

doi: 10.3969/j.issn.0490-6756.2017.06.015

基于多层板过孔互连结构的小型化微波整流电路设计

冯小平, 黄卡玛

(四川大学电子信息学院, 成都 610064)

摘要: 设计了一种新颖的基于多层结构的微波整流电路, 在该电路中使用过孔连接多层板的各导体层. 在此基础上, 加工了基于 HSMS-282C 肖特基二极管的 S 波段多层整流电路, 其微波到直流转换效率达到 73%. 与传统的微带整流电路相比, 多层整流电路与其转换效率相近且能极大地减小电路物理尺寸. 实验结果表明, 本文采用的多层整流电路能够在不牺牲整流效率的前提下, 实现小型化的目标, 从而满足微波无线输能系统的大规模集成及小型化需求.

关键词: 整流电路; 小型化; 多层; 过孔; 转换效率

中图分类号: TN61 **文献标识码:** A **文章编号:** 0490-6756(2017)06-1217-05

Design of a miniaturized rectifying circuit with a via-hole interconnected multilayer structure

FENG Xiao-Ping, HUANG Ka-Ma

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

Abstract: This article proposes a novel concept for constructing a microwave (MW) rectifying circuit by using a multilayer structure, aiming at reducing physical dimensions. Specifically, conductor layers in the multilayer structure are interconnected with an embedded via-hole. Then, an S-band rectifying circuit based on HSMS-282C Schottky diode is fabricated with the proposed multilayer structure for demonstration. The maximum MW-DC conversion efficiency of 73% has been measured. In comparison with the conventional microstrip rectifying circuit, the proposed multilayer circuit shows a great reduction of physical dimensions and a very similar efficiency, which validates that the proposed circuit can reduce physical dimensions significantly without sacrificing the MW-DC conversion efficiency.

Keywords: Rectifying circuit; Miniaturized; Multilayer; Via-hole; Conversion efficiency

1 引言

近年来,微波能的应用范围越来越广泛,涉及到人类生活的各个方面^[1,2]. 随着微波无线能量传输技术的发展,整流天线也得到更多的关注^[3,4]. 作为整流天线的一个关键部分,整流电路也越来越多地应用于航空航天系统,如微波远程供能的直升机,太阳能电站以及空间能量传输等^[5-7]. 在实际的

微波无线能量传输系统中,整流天线都是以阵列的形式存在,通常由大量独立的整流电路构成,而这些整流电路只能放置在有限的可利用面积内. 为了节省航空飞行器的可使用面积,实现大规模,高集成度和更高的功质比,研究小型化整流电路是非常必要的.

目前,微波整流电路的研究主要集中在 ISM 频段,包括 915 MHz^[8], 2.45 GHz^[9] 以及 5.8

收稿日期: 2017-08-18

基金项目: 国家重点基础研究发展“973 计划”(2013CB328902, 2013CB328905)

作者简介: 冯小平(1987-), 男, 四川南充人, 博士生, 研究方向为微波无线能量传输.

通讯作者: 黄卡玛. E-mail: kmhuang8779@163.com

GHz^[10]. 其中 2.45 GHz 的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. 因此, 本文设计了应用于 2.45 GHz 的微波整流电路, 通过使用多层结构来替代传统的微带整流电路, 从而实现电路小型化. 在该多层结构中, 输入滤波器、整流二极管、输出滤波器和负载电阻分布于不同的导体层, 并通过过孔实现互连. 此外, 本文采用混合设计方法, 应用全波电磁分析研究选定的过孔参数对电路性能的影响; 应用谐波平衡仿真处理二极管的非线性整流过程, 用来优化电路参数.

2 多层结构及过孔设计

2.1 多层结构

本文采用的多层结构如图 1 所示. 该结构包含两个介质层及三个导体层, 分别定义为顶层, 介质层 1, 中间层, 介质层 2 和底层. 在该结构中, 电路的输入滤波器及整流二极管位于顶层, 输出滤波器及负载电阻位于底层, 中间层为整个电路的公共地, 通过过孔实现顶层与底层的互连.

