

DOI: 10.11991/ykj.202102009

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1191.U.20210802.1532.002.html>

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

廖崇蔚, 蒋龙凯, 瞿强, 陈倩, 刘长军

四川大学 电子信息学院应用电磁所, 四川 成都 610064

摘 要:为解决液体复介电常数实时测量问题,提出了一种基于基片集成波导(SIW)的传感器新结构,提升了测量液体介电常数的便捷性和测量高损耗材料的灵敏度。该结构基于 SIW 谐振器,在末端减少金属化过孔以增加其电磁辐射,并在末端引入长度为四分之一波长的缝隙,改善阻抗匹配。以缝隙作为溶液的测试界面,增强了传感器谐振频率、空载品质因数与待测溶液的复介电常数之间的关联,提升了测量灵敏度。本传感器工作在 5.76 GHz,介电常数测试范围宽、测试便捷并且加工方便。通过测量乙醇与水混合溶液进行验证,利用反向传播(BP)神经网络反演获取的复介电常数精度高,具有良好的应用前景。

关键词:基片集成波导;复介电常数;谐振频率;空载品质因数;反向传播神经网络

中图分类号:TM934.33

文献标志码:A

文章编号:1009-671X(2021)06-0013-05

A complex permittivity measuring sensor based on the SIW terminal loading structure

LIAO Chongwei, JIANG Longkai, QU Qiang, CHEN Qian, LIU Changjun

Institute of Applied Electromagnetics, School of Electronics and Information Engineering,
Sichuan University, Chengdu 610064, China

Abstract: In order to solve the problem of real time measurement of the complex permittivity of liquid, a novel sensor structure based on substrate integrated waveguide (SIW) is proposed, which enhances the convenience of measuring permittivity of liquid and the sensitivity of measuring high-loss material. Taking SIW resonator as its basis, this structure intensifies electromagnetic radiation by reducing metallized holes at the end and improves impedance matching by introducing the quarter-wavelength slots there. As the testing interface of the solution, the slot improves the correlation between the unload quality factor and the complex permittivity of the solution to be tested, thus enhancing test sensitivity. This sensor works at 5.76 GHz. It has the advantages of wide permittivity testing range and convenient testing and processing. The mixed solutions of ethanol and water are measured, showing that the method of obtaining complex permittivity through the back propagation (BP) neural network has high accuracy and has a promising application prospect.

Keywords: substrate integrated waveguide ; complex dielectric constant; resonant frequency; unload quality factor; back propagation neural network

在微波工程领域中,复介电常数是材料的重要电磁宏观参量,表征不同材料的电磁特性^[1]。在微波化学、航天航空、生物医学、材料学等领域中,需要高效精准地测量复介电常数以探知

物质的特性,所以对复介电常数测量的研究具有重要意义^[2-3]。随着科技的发展,微波与工业、科学和医学领域的结合日益密切。工业科学医疗频段(industrial scientific medical band, ISM Band)被单独规划出来满足相关领域对频谱的需求。2.45 GHz 和 5.8 GHz 是 2 个典型的 ISM 频率。基于点频测量的复介电常数测量方法通常具有较高的测量精度。基片集成波导由于加工简便、损耗低,可以用于对复介电常数的实部和虚部进行精准测量^[4]。

收稿日期:2021-02-25. 网络出版日期:2021-08-03.

基金项目:国家自然科学基金项目(62071316);四川省科技项目(2021YFH0152, 2020YFH0100).

作者简介:廖崇蔚,男,硕士研究生.

刘长军,男,教授,博士生导师.

通信作者:刘长军, E-mail: cjliu@scu.edu.cn.

文献 [5] 实现了 5.8 GHz 的液体介电常数测量, 展示了较高的测量精度。文献 [6] 利用一对 SIW 圆形腔分别确定空载品质因数, 得到待测物的复介电常数。文献 [7] 通过在 SIW 矩形谐振腔引入互补开口环谐振器, 实现了复介电常数的测量。文献 [8] 中设计了一款基于 SIW 的双频测试系统, 实现了在 2.45 和 5.8 GHz 频段下的复介电常数的测量。传统基片集成波导传感器通常通过腔体中央位置进行处理, 实现复介电常数测量。

本文提出了一种基于 SIW 的矩形谐振腔, 通过减少其终端金属化过孔的分布, 增加电磁功率辐射。通过在过孔间引入缝隙, 改善阻抗匹配。该传感器工作在 5.8 GHz, 通过将传感器插入待测液体, 实现 S 参数的测量, 进而获取相应的谐振频率与空载品质因数; 然后利用人工神经网络进行反演, 成功得到待测物的复介电常数。

