

doi: 10.3969/j.issn.0490-6756.2018.06.015

# 基于二极管等效模型的 2.45 GHz 微波整流电路的设计

万韶鹏, 黄卡玛

(四川大学电子信息学院, 成都 610064)

**摘要:** 提出了一种提取二极管等效模型的方法, 并基于该方法设计了微波整流电路. 文中首先根据软件自带 HSMS-282C 肖特基二极管的电路模型, 设计、加工并测试了一款工作于 2.45 GHz 的微波整流电路; 然后根据测试结果优化了二极管等效模型的相关参数; 最后用得到的等效模型替代二极管重新设计了整流电路. 其中, 为了减少焊接产生的寄生参数对测试结果的影响, 采用了阻抗阶跃微带线来设计低通滤波器. 实验结果表明, 基于本文得到的二极管等效模型设计的微波整流电路, 其仿真结果和测试数据可以良好地吻合. 在输入功率为 20 dBm、负载为 500  $\Omega$  时, 整流电路实现了 73.4% 的转换效率.

**关键词:** 整流电路; 肖特基二极管; 等效模型; 低通滤波器

**中图分类号:** TN61      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0490-6756(2018)06-1225-05

## Design of a 2.45 GHz microwave rectifying circuit based on the diode equivalent model

WAN Shao-Peng, HUANG Ka-Ma

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

**Abstract:** This paper proposes a method to extract the equivalent circuit model of the diode and a microwave rectifying circuit is designed base on this method. Specifically, a rectifying circuit operating at the microwave frequency of 2.45 GHz is designed, fabricated and tested according to the diode model of HSMS-282C in the component library first. Then, the equivalent model of the diode is optimized on the basis of the measured results. Finally, the rectifying circuit is redesigned with the obtained equivalent model. In addition, a microstrip step-impedance low-pass filter is adopted, which is used to reduce the effects of the parasitic parameters on the tested results introduced by the welding. It is demonstrated that the measured and the simulated results of the rectifying circuit designed with the proposed method agree well with each other. The conversion efficiency of achieved 73.4% when the input power is 20 dBm and the DC load is 500  $\Omega$ .

**Keywords:** Rectifying circuit; Schottky diode; Equivalent model; Low-pass filter

## 1 引言

自从 Glaser 在 1968 年提出了空间太阳能卫星计划以来<sup>[1]</sup>, 微波能量传输受到了越来越多的关

注, 各国研究者对其进行了大量的研究<sup>[2,3]</sup>. 在微波能量传输系统中, 整流电路是一个关键的部件, 它的性能对系统的整体传输效率具有重要的影响. 目前, 人们已经在 0.915 GHz、2.45 GHz 和 5.8

收稿日期: 2017-12-15

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

作者简介: 万韶鹏(1989—), 男, 江西丰城人, 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 等多个频点设计了相应的整流电路<sup>[4-7]</sup>. 近年来,随着物联网和无线传感器的迅速发展<sup>[8,9]</sup>,整流电路得到了更多的关注.

自从 1963 年发现了半导体二极管可以有效地将微波能量转换为直流能量后<sup>[10]</sup>,越来越多的二极管应用于整流电路中. 其中,Brown 采用定制的二硫化镓二极管设计的整流电路实现了超过 90% 的转换效率<sup>[11]</sup>. 但采用一般商用的二极管得到的转换效率要小得多<sup>[5,12]</sup>. 除了商用二极管本身损耗大之外,另一个重要原因是没有建立准确的二极管电路模型. 而且,即使对于同一型号的二极管,不同厂家甚至同一厂家不同批次生产的二极管其对应的电路模型都存在一定差异. 因此,在整流电路的设计中,为了实现较高的整流效率,提取准确的二极管模型具有实际的应用价值. 一般地,二极管模型可以采用专用的测试夹具和校准系统直接测试得到,但这种方法需要精密的仪器,而且对不同封装类型的二极管需要不同的测试夹具和校准件<sup>[13]</sup>. 本文根据软件自带的二极管模型设计了应用于 2.45 GHz 的整流电路,并测试了其转换效率. 以实测数据为目标优化提取出了更为准确的二极管等效模型. 使用该模型替代软件自带模型,设计了新的整流电路. 实测结果表明,新的整流电路的测试结果和仿真结果基本吻合,在输入功率为 20 dBm、负载电阻为 500  $\Omega$  时,电路得到最大转换效率 73.4%.