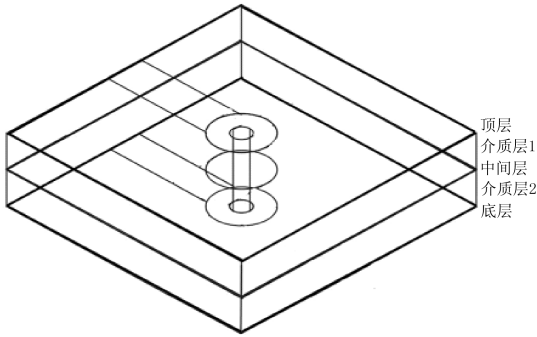


图 1 多层结构示意图
Fig. 1 Model of the multilayer structure

2.2 过孔设计

传统电路设计中, 当频率较低时, 过孔各参数的确定多是基于经验以及厂家的建议值. 然而, 当频率上升至微波频段时, 过孔结构导致的阻抗不连续性会引起能量的反射并影响电路性能. 过孔结构可以用一个简单的集总 LC- π 型电路等效^[11], 如图 2 所示, 基于准静态分析, 其电容电感值可以用经验公式来表示^[12], 如下式.

$$C \approx 1.41 \epsilon_r T \frac{D_p}{D_{ap} - D_p} \quad (1)$$

$$L \approx 5.08h \left[\ln\left(\frac{4h}{d}\right) + 1 \right] \quad (2)$$

其中, $\epsilon_r, T, D_p, D_{ap}, h$ 和 d 分别为基板相对介电常数, 基板厚度, 过孔焊盘直径, 过孔隔离焊盘直径, 过孔高度以及过孔直径.

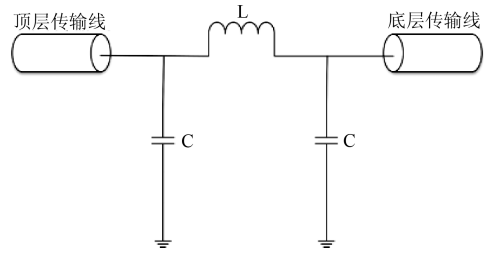


图 2 过孔结构等效电路
Fig. 2 Equivalent circuit of the proposed via-hole

为了减小式(1)中的电容效应, 过孔焊盘直径, 相对介电常数及多层板厚度应该尽量小并增大隔离焊盘直径. 同样的, 为了减小式(2)中的电感效应, 需要减小过孔的高度.

基于上述分析, 为了减小过孔结构导致的能量损耗, 需要采用厚度小, 低介电常数的介质基板并减小过孔直径. 但这会导致加工难度和加工费用的增加. 工程上通常用高径比来衡量成本收益, 其定义为过孔高度与过孔直径的比值. 低高径比意味着相对简单和低花费的加工过程.

在本设计中, 采用两层常用的 F4B-2 介质, 其厚度均为 1 mm, 介电常数 $\epsilon_r = 2.65$, 损耗角正切 $\tan \delta = 0.001$. 过孔直径选为 0.4 mm, 其对应的高径比仅为 5. 因二极管需要连接在过孔及输入滤波器中间, 基于焊接及加工精度的考量, 传输线宽度选为 0.8 mm, 过孔焊盘直径和隔离焊盘直径皆为 1.2 mm. 该过孔结构的 $|S_{11}|$ 和 $|S_{21}|$ 如图 3 所示, 当频率为 2.45 GHz 时, $|S_{11}|$ 和 $|S_{21}|$ 分别为 -20.8 dB 和 -0.1 dB.

