

引用格式: WU Wenjing, PENG Liang. Research and Design of a Differential Microwave Sensor Based on ICS-SRR (Invited) [J]. Acta Photonica Sinica, 2023, 52(10):1052411

吴文敬, 彭亮. 一种基于交指电容裂环谐振器的差分微波传感器研究与设计(特邀)[J]. 光子学报, 2023, 52(10):1052411

一种基于交指电容裂环谐振器的差分微波 传感器研究与设计(特邀)

吴文敬, 彭亮

(浙大城市学院 信息与电气工程学院, 杭州 310015)

摘要:提出了一种基于交指电容裂环谐振器的差分微波传感器。通过把交指电容结构嵌入到裂环谐振器的开口处以增强电场束缚效应,并且为了抑制外界环境因素的干扰,制作成差分结构。差分结构采用两个裂环谐振器分别分布于单根微带线两边的结构形式,谐振器与微带线呈磁耦合效应。该传感器结构可以克服传统微波传感器的低灵敏度和易受外界干扰的问题。在实验中,将一个谐振器作为参考单元,另一个谐振器作为测量单元,待检测液体样本放置于测量交指电容处,随着不同浓度的乙醇-水混合溶液的注入,测量单元的谐振频率相较于参考单元会发生明显的频率偏移和陷波幅值的偏差,由此可以拟合出复数介电常数与它们之间的关系以预测不同浓度的乙醇-水混合溶液的复数介电常数。实验结果表明:所提出传感器的单位体积平均灵敏度可达 $3.6308\%/ \mu\text{L}$, 比同类型的传感器提高了几倍至几十倍。

关键词:微波微带传感器;裂环谐振器;差分结构;交指电容;复数介电常数;灵敏度

中图分类号: TN98

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20235210.1052411

0 引言

微波谐振式传感器在工业食品、农业、生物医药、医疗健康等领域发挥着至关重要的作用^[1]。相较于光学传感器,微波传感器的优势在于加工制造成本低廉、质量轻、体积小便于携带、受外界环境影响较低、运行稳定性好、便于维护等。谐振器是微波传感器的关键部件之一,其性能的好坏直接决定所设计传感器的灵敏度性能的高低。目前,在国内外等知名期刊上发表的微波传感器的谐振器主要包括裂环谐振器(Split Ring Resonator, SRR)^[2]、互补裂环谐振器(Complementary Slit Ring Resonator, CSRR)^[3]、电壁谐振器(Electric-LC)^[4]、磁壁谐振器(Magnetic-LC)^[5]以及它们的改进模型。微波微带传感器因具有较低的价格、加工制作简便、精度高、结构紧凑、检测方便等因素得到了广泛使用。在检测中,一般把待检测固体或者液体放置于谐振器上,此时传感器对应的反射系数 S_{11} 的极点或者传输系数 S_{21} 的零点会随着待测物体不同的复数介电常数而发生频率偏移和品质因数的变化。利用这种变化规律,得出频率偏移量、品质因数与介电常数的数学模型。根据获得的数学模型就可以对待测固体或者液体进行介电常数的预测。

近年来,世界各地的学者提出了各种基于不同谐振单元的微波传感器,用以检测固体或者液体的复数介电常数。SHAFIK T 等^[6]提出了一种基于 SRR 的微波传感器用于检测磁介质材料的参数。该传感器由一根微带线和两个不同的 SRR 构成,两个 SRR 分别分布于微带线的两边并与微带线呈现磁耦合的关系。其中一个 SRR 用于提取磁介质材料的介电常数值,另一个 SRR 用于检测磁介质材料的磁导率值,但是该传感器灵敏度较低。为了提高检测的灵敏度,HAQ T 等^[7]提出了一种基于 CSRR 谐振器的微波传感器,CSRR

基金项目:国家自然科学基金(No. 61875051)

第一作者:吴文敬, wwjhdu@163.com

通讯作者:彭亮, pengl@zucc.edu.cn

收稿日期:2023-03-09;录用日期:2023-05-04

<http://www.photon.ac.cn>

刻蚀于该基片的底层,位于顶层的微带线用于激励底层的CSRR谐振单元。相较于SRR结构,CSRR结构能够更好地起到束缚电场的作用,从而产生更高的检测灵敏度。但是该传感器结构简单,功能单一,易受外界环境的干扰。为了增加微波传感器的双模检测功能,并且保持高灵敏度特点。HARNSOONGNOEN S等^[8]提出了一种基于Electric-LC谐振单元的共面波导微带线激励的微波传感器。Electric-LC谐振单元作为感应区域位于共面波导结构的正对面,该谐振器产生两个谐振模式,分别为奇模和偶模,可实现双模检测的功能,但是该传感器易受外界干扰,且检测灵敏度不高。为了抵消外界因素的影响,并维持高灵敏度特性,VARSHNEY P等^[9]提出了一种基于Electric-LC谐振单元的差分传感器,该传感器由微带线和分别位于两边的Electric-LC谐振单元构成。其差分结构特性可有效抑制外界环境因素(温度、气压、湿度等)对测量结果的影响,从而提高检测灵敏度,但是该传感器只能对介电常数的实部进行检测,不能实现对介电常数虚部和磁导率的检测。为了实现在待测物质的介电常数和磁导率的检测,ALHARBI F等^[10]提出了一种基于阶跃阻抗(Stepped Impedance Resonators, SIRs)的差分传感器,该传感器由微带线和分布于两边的阶跃阻抗结构构成,阶跃阻抗谐振器直接与微带线相连。该阶跃阻抗谐振单元由一个高阻抗微带线与另一个低阻抗微带线构成,电场主要聚集于低阻抗线端,磁场主要聚集于低阻抗线与微带线的直连部分。依据电场和磁场的分布情况,可分别利用这两个感应区域实现对介电常数和磁导率的检测。该传感器具有差分结构特性也可有效降低外界环境因素对检测结果的影响,但是阶跃阻抗结构对电场的束缚能力较弱,因此也存在灵敏度受限的问题。FAN Xingye等^[11]提出了一种基于阶跃阻抗激励的微波传感器,该传感器的创新点在于把激励结构从传统的标准微带线形式改为阶跃阻抗结构,将介质基板的内部作为检测区域。因为阶跃阻抗结构是一种多阶形式,所以其可以产生更多的谐振模式,以实现多模检测。但是该传感器制作复杂,检测也不够方便。

为了解决上述问题,本文提出了一种基于交指裂环谐振器的差分微波传感器。所提出的传感器是从传统裂环谐振传感器发展而来,将交指电容结构(Interdigital Capacitance Structure, ICS)嵌入裂环谐振器的开口处以增强电场的束缚效应。同时为了抑制外界环境因素对检测结果的影响,将该传感器的两个SRR谐振器分别分布于微带线的两边以构成差分结构的形式。

1 工作原理

所提出的传感器是从基于传统裂环谐振器的微波传感器发展而来,在传统裂环谐振器的开口处嵌入交指电容结构,交指电容结构刻蚀在该传感器的顶层,交指电容谐振器可有效提高电场的束缚效应,从而提高介电常数检测的灵敏度。并且,该微波传感器还具有双模检测的能力。本文提到的复数介电常数特指待检测物质的相对复数介电常数值。相对复数介电常数的计算公式为 $\epsilon_r = \epsilon/\epsilon_0$, ϵ 指待检测物质的绝对介电常数值, $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ F/m是真空的绝对介电常数值。

