

DOI: 10.11991/ykj.202008012

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1191.U.20210413.1729.012.html>

一种介质集成悬置线结构的介电常数测量装置

马奎, 刘长军, 陈倩

四川大学电子信息学院, 四川成都 610064

摘要: 为进一步提高介质复介电常数测量精度和范围, 本文提出了一种工作于 C 波段的基于介质集成悬置线(SISL)结构的复介电常数测量装置。该装置具有小巧精致、成本低、精度高和适用范围广等特点, 探头由部分镂空的 5 层介质板黏合而成的谐振腔、测量加载缝和馈电耦合 3 部分构成, 工作的基本原理是通过上盖板面缝隙引入待测样品带来的腔内电磁场分布扰动, 从而得到频率和品质因数(Q 值)的变化, 并使用仿真数据训练过的人工神经网络(ANN)对上述变化量进行反演, 得到待测介质节点常数数值。在水-乙醇二元混合溶液的实验中, 结果与理论数值实部误差 3.75%, 虚部误差 1.75%, 具有较高的测量精度。

关键词: 介质集成悬置线; 人工神经网络; 复介电常数; 混合溶液; 微波测量; 谐振频率; 品质因数; 谐振腔

中图分类号: TN98

文献标志码: A

文章编号: 1009-671X(2021)04-0029-05

A permittivity measurement device using substrate integrated suspended line

MA Kui, LIU Changjun, CHEN Qian

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

Abstract: In order to further improve the precision and range of the complex permittivity measurement, a permittivity measurement device based on substrate integrated suspended line(SISL) at C-band is proposed, which is characterized by small size, low cost, high measurement accuracy and wide application range. The probe is composed of a resonant cavity, which is bonded by a five-layer partially hollowed substrate, a feed coupling structure and a testing slot. The electromagnetic field distribution inside the cavity will be slightly changed when a sample under test is placed above the slot, which will cause the shift of resonant frequency and the variation of quality factor Q . An artificial neural network(ANN) trained by simulation data is used to obtain the complex permittivity of the object under test. The measured results of a water-ethanol binary mixture solution show that the average relative errors of the real and imaginary parts of the complex permittivities were 3.75% and 1.75%, respectively, proving high measuring precision of the the sensor.

Keywords: substrate integrated suspended line; artificial neural network; complex permittivity; microwave measurement; mixed liquid; resonant frequency; quality factor; resonant cavity

作为表征介质电极化性能的重要电磁学参量, 复介电常数一直是国内外学者研究的一个重要方向^[1-2]。在工程应用中, 准确、高精度、快速实时地对介电常数进行测量具有重要意义^[3]。目前通常通过间接测量物体介电常数改变引起的测量系统其他参数, 如传播常数、品质因数、频率偏移

和相位衰减等^[4-5]变化来达到测量目的。其中基于平面传输结构的谐振法测量装置^[6-7]结构简洁, 应用广泛。文献 [8] 提到一种利用微带线谐振法测量液体 S 波段复介电常数的方法, 使用了牛顿迭代法对数据进行反演, 介电常数实部和虚部相对误差分别为 4.4% 和 8.6%。文献 [9] 提出一种利用矩形基片集成波导谐振腔测量液体复介电常数的方法, 使用人工神经网络进行反演, 实部和虚部相对误差分别为 5% 和 7%。文献 [10] 提出了一种使用基片集成波导构成的双频测量装置, 通过 2 个级联的谐振器, 能够在双频点进行测量。

谐振法测量介电常数时, 装置的衰减情况通

收稿日期: 2020-08-23. 网络出版日期: 2021-04-14.

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

作者简介: 马奎, 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.