1 传感器设计理论与测试

SIW 是一种基于介质基板的传输线结构。该结构上下表面覆铜, 并由规则排布的金属化过孔连通形成波导结构。SIW 具有体积小、重量轻等特点。在微波毫米波频段, 具有高品质因数、低辐射损耗的优点^[9-10]。

1.1 基于 SIW 的传感器理论分析

本文提出的基于 SIW 结构的传感器是通过微带线渐变结构对其进行耦合馈电, 其谐振频率与 SIW 尺寸以及基板复介电常数的关系为^[11]

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{\epsilon\mu}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{L_{\text{eff}}}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{H}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{W_{\text{eff}}}\right)^2} \quad (1)$$

式中: ϵ 和 μ 分别为介质基板的介电常数与导磁率, m 、 n 、 $p = 1, 2, 3, \dots$ 是腔体内分别沿 x 、 y 、 z 方向的半个周期个数, H 为介质基板的厚度, L_{eff} 和 W_{eff} 分别是 SIW 矩形谐振腔的等效长度和宽度^[12], 表示为

$$L_{\text{eff}} = L - 1.08 \frac{D^2}{S} + 0.1 \frac{D^2}{L}$$

$$W_{\text{eff}} = W - 1.08 \frac{D^2}{S} + 0.1 \frac{D^2}{W}$$

式中: L 和 W 分别为实际 SIW 矩形腔体的长边长度与短边长度, D 和 S 分别为金属化过孔直径与相邻过孔间距。传感器的空载品质因数与导体损耗和介质损耗有关^[12]:

$$\frac{1}{Q_u} = \frac{1}{Q_c} + \frac{1}{Q_d}$$

式中: Q_u 是谐振腔的空载品质因数, Q_c 为无介质损耗时的品质因数, Q_d 为谐振腔无导体损耗情况下的品质因数。 Q_d 与介质基板的复介电常数存在关联:

$$Q_d = \frac{1}{\tan \delta} = \frac{\epsilon'}{\epsilon''} \quad (2)$$

式中: $\tan \delta$ 为介质基板的损耗角正切, ϵ' 和 ϵ'' 分别为介质基板的介电常数实部和虚部。

当传感器处于空载状态时, 馈入的电磁能量大部分储存在腔体中, 其谐振频率由式 (1) 确定; 当传感器处于加载状态时, 馈入功率经由待测物与测量区域的界面辐射, 待测物介电常数的实部影响了传感器谐振器的边界条件, 改变了谐振频率。另一方面, 在测量待测物时, 传感器辐射功率的大小还受待测物等效介电常数的虚部的影响, 具体表现为谐振器品质因数的变化。因此, 通过测量传感器谐振频率和品质因数的变化, 就可以获得待测物的复介电特性。

当金属化过孔紧密排布时, 等效为理想金属壁。而本文提出的传感器终端采用稀疏排布, 引入了电磁辐射。通过在末端相邻金属化过孔处开设四分之一波长的缝隙槽, 实现了阻抗匹配, 并增加了测量面积。

1.2 传感器仿真设计与测试

本文提出的 SIW 传感器结构如图 1 所示。介质基板采用 F4B-2, 相对介电常数 ϵ_r 为 2.65, 厚度为 1 mm。由金属化过孔形成的谐振腔尺寸为 $L=51.6$ mm, $W=20$ mm。为保证除终端外的金属化过孔等效为理想金属壁, 过孔直径 $D=0.6$ mm, 过孔间距 $S=1.2$ mm。馈线部分通过耦合馈电, 微带线采用渐变设计实现阻抗匹配, $W_1=2.7$ mm, $L_{\text{tapper}}=5$ mm, $W_2=0.8$ mm, $L_c=12.9$ mm, $W_3=0.4$ mm, $W_4=0.2$ mm, $L_{\text{slot}}=13.75$ mm, $W_5=4$ mm。

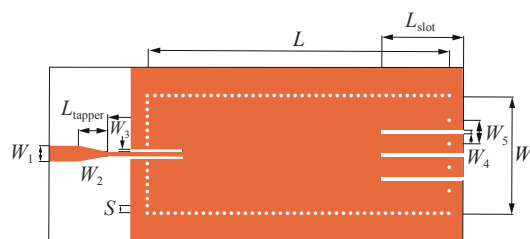


图1 模型结构示意图

传感器工作频率为 5.76 GHz, 通过仿真优化其馈线与末端缝隙尺寸, 改善了传感器的功率馈入情况, 提高了传感器对复介电常数变化的灵敏度。传感器实物如图 2 所示。该传感器与待测溶

