

文章编号: 2096-1618(2023)05-0503-04

# 一种用于材料介电特性无损检测电路设计

王 韧<sup>1</sup>, 孙浩然<sup>2</sup>, 敬守钊<sup>1</sup>, 樊 勇<sup>1</sup>, 黄何平<sup>3</sup>

(1. 电子科技大学电子科学与工程学院, 四川 成都 610071; 2. 成都信息工程大学电子工程学院, 四川 成都 610225; 3. 西南民族大学电子信息学院 电子信息工程国家民委重点实验室, 四川 成都 610225)

**摘要:**随着微波技术的高速发展,基于微波技术的材料介电特性无损检测被广泛应用于复合材料、食品工程和细胞活性检测等领域。提出一种基于共面波导结构(CPW)的对称型材料介电特性检测电路,该微波电路工作于S波段,主要包含二等分功率分配/合路器及多根交指电容(IDC),通过对称结构和多根交指电容互耦建立待检测材料与电磁波强相互作用区域,基于该电路设计了材料介电特性无损检测实验系统。实验测量与仿真结果非常吻合,证明该检测装置的可靠性。最后,实验测量了常用固态材料如 Teflon、Plexiglas、PVC 和干燥原木等的电路散射参数响应情况,证明该无损检测电路的高灵敏度和可靠性。

**关键词:** S 波段; 共面波导; 无损检测

**中图分类号:** TN923

**文献标志码:** A

**doi:** 10.16836/j.cnki.jcuit.2023.05.002

## 0 引言

随着物联网时代的发展,种类繁多、功能各异的微波传感器已被广泛应用于航空航天、食品工程和材料检测等领域。而介电特性是材料在电磁场中的基本属性,材料介电特性的测量与表征具有重要的研究与应用价值<sup>[1-2]</sup>。

用于材料介电特性测量与表征的方法分为基于微波传输特性的非谐振法和基于谐振电路效应的谐振法<sup>[3-6]</sup>。非谐振法是将待测样品及测量装置视为多端口的微波网络,利用传反射法、自由空间法等方法提取待测材料的介电特性,该方法具有宽频带测量特性,不足之处是对于低损耗物质,准确性无法进一步提高。谐振法是利用谐振结构,提高电磁波与待测材料在特点位置的相互作用效果,并通过谐振频率偏移和  $Q$  值提取材料的介电特性参数,该方法适用于窄带、较高损耗材料介电常数测量。而基于平面传输线的微波测量传感器由于其成本低,重量轻,可兼容性高等优点,近年来研究较多。如早期的研究人员基于共面波导(CPW)电路结构和聚甲基硅氧烷(PDMS)微流装置,设计了一种液体样品介电特性测量装置,通过传输线的  $S$  参数实现对待测液体样品的复介电参数测量和表征<sup>[7]</sup>。该装置最大可工作在40 GHz 的频率范围内实现液体样品介电特性的测量。Withawat 等<sup>[8]</sup>提出了一

个基于单开口环谐振器的液体样品介电特性测量系统,该系统可有效提高电磁场与待测样品之间的相互作用强度,最终实现对不同浓度乙醇水溶液的复介电特性参数表征。随后,研究人员提出了一种基于介质集成波导(SIW)结构的溶液介电常数测量电路,可以在窄带条件下实现对甲醇溶液介电特性准确测量<sup>[9]</sup>。朱明亮等<sup>[10]</sup>提出一种在矩形波导中直接放入待测样品,通过寻找样品的特征谐振峰得到介电常数的测量方法,可检测介电常数为 2.5 ~ 100 的介质材料。郭富祥等<sup>[11]</sup>介绍了一种基于微带谐振法的介电常数无损测量方法,测量装置采用背面缝隙耦合的馈电结构,可以无损测量大面积介质的介电常数。廖崇蔚等<sup>[12]</sup>提出了基于 SIW 谐振器的材料介电特性测量装置,通过在末端减少金属化过孔和缝隙以增加其电磁辐射,提升了测量灵敏度。最近,晏晗等<sup>[13]</sup>设计了一套基于基片集成脊波导的介电常数测量装置,并与矢量网络分析仪构成测量系统,用于测量液体的介电常数。该测量装置的测量范围较大,可以区分不同类型的废水。

为进一步提高材料介电特性的测量精度,提出了一种基于共面波导结构(CPW)的对称型射频电路,该电路包括二等分功率分配/合路器及多根交指电容(IDC),建立了待检测材料与电磁波相互作用区域,并基于该电路设计了材料介电特性无损检测实验系统。通过对该检测电路加工测试,结合参考材料进行实时无损检测,分析了传感器结构中关键参数对传感系统测量性能的影响。

收稿日期: 2022-09-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(62001402); 广东省重点领域研发计划资助项目(2020B0101080001)