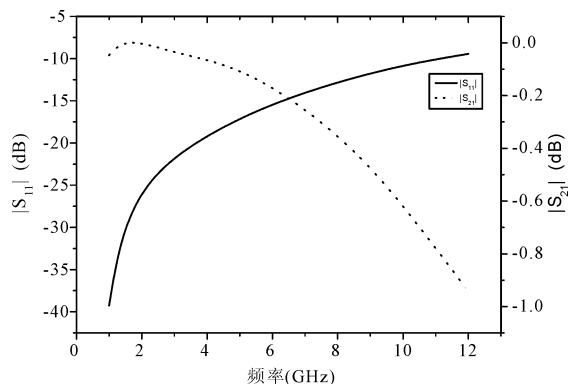


图 3 设计的过孔 $|S_{11}|$ 及 $|S_{21}|$ 变化趋势
Fig. 3 $|S_{11}|$ and $|S_{21}|$ of the proposed via-hole

3 整流电路设计

过孔参数确定后, 将应用于后续的多层电路设计. 一个完整的整流电路通常是由隔直电容, 输入滤波器, 整流二极管和输出滤波器构成^[13]. 微波能量从输入滤波器传至整流二极管并将微波转换成直流, 直流能量流过输出滤波器并在负载电阻上以直流电压的形式存在. 整流二极管非线性过程产生的谐波能量在输入滤波器及输出滤波器之间反射并传至二极管再次整流.

3.1 输入滤波器及隔直电容

二极管的复阻抗^[14]一般定义为

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

其中, C_j, R_s, θ_{on} 分别为结电容, 串联电阻和导通角. 相应的, 二极管虚部为

$$\text{Im}[Z_d] = \frac{-j\pi}{\omega C_j \left(\frac{\pi - \theta_{on}}{\cos\theta_{on}} + \sin\theta_{on} \right)} \quad (4)$$

刘长军等人^[15]已经证明, 可以采用一个集总电感用来抵消二极管的容抗并实现简单的阻抗匹配. 但是在微波频段, 集总元件的寄生参数是不可忽略的. 本设计中为进一步减小电路尺寸, 取消输入滤波器和隔直电容, 采用 $\frac{\lambda_g}{8}$ 短路枝节代替集总电感. $\frac{\lambda_g}{8}$ 传输线在基频等效于一个电感; 在二次谐波处, 等效于一个 $\frac{\lambda_g}{4}$ 谐振器, 因此可以用来抵消二极管阻抗的虚部.

3.2 整流二极管

整流二极管是整流电路的关键器件, 其转换效率主要由反向击穿电压 (V_{br}), 零偏置结电容 (C_{j0}), 串联电阻 (R_s) 三个参数确定. 由于具有低导通电压和低结电容, 肖特基二极管广泛应用于整流中. 本设计中采用 Avago HSMS-282C 肖特基二极管, 其主要 SPICE 参数为: $R_s = 6 \Omega, V_{br} = 15 \text{ V}, C_{j0} = 0.7 \text{ pF}$.

3.3 输出滤波器

两个 100 pF 贴片电容以及一段传输线构成输出滤波器. 其主要作用为: 通过电容位置调节二极管电抗; 隔绝谐波能量并反射至二极管再次整流;

电容的充放电过程使得直流电压输出更稳定.

整个多层电路采用矩量法和谐波平衡仿真方法进行协同仿真. 优化后的版图如图 4 所示.

