

DOI:10.11991/yykj.201701001

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1191.U.20170503.0645.004.html>

# 一种新型微带贴片微波整流天线设计

杨弋斓, 刘长军

四川大学 电子信息学院, 四川 成都 610064

**摘要:**在微波无线能量传输系统中,整流天线广泛应用。为了解决整流天线中小型化的问题,对整流天线结构进行研究,提出一种新型整流天线设计。通过将天线和整流二极管阻抗直接共轭匹配进行设计,简化整流天线结构。该新型整流天线设计方法应用于 2.45 GHz 微带贴片微波整流天线中,用 1 mm 厚的 F4B-2 介质板设计和加工,设计出新型微带贴片整流天线,尺寸为 70 mm×70 mm。实验结果显示,新型微带贴片整流天线最高整流效率为 69.3%。新型整流天线相比传统整流天线具低剖面、轻量化、结构简化、低成本、容易加工和高射频-直流转换效率等优势,证明了该设计的有效性。

**关键词:**微波;无线能量传输;整流天线;贴片天线;整流二极管;阻抗;共轭匹配;整流效率

中图分类号:TN455

文献标志码:A

文章编号:1009-671X(2017)04-060-04

## Design of a novel microwave rectenna with microstrip patch

YANG Yilan, LIU Changjun

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

**Abstract:** Rectennas are widely applied to wireless microwave power transmission systems. In order to realize the miniaturization of rectennas, the structures of rectennas were researched in this paper. This paper presented the design of a novel rectenna, in which the antenna impedance matches to the rectifying diode conjugation impedance directly. The impedances of antenna and rectifying diode were conjugate matched directly. The novel design method simplify the rectenna design. It is applied to a patch rectenna at 2.45 GHz. The novel patch rectenna was designed and fabricated on a 1 mm thick F4B-2 substrate with the physical dimension of 70 mm×70 mm. The highest measured MW-to-DC conversion efficiency at 2.45 GHz reached 69.3% in the experiment. The conclusion is that the novel rectenna has the advantages of low profile, light weight, structure simplification, low cost, and easy fabrication. Experiments prove the validity of the proposed design method.

**Keywords:** microwave; wireless power transmission; rectenna; patch antenna; rectifying diode; impedance; conjugation matching; rectification efficiency

微波无线能量传输 (microwave wireless power transmission, MPT) 是新能源领域的一个重要方向,吸引很多研究者的关注<sup>[1-4]</sup>。微波无线能量传输系统通常由微波源、发射天线、接收天线、整流电路和直流负载组成。接收天线和整流电路合称为整流天线。整流天线是微波无线能量传输系统的关键组成部分之一。

近年来,各种整流天线设计被提出,包括整流天线单元和整流天线阵列<sup>[5]</sup>。传统整流天线由天线和整流电路组成,其中天线和整流电路输入阻抗均

匹配到 50  $\Omega$ ,通常包含射频同轴接头,体积大并且引入插损<sup>[6-10]</sup>。

文中提出一种新型整流天线设计方法,将天线阻抗与整流二极管阻抗直接匹配,设计出 2.45 GHz 贴片整流天线,做到整流天线小型化和集成化。

### 1 新型整流天线设计

在整流天线中,将接收天线等效为内阻为天线输入阻抗  $Z_s$  的信号源,单个二极管并联整流天线由天线、输入阻抗匹配电路、输入低通滤波器、整流二极管、输出直通滤波器和直流负载组成<sup>[11]</sup>。在文中设计中,微波功率由贴片天线接收,由于贴片天线是谐振型天线,主要接收谐振频率附近的信号,起到输入低通滤波作用;整流二极管直接与贴片天线阻抗

收稿日期:2017-01-03. 网络出版日期:2017-05-03.

基金项目:国家自然科学基金项目(61271074).

作者简介:杨弋斓(1992-),女,硕士研究生;

刘长军(1973-),男,教授,博士.

通信作者:刘长军, E-mail: cjliu@scu.edu.cn.

