

固体电介质微波介电参数的耦合器测量技术

刘伟娜,詹华伟

(河南师范大学 物理与电子工程学院,河南 新乡 453007)

摘要:论述了微带分支线耦合器非破坏性测量固体电介质复介电常数的方法,阐明了3 dB分支线耦合器用于介电常数测量的原理,提出的分支线耦合器的输出与耦合端口各连接一段终端开路的微带线,待测物放在其中的一条线上。待测物的介电常数可通过测量两端口的散射参数的幅度进行计算。运用提出的方法,在2.45 GHz下测量了特氟龙、聚丙烯等固体电介质的复介电常数,其结果与文献相吻合。

关键词:介电常数;分支线耦合器;固体电介质;微波测量;非破坏性测量

中图分类号:TM931 **文献标识码:**A

A Technique for Measuring Microwave Dielectric Parameters of Solid Dielectric Based on a Coupler

LIU Weina, ZHAN Huawei

(School of Physics and Electronics Engineering, Henan Normal University, Xingxiang 453007, China)

Abstract: A method for non-destructively measuring the complex permittivity of solid dielectric on a microwave branch coupler has been described in this paper. The principle of measuring the dielectric constant by using 3 dB branch coupler was illustrated. The device consists of a planar hybrid junction with the direct and coupled ports terminated by two identical open-ended transmission lines; one being loaded with the material under test (MUT). The complex permittivity of the MUT was evaluated by simply measuring the amplitudes of the reflected and the transmitted signals of the measuring device. The complex permittivity of the solid dielectric such as Teflon and Polypropylene has been measured at 2.45 GHz by using the proposed method. The results are agreed with that reported on the literatures.

Key words: permittivity; branch coupler; solid dielectric; microwave measurement; non-destructive measurement

0 引言

随着介质材料在通信、雷达、电磁兼容及微波化学等领域内的应用范围的不断扩大,材料的介电常数测量也越来越受到人们的关注^[1-2]。近年来,由于测试设备和测量方法的不断改进,材料的复介电常数测量更是提出了无损、快速及准确的测量要求^[2]。传统的介电常数测量方法主要有谐振法^[3]、传输/反射法^[4]、自由空间法等,在这些测量方法中,一般都要求对被测材料加工(破坏待测材料)且设备复杂。因此,本文提出了一种新型测量技术,该技术以一简单的平面装置为测量器件,通过测量到的散射参数的幅度最终实现材料介电常数的计算。

1 平面装置

图1为提出的测量装置的电路原理图,该平面结构主要包括一个3 dB分支线耦合器(正交混合连接器)^[5],其两个输出端口各端接一段终端开路的传输线,待测物将放置在其中的一段传输线上。因此该器件是两端口网络。

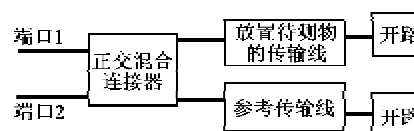


图1 电路原理图

本文通过测量不放置任何测量物(空载)及放置待测物(负载)两种情况下的两端口散射参数的幅度

收稿日期:2013-03-03

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61001019)

作者简介:刘伟娜(1979-),女,河南汝州人,讲师,博士生,主要从事介电常数测量的研究。E-mail:ln168168@sina.com。詹华伟(1979-),男,河南汝南人,副教授,主要从事通信技术的研究。

来计算被测材料的介电常数^[6], 其微带结构的测量装置如图 2 所示。图中, d 为待测物的长度。

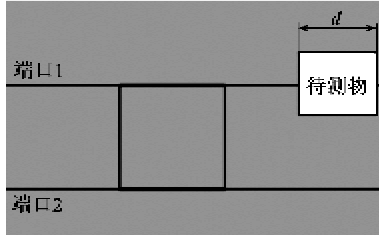


图 2 微带结构的测量装置

2 测量方法

信号从端口 1 输入, 由于两个输出端口开路, 且放置的材料不同, 因此两条支路上反射的信号不同。通过测量端口 1、2 的散射参数的幅度可计算出待测物的介电常数。该计算过程不需要任何的相位信息。其端口 1、2 的散射参数的幅度为

$$|S_{11}| = \frac{1}{4}(1 + T^2 e^{-4\alpha d} - 2Te^{-2\alpha d} \cos \varphi) \quad (1)$$

$$|S_{21}| = \frac{1}{4}(1 + T^2 e^{-4\alpha d} - 2Te^{-2\alpha d} \cos \varphi) \quad (2)$$