液接触部分为末端稀疏金属化过孔和末端缝隙。

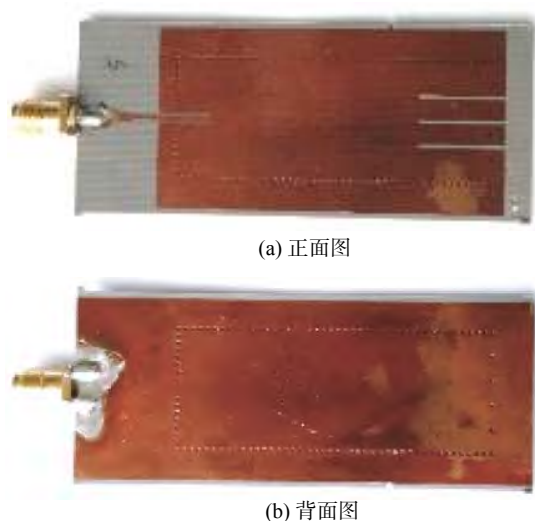


图2 传感器实物

在搭建测量系统后,首先对传感器空载情况进行测量,得到空载下的散射参数如图3所示。表1为空载传感器谐振频率与品质因数的测量和仿真结果对比,实测值与理论值基本吻合。

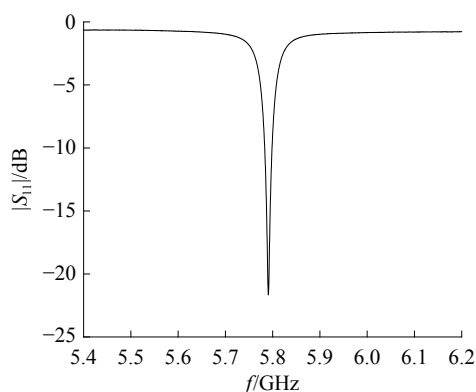


图3 传感器空载下散射参数

表1 实测与仿真下的谐振频率和空载品质因数

对比方案	谐振频率 f_0 /GHz	空载品质因数 Q_u
理论仿真	5.740	294.7
实际测量	5.766	272.0

然后以无水乙醇和水的混合溶液作为待测物,通过矢量网络测量其 S 参数变化,进行实验验证。在液体介电常数测量中,将传感器固定高度后,插入300 mL待测溶液。静置一段时间后,测量不同浓度溶液对应的 S 参数。在固定溶液体积情况下,以10%为步进,乙醇浓度从0~100%变化,一共测量了11组溶液。利用矢量网络分析仪测得到 S 参数。测试系统实物如图4所示。



图4 测试系统

2 溶液复介电常数反演

测量的每一组 S 参数都可以得到传感器的谐振频率和空载品质因数。然后就可以反演获得混合溶液的复介电常数。由于复介电常数与谐振频率、空载品质因数的关系复杂,本文采用神经网络通过谐振频率、空载品质因数反演溶液的复介电常数。

人工神经网络作为一种模拟人脑神经元进行信息数据处理的运算模型,由大量神经元节点组成。BP神经网络由输入层、隐藏层和输出层构成,是运用最广泛的一种人工神经网络模型,能够处理多输入多输出的映射关系^[13]。本文采用BP神经网络构建谐振频率和空载品质因数与复介电常数之间的映射关系,完成对待测物复介电常数的反演。

首先训练网络,计算不同浓度下的无水乙醇和水的二元混合溶液的复介电常数^[14],其拟合公式为

$$\varepsilon^* = \varepsilon_{\infty j} + \sum_{j=1}^n \frac{\varepsilon_{0j} - \varepsilon_{\infty j}}{1 + (j\omega\tau_j)^{\beta_j}}$$

式中: n 为拟合项数; $\varepsilon_{\infty j}$ 和 ε_{0j} 分别为第 j 项拟合时的介电常数高频和低频值; τ_j 为相应的介电弛豫时间; ω 为角频率; α_j 和 β_j 分别为弛豫时间不对称和对称分布时的形状参数, $\alpha_j > 0$, $\beta_j \leq 1$ 。其中, $\varepsilon_{\infty j}$ 与浓度有关,定义为

$$\varepsilon_{\infty j} = X\varepsilon_{\infty j}^{\text{water}} + (1 - X)\varepsilon_{\infty j}^{\text{ethanol}}$$

