

DOI: 10.11991/ykj.202003012

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1191.U.20201202.1409.012.html>

2.45 GHz 紧凑型微带整流天线阵列

李金城, 林航, 刘长军

四川大学电子信息学院, 四川成都 610064

摘要: 为了提升整流天线的微波功率容量与直流输出功率, 本文提出了一款基于肖特基二极管的紧凑型微带整流天线阵列, 工作频率为 2.45 GHz, 采用 HSMS-2700 肖特基二极管作为整流器件, 并采用倍压电路提升功率容量与直流输出功率。在输入微波功率 2 W 时, 单支整流电路的最大输出直流功率为 0.93 W。将整流电路集成到贴片天线后, 形成整流天线阵列。结果表明, 天线阵列最大可输出 14.03 W 的直流功率, 尺寸为 217 mm×275 mm×2 mm。整流天线阵列结构紧凑, 输出直流达到了 117.6 mW/cm³。

关键词: 微波无线能量传输; 整流天线; 功率容量; 直流输出; 整流电路; 肖特基二极管; 倍压电路; 天线阵列

中图分类号: TN455

文献标志码: A

文章编号: 1009-671X(2021)02-0008-04

A compact microstrip rectenna array at 2.45 GHz

LI Jincheng, LIN Hang, LIU Changjun

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

Abstract: In order to improve the power capacity and the DC output power of a rectenna, a compact microstrip rectifier rectenna array at 2.45 GHz based on Schottky diode was designed and fabricated. HSMS-2700 Schottky diodes are applied with voltage doubler rectifying circuit to improve its microwave power capacity and DC output power. When the input microwave power is 2 W, the maximum DC output power of a single rectifier reaches 0.93 W. The DC output power of the whole rectenna reaches 14.03 W at most. Its dimension is 217 mm×275 mm×2 mm. The proposed rectenna array is compact, with DC output power reaching 117.6 mW/cm³.

Keywords: microwave wireless power transmission; rectenna; power capacity; DC output power; rectifier; Schottky diode; voltage doubler; antenna array

随着不可再生资源的日益减少, 可再生清洁能源的获取问题亟待解决。空间太阳能电站^[1] (solar space power satellite, SSPS) 的发展, 为解决该问题提供了一个思路, 具有良好的发展与应用前景^[2-4]。微波无线能量传输技术是 SSPS 中的一项关键技术^[5-6]。该技术是指能量以微波为载体在空间中传输, 具有衰减小、传输效率高、对天气变化适应性好等优点。

整流天线通常采用肖特基二极管作为核心整流器件。文献 [7] 中提出一款新型的小型化整流天线缩小天线尺寸, 最高整流效率达到 69.3%, 最大输出直流功率为 0.18 W。文献 [8] 提出一款小型化微带整流天线, 缩减了整流天线的尺寸, 最

高整流效率可达 72.4%, 最大直流输出为 0.07 W。功率容量与输出直流功率大小作为整流天线的重要指标, 在不增大整流天线尺寸的前提下, 如何提升整流天线的功率容量及输出直流功率, 成为当下的一个研究热点。

本文设计了一款最大输出直流功率 0.93 W 的整流电路, 并实现了一款可输出 14 W 直流功率的整流天线阵列, 提升了整流天线的输出功率。该天线阵列具有易集成、易加工等特点, 可用于 S 波段微波无线输能系统中。

1 整流天线阵列

微波无线能量传输系统结构如图 1 所示。整流天线作为微波无线能量传输技术中的关键部位, 包括接收天线和整流电路 2 部分。Deschamps^[9] 在 1953 年提出了微带天线, 具有结构简单、便于加工制作、易于阻抗匹配等优点, 被广泛用于微波通信与测量领域中。辐射贴片可以是矩

收稿日期: 2020-03-15. 网络出版日期: 2020-12-02.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61930009).

作者简介: 李金城, 男, 硕士研究生.

刘长军, 男, 教授, 博士生导师.

通信作者: 刘长军, E-mail: cljhu@scu.edu.cn.

