# 一种微波输能的高效二极管阵列 整流电路设计与分析<sup>®</sup>

## 宋 炜,张淮清\*,肖 辉,彭文雄,肖冬萍

(重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室,重庆 400044)

摘 要:微波无线能量传输是实现远距离无线传能的主要方式之一,也是空间太阳能电站系统的核心技术之一。微波整流电路是实现微波到直流转换的关键环节,为实现大功率、远距离微波无线能量传输,文章设计了一种频率为2.45GHz的二极管阵列整流电路,能在大功率下完成高效整流,且对负载变化的敏感度低。测试表明:在27dBm 输入功率、150Ω负载下,MW-DC 转换效率最大达71.83%;输入功率为23~32dBm 时的转换率高于65%;即使输入功率低至17dBm 的转换率仍高于50%。因此,论文所提整流电路的输入功率动态范围大,最高可达32dbm, 且转换效率高,可用于微波无线能量传输中。

关键词:微波传能;整流电路;转换效率;二极管阵列
中图分类号:TN820
文献标识码:A
文章编号:1674-7135(2020)02-0033-06
D O I:10.3969/j. issn. 1674-7135.2020.02.006

# Design and Analysis of A High Efficiency Rectifier Circuit Based on Diode Arrays for Microwave Power Transmission

SONG Wei, ZHANG Huaiqing\*, XIAO Hui, PENG Wenxiong, XIAO Dongping

(Chongqing University State Key Laboratory of Power Transmission Equipment&System Security and New Technology, Chongqing 400044, China)

Abstract: Microwave wireless power transmission (MWPT) is one of the main methods to achieve long-distance wireless energy transmission, which is also one of the core technologies of space solar power systems (SSPS). Microwave rectifier circuit is the key link to convert microwave power to DC power. In order to realize high-power and long-distance MWPT, a rectifier circuit based on diode arrays and operating at 2.45 GHz is designed in this paper, which is capable to achieve high efficiency power conversion under high input power, and appears low sensitivity to load changes as well. Measurement results show that the maximum MW-DC power conversion efficiency (PCE) reaches 71.83% under 27 dBm input power and 150  $\Omega$ load; the MW-DC PCE keeps higher than 65% when the input power varies from 23 dBm to 32 dBm; even if the input power is as low as 17 dBm, the MW-DC PCE still exceeds 50 %. Therefore, the proposed rectifier circuit features wide dynamic input power range and high power conversion efficiency, which can be applied in MWPT systems.

Key words: MWPT; Rectifier circuit; Power conversion efficiency; Diode arrays

① 收稿日期:2019-11-08;修回日期:2019-11-18。

基金项目:中央高校基本科研业务费国防科技创新专项(编号:2019CDJFDQ004)。 作者简介:宋炜(1994—),硕士在读,研究方向:微波整流电路设计。E-mail:474191054@qq.com 通信作者:张淮清(1979—),博士,教授、博导。研究方向:微波无线能量传输,电磁兼容等。 E-mail:zhanghuaiqing@cqu.edu.cn

### 0 引言

微波无线能量传输(Microwave Wireless Power Transfer, MWPT)是空间太阳能电站牵引的关键技术 之一<sup>[1]</sup>,其实现的移动供能应用将带来颠覆性变化, 被中国科协列为十大变革性、颠覆性技术之一。 MWPT系统主要由微波源、发射天线和接收整流天 线组成,其中整流天线又包括接收天线和整流电路, 通常微波整流电路由输入带通滤波器、匹配网络、整 流管、输出直通滤波器和负载组成。

早期的整流电路输入功率较低,为提高输入功 率已提出多种方案,如改变整流管连接方式<sup>[2]</sup>、基于 场效应管的高低功率开关<sup>[3]</sup>、可拓单管功率范围的 pHEMT<sup>[4]</sup>等。此外,文献[5]将功分器与串联二极 管整流电路结合,实现电路最佳状态自适应切换,其 工作频率为915MHz,输入功率9~16.7dBm 的整流 效率超过70%;文献[6,7]使用 GaAs 场效应管,其 工作频率 2.45GHz 的小型化整流电路在输入功率 30dBm 时的最高效率达到 41%<sup>[6]</sup>, 而频率 2.4GHz 整流电路能在 10~36dBm 输入功率下达到 15.3~ 62.4%的效率<sup>[7]</sup>。文献[8]则采用三级倍压结构提 高输出直流电压,并在 30dBm 输入功率下达 到 58.7% 的效率; 文献 [9] 使用了 2×2 二极管阵列, 在 27dBm 到 31.7dBm 的输入功率范围内, MW-DC 转换效率保持在60%以上,并且在30dBm时达到最 大值 63.3%;文献 [10] 用 16 个肖特基二极管组成 阵列,工作频率为 2.45 GHz,并在 30dBm 处取得 了 69.4% 的最大转换效率。