基于传统裂环谐振器的传感器结构和等效电路分别如图1(a)和(b)所示。在图1(b)中,电感 L_1 和 L 分别代表微带线三部分的等效电感,电容 $C/2$ 是微带线与地平面之间的容性耦合,串联 $R_{s1}L_{s1}C_{s1}$ 代表裂环谐振器的电路模型, M 是微带线与SRR谐振器之间的互感。图1(c)是图1(b)的简化等效电路模型,其转化关系表达式为

$$C'_{s1} = \frac{L_{s1}}{\omega_0^2 M} \quad (1)$$

$$L'_{s1} = \omega_0^2 M^2 C_{s1} \quad (2)$$

$$L' = L - L'_{s1} \quad (3)$$

式中, $\omega_0^2 = \frac{1}{L_{s1}C_{s1}} = \frac{1}{L'_{s1}C'_{s1}}$ 。根据图1(c)所示的电路模型,可得该传感器的谐振频率表达式为

$$f_{01} = \frac{1}{2\pi \sqrt{L'_{s1}C'_{s1}}} \quad (4)$$

根据文献[12]描述的电路模型参数抽取方法,可根据电磁仿真软件仿真的S参数结果提取图1(c)所示模型的电路参数。最后,运用电路仿真软件ADS微调集总电路模型的参数使之与全波仿真结构基本一致。电路

模型集总器件参数值分别为: $L_1 = 0.82 \text{ nH}$, $L'_1 = 1.4 \text{ nH}$, $L'_{S1} = 0.82 \text{ nH}$, $C = 0.43 \text{ pF}$, $C'_{S1} = 1.71 \text{ pF}$, $R'_{S1} = 1 \text{ k}\Omega$ 。

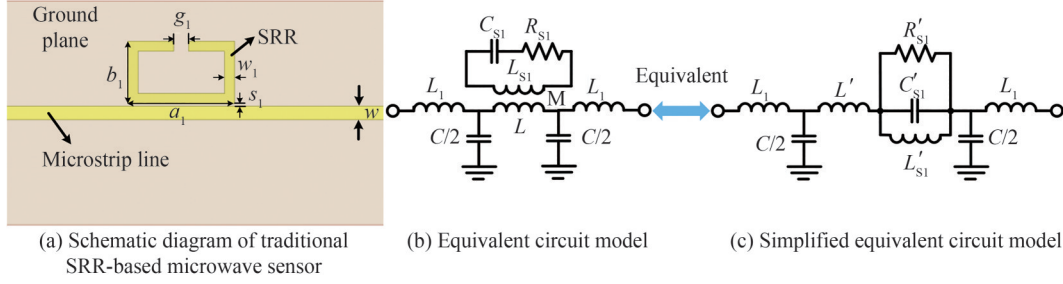


图1 基于传统SRR谐振单元的微波传感器示意图及其等效电路模型
Fig.1 Schematic diagram and equivalent circuit model of traditional SRR-based microwave sensor

为了提高SRR传感器的检测灵敏度,在SRR谐振器的开口处嵌入一个交指电容结构(ICS)以增强电场的束缚效应,如图2(a)所示。该传感器的等效电路拓扑结构如图2(b)所示,与图1(c)的区别在于交指电容的嵌入会使等效电容 C'_{S1} 的数值更大。该传感器集总电路模型的谐振频率表达式可写为

$$f_{02} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L'_{S1}C'_{S11}}} \quad (5)$$

该传感器的等效电路模型参数的抽取方法也与图1所示的方法基本一致。最后利用电路仿真工具ADS通过微调各个参数以拟合全波仿真的结果。该电路模型集总器件参数值分别为: $L_1 = 0.82 \text{ nH}$, $L'_1 = 1.4 \text{ nH}$, $L'_{S1} = 0.47 \text{ nH}$, $C = 0.43 \text{ pF}$, $C'_{S11} = 4.8 \text{ pF}$, $R'_{S1} = 1 \text{ k}\Omega$ 。接下来从理论上详细对比和分析传统SRR和ICS-SRR传感器的灵敏度大小。

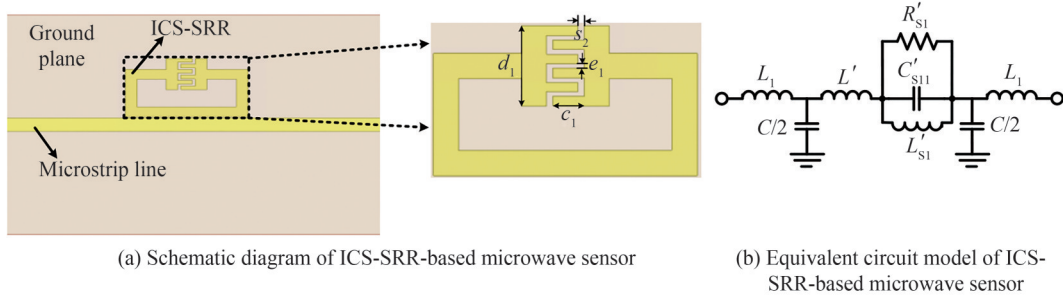


图2 基于ICS-SRR传感器的原理和等效电路模型
Fig.2 Schematic diagram and equivalent circuit model of ICS-SRR-based microwave sensor

当待检测物质分别放在传统SRR和ICS-SRR传感器的感应区域上时,它们的加载谐振频率表达式可写为

$$f_{01_MUT} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L'_{S1}C_{S1_MUT}}} \quad (6)$$

$$f_{02_MUT} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L'_{S1}C_{S11_MUT}}} \quad (7)$$

式中, $C_{S1_MUT} = C'_{S1} + \epsilon_r C_e$, $C_{S11_MUT} = C'_{S11} + \epsilon_r C_e$, ϵ_r 是加载物质的相对介电常数值, C_e 是单位介电常数引入的等效电容值。根据条件,式(6)和(7)可改写为

$$f_{01_MUT} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L'_{S1}C_{S1_MUT}}} \quad (8)$$

$$f_{02_MUT} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L'_{S1}(\gamma C_{S1_MUT} + (1-\gamma)\epsilon_r C_e)}} \quad (9)$$

式中, $C'_{S11} = \gamma C'_{S1}$, γ 为大于 1 的系数。将函数 $f_{01,MUT}$ 和 $f_{02,MUT}$ 分别关于 $C_{S1,MUT}$ 求偏导, 可得

$$\frac{\partial f_{01,MUT}}{\partial C_{S1,MUT}} = -\frac{1}{4\pi} L_{S1}^{-\frac{1}{2}} C_{S1,MUT}^{-\frac{3}{2}} = -\frac{1}{4\pi} L_{S1}^{-\frac{1}{2}} g_1(C_{S1,MUT}) \quad (10)$$

$$\frac{\partial f_{02,MUT}}{\partial C_{S1,MUT}} = -\frac{\gamma}{4\pi} L_{S1}^{-\frac{1}{2}} [\gamma C_{S1,MUT} + (1-\gamma)\epsilon_r C_e]^{-\frac{3}{2}} = -\frac{1}{4\pi} L_{S1}^{-\frac{1}{2}} g_2(C_{S1,MUT}) \quad (11)$$