式中 φ, α, T 为放上待测物后相对于空载情况下引起的相移、衰减常数及传输系数。式(1)、(2)是在忽略装置的有限电导率及分支线耦合器与终端开路的微带线的失配引起的损耗的情况下得出的。则空载及负载情况下的散射参数的幅度间的关系为

$$|S_{11-负载}| = \frac{|S_{21-空载}|}{4}(1 + T^2 e^{-4\alpha d} - 2Te^{-2\alpha d} \cos \varphi) \quad (3)$$

$$|S_{21-负载}| = \frac{|S_{21-空载}|}{4}(1 + T^2 e^{-4\alpha d} + 2Te^{-2\alpha d} \cos \varphi) \quad (4)$$

其中

$$\varphi = \varphi_{负载} - \varphi_{空载} = \frac{\omega d}{c}(\sqrt{\epsilon_{空载-等效}} - \sqrt{\epsilon_{负载-等效}}) \quad (5)$$

$$T = \frac{4\sqrt{\epsilon_{空载-等效}\epsilon_{负载-等效}}}{(\sqrt{\epsilon_{空载-等效}} + \sqrt{\epsilon_{负载-等效}})^2} \quad (6)$$

$$\alpha = \alpha_{负载} - \alpha_{空载} = \alpha_{负载} - \left(\frac{273}{\lambda_0} \sqrt{\epsilon_{R-介质板}} \tan \delta_{介质板}\right) \quad (7)$$

式中: $\epsilon_{空载-等效}, \epsilon_{负载-等效}$ 分别为不放置任何材料和放上待测物后微带线的等效介电常数; $\tan \delta_{介质板}$ 为介质板的损耗角正切; c, λ_0 分别为自由空间中的光速和波长。从式(3)~(7)可求出 $\epsilon_{负载-等效}$ 和 $\alpha_{负载}$ 。

在考虑待测物有限厚度下, 其待测物的相对介电常数 $\epsilon_{R-待测物}$ 及损耗角正切 $\tan \delta_{待测物}$ 可由下式得出, 即

$$\alpha_{负载} = \left[\frac{\epsilon_{空载-等效} - 1}{\epsilon_{R-待测物} - 1} \times \epsilon_{R-介质板} \tan \delta_{介质板} + \tan \delta_{待测物} \times \frac{\epsilon_{负载-等效} - \epsilon_{空载-等效}}{\epsilon_{R-待测物} - 1} \right] \times \frac{273}{\lambda_0 \sqrt{\epsilon_{负载-等效}}} \quad (8)$$

$$\epsilon_{负载-等效} = [q_1 \epsilon_{R-待测物} + q_2 \epsilon_{R-介质板} + (1 - q_1 - q_2)] \quad (9)$$

式中: $\epsilon_{R-介质板}$ 为介质板的介电常数; $\epsilon_{R-负载}$ 为待测物的相对介电常数; q_1, q_2 为负载与空载两种情况下微带结构的介电填充因子。从式(3)~(7)可求出 $\epsilon_{负载-等效}$ 和 $\alpha_{负载}$, 最终通过式(8)、(9)求出 $\epsilon_{R-负载}$ ^[7]。

3 待测材料介电常数的计算

根据上述原理, 本文运用高频仿真软件 HFSS 对所提出的测量装置进行仿真, 其测试频率取决于 3 dB 分支线耦合器的工作频率, 本文设计的平面测量装置的工作频率为 2.45 GHz, 其空载情况下的仿真结果如图 3 所示, 由图可知, 在设计频点 2.45 GHz, S_{21} 低至 -38 dB, S_{11} 为 0.2 dB。加工的测量装置如图 4 所示。