# 1 传感器结构与仿真性能分析

## 1.1 电路工作原理

本文提出的基于 CPW 的传感器主要由两个相同的二等分功率分配器组成,同时在电路上下支路嵌入两个多枝节 IDC 单元,传感器的每个端口为  $50 \Omega$ 。对称型测量电路结构如图 1 所示。该电路板材为 Rogers R5880 基板 ( $\varepsilon_r' = 2.20$ ,  $\tan\delta = 0.001$ , 厚度  $h = 1.0 \text{ mm}$ ), 端口宽度和长度分别为  $5.80 \text{ mm}$  和  $16.00 \text{ mm}$ , 功分器臂长为  $25.20 \text{ mm}$ 。

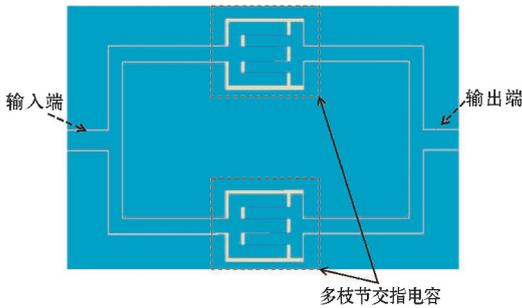


图1 射频传感电路结构图

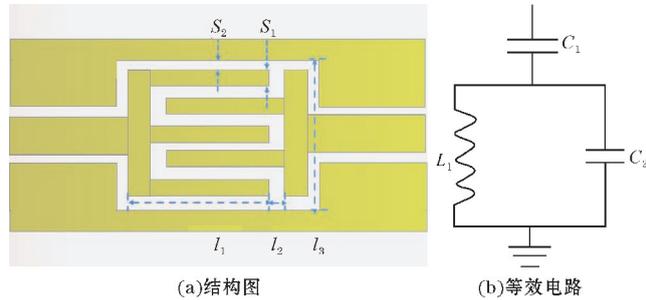


图2 多枝节交指电容

由集总元件组成的多枝节交指单元及其等效电路如图 2 所示。CPW-IDC 单元本质上是一个  $\pi$  型结构网络,它由 2 个电容 ( $C_1$  和  $C_2$ ) 以及串联电阻 ( $Z_{\text{IDC}}$ ) 和电感  $L_1$  组成。其中  $C_1$  用于表征接地层和 IDC 外部金属指之间的电容;电容  $C_2$  是多枝节 IDC 的每个枝节开放端所产生的电容之和; $Z_{\text{IDC}}$  代表的多枝节交指结构的特性阻抗; $L_1$  代表 IDC 电感。因此,多枝节交指结构和 CPW 传输线的串联和并联电容将被视为介电特性的敏感区域。

根据谐振理论并考虑了对称结构的射频信号对消原理,其工作原理基于微扰理论。在这种情况下,由多枝节交指结构引入的等效串联电容可以用作电磁场敏感区域,实现更高的灵敏度。基于 CPW-IDC 的射频电路谐振频率和品质因数为<sup>[14-15]</sup>

$$f_r = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_1 \left( \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} \right)}} \quad (1)$$

$$Q = R \frac{\sqrt{\frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}}}{\sqrt{L_1}} \quad (2)$$

$$C_2 = C_0 + \varepsilon_r' C_{\text{MUT}} \quad (3)$$

$$\varepsilon_r = \varepsilon_r' - j\varepsilon_r'' \quad (4)$$

引入待测材料后,电路谐振频率和品质因数都将是材料介电常数的函数,表示为式(5)。当待测介质覆盖在测量装置敏感区域时,由式(1)~(3)可知,电路的谐振频率和品质因数会随着变化,最终对应变化的介质的介电常数。基于以上电路分析,最终设计的电路模型参数为: $l_1 = 13.80 \text{ mm}$ ,  $l_2 = 1.00 \text{ mm}$ ,  $l_3 = 12.60 \text{ mm}$ ,  $S_1 = 0.15 \text{ mm}$ ,  $S_2 = 2.65 \text{ mm}$ 。

$$f_0 = F_1(\varepsilon_r', \varepsilon_r'') \quad (5)$$

$$Q = F_2(\varepsilon_r', \varepsilon_r'')$$

上述讨论表明,当被测材料 (MUT) 放置在传感区域上时,样品的有效介电常数值的变化会导致 IDC 的总电容发生变化,进而导致材料介电特性的对应变化。通过将两个电容耦合 IDC 单元引入 CPW 结构可以实现材料介电特性的高灵敏度无损检测。当无负载时(例如,当测量区域中没有引入材料时),阻带谐振器是对称的。当待测材料放置在一个传输线段的测量区域时,IDC 单元的对称性破坏,可以实现显著的频移和  $Q$  值改变。因此,该传感器特别适用于测量样品的复介电常数。

