

DOI: 10.13382/j.jemi.B2407976

# 互补分裂谐振环缺陷地结构的平面传感器

陶永强 程勇

(南京邮电大学电子与光学工程学院、柔性电子(未来技术)学院 南京 210023)

**摘要:**为实现多形态介质材料介电特性的精确区分与测量,设计了一种基于互补分裂谐振环缺陷地结构(complementary split resonator ring-defected ground structure, CSRR-DGS)的微波平面传感器,该传感器通过CSRR-DGS的独特设计,显著增强了局部电场强度,与传统的平面结构相比,该传感器的品质因数提升了51.1%,提高了传感器的检测性能,能够实现对固体和液体介质的准确检测。仿真结果表明,在传感器的待测区域放置4 mm×4 mm×1 mm的立方体样品,且相对介电常数在1~15范围内变化时,传感器的谐振频率呈现良好的线性响应特性。通过测量聚四氟乙烯(polytetrafluoroethylene, PTFE)、3240环氧板、FR4玻璃纤维板以及丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物(acrylonitrile-butadiene-styrene, ABS)树脂板的相对介电常数,所得结果与仿真数据具有良好的一致性。基于建立的数学模型分析得出固体介质的测量平均相对误差为2.4%。通过测量不同浓度乙醇溶液,建立溶液浓度与相对频偏之间的关系,由此计算出乙醇溶液的测量平均相对误差为4.6%。实验结果表明,所设计的传感器在介电特性测量中具有优异的性能,为多形态介质的高精度检测提供了有效的解决方案。

**关键词:** 互补分裂谐振环;缺陷地结构;分裂谐振环;材料介电特性;微波传感器

**中图分类号:** TP212.1; TN98 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1025

## Planar sensor with complementary split-ring resonant defect ground structure

Tao Yongqiang Cheng Yong

(College of Electronic and Optical Engineering & College of Flexible Electronics (Future Technology),  
Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

**Abstract:** To achieve precise discrimination and measurement of dielectric properties for multi-form materials, this study proposes a microwave planar sensor based on a complementary split-ring resonator-defected ground structure (CSRR-DGS), whose unique configuration significantly enhances localized electric field intensity, resulting in a 51.1% improvement in quality factor compared to conventional planar structures, enabling accurate measurements for both solid and liquid dielectrics. Simulation results demonstrate that when testing 4 mm×4 mm×1 mm cubic samples with relative permittivity ranging from 1 to 15, the sensor exhibits excellent linear response characteristics in resonant frequency, which was experimentally validated through measurements of polytetrafluoroethylene (PTFE), 3240 epoxy board, FR4 fiberglass laminate, and acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS) resin, showing strong agreement with simulation data and yielding an average relative error of 2.4% for solid dielectric measurements based on the established mathematical model. Furthermore, characterization of ethanol solutions with varying concentrations established a reliable correlation between solution concentration and relative frequency shift, achieving an average relative error of 4.6% for liquid dielectric measurements, collectively demonstrating the sensor's outstanding performance in dielectric characterization and its effectiveness as a high-precision solution for multi-form material detection.

**Keywords:** complementary split resonant rings; defective ground structure; split resonant ring; dielectric properties of materials; microwave sensors

## 0 引言

材料的介电特性表征了材料在电场作用下的电学行为。准确地测量介质材料的介电常数在生产 and 生活中具有特别重要的意义。一方面,介电常数是表征材料介电性能的指标,对微波器件的结构设计与性能优化具有重要影响,必须对器件所采用的高频基板的介电特性进行精确表征<sup>[1-2]</sup>。另一方面,介电常数可以作为生物特性的间接表征参数,在工业生产和生物医学领域中具有重要的应用价值<sup>[3-4]</sup>。目前常用的测量介电常数的方法主要有传输线法<sup>[5]</sup>、谐振法<sup>[6]</sup>、自由空间法<sup>[7]</sup>等。微波平面谐振法因其高测量精度和良好的适用性,已成为测量低损耗介质材料相对介电常数的重要方法,该方法的工作原理是基于谐振频率对介电常数的敏感性,当被测样品置于传感器平面时,样品介电常数的变化会直接引起传感器谐振频率的偏移,这种频率偏移量与样品介电特性之间存在明确的对应关系,为材料表征提供了可靠的测量依据。平面谐振法常用结构主要包括分裂谐振环(split-ring resonator, SRR)和互补分裂谐振环(complementary split-ring resonator, CSRR)。现阶段主流的平面传感器设计均是在这些基础结构上演化发展而来。Kiani 等<sup>[8]</sup>提出了 T 型结功分器结构通过窄边耦合激励非等效双分裂谐振环(non-identical double-SRRs, NID-SRRs)测量液体介电常数,利用不同的谐振环单元对不同的介质进行测量。Jan 等<sup>[9]</sup>提出在地平面刻蚀互补分裂谐振环增强电场约束且在谐振器馈电结构的顶面至底面之间制备规则排列的通孔阵列,有效抑制了传感区域的电场泄漏损耗。Javed 等<sup>[10]</sup>提出利用多重互补分裂谐振环(multiple complementary split-ring resonator, MCSRR)的内环中心高电场区域中插入内径为  $0.008 \lambda_g$  的毛细管测试乙醇溶液,该项研究的测试方案需将毛细管精确插入谐振器内环结构进行测量,对测量设备和操作精度提出了较高要求。现有研究主要集中于单一谐振结构的应用,而对两种结构的复合设计及其协同效应的系统性研究仍较为缺乏,此外,现有工作主要集中于液态介质的介电特性测量,对固体介质的适用性验证尚不充分。