这些方法有效拓宽了整流电路的功率范围,但 也存在局限性。例如,使用功分器将大功率进行分 流,虽达到了设计目标,但也复杂化了电路结构,增 大了电路的尺寸;使用 pHEMT 来保护二极管,使单 管能承受更高的输入功率,但由于场效应管在高频 下功率损耗增大,故降低了整体的转换效率。基于 以上因素,论文采用了基于 2×2 二极管阵列的微波 整流电路,使用 Advanced Design System 2011 进行设 计,工作频率为 2.45 GHz,实验表明,该电路具备高 输入功率、宽动态范围、高转换效率的特点。

#### 1 整流电路设计

整流电路各模块主要功能为:输入带通滤波器 允许基频信号通过;反射整流二极管等非线性器件 在工作时产生的高次谐波以提高能量的转换效率; 输出直通滤波器允许直流通过,反射基频及以上谐 波,改善了直流输出的平滑性。图1为论文所设计 的整流电路结构图,其中输入端由十字枝节组成,短 路线  $TL_1$ 与可变电阻  $R_L$ 并联可起到一定的压缩阻 抗作用<sup>[11]</sup>;为了避免集总元件的寄生效应对整流效 率的负面影响,输出滤波器没有使用常见的 $\lambda/4$  微 带线与射频电容的并联结构设计,而是通过调节扇 形枝节  $Stub_1,Stub_2$ 的长度和弧度实现对输出直通滤 波器的优化。本次设计扇形支节的弧度为 120°,能 够滤除基波与高次谐波,从而平滑直流输出电压。



肖特基二极管是依靠多数载流子工作的微波有 源器件,由于消除了少子的存储效应,具有良好的高 频特性,其导通电压低、结电阻小、恢复速度快,适用 于微波整流<sup>[12]</sup>。肖特基整流二极管闭合公式的等 效电路模型如图 2 所示<sup>[13]</sup>,其等效参数包括寄生串 联电阻 *R*<sub>s</sub>,结电容 *C*<sub>j</sub>,结电阻 *R*<sub>j</sub>,根据 KVL,可得负 载端的直流输出电压为

$$V_{DC} = -V_{j,DC} \frac{R_L}{R_S + R_L} \tag{1}$$

其中 V<sub>j,DC</sub> 为二极管结电压 V<sub>j</sub> 在一个周期内的 平均值,因此肖特基二极管的结电压 V<sub>j</sub> 决定了负载 端的直流输出电压。



当二极管工作于大信号时,有  

$$V_{j} = \begin{cases} -V_{j0} + V_{j1}\cos(\omega t - \phi), \quad \Box 极管截止\\ V_{in}, \quad \Box 极管导通 \end{cases}$$
(2)

其中,*V*<sub>j0</sub> 与*V*<sub>j1</sub> 分别是二极管结电压的直流分量 和基频分量,*θ*<sub>on</sub> 为前向导通角。对于大功率微波整 流电路,随着输入功率的增大,整流二极管的正向导 通阻抗迅速减小,整流效率也因此快速上升,但当输 入功率增大到超过二极管反向击穿电压时,二极管被 击穿,转换效率迅速下降。对于大功率场合,应选用 串联电阻 *R*<sub>s</sub> 较小而结电容 *C*<sub>i</sub> 较大的整流二极管。



Fig. 3 Matching Network Simulation of Rectifier Circuit

论文所使用的整流二极管是 Avago 公司的 HSMS2820 肖特基二极管<sup>[14]</sup>,其串联电阻  $R_s$ =7.8 $\Omega$ ,开启电压  $V_{bi}$  = 0.35V,零偏结电容  $C_{j0}$ =0.65pF,击穿电压  $V_{br}$  = 26.7V。该管具有较高的 击穿电压  $V_{bi}$ ,从而保证在高功率输入时二极管不易 击穿。由于目前大部分整流电路的都是针对中低功 率输入情况而设计的,为了使整流电路能够适应更 大输入功率,论文采用二极管阵列进行整流,即先将 二极管两两串联后再进行并联,形成 2×2 二极管阵 列,这样不仅可以提高总体整流管的耐压能力,且对 串联电阻值的影响也较小。

