

DOI: 10.11991/ykj.202112025

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1191.U.20220705.1735.002.html>

一种基于介质集成悬置线的高效率微波整流电路

王玲^{1,2}, 刘定南¹, 和浩铭¹, 刘长军^{1,2}

1. 四川大学电子信息学院, 四川 成都 610064
2. 宜宾四川大学产业技术研究院, 四川 宜宾 644000

摘 要:针对整流电路中微带传输线损耗高的问题, 提出了一种基于介质集成悬置线 (SISL) 技术的高效率微波整流电路, 首次实现了 SISL 与微波整流电路的有机结合。采用 SISL 结构将微波整流电路置于由多层介质基板堆叠而形成的金属腔内, 降低了辐射损耗和插入损耗。通过理论计算得到 SISL 结构的等效介电常数, 设计了基于 SISL 的直流滤波器和单枝节输入匹配网络, 与肖特基二极管构成了微波整流电路。制作了基于 SISL 结构的工作频率为 2.45 GHz 的整流电路, 测试结果与仿真结果吻合良好。在 16.2 dBm 输入功率和 680 Ω 直流负载下, 获得了 80.6% 的 RF-DC 转换效率。基于 SISL 的整流电路采用标准的印制电路板工艺设计, 成本低、加工周期短, 可大规模应用到无线能量传输技术中。

关键词:微波无线能量传输; 高效率; 整流电路; 辐射损耗; 插入损耗; 介质集成悬置线; 自封装; 低成本

中图分类号: TN455

文献标志码: A

文章编号: 1009-671X(2022)05-0052-06

A high-efficiency microwave rectifier based on substrate integrated suspended line technology

WANG Ling^{1,2}, LIU Dingnan¹, HE Haoming¹, LIU Changjun^{1,2}

1. School of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610064, China
2. Yibin Industrial Technology Research Institute of Sichuan University, Yibin 644000, China

Abstract: A high-efficiency microwave rectifier based on the dielectric integrated suspension lines (SISL) is proposed to reduce the circuit losses in microstrip transmission lines. For the first time, the SISL technology has been applied to microwave rectifier design, in which both radiation loss and insertion loss are reduced. A microwave rectifier is integrated into a metal cavity based on SISL structures, which are stacked with multilayer substrates. The equivalent permittivity of SISL structures is obtained through theoretical analysis. Two fan-shaped DC filters and a single-stub input impedance matching are designed, which are applied to building a rectifier together with a Schottky diode. A microwave rectifier at 2.45 GHz was designed, fabricated and measured. The measured results agree with the simulation results well. The maximum RF-DC conversion efficiency reaches 80.6% at 16.2 dBm input power and with 680 Ω DC load. In addition, the proposed microwave rectifier is designed using a standard printed circuit board process, which is with low cost and rapid fabrication. They may be applied to wireless energy transmission technology on a large scale.

Keywords: microwave wireless power transmission; high efficiency; rectifier; radiation loss; insertion loss; substrate integrated suspended line; self-packaged; low cost

随着技术的发展, 微波无线能量传输和能量收集技术得到了更加广泛的研究。无线输能系统效率中微波整流电路的 RF-DC 转换效率尤为重要^[1-6]。微波整流电路的整流效率主要受阻抗匹配、二极管的非线性以及谐波抑制三大方面因素

的影响。阻抗匹配网络用来消除反射, 减少由于阻抗不连续导致微波信号在进入整流电路的二极管时产生的回波损耗^[7]。以往的研究通常也是使用各种匹配网络来改善阻抗匹配进而提高整流电路的 RF-DC 转换效率, 例如常见的枝节匹配网络^[8]、L 形匹配网络等^[9]。但常规的阻抗匹配网络对二极管本身性能的变化敏感, 为此许多文献中针对二极管的非线性, 提出了一些用来拓宽输入功率和输出负载的结构, 进而实现宽动态整流^[10-12]。对于输出滤波器研究者也提出了不少高次谐波抑制

收稿日期: 2021-12-28. 网络出版日期: 2022-07-06.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (62071316); 四川省科技项目 (2021YFH0152).

