

文章编号: 2095-4980(2025)02-0158-07

基于半波长传输线的双频整流电路设计

聂之君, 韩滔, 孔笑荷, 郭晗, 周若臣, 沈郁博, 么鹏, 孙铮, 赵帅

(航天科工防御技术研究试验中心, 北京 100084)

摘要: 提出一种低剖面、紧凑的双频整流电路, 可用于射频能量收集和微波功率传输等场景中。提出的整流电路没有使用阻抗匹配网络, 仅使用 2 条微带传输线实现整流电路的双频特性: 第 1 条微带传输线将肖特基二极管(HSMS-2850)与整流电路后端的负载和滤波器进行连接; 第 2 条微带传输线为半波长微带传输线, 为设计的整流电路增加了第 2 个频段。这种设计方式不仅减小了整流电路的整体尺寸($0.14\lambda_0 \times 0.11\lambda_0$, λ_0 为最低频率对应的波长), 也减少了额外匹配结构带来的损耗。经过理论分析、仿真和加工制造, 整流电路的实测结果与仿真结果基本一致。当输入功率为 0 dBm 时, 整流电路的工作频段为 1.44~1.66 GHz(14.2%)和 3.35~3.54 GHz(5.5%), 在频带内可实现的最大整流效率分别为 73.7% 和 69.5%。

关键词: 双频整流电路; 射频能量收集; 整流效率; 半波长传输线

中图分类号: TN6

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2023389

Design of dual-band rectifier circuit using a half-wavelength transmission line

NIE Zhijun, HAN Tao, KONG Xiaohe, GUO Han, ZHOU Ruochen, SHEN Yubo,
YAO Peng, SUN Zheng, ZHAO Shuai

(Research and Test Center of Defense Technology for Aerospace Science and Industry, Beijing 100084, China)

Abstract: A low-profile, compact dual-band rectifier circuit is proposed, which can be used in scenarios such as radio frequency energy harvesting and microwave power transmission. The proposed rectifier circuit does not employ an impedance matching network, and achieves dual-band characteristics using only two microstrip transmission lines: the first microstrip transmission line connects the Schottky diode(HSMS-2850) with the load and filter at the rear end of the rectifier circuit; the second microstrip transmission line is a half-wavelength microstrip transmission line, adding a second frequency band to the designed rectifier circuit. This design approach not only reduces the overall size of the rectifier circuit($0.14\lambda_0 \times 0.11\lambda_0$, where λ_0 is the wavelength corresponding to the lowest frequency), but also minimizes the losses introduced by additional matching structures. After theoretical analysis, simulation, and fabrication, the measured results of the rectifier circuit are essentially consistent with the simulated results. When the input power is 0 dBm, the operating frequency bands of the rectifier circuit are 1.44~1.66 GHz(14.2%) and 3.35~3.54 GHz(5.5%), with maximum rectification efficiencies achievable within the bands being 73.7% and 69.5%, respectively.

Keywords: dual-band rectifier; radio frequency energy harvesting; Power Conversion Efficiency (PCE); half-wavelength transmission line

随着物联网技术的飞速发展, 用于物联网设备的供电方式引起了研究人员的诸多兴趣, 考虑到环境污染和资源再利用等因素, 研究人员对一些可再生能源的利用技术进行了研究, 如振动、热能、太阳能和射频等能源的收集^[1-9]。其中, 射频能量的收集一般是指接收器收集射频能量后, 将射频能量传递到整流电路中, 通过整流电路将射频能量转化为直流可用的能量。具有可利用的资源丰富、对天气条件依赖性较小、工作时间较长、应用范围更广等特性, 这些特性使射频能量收集的方式在物联网领域中比其他能量收集的方式具有先天的优势和较大的潜力^[4]。但由于整流电路中采用的肖特基二极管具有非线性的特点, 在将射频信号转换为直流信号的同

时, 会使整流电路的输入阻抗随着整流电路的输入功率、负载值和工作频率等的变化而变化。这种输入阻抗的变化为整流电路的设计带来了一定的挑战。近年来, 为获得更多的射频能量, 研究人员针对多频段和宽频带的整流电路展开了许多研究。刘久春等^[5]使用 π 型阻抗匹配网络和 T 型阻抗匹配网络进行 2 个频段的阻抗匹配, 使用 1/4 波长微带线和滤波电容组成直通滤波器, 将整流电路与天线连接后, 可在 2.06 GHz、3.43 GHz 和 5.25 GHz 处实现的最大整流效率分别为 54.1%、43.9% 和 39.9%; 涂世琼等^[6]使用一个 L 型阻抗调节器和一个 π 型阻抗匹配器构成一个阻抗压缩匹配网络, 使整流电路可在较大的动态负载值范围(200~4 000 Ω)内进行工作, 0.8 GHz 和 2.4 GHz 的整流效率分别可达 81.2% 和 77.8%; 王宇超等^[7]使用并联的方式将 2 个工作于不同频段的整流电路进行连接, 在 1.75 GHz、2.3 GHz、2.8 GHz、3.5 GHz 和 4.9 GHz 中可实现的最大整流效率为 58.0%; S Chandravanshi 等^[8]提出了一种可进行三频段整流的整流天线, 其采用差分馈电的方式在 2 GHz、2.5 GHz 和 3.5 GHz 处分别可以达到 53.0%、31.0% 和 15.6% 的最大整流效率; SHEN S 等^[9]提出一种 L 形探针馈电方式的三频段微带整流天线, 这种设计方式扩展了带宽。当接收功率为 -10 dBm 时, 其在 GSM-900、GSM-1800 和 UMTS-2100 三个频段内可分别实现 42.0%、32.0% 和 26.0% 能量转换。

