

文章编号: 2095-4980(2020)02-0273-05

基于传输反射法的等离子体相对复介电系数测量

吴晓明¹, 杨帆², 解田², 吴丽¹, 朱铎丞¹, 杨阳¹, 黄卡玛¹

(1.四川大学 电子信息学院, 四川 成都 610065;

2.瓮福(集团)有限责任公司 中低品位磷矿及其共生资源高效利用国家重点实验室, 贵州 贵阳 550000)

摘要: 为解决微波激发等离子体参数诊断存在的困难问题, 提出利用二端口传输反射法测量微波激励产生的低温等离子体的等效相对复介电系数。使用有限元方法设计了基于BJ22标准波导的样品测试结构, 该结构能在较大的介电系数范围内, 保证介电系数和端口的 $|S_{11}|$, φS_{11} 和 $|S_{21}|$ 参数保持较好的单调性, 避免产生多值问题; 通过人工神经网络对计算获得的各介电系数对应的 S 参数进行训练, 达到足够的精确度; 最后通过实验, 将测量获得的 S 参数利用神经网络反演获得待测物质的相对复介电系数。该方法对今后测量类似等离子体、复介电系数实部为负的特殊材料的介电常数具有一定的指导意义。

关键词: 等离子体; 相对复介电系数; 神经网络; 传输反射法; 在线测量

中图分类号: TN06

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA2019445

Measurement of relative complex permittivity of plasmas based on transport reflection method

WU Xiaoming¹, YANG Fan², XIE Tian², WU Li¹, ZHU Huacheng¹, YANG Yang¹, HUANG Kama¹

(1.College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu Sichuan 610065, China;

2.State Key Laboratory for Efficient Utilization of Middle and Low Grade Phosphate Rock and Its Associated Resources, Wengfu(Group) Limited Liability Company, Guiyang Guizhou 550000, China)

Abstract: To solve the problem of parameter diagnosis of microwave excited plasma, the equivalent relative complex permittivity of low-temperature plasma excited by microwave is measured by the two-port transmission reflection method. Firstly, the sample-test structure is designed based on the standard BJ22 waveguide structure with the finite element method. The structure can ensure that the permittivity and port parameters of $|S_{11}|$, φS_{11} , $|S_{21}|$ keep good monotonicity in a large range of permittivity, avoiding multi-value problems. Then, artificial neural network is utilized to train the S parameters which are corresponding to each permittivity obtained by simulation, and the training results achieve sufficient accuracy. Finally, through experiments, the measured S parameters are inverted by neural network to obtain the relative complex permittivity of the substance to be measured. This method can be applied to measure the permittivity of materials like plasma which has negative real part of complex permittivity.

Keywords: plasma; relative complex permittivity; neural network; transmission reflection method; on-line measurement

介电特性是物质最基本的一个特性, 精确地测量物质的介电系数对了解微波作用物质有着十分重要的意义。随着科学技术的不断发展, 微波应用的范围越来越广, 在航空航天、石油化工、生物医疗、矿物化工、食品化工以及材料合成等多个领域有着广泛应用, 这意味着需要知道的物质介电系数的范围越来越广, 甚至有一些介电系数超出常规的材料, 如超材料或等离子体。由于等离子体的特殊性, 使得它的介电特性和常规材料与众不同, 相对复介电系数实部可能是负数, 并且范围会非常广, 导致等离子体的相对复介电系数难以测量。而且等离子体的介电性质不是恒定不变的, 会随着频率、温度的变化而变化, 给实际测量带来了困难。

收稿日期: 2019-11-05; 修回日期: 2019-12-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61731013; 61971295); 贵州省科技资助项目(黔科合支撑[2018]2004)

作者简介: 吴晓明(1995-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为微波等离子体。email:2721822385@qq.com.