## 1.2 实物制作与测量

基于以上设计的模型尺寸,测量装置制作在介电常数为 2.2、厚度为 1.0mm 的 Rogers 板材上。该射频传感电路选用 R5880 ( $\varepsilon_r = 2.20$ ,  $h = 1 \text{ mm}$ )。实验测量系统主要由 CPW-IDC 无损检测电路和矢量网络分析仪组成 (Rohde & Schwarz ZVB20) 组成。具体实验装置如图 3 所示。

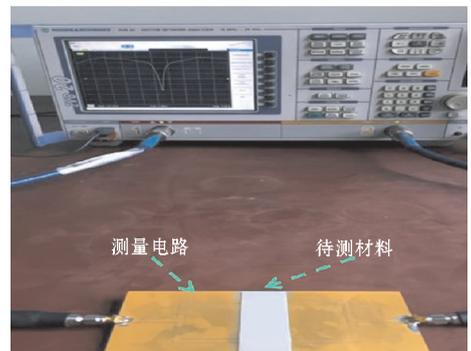


图3 基于 CPW 结构的对称型电路实验系统

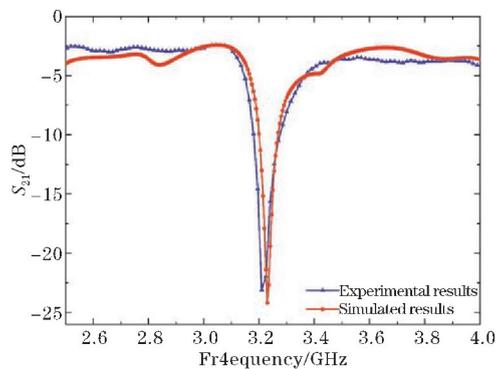
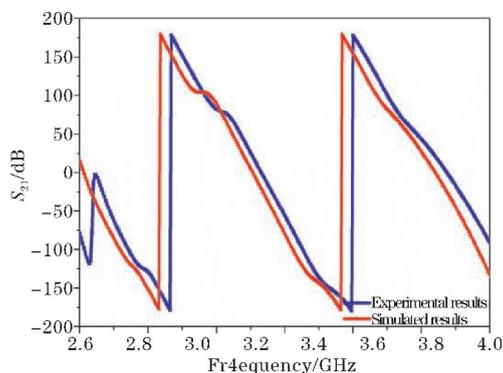
(a)  $S_{21}$  幅度对比(b)  $S_{21}$  相位对比

图4 基于 CPW 结构的对称型电路 S 参数仿真测量值对比

同时,为进一步验证该 CPW 对称型电路测量准确性,在无负载条件下,进一步测量的该电路的  $S_{21}$  参数在不同频段下的幅度和相位变化,并与仿真值对比分析。对比结果如图 4 所示。可知,该电路的  $S_{21}$  幅度和相位在仿真实验条件下较为吻合,误差来源主要为在电路加工制作过程中粗糙的焊接以及介质板介电常数偏差,及测量装置与待测介质中间存在空气缝隙等。最后,基于该电路,设计了用于材料介电特性无损检测的实验系统(图 3)。

## 2 实验及结果分析

实验过程使用矢量网络记录  $S_{21}$  的谐振频率和幅度数据的相对变化。为保证测量准确性,所有测试板材在室温 22.5 °C、相对湿度为 35% 的封闭环境中静止 24 h,同时,所有测量数据进行多次测量求平均值,以保证最小误差。图 4 显示样品材料的介电常数变化时反射系数的变化。实验测量了常用固态材料如 Teflon(介电常数实部 2.1)、Plexiglas(介电常数实部 2.3)、PVC(介电常数实部 2.8)和干燥原木(介电常数实部 2.9)的复介电常数,并观察不同待测材料下电路测量的 S 参数。具体结果如图 5 所示。

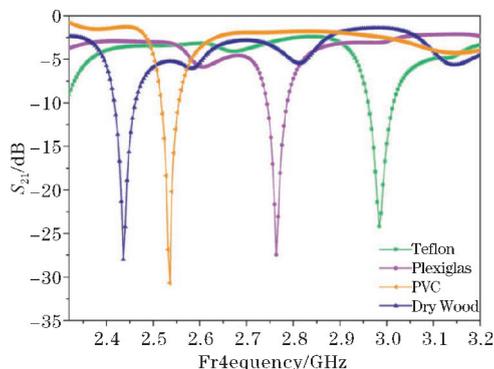


图5 不同标准样品的 S 参数测试结果

该测量方法将待测样品及测量装置视为多端口网络,利用对应的传播方程与待测样品介电特性之间的关系,最终实现对样品介电特性的测量。同时,该共面波导电路中多枝节交指结构可以实现局部电场的积聚和增强,能有效地提高电场和待测材料的相互作用强度,从而提高测量装置的品质因数和灵敏度。