图 3(a) 所示为整流电路输入阻抗功率曲线。 由图可知,当输入功率为-20dBm~0dBm时,输入阻 抗保持不变;当输入功率为0dBm~60dBm时,输入 阻抗随着功率呈现非线性变化;当超过60dBm时, 输入阻抗趋于稳定。为提高系统效率,使用前述的 十字枝节对输入端进行电路匹配。选择输入功率为 27dBm,此时输入阻抗为224.661+j74.454Ω,匹配后 的结果如图 3(b)所示,可见该结构使电路 在2.45GHz处取得了良好匹配。

#### 2 整流电路仿真分析

整流电路采用 ADS2011 进行仿真,介质板的相 对介电常数为 2.2,损耗正切角为 0.0009,厚度 为 0.508mm,覆铜厚度 0.035mm。在负载为 150Ω, 输入功率为 27dBm,仿真得到的 S 参数如图 4 所示。



由图 4(a) 中输入带通滤波器的 S 参数仿真曲 线可知,在 1GHz 到 4GHz 的频段内,插入损耗 S21 接近零值,在 4.9GHz,7.35GHz 处分别为-28dB 与-41.5dB;在 2.45GHz 处的回波损耗 S11 低 至-29.5dB。由此可见,所设计的十字滤波器具有 良好的通基频特性,同时有效地抑制了二、三次谐波 的通过,提高整流效率。由图 4(b) 中输出直通滤波 器 的 S 参 数 仿 真 曲 线 可 知, 在 2.45GHz,4.9GHz,7.35GHz 处的 S21 值分别 为-43.5dB,-44.6dB,-47.2Db,说明通过调节扇形 支节的参数对基频及以上谐波有较好的抑制作用。

对所设计的电路分别采用单管和阵列,观察整 流效率随输入功率与负载的变化情况,仿真结果如 图 5 所示。可以看出,在高输入功率下,单管效率迅 速下降,而阵列效率依然很高;随着负载的变化,单 管效率变化较大,而阵列效率相对稳定。仿真结果 表明二极管阵列在高输入功率下仍能保持较高的转 换效率,且对负载变化的敏感度较低,因此论文采用 二极管阵列进行电路设计。



#### 3 整流电路实验结果与分析

实际加工制作的整流电路板如图 6 所示,所使用的高频介质板为 Rogers\_RT\_duroid5880,尺寸为 63mm×40mm。



(a) 整流电路仿真图



(b)整流电路板实物图
 图 6 整流电路结构图
 Structure of Rectifier Circuit

Fig. 6



图 7 整流电路测试系统





图 8 整流电路实测系统 Fig. 8 Picture of Rectify Circuit Test System

图 7 为设计的整流测试系统,所搭建的实测系 统则如图 8 所示。测试系统中微波信号发生器(Agilent N5181A)用于产生和控制工作频率为 2.45GHz 的小功率输出;射频功放(YJPA2450020)在实验中 用来放大微波输入功率,同时使用功率计(Agilent E4418B)进行实时的功率监测;为了测量不同负载 时的输出电压与电路整流效率,使用电阻箱作为可 调负载,并通过万用表测量负载两端电压。

使用矢量网络分析仪(R&S ZND)测量整流电路的 S11 参数,并与仿真结果对比,如图 9 所示。电路 S11 参数的仿真值与实测值分别为-18.3dB与-12.5dB,可见电路在工作频率 2.45GHz 处获得了良好的匹配。



Fig. 9 Test System Diagram of Rectifier Circuit

整流电路的 MW-DC 转换效率计算方法如公式 (3) 所示:

$$\eta = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} = \frac{V_{\text{DC}}^2}{R_L \cdot P_{\text{in}}} \times 100\%$$
(3)

仿真和实测的直流输出电压 VDC 与整流转换 效率随输入功率的变化曲线如图 10(a)所示。负载 RL 为 150Ω,当输入功率从 0dBm 至 27dBm 范围内 变化时,实测结果与仿真结果比较吻合,当输入功率 继续增大时,转换效率开始下降,这是因为大功率下 二极管内部温度过高,二极管性能大幅下降所造成 的。当输入功率为 27dBm 时,最大转换效率可达 71.83%,对应的直流输出电压为 7.34V。输入功率 在 17dBm ~ 33dBm 的范围内变化时,效率始终超过 50%;输入功率在 23dBm ~ 32dBm 的范围内变化时, 效率均高于 65%。电路在 33dBm ~ 35dBm 的高功 率输入下仍能够短时工作,且整流效率依然能够达 到50%左右。