介电系数的测量方法有很多,大致可分为网络参数法^[1-4]和谐振腔法^[5-6];网络参数法包括自由空间法^[7-8]、开口同轴探针法^[9]及传输反射法^[10-12];谐振腔法虽然对低损耗的介电测量有很高的精确度,但不适合宽频段测量,且测试频率会受到腔体自身谐振频率的限制。自由空间法要求尺寸大而且平整的材料;开口同轴探针法属于无损测量,适用于液体、半固体材料的测量,但该方法在测量固体材料时,要求材料表面平整、光滑,且具备一定的厚度;传输/反射法广泛用于宽频段测量,能够从散射参数中计算得到材料的介电常数,但传输/反射法也存在多值、相位跳变以及半波谐振等问题。考虑到使用大功率微波输入能量产生等离子体比较简单,本文采用传输反射法测量等离子体的等效相对复介电系数。

1 方法

1.1 整体逻辑

本文目的是设计一个能够实现在线测量被激发等离子体的等效相对复介电系数的系统。首先基于有限元方法和 BJ22 标准矩形波导对腔体进行仿真设计,经过对影响腔体结构性能的几个参数进行大量扫参和优化,最终确定腔体的尺寸,见图 1。腔体上下两面的截止波导的外直径为 22 mm,无极紫外灯管的壁厚为 2 mm,内直径为 12 mm。利用设计的腔体进行等离子体的仿真以获得对应的 S 参数,考虑到等离子体本身存在较大的损耗,在仿真时损耗角正切的取值范围选择为 $-1 \sim 0$,介电系数的实部取值范围为 $-200 \sim 0$,仿真结果见图 2。由图 2 可知,介电系数取值范围内,端口的 $|S_{11}|, \varphi S_{11}$ 和 $|S_{21}|$ 参数保持较好的单调性。尽管介电系数实部在 $-6 \sim 0$ 的范围内,出现多值情况,但 $|S_{11}|, |S_{21}|$ 和介电常数的单调性却很好,反演时可以更容易地利用人工神经网络选择合理的值。将通过计算获得的各介电系数对应的 S 参数作为一个样本,编写人工神经网络,将仿真得到的样本放入神经网络进行网络训练;再通过实验,将测量获得的等离子体的 S 参数作为样本输入,最终利用神经网络反演获得待测物质的相对复介电系数。