作者简介: 王玲, 女, 硕士.

刘长军, 男, 教授, 博士.

通信作者: 刘长军, E-mail: cjliu@scu.edu.cn.

结构,如 $\lambda/4$ 传输线^[13]、扇形直通滤波器等^[14],这些结构不仅实现了直流滤波,减少了高次谐波流入负载,也让能量较高的高次谐波再次反射回二极管进行回收,从而提高整流效率。总的来说,在以前的研究工作中,为了提高微波整流电路 RF-DC 转换效率,人们在电路结构上做了很多探索,但在降低环境以及辐射损耗对微波整流电路转换效率的影响方面的研究比较少。

对于微波传输线,其损耗来源主要包括辐射损耗、介质损耗和导体损耗。自 2007 年 Ma 等^[15]提出介质集成悬置线(substrate integrated suspended line, SISL)技术以来,研究者们对该结构进行了广泛地探究,根据文献[16–17]中的分析可以得知, SISL 传输线具有高 Q 值、低损耗、自封装的特点,在工作时电磁能量主要分布于其内部的空气腔体而非介质基板中,这有效降低了介质损耗。同时由于其自封装的特性,电磁能量被屏蔽于内部,也极大地降低了其辐射损耗。近年来, SISL 传输线被广泛应用于各种微波器件中,例如耦合器、滤波器、双工器、介电常数测量装置、振荡器、移相器、低噪放和天线等^[18–26]。由文献[17–18]、[27]可知,在实际电路中,基于 SISL 结构的电路能够实现较基于其他传输线结构电路更低的插入损耗,这表明 SISL 能够有效降低电路的损耗。因此,将 SISL 传输线应用于整流电路的设计也能够实现更低的损耗,即获得更高的整流效率。

本文提出了一种采用 SISL 技术的高效率整流电路。通过 SISL 技术将微波整流电路置于由多层介质基板堆叠而成的金属腔内,以减少微波整流电路的辐射损耗。相较于微带整流电路,基于 SISL 结构的微波整流电路采用类似的设计即可获得高的 RF-DC 转换效率。此外,所设计的微波整流电路基于多层结构的 SISL 技术,可使用标准的印刷电路板工艺设计和制造,易于与其他微波电路集成。

1 基于 SISL 的整流电路设计与分析

1.1 SISL 技术分析

SISL 结构如图 1 所示,图中 w 、 H 、 h 、 a 和 b 分别为金属导带的宽度、空气腔的高度、介质基板 3 的高度、空气腔的宽度和腔体的高度。

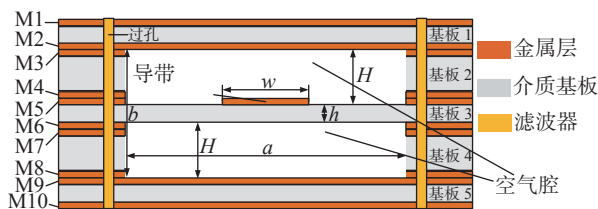


图1 自封装 SISL 多层结构的剖视图

自封装 SISL 多层结构由 5 层基板(即基板 1~基板 5)和 10 层命名为 M1~M10 的金属层组成,所需的电路主要设计在 M5 和 M6 层上。当把 5 层介质基板按顺序重叠起来,并将基板 2 和基板 4 都挖空一部分时,会形成相应形状的空气腔,空气腔的周围通过金属通孔将 5 层基板和 10 层金属层连接。金属层 M2 和 M9 与空腔周围的金属通孔包围位于基板 3 上的核心电路,这样的结构能防止能量泄漏并形成良好的电磁屏蔽效果,可用来设计整流电路。

SISL 的结构与悬置线的结构类似,悬置线的特征阻抗和等效介电常数的计算公式已有大量的数值拟合及实验验证^[28–29],基于 SISL 技术的微波电路仍可采用这些公式进行设计分析。SISL 的特征阻抗 Z 可表示为

$$Z = \frac{Z_0}{\epsilon_{\text{eff}}}$$

式中: Z_0 为相同尺寸下 SISL 内部完全填充空气时的特征阻抗, ϵ_{eff} 为 SISL 的等效介电常数。文献中的计算公式可根据金属导带的宽度 w 与空气腔的宽度 a 的比值(w/a)的不同分成两类。