为了方便地比较式(10)和(11)的绝对值大小, 仅需要比较 $\frac{g_1(C_{S1,MUT})}{g_2(C_{S1,MUT})}$ 与 1 的大小关系即可。 $\frac{g_1(C_{S1,MUT})}{g_2(C_{S1,MUT})}$ 的表达式可写为

$$Q(C_{S1,MUT}) = \frac{g_1(C_{S1,MUT})}{g_2(C_{S1,MUT})} = \frac{[\gamma + (1-\gamma)\epsilon_r C_e C_{S1,MUT}^{-1}]^{\frac{3}{2}}}{\gamma} \quad (\gamma > 1, C_{S1,MUT} > C'_{S1}) \quad (12)$$

将式(12)关于 $C_{S1,MUT}$ 求导, 可得

$$\frac{dQ(C_{S1,MUT})}{dC_{S1,MUT}} = \frac{3}{2\gamma} [\gamma + (1-\gamma)\epsilon_r C_e C_{S1,MUT}^{-1}]^{\frac{1}{2}} \frac{(\gamma-1)\epsilon_r C_e}{C_{S1,MUT}^2} \quad (13)$$

从式(13)可得, 函数 $Q(C_{S1,MUT})$ 在 $C_{S1,MUT} \in \left(0, \frac{(\gamma-1)\epsilon_r C_e}{\gamma}\right)$ 单调递减, 在 $C_{S1,MUT} \in \left(\frac{(\gamma-1)\epsilon_r C_e}{\gamma}, +\infty\right)$ 单调递增, 又因为 $C_{S1,MUT} > C'_{S1}$, 所以进行分类讨论。

1) 当 $C'_{S1} < \frac{(\gamma-1)\epsilon_r C_e}{\gamma}$ 时, 函数 $Q(C_{S1,MUT})$ 在 $C_{S1,MUT} \in \left(C'_{S1}, \frac{(\gamma-1)\epsilon_r C_e}{\gamma}\right)$ 单调递减, 则 $Q(C_{S1,MUT})$ 的

最大值记为 $Q_{\max}(C_{S1,MUT}) = Q(C'_{S1}) = \frac{[\gamma + (1-\gamma)\epsilon_r C_e C_{S1}^{-1}]^{\frac{3}{2}}}{\gamma} < 1$ 。因为 $Q > 0$, 所以条件 $C'_{S1} < \frac{(\gamma-1)\epsilon_r C_e}{\gamma}$ 不成立; 又因为函数 $Q(C_{S1,MUT})$ 在 $C_{S1,MUT} \in \left(\frac{(\gamma-1)\epsilon_r C_e}{\gamma}, +\infty\right)$ 单调递增, 则最大值为

$Q_{\max}(C_{S1,MUT}) = \lim_{C_{S1,MUT} \rightarrow +\infty} \frac{[\gamma + (1-\gamma)\epsilon_r C_e C_{S1,MUT}^{-1}]^{\frac{3}{2}}}{\gamma} = \sqrt{\gamma} > 1$, 最小值为 $Q_{\min}\left(\frac{(\gamma-1)\epsilon_r C_e}{\gamma}\right) = 0$, 所以必然

存在某一值 C_0 使 $Q(C_0) = 1$ 成立, 那么函数 $Q(C_{S1,MUT})$ 在 $C_{S1,MUT} \in \left(\frac{(\gamma-1)\epsilon_r C_e}{\gamma}, C_0\right)$ 的范围内必然使

$Q(C_{S1,MUT}) < 1$ 成立。所以在 $C_{S1,MUT} \in \left(\frac{(\gamma-1)\epsilon_r C_e}{\gamma}, C_0\right)$ 的范围内, $\left|\frac{\partial f_{01,MUT}}{\partial C_{S1,MUT}}\right| < \left|\frac{\partial f_{02,MUT}}{\partial C_{S1,MUT}}\right|$ 必然成立, 即谐

振频率 $f_{02,MUT}$ 关于等效电容 $C_{S1,MUT}$ 的变化率大于 $f_{01,MUT}$ 关 $C_{S1,MUT}$ 的变化率, 也就是说当不同介电常数的物质放置于感应区域时, 引起的 ICS-SRR 传感器的谐振频率偏移量大于传统 SRR 传感器, 即 ICS-SRR 传感器的灵敏度高于传统 SRR 传感器。

2) 当 $C'_{S1} > \frac{(\gamma-1)\epsilon_r C_e}{\gamma}$ 时, 函数 $Q(C_{S1,MUT})$ 在 $C_{S1,MUT} \in (C'_{S1}, +\infty)$ 单调递增, 则 $Q(C_{S1,MUT})$ 的最大值记

为 $Q_{\max}(C_{S1,MUT}) = \lim_{C_{S1,MUT} \rightarrow +\infty} \frac{[\gamma + (1-\gamma)\epsilon_r C_e C_{S1,MUT}^{-1}]^{\frac{3}{2}}}{\gamma} = \sqrt{\gamma} > 1$, 最小值为 $Q_{\min}(C'_{S1}) > 0$, 所以也必然存在

某一值 C'_0 使 $Q(C'_0) = 1$ 成立, 那么函数 $Q(C_{S1,MUT})$ 在 $C_{S1,MUT} \in (C'_{S1}, C'_0)$ 的范围内必然使 $Q(C_{S1,MUT}) < 1$ 成

立。所以在 $C_{S1,MUT} \in (C'_{S1}, C'_0)$ 的范围内, $\left|\frac{\partial f_{01,MUT}}{\partial C_{S1,MUT}}\right| < \left|\frac{\partial f_{02,MUT}}{\partial C_{S1,MUT}}\right|$ 必然成立, 那么 ICS-SRR 传感器的谐振频率偏移量大于传统 SRR 传感器, 即 ICS-SRR 传感器的灵敏度高于传统 SRR 传感器。

以上从理论上详细分析了要使基于交指电容传感器的灵敏度高于传统 SRR 传感器的相应条件和要求,

那么根据理论分析,对电磁仿真软件构建相应仿真模型进行优化设计起到理论指导的作用。通过仿真建模,可以发现在SRR开口谐振环处,左右两边的交叉部分越多,越容易满足条件,从而引起更多的谐振频率偏移量,并且因为交指结构的高等效电容效应使得ICS-SRR传感器的谐振频率明显低于传统SRR传感器。

为了进一步更加直观地呈现图1和图2所示传感器的灵敏度特性,用全波电磁仿真软件HFSS仿真的电场强度分布如图3所示。可明显看出,加载ICS的SRR传感器具有更强的电场束缚能力,表明其具备更高的介质检测灵敏度特性。