共轭匹配,省去了输入阻抗匹配电路;输出直通滤波器采用  $\lambda_c/4$  ( $\lambda_c$  是中心频率微带线对应的波长) 高阻抗线。新型贴片整流天线包括 4 个部分:天线、整流二极管、高阻抗线和直流负载。本文设计出了新型 2.45 GHz 贴片整流天线。

### 1.1 贴片天线

2.45 GHz 贴片天线实物如图 1 所示,采用相对介电常数 2.65、损耗角正切 0.005、厚度 1 mm、覆铜厚度  $17 \mu\text{m}$  的 F4B-2 双面覆铜板加工,天线尺寸为  $70 \text{ mm} \times 70 \text{ mm}$ ,贴片长边 37.6 mm,贴片宽边 50 mm,天线阻抗匹配到  $50 \Omega$ 。

天线实测和仿真  $|S_{11}|$  结果如图 2 所示,在中心频率 2.45 GHz 处,实测  $|S_{11}|$  达到 -28 dB,实测和仿真曲线基本一致。天线实测和仿真的 2.45 GHz 频率方向图如图 3 所示,实测和仿真结果一致。贴片天线在 2.45 GHz 频率的增益为 6.0 dBi。



图 1 贴片天线实物图

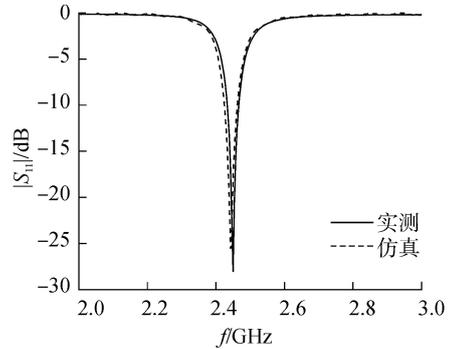


图 2 贴片天线实测和仿真天线  $|S_{11}|$

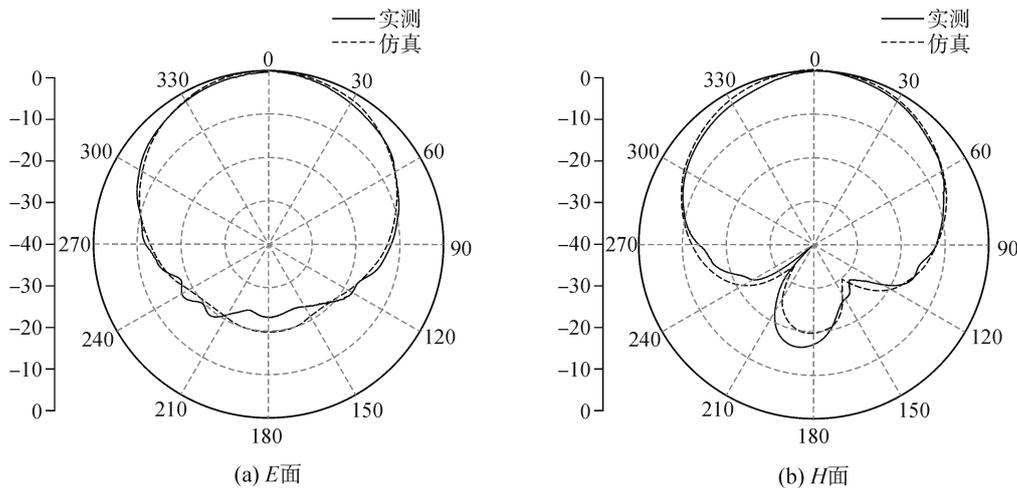


图 3 贴片天线实测和仿真方向图

### 1.2 贴片整流天线

肖特基二极管具有截止频率高、结电阻低和结电容小的特点,广泛应用于微波电路。肖特基二极管的等效电路模型如图 4 所示。 $V_1$  为输入电压, $V_{DC}$  为输出直流电压, $I$  和  $I_{DC}$  分别为输入和输出端流经二极管的电流, $R_s$  为二极管串联阻抗, $C_j$  和  $R_j$  为结电容和结电阻, $R_L$  为负载阻抗, $V_d$  为肖特基二极管结电压。