1) 窄的金属导带, $0 < w/a < 1/2$:

$$Z_0 = \frac{\eta_0}{2\pi} \left[V + R \ln \left(\frac{6}{w/b} + \sqrt{1 + \frac{4}{(w/b)^2}} \right) \right]$$

$$\epsilon_{\text{eff}} = \frac{1}{\left\{ 1 + \left[E - F \ln(w/b) \ln(1/\sqrt{\epsilon_r}) \right] \right\}^2}$$

其中

$$V = 1.7866 - 0.2035h/b + 0.4750a/b$$

$$R = 1.0835 + 0.1007h/b - 0.09457a/b$$

$$E = 0.2077 + 1.2177h/b - 0.08364a/b$$

$$F = 0.03451 - 0.1031h/b + 0.01742a/b$$

2) 宽的金属导带, $1/2 < w/a < 1$:

$$Z_0 = \eta_0 \left[V + \frac{R}{(w/b) + 1.3930 + 0.6670 \ln[(w/b) + 1.444]} \right]$$

$$\epsilon_{\text{eff}} = \frac{1}{\left\{ 1 + \left[E - F \ln(w/b) \ln(1/\sqrt{\epsilon_r}) \right] \right\}^2}$$

其中

$$V = -0.6301 - 0.07082h/b + 0.2470a/b$$

$$R = 1.9492 + 0.1553h/b - 0.5123a/b$$

$$E = 0.4640 + 0.9647h/b - 0.2063a/b$$

$$F = -0.1424 + 0.3017h/b - 0.02411a/b$$

式中: $\eta_0 = 120\pi$, ϵ_r 为基板 3 的相对介电常数。考虑 SISL 结构的尺寸和基板,以上方程计算结果准确的前提条件为 $1 \leq \epsilon_r \leq 4$, $1 \leq w/a \leq 2.5$, $0.1 \leq$

$h/b \leq 0.5$ 。

本文所设计的 SISL 结构相关参数为 $H=1.6\text{ mm}$, $h=1.0\text{ mm}$, $0 < w/a < 1$, $b=4.2\text{ mm}$, 基板 3 采用相对介电常数为 2.6 的聚四氟乙烯 F4BM 高频天线板 (F4B), SISL 结构的尺寸和基板的介电常数均符合文献中方程的前提条件。

采用控制变量法, 将基板 3 上金属导带的宽度 w 设置为变量, SISL 结构的其他参数保持不变, 通过 Matlab 软件计算得到 SISL 的特征阻抗 Z 随金属导带线宽 w 的变化曲线, 如图 2 所示。由图 2 可以得到相应阻抗对应的线宽, 为后续整流电路的尺寸初始设计提供了理论计算值。

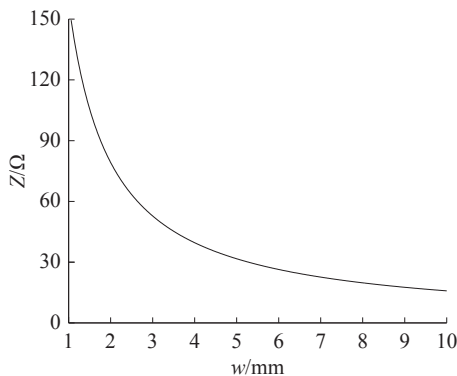


图2 SISL 特征阻抗 Z 与线宽 w 的关系

1.2 整流电路的原理与设计分析

整流电路的作用是将收到的射频信号转换成直流信号。如图 3 所示, 一般的整流电路都是由 1 个输入低通滤波器、匹配网络、整流二极管、直流滤波器和负载组成。匹配网络用来确保阻抗匹配, 以实现最大的功率传输, 直流滤波器实现直流输出同时抑制二极管整流中出现的高次谐波。在本文中, 所设计的整流电路选择了具有低串联电阻和低结电容的 HSMS286F 肖特基二极管。