本文提出一种基于 1/2 波长微带传输线的双频整流电路, 当输入功率为 0 dBm 时, 使用 2 条微带传输线在 1.5 GHz 和 3.5 GHz 附近实现超过 60% 的整流效率; 并通过弯曲设计减小了整流电路的整体尺寸, 使整流电路的结构更加紧凑。

1 双频整流电路的设计

1.1 原理分析与拓扑结构

目前, 整流电路的拓扑结构类型如图 1 所示, 主要分为串联型拓扑结构、并联型拓扑结构和倍压型拓扑结构等^[5-7]。串联型拓扑结构是指肖特基二极管串联在整流电路中, 对输入的射频信号进行正半周期的交直流转换, 属于半波整流电路; 并联型拓扑结构是指肖特基二极管与射频信号源进行并联设计, 对输入的射频信号进行负半周期的交直流转换, 也属于半波整流电路。值得注意的是, 肖特基二极管的输出信号中存在直流信号, 为防止直流信号回流到微波源, 在射频信号源之后还需设计一个隔直电容; 倍压型拓扑结构整合了串联型拓扑结构和并联型拓扑结构的特点, 使用 2 个肖特基二极管分别进行串联和并联设计, 实现射频信号的全周期整流, 同样需在射频信号源之后设计一个隔直电容, 防止直流信号的回流。为设计一款可工作在输入功率小于 0 dBm 的整流电路, 本文选择使用串联型拓扑结构。其原因是串联型拓扑结构相较于其他两种拓扑结构, 使用的集总元件(隔直电容)更少, 减少了集总元件对于能量的损耗, 一定程度上提高了整体电路的整流效率^[10]。

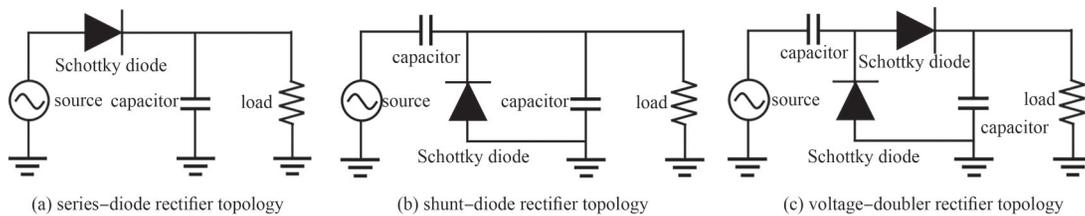


Fig.1 Topology of the rectifier circuit
图 1 整流电路的拓扑结构

肖特基二极管是整流电路中的关键元件, 很大程度上决定了整流电路的整流效率, 因此对肖特基二极管的分析和研究至关重要。选择图 1 中的串联型拓扑结构, 使用谐波平衡仿真模块对现有的肖特基二极管模型(HSMS 2850)进行阻抗特性分析, 电路中的滤波电容为 100 pF, 负载阻抗为 2 000 Ω , 结果如图 2 所示。从图中可以看出, 肖特基二极管的输入阻抗具有非线性特点, 其阻抗特性为输入功率和频率的函数。当肖特基二极管接入电路后, 电路的阻抗特性会随着工作频率和输入功率的变化而变化, 这种非线性的特点给整流电路的设计带来了许多挑战。另外, 肖特基二极管的物理参数也对整流效率有较大的影响: 较大的反向击穿电压可增加整流电路的整流范围和整流效率; 较低的零偏电容可方便匹配电路的设计和整流效率的提升; 较小

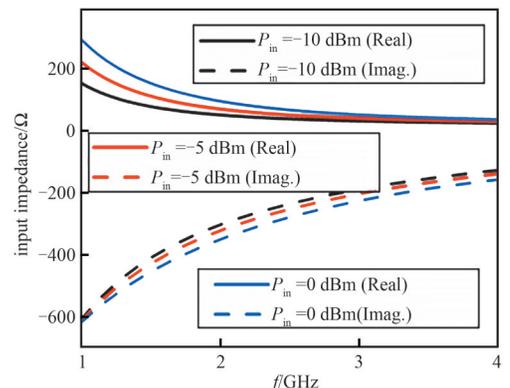


Fig.2 Nonlinear characteristics of the Schottky diode
图 2 肖特基二极管(HSMS-2850)的非线性特性