常是制约测量性能和精度的最重要因素。在面对高损耗待测介质时,谐振状态往往不易保持。本文提出了一种使用介质集成悬置线(SISL)的复介电常数测量装置,通过使用封闭结构形成谐振腔,减少了损耗,提高了品质因数和介电常数测量的精度及适用范围。待测样品通过谐振腔表面的缝隙间接影响空腔内谐振的频率和 Q 值,使用神经网络对测量数据进行求解。

1 测量装置的原理分析及设计

传统的微带悬置线由于其出色的传输性能和功率容量在滤波器、功分器^[11-12]等器件设计上具有很好的适用性,然而其体积结构笨重、难以与其他电路集成的劣势同样突出。2007年 Ma 等^[13]提出了一种新的介质集成悬置线改良结构,有效地避免了悬置线尺寸上的劣势,同时保留了其良好的传输性能,并具有很高的集成度。目前基于这种新型结构的微波电路得到了国内外的广泛关注^[14-15]。典型的 SISL 物理结构如图 1 所示,由 5 层印刷电路板及电路板上下印制铜板(金属层 1—金属层 10)构成,四周采用金属过孔作电壁。电路设计主要在第 3 层的金属层 5 和金属层 6 这 2 个表面上,这使得 SISL 与其他常见的微带以及共面波导(coplanar waveguide, CPW)等平面电路一样,易于集成。针对这种新型传输线的性能优势,使用有限元数值计算方法对几种主要传输线的衰减情况进行了仿真,图 2 为多种传输线在特征阻抗为 50Ω 时的衰减常数对比。由图 2 可以看到在同等条件下,悬置线的衰减常数比金属波导略高,这一定程度上证明了 SISL 结构具有优秀的传输性能。

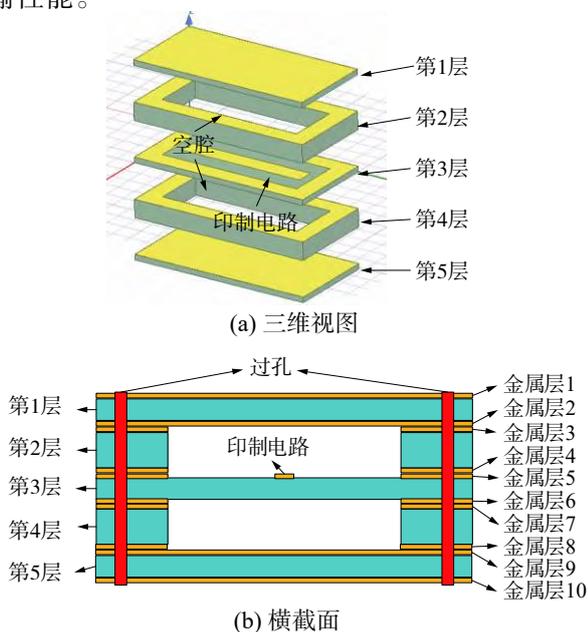


图1 介质集成悬置线结构

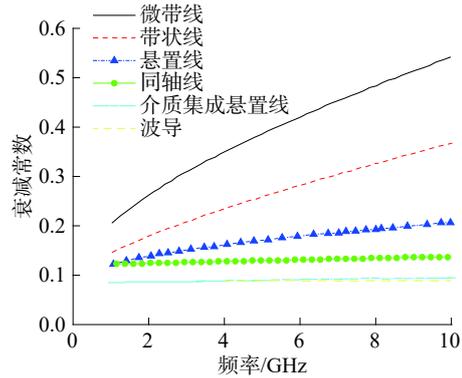


图2 SISL 与多种传输线衰减对比

本文基于谐振法测介电常数的原理,使用 SISL 结构,根据其结构特点设计了一款工作于 5.8 GHz 的悬置线谐振器。设计结构共 5 层,第 1、3、5 层介质板为 1 mm 厚度的 F4B 材质,相对介电常数为 2.2;第 2、4 层为中间正方形镂空的 FR-4 介质板,厚度为 1.6 mm,相对介电常数为 4.3;中间镂空区域长度为 25 mm,宽度为 11 mm;谐振金属导带位于金属层 5,宽度为 3 mm;四周金属通孔的直径为 1 mm,彼此间隔 2 mm。