形、圆形或者三角形等。本文选用矩形微带贴片天线进行设计制作。

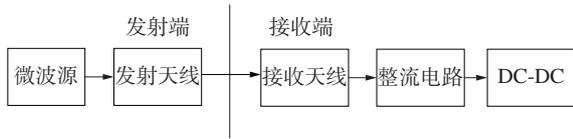


图1 微波无线能量传输系统结构

1.1 接收天线的设计

微带天线通常使用传输模式进行近似计算与设计。假定电场沿天线宽边 W 方向无变化, 且天线的辐射是宽边的边沿。将天线等效为槽阻抗与传输线级联, 则矩形天线的输入导纳为

$$Y_{in} = Y_s + Y_0 \frac{Y_s + jY_0 \tan\beta(L + 2\Delta L)}{Y_0 + jY_0 \tan\beta(L + 2\Delta L)} \quad (1)$$

式中: Y_0 为微带线结构特征导纳; L 为微带线长; ΔL 为边沿电容引起的边沿延伸, $\Delta L = 0.412h \cdot \frac{\epsilon_c + 0.3}{\epsilon_c - 0.258} \frac{(W/h) + 0.264}{(W/h) + 0.8}$; $\beta = 2\pi\sqrt{\epsilon_c}/\lambda_0$, 其中, ϵ_c 为有效介电常数, λ_0 为自由空间波长; $Y_s = G + jB$, 其中, G 为辐射单元的发射电导, B 为辐射单元的辐射电纳^[10]。

当天线正常工作(谐振)时, 有

$$L + 2\Delta L = \lambda_0 / 2 \sqrt{\epsilon_c} \quad (2)$$

此时式(1)可化简为

$$Y_{in} = 2G$$

微带天线的工作频率与结构参数的关系为

$$f_0 = \frac{c}{2\sqrt{\epsilon_c}(L + 2\Delta L)} \quad (3)$$

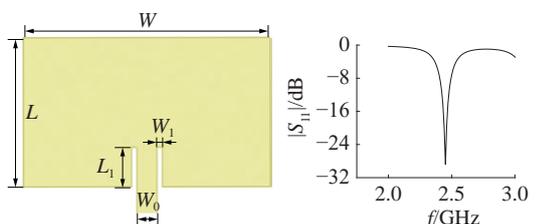
$$W = \frac{c}{2f_0} \left(\frac{2}{\epsilon_c + 1} \right)^{-1/2} \quad (4)$$

文中矩形贴片天线设计采用 FR4 双面敷铜介质板作为介质基板, 其主要参数如表 1 所示。

表1 FR-4 介质板主要参数

参数	介电常数 (ϵ_c)	损耗角正切 ($\tan \theta$)	基板厚度 (h)/mm	敷铜厚度 (d)/mm
数值	4.4	0.02	2	0.018

由式(1)~(4)计算可得天线的尺寸。将所得数据带入 HFSS 软件中进行仿真优化, 最终接收天线结构如图 2(a) 所示, 其中: $W=46$ mm, $L=28$ mm, $W_1=1$ mm, $L_1=7.5$ mm, $W_0=3.8$ mm, 馈电端口 W_0 阻抗为 50Ω 。图 2(b) 为矩形天线 S 参数的仿真结果, 天线的 3 dB 带宽为 2.42~2.48 GHz。



(a) 接收天线结构 (b) 接收天线 S 参数

图2 接收天线仿真结果

1.2 整流电路设计

肖特基二极管具有截止频率高、结电阻低和结电容小等特点, 广泛应用于微波电路。本电路采用 Avago 公司的 HSMS-2700 系列二极管, 其主要参数如表 2 所示。

表2 HSMS2700 肖特基二极管部分参数

名称	反向击穿电压 V_{br}/V	结电容 C_{jo}/pF	串联电阻 R_s/Ω
数值	15	6.7	0.65

本文设计了由 HSMS-2700 肖特基二极管构成的倍压整流电路, 将贴片天线等效为阻抗为 50Ω 的微波信号源。

输出低通滤波器的作用是为了抑制基波和二极管产生的高次谐波的通过。为了使电路更紧凑, 降低贴片元器件带来的损耗影响, 本文采用蛇形微带线来进行输出滤波器的设计。蛇形微带线宽 0.2 mm, 对基波及高次谐波呈高阻抗性, 结构如图 3 所示。