的串联电阻可较大地提升整流电路的整流效率^[11]。经过比较后,为实现在 0 dBm 输入功率情况下的整流电路设计,本文选择 HSMS 2850 作为关键元件。数据手册中得到它的主要物理参数为:零偏电容为 0.18 pF,阈值电压为 0.35 V,串联电阻为 25 Ω ,反向击穿电压为 3.8 V。

通过以上分析,本文提出一个双频整流电路的拓扑结构,如图 3 所示,由 2 条微带线、1 个肖特基二极管(HSMS-2850, Avago)、1 个 100 pF 的电容和 1 个 2 000 Ω 的负载阻抗组成。其中,2 条微带线的宽度和电长度用以对整流电路的特性阻抗进行调整,使整流电路可在所需的频段内实现较好的阻抗匹配,完成整流的功能。工作在低频段的肖特基二极管具有较为成熟的工艺,可用于不同输入功率密度的应用场景,且其优秀的快速开关特性十分适合将接收到的射频信号进行交、直流转换;100 pF 的电容在整流电路中起到滤波作用,可对肖特基二极管之后的交流信号进行滤波处理,减少高次谐波对整流电路的影响,提高整流电路的整流效率;负载用于代替后端用电器或电容,对直流信号进行能量的收集和测量。

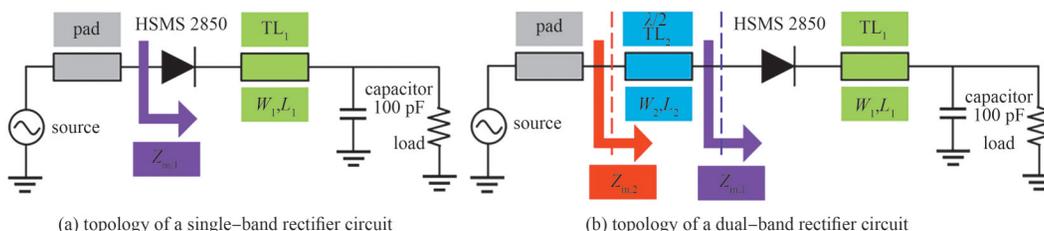


Fig.3 Evolution process of the topology of the dual-band rectifier

图 3 双频整流电路拓扑结构的演化过程

1.2 双频整流电路的设计

在整流电路设计过程中,为方便对每条微带传输线的阻抗特性进行计算和分析,微带传输线的阻抗特性可用微波网络中的阻抗方程进行计算^[11]:

$$Z_{in} = Z_0 \times \frac{Z_L + jZ_0 \tan \beta l}{Z_0 + jZ_L \tan \beta l} \quad (1)$$

式中: Z_{in} 为从某一位置看向这段传输线的输入阻抗; Z_0 为微带传输线的特性阻抗; Z_L 为负载阻抗; β 为波数; l 为微带传输线的长度。

在未添加任何微带传输线的整流电路中,根据微带传输线的阻抗方程(1)对第 1 条微带传输线 TL_1 进行设计,其拓扑结构如图 3(a)所示。为充分利用整流电路中的每条传输线,将微带传输线 TL_1 设计于整流二极管与负载之间,使其与肖特基二极管的输出端相连,并直接与负载和滤波电容进行连接。对微带传输线 TL_1 进行合理的尺寸设计之后,可在频率 f_1 附近实现较好的阻抗匹配,此时,从整流二极管的输入端向整流电路的负载端看去,记 f_1 频率下的输入阻抗为 $Z_{in,1@f_1}$ 。在图 3(a)的基础上,添加第 2 条微带传输线 TL_2 后的拓扑结构如图 3(b)所示。同样,为充分利用微带传输线,将微带传输线 TL_2 设计于整流电路输入端的焊盘与肖特基二极管的输入端之间,使其直接将整流二极管与输入端的焊盘连接。根据微带传输线的阻抗方程(1)可知, l 取 $\lambda/2$ 时, $Z_{in}=Z_0$,即当微带传输线 TL_2 选取 $\lambda/2$ 时, $Z_{in,1@f_1}=Z_{in,2@f_1}$,这意味着添加微带传输线 TL_2 后,整流电路在 f_1 频率附近的输入阻抗并不会因为微带传输线 TL_2 的加入而发生改变,这样的长度设计为整流电路的设计带来了很大便利。因此,根据微带传输线的阻抗方程(1)可得,添加微带传输线 TL_2 后,频率 f_2 下的输入阻抗特性为:

$$Z_{in,2@f_2} = Z_{0,TL2} \times \frac{Z_{in,1@f_2} + jZ_{0,TL2} \tan \beta_{f_2} l_{TL2}}{Z_{0,TL2} + jZ_{in,1@f_2} \tan \beta_{f_2} l_{TL2}} \quad (2)$$