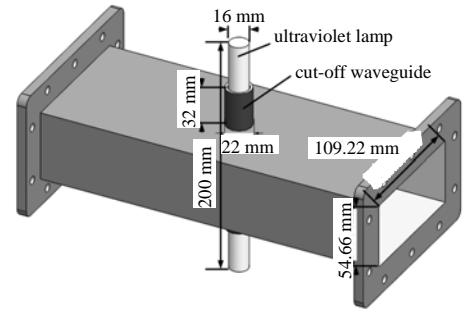


Fig.1 Diagram of model
图 1 模型示意图

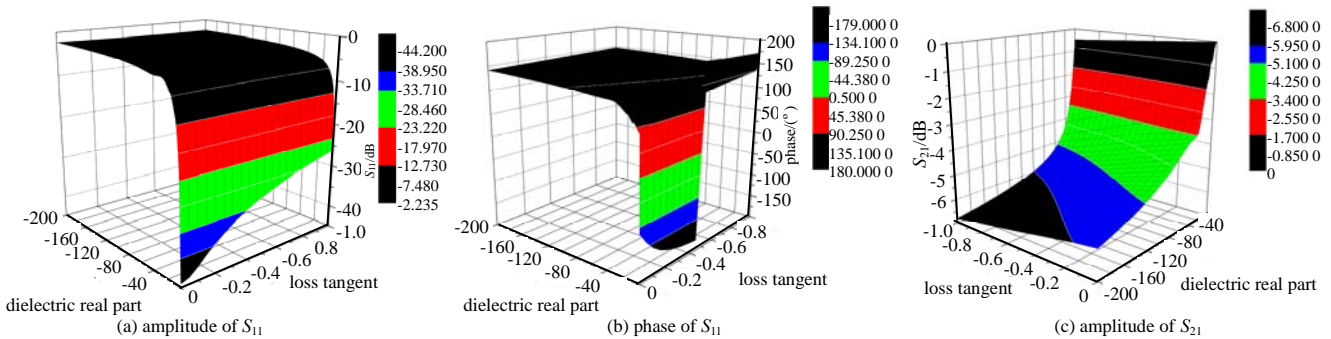


Fig 2 Simulation results
图 2 仿真结果

1.2 学习样本

对已设计好的腔体进行仿真计算。计算中主要利用软件的电磁场模块,使用 Maxwell 方程组来计算模型中的电磁场分布,得到不同物质的 S 参数。在仿真中,参数的设置主要通过改变相对复介电系数的实部 ϵ' 和损耗角正切 $\tan \delta$ 来代表不同的物质。对介电系数的实部为正值或负值的情况进行不同的仿真计算,仿真的范围和步长见表 1,仿真结果见图 2。介电系数的实部在 $-200 \sim 0$ 、损耗角正切在 $-1 \sim 0$ 的范围内,和端口的 $|S_{11}|, \varphi S_{11}$ 和 $|S_{21}|$ 参数保持较好的单调性。

表 1 数值计算介电系数取值范围及步长

Table 1 Range and step size of dielectric coefficient in numerical calculation

real part range	real step length	loss tangent step
$-200 \sim 0$	1	0.05
$1 \sim 15$	1	0.05

1.3 人工神经网络

材料相对复介电系数的精确获得,很大程度上依赖于被测参数与被测物质的相对复介电系数之间具有比较明确的数学公式推导关系。对于大部分被测材料,测量得到的 S 参数与被测物质的相对复介电系数之间的数学关系非常复杂,难以用确切的数学关系式进行表达。基于此,人工神经网络在微波测量技术中得到广泛应用,因为在介电测量系统中,采用人工神经网络对测量设备和材料不需要任何的限制条件,仅是数据之间的拟合和反演。

神经网络的基本原理大致可以理解为：通过大量的数据训练，学习某种规则，然后在给定输入值时得到一个较为期望的结果。这种方法主要是实现输入与输出变量之间的对应关系，可以是线性的，也可以是非线性的，不需要知道输入输出量之间的数学关系。

当输入与输出的关系是一一对应时，人工神经网络可精确得出输入值与输出值的对应关系，不会出现输出多值问题。但实际情况中，一般会存在一个输入数值可能同时对应几个输出数值。这是因为仿真得到的数据中获得的 S 参数与测试物质的相对复介电系数不能很好地一一对应。本文主要建立 $|S_{11}|, \phi S_{11}$ 和 $|S_{21}|$ 等参数与相对复介电系数实部及损耗角正切的对应关系。为尽量避免多值现象，本文在腔体仿真设计时，对模型的各个参数进行了优化，选择单调性最佳的尺寸进行设计加工。最后利用仿真获得的数据对人工神经网络进行网络训练，训练结果得到较高的精确度。利用神经网络计算等离子体相对复介电系数的流程见图 3。

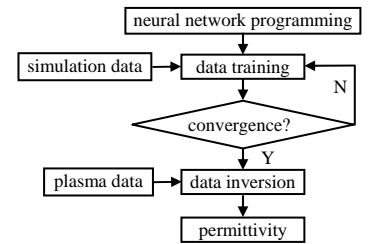


Fig.3 Measurement steps of relative complex permittivity
图 3 相对复介电系数测量步骤

1.4 实验系统的搭建

等离子体的实际测量系统见图 4，固态源 (WSPS-2450-1000TW) 提供实验所需的能量，环形器 (CIWG2450B100A10) 防止反射功率太大损坏固态源，定向耦合器 (LOOP2450B100C40A10N/LOOP E22DC40A10N) 连接功率计和干涉仪 (KC908)，分别测量被测材料的 $|S_{11}|, |S_{21}|$ 和 ϕS_{11} ，样品测试腔体放置被测物质，水负载吸收多余能量。