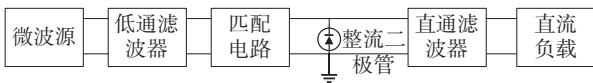


图3 整流电路的原理图

目前, 很多研究者通过抑制谐波或对谐波进行二次整流提高整流效率, 文献 [30] 中, 利用 3 个级联的扇形结构对二极管产生的谐波进行抑制, 提高整流效率; 文献 [31] 中, 利用了 2 个二极管来进行整流, 一方面实现宽动态, 另一方面对谐波进行二次整流以实现高效率。这些研究虽然有效地提高了整流电路的效率, 但是也使得整流电路的设计变得复杂, 增加了电路的成本和尺寸。

基于 SISL 技术的优点, 本文未对整流电路进行复杂地设计, 而是采用基础的整流电路结构实

现高效率微波整流。输入阻抗匹配网络采用单枝节匹配, 在二极管和地之间插入了一段 $\lambda_g/8$ 终端短路微带线以抑制二极管产生的高次谐波, 直流滤波器采用 1 段串联传输线和 2 个扇形支路。本文首先设计了基于 SISL 结构的直流滤波器, 其整体三维结构如图 4 所示。

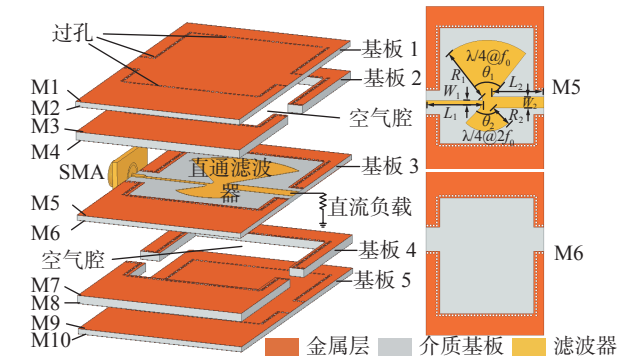


图4 基于 SISL 技术的直流滤波器

由图 4 可以看出, 直流滤波器有 2 个并联的扇形短截线, 分别用于抑制整流时的基波和二次谐波, 其中 R_1 、 θ_1 为抑制基波的扇形短截线的半径和角度, R_2 、 θ_2 为抑制二次谐波的扇形短截线的半径和角度。相比传统的直行分支线, 扇形分支线可以在相同的输入阻抗下实现比较宽的频带, 同时也与主传输线之间实现较为平滑的过渡。

通过电磁仿真软件 HFSS 仿真了基于 SISL 技术的直流滤波器, 优化设计输入和输出 2 段传输线的长度 L_1 和 L_2 , 以及 2 段传输线的宽度 W_1 和 W_2 , 最终得到的直流滤波器尺寸参数如表 1 所示。仿真的 S 参数如图 5 所示, 在基波 2.45 GHz 时, $|S_{11}| < -77.67\text{ dB}$; 在二次谐波 4.90 GHz 时, $|S_{21}| < -81.79\text{ dB}$ 。由此可见基于 SISL 的直流滤波器具有良好谐波抑制性能, 可用于整流电路的直流滤波。

表 1 直流滤波器尺寸参数

参数	L_1/mm	L_2/mm	W_1/mm	W_2/mm	R_1/mm	R_2/mm	$\theta_1/(\circ)$	$\theta_2/(\circ)$
数值	15.6	15.4	1.0	3.1	16.5	10.4	89	70

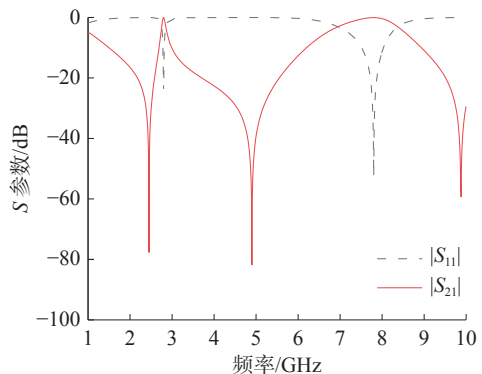


图5 SISL 直流滤波器的谐波抑制仿真结果

在 SISL 直流滤波器的仿真基础上,构建了基于 SISL 技术的整流电路。通过上文 Matlab 软件计算得到 SISL 的特征阻抗 Z 随金属导带线宽 w 的变化曲线,找到所需阻抗下的金属导带尺寸。设计的整流电路的版图和相关尺寸如图 6 所示。