当谐振器工作在谐振状态时,其电磁场分布于内部空腔和第 3 层介质板中,与外界几乎隔离。此时电磁场存在的空间可以看作被等效介电常数为 ϵ_c 的均匀介质填充,容易得出 ϵ_c 的大小介于空气和第 3 层介质板介电常数之间,且与介质板所占空间的比例直接相关。结构整体厚度不变的情况下,介质板的厚度越薄, ϵ_c 的值越接近 1,电磁波在内部的介质损耗越小。此时 SISL 的等效介电常数和特征阻抗计算可以视作与传统悬置线相同。根据导带宽度与空腔尺寸比值的不同,大致可以分为宽导带和窄导带 2 种情况。文献 [16] 给出了不同尺寸和介电常数环境下的多种计算方法,可以方便地计算任意情况下的 ϵ_c 和特征阻抗。

本设计中谐振金属导带可以看作是四周增加金属屏蔽罩的微带线,其长度遵循终端开路的半波长微带谐振器设计方法,长度 l 为

$$l = \frac{c}{2f_0 \sqrt{\epsilon_c}} - \Delta L \tag{1}$$

式中: c 为真空中光速, f_0 为谐振频率, ΔL 为导带与边框和地之间的耦合效应造成的长度缩减。

谐振器的 Q 值与电磁场的衰减有关,本结构中的衰减来源包括内部空腔上下金属壁上的导体损耗、金属化通孔之间的辐射损耗、谐振金属导带上的导体损耗和空腔内的介质损耗。其中辐射损耗极小,可以忽略。结构的空载品质因数为

$$\frac{1}{Q_u} = \frac{1}{Q_c} + \frac{1}{Q_d} \quad (2)$$

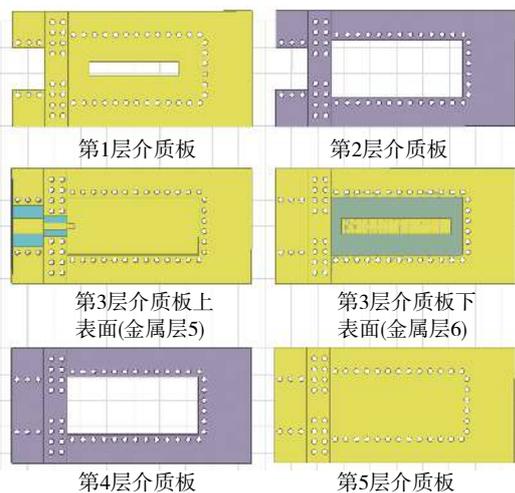
式中 Q_u 、 Q_c 和 Q_d 分别代表空载品质因数、无介质损耗和无导体损耗时的品质因数。

Q_d 与损耗正切的关系有

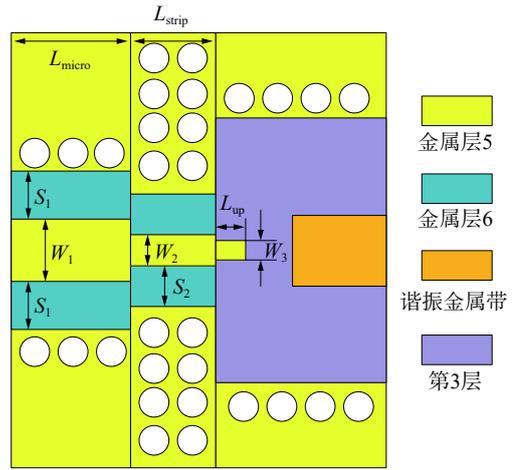
$$Q_d = \frac{\epsilon'}{\epsilon''} = \frac{1}{\tan \delta}$$