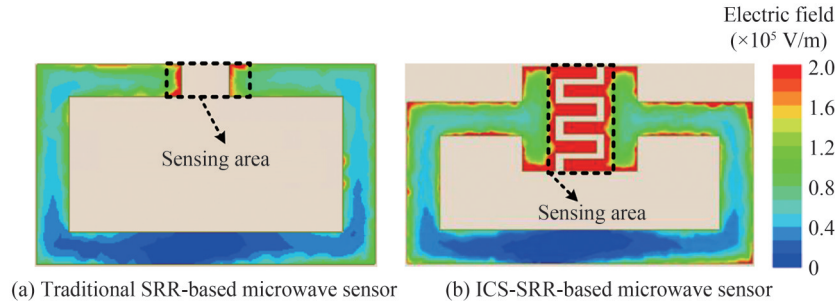


图3 电场强度分布

Fig.3 Distributions of electric fields

为了进一步抑制外界环境因素的干扰,提出的传感器在图2所示的基础上,制作成差分形式,具体如图4(a)所示。在图4(a)中,上边的SRR谐振器作为参考,下边的SRR传感器作为测量。等效电路如图4(b)所示。当被检测物质放置于测试端的SRR谐振器时,除了原本空载时候的谐振频率,另外产生一个测试谐振频率。测试谐振频率随着具有不同介电常数的物质加载而发生变化,总结出相对频率偏移量与介电常数的变化关系从而反演出未知物质的介电常数值。

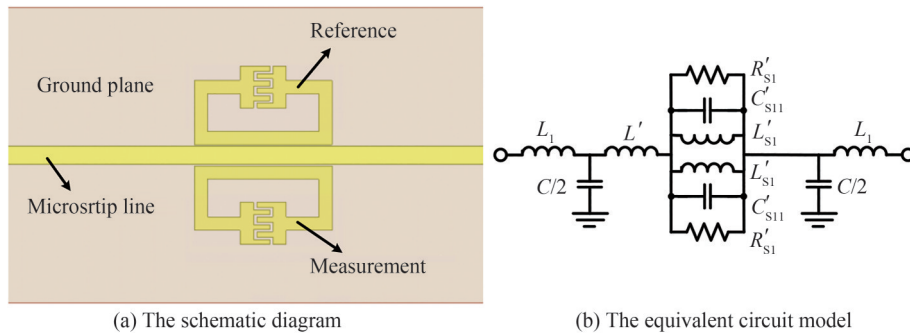


图4 所提出传感器原理和等效模型

Fig.4 Schematic diagram and equivalent circuit model of proposed microwave sensor

2 仿真结构和讨论

选取的介质基板为Rogers RO4003,其介电常数为3.55,损耗角正切为0.0027,厚度为0.508 mm。所设计传感器的整体电路尺寸为 $18\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 0.508\text{ mm}$,该传感器的激励微带线是标准的 $50\ \Omega$ 结构,线宽为1.1 mm,传感器结构的其他参数如表1所示。传感器的集总电路仿真S参数与全波电磁仿真结果如图5所示,可见,全波电磁仿真结果基本与电路仿真一致,也验证了电路模型的正确性,但是电路模型S参数结果还未完全与电磁仿真结果重合,这主要是因为可能还存在一些寄生参数未被完全考虑进来。从图5可见,基于传统SRR和ICS-SRR传感器的谐振频率分别约为4.24 GHz和3.35 GHz,并且品质因数(Quality factor)分别约为75.7和95.7,其中品质因数的计算公式为^[13-14]

$$Q = \frac{f_0}{W_{3\text{dB}}} \quad (14)$$

式中, f_0 为谐振器的谐振频率, $W_{3\text{dB}}$ 为谐振器的3 dB带宽。

表 1 传感器结构参数值(单位:毫米)

Table 1 Values of geometrical parameters of sensors(unit: mm)

	a_1	b_1	c_1	d_1	e_1	g_1	s_1	s_2	w_1	w
Traditional SRR sensor	8.5	5	—	—	—	1.2	0.2	—	0.8	1.1
Proposed sensor	8.4	3.9	1	2.55	0.15	1.2	0.1	0.2	0.8	1.1

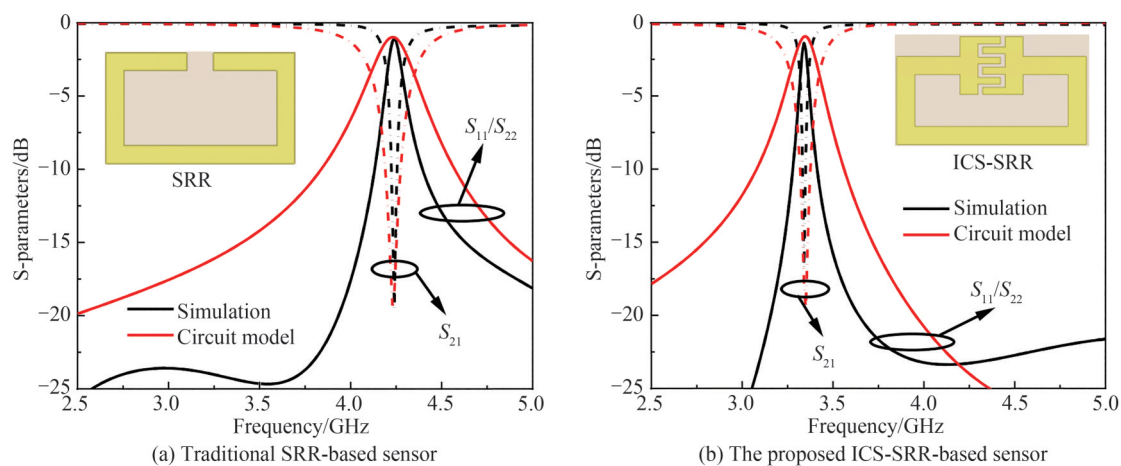


图 5 仿真与电路模型的 S 参数对比

Fig.5 A comparison between circuit model and simulation in terms of S-parameters

为了验证所提出传感器的性能,一种聚二甲硅氧烷(Polydimethylsiloxane, PDMS)微流通道基片放置于感应区域,该微流通道用来储存待检测液体,具体模型如图 6 所示。从图 6 可见,微流通道路径与交指电容缝隙完全重合,该 PDMS 基片尺寸为 $10.85 \text{ mm} \times 2.8 \text{ mm} \times 5.0 \text{ mm}$,微流通道的长、宽和高分别为 7.4 mm 、 0.2 mm 和 0.2 mm 。其中,微带线左边的 SRR 谐振器作为参考端,微带线右边的 SRR 谐振器作为测量端。利用针筒把待测液体注入测量端的微流通道,使溶液完全充满微流通道。当待测液体注入微流通道时,该传感器相对于未注入液体时会产生额外的谐振频率,此时可定义相对频率偏移量为

$$\Delta f = \frac{f_{\text{air}} - f_{\text{LUT}}}{f_{\text{air}}} \times 100\% \quad (15)$$

式中, f_{air} 和 f_{LUT} 分别表示空载和注入液体时对应的谐振频率。图 7 显示了在仿真状态下,当液体样本介电常数实部从 1 变化为 80 时,所提出的基于 ICS-SRR 传感器的传输系数变化曲线。从图 7 可见,空载状态时参考谐振环的谐振频点为 3.25 GHz ,当检测谐振环的感应区域加载物质时,检测谐振环产生了一个额外的谐振频率。当加载物质的介电常数实部从 1 变化到 80,损耗角正切设置为 0 时,该谐振频点从 3.25 GHz 变化到 1.54 GHz 。图 8 显示了传统 SRR 传感器和所提出传感器的相对频率偏移量对比曲线,可见所提出的基于 ICS-SRR 谐振器的传感器具有更高的相对频率偏移量,意味着其拥有更高的介电常数检测灵敏度,从而验证了数学理论模型关于灵敏度分析的正确性