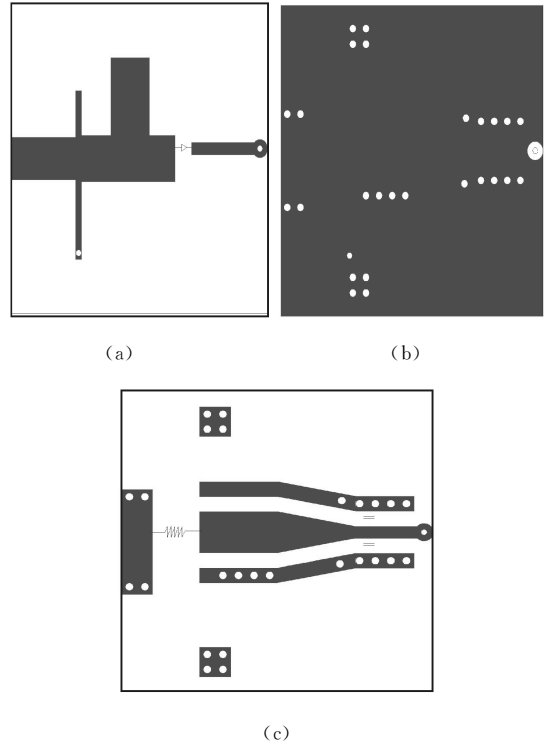
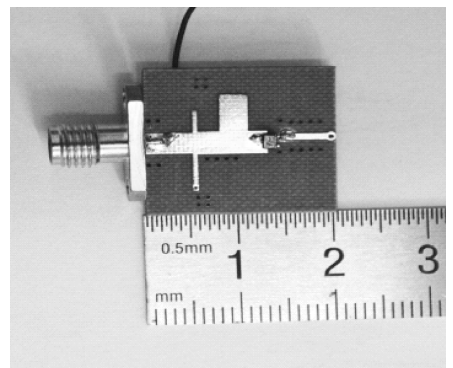


图 4 多层整流电路版图
(a) 顶层; (b) 中间层; (c) 底层

Fig. 4 Layout of the proposed multilayer rectifying circuit
(a) top layer; (b) internal layer; (c) bottom layer

4 实验结果

多层整流电路包含两层介质板和三层覆铜层, 介质板均采用 F4B-2 聚四氟乙烯玻璃纤维板, 基板厚度 1 mm, 介电常数 $\epsilon_r = 2.65$, 损耗角正切值 $\tan \delta = 0.001$, 覆铜层厚度为 0.018 mm. 电路中的二极管为 HSMS-282C 型肖特基二极管. 图 5 为加工的 2.45 GHz 多层整流电路实物图, 其尺寸为 20 mm × 20 mm.



(a)

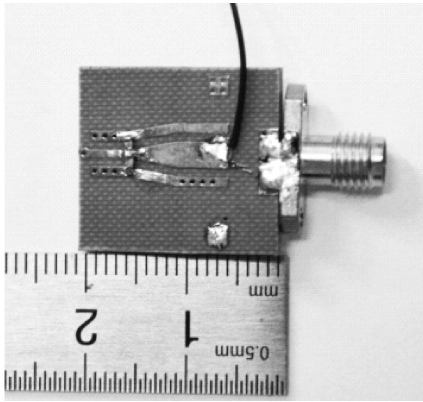


图 5 多层整流电路实物图
(a)顶层;(b)底层

Fig. 5 Prototype of the proposed multilayer rectifying circuit

(a) top layer; (b) bottom layer

电路测试中,功率源采用 Agilent E8267C 矢量信号源,直流电压测量采用 Agilent 34970A 数据采集器,整流电路负载采用可调电阻箱.微波到直流转换效率定义为

$$\eta = \frac{V_o^2}{R_L P_{in}} \times 100\% \quad (5)$$

其中, V_o 为负载电阻 R_L 上的直流电压; P_{in} 为微波输入功率.

多层整流电路的输出直流电压随输入微波功率及负载电阻的变化曲线如图 6 所示.可以看出,当负载在一定的范围内增加时,直流电压会随之增加;当输入功率增加时,直流电压曲线变得更陡峭.图 7 为测量的微波到直流转换效率随不同的输入功率和负载电阻的变化曲线,实测多层整流电路最高转换效率为 73%,其对应的输入功率为 19 dBm,负载电阻为 350 Ω .