式中 $X=A/(A+B)$, A 和 B 分别为混合溶液中的乙醇和水的物质的量。

浓度变化区间为0~100%,将实部和虚部理论值作为训练网络的输出,然后在仿真软件中模拟实测环境,得到不同浓度对应的 S 参数。结合品质因数提取算法,得到谐振频率和空载品质因数^[15],以此作为训练网络的输入。经过不断调整优化神经元数、激励函数与层数,最终得到训练误差收

敛的人工神经网络。测量得到不同液体浓度下传感器的 S 参数如图 5 所示, 谐振频率和品质因数均随液体浓度发生变化。

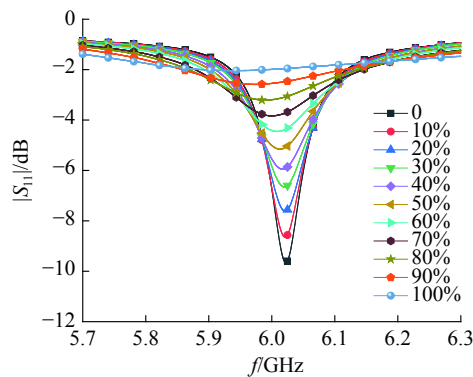


图5 加载不同浓度溶液时传感器的 S 参数

将传感器插入 11 组不同浓度的溶液中, 测得相应的 S 参数。将数据处理得到的谐振频率与空载品质因数导入训练好的网络中进行反演, 输出得到相应的复介电常数反演值。溶液复介电常数理论与反演值对比曲线如图 6 所示。从图 6 中可以看出, 传感器加载低浓度时, 反演值和理论值误差较小。总的来说, 该传感器测量效果符合预期, 实现了对溶液复介电常数的测量。

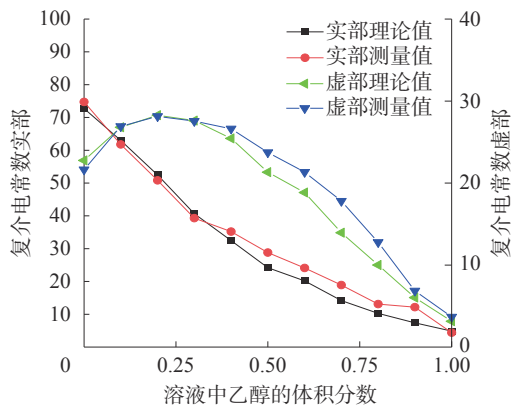


图6 溶液复介电常数理论值与实测反演值对比

相较于传统的基片集成波导复介电常数测量传感器, 该结构的传感器具有测量便捷、便于加工等特点, 终端开路结构也不局限于矩形波导形式。本设计成功验证了该结构对复介电常数测量可行性。C 波段不同传感器相对误差对比如表 2 所示。

表2 介电常数相对误差对比

文献	实部/%	虚部/%
[5]	5.00	7.00
[8]	2.15	2.65
本文	3.45	2.79

3 结论

本文提出一种基于 SIW 的终端开放式传感器结构。

1) 该传感器工作在 5.76 GHz 频率下, 结构新颖、加工测试便捷, 测试效果与仿真设计吻合。

2) 在高损耗溶液的测试过程中, 谐振效果明显, 测试效果良好, 具有一定的应用前景。

3) 成功利用 BP 神经网络对待测物的复介电常数进行反演, 极大提升了测试效率, 降低了人工成本。

本传感器整体结构简单、体积小, 可应用于实际生产中。后续将研究终端稀疏过孔分布以及开缝结构的设计规律, 进一步优化测试精准度, 提高测量效率与灵敏度。

参考文献:

- [1] 金钦汉, 戴树珊, 黄卡玛. 微波化学 [M]. 北京: 科学出版社, 1999
- [2] GONON P, BOURDELAIS S, LESAIN O, et al. Effects of hydrothermal aging on the dielectric properties of epoxy composites[C]//Proceedings of the 7th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials. Nagoya, Japan, 2003: 936-939.
- [3] 吴秉琪, 刘长军. 一种测量微波介质基板复介电常数的方法 [J]. 应用科技, 2018, 45(4): 100-103.
- [4] LIU Changjun, PU Yang. A microstrip resonator with slotted ground plane for complex permittivity measurements of liquids[J]. IEEE microwave and wireless components letters, 2008, 18(4): 257-259.
- [5] LIU Changjun, TONG Fan. An SIW resonator sensor for liquid permittivity measurements at C band[J]. IEEE microwave and wireless components letters, 2015, 25(11): 751-753.
- [6] WU Yiwu, HAO Zhangcheng, TAO Mingcui, et al. Extracting extremely wideband complex dielectric permittivity and effective conductivity by using one pair of SIW circular cavities[C]//Proceedings of the IEEE MTT-S International Wireless Symposium. Chengdu, China: IEEE, 2018.
- [7] PENG Xiaomiao, LI Yixin, YAN Jinkui. A novel CSRR-loaded high-sensitivity SIW resonator for measuring permittivity of materials[C]//Proceedings of the 11th UK-Europe-China Workshop on Millimeter Waves and Terahertz Technologies. Hangzhou, China: IEEE, 2018.
- [8] 龙卓, 刘长军. 一种双频基片集成波导介电常数测试系统 [J]. 应用科技, 2019, 46(3): 21-24.
- [9] DESLANDES D, WU Ke. Integrated microstrip and rectangular waveguide in planar form[J]. IEEE microwave