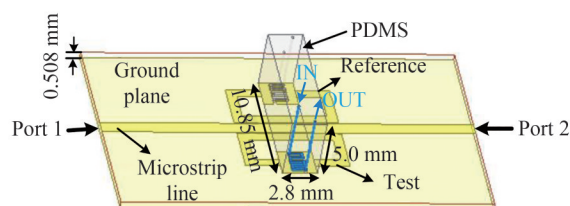


图 6 基于 ICS-SRR 的微波传感器的 3D 模型

Fig.6 The 3D model of proposed differential ICS-SRR-based microwave sensor

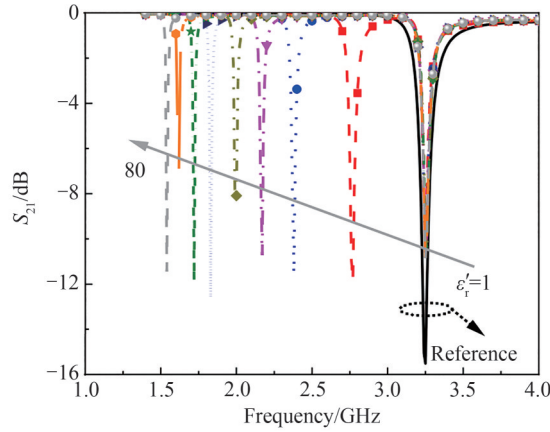


图7 待测液体实部介电常数从1变化到80时,传输系数 S_{21} 的仿真变化曲线
 Fig.7 Simulated transmission coefficients S_{21} for real permittivity of material under test altering from 1 to 80

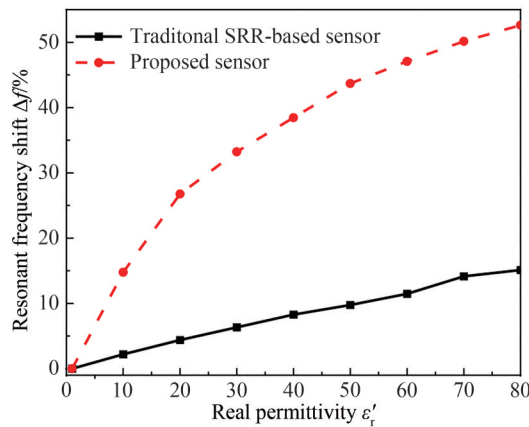


图8 仿真得到的相对频率偏移量与实部介电常数的变化关系
 Fig.8 Simulated relative resonant frequency shift versus real permittivity

3 实验验证

从实验角度验证所提出传感器的性能,所制作的传感器实物照片如图9所示,实验测试照片如图10所示。从图10可看出,PDMS微流通道基片紧贴谐振器的上表面,液体溶液样本从测试通道缓慢注入,并利用矢量网络分析仪记录不同浓度的乙醇-水混合溶液的传输系数曲线。图11显示了放置和未放置PDMS基片情况下,仿真和实测的传输系数曲线。可见,在放上PDMS基片之后,谐振频率往低频处偏移,并且实测的谐振频点与仿真的谐振频点存在一定频偏,这主要是因为实测的状态下,基质基板的某些参数属性与仿真存在的略微偏差、制作焊接误差和环境影响等多重因素造成的。

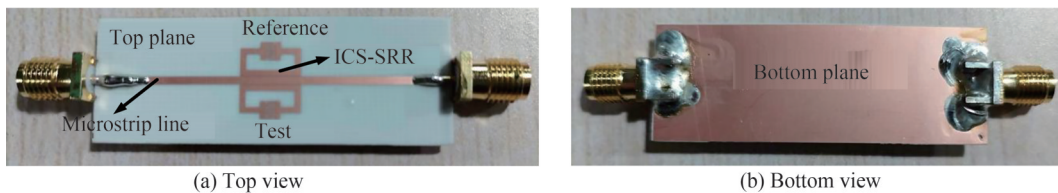


图9 所提出差分微波传感器的实物照片
 Fig.9 Photograph of proposed differential microwave sensor

在实测中,不同浓度的乙醇-水混合溶液作为待测液体,通过所提出的传感器来提取其复数介电常数值($\epsilon_r = \epsilon_r' - j\epsilon_r''$)。在蒸馏水和乙醇组成的混合溶液中,水的体积分数以步进20%从0%变化到100%,以这6组混合溶液作为实验组去提取S参数与复数介电常数的数学关系,从而去预测其他不同浓度的乙醇-水混

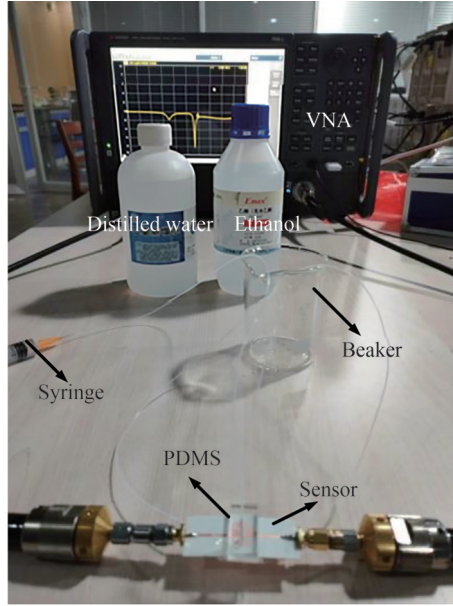


图10 所提出传感器的实验测试照片
Fig.10 Experimental photograph of proposed sensor

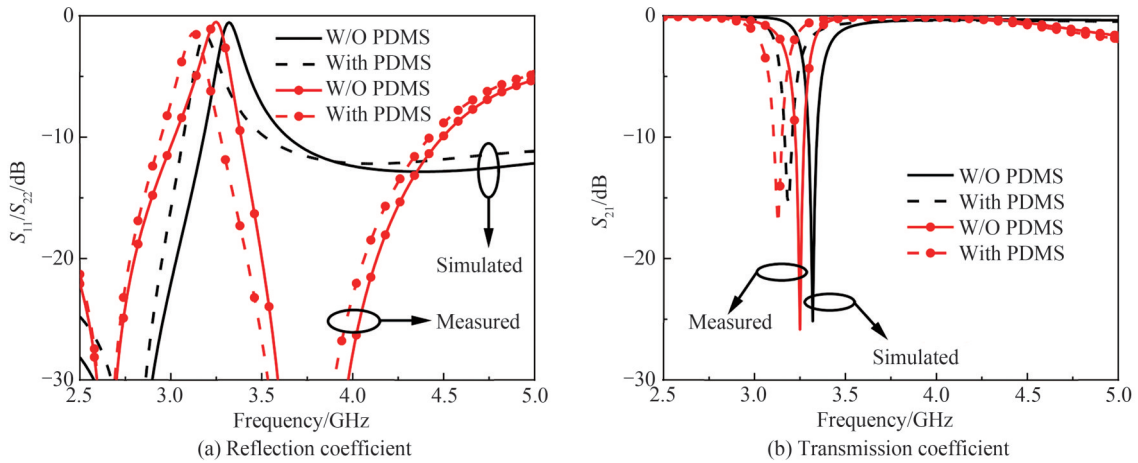


图11 放置和未放置PDMS基片情况下,仿真和实测的反射系数和传输系数曲线
Fig.11 Simulated and measured reflection coefficient and transmission coefficient for PDMS loaded and unloaded