本文提出了一种 CSRR-DGS 的新型微波平面传感器,此结构有效增强了测量区域的电场强度,使品质因数显著提升。研究采用电磁仿真与实验测量相结合的方法,系统验证了该传感器对液态和固态介质的检测性能,通过实验数据验证所提出模型的有效性。

## 1 传感器原理及设计

互补分裂谐振环缺陷地结构的微波平面传感器由顶

层微带线以及分裂谐振环、介质层和刻蚀有互补分裂谐振环缺陷地平面 3 部分组成。顶层和底层导电层均采用高导电率的铜,介质层选用相对介电常数为 4.4 的 FR4 玻璃纤维板,其中分裂谐振环开口间隙处为测量区域。传感器的基本结构如图 1 所示。

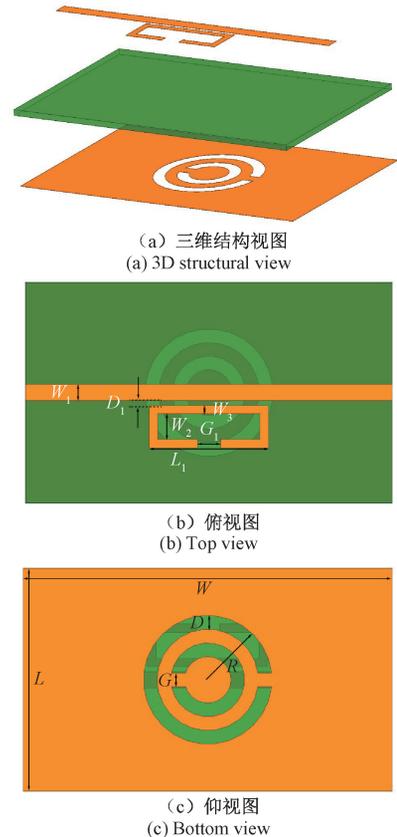


图 1 传感器基本结构

Fig. 1 Basic structure of the sensor

分裂谐振环作为典型的谐振结构,在超材料设计和微波器件中具有重要应用价值,其等效电路可以看成 LC 谐振电路。互补分裂谐振环也同样表现出 LC 谐振特性,通过地平面刻蚀形成的 CSRR 结构能够在基板底部区域产生高度集中的电场分布<sup>[11]</sup>。其中,通过调整互补分裂谐振环的开口间隙  $G$ ,分环间隔  $D$ ,外环半径  $R$  等参数可有效实现对谐振频率的调控。所提出的传感器谐振频率  $f_r$  可以由式(1)计算得到。

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_{SRR} + L_{CSRR})(C_{SRR} + C + C_{CSRR})}} \quad (1)$$

式中:  $L_{SRR}$ 、 $L_{CSRR}$  为 SRR 等效电感和 CSRR 等效电感;  $C$  为顶层微带线、SRR 与下层缺陷地结构之间的耦合电容值;  $C_{SRR}$ 、 $C_{CSRR}$  为结构中 SRR、CSRR 的等效电容值。

当待测材料(material under test, MUT)置于分裂谐振环的开口间隙区域时,会显著改变该区域的电磁场分

布特性,由于 MUT 的扰动将直接导致固有谐振频率产生偏移。谐振频率的变化与 MUT 之间的关系<sup>[12]</sup>可表示为:

$$\Delta f = \int_v (\Delta \varepsilon E_1 \cdot E_0 + \Delta \mu H_1 \cdot H_0) dv \quad (2)$$

其中:

$$\Delta f = f_{ru} - f_{rl} \quad (3)$$

$$\Delta \varepsilon = \varepsilon_0(\varepsilon_r - 1) \quad (4)$$

$$\Delta \mu = \mu_0(\mu_r - 1) \quad (5)$$

式中: $\Delta f$ 表示传感器的相对频偏; $f_{ru}$ 为传感器空载时的谐振频率; $f_{rl}$ 为传感器加载 MUT 时的谐振频率; $\Delta \varepsilon$ 表示相对介电常数变化; $\Delta \mu$ 表示磁导率变化; $E_0$ 和  $H_0$ 表示无扰动时的基准电场与磁场分布; $E_1$ 和  $H_1$ 表示 MUT 引入后的扰动电场和磁场分布; $v$ 表示 MUT 扰动的体积。

传感器的各项结构参数如表 1 所示,为实现  $50 \Omega$  的特征阻抗匹配,通过式 (6) 得出微带线的设计宽度应为  $1.5 \text{ mm}$ 。

$$w = 7.48 \times h \times e^{-\left(\frac{Z_0 \sqrt{\varepsilon_r + 1.41}}{87}\right)} \quad (6)$$

式中: $h$ 表示 FR4 基板厚度为  $0.8 \text{ mm}$ ; $\varepsilon_r$ 表示基板相对介电常数。

表 1 微波平面传感器设计尺寸参数

Table 1 Microwave planar sensor design size

参数符号	数值/mm	含义
$W_1$	1.5	微带线宽度
$D_1$	0.55	微带线与 SRR 间隔
$W_2$	5	SRR 宽度
$G_1$	2.7	SRR 开口间隙
$L_1$	15	SRR 长度
$W_3$	1	SRR 线宽
$L$	26	地平面长度
2	45	地平面宽度
$D$	1.6	分裂环间距
$G$	1.6	分裂环间隙
$R$	7.5	外环半径
$h$	0.8	基板高度