- and wireless components letters, 2001, 11(2): 68–70.
- [10] WU Ke, BOONE F. Guided-wave properties of synthesized nonradiative dielectric waveguide for substrate integrated circuits (SICs)[C]//Proceedings of the IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. Phoenix, USA, 2001.
- [11] POZAR D M. 微波工程 [M]. 张肇仪, 周乐柱, 吴德明, 等, 译. 北京: 电子工业出版社, 2006: 238–242, 256–261
- [12] XU Feng, WU Ke. Guided-wave and leakage characteristics of substrate integrated waveguide[J]. *IEEE transactions on microwave theory and techniques*, 2005, 53(1): 66–73.
- [13] MKADEM F, BOUMAIZA S. Physically inspired neural network model for RF power amplifier behavioral modeling and digital predistortion[J]. *IEEE transactions on microwave theory and techniques*, 2011, 59(4): 913–923.
- [14] SATO T, CHIBA A, NOZAKI R. Composition-dependent dynamical structures of monohydric alcohol-water mixtures studied by microwave dielectric analysis[J]. *Journal of molecular liquids*, 2002, 96-97: 327–339.
- [15] KAJFEZ D. Random and systematic uncertainties of reflection-type Q-factor measurement with network analyzer[J]. *IEEE transactions on microwave theory and techniques*, 2003, 51(2): 512–519.

本文引用格式:

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.

LIAO Chongwei, JIANG Longkai, QU Qiang, et al. A complex permittivity measuring sensor based on the SIW terminal loading structure[J]. *Applied science and technology*, 2021, 48(6): 13–17.

(上接第12页)

参考文献:

- [1] 柳卫东, 陈兵. 新造船能效设计指数及其对船舶设计的影响 [J]. *船舶工程*, 2010, 32(2): 17–21.
- [2] 严新平. 新能源在船舶上的应用进展及展望 [J]. *船海工程*, 2010, 39(6): 111–115, 120.
- [3] 张益敏, 陈俐, 朱剑响. 混合动力船舶动力装置及能量管理研究综述 [J]. *舰船科学技术*, 2018, 40(3): 1–7.
- [4] 刘佳彬, 赵同宾, 邱爱华, 等. 船舶柴电混合动力系统 Booster 模式下的“柴-电”方式并车控制技术研究 [J]. *舰船科学技术*, 2016, 38(S1): 123–126.
- [5] ZHU Jianyun, CHEN Li, WANG Bin, et al. Optimal design of a hybrid electric propulsive system for an anchor handling tug supply vessel[J]. *Applied energy*, 2018, 226: 423–436.
- [6] 徐达, 吕行, 焦文健, 等. 电力推进船舶柴电混合动力系统的研究与分析 [J]. *内燃机与配件*, 2020(10): 82–84.
- [7] KALIKATZARAKIS M, GEERTSMA R D, BOONEN E J, et al. Ship energy management for hybrid propulsion and power supply with shore charging[J]. *Control engineering practice*, 2018, 76: 133–154.
- [8] 卢耀文. 船舶并联式气电混合动力系统能量管理与节能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019.
- [9] 王鑫. 船舶气电混合动力推进系统能量效率分析 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2018.
- [10] 中国船级社. 内河绿色船舶规范 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2020.
- [11] 中国船级社. 绿色生态船舶规范 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2020.
- [12] 中国船级社. 混合动力船舶检验指南 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2019.

本文引用格式:

阳子轩, 王志芳. 船舶清洁能源应用比例计算方法 [J]. 应用科技, 2021, 48(6): 8–12, 17.

YANG Zixuan, WANG Zhifang. The calculation method of the proportion of clean energy on ships[J]. *Applied science and technology*, 2021, 48(6): 8–12, 17.