合溶液的复数介电常数。不同浓度的乙醇-水混合溶液对应的复数介电常数可以参考文献[15]获得。在实测中,参考谐振环感应区域为空载状态,检测谐振环感应区域加载待检测液体。实测的水的体积分数以步进20%从0%变化到100%所对应的传输系数如图12(a)所示,可见,参考谐振器谐振频率基本保持不变,检测谐振器谐振频率从2.83 GHz变化到1.56 GHz,陷波系数从-1.077 dB变化到-1.21 dB。图7显示的仿真结果与图12(a)所示的实测结果变化规律基本一致。利用测量得到的频率偏移量 Δf_0 和最小陷波系数 $|S_{21}|_{\min}$ 来建立复数介电常数的提取模型,该数学模型可写为^[16-20]

$$\begin{bmatrix} \Delta f_0 \\ \Delta |S_{21}| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.01845 & -0.03144 \\ 0.05988 & 0.7384 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \epsilon'_{\text{sam}} \\ \Delta \epsilon''_{\text{sam}} \end{bmatrix} \quad (16)$$

式中, $\Delta f_0 = f_{\text{sam}} - f_{\text{ref}}$, $\Delta |S_{21}| = |S_{21}|_{\text{sam}} - |S_{21}|_{\text{ref}}$, $\Delta \epsilon'_{\text{sam}} = \epsilon'_{\text{sam}} - \epsilon'_{\text{ref}}$ 和 $\Delta \epsilon''_{\text{sam}} = \epsilon''_{\text{sam}} - \epsilon''_{\text{ref}}$ 。其中,下标“sam”代表测量端注入液体样本时对应的参数值,下标“ref”代表参考端PDMS空载时对应的参数值。为了更加直观地呈现复数介电常数的提取表达式,对式(16)进行运算,可得

$$\begin{bmatrix} \Delta \epsilon'_{\text{sam}} \\ \Delta \epsilon''_{\text{sam}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -62.8915 & -2.6778 \\ 5.1001 & 1.5714 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta f_0 \\ \Delta |S_{21}| \end{bmatrix} \quad (17)$$

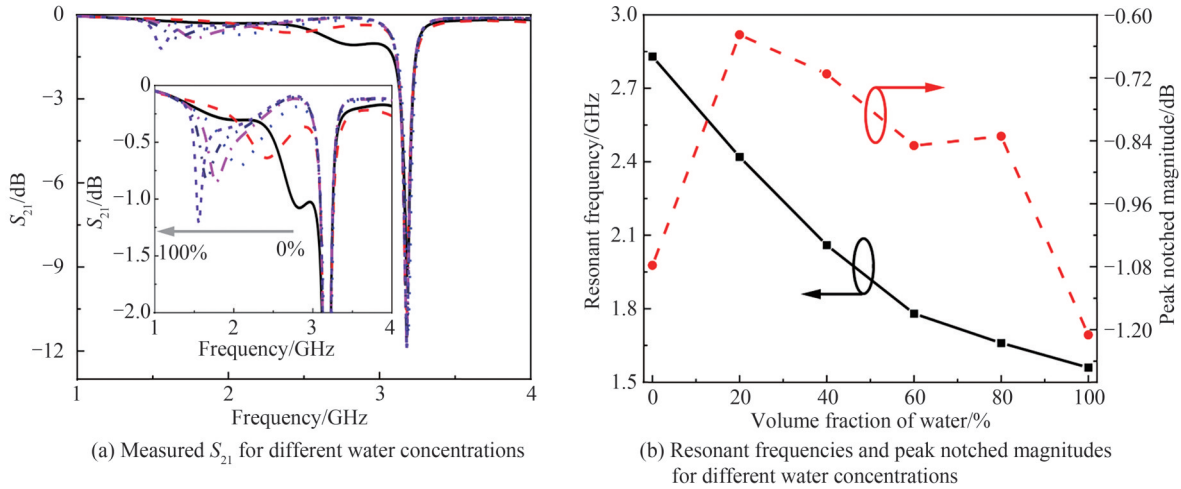


图 12 水浓度以步进 20% 从 0% 变化到 100% 时,实测的 S 参数、谐振频率和陷波幅度

 Fig.12 Measured S -parameters, resonant frequencies, and notched magnitudes for water concentration altering from 0% to 100% with a step of 20%

为了验证所提出模型的正确性,将水的体积分数以步进 20% 从 10% 变化到 90% 的乙醇-水混合溶液作为待测液体,其对应的实测传输系数曲线如图 13(a) 所示,谐振频率和最高陷波系数如图 13(b) 所示。把图 13(b) 所示的频率偏移量和相对陷波值代入式 (17) 中可以预测出此时溶液的复数介电常数,水体积分数从 10% 变化到 90% 的混合溶液的实测复数介电常数值如图 14 所示。可见,预测的不同浓度溶液的复数介电常数与参考值基本吻合,也验证了所提出方法的正确性。为了进一步验证所提出 ICS-SRR 传感器比传统 SRR 传感器在介电常数实部检测上的灵敏度优势,对传统 SRR 传感器进行相应的实验并总结归纳数据。图 15 为传统 SRR 传感器与所提出 ICS-SRR 传感器在介电常数实部检测方面的灵敏度对比,可见,所提出 ICS-SRR 传感器的灵敏度有了显著的提升。另外,根据实测数据,计算得到传统 SRR 传感器和所提出的 ICS-SRR 传感器在介电常数实部检测方面的平均误差分别为 18.17% 和 9.55%,在介电常数虚部检测方面的平均误差分别为 10.68% 和 3.79%。介电常数实部检测的灵敏度计算公式可写为^[21-23]

$$S = \frac{|f_{LUT} - f_{ref}|}{f_{ref}} \cdot \frac{1}{\epsilon_r' - 1} \cdot 100\% \quad (18)$$

式中, f_{LUT} 和 f_{ref} 分别代表测量端和参考端的谐振频率。

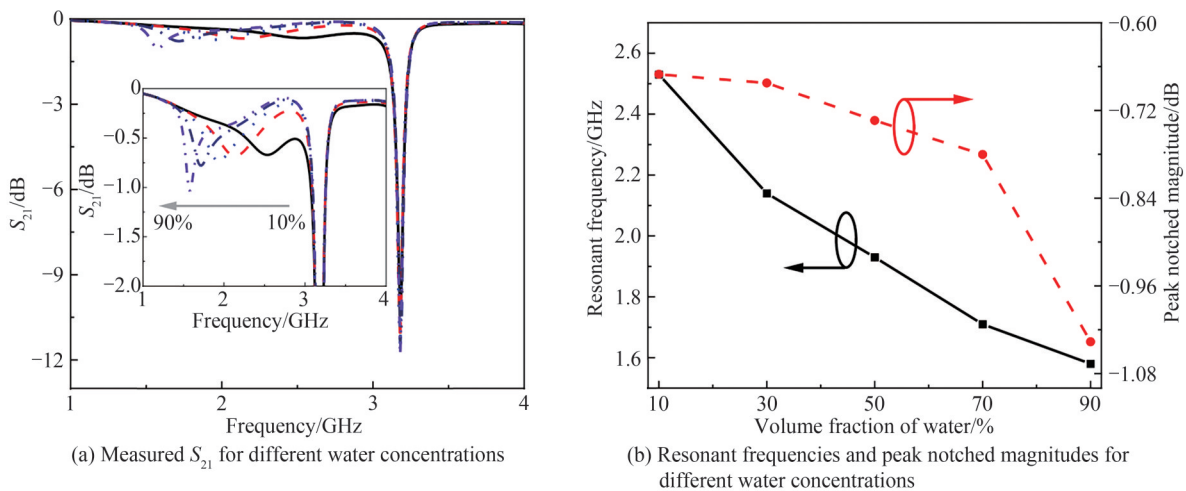


图 13 水浓度以步进 20% 从 10% 变化到 90% 时,实测的 S 参数、谐振频率和陷波幅度

 Fig.13 Measured S -parameters, resonant frequencies, and notched magnitudes for water concentration altering from 10% to 90% with a step of 20%