## 3 结束语

本文介绍了一种基于 CPW 结构的对称型微波电路,用于材料介电常数无损检测。该电路通过引入二等分功率分配/合成器及多根交指电容结构,建立了待检测材料与电磁波相互作用区域,可以无损测量大面积介质的介电常数。最后,本文制作了一款谐振频率在 S 波段的无损检测传感器。通过测量标准介质基片的介电常数发现该检测电路具有高灵敏度。本测量装置不但可以节省开支,而且测试过程更为简便,装置的测量精度满足实际应用需求。

## 参考文献:

- [1] 赵锐,陈超婵. 传输/反射法测量固体复介电材料介电常数[J]. 上海计量测试,2020,47(3): 43-45.
- [2] 王韧,孙浩然,敬守钊,等. 5G 频段下材料无损检测传感装置设计[J]. 成都信息工程学院学报,2022,37(1):51-54.
- [3] 王依超,郭高凤,王娟,等. 自由空间法测量电磁材料电磁参数[J]. 宇航材料工艺,2014,44(1): 107-111.
- [4] 刘君,许卫东,刘珩,等. 基于微波反射率波动特性的混凝土介电常数测量方法[J]. 电波科学学报,2015,30(1):141-146.
- [5] 卞峰,黄卡玛. 微波化学反应器与实验结果的重复性[J]. 化工学报,2007,58(2):378-382.

- [6] 郭富祥, 赖展军, 薛锋章. 基于微带谐振法的介电常数无损测量[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2017, 29(3): 346-351.
- [7] Booth J, Orloff N, Mateu J, et al. Quantitative permittivity measurements of nanoliter liquid volumes in microfluidic channels to 40 GHz [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2010, 59(12): 3279-3288.
- [8] Withayachumnankul W, Jaruwongrungrsee K, Tuantranont A, et al. Metamaterial-based microfluidic sensor for dielectric characterization [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2013(189): 33-237.
- [9] Silavwe E, Somjit N, Robertson I. A microfluidic-integrated SIW lab-on-substrate sensor for microliter liquid characterization [J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(21): 7628-7635.
- [10] 朱明亮, 李勃, 郭云胜. 一种微波介质材料介电常数的测量方法[J]. 电子元件与材料, 2022, 41(3): 238-242, 290.
- [11] 郭富祥, 赖展军, 薛锋章. 基于微带谐振法的介电常数无损测量[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2017, 29(3): 346-351.
- [12] 廖崇蔚, 蒋龙凯, 瞿强, 等. 一种基片集成波导终端加载结构的复介电常数测量传感器[J]. 应用科技, 2021, 48(6): 13-17.
- [13] 晏晗, 陈倩, 黄卡玛, 等. 一种基于基片集成脊波导的介电常数测量研究[J]. 真空电子技术, 2021(6): 87-91.
- [14] 孙景芳, 李永倩, 胡佩佩, 等. 互补开口谐振环微带传感器介电常数的测量[J]. 传感技术学报, 2019, 32(4): 532-536.
- [15] 邹玉鹏. 基于开口谐振环的滤波器设计[J]. 科技创新与应用, 2016(3): 1.

## A RF Circuit Design for Non-destructive Testing of Dielectric Properties of Materials

WANG Ren<sup>1</sup>, SUN Haoran<sup>2</sup>, JING Shouzhao<sup>1</sup>, FAN Yong<sup>1</sup>, HUANG Heping<sup>3</sup>

(1. School of Electronic Science and engineering, University of Electronic and Science Technology of China, Chengdu 610071, China; 2. College of Electronic Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 3. Key Laboratory of Electronic Information of State Ethnic Affairs Commission, College of Electrical Engineering, Southwest Minzu University, Chengdu 610225, China)

**Abstract:** With the rapid development of microwave technology, non-destructive testing (NDT) of dielectric properties of materials based on microwave technology has been widely applied in the fields of compliance materials, food engineering and cell activity testing. This paper proposes symmetrical RF circuit based on coplanar waveguide structure. The microwave circuit works in the S-band and mainly includes two-half power distribution/synthesis branches and multiple interdigitated capacitive mutual couplings. The experimental measurements are consistent with the simulation results, proving the reliability of the detection device. Finally, the complex dielectric constants of common solid materials such as Teflon, Plexiglas and PVC are measured experimentally, and the comparison with the existing experimental data proves the measurement accuracy and reliability of the nondestructive testing circuit.

**Keywords:** S-band; coplanar waveguide structure; non-destructive testing