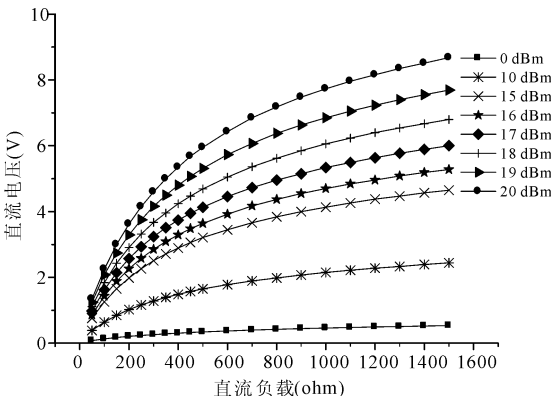


图 6 实测多层整流电路直流输出电压

Fig. 6 Measured output DC voltage of the proposed circuit

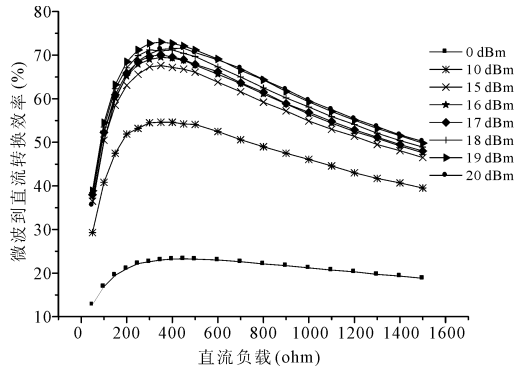


图 7 实测多层整流电路转换效率

Fig. 7 Measured conversion efficiency of the proposed circuit

对应于多层整流电路,另加工了一个传统的单层微带型整流电路作为对比,尺寸为 35 mm \times 35 mm,其实物图如图 8 所示.直流输出电压及转换效率分别如图 9,图 10 所示.实测在输入功率为 19 dBm,负载电阻为 200 Ω 时,其转换效率达到 75%.与传统整流电路相比,小型化的多层整流电路尺寸减小 67%,而其微波到直流转换效率仅降低 2%.

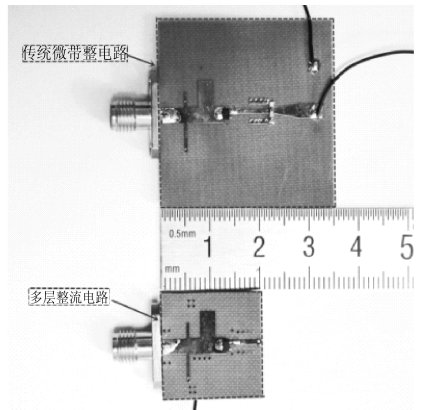


图 8 多层及传统微带整流电路尺寸对比

Fig. 8 Physical size comparison of the multilayer circuit and the conventional circuit