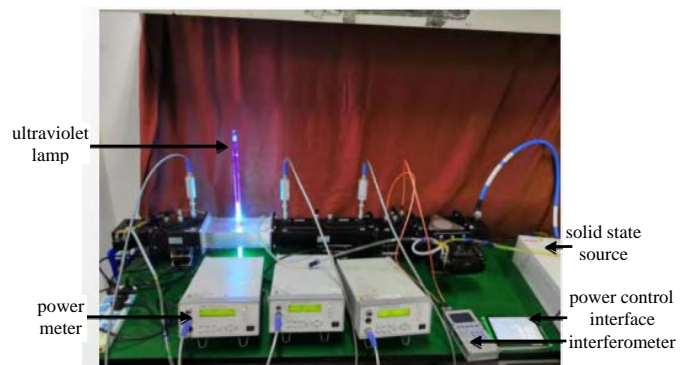


Fig.4 Measurement system
图 4 测量系统

2 实验结果和分析

2.1 常规材料验证

室温下选取丙三醇、正丙醇、正丁醇、无水乙醇等常见的化学溶液来验证该测量系统的正确性和准确度。首先将仿真得到的相对复介电系数实部为正的仿真结果 ($S_{11}, \phi S_{11}$ 和 S_{21}) 作为输入，输出设为相对复介电系数的实部及损耗角正切，以完成神经网络的训练。使用加工好的模型进行试验验证，采用图 4 所示的测量系统，将测得的 S 参数代入神经网络中进行反演，得到测量的数据并与实际值进行对比，其结果见表 2 和表 3，可以看出被测材料的介电系数和损耗角正切的测量值和理论值存在误差。测量值和理论值的误差一部分来自实验系统自身测量的误差，一部分来自神经网络。总体看来测量和理论值的误差比较小，说明该实验系统和仿真结果是吻合的。

表 2 介电系数实部测量误差

Table2 Measurement error of real part of dielectric coefficient

material	theoretical value	measured value	error/%
Glycerol	7.12	6.723 2	5.57
Propyl alcohol	4.66	4.640 0	0.43
N-butanol	3.75	3.398 0	9.30
ethanol	8.94	8.570 0	4.10

表 3 损耗角正切测量误差

Table3 Measurement error of loss tangent

material	theoretical value	measured value	error/%
Glycerol	0.540 0	0.583	7.4
Propyl alcohol	0.813 0	0.780	4.5
N-butanol	0.608 0	0.650	6.5
ethanol	0.847 8	0.779	8.1

2.2 等离子体的介电系数测量

测量时将无极紫外灯管置于之前设计的腔体内。逐渐增加固态源的功率直至灯管被激亮，灯内物质呈等离子态；随后调整功率的大小，记录不同功率下测量得到的等离子体 S 参数，并观察灯管的亮度和激发的长度。从实验结果来看，实验系统的输入功率越大，灯管越亮且激发的等离子体的长度越长。通过试验获得不同功率下的等离子体的 S 参数作为输入量，经人工神经网络反演得到相应等离子体的相对复介电系数；不同输入功率下，等离子体的实部和损耗角正切见图 5。从图 5 可知，功率的改变影响等离子体的介电系数。这是因为电场强度的变化改变了等离子体的电子密度和碰撞频率，从而改变了等离子体的介电系数。输入功率在 150 W 以下时，经人工神经网络反演出的等离子体介电系数出现较大波动。这是因为功率较低时，测量系统内电场太低，导致激发出的等离子体不太稳定，最终导致测量结果波动较大，实验现象也表明了这一点；当输入功率逐渐升高，等离子体吸收微波的能量逐渐增多，其碰撞频率和电子密度也逐渐增大，等离子体的损耗角正切为负数，且在不断地变大；

