可以将二倍频信号反射回二极管重新整流，提升整流效率。通过微带线理论，计算等效微带线的宽度，经过仿真优化，使二极管得到良好的匹配，取得高整流效率。

2 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 $18\ \mu\text{m}$ 。电路中的二极管为 HSMS-282 型肖特基二极管。

2.1 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。

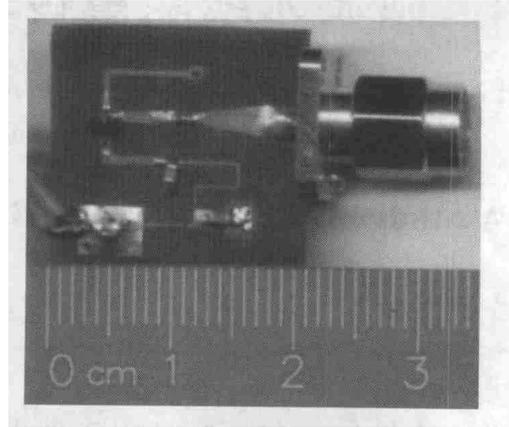


图 2 小功率微波整流电路

图 3(a)给出了当输入功率为 $20\ \text{dBm}$ 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。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 3(b)给出了当输入微波功率 $10\sim 20\ \text{dBm}$ ，负载 $100\sim 1500\ \Omega$ 时的整流效率的测量结果。当输入功率在 $13\sim 20\ \text{dBm}$ 内，负载在 $600\sim 1200\ \Omega$ 之间时，均获得了大于 70% 的整流效率；当输入功率为 $17\sim 20\ \text{dBm}$ 之间，负载为 $500\sim 800\ \Omega$ 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 $20\ \text{dBm}$ ，负载为 $600\ \Omega$ 。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。

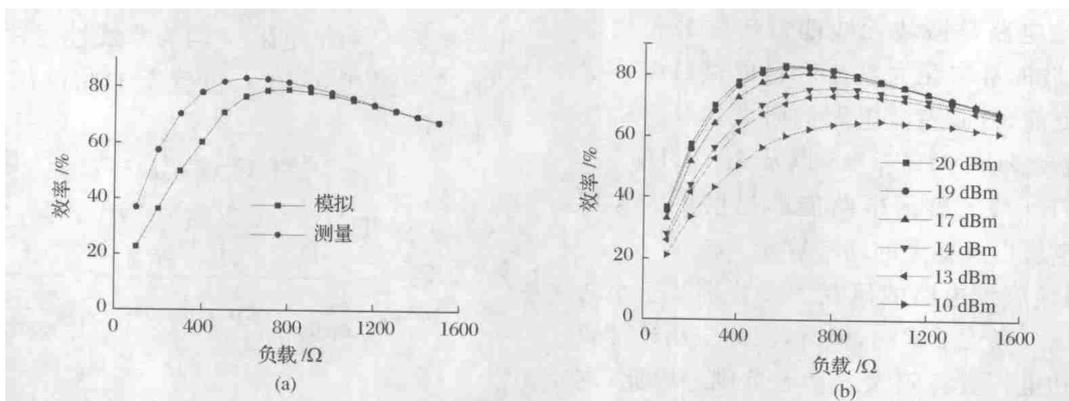


图 3 整流效率随负载的变化曲线

2.2 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。

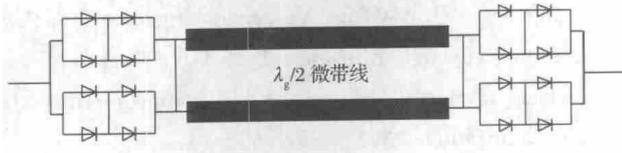


图4 肖特基二极管阵列

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。图6(a)中的方形标记和

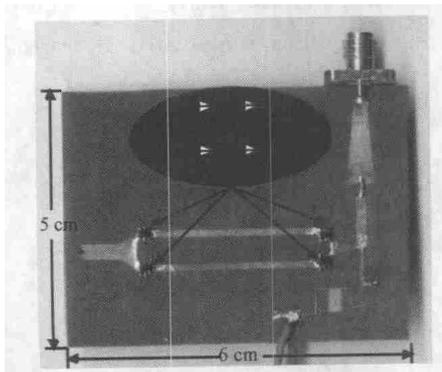


图5 基于二极管阵列的微波整流电路

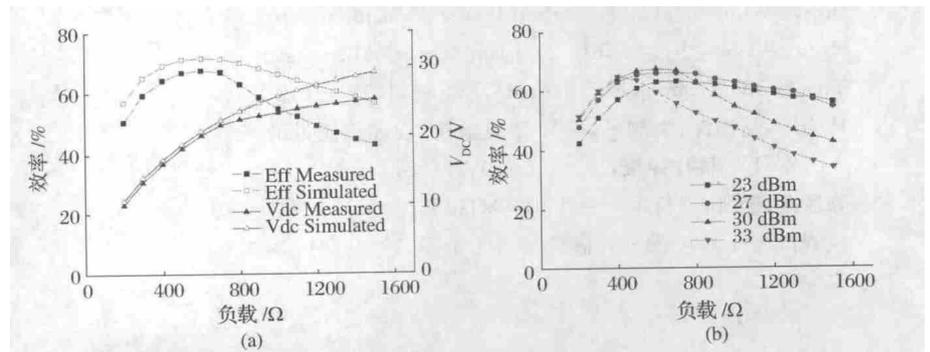


图6 整流效率随负载的变化曲线

2.3 大功率整流电路设计

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,实现了功率容量的大幅度提升。

图7为本文所设计的大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39~41 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,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%。