实际测量时, 在谐振器第 1 层介质层上下金属层对应位置开缝, 用于引入不同待测样品对空腔内电磁场的微扰, 从而改变谐振器的谐振频率和品质因数^[17], 可以认为只有介质损耗情况会发生变化。此时, 待测样品的引入可以看作改变了空腔中等效介电常数 ϵ_c 。这将使空腔内部的介质损耗情况发生变化, 从而改变式 (2) 中 Q_d 和 Q_u 的值; 同时根据式 (1), ϵ_c 的变化将使谐振频率变化。

图 3 为所设计耦合器各层介质板的结构。第 1 层介质板上下对应位置开有细缝, 缝隙宽度为 2.5 mm, 长度为 17 mm, 位于空腔上方正中央。设计的 SISL 谐振器通过一个微带线—带状线—悬置线的 3 级过渡结构与外部 50 Ω 的同轴馈电接口连接, 谐振金属导带则通过缝隙耦合的方式进行激励。微带线、带状线和悬置线均位于第 3 层介质板的上表面, 即金属层 5。金属层 6 作为微带线和带状线的公共地, 谐振金属导带也位于这一层。为使每个部分连接处不出现反射, 各个部分的设计阻抗均应为 50 Ω, 故微带线宽 W_1 为 3 mm, 带状线宽度 W_2 为 1.4 mm; 微带线 L_{micro} 和带状线 L_{strip} 长度分别为 6 mm 和 4.5 mm; 同时微带线与地间隙 S_1 为 2.5 mm, 带状线与地间隙 S_2 为 1.2 mm。悬置线宽度与缝隙耦合系数有关, 根据计算机仿真结果选取宽度 W_3 为 1.1 mm, 长度 L_{up} 为 1.2 mm。由式 (1) 和仿真优化, 选取谐振金属导带尺寸为 21 mm×3 mm。



(a) 谐振器各层介质板俯视图

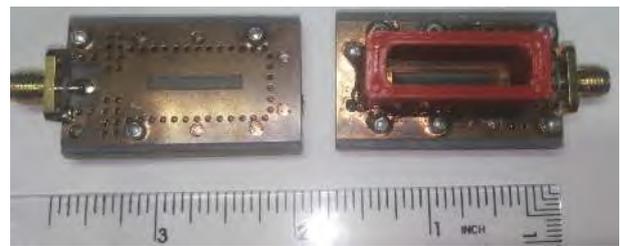


(b) 馈电过渡结构

图 3 介质板结构

2 测量与反演结果

实验中, 使用了去离子水-乙醇混合溶液作为待测样品, 使用 Agilent N5230A 矢量网络分析仪连接测量探头进行测量。为固定加载的待测样品, 避免其接触到缝隙外的其他介质而造成测量结果不准的问题, 使用 3D 打印机制作了一个矩形方框粘贴在表面缝隙上方, 以保证待测物固定于电场最强处, 图 4 为测量探头实物。根据理论分析和实验证明, 附加矩形方框对结构的谐振状态几乎没有影响。



(a) 不带载物槽的加工样品

(b) 带载物槽

图 4 测量探头实物

表 1 为实测空气中探测器和经校准后仿真的谐振频率和 Q 值对比。由表 1 可以看到, 仿真和实测的频率结果基本一致。

表 1 实测和仿真数据对比。

| 方案对比 | f_0/GHz | Q 值 | 耦合系数 k |
|------|------------------|--------|----------|
| 实测 | 5 807.56 | 638.65 | 0.769 8 |
| 仿真 | 5 807.78 | 638.08 | 0.754 8 |

乙醇-水混合溶液具有介电常数变化范围大、无毒害和方便配置等特点。在 30 °C 左右的室温下, 依照乙醇体积分数 (0~100%) 等比例增长和等溶剂量增长 (0:50, 10:50, 20:50, 30:50, 40:50, 50:50,

50:40, 50:30, 50:20, 50:10, 50:0) 的方式, 配置了 11 份不同体积分数的乙醇-水混合溶液。依次将配置好的溶液加入探测器矩形方框中, 使用矢网在 5.75~5.85 GHz 对探测器 S 参数进行测量, 并记录稳定读数用以计算谐振频率和 Q 值。探头 2 次测量不同乙醇体积分数对应的频率偏移量和 Q 值变化如图 5 所示。由图 5 可以看出, 随着体积分数的提高, 频率偏移量不断下降, 而品质因数不断上升。2 次测量的结果前后基本一致。