## 2 二极管等效模型的参数提取

微波整流电路通常由传输线、匹配枝节、整流二极管和低通滤波器构成. 其中,整流二极管的性能决定整流电路转换效率的极限. 因为具有低导通电压和低结电容等优点,肖特基二极管被广泛应用于微波频段的整流电路设计中. 本文采用 HSMS-282C 的肖特基二极管. 首先,根据软件自带的 HSMS-282C 模型设计了一个整流电路. 如图 1 所示,整流电路介质板采用单层 F4B-2 聚四氟乙烯玻璃纤维板,基板厚度为 1 mm,相对介电常数为 2.65,损耗角正切为 0.001. 电路整体尺寸为 52 mm $\times$ 52 mm. 在整流电路中,一般采用电容加载的低通滤波器,但为了减少焊接对参数提取的影响,文中采用阻抗阶跃微带线的低通滤波器.

为了了解整流电路中低通滤波器的性能,对低通滤波器进行了仿真,滤波器的输入端使用阻抗为 50  $\Omega$  的端口激励,输出端依次加载 50  $\Omega$ 、300  $\Omega$ 、

600  $\Omega$  和 900  $\Omega$  的负载. 对应的反射系数如图 2 所示. 可以看出,设计的由阻抗阶跃微带线构成的低通滤波器具有良好的工作特性. 输出端加载不同负载时,滤波器在基频(2.45 GHz)、二次谐波和三次谐波的反射系数均大于 -0.65 dB.

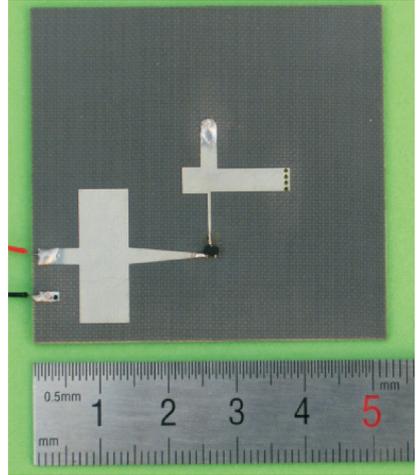


图 1 根据软件自带模型设计的整流电路的实物图

Fig. 1 Prototype of the designed rectifying circuit based on the library model

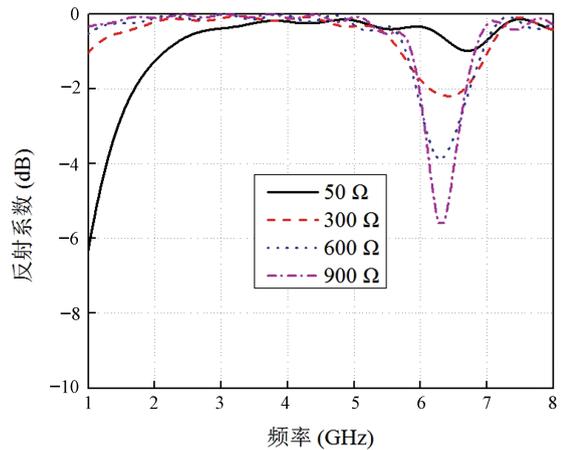


图 2 加载不同负载时滤波器的反射系数

Fig. 2 Reflection coefficient of the filter with different loads

在电路测试中,微波源采用了 Agilent E8267C 的信号源,使用了可调电阻箱作为整流电路的直流负载. 微波到直流转换效率定义为

$$\eta = \frac{P_{DC}}{P_{in}} = \frac{V_{DC}^2}{P_{in}R_L} \times 100\% \quad (1)$$