3 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

三角标记分别表示输入功率30 dBm时的整流效率和直流输出电压。可以看出,仿真结果和实测结果吻合良好,验证了仿真的正确性。图6(b)中可以看出,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600 Ω。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。

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。

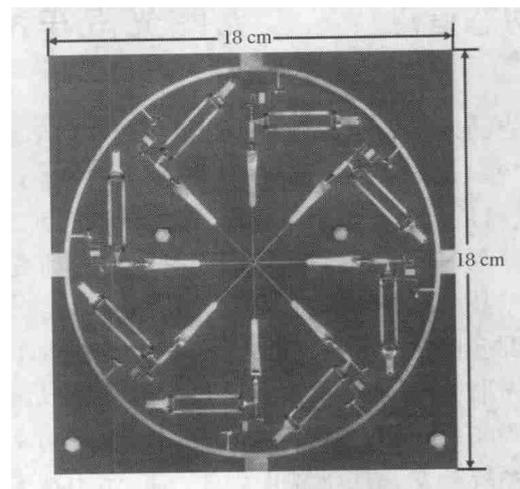


图7 大功率整流电路实物图

型和设计方法的正确性及准确性。并以此为基础,设计了基于二极管阵列的中小功率整流电路,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大功率需求,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10~43 dBm的功率范围,能够满

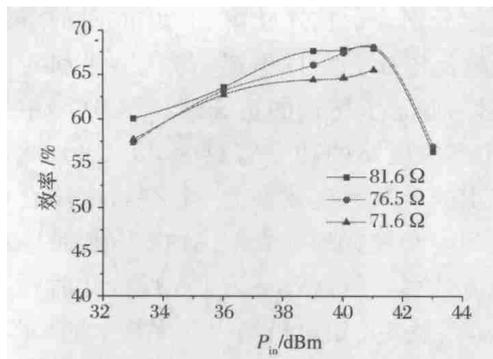


图8 不同负载时整流效率随输入功率的变化曲线

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] Brown William. The History of Power Transmission by Radio Waves [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1984, MIT-32(9):1230-1242.
- [2] 林为干,赵愉深,文舸一,等. 微波输能,现代化建设的生力军[J]. 科技导报,1994, 15(3):31-34.
- [3] 陈彦龙,李凯,刘长军. 一种 915 MHz 紧凑型肖特基二极管微波整流电路[J]. 信息与电子工程,2012, 10(1): 64-67.

- [4] 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[C]. 2011 年全国微波毫米波会议, 2011:1693-1696.
- [5] 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.
- [6] Zhang Biao, Zhao Xiang, Yu Chengyang, et al. A Power Enhanced High Efficiency 2.45 GHz Rectifier Based on Diode Array[J]. Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 2011, 25: 765-744.
- [7] McSpadden James O, Fan Lu, Chang Kai. Design and Experiments of a High Conversion Efficiency 5.8 GHz Rectenna[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1998, 46(12): 2053-2060.
- [8] Huang Wen, Zhang Biao, Chen Xing, et al. Study on an S-Band Rectenna Array in Microwave Power Transmission[J]. Progress in Electromagnetics Research, 2013, 135:747-758, 2013.

收稿日期:2013-05-20

动态信息

无眩光汽车前照灯——新的智能技术

自适应无眩光汽车前照灯将是驾驶者今后可享受到的又一智能技术。它靠摄像头控制,可于瞬间作出反应。这些复杂功能的关键技术是微电子与光电的集成,这正是德国欧司朗公司主持的研发项目“?-AFS(自适应车前照明系统)”的研究重点之一。

该项目得到德国联邦教研部“光子学研究支持计划”的资助,目标是为新一族高效节能 LED 汽车前照灯开发新技术。在此基础上可形成自适应汽车前照明系统,为驾驶人与乘客添加安全。为此需要有按行驶速度配光的无眩光远光灯及近光灯,如在汽车加速时,照射范围可自动加大;在市区交通中,自适应并更宽的光分布照亮街道、马路边缘与人行道,也可带来更多安全。这些功能依靠全电子化而非机械的伺服马达。

为实现目标,参与此项目的多家知名企业分头行动:欧司朗“专业照明”业务部负责为控制 LED 车前灯照明系统开发一款新型电子镇流器;弗朗霍夫可靠性与微型集成研究所利用其专长研究连接技术与材料;Infineon 科技公司以其汽车电子装置领域的成熟经验研发 LED 驱动器;HELLA 公司将开发 LED 模块的整体光系统和前照灯并制造模型;戴姆勒公司则承担汽车检测实验任务。该项目将于 2016 年 1 月结束。

摘自《科技网》