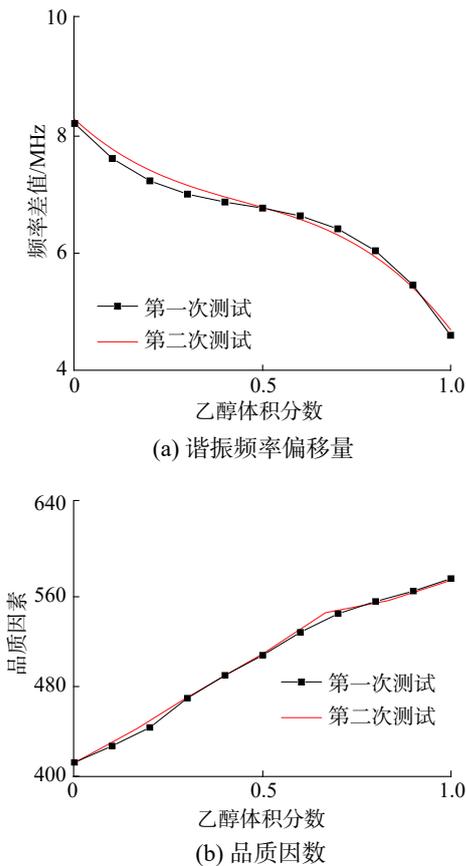


图5 测量结果随乙醇体积分数增加的变化曲线

由于待测物介电常数 ϵ 与腔体的谐振频率和品质因数的关系很难直接求解, 本文利用 BP 神经网络反演系统作为数据关系重构工具。人工神经网络模拟生物大脑的作用机理, 使用神经元模型作为其基本组成单位, 多个神经元使用不同的权值相互连接, 能够使整个系统对复杂问题做出精确的判断和分析。神经网络的训练过程实际上就是这些权值的求解过程。

使用神经网络反演需要训练和计算 2 个阶段, 针对本文的具体情况, 按照以下步骤进行。

1) 对加载若干组不同复介电常数测量物的模型进行仿真计算, 从计算出的 S 参数中得到相应的谐振频率和 Q 值。

2) 将频率相对空气加载时的偏移量和 Q 值作

为神经网络的输入层数据, 介电常数实部和虚部作为输出层数据, 开始训练并根据情况不断调整神经网络的神经元个数和学习率, 保存收敛后的神经网络。

3) 使用测量得到的相对频率和 Q 值输入到训练好的网络中, 即可得到待测样品的介电常数。

按照上述步骤, 绘制了神经网络反演得到的介电常数实部和虚部随乙醇体积分数的走势, 以及与理论值的对比^[18], 如图 6 所示。测量后的实部平均误差为 3.75%, 虚部平均误差为 1.29%, 与理论值吻合良好, 结果准确。

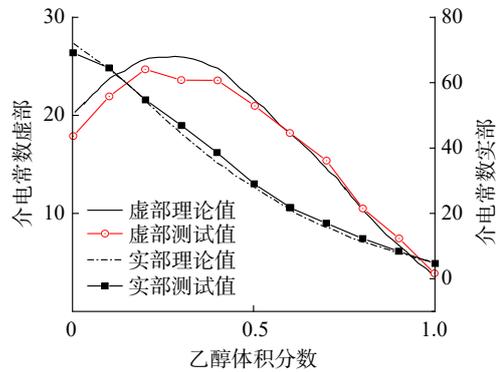


图6 混合溶液等效复介电常数实测和理论值

3 结论

1) 本文设计了一种工作于 5.8 GHz 的高 Q 值新型介电常数测量结构, 经过加工测量, 计算机仿真和实测结果吻合良好。

2) 装置在对乙醇-水二元混合溶液的精确实验中表现良好, 测量结果与理论平均误差实部为 3.75%, 虚部为 1.29%, 特别是在对高损耗介质的测量上, 其谐振现象依旧十分明显, 为测量提供了高准确度依据。