在功率达到 300 W 附近时, 等离子体呈现出较强的金属性, 虽然损耗角正切较大, 但等离子体介电常数实部为负数, 电磁波无法在等离子体内部传播, 因此, 电子密度和碰撞频率达到动态平衡, 等离子体的损耗角正切和介电常数实部不再剧烈变化。

3 结论

本文设计了一个腔体, 该腔体可以实现介电系数实部为负数情况下的介电测量。利用仿真和神经网络反演算法相结合得到被激发得到的等离子体的复介电系数。就一些实验室常见的化学试剂如丙三醇、正丙醇、正丁醇、乙醇等物质用设计的腔体进行介电测量, 成功验证了该方法的准确度和可行性。通过实验在线测量被微波

激发的等离子体, 获得相应的 S 参数并利用人工神经网络反演获得被激发等离子体的相对复介电系数。该方法对今后测量类似等离子体这样复介电系数实部可能为负数的材料的介电系数有一定的指导意义。

参考文献:

- [1] 李恩. 透波材料介电性能高温宽频测试技术研究[D]. 成都:电子科技大学, 2009. (LI En. Research on high temperature and wide frequency testing technology of dielectric properties of transparent materials[D]. Chengdu, China: University of Electronic Science and Technology of China, 2009.)
- [2] 王益, 张翠翠, 王建忠, 等. 非磁性材料介电常数测量传输反射法改进研究[J]. 宇航计测技术, 2015, 35(1):5-9. (WANG Yi, ZHANG Cuicui, WANG Jianzhong, et al. Improvement of transmission reflection method for measuring dielectric constant of nonmagnetic materials[J]. Astrometric Technology, 2015, 35(1):5-9.)
- [3] 赵才军, 蒋全兴, 景莘慧. 改进的同轴传输/反射法测量复介电常数[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(3):695-700. (ZHAO Caijun, JIANG Quanxing, JING Xinhui. Measurement of complex permittivity by improved coaxial transmission/reflection method[J]. Journal of Instrumentation, 2011, 32(3):695-700.)
- [4] 张磊, 韦高, 毛得明. 基于 VC++ 的介质复介电常数变温测量系统软件设计[J]. 电子测量技术, 2007, 30(5):47-49. (ZHANG Lei, WEI Gao, MAO Deming. The software design of the variable temperature measurement system of dielectric complex permittivity based on VC++[J]. Electronic Measurement Technology, 2007, 30(5):47-49.)
- [5] 徐江峰, 陈秋灵, 倪尔瑚, 等. 截止波导介质腔介电常数测量理论与方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(10):1322-1325. (XU Jiangfeng, CHEN Qiuling, NI Erhu, et al. Study on the theory and method of dielectric constant measurement of cut-off waveguide dielectric cavity[J]. Journal of Instrumentation, 2006, 27(10):1322-1325.)
- [6] SANTRA M, LIMAYE K U. Estimation of complex permittivity of arbitrary shape and size dielectric samples using cavity measurement technique at microwave frequencies[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2005, 53(2):718-722.
- [7] 张伟, 苏东林. 自由空间法测量复合材料复电磁参数[J]. 复合材料学报, 2007, 24(1):145-149. (ZHANG Wei, SU Donglin. Measurement of complex electromagnetic parameters of composite materials by free space method[J]. Journal of Composite Materials, 2007, 24(1):145-149.)
- [8] GHODGAONKAR D K, VARADAN V V, VARADAN V K. Free-space measurement of complex permittivity and complex permeability of magnetic materials at microwave frequencies[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1990, 39(2):387-394.
- [9] GERSHON D L, CALAME J P, CARMEL Y, et al. Open-ended coaxial probe for high-temperature and broad-band dielectric measurements[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1999, 47(9):1640-1648.
- [10] 开金星. 基于矩形波导传输/反射法测量 K 和 Ka 波段微波材料电磁参数的研究[D]. 南京:南京邮电大学, 2013. (KAI Jinxing. Measurement of electromagnetic parameters of microwave materials in K and Ka band based on transmission/reflection method of rectangular waveguide[D]. Nanjing, China: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2013.)