根据微带传输线特性阻抗的经验公式可知,当介质基板的参数一定时,改变微带传输线的线宽可改变微带传输线的特性阻抗^[11]。因此,当微带传输线 TL_2 的长度选为频率 f_1 对应的半个波长($\lambda/2@f_1$)时,可通过改变微带传输线 TL_2 的宽度改变微带传输线 TL_2 的阻抗特性,实现对微带传输线 TL_2 的输入阻抗的调整。在合理的设计后,可在第 2 个频率 f_2 附近实现整流电路的阻抗匹配。

在整流电路的演变过程中,输入功率为 0 dBm 时,其阻抗变化如图 4(a)~(c)所示,整流性能变化情况如图 4(d)~(e)所示。当没有微带传输线加入整流电路时,从肖特基二极管的输入端向后看,其输入阻抗实部可在 3.0 GHz 附近接近 50 Ω ,但对应的虚部较大,在 3.0 GHz 附近虚部的值小于 -300 Ω ,这种情况实现阻抗匹配的难度较大。在 Smith 圆图中,中间以紫色虚线绘制的单位圆表示电压驻波比等于 2 时的阻抗变化范围,显然,没有传输线时的输入阻抗情况较差,蓝色线段远离中心的单位圆,且整流电路整体呈现出容性。在对应的整流性能

中可以看出, 在 1.0~4.0 GHz 范围内, 整流电路无法实现阻抗匹配, 几乎没有能量进入到整流二极管中进行整流, 尽管在一定频段范围内的整流效率可达到 50.0%, 但阻抗匹配较差, 整流电路无法正常工作, 这与上文对于整流电路的输入阻抗分析相同。

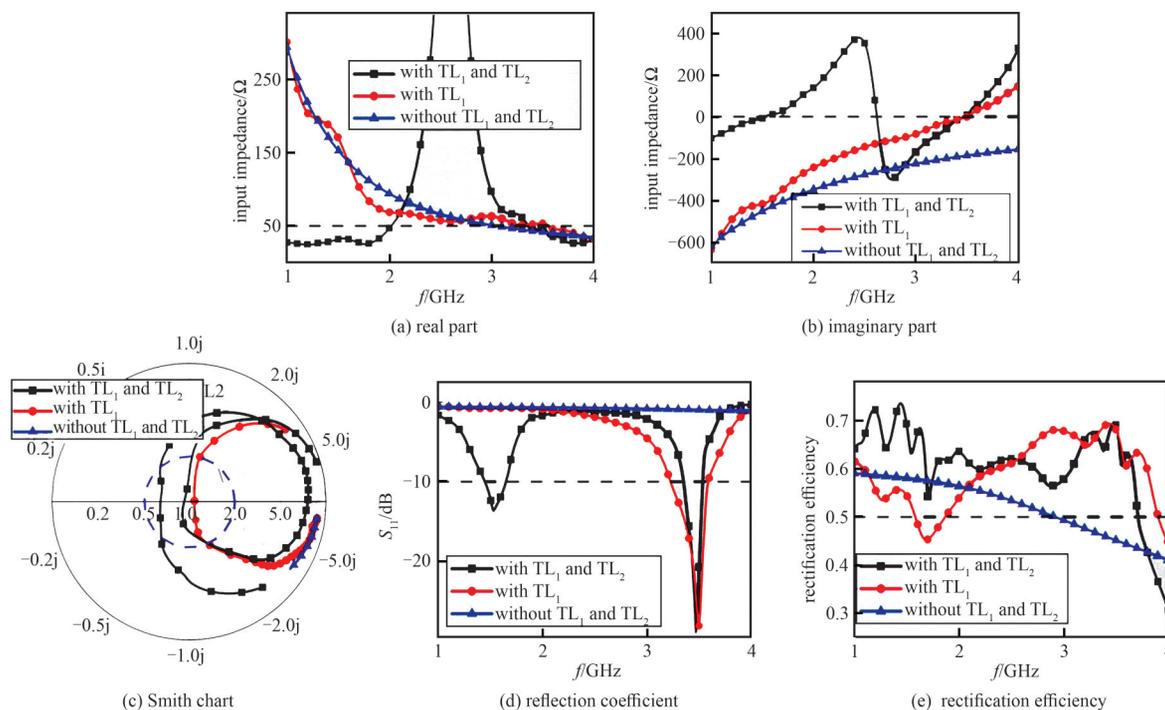


Fig.4 Variation of rectifier performance with the number of microstrip transmission lines for 0 dBm input power