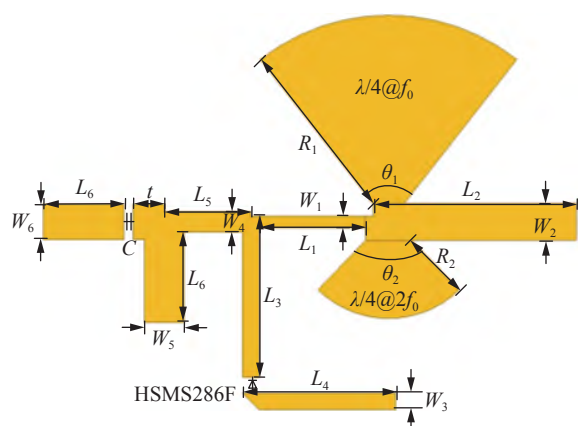


图6 所设计整流电路的版图

使用电磁仿真软件 HFSS 和 ADS 设计和优化了所构建的整流电路,二极管和地之间插入的一段 $\lambda_g/8$ 终端短路微带线是通过巧妙利用 SISL 结构的特点,将微带线直接连接到侧边的金属腔壁实现接地。采用此整流电路工作在 2.45 GHz。所设计的基于 SISL 结构的整流电路的整体三维结构如图 7 所示。

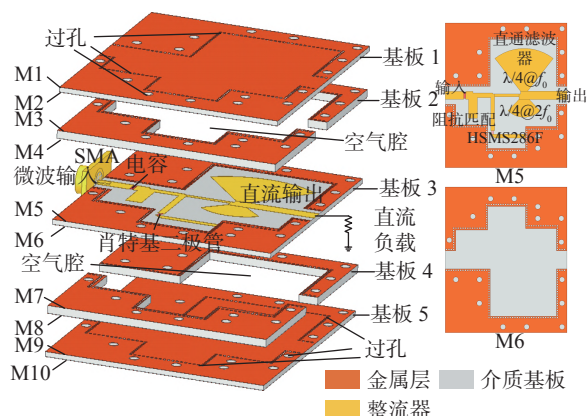


图7 SISL 整流电路的三维视图

基于 SISL 技术的整流电路的介质基板 3 采用相对介电常数为 2.65、损耗正切为 0.002、厚度为 1.0 mm 的 F4B。其他 4 层介质基板均采用介电常数为 4.4、损耗角正切为 0.02 的 FR4 进行加工,其中介质基板 2 和介质基板 4 的厚度为 1.6 mm,介质基板 1 和介质基板 5 的厚度为 1.0 mm。图 8 为所加工制作微波整流电路的实物照片。