等效电路模型如图 2 所示,SRR 结构可等效为由电容  $C_{r1}$  和电感  $L_{r1}$  构成的并联谐振回路。微带线与 SRR 之间的间距可等效为耦合电容  $C_{c1}$ 。CSRR 结构被蚀刻在接地平面上,其等效结构可由等效电感  $L_{r2}$  和等效电容  $C_{r2}$  构成的集总参数模型进行表征。电感  $L_{m1}, L_{m2}$  是由传输线结构决定的,而电容  $C_{c2}$  是由馈电微带线与 SRR 结构之间以及与接地平面 CSRR 结构耦合产生的。各集总元件的数值为  $L_{m1} = 981.09 \text{ pH}$ ,  $L_{m2} = 257.95 \text{ pH}$ ,  $C_{c1} = 216.97 \text{ pF}$ ,  $L_{r1} = 12.02 \text{ pH}$ ,  $C_{r1} = 1.51 \text{ nF}$ ,  $C_{c2} = 3.0 \text{ pF}$ ,  $L_{r2} = 422.90 \text{ pH}$ ,  $C_{r2} = 9.40 \text{ pF}$ 。

电磁仿真和电路仿真反射系数如图 3 所示,图 3(a)是 ADS 得到的  $S_{11}$  曲线,图 3(b)是 HFSS 得到的  $S_{11}$  曲

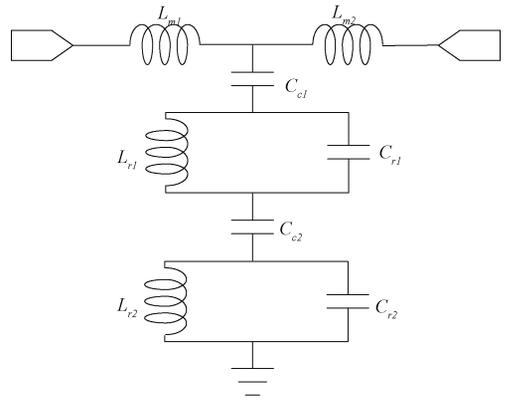


图 2 等效电路模型

Fig. 2 Equivalent circuit model

线,通过对比可以观察到两者在主要工作频段内展现出良好的一致性。两条曲线在谐振频率、 $-10 \text{ dB}$  带宽上均保持高度吻合。该结果充分验证了所提出等效电路模型的准确性,表明该模型能够有效表征实际传感器的电磁响应特性。

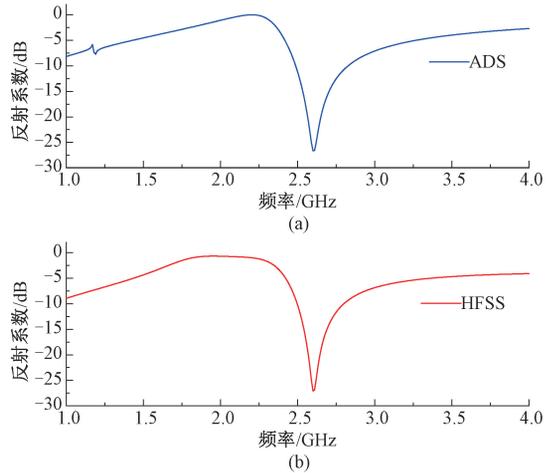


图 3 电磁仿真和电路仿真反射系数

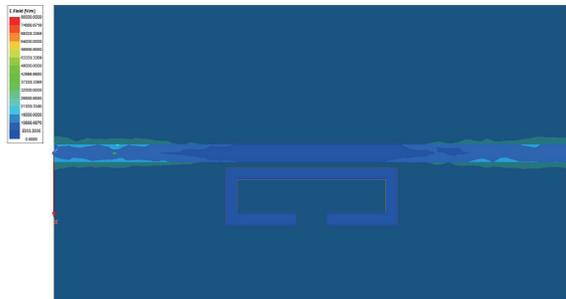
Fig. 3 EM simulation & circuit simulation reflection coefficients

## 2 传感器仿真分析

### 2.1 缺陷地结构对电场强度的影响

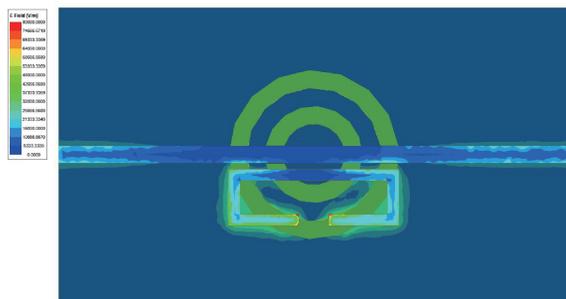
刻蚀在地平面上的互补分裂谐振环为样品相互作用提供了更大的边缘区域<sup>[13]</sup>。虽然 CSRR 可采用圆形、方形或其他多边形构型,但圆形结构在灵敏度方面表现更优。传感器在未引入和引入 CSRR-DGS 时的电场分布对比如图 4(a)、(b)所示,可见,CSRR-DGS 与顶层 SRR 通过垂直方向的耦合作用,在 SRR 的开口间隙区域表现出明显的局部电场增强现象。为系统评估 CSRR-DGS 对局部电场强度的影响,本文选取 SRR 开口间隙区域的 4 个