图4 输入功率为 0 dBm 时, 整流电路性能随着微带传输线数量的变化情况

由于在没有传输线时整流电路整体呈现出容性, 因此, 在整流二极管的输出端与负载端之间添加微带传输线 TL_1 , 抵消整流电路的部分容性。此时的整流电路拓扑结构对应于图 3(a), 输入阻抗 $Z_{in,1}$ 的实部在 2.5~4.0 GHz 附近接近 50Ω , 这是一个较为理想的实部阻抗; 而输入阻抗的虚部在 3.5 GHz 附近接近 0, 相比于没有传输线的输入阻抗虚部, 添加微带传输线 TL_1 后电路的容性显著减弱, 可在 3.5 GHz 附近实现一定带宽的阻抗匹配。在 Smith 圆图中, 添加微带传输线 TL_1 后, 整流电路整体的感性增加, 在一定的频段内抵消了容性, 使蓝色线段由容性区域向感性区域进行弯曲变为红色线段, 在 3.5 GHz 附近穿入紫色单位圆实现阻抗匹配; 在对应的整流性能中可以看出, 在 3.23~3.59 GHz 之间整流电路获得了较好的阻抗匹配, 其相对带宽为 10.6%, 在带宽内的最大整流效率为 69.5%, 带宽内的整流效率基本在 60.0% 之上。

为实现双频段的整流电路设计, 在单频段整流电路设计完成后, 在微波源的焊盘与整流二极管的输入端之间添加微带传输线 TL_2 (半波长微带传输线), 此时的整流电路拓扑结构对应于图 3(b), 输入阻抗 $Z_{in,2}$ 的实部在 1.0~2.0 GHz 附近接近 50Ω , 而输入阻抗的虚部在 1.5 GHz 和 3.5 GHz 附近接近 0。相比于单频整流电路的输入阻抗虚部, 添加微带传输线 TL_2 后新增加了一个虚部接近于 0 的频点, 这与上述公式的推导结果一致, 在 1.5 GHz 和 3.5 GHz 附近可以实现 2 个频段的阻抗匹配; 在 Smith 圆图中, 添加微带传输线 TL_2 后, 黑色线段由容性区域途经紫色单位圆弯曲移动到感性区域后, 又从容性区域第二次弯曲途经紫色单位圆后弯曲移动到感性区域, 2 次穿过紫色单位圆实现了 2 个频段的阻抗匹配; 在对应的整流性能中可以看出, 添加了微带传输线 TL_2 后新增加了一个可用的阻抗带宽, 可在 1.44~1.66 GHz 和 3.35~3.54 GHz 之间实现较好的阻抗匹配, 其相对带宽分别为 14.2% 和 5.5%, 带宽内的最大整流效率分别为 73.7% 和 69.5%, 带宽内的整流效率均在 60.0% 之上。

2 双频整流电路的性能分析

对微带传输线 TL_2 的设计进行分析。当输入功率为 0 dBm 时, 通过改变微带传输线的宽度可实现微带传输线阻抗特性的调整, 如图 5 所示。当微带传输线的宽度由 0.20 mm 减小至 0.05 mm 时, 微带传输线的线宽变化几乎没有对整流电路的整流效率产生影响; 对于整流电路的阻抗特性, 正如式(1)所分析, 微带传输线的线宽变化不会影响到 3.5 GHz 附近的阻抗匹配性能, 而在 1.5 GHz 附近的阻抗匹配带宽则发生了较大的改变。随着微带传输

线的宽度逐渐降低,微带传输线的阻抗特性逐渐增大,阻抗匹配带宽由 0 逐渐增大为 1.37~1.66 GHz(相对带宽为 19.1%)。另外,考虑到加工工艺和精确度的问题,微带传输线 TL_2 的宽度并没有选择性能较好的 0.05 mm,而是选择为 0.1 mm。

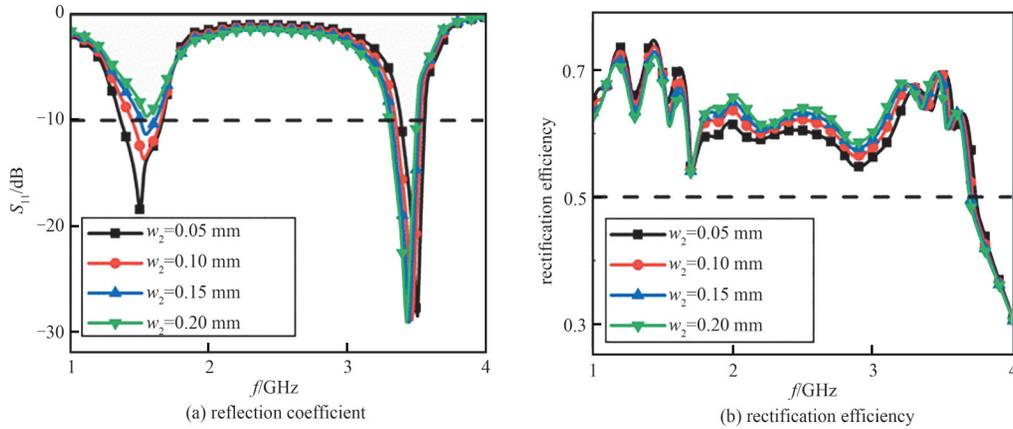


Fig.5 Variation of rectifier performance with the TL_2 width for 0 dBm input power
图5 输入功率为 0 dBm 时,整流电路的性能随着 TL_2 宽度的变化情况