图3 蛇形线滤波器结构示意图

整流电路实物图如图 4 所示。其中 A 部分为整流电路的输入带通滤波器部分, 由 0.7 pF 村田电容及匹配枝节线构成; B 部分为整流部分, 由匹配支节线及 2 只二极管组成, 2 只二极管组成倍压整流电路来增大电路的功率容量; C 部分为输出低通滤波器部分, 由一段匹配支节线及一段高阻抗的蛇形细线组成。

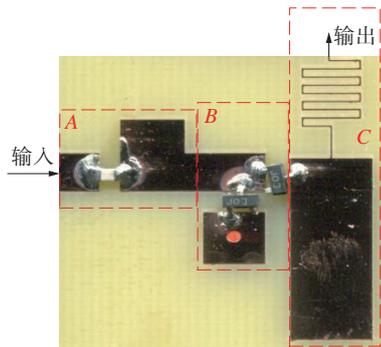


图4 整流电路实物

最终该电路的测试结果如图 5 所示。当输入功率在 28~32 dBm 时, 整流电路的整流效率高于 50%; 并且当输入功率为 32 dBm 时, 整流效率最大, 可达 57%。当输入功率在 31~34 dBm 时, 该电路的输出直流功率均高于 0.7 W, 并且当输入功率为 33 dBm 时, 该电路输出的直流功率最大, 为 0.93 W。电路在输入功率为 32 dBm 时, 整流效率最高, 输出

直流功率为 0.91 W; 当输入功率高于 32 dBm, 整流效率大幅减小。二极管工作在过饱和状态, 二极管损耗逐渐增加, 直流输出功率饱和后迅速下降。

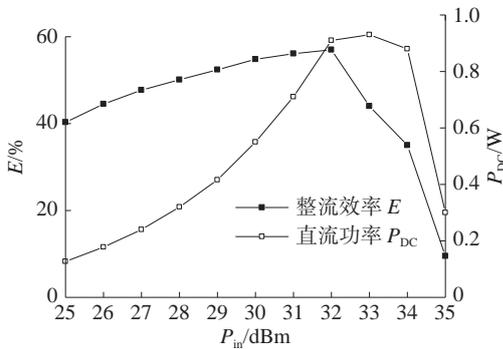


图5 整流电路实测效率及输出功率曲线

1.3 整流天线阵列

整流天线能够接收到的功率密度为

$$P_d = \frac{P_t G_t}{4\pi d^2}$$

式中: P_t 为发射功率; G_t 为发射天线增益; d 为发射天线与接收天线之间的距离^[11]。

整流天线的效率为

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_r} \times 100\% = \frac{V_{out}^2 / R_{load}}{P_t G_t / 4\pi d^2 \times A_{rectenna-array}} \quad (5)$$

式中: P_{out} 表示直流输出功率; P_r 表示天线阵列接收到的功率; V_{out} 为直流输出电压; R_{load} 为直流负载; $A_{rectenna-array}$ 为整流天线面积^[12]。

由式 (5) 可知, 接收天线整流效率与接收天线阵列的面积成反比, 缩小天线单元的间距, 减小阵列的面积, 可提高天线阵列效率。

通过电磁仿真, 将各天线的馈电端口交错放置, 天线间距确定为 20 cm。最终加工天线阵列实物图如图 6 所示。天线与整流电路依靠阻抗为 50 Ω 的微带线连接, 整流天线之间依靠蛇形微带细线连接。天线阵由 4×4 个整流天线单元组成, 所有整流电路并联输出直流功率, 面积为 21.7 cm×27.5 cm。