其中, $P_{DC}$ 为直流输出功率; $V_{DC}$ 为负载电阻  $R_L$  上的直流电压; $P_{in}$ 为微波信号源的输出功率. 图 3 给出了整流电路的仿真和测试结果,从图 3(a)中可以看出,在采用软件自带模型的仿真中,整流电路

在输入功率为 17 dBm 时的最大转换效率为 64.7%, 对应的直流负载电阻为 1000  $\Omega$ ; 此时整流电路实测的最大转换效率为 30.8%, 对应的直流负载电阻为 700  $\Omega$ . 图 3(b) 为直流负载固定为 700  $\Omega$  时, 整流电路转换效率随输入功率的变化曲线. 从中可以看出仿真得到的转换效率曲线和测试结果同样存在很大的差异.

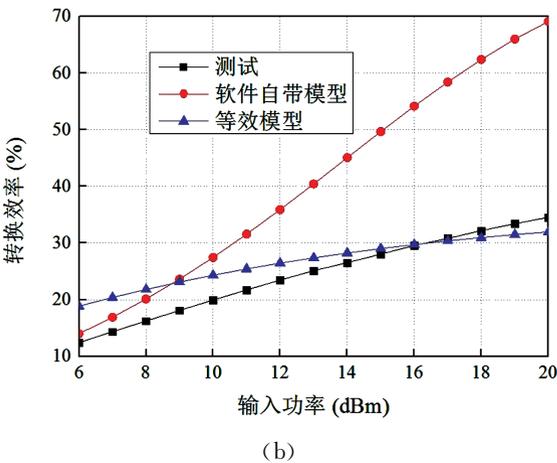
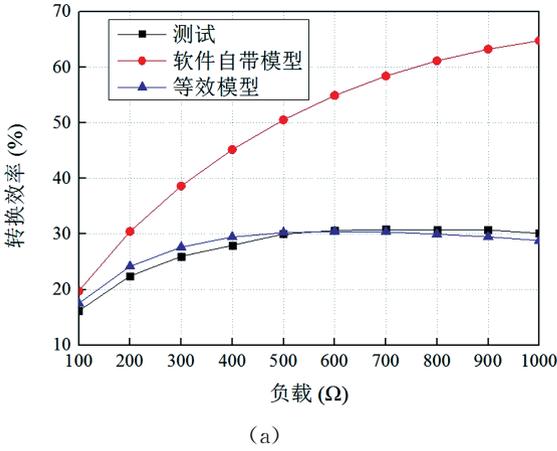


图 3 整流电路转换效率

(a) 转换效率随负载的变化; (b) 转换效率随输入功率的变化

Fig. 3 Conversion efficiency of the rectifying circuit (a) conversion efficiency versus DC load; (b) conversion efficiency versus input power

为了设计出高效率的整流电路, 需要得到实验中二极管的准确模型. 肖特基二极管 HSMS-282 管芯<sup>[14]</sup>和 SOT-323 封装<sup>[15]</sup>的等效电路如图 4 所示. 管芯中结电阻  $R_j$  是可变的, 在仿真中, 可以采用非线性电流模型表征它的工作特性<sup>[16,17]</sup>, 如图 5 所示. 这样就得到了完整的二极管的等效模型. 为了得到准确的等效模型, 将测试结果作为优化目标, 不断调整等效模型中各个参数的值. 得到的拟

合结果如图 3 所示, 表 1 和表 2 给出了其各个参数对应的值.