整流电路的负载变化情况反映了整流电路驱动变化负载的能力,当负载值由 2 500 Ω 逐渐减小至 1 000 Ω 时,整流电路的性能发生了一定的变化,如图 6 所示。对于整流电路的阻抗匹配特性,随着负载阻抗的降低,3.5 GHz 附近的阻抗带宽发生了轻微的红移,而 1.5 GHz 附近的阻抗带宽逐渐增大,匹配效果逐渐变好,阻抗匹配带宽由 1.50~1.59 GHz(相对带宽为 5.8%)增加到 1.34~1.71 GHz(相对带宽为 24.3%),这是因为小的负载值更容易实现较好的匹配。对于整流电路的整流效率,随着负载阻抗的降低,整流效率逐渐降低,在 3.5 GHz 附近,最高整流效率由 70.2% 减小为 63.1%;在 1.5 GHz 附近,最高整流效率由 76.2% 减小为 64.2%。因此,综合考虑后选择负载阻抗为 2 000 Ω ,这样可以保证在 1.5 GHz 和 3.5 GHz 附近的带宽内整流效率均高于 60.0%。

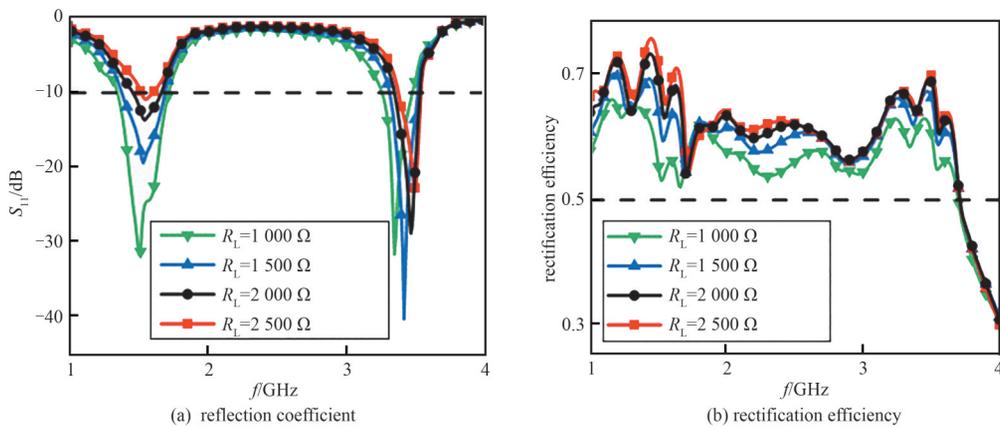


Fig.6 Variation of rectifier performance with load value for 0 dBm input power
图6 输入功率为 0 dBm 时,整流电路的性能随着负载值的变化情况

整流电路在不同输入功率情况下的性能十分重要,由于本文设计的整流电路主要工作于低输入功率密度,因此对 0 dBm 以下的输入功率范围进行研究分析。如图 7 所示,当输入功率由 -10 dBm 逐渐增加为 0 dBm 时,整流电路的性能逐渐变好。对于整流电路的阻抗特性:在 1.5 GHz 和 3.5 GHz 两个频段附近,随着输入功率的增加,阻抗匹配带宽逐渐变好,由 1.43~1.48 GHz 和 3.31~3.39 GHz(相对带宽为 3.4% 和 2.4%)增加到 1.44~1.66 GHz 和 3.35~3.54 GHz(相对带宽为 14.2% 和 5.5%);对于整流电路的整流效率:随着输入功率的增加,在 1.5 GHz 和 3.5 GHz 两个频段附近的整流效率都有较好的提升,在 3.5 GHz 附近,当输入功率小于 -8 dBm 时,整流效率下降到 50% 以下;在 1.5 GHz 附近,在 -10 dBm 以上时,均可以保证具有 50% 以上的整流效率;当输入功率为 0 dBm 时,带宽内整流效率均超过了 60.0%。