测试点进行分析,其电场强度如表 2 所示,数据显示在未引入 CSRR-DGS 的情况下,各测试点的电场强度分布于 5 894~7 376 V/m,平均值为 6 856.25 V/m,整体处于约 7 000 V/m 数量级。在引入 CSRR-DGS 后,测试点的电场强度均显著提升,电场强度提升至 55 090~141 200 V/m,平均电场强度达到 95 385 V/m,呈现出一个数量级的提升。进一步计算得到平均电场增强比为 13.91。计算结果表明,CSRR-DGS 在局部电场增强方面具有显著效果。



(a) 无CSRR-DGS结构时传感器电场分布

(a) Sensor field distribution without CSRR-DGS structure



(b) 有CSRR-DGS结构时传感器电场分布

(b) Sensor field distribution with CSRR-DGS structure

图 4 电场分布对比

Fig. 4 Comparison of electric field distributions

表 2 开口间隙处电场强度

Table 2 Electric field intensity at the open gap

无 DGS 结构电场强度/ ( $V \cdot m^{-1}$ )	有 DGS 结构电场强度/ ( $V \cdot m^{-1}$ )	电场增强比
6 932	110 700	15.97
7 223	141 200	19.55
7 376	74 550	10.11
5 894	55 090	9.35

## 2.2 缺陷地结构对反射系数的影响

如图 5 所示,传感器在引入 CSRR-DGS 前后的谐振特性和反射参数表现出明显差异。在未引入 CSRR-DGS 的情况下,谐振频率定位于 1.8 GHz,对应的反射系数为 -53 dB;在引入 CSRR-DGS 后,谐振频率上移至 2.6 GHz,反射系数增大至 -27 dB,上述结果表明,引入

CSRR-DGS 结构后产生了额外的电磁耦合作用,改变了传感器的等效电磁参数,进而使谐振频率向高频方向偏移。同时,该结构的引入也破坏了原有的阻抗匹配条件,进而导致反射系数增大。

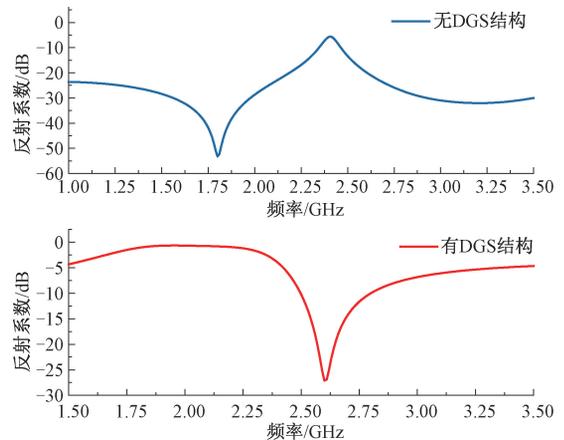


图 5 CSRR-DGS 对传感器的影响

Fig. 5 The effect of the CSRR-DGS on the sensor

品质因数是衡量传感器性能的重要参数之一,可通过如下公式计算:

$$Q = \frac{f_0}{BW_{3dB}} \quad (7)$$

式中: $f_0$  表示谐振频率; $BW_{3dB}$  表示低于峰值 3 dB 的上下频率带宽。根据上述公式计算,未引入 CSRR-DGS 时,传感器的品质因数为 56.25;在引入该结构后,品质因数提升至 85,较原始结构提高了约 51.1%。

## 2.3 相对介电常数和谐振频率关系

基于 CSRR-DGS SRR 传感器,探究不同介电常数介质对谐振频率的影响。利用 HFSS 软件建立传感器仿真模型,在 SRR 开口间隙处设置 4 mm×4 mm×1 mm 的 MUT,并使其相对介电常数在 1~15 范围内以步长 1 递增,分析其对谐振频率的影响。

仿真结果如图 6 所示,随着 MUT 介电常数的增大,谐振频率呈现规律性下降趋势。当  $\epsilon_r$  由 1 增至 15 时,谐振频率从 2.6 GHz 变化至 2.36 GHz,总偏移量达 240 MHz。该现象可归因于材料介电常数的提升,增强了 MUT 在开口间隙处的电荷存储能力,从而提升传感器的等效总电容值,最终导致谐振频率的降低。这一规律性变化表明,所提出的传感器结构能够有效感知 MUT 相对介电常数的变化,在相对介电常数检测中表现出良好的可靠性。

如图 7 所示,基于图 6 的仿真数据建立的数学模型清晰地揭示了 MUT 相对介电常数与传感器相对频偏之间存在显著的线性相关性。在该模型中,以相对介电常数作为自变量,相对频偏作为因变量,这一关系为介质材