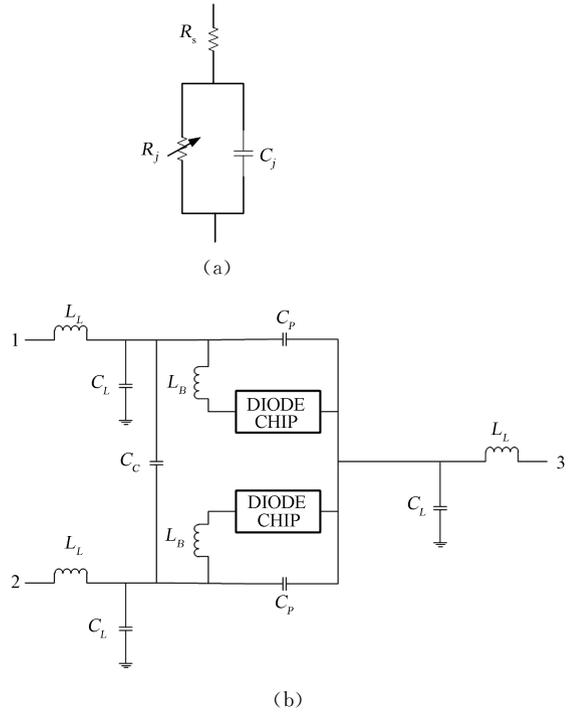


图 4 HSMS-282C 二极管的线性模型

(a) 管芯的线性模型; (b) SOT-323 的封装模型

Fig. 4 Equivalent circuit of a HSMS-282C diode (a) linear model of the diode chip; (b) model of the SOT-323 package

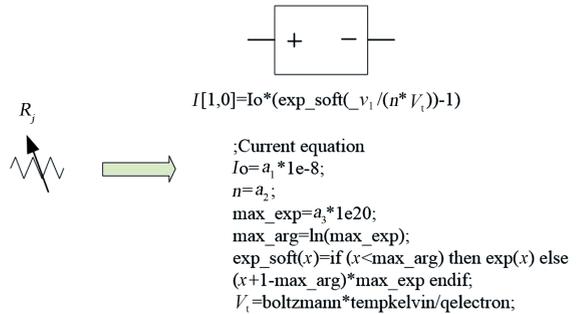


图 5 非线性电流模型

Fig. 5 Nonlinear current model

表 1 优化后的管芯模型参数

Tab. 1 Optimized parameters of the diode chip

$R_s$	$C_j$	$a_1$	$a_2$	$a_3$
5.5 $\Omega$	0.4 pF	2.2	1.87	2

表 2 优化后的封装模型参数

Tab. 2 Optimized parameters of the SOT-323 Package

$L_L$	$C_L$	$C_P$	$C_C$	$L_B$
0.26 nH	0.047 pF	0.027 pF	0.053 pF	0.55 nH

### 3 整流电路的重新设计

在整流电路的重新设计中,优化得到的二极管等效模型替代了软件中的自带模型,设计的电路如图 6 所示. 类似的,对整流电路中低通滤波器进行了仿真,结果如图 7 所示. 可以看出,阻抗阶跃微带线构成的低通滤波器具有良好的工作特性,它对 2.45 GHz 基频及其二次和三次谐波具有良好的抑制作用. 低通滤波器实现了对基频和高次谐波的回收<sup>[17]</sup>.