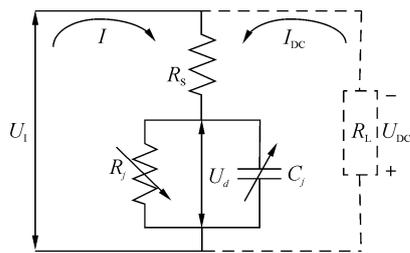


图 4 肖特基二极管等效电路模型

整流二极管选取 SMSA3923\_0111LF 肖特基二极

管,主要 SPICE 参数为: $B_V=46 \text{ V}$ ,  $C_{j0}=0.9 \text{ pF}$ ,  $R_s=10 \Omega$ 。肖特基二极管在频率  $f_c$  时的阻抗为

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

式中: $C_j$ 、 $R_s$  和  $\theta_{on}$  分别是结电容、串联电阻和二极管理导通角<sup>[12-13]</sup>。

应用 CST 软件仿真 2.45 GHz 贴片天线阻抗随位置分布,用于确定二极管的放置位置,实现共轭阻抗匹配。在直流输出端,高阻抗线起到滤除基波和整流产生的高次谐波的作用。选取位置使得天线和二极管整流电路的阻抗共轭匹配,结果如图 5 所示。在贴片天线阻抗为  $38.6 + j74.2 \Omega$  的位置,贴片天线和整流二极管形成共轭匹配,此时  $|S_{11}|$  为 -25.1 dB。贴片整流天线实物如图 6 所示。

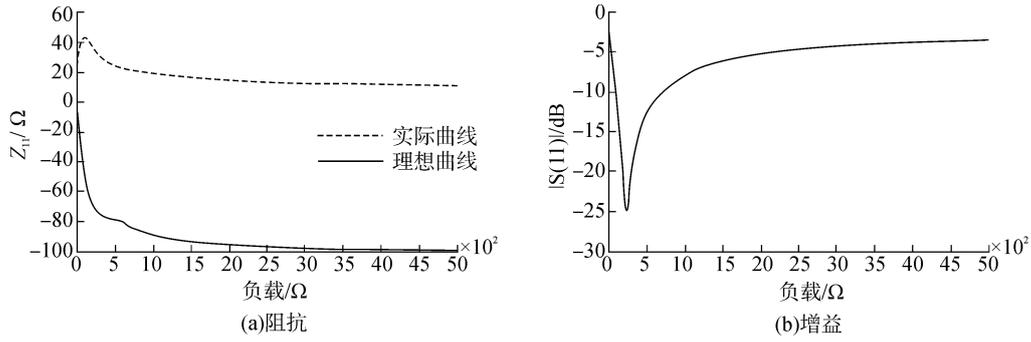


图 5 贴片天线和肖特基阻抗共轭匹配

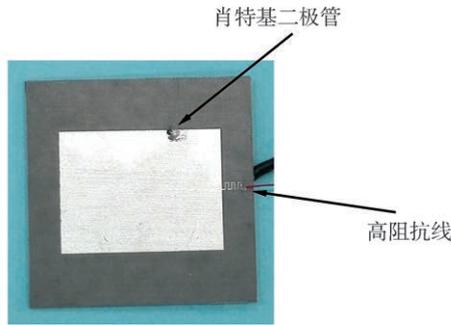


图 6 贴片整流天线实物图

## 2 整流天线测试与分析

图 7 所示为 2.45 GHz 贴片整流天线测试实验系统框图。微波信号源输出功率经功率放大器放大,输入至发射天线,通过 20 dB 定向耦合器测量输入功率。发射天线采用增益 15 dBi 的 2.45 GHz 标准喇叭天线。接收整流天线处在发射天线远场,发射天线和接收整流天线中心对准且极化一致,发射天线和接收整流天线距离为 2.6 m。