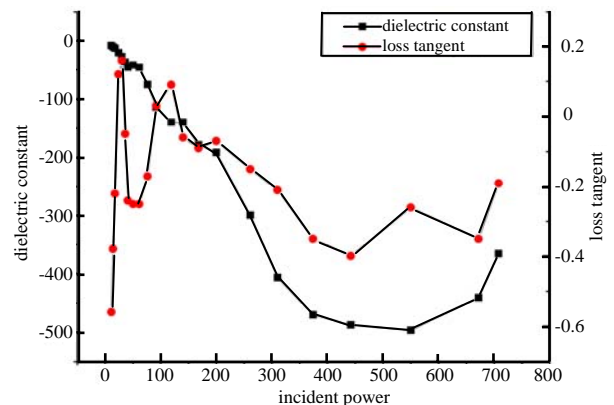


Fig.5 Incident power and its corresponding dielectric constant and loss tangent
图 5 入射功率及其对应的介电常数和损耗角正切

- [11] 田步宁,杨德顺,唐家明,等. 传输/反射法测量材料电磁参数的研究[J]. 电波科学学报, 2001,16(1):57-60. (TIAN Buning,YANG Deshun,TANG Jiaming,et al. Study on the measurement of electromagnetic parameters of materials by transmission/reflection method[J]. Journal of Radio Wave Science, 2001,16(1):57-60.)
- [12] 冯永宝,丘泰. 传输/反射法测量微波吸收材料电磁参数的研究[J]. 电波科学学报, 2006,21(2):293-297. (FENG Yongbao,QIU Tai. Measurement of electromagnetic parameters of microwave absorbing materials by transmission/reflection method[J]. Journal of Radio Wave Science, 2006,21(2):293-297.)

(上接第 268 页)

- [2] 刘长军,吴昕. 微波能工业应用研究进展[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2012,10(4):451-455. (LIU Changjun,WU Xin. Research progress on microwave energy industrial applications[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2012,10(4):451-455.)
- [3] VADIVAMBAL R,JAYAS D S. Non-uniform temperature distribution during microwave heating of food materials—a review[J]. Food & Bioprocess Technology, 2010,3(2):161-171.
- [4] 斯丹燕. 多源微波加热中若干关键问题的分析[D]. 上海:华东师范大学, 2012. (SI Danyan. Analysis of several key problems of the microwave heating on multi-port excitation[D]. Shanghai,China:East China Normal University, 2012.)
- [5] SEBERA V,NASSWETTROVA A,NIKL K. Finite element analysis of mode stirrer impact on electric field uniformity in a microwave applicator[J]. Drying Technology, 2012(30):1388-1396.
- [6] 辛磊,杨晓庆. 基于优化两端口微波炉结构的加热均匀性和加热效率研究[J]. 真空电子技术, 2016(3):32-34. (XIN Lei,YANG Xiaoqing. Research on temperature uniformity and power efficiency of an optimized two-port microwave oven[J]. Vacuum Electronics, 2016(3):32-34.)
- [7] TORRES F,JECKO B. Complete FDTD analysis of microwave heating processes in frequency-dependent and temperature-dependent media[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 1997,45(1):108-117.
- [8] 郑亚琪,陈星. 微波加热效应的多物理场仿真与实验[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018,16(2):302-306. (ZHENG Yaqi,CHEN Xing. Multi-physics simulation and experiment research of microwave heating[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2018,16(2):302-306.)
- [9] YE J,HONG T,WU Y,et al. Model stirrer based on a multi-material turntable for microwave processing materials[J]. Materials, 2017,10(2):95.
- [10] 步晨. 微波炉仿真与性能提升研究[D]. 成都:电子科技大学, 2018. (BU Chen. Research on microwave oven simulation and performance improvement[D]. Chengdu,China:University of Electronic Science and Technology of China, 2018.)