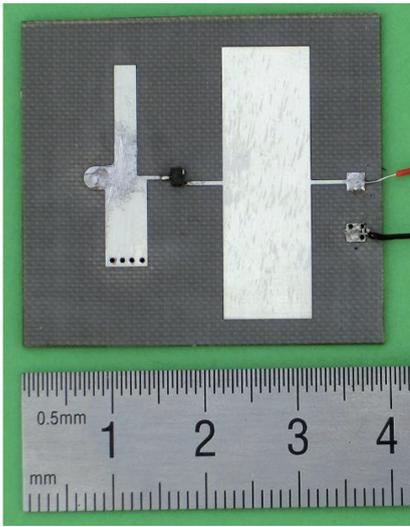


图 6 重新设计的整流电路的实物图

Fig. 6 Prototype of the redesigned rectifying circuit

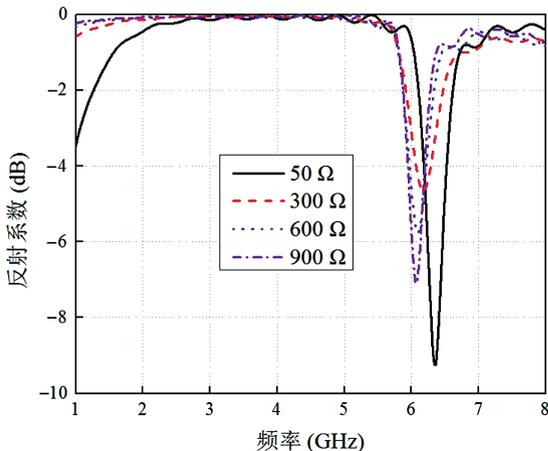
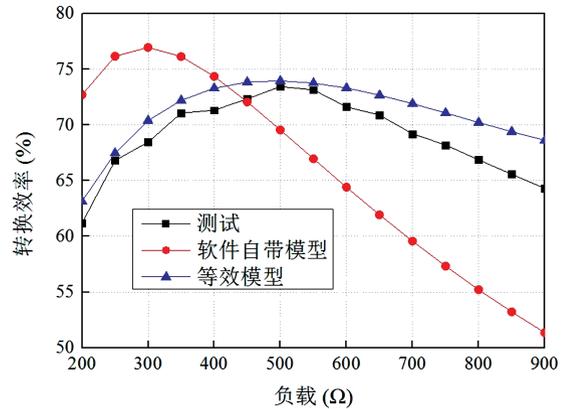


图 7 加载不同负载时滤波器的反射系数

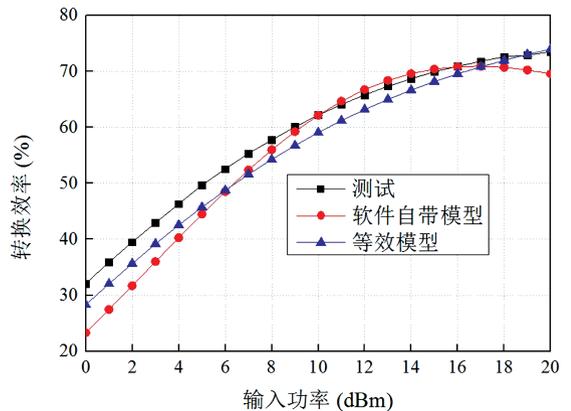
Fig. 7 Reflection coefficient of the filter with different loads

图 8 给出了重新设计的整流电路的仿真和测试结果,从图 8(a)中可以看出在输入功率为 20 dBm 时,整流电路实测的最大转换效率为 73.4%,

对应的直流负载电阻为 500  $\Omega$ ;采用软件自带模型仿真时,整流电路的最大转换效率为 77%,对应的直流负载电阻为 300  $\Omega$ ;采用建立的等效模型仿真时,整流电路的最大转换效率为 73.7%,对应的直流负载电阻为 500  $\Omega$ . 图 8(b)为直流负载电阻固定为 500  $\Omega$  时,整流电路的转换效率随输入功率的变化曲线. 从图 8 中可以看出采用等效模型仿真的结果更符合测试结果.