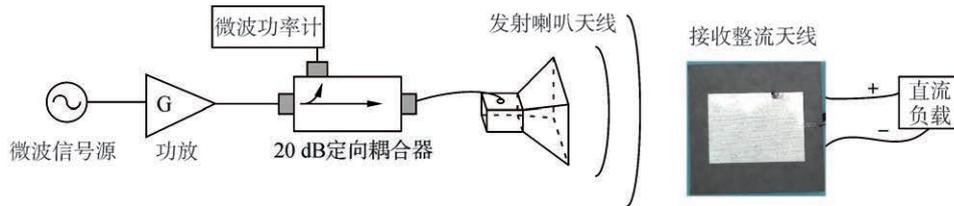


图 7 整流天线测试实验系统框图

贴片整流天线的整流效率为

$$\eta = \frac{V_{out}^2 / R_L}{S_d \times \frac{\lambda_0^2}{4\pi} \times G_{patch}} \times 100\%$$

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

式中:  $V_{out}$  是输出直流电压;  $R_L$  是直流负载;  $d$  是发射天线和接收整流天线远场距离;  $S_d$  为距离  $d$  处时,接收整流天线口径面处功率密度;  $\lambda_0$  是频率  $f_0$  微波在真空中的波长;  $G_{patch}$  是贴片天线增

益;  $P_t$  是发射喇叭天线输入功率;  $G_t$  是发射喇叭天线增益<sup>[14-15]</sup>。  $P_t$  为 50 W 时,  $S_d$  为 1.86 mW/cm<sup>2</sup>;  $P_t$  为 100 W 时,  $S_d$  为 3.72 mW/cm<sup>2</sup>;  $P_t$  为 150 W 时,  $S_d$  为 5.58 mW/cm<sup>2</sup>。

图 8 所示为贴片整流天线在不同发射喇叭天线输入功率下,测得直流输出电压和直流输出功率随负载变化曲线。在负载一定时,直流输出电压和直流输出功率随发射天线输入功率增加而增加;在发射天线输入功率一定时,直流输出电压随负载增加而增加,直流输出功率在负载为 230 Ω 附近达到最大值。

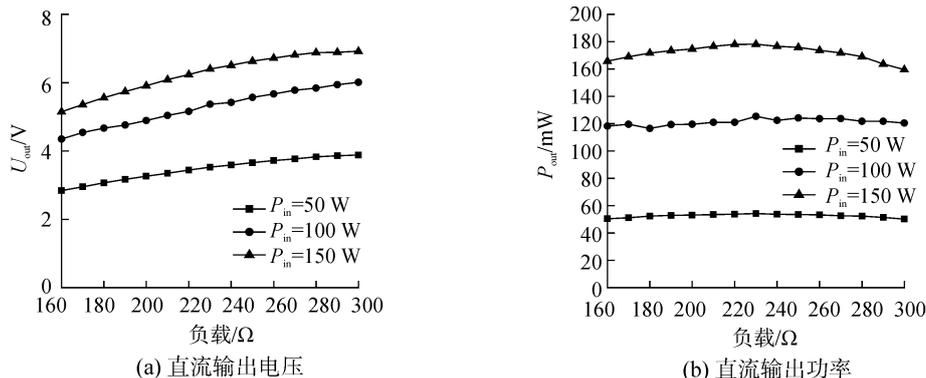


图 8 直流输出电压与功率随负载变化曲线

图9所示为2.45 GHz贴片整流天线在不同发射喇叭天线输入功率下测得整流效率随负载变化曲线。在负载为230  $\Omega$ ,发射天线输入功率为100 W时,最高整流效率达到69.3%,此时整流二极管处在最佳工作状态。整流效率随负载变化基本稳定,随发射天线输入功率有较大的变化。

文中设计实现的2.45 GHz贴片整流天线与传统整流天线相比,主要具有这些创新性:

1)设计方法具有创新。本文整流天线设计关键在于将天线和整流二极管的阻抗相结合,而传统整流天线设计中,阻抗不是重点研究的对象,通常需要匹配到50  $\Omega$ 。