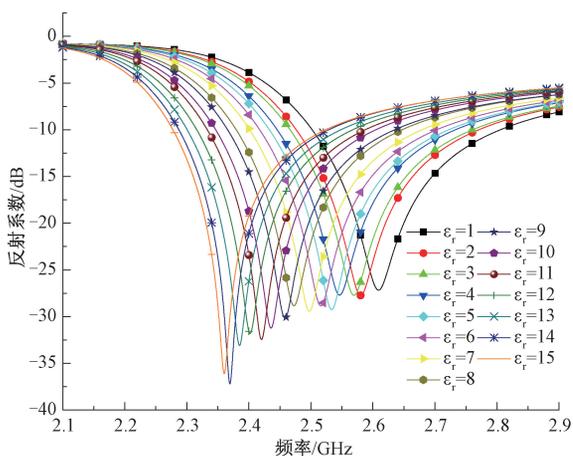


图 6 不同  $\epsilon_r$  对谐振频率的影响

Fig. 6 Effect of different  $\epsilon_r$  on resonant frequency

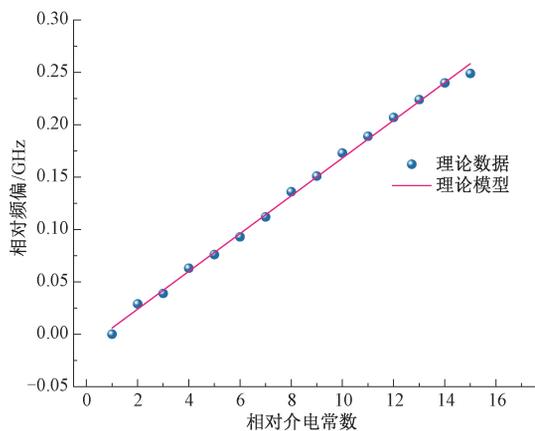


图 7 仿真结果

Fig. 7 Simulate result

料介电参数的快速、准确检测提供了重要的理论依据。

### 3 实验验证及分析

基于优化后的结构,研制了 CSRR-DGS SRR 平面传感器实物如图 8 所示。实验测试系统搭建如图 9 所示,采用 Rohde & Schwarz ZVA67 型矢量网络分析仪作为测量设备,该仪器工作频率覆盖 10 MHz~67 GHz,可满足传感器的测试需求。

传感器空载时的测量结果与仿真数据对比如图 10 所示,分析可以看出,谐振频率由 2.60 GHz 偏移至 2.406 GHz,相对偏移量为 7.46%,  $S_{11}$  幅度从 -27.3 dB 变化至 -26.8 dB,相对误差为 1.8%。经分析,实测与仿真结果的差异主要来源于如下 3 方面因素:首先,传感器介质基板材料的实际相对介电常数、损耗角正切值与仿真设定值存在不可避免的偏差;其次,焊接工艺引入的接触阻抗抗



图 8 传感器实物

Fig. 8 Sensors in kind



图 9 测试系统构成

Fig. 9 Test system composition

会导致额外的插入损耗和回波损耗;最后,测试环境中的电磁干扰等因素也会对测量结果产生一定影响。需要特别指出的是,这些因素所产生的影响程度完全在可接受范围之内,通过上述对比验证了所建立仿真模型的准确性。

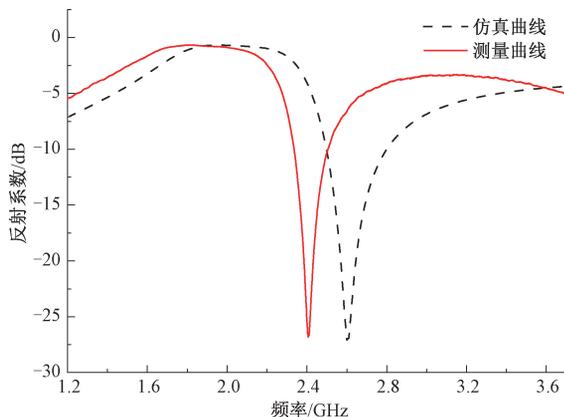


图 10 仿真和实物反射系数对比

Fig. 10 Comparison of simulated and measured reflection coefficients

#### 3.1 固体介质材料测量及分析

选取 4 种典型的介质基板材料进行测试,分别是 PTFE、ABS、3240 环氧树脂板、FR4 玻璃纤维板。

数据如表 3 所示,随着介质基板相对介电常数的增

大,仿真与实测频偏均呈现递增趋势,且二者数值具有良好的—致性。PTFE、ABS 和 3240 环氧树脂板的频偏误差分别为 11%、11%和 10%,表明这 3 组材料的仿真与实测结果吻合较好。然而,FR4 玻纤板的频偏误差达到 24%,其主要成因在于材料制备过程中的工艺参数波动导致 FR4 材料实际相对介电常数与标称值存在偏差所致。

表 3 不同相对介电常数下仿真和实测相对频偏

Table 3 Simulated and measured relative frequency shifts under varying relative permittivity

材料	相对介电常数	仿真相对频偏/GHz	实测相对频偏/GHz
PTFE	2.1	0.017	0.015
ABS	2.6	0.027	0.024
3240	3.5	0.039	0.035
FR4	4.4	0.054	0.041

如图 11 所示,进一步验证了上述结论,除 FR4 基板由于相对介电常数存在波动而导致谐振频率发生偏移外,其余 3 种材料的仿真与实测  $S_{11}$  曲线均呈现出高度—致性。这种良好的吻合关系充分证明了本文所提出的传感器具有可靠的测试精度。