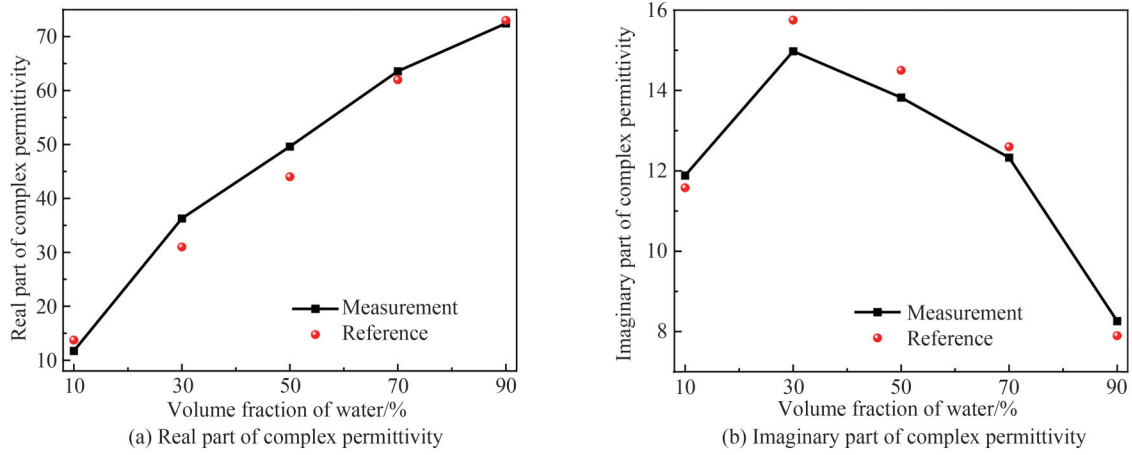


图 14 实测的复数介电常数与参考值对比

Fig.14 A comparison between reference value and measured complex permittivity

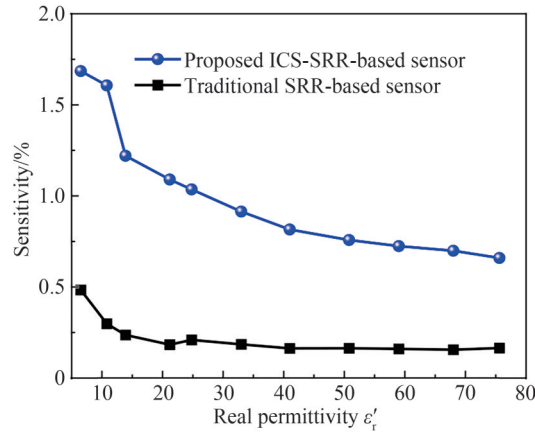


图 15 传统 SRR 传感器与所提出 ICS-SRR 传感器在灵敏度方面的对比

Fig.15 A comparison between traditional SRR-based sensor and proposed ICS-SRR-based sensor in terms of sensitivity

表 2 列举了所提出传感器与其他同类型传感器在技术指标方面的对比,主要包括谐振器类型、中心频率、液体消耗量、相对尺寸、平均灵敏度以及是否为差分结构。其中,平均灵敏度的计算公式为^[24-25]

$$S_{avg} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|f_{LUT} - f_{ref}|}{f_{ref}} \cdot \frac{1}{\epsilon'_r - 1} \cdot 100\% \quad (19)$$

式中, N 为检测次数。从表 2 可以看出,所提出传感器的平均灵敏度约为 1.013%,比大部分同类型传感器的平均灵敏度要高。因为注入液体量对平均灵敏度有较大的影响,为了消除液体使用量对灵敏度比较的影

表 2 所提出传感器与其他同类型传感器的对比

Table 2 A comparison between proposed sensor and other same-typed designs

Ref.	Resonance type	Center frequency/ GHz	Volume of liquid/ μL	Electrical size(λ_0^2)	$S_{avg}/\%$	Average sensitivity of per unit volume/ %	Differential structure?
[17]	CSRR	2.45	2.65	0.054	0.214	0.080 7	No
[18]	SRR	1.6	0.96	N/A	0.506	0.527	No
[19]	M-CSRR- CELC	2.45	1.674	0.063 4	1.444	0.862	No
[20]	MCSRR	1.618	6.3	0.126 5	0.626	0.099 3	Yes
[21]	CSRR	2.226	0.52	0.038 3	0.98	1.884 6	No
This work	ICS-SRR	3.18	0.279	0.101 1	1.013	3.630 8	Yes

响,定义单位体积的平均灵敏这一指标来衡量各个传感器的灵敏度大小。单位体积的平均零度定义为

$$S_{\text{apu}} = \frac{S_{\text{avg}}}{V} \quad (20)$$

式中, V 代表液体的消耗量。从表2可以看出,所提出ICS-SRR传感器的单位体积平均灵敏度为最大值,其值为3.6308%/μL。另外,该传感器还具有差分检测模式,这种结构在一定程度上可以抑制外界环境因素对检测结果的影响。

4 结论

本文提出的基于交指电容裂环谐振器的差分微波传感器从传统的裂环谐振器发展而来。通过在传统裂环谐振器的开口处嵌入交指电容结构,可以极大地提高电场的束缚能力,从而提高检测灵敏度。两个新型裂环谐振器分别分布于微带线的两旁,与微带线呈磁耦合特性,这种差分构造模型可以有效抑制外界环境因素的干扰从而提高检测灵敏度。构建集总等效电路模型,从电路角度阐述该传感器的工作机理,得到了等效电容的增大是灵敏度提升的一个因素。试验结果表明:该传感器在乙醇-水混合溶液的复数介电常数检测方面获得了较高的精度,相对于其他同类型的传感器具有较高的灵敏度。