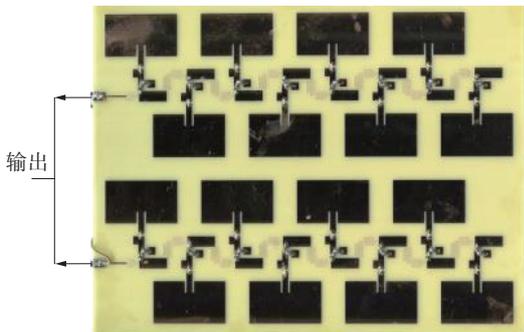


图6 整流天线阵列实物

2 测试与分析

测试系统原理图如图 7 所示, 采用 Analog

Devices 公司的 HMC-T2220 型号信号源、固态放大器、16 dBi 标准增益喇叭天线、万用表及大功率负载进行测试。微波功率源的最大输出功率为 79.9 W, 分别调整微波源的输出功率, 测量整流天线阵列的直流输出功率及整流效率。

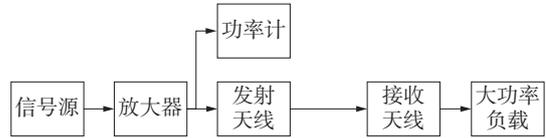
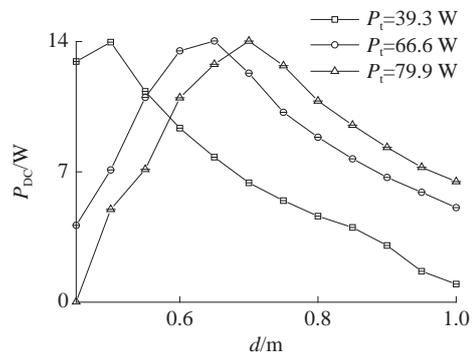
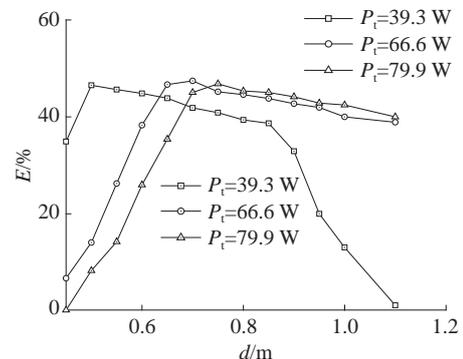


图7 测试系统原理框图

图 8(a) 为 3 种发射功率下, 收发天线在不同间距处天线阵列直流输出功率的曲线图。随着距离的增加, 直流输出功率先增加后减小, 最大可达 14.03 W。图 8(b) 为 3 种发射功率下, 天线阵列整流效率随收发天线间距变化的曲线图。在收发天线间距较小处, 天线阵列所接收功率较大, 超过电路的功率容量上限, 整流效率偏低; 在距离较大处, 天线阵列所接收功率随着距离的增加逐渐减少, 整流效率也逐渐降低。整流天线阵列最大整流效率为 47.6%



(a) 各距离处输出直流功率曲线



(b) 各距离处整流效率曲线

图8 整流天线阵列实测结果

单只整流电路的直流输出功率最大值为 0.93 W, 16 只整流电路的直流输出在理想叠加的情况下, 最大为 14.88 W。实测得到的最大直流输出功率值与理想叠加情况下的最大值相差 5.7%, 实测结果与理论基本一致。

测试系统的功率源输出功率有限, 本次测试中尽量满足远场条件, 为了保证整流电路工作于正常状态, 缩短收发天线的间距。近距离测试会导致整流天线阵列中心与四周的功率密度分布不均, 造成中心功率密度大于四周功率密度的情况, 从而使得实际接收到的功率小于理论计算值。同时这也会使得不同整流电路的工作状态不同, 由图 8 测试曲线可知, 四周的整流电路输出直流功率与电压会小于中心处整流电路。当输出电压不一致时, 整流电路相互并联也会降低整流天线整体效率。

表 3 展示了本文设计与文献中的 2.45 GHz 整流天线输出直流功率与尺寸的对比。从表中可以看出, 本文的直流输出功率较高, 而整流效率略有不足。这是因为本文的设计重心主要放在了阵列的紧凑性与单位体积内的输出直流性能上。在功率较大的工作环境下, 二极管上的微波损耗增加, 且其实际参数与仿真模型相比会出现一定的偏差, 导致整流天线阵列整体的效率并不突出。同时可以看出, 本文整流天线单位体积的直流输出功率与常规整流天线相比, 可以提升 5 倍。