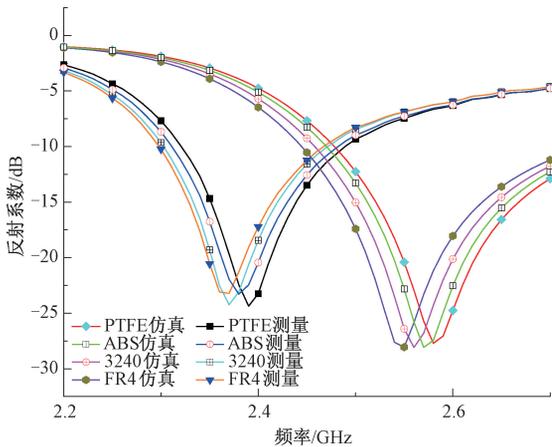


图 11 加载不同介质时谐振频率仿真结果和实测结果  
Fig. 11 Simulation and measured results of resonant frequencies when loading different media

为验证各类模型的准确性,对理论模型、多介质仿真模型及实际介质测量模型进行了对比分析。如图 12 所示,在 2.1~4.4 的测量范围内,理论模型与多介质仿真模型之间表现出高度—致性,二者的均方根误差 (RMSE) 仅为 0.009 5,充分验证了理论模型的准确性。在实验测试中,除去 FR4 材料因相对介电常数波动较大带来的偏差,PTFE、ABS 及 3240 环氧树脂基板的实测数据与多介质仿真结果高度吻合,印证了测量方法的可靠性。进一步的误差分析表明,理论模型与实际介质测量模型之间的 RMSE 为 0.012 7,而多介质仿真模型与实际

介质测量模型之间的 RMSE 仅为 0.003 3。该结果表明,多介质仿真模型在表征固体介质介电特性方面更接近实际场景。多介质仿真模型表达式如表 4 所示。

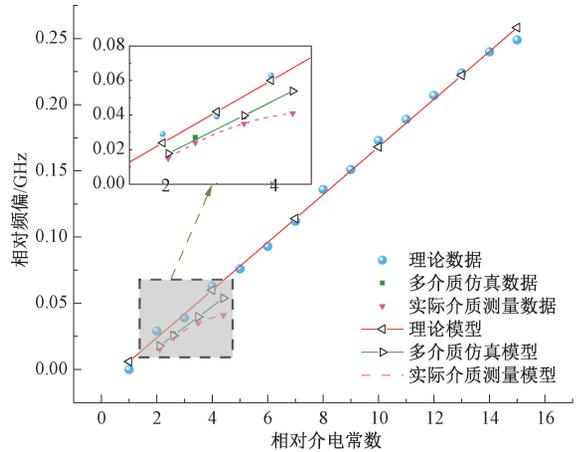


图 12 3 种模型对比

Fig. 12 Comparison of the three models

表 4 多介质仿真模型表达式

Table 4 Expression of the multi-dielectric simulation model

拟合曲线	$R^2$
$\Delta f = 0.015\ 679\ 6\ \epsilon_r - 0.015\ 140\ 8$	0.993 9

将表 3 的测试数据代入表 4 的多介质仿真模型表达式,即可反推出材料的介电常数,进而计算出各材料的测量相对误差:

$$Error = \frac{\epsilon_c - \epsilon_a}{\epsilon_a} \times 100\% \quad (8)$$

式中:  $\epsilon_a$  为材料的实际相对介电常数;  $\epsilon_c$  为预测相对介电常数。为确保评估的准确性,计算过程中排除了 FR4 材料因其相对介电常数波动较大所带来的影响。根据式 (8) 计算结果可知,本文所提出的传感器在固体介质相对介电常数测量中的平均相对误差为 2.4%。

### 3.2 液体介质材料测量及分析

传统的酒精浓度测量通常依赖于浮计法,其依据是不同浓度的酒精溶液具有不同的密度。当酒精浓度越低,浮力越大,酒精计下沉越少;反之,酒精浓度越高,密度越低,酒精计下沉越多。该方法虽原理简单,但测量过程较为繁琐,且通常需较大体积的样品液体,操作不便。相比之下,基于平面微波传感器的测量方法则具有明显优势,仅需少量酒精样品滴加于测量区域,便可快速获取测量结果,显著提升了检测的便捷性与效率。

使用微波传感器对乙醇-水混合物进行直接测量之前,首先建立了相对介电常数模型。考虑到乙醇能够与水完全互溶,因此采用麦克斯韦-加内特 (MG) 公式<sup>[14]</sup>对混合物的有效相对介电常数进行建模。利用式 (9) 计算

不同浓度混合物的相对介电常数。

$$\epsilon_{MUT} = \epsilon_{ethanol} + 3\alpha\epsilon_{ethanol} \times \left( \frac{\epsilon_{water} - \epsilon_{ethanol}}{\epsilon_{water} + 2\epsilon_{ethanol} - \alpha(\epsilon_{water} - \epsilon_{ethanol})} \right) \quad (9)$$

式中： $\alpha$  为混合比。

水和乙醇的相对介电常数分别约为 80 和 24，基于式(9)计算可得，不同浓度乙醇-水溶液的等效相对介电常数，如表 5 所示，随着乙醇浓度的增加，溶液的相对介电常数呈逐渐下降趋势。

表 5 不同浓度乙醇溶液对应的相对介电常数

Table 5 The relative permittivity of different concentrations of ethanol solutions