参考文献

- [1] SHI Jianming, TONG Lei, TONG Wenqiang, et al. Current progress in long-term and continuous cell metabolite detection using microfluidic[J]. *Trends in Analytical Chemistry*, 2019, 117(8): 263-279.
- [2] NIKSAN O, JAIN M, SHAH A, et al. A nonintrusive flow rate sensor based on microwave split-ring resonators and thermal modulation[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2022, 70(3): 1954-1963.
- [3] PRAKASH D, GUPTA N. High-sensitivity grooved CSRR-based sensor for liquid chemical characterization [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(19): 18463-18470.
- [4] GOVIND G, AKHTAR M. Design of an ELC resonator-based reusable RF microfluidic sensor for blood glucose estimation[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 18842-18849.
- [5] WU Wenjing, ZHAO Wensheng, WANG Dawei, et al. Ultrahigh-sensitivity microwave microfluidic sensors based on modified complementary electric-LC and split-ring resonator structures[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(17): 18756-18763.
- [6] SHAFI K, ANSARI M, JHA A, et al. Design of SRR-based microwave sensor for characterization of magnetodielectric substrates[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2017, 27(5): 524-526.
- [7] HAQ T, KOZEIL S. Inverse modeling and optimization of CSRR-based microwave sensors for industrial applications[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2022, 70(11): 4796-4804.
- [8] HARNISOONGNOEN S, WANTHONG A. Coplanar waveguide transmission line loaded with electric-LC resonator for determination of glucose concentration sensing[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2017, 17(6): 1635-1640.
- [9] VARSHNEY P, KAPOOR A, AKHTAR M. Highly sensitive ELC resonator based differential sensor [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2021, 70(1): 1-7.
- [10] ALHARBI F, HAQ M, UDPA L, et al. Magnetodielectric material characterization using stepped impedance resonators [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 23(3): 2093-2104.
- [11] FAN Xingye, CHENG Y, YU Y, et al. A multiple resonant frequencies sensor for measuring permittivity based on stepped impedance resonator[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(12): 11602-11614.
- [12] AZNAR F, BONACHE J, MARTIN F. Improved circuit model for left-handed lines loaded with split ring resonators[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 92(4): 1-3.
- [13] CHEN Yukang, HUANG Jie, XIANG Y, et al. A modified SIW re-entrant microfluidic microwave sensor for characterizing complex permittivity of liquids[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(13): 14838-14846.
- [14] BANERJEE A, KUMAR A, TIWARI N, et al. Design of bridge type C-band planar RF sensor for detection of solute concentration level in water[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(20): 22670-22678.
- [15] BAO Jianzhong, SWICORD M L, DAVIS C C. Microwave dielectric characterization of binary mixtures of water, methanol, and ethanol[J]. *Journal of Chemical Physics*, 1996, 104(12): 4441-4450.
- [16] ABDOLRAZZAGHI M, DANESHMAND M. Exploiting sensitivity enhancement in micro-wave planar sensors using intermodulation products with phase noise analysis[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2020, 67(12): 4382-4395.
- [17] 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.
- [18] ABBASI Z, BAGHELANI M, DANESHMAND M, et al. High-resolution chipless tag RF sensor [J]. *IEEE*

- Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2020, 68(11): 4855-4863.
- [19] WU Wenjing, ZHAO Wensheng, WANG Dawei, et al. Ultrahigh-sensitivity microwave microfluidic sensors based on modified complementary electric-LC and split-ring resonator structures[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 12(17): 18756-18763.
- [20] GAN Hongyi, ZHAO Wensheng, LIU Qi, et al. Differential microwave microfluidic sensor based on Microstrip Complementary Split-Ring Resonator (MCSRR) structure[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(11): 5876-5884.
- [21] FAN Lichao, ZHAO Wensheng, WANG Dawei, et al. An ultrahigh sensitivity microwave sensor for microfluidic applications[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2020, 30(12): 1201-1204.
- [22] WU Wenjing, ZHAO Wensheng, WANG Dawei, et al. A temperature-compensated differential microstrip sensor for microfluidic applications[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(21): 24075-24083.
- [23] FANG Yuhao, ZHAO Wensheng, LIN Fukang, et al. An AMC-based liquid sensor optimized by particle-ant colony optimization algorithms[J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(3): 2083-2090.
- [24] HUANG Xin, YE Wenxian, RAN Jia, et al. Highly sensitive biosensor based on metamaterial absorber with an all-metal structure[J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23(4): 3573-3580.
- [25] BISWAS A, YIN Shenwei, TURSUNNIYAZ M, et al. Geometrical optimization of printed interdigitated electrode sensors to improve soil moisture sensitivity[J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(20): 19162-19169.

Research and Design of a Differential Microwave Sensor Based on ICS-SRR (Invited)

WU Wenjing, PENG Liang

(School of Information and Electrical Engineering, Hangzhou City University, Hangzhou 310015, China)

Abstract: In the traditional Split Ring Resonator (SRR)-based microwave microstrip sensor, the microstrip line is coupled with SRR, and the magnetic coupling is appeared between microstrip line and SRR. The electrical field is distributed at the gap of SRR. A high resonant frequency is occurred due to the relatively low equivalent capacitance. And, the traditional SRR-based sensor shows a low sensitivity. In order to improve the detection sensitivity, an Interdigital Capacitance Structure (ICS) is inserted into the opening of the split ring resonator to enhance the density of electric field. From the simulated distribution of electrical field, it can be seen that more electrical field is concentrated at the slot of interdigital capacitance with comparison to traditional SRR-based sensor. The meander slot can increase the interacted path of electrical field, create a higher equivalent capacitance, so more electrical field is focused on the slot of interdigital capacitance. As known, the external environmental factors, such as temperature, humidity, gas pressure, etc, can cause an influence on the measured results and result in a large measurement error. In order to suppress the interferences of external environment, a differential structure is added. With comparison to traditional microstrip sensors, the proposed differential microwave sensor can overcome low sensitivity and effects of environment factors. The designed differential structure adopts the form of two split ring resonators distributed on both sides of a single microstrip line, and the microstrip line is coupled with the two split-ring resonators, and the magnetic couplings distributed on both sides are equal. An equivalent circuit model is adopted to analyze the operating principle of proposed microwave sensor, the element values of equivalent circuit model are calculated, then Keysight ADS is adopted to fine-tune all the element values to match the simulation results. It can be found that there is a good agreement between them. The consistent also reveals the correctness of proposed equivalent circuit model. Besides, mathematical analysis is utilized to explain the phenomenon that the ICS-SRR has a higher confined electrical field than traditional SRR. Then, simulation and experimental results both verify the correctness of theoretical analysis. In the experiment, one resonator serves as the reference unit and the other resonator serves as the measurement unit. The liquid under test is placed at the test resonator. In measurement, the water-ethanol mixtures with water concentrations changing from 0% to 100% with a step of 20% are adopted to establish the mathematical model. As the mixture solutions of water-ethanol with different volume fractions of water are injected, the resonance frequency of the measurement unit will show significant frequency shift and notch amplitude deviation compared to the reference unit. The deviations of

resonant frequency and notched magnitude can be used to fit the complex permittivity. Then, in order to demonstrate the correctness of established mathematical model, the water-ethanol mixtures with water concentrations altering from 10% to 90% with a step of 20% are utilized. By substituting the measured resonant frequencies and notched magnitudes for water-ethanol mixtures with water concentrations changing from 10% to 90% into the established mathematical model, the real and imaginary parts of complex permittivity for water-ethanol mixtures with water concentration changing from 10% to 90% can be obtained. The experimental results show that the average sensitivity of per unit volume of the proposed sensor can reach 3.630 8%/μL, which is several times higher than the other designs. In addition, the proposed microwave sensor can also be adopted to measure other binary mixed solutions by establishing the corresponding mathematical models.

Key words: Microwave microstrip sensor; Split-ring resonator; Differential structure; Interdigital capacitance; Complex permittivity; Sensitivity

OCIS Codes: 350.4010; 310.2790; 330.1880; 310.3840