(a)



(b)

图 8 重新设计的整流电路的转换效率

(a) 转换效率随负载的变化; (b) 转换效率随输入功率的变化  
Fig. 8 Conversion efficiency of the redesigned rectifying circuit

(a) conversion efficiency versus DC load; (b) conversion efficiency versus input power

### 4 结论

本文提出了一种通过建立二极管等效模型来设计整流电路的方法. 其中,采用非线性的电流模型替代二极管的可变结电阻;然后,根据软件自带模型设计的整流电路的测试结果,优化了等效模型中的参数;最后,根据得到的等效模型重新设计了整流电路. 实验结果表明,采用这种方式设计的整

流电路具有良好的工作性能,对应的仿真结果明显比采用软件自带模型的仿真结果更接近实验数据。因此,在二极管模型不确定的情况下,采用本文提出的方法设计的微波整流电路可以实现较高的转换效率。此外,在实验中可以根据多个整流电路的测试结果来优化等效模型,进一步增加模型的准确性。

### 参考文献:

- [1] Glaser P E. Power from the Sun: its future [J]. Science, 1968, 162: 857.
- [2] Strassner B, Chang K. Microwave power transmission: historical milestones and system components [J]. Proc IEEE, 2013, 101: 1379.
- [3] Shinohara N, Matsumoto H. Experimental study of large rectenna array for microwave energy transmission [J]. IEEE Trans Microw Theory Tech, 1998, 46: 261.
- [4] 李凯, 陈彦龙, 刘长军. 一种 915 MHz 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.
- [5] 冯小平, 黄卡玛. 基于多层板过孔互连结构的小型化 S 波段整流电路设计[J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2017, 54: 1217.
- [6] McSpadden J O, Fan L, Chang K. Design and experiments of a high-conversion-efficiency 5.8-GHz rectenna [J]. IEEE Trans Microw Theory Tech, 1998, 46: 2053.
- [7] Chiou H, Chen I. High-efficiency dual-band on-chip rectenna for 35- and 94-GHz wireless power transmission in 0.13- $\mu\text{m}$  CMOS technology [J]. IEEE Trans Microw Theory Tech, 2010, 58: 3598.
- [8] Mukherjee A. Physical-layer security in the internet of things: sensing and communication confidentiality under resource constraints [J]. Proc IEEE, 2015, 103: 1747.
- [9] Jayaprakasam S, Rahim S K A, Leow C Y. Distributed and collaborative beamforming in wireless sensor networks: classifications, trends and research directions [J]. IEEE Commun Surv Tutor, 2017, 19: 2092.
- [10] George R H, Sabbagh E M. An efficient means of converting microwave energy to dc using semiconductor diodes [J]. Proc IEEE, 1963, 51: 132.
- [11] Brown W C. The history of wireless power transmission [J]. Solar Energy, 1996, 56: 3.
- [12] Takhedmit H, Cirio L, Bellal S, *et al.* Compact and efficient 2.45 GHz circularly polarized shorted ring-slot rectenna [J]. Electron Lett, 2012, 48: 253.
- [13] 孙璐. 基于散射函数的一种微波非线性电路建模新方法[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.
- [14] Avago Technologies. HSMS-282x, Surface Mount RF Schottky Barrier Diodes [EB/OL]. (2014-03-06) [2017-10-12]. <http://www.avagotech.com/docs/AV02-1320EN>.
- [15] Avago Technologies. Linear models for diode surface mount packages [EB/OL]. (2017-06-09) [2017-10-13]. <http://www.avagotech.com/docs/AV02-0038EN>.
- [16] Hansen J, Chang K. Diode modeling for rectenna design [C]//IEEE International Symposium Antennas and Propagation. Spokane, WA, USA: IEEE, 2011.
- [17] 奚文龙, 唐文秀, 许李尚, 等. 基于一阶低通滤波器滑模反步法的直流电机位置控制[J]. 重庆邮电大学学报: 自然科学版, 2017, 29: 550.

### 引用本文格式:

- 中文: 万韶鹏, 黄卡玛. 基于二极管等效模型的 2.45 GHz 微波整流电路的设计[J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2018, 55: 1225.
- 英文: Wan S P, Huang K M. Design of a 2.45 GHz microwave rectifying circuit based on the diode equivalent model [J]. J Sichuan Univ: Nat Sci Ed, 2018, 55: 1225.