3) 通过使用人工神经网络对测量数据进行预测, 为介电常数的计算提供了很大的便捷性。

本装置相比于其他同类设计, 在结构上具有一定的优势, 极大地减少了外部干扰和辐射损耗, 提供了更高的品质因数和测量精度。同时整个测量装置尺寸小巧, 仅为 22 mm×42 mm, 便于携带, 易于加工, 具有一定的应用前景。

参考文献:

[1] 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 (Cat. No.03CH37417). Nagoya, Japan: IEEE,

- 2003: 936-939.
- [2] 位宇, 陈潇杰, 刘臻龙, 等. 两路 15 kW 连续波微波磁控管相干功率合成技术 [J]. *应用科技*, 2018, 45(2): 34-37.
- [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] ROBERTS S, VON HIPPEL A. A new method for measuring dielectric constant and loss in the range of centimeter waves[J]. *Journal of applied physics*, 1946, 17(7): 610-616.
- [5] HOSHINA S, KANAI Y, MIYAKAWA M, et al. A numerical study on the measurement region of an open-ended coaxial probe used for complex permittivity measurement[J]. *IEEE transactions on Magnetics*, 2001, 37(5): 3311-3314.
- [6] WALDRON I, MAKAROV S N, BIEDERMAN S, et al. Suspended ring resonator for dielectric constant measurement of foams[J]. *IEEE microwave and wireless components letters*, 2006, 16(9): 496-498.
- [7] VERMA A K, NASIMUDDIN, OMAR A S. Microstrip resonator sensors for determination of complex permittivity of materials in sheet, liquid and paste forms[J]. *IEEE proceedings-microwaves, antennas and propagation*, 2005, 152(1): 47-54.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] XU Zhaoxu, YU Xi, LIU Jiaqi, et al. Suspended stripline low-loss bandpass filter with four transmission zeros[J]. *Electronics letters*, 2015, 51(25): 2121-2123.
- [12] MENZEL W, BALALEM A. Quasi-lumped suspended stripline filters and diplexers[J]. *IEEE transactions on microwave theory and techniques*, 2005, 53(10): 3230-3237.
- [13] MA Kaixue, CHAN K T. Quasi-planar circuits with air cavities US, WO2007149046A1[P]. 2007-12-27.
- [14] MA Zonglin, MA Kaixue, MOU Shouxian. An ultra-wide stopband self-packaged quasi-lumped-element low pass filter based on substrate integrated suspended line technology[C]//Proceedings of 2017 IEEE MTT-S International Microwave Symposium. Honolulu, USA: IEEE, 2017: 1084-1087.
- [15] HE Yun, MA Kaixue, YAN Ningning, et al. A cavity-backed endfire dipole antenna array using substrate-integrated suspended line technology for 24 GHz band applications[J]. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 2018, 66(9): 4678-4686.
- [16] LEHTOVUORI A, COSTA L. Model for shielded suspended substrate microstrip line, CT-38[R]. Espoo: Helsinki University of Technology, 1998.
- [17] POZAR D M. 微波工程 [M]. 张肇仪, 周乐柱, 吴德明, 等, 译. 3 版. 北京: 电子工业出版社, 2006: 238-242, 256-261.
- [18] SATO T, CHIBA A, NOZAKI R. Dynamical aspects of mixing schemes in ethanol-water mixtures in terms of the excess partial molar activation free energy, enthalpy, and entropy of the dielectric relaxation process[J]. *The journal of chemical physics*, 1999, 110(5): 2508-2521.

本文引用格式:

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.

MA Kui, LIU Changjun, CHEN Qian. A permittivity measurement device using substrate integrated suspended line[J]. *Applied science and technology*, 2021, 48(4): 29-33.