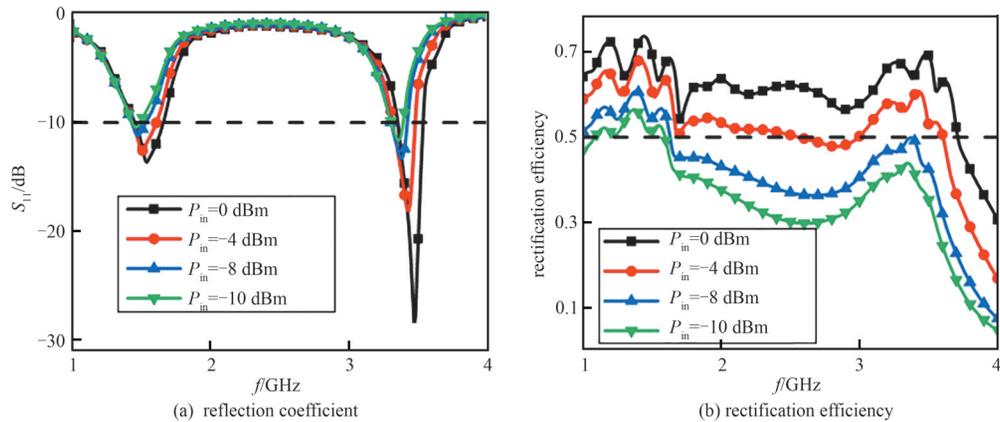


Fig.7 Variation of rectifier performance with different input powers
图 7 整流电路的性能随着不同输入功率的变化情况

3 整流电路的制造与测试

经过软件参数优化，整流电路的具体参数如下：微带传输线 TL₁的 W₁=0.1 mm，L₁=10.9 mm；微带传输线 TL₂的 W₂=0.1 mm，L₂=29.8 mm，滤波电容为 100 pF，负载阻抗为 2 000 Ω。为使整流电路的结构更加紧凑，对微带传输线 TL₁和 TL₂进行弯曲处理，弯曲后的整流电路尺寸为 29 mm×23 mm(0.14λ₀×0.11λ₀，λ₀为最低频率对应的波长)；随后，将设计的整流电路加工制作于厚度为 1 mm 的 F4B 介质基板(介电常数为 2.2，损耗角为 0.009)上。拓扑结构与加工实物如图 8 所示。

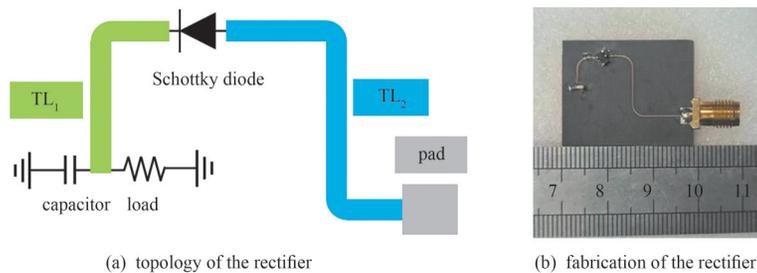


Fig.8 Topology and physical diagram of the rectifier
图 8 整流电路的拓扑与实物图

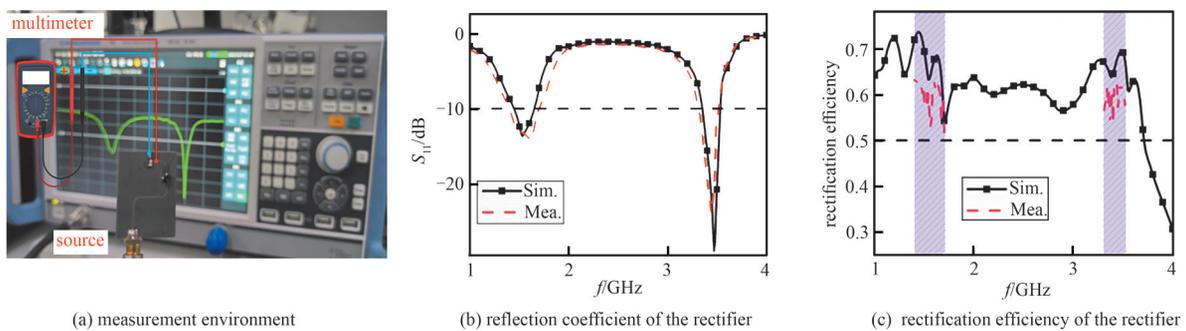


Fig.9 Test and simulation results of rectifier
图 9 整流电路性能的测试与仿真结果

对所设计的整流电路进行测试。使用矢量网络分析仪作为整流电路输入端的微波源，提供 0 dBm 的输入功率；电压表的正负极连接整流电路负载的两端，测量输出电压。整流电路测量过程和测试结果如图 9 所示，并根据式(2)对整流效率(PCE)进行计算：

$$E_{PC} = \frac{U_{out}^2}{R_L P_{in}} \tag{3}$$

式中：U_{out}为负载两端电压表测到的电压；R_L为负载(2 000 Ω)；P_{in}为输入功率(0 dBm)。

在输入功率为 0 dBm 时，仿真所得的阻抗带宽为 1.44~1.66 GHz 和 3.35~3.54 GHz(相对带宽为 14.2% 和 5.5%)，在 1.5 GHz 附近最大的整流效率为 73.7%，在 3.5 GHz 附近最大的整流效率为 69.5%；测试所得的阻抗带宽为