表 3 整流天线对比

对比方案	体积/mm ³	直流输出功率/W	整流效率/%	单位体积直流输出/(mW·cm ⁻³)
文献[7]	70×70×2	0.18	69.3	18.37
文献[8]	70×70×10	0.07	72.4	1.43
文献[13]	500×500×1	2.42	37.1	9.68
本文	217×275×2	14.03	47.6	117.6

3 结论

本文提出了一款工作在 S 波段的基于肖特基二极管的整流天线阵列, 可输出最大直流功率为 117.6 mW/cm³。

1) 整流电路采用倍压结构, 提高了电路的直流功率输出。

2) 采用蛇形细微带线作为输出滤波器, 连接整流天线单元, 使整流天线阵列结构更紧凑, 提升了其单位体积内的直流输出。

3) 天线阵列厚度小, 重量轻, 单位体积直流输

出功率大。

本文设计的整流天线阵列具有结构紧凑、天线阵列单位体积内直流输出较大等优势, 可以有效应用在微波无线输能系统中。本文的工作尚处于初步研究阶段, 值得进一步深入广泛研究。

参考文献:

- [1] 侯欣宾, 王立. 空间太阳能电站技术发展现状及展望 [J]. 中国航天, 2015(2): 12–15.
- [2] 李振宇, 张建德, 黄秀军. 空间太阳能电站的激光无线能量传输技术研究 [J]. 航天器工程, 2015, 24(1): 31–37.
- [3] 李向阳, 石德乐, 李振宇, 等. 无线能量传输系统能源管理技术研究 [J]. 空间电子技术, 2013(3): 61–65.
- [4] YANG Yang, LI Lu, LI Jun, et al. A circularly polarized rectenna array based on substrate integrated waveguide structure with harmonic suppression[J]. IEEE antennas and wireless propagation letters, 2018, 17(4): 684–688.
- [5] MOHAMMED S S, RAMASAMY K, SHANMUGAN-ANTHAM T. Wireless power transmission-a next generation power transmission system[J]. International journal of computer applications, 2010, 1(13): 100–103.
- [6] 李向阳, 吴世臣, 李钟晓. 激光无线能量传输技术应用及其发展趋势 [J]. 航天器工程, 2015, 24(1): 1–7.
- [7] 杨弋澜, 刘长军. 一种新型微带贴片微波整流天线设计 [J]. 应用科技, 2017, 44(4): 60–63.
- [8] 和历阳, 严安, 李勋勇, 等. 一款小型化 2.45 GHz 整流天线的设计 [J]. 应用科技, 2019, 46(5): 63–66.
- [9] 李明洋, 刘敏, 杨放. HFFS 天线设计 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2011.
- [10] 冯新宇, 蒋洪波. ADS2012 射频电路设计与仿真 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2014.
- [11] VU K T C, EGOROV R V, MIKHEEV D A, et al. Model of a spiral rectenna array with an omnidirectional radiation pattern[J]. Bulletin of the Russian academy of sciences: physics, 2015, 79(12): 1477–1479.
- [12] LYUBCHENKO V E, YUNEVICH E O. Visualizing the intensity distribution of a microwave field using a microstrip rectenna with a schottky diode[J]. Journal of communications technology and electronics, 2019, 64(9): 1001–1002.
- [13] 张彪, 侯欣宾, 郁成阳, 等. 微波输能中一款 S 波段整流天线阵列研究 [J]. 空间电子技术, 2013(3): 43–46.

本文引用格式:

李金城, 林航, 刘长军. 2.45 GHz 紧凑型微带整流天线阵列 [J]. 应用科技, 2021, 48(2): 8–11.

LI Jincheng, LIN Hang, LIU Changjun. A compact microstrip rectenna array at 2.45 GHz[J]. Applied science and technology, 2021, 48(2): 8–11.