2)整流天线把天线部分和整流部分集为一体,不需要同轴接头,整流二极管通过在天线上打孔的方式隐藏在天线中,新型贴片整流天线尺寸与省去50  $\Omega$ 同轴接头的贴片天线尺寸一样,其中整流部分没有增加额外的面积。传统整流天线通常具有同轴接头和占据较大面积的整流部分,在相同条件下,面积、体积、重量、成本和插损都比本文整流天线的大。

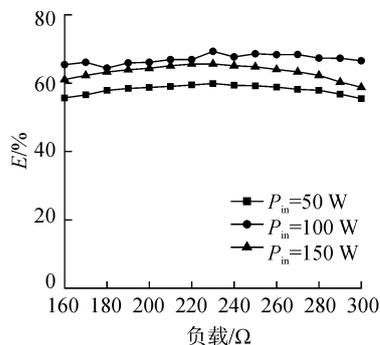


图9 整流效率随负载变化曲线

### 3 结束语

提出了一种新型整流天线设计方法,并设计实现了2.45 GHz微带贴片微波整流天线。经测量2.45 GHz新型微带贴片微波整流天线最高整流效率为69.3%。这种新型整流天线无需微波接头和匹配电路,可在单层结构PCB板上进行加工。新型整流天线具有低剖面、轻重量、低成本、结构简化、容易加工和高整流效率等优势,该设计方法可以有效应用于微波无线能量传输系统中。本文的研究还处于初步阶段,有很大的发展空间,在未来的工作中还值得进一步努力研究。

#### 本文引用格式:

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.

YANG Yilan, LIU Changjun. Design of a novel microstrip patch microwave rectenna[J]. Applied science and technology, 2017, 44(4): 60-63.

### 参考文献:

- [1] BROWN W. Experiments in the transportation of energy by microwave beam[C]// Ire International Convention Record. IEEE, 1964: 8-17.
- [2] 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.
- [3] BROWN W C. The history of power transmission by radio waves[J]. IEEE transactions on microwave and techniques, 1984, 32(9): 1230-1242.
- [4] 银振宇, 位宇, 刘臻龙, 等. 1 kW注入锁定连续波磁控管微波相干合成实验研究[J]. 应用科技, 2016, 43(5): 20-23.
- [5] 张鹤馨, 刘长军. 一种基于子阵分解的高效整流天线阵列[J]. 应用科技, 2016, 43(4): 57-61.
- [6] HUANG W, ZHANG B, CHEN X, et al. Study on an S-band rectenna array for wireless microwave power transmission[J]. Progress in electromagnetics research, 2013, 135(1): 747-758.
- [7] MEI H., YANG X X, HAN B, et al. High-efficiency microstrip rectenna for microwave power transmission at Ka band with low cost[J]. Iet microwaves antennas & propagation, 2016, 10(15): 1648-1655.
- [8] ZHANG B, ZHAO X, YU C, et al. A power enhanced high efficiency 2.45 GHz rectifier based on diode array[J]. Journal of electromagnetic waves and applications, 2001, 25(5-6): 765-774.
- [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.
- [10] LI R, XU L, SHI X W, et al. A 2.45 GHz frequency-selective rectenna for wireless energy harvesting[J]. Microwave and optical technology letters, 2016, 58(10): 429-411.
- [11] TAKHEDMIT H, CIRIO L, MERABET B, et al. Efficient 2.45 GHz rectenna design including harmonic rejecting rectifier device[J]. Electronics letters, 2010, 46(12): 811-812.
- [12] 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.
- [13] MCSPADEN J O, YOO T, CHANG K. Theoretical and experimental investigation of a rectenna element for microwave power transmission[J]. IEEE transactions on microwave theory & techniques, 1992, 40(12): 2359-2366.
- [14] SUH Y H, CHANG K. A high-efficiency dual-frequency rectenna for 2.45 and 5.8 GHz wireless power transmission[J]. IEEE transactions on microwave theory & techniques, 2002, 50(7): 1784-1789.
- [15] MCSPADEN J O, FAN L, CHANG K. Design and experiments of a high-conversion-efficiency 5.8-GHz rectenna[J]. IEEE transactions on microwave theory & techniques, 1998, 46(12): 2053-2060.