图 10(b)展示了实测中不同输入功率下,负载 变化对整流效率的影响。当输入功率为 20dBm ~ 30dBm,负载为 20Ω ~ 600 Ω 时,整流效率的变化趋 势大体相同,证明了二极管阵列能降低整流效率对 负载变化的敏感度。最终通过测试找到在输入功率 27dBm,负载为 150 时电路可达最高整流效 率71.83%。



图 10 整流效率随输入功率与负载的变化曲线



表 1	类似工作对比	
-----	--------	--

Table 1 Performance Comparison

文献编号	工作频率	输入功率	整流效率	最大整流效率
[8]	2.1GHz	$21 \mathrm{dBm}{-}30 \mathrm{dBm}$	>50%	58.7%
[8]	2.1GHz	$19\mathrm{dBm}30\mathrm{dBm}$	>50%	64.5%
[10]	2.45GHz2	27dBm-31.7dBm	n >60%	63.3%
[11]	2.45GHz	$23 \mathrm{dBm}{-}33 \mathrm{dBm}$	>60%	69.4%
论文	2.45GHz	23dBm-32dBm	>65%	71.82%

将论文所设计的整流电路的测试结果与其他类 似研究工作进行了对比,如表1所示。可以看出,论 文所设计的微波整流电路在较宽的输入功率范围内 依然保持高效的整流效率,其最大整流效率能够达 到71.82%。

#### 4 结论

论文设计了一种工作频率为 2.45GHz 的二极 管阵列微波整流电路,用于在高效微波整流的同时 拓展输入功率的范围。使用 2×2 二极管阵列来代替 单二极管进行整流,提高了整流器的耐压能力。仿 真和实验结果均表明该电路能够用于高功率输入场 合,当输入功率为 27dBm,负载为 150Ω 时,整流效 率可以达到 71.83%,且在 17dBm ~ 33dBm 的功率 范围内,整流效率超过 50%;在 23dBm ~ 32dBm 的 功率范围内,整流效率超过 65%。当输入功率在 33dBm ~ 35dBm 时,电路能够短时工作,且保持 50% 的 MW-DC 整流效率。测试结果表明该整流电路具 有大功率微波无线能量传输系统的潜在价值。

#### 参考文献:

- [1] 李军,董士伟,李洋,等.空间太阳能电站发展历程回顾 与前景展望[J].空间电子技术,2018,15(2):8-15.
- [2] 杜志侠,章秀银,郑艳华.宽功率微波整流电路研究进展[J].南京信息工程大学学报:自然科学版,2017,9 (1):25-33.
- [3] T. Ngo, A. Huang, Y. Guo. Analysis and Design of a Reconfigurable Rectifier Circuit for Wireless Power Transfer[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(9):1-1.

- Z. Liu, Z. Zhong, Y. Guo. Enhanced Dual-Band Ambient RF Energy Harvesting With Ultra-Wide Power Range
   [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2015,25(9):1-1.
- [5] 林权纬.无线输能中的高效宽功率范围整流电路研究[D].广州:华南理工大学,2016:27-30.
- [6] 叶力群,郁成阳,张彪等.基于 GaAs 晶体管 2.45GHz 大功率微波整流电路[J].太赫兹科学与电子信息学 报,2013,11(4):591-594.
- [7] 刘赳赳. 高动态输入微波整流技术的研究[D]. 重庆: 重庆大学,2016:43-51.
- [8] 程心怡.高功率微波整流及其在有源 FSS 无线控制中的应用[D].南京:南京航空航天大学,2016:17-28.
- [9] 张彪,刘长军. 一种高效的 2.45CHz 二极管阵列微波 整流电路[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(9): 2443-2446.
- [10] B. Zhang, X. Zhao, C. Yu, K. Huang & C. Liu. A Power Enhanced High Efficiency 2. 45 GHz Rectifier Based on Diode Array, Journal of Electromagnetic Waves and Applications. 2011,25(5-6):765-774.
- [11] 李文杰,张文梅.基于传输线的单支路电阻压缩网络 [J].华北工学院测试技术学报,2018,32(1):50-53.
- [12] 杨雪霞,黄文华著.微波输能技术[M].北京:科学出版社,2018:72-76.
- [13] T. Yoo and K. Chang. Theoretical and experimental development of 10 and 35GHz rectennas [J]. IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques. 1992, 40 (6):1259-1266.
- [14] Avago Technologies, "HSMS-282x surface mount RF Schottky barrier diodes," HSMS-2850 datasheet, Nov. 2014.