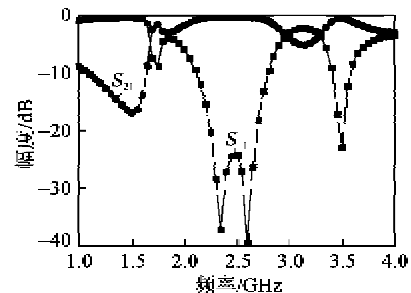


图 3 空载情况下仿真的散射参数

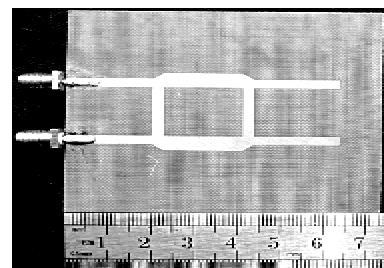


图 4 加工的测量装置

运用加工出的测量装置, 在待测物为特氟龙 (Teflon)、聚丙烯 (PP)、聚氯乙烯 (PVC)、环氧玻纤板 (FR-4) 和美国雅龙 (AD1000) 板时, 测量了端口 1、2 的散射参数, 其结果如图 5、6 所示。结合本文

的计算方法,最终根据测得的散射参数的幅度计算出待测物的介电常数,其结果如表1所示。

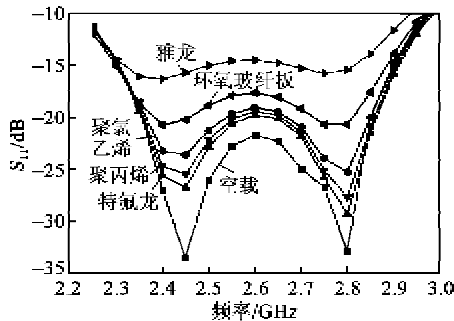


图5 测量的待测物为不同物质时的 S_{11}

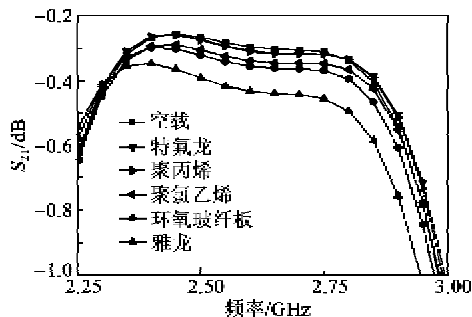


图6 测量的待测物为不同物质时的 S_{21}

表1 2.45 GHz 下测量的不同待测物的介电常数

待测物	测得的 ϵ'	参考文献[7]	测得的 $\tan \delta$	参考文献[7]
Teflon	2.16	2.108	0.000 9	0.000 8
PP	2.11	2.31	0.000 7	0.001 1
PVC	3.02	2.98	0.036 0	0.040 0
FR-4	4.43	—	0.023 0	—
AD1000	10.3	—	0.002 6	—

4 结束语

本文提出了测量块状表面平滑的固体材料介电常数的新方法,采用3 dB分支线耦合器的输出与耦合端口各端接一段终端开路的微带线为测量装置,

将待测物放置在其中的一段传输线上,通过测量端口1、2的散射参数的幅度计算出了待测物的介电常数。运用该方法在2.45 GHz下测量了Teflon,PP,PVC,FR-4和AD1000这几种物质的介电常数,事实证明该方法具有设备简单,操作方便及非破坏性等特点。测试的待测物的尺寸由终端开路的微带线的长度决定,本文中,待测物的长度应控制在20 mm之内。

待测物介电常数的测试频率取决于设计的耦合器的工作频率。后期的工作可使用多节分支线耦合器实现宽带范围内的介电常数测量。

参考文献:

- [1] 李秀萍,高建军.微波射频测量技术基础[M].北京:机械工业出版社,2007.
- [2] 周在杞,周克印,许会,等.微波检测技术[M].北京:化学工业出版社,2007.
- [3] ADDAMO G, VIRONE G, VACCANEO D, et al. An adaptive cavity setup for accurate measurements of complex dielectric permittivity[J]. Progress in Electromagnetics Research, 2010, 105: 141-155.
- [4] HASAR U C, ORA E A. A metric function for fast and accurate permittivity determination of low-to-high-loss materials from reflection measurements[J]. Progress in Electromagnetics Research, 2010, 107: 397-412.
- [5] 陈抗生.电磁场与电磁波[M].北京:高等教育出版社,2007.
- [6] OCERA A, DIONIGI M, FRATTICCIOLI E, et al. A novel technique for complex permittivity measurement based on a planar four-port device[J]. IEEE Microwave Theory and Techniques, 2006, 54(6): 2568-2575.
- [7] OCERA A, DIONIGI M, SORRENTINO R. A novel technique for permittivity and moisture measurements using a planar hybrid junction[C]//European, IEEE Microwave Conference, 2007: 210-213.