乙醇溶液浓度/%	混合比 $\alpha$	相对介电常数
10	0.9	70.76
20	0.8	62.76
30	0.7	55.78
40	0.6	49.62
50	0.5	44.16
60	0.4	39.27
70	0.3	34.87
80	0.2	30.90
90	0.1	27.29

为确保测量结果的准确性与可重复性，实验过程中严格控制测试条件：测试温度保持在  $27 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ ，液体体积控制为 0.01 mL。每次测量后均对传感器测试区域进行彻底清洁，确保每组数据的独立性与可靠性。图 13 所示不同乙醇浓度下的  $S_{11}$  实测曲线与仿真曲线。结果表明，随着乙醇浓度的降低，谐振频率逐渐从 2.318 GHz 下降至 2.108 GHz。在乙醇浓度为 90%、70%、50%、30% 和 10% 时，相对频偏依次为 88.31、138.26、188.21、238.16 和 298.1 MHz。仿真结果与实验数据在谐振频率变化趋势上基本一致，验证了传感器在检测不同浓度乙醇溶液中的有效性与可靠性。

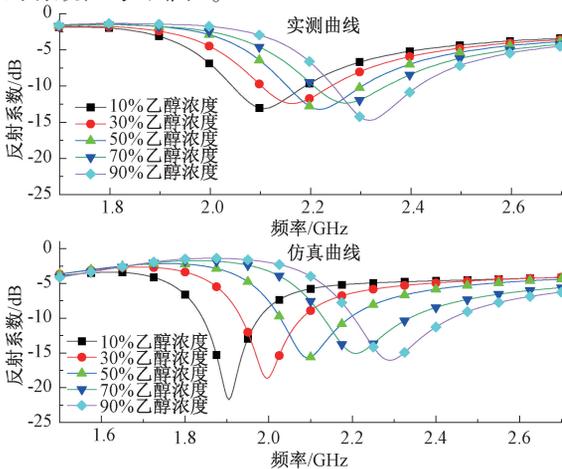


图 13 不同浓度下的反射系数

Fig. 13 Reflection coefficient at different concentrations

溶液浓度与相对频偏关系如图 14 所示，相对频偏随着乙醇浓度的升高而呈现出近似线性下降趋势。实验数据与拟合曲线高度吻合，该结果验证了此传感器在乙醇浓度定量检测方面的可行性，并为后续浓度反演模型的构建提供了理论依据。

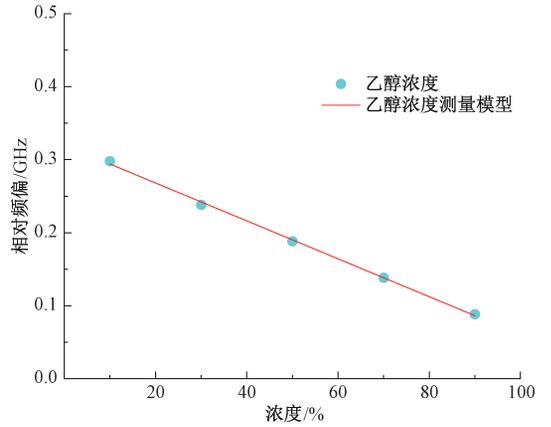


图 14 溶液浓度与相对频偏关系

Fig. 14 Relationship between solution concentration and relative frequency shift

表 6 为乙醇浓度测量的数学模型，其中  $C$  为溶液浓度，其决定系数  $R^2$  达到 0.998 0，表明该模型具有极高的拟合度。通过建立相对频偏与乙醇浓度间关系，只需测量传感器的相对频偏，即可通过公式反演计算出待测乙醇液体的准确浓度。

表 6 乙醇浓度测量模型表达式

Table 6 Expression of the ethanol concentration measurement model

拟合曲线	$R^2$
$\Delta f = -0.25974C + 0.320078$	0.998 0

将各浓度下的实测频偏代入表 6 所给出的数学模型，根据式(8)计算得出本文所提出的传感器在乙醇浓度测量中的平均相对误差为 4.6%。

### 3.3 传感器比较与分析

根据表 7 的对比分析，现有研究多采用单一谐振结构进行单一物质形态的测量。

表 7 本文与其他传感器比较分析

Table 7 Comparative analysis between the proposed method and other sensors

传感器来源	基本结构	工作频率/GHz	待测物质
文献[8]	SRR	5.76&7.85	液体
文献[10]	MCSRR	2.45	液体
文献[15]	CCRR	3.51	固体
文献[16]	CSRR	2.26&3.5	固体
本文	CSRR&SRR	2.6	固体 & 液体

相比之下,本文提出的复合结构传感器实现了同一传感器测量多种物质形态的能力,实现了固体和液体介质的兼容性测量。

## 4 结 论

本文设计了一种基于 CSRR-DGS 的 SRR 微波平面传感器,实现多形态介质材料相对介电常数的精确测量。该传感器采用的 CSRR-DGS 使品质因数提升了 51.1% 且优化测量区域的局部电场分布,有效增强了传感器的检测能力。该传感器对于固体介质材料测量平均相对误差仅为 2.4%,在乙醇溶液浓度检测中,平均相对误差为 4.6%。与传统传感器相比,本文设计具有如下显著优势:样品需求量小、制造成本低、重量轻、适用于固体和液体介质的测量。这些特性不仅拓展了传感器的应用范围,也为介电常数测量技术的发展提供了新的技术方案。