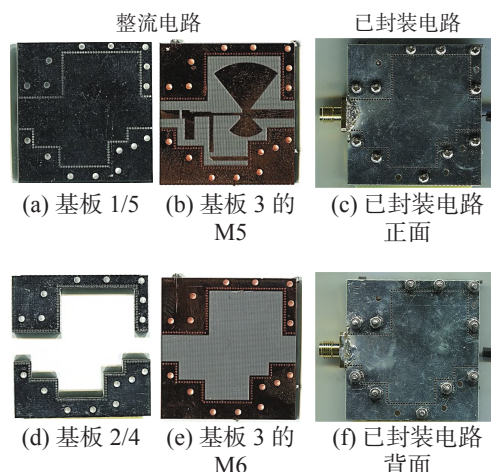


图8 SISL 整流电路实物

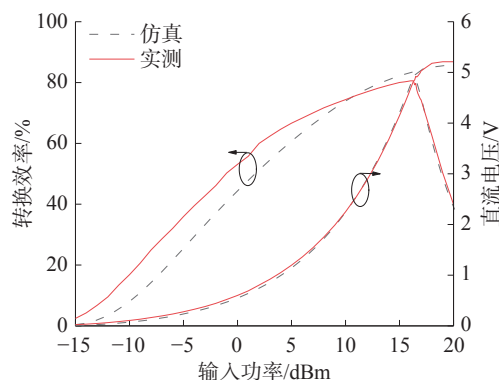
2 测试结果与分析

将设计的整流电路进行了实际测试, 2.45 GHz 整流电路的测试系统如图 9 所示, Agilent E8267C 信号发生器提供了射频微波输入功率。自行封装好的整流电路通过 SMA 接头连接到信号源。电路的输出接电阻负载,由万用表测试负载的直流电压。测试过程中可调节输出功率、电阻值以及工作频率,获得此整流电路在不同设置下的测试结果。

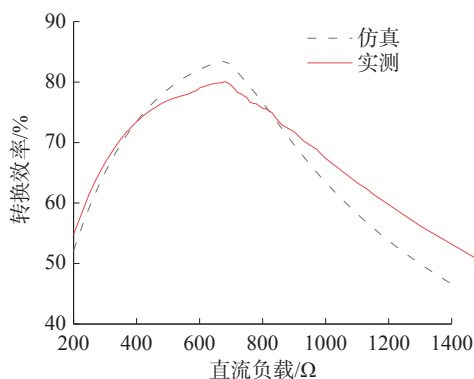


图9 SISL 整流电路测试

图 10 (a) 为基于 SISL 技术整流电路的实测与仿真整流效率及输出直流电压。当输入功率为 16.2 dBm、最佳负载为 680 Ω 时,整流电路可以获得最高的整流效率, 2.45 GHz 的输出效率和输出直流电压分别为 80.6 % 和 4.78 V。图 10 (b) 展示了在输入直流负载改变时,该整流电路实测和仿真整流效率的变化。实测结果表明,此整流电路在直流电路从 350~930 Ω 变化时,整流效率大于 70%。可见基于 SISL 结构的微波整流电路较容易获得高的转换效率。



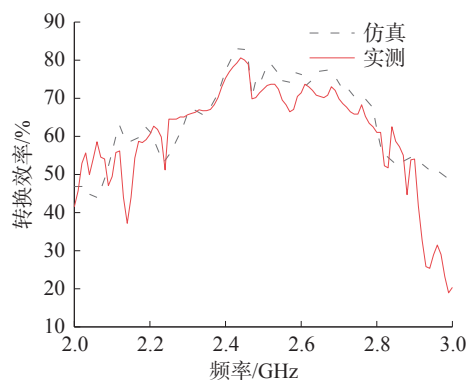
(a) 整流效率和输出电压 ($R_L=680 \Omega$)



(b) 不同直流负载下的整流效率

图10 SISL 整流电路的仿真与实测结果

图 11 给出了不同频率下转换效率和 S 参数的实测和仿真结果。输入功率为 16.2 dBm 时, 从 2.38~2.69 GHz, 测试的最大 RF-DC 转换效率高于 70%, 而仿真的是 2.38~2.74 GHz, 实测的 $|S_{11}| < -10$ dB 的频率范围在 2.08~2.62 GHz。



(a) 转换效率

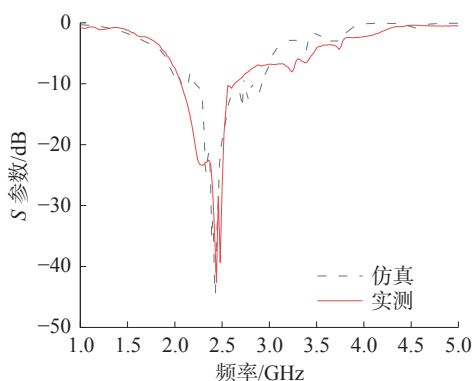
(b) $|S_{11}|$

图11 不同频率下 SISL 整流电路的仿真与实测结果

所有的实测与仿真结果表明, 仿真的微波整流电路特性变化与实测的微波整流电路特性变化趋势相同, 它们之间的差异由加工精度和电介质插入损耗引起。实测与仿真存在的不一致主要是由于 HSMS286F 二极管生产存在离散性, 与仿真模型有差异, 例如反向击穿电压、结电容等存在误差, 使得实测与仿真结果存在一定差距。一般