1.40~1.70 GHz 和 3.31~3.52 GHz(其相对带宽为 19.4% 和 6.2%), 在 1.5 GHz 附近最大的整流效率为 63.2%, 在 3.5 GHz 附近最大的整流效率为 62.5%, 仿真和模拟之间的差异主要来源于制造的公差、肖特基二极管的不稳定性和焊接的影响等。

4 结论

本文提出了一种使用半波长微带传输线的双频整流电路, 仅经过 2 个设计步骤实现了整流电路的双频特性, 并通过使用半波长微带传输线代替匹配网络, 减小了整流电路的整体尺寸和额外的损耗。测量结果表明, 在 0 dBm 的低输入功率下, 在 1.40~1.70 GHz(19.4%)和 3.31~3.52 GHz(6.2%)的工作带宽内, 可实现的最大整流效率分别为 63.2% 和 62.5%。

参考文献:

- [1] PEREIRA R I S,CAMBOIM M M,VILLARIM A W R,et al. On harvesting residual thermal energy from photovoltaic module back surface[J]. AEU-International Journal of Electronics and Communications, 2019(111):152878. doi:10.1016/j.aeue.2019.152878.
- [2] CAMBERO E V V,PAZ H P,SILVA V S,et al. A 2.4 GHz rectenna based on a solar cell antenna array[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2019,18(12):2716-2720. doi:10.1109/LAWP.2019.2950178.
- [3] YAN Jiabin,LIAO Xiaoping,JI Sichao. A novel multi-source micro power generator for harvesting thermal and optical energy[J]. IEEE Electron Device Letters, 2018,40(2):349-352. doi:10.1109/LED.2018.2889300.
- [4] GU X Q,HEMOUR S. Far-field wireless power harvesting:nonlinear modeling,rectenna design,and emerging applications[J]. Proceedings of the IEEE, 2022,110(1):56-73. doi:10.1109/JPROC.2021.3127930.
- [5] 刘久春,杨雪霞. 一种新型高效能量收集三频整流天线[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2023,29(1):95-104. (LIU Jiuchun, YANG Xuexia. A novel high-efficiency triple-band rectenna for energy collection[J]. Journal of Shanghai University(Natural Science Edition), 2023,29(1):95-104.) doi:10.12066/j.issn.1007-2861.2356.
- [6] 涂世琼,王健,钱利波,等. 一种新型双频宽负载整流电路[J]. 微波学报, 2021,37(2):54-59. (TU Shiqiong,WANG Jian,QIAN Libo,et al. A new dual-frequency wide-load rectifier circuit[J]. Journal of Microwaves, 2021,37(2):54-59.)
- [7] 王宇超,张经纬,张琤,等. 五频段整流天线的研究与设计[J]. 武汉理工大学学报, 2020,42(11):79-85. (WANG Yuchao,ZHANG Jingwei,ZHANG Cheng, et al. Research and design of five-band rectenna[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2020,42(11):79-85.)
- [8] CHANDRAVANSHI S,SARMA S S,AKHTAR M J. Design of triple band differential rectenna for RF energy harvesting[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2018,66(6):2716-2726. doi:10.1109/TAP.2018.2819699.
- [9] SHEN S,CHIU C Y,MURCH R D. A dual-port triple-band L-probe microstrip patch rectenna for ambient RF energy harvesting[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2017(16):3071-3074. doi:10.1109/LAWP.2017.2761397.
- [10] LI Shun,CHENG Fei,GU Chao,et al. Efficient dual-band rectifier using stepped impedance stub matching network for wireless energy harvesting[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2021,31(7):921-924. doi:10.1109/LMWC.2021.3078546.
- [11] 陈航宇. 微波输能系统整流效率提升关键技术研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2019. (CHEN Hangyu. Research on key technology for rectification efficiency improvement of microwave energy transmission system[D]. Xi'an,China:Xidian University, 2019.)

作者简介:

聂之君(1993-), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为模拟集成电路测试、射频器件设计与检测 .email:nzjjzn@foxmail.com.

韩滔(1993-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为数字集成电路测试、射频器件设计与检测.

孔笑荷(1995-), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为数字集成电路测试、射频器件设计与检测.

郭晗(1997-), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为数字集成电路测试、射频器件设计与检测.

周若臣(1996-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为模拟集成电路测试、射频器件设计与检测.

沈郁博(1996-), 男, 本科, 工程师, 主要研究方向为数字集成电路测试、射频器件设计与检测.

么鹏(1996-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为光电测试、射频器件设计与检测.

孙铮(1994-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电源类测试技术、射频器件设计与检测.

赵帅(1989-), 男, 本科, 工程师, 主要研究方向为模拟集成电路测试、射频器件设计与检测.