## 参考文献

- [ 1 ] 孙景芳,李永倩,胡佩佩,等. 互补分裂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.  
SUN J F, LI Y Q, HU P P, et al. Permittivity measurement using the microstrip sensor loaded with a complementary split-ring resonator[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2019, 32(4): 532-536.
- [ 2 ] 郝宏刚,王德戌,汪竹,等. 基于 SIW-CSRR 的固体物质介电常数测试件设计[J]. 微波学报, 2020, 36(3): 15-19.  
HAO H G, WANG D X, WANG ZH, et al. Design of solid material dielectric constant measurement device based on SIW-CSRR[J]. Journal of Microwaves, 2020, 36(3): 15-19.
- [ 3 ] 张威虎,李晓,田丰,等. 一种超介质液体浓度传感器的设计[J]. 西安科技大学学报, 2021, 41(3): 498-505.  
ZHANG W H, LI X, TIAN F, et al. Design of a metamaterial liquid concentration sensor[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2021, 41(3): 498-505.
- [ 4 ] ANDRIA G, ATTIVISSIMO F, DI NISIO A, et al. Design of a microwave sensor for measurement of water in fuel contamination [ J ]. Measurement, 2019, 136: 74-81.
- [ 5 ] NARAYANAN P M. Microstrip transmission line method for broadband permittivity measurement of dielectric substrates[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2014, 62(11): 2784-2790.
- [ 6 ] EBRAHIMI A, SCOTT J, GHORBANI K. Differential sensors using microstrip lines loaded with two split-ring resonators[J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(14): 5786-5793.
- [ 7 ] RASHIDIAN A, SHAFAI L, KLYMYSHYN D, et al. A fast and efficient free-space dielectric measurement technique at mm-wave frequencies[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2017, 16: 2630-2633.
- [ 8 ] KIANI S, REZAEI P, NAVAEI M. Dual-sensing and dual-frequency microwave SRR sensor for liquid samples permittivity detection [ J ]. Measurement, 2020, 160: 107805.
- [ 9 ] JAN R, SHEIKH J A, KHAN A A, et al. An Improved RF sensor for detection of variation in different body fluids [ C ]. 2024 IEEE Applied Sensing Conference (APSCON). IEEE, 2024: 1-5.
- [ 10 ] JAVED A, ARIF A, ZUBAIR M, et al. A low-cost multiple complementary split-ring resonator-based microwave sensor for contactless dielectric characterization of liquids [ J ]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(19): 11326-11334.
- [ 11 ] 江正峰,高尚,江剑. 波导谐振环微带阵列多裂纹检测传感器设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(1): 1-8.  
JIANG ZH F, GAO SH, JIANG J. Design of a waveguide resonant ring microstrip array multi-crack detection sensor[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(1): 1-8.
- [ 12 ] GHIRI R E, SAGHATI A P, KAYA E, et al. A miniaturized contactless UWB microwave system for time-domain dielectric spectroscopy[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2017, 65(12): 5334-5344.
- [ 13 ] KHANNA Y, AWASTHI Y K. Dual-band microwave sensor for investigation of liquid impurity concentration using a metamaterial complementary split-ring resonator [ J ]. Journal of Electronic Materials, 2020, 49(1): 385-394.
- [ 14 ] ALAM T, CHEFFENA M. Integrated microwave antenna/sensor for sensing and communication applications [ J ]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2022, 70(11): 5289-5300.
- [ 15 ] HAN X, LI X, ZHOU Y, et al. Microwave sensor loaded with complementary curved ring resonator for material permittivity detection[J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(21): 20456-20463.
- [ 16 ] OLIVEIRA J G D, PINTO E N M G, SILVA NETO V P, et al. CSRR-based microwave sensor for dielectric

materials characterization applied to soil water content determination[J]. *Sensors*, 2020, 20(1): 255.

- [17] 韩雪云,李肖松,周应平. 用于测量材料介电常数的高精度微波传感器[J]. *传感器与微系统*, 2024, 43(1): 84-87.

HAN X Y, LI X S, ZHOU Y P. High-precision microwave sensor for permittivity measuring of materials [ J ]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2024, 43(1): 84-87.

作者简介



陶永强,2020 年于淮阴工学院获得学士学位,现为南京邮电大学硕士研究生,主要研究方向为微波无源器传感器。

E-mail: 1325097740@qq.com

**Tao Yongqiang** received his B. Sc. degree from Huaiyin Institute of Technology in

2020. Now he is M. Sc. candidate in Nanjing University of Posts

and Telecommunications. His main research interests include Microwave passive sensor.



**程勇**(通信作者),1992 年于南京邮电大学获得学士学位,1998 年于南京邮电大学获得硕士学位,2010 年于南京邮电大学获得博士学位,现为南京邮电大学教授,主要研究方向为射频与微波电路、天线理论与设计。

E-mail: chengy@njupt.edu.cn

**Cheng Yong** (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Nanjing University of Posts and Telecommunications in 1992, M. Sc. degree from Nanjing University of Posts and Telecommunications in 1998, and Ph. D. degree from Nanjing University of Posts and Telecommunications in 2010. Now he is a professor in Nanjing University of Posts and Telecommunications. His main research interests include RF/microwave circuits and antennas theory and design.