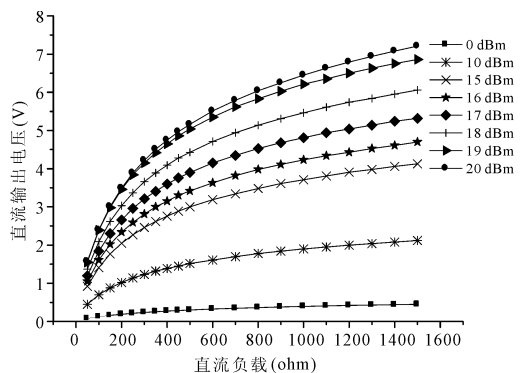


图 9 实测传统微带整流电路直流输出电压

Fig. 9 Measured output DC voltage of the conventional circuit

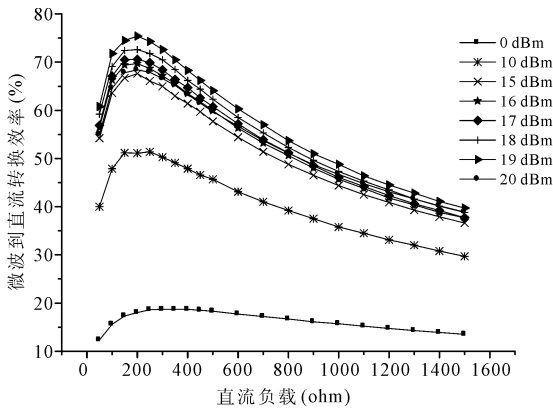


图10 实测传统微带整流电路转换效率

Fig. 10 Measured conversion efficiency of the conventional circuit

5 结论

为了满足微波无线能量传输系统中小型化及大规模集成应用的需求,本文设计了2.45 GHz的多层整流电路.作为该多层结构的重要组成部分,过孔结构对电路性能的影响极大.分析表明,随着过孔直径,过孔高度及基板介电常数的增加,电路的损耗会随之增加.实际加工了基于HSMS-282C肖特基二极管的多层整流电路,其尺寸仅为20 mm×20 mm,在输入功率为19 dBm,负载为350 Ω时,微波到直流转换效率达到73%.此外加工了对应的微带整流电路,尺寸为35 mm×35 mm,最大转换效率为76%.两者相较,多层整流电路物理尺寸减小67%,同时对转换效率的影响极小.实验结果表明采用多层板过孔互连结构可以实现微波整流电路的小型化.

参考文献:

[1] 唐正明,黄卡玛.多模微波加热腔电场刷变条件研究[J].四川大学学报:自然科学版,2016,53:1273.

[2] 石超,王涛,张福浩,等.微波热处理再生颗粒状活性炭的研究[J].四川大学学报:自然科学版,2015,52:101.

[3] Hagerty J A, Helmbrecht F B, McCalpin W H, *et al.* Recycling ambient microwave energy with broad-band rectenna arrays [J]. IEEE Trans Microw Theory, 2004, 52: 1014.

[4] Huang Y, Shinohara N, Mitani T. A constant efficiency of rectifying circuit in an extremely wide load range [J]. IEEE Trans Microw Theory, 2014, 62: 986.

[5] Brown W C. Experiments involving a microwave beam to power and position a helicopter [J]. IEEE Trans Aero Elec sys, 1969, 5: 692.

[6] Glaser P E. An overview of the solar power satellite option [J]. IEEE Trans Microw Theory, 1992, 40: 1230.

[7] Shinohara N. Beam control technologies with a high-efficiency phased array for microwave power transmission in Japan [J]. Proc IEEE, 2013, 101: 1448.

[8] 李凯,陈彦龙,刘长军.一种915MHz低功率微波高效微带整流电路研究[J].四川大学学报:自然科学版,2012,49:601.

[9] 张全琪,邓华超,谭洪舟.一种高效2.45GHz低输入功率微带整流电路[J].电子技术应用,2015,41:60.

[10] Matsunaga T, Nishiyama E, Toyoda I. 5.8-GHz stacked differential rectenna suitable for large-scale rectenna arrays with DC connection [J]. IEEE Trans Antenn Propag, 2015, 63: 5944.

[11] Wang T, Harrington R F, Mautz J R. Quasi-static analysis of a microstrip via through a hole in a ground plane [J]. IEEE Trans Microw Theory, 1988, 36: 1008.

[12] Johnson H W, Graham M. High-speed digital design: a handbook of black magic [M]. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1993.

[13] Chou J H, Lin D B, Weng K L, *et al.* All polarization receiving rectenna with harmonic rejection property for wireless power transmission [J]. IEEE Trans Antenn Propag, 2014, 62: 5242.

[14] Yoo T W, Chang K. Theoretical and experimental development of 10 and 35 GHz rectennas [J]. IEEE Trans Microw Theory, 1992, 40: 1259.

[15] He Q, Liu C. An enhanced microwave rectifying circuit using HSMS-282 [J]. Microw Opt Techn Lett, 2009, 51: 1151.