来说, SISL 结构的微波整流电路可以实现更高的整流效率。

3 结论

本文首次提出了一种采用介质集成悬置线的高效率整流电路, 实测与仿真的效率及散射参数结果均基本吻合。主要创新点和工作如下:

1) 首次使用 SISL 结构将整流电路置于由多层介质基板堆叠形成的金属腔内, 实现了 SISL 与微波整流电路的有机结合。所加工制作的微波整流电路具有损耗小、效率高、自封装和电磁屏蔽性能良好的优点。

2) 实验结果表明, 基于 SISL 结构的微波整流电路, 采用类似的设计即可在 S 波段实现较高的 RF-DC 转换效率。相对于传统微带整流电路, SISL 的腔体结构有效降低了电路的辐射损耗。在今后大规模无线能量传输应用中, 可以有效减少谐波辐射干扰。

3) SISL 结构采用标准印刷电路板工艺制作, 成本低廉, 且其他几层均可利用起来做折叠连接, 易于同其他微波电路集成, 具有很好的应用前景。

参考文献:

- [1] 孙雪曼, 武鹏德, 刘长军. 一种低功耗无线携能通信中整流电路集成上行链路的研究 [J]. 应用科技, 2021, 48(5): 60-63.
- [2] BROWN W C. The history of power transmission by radio waves[J]. IEEE transactions on microwave theory and techniques, 1984, 32(9): 1230-1242.
- [3] LIU C, TAN F, ZHANG H, et al. A novel single-diode microwave rectifier with a series band-stop structure[J]. IEEE transactions on microwave theory and techniques, 2017, 65(2): 600-606.
- [4] 林先其, 许冬冬, 曾姜杰, 等. 微波输能技术的研究进展及发展趋势分析 [J]. 南京信息工程大学学报 (自然科学版), 2017 (1): 34-45.
- [5] 徐敏. C 波段无线输能整流阵列研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2021.
- [6] 刘宝宏, 陈瑛, 樊棠怀. 射频/微波能量收集系统的整流电路研究进展 [J]. 半导体技术, 2019, 44(3): 161-170.
- [7] HUANG Y, SHINOHARA N, MITANI T. Impedance matching in wireless power transfer[J]. IEEE transactions on microwave theory and techniques, 2016, 65(2): 582-590.
- [8] LIU W, HUANG K, WANG T, HOU J, et al. Broadband high-efficiency RF rectifier with a cross-shaped match stub

- of two one-eighth-wavelength transmission lines[J]. IEEE microwave and wireless components letters, 2021, 31(10): 1170–1173.
- [9] MANSOUR M M, KANAYA H. Compact and broadband RF rectifier with 1.5 octave bandwidth based on a simple pair of L-section matching network[J]. IEEE microwave and wireless components letters, 2018, 28(4): 335–337.
- [10] 王宇超, 张经纬, 张琤. 基于新型匹配网络的宽带整流电路[C]//2021年全国微波毫米波会议论文集(下册). 南京: 中国电子学会, 2021: 444–446.
- [11] 杜志侠, 章秀银, 薛泉. 基于分支线耦合器的高效率宽带微波整流电路[C]//2015年全国微波毫米波会议论文集. 合肥: 中国电子学会, 2015: 1686–1689.
- [12] 王建鑫, 齐晓斐, 曲浩然, 等. 一种新型谐波抑制负载结构的整流电路[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2021, 22(3): 41–46.
- [13] GUO J, ZHANG H, ZHU X. Theoretical analysis of RF-DC conversion efficiency for class-F rectifiers[J]. IEEE transactions on microwave theory and techniques, 2014, 62(4): 977–985.
- [14] NIE M, YANG X, TAN G. A broad band rectifier with wide input power range for electromagnetic energy harvesting[C]//Proceedings of 2014 3rd Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation. Harbin: IEEE, 2014: 1187–1189.
- [15] MA K X, CHAN K T. Quasi-planar circuits with air cavities[P]. PCT Patent WO/2007/149046, 2007.
- [16] WANG Y, MA K. Loss mechanism of the SISL and the experimental verifications[J]. IET microwaves, antennas & propagation, 2019, 13(11): 1768–1772.
- [17] 王勇强. 介质集成悬置线前端电路关键技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2019.
- [18] 牟成林, 刘长军. 一种新型 SISL 分支线 3 dB 定向耦合器[J]. 应用科技, 2021, 48(4): 43–46.
- [19] YAN N, MA K, ZHANG H. A novel substrate-integrated suspended line stacked-patch antenna array for WLAN[J]. IEEE transactions antennas propagation, 2018, 66: 3491–3499.
- [20] 马奎, 刘长军, 陈倩. 一种介质集成悬置线结构的介电常数测量装置[J]. 应用科技, 2021, 48(4): 29–33.
- [21] 李双旭, 马凯学, 闫宁宁, 等. 基于 SISL 的介质填充双通带滤波器设计[J/OL]. 电波科学学报, 2021, 36(6): 1–6.
- [22] WANG Y, MA K, YAN N. A low loss patch-based phase shifter based on SISL platform[C]//IEEE/MTT-S International Microwave Symposium-IMS. Philadelphia: IEEE, 2018: 281–284.
- [23] CHU Y, MA K, WANG Y. A high isolation and low loss duplexer based on SISL platform[C]//IEEE/MTT-S International Microwave Symposium-IMS. Philadelphia: IEEE, 2018: 525–528.
- [24] WANG Y, MA K. Low-loss SISL patch-based phase shifters and the mixer application[J]. IEEE transactions on microwave theory and techniques, 2019, 67(6): 2302–2312.
- [25] KE Z, MOU S, MA K, et al. A compact 0.8 dB low noise and self-packaged LNA using SISL technology for 5 GHz WLAN application[C]//IEEE/MTT-S International Microwave Symposium-IMS. Philadelphia: IEEE, 2018: 1507–1510.
- [26] LI M, MA K, HU J, et al. Design and fabrication of low phase noise oscillator using Q enhancement of the SISL cavity resonator[J]. IEEE transactions on microwave theory and techniques, 2019, 67(10): 4260–4268.
- [27] FENG T, MA K, WANG Y. A self-packaged SISL 3 dB Lange coupler suitable for PCB fabrication[C]//2019 IEEE Asia-Pacific Microwave Conference. Singapore: IEEE, 2019: 1083–1085.
- [28] SHU Yonghui, QI Xiaoxia, WANG Yunji. Analysis equation for shielded suspended substrate microstrip line and broadside-coupled stripline [C]//IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. Palo Alto: IEEE, 1987: 693–696.
- [29] ANU L, LUIS C. Model for shielded suspended substrate microstrip line[J]. Circuit theory laboratory report series, 1998: 142–146.
- [30] SHEN L, YANG X. A novel rectifier circuit operating at dual-frequencies of 1.8 GHz and 2.4 GHz[C]//2013 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on RF and Wireless Technologies for Biomedical and Healthcare Applications. Singapore: IEEE 2013: 1–3.
- [31] ZHENG S Y, WANG S H, LEUNG K W, et al. A high-efficiency rectifier with ultra-wide input power range based on cooperative structure[J]. IEEE transactions on microwave theory and techniques, 2019, 67(11): 4524–4533.

本文引用格式:

王玲, 刘定南, 和浩铭, 等. 一种基于介质集成悬置线的高效率微波整流电路[J]. 应用科技, 2022, 49(5): 52–57.

WANG Ling, LIU Dingnan, HE Haoming, et al. A high-efficiency microwave rectifier based on substrate integrated suspended line technology[J]. Applied science and technology, 2022, 49(5): 52–57.