

# 基于微波光子晶体缺陷模特性的 材料介电损耗测量方法

梅永<sup>1</sup> 庄建军<sup>1</sup> 王刚<sup>2</sup> 乔欣然<sup>2</sup>

(1. 南京信息工程大学 工程训练中心 南京 210044; 2. 南京信息工程大学 电子与信息工程学院 南京 210044)

**摘要:**为了精准测量电子材料在特定微波工作频率的介电损耗,提出一种基于微波光子晶体缺陷模特性的材料介电损耗测量方法。利用缺陷微波光子晶体结构的微波局域特性,将被测材料设计为微波光子晶体的缺陷层结构,采用传输矩阵方法计算和模拟了缺陷透射峰值与被测材料介电损耗之间的关系。结果表明,被测材料的介电损耗因数与缺陷透射峰值呈显著的单值函数关系,当介电损耗因数从0增加到1.0时,缺陷透射峰值从1.0降低到0.21。因此,通过实验检测到被测材料缺陷透射峰值后,利用所建立的材料损耗因数与透射峰值之间的关系,可以非常灵敏地反演出被测材料的介电损耗。

**关键词:**微波光子晶体;介电损耗;传输矩阵;缺陷模

**中图分类号:** TP301 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 410.630

## Dielectric loss measurement method based on defect modeling of microwave photonic crystal

Mei Yong<sup>1</sup> Zhuang Jianjun<sup>1</sup> Wang Gang<sup>2</sup> Qiao Xinran<sup>2</sup>

(1. Engineering Training Center, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;

2. School of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

**Abstract:** In order to accurately measure the dielectric loss of electronic materials at a specific microwave frequency, a dielectric loss measurement method based on the defect model of microwave photonic crystal is proposed. Considering the microwave energy localization of the defective microwave photonic crystal, the dielectric under test is designed to be a defect layer within the microwave photonic crystal. The monotonic relationship between the transmission defect peak value and dielectric loss factor of the measured material is calculated by using transfer matrix method. When the dielectric loss factor varies from 0 to 1.0, the defect transmission peak value reduces from 1.0 to 0.21. As a result, when the defect transmission peak value is tested, and the dielectric loss factor can be obtained by using the calculated relationship between the transmission defect peak value and dielectric loss factor.

**Keywords:** microwave photonic crystal; dielectric loss; transmission matrix; defect mode

## 0 引言

电子材料的电磁参数对设计电子元器件至关重要。因此,精确测量电子材料的电磁参数具有十分重要的意义和应用价值。当前,电子材料电磁参数测量方法<sup>[1-4]</sup>主要包括传输/反射法<sup>[5-7]</sup>、谐振腔法<sup>[8-9]</sup>、自由空间法<sup>[10]</sup>。

传输/反射法的优点主要有操作简单、测量频带宽、测量精度较高,可以很方便地执行扫频测量。但在实际测试中,需要解决厚度共振问题和 NRW(nicolson-ross-weir)算法中的多值和相角跃变等问题。

对于小介电常数以及低电磁损耗的材料,谐振腔法是测量其介电常数最常用的方法之一。这种测量介电常数的方法限制条件少,结果准确快捷,但对于大介电常数的材料就不太适应,且对于不同待测材料的形状大小和介电常数的大致范围要选取不同的谐振腔。要想测得最准确的介电常数值,需要在向谐振腔内填充介质时尽可能的做到均匀。

自由空间波法的核心也是反演法,所以在材料科学中,这种方法也被认为是传输反射法的一种,而与常规的近似封闭式的局部测量的传输线法不同的是,自由空间波法所

面对的是开放式的宏观的介电常数测量,这是因为在利用自由空间波测量法测量材料的介电常数时,无需与被测材料接触,相关的工作人员就可以利用测量仪器测量。这种测量方法的优点在于在反演出待测材料的介电常数的同时,还能在当待测材料不满足菲涅尔反射公式成立条件的情况下,引进各种类型的散射或者绕射模型,打开了实地空内介电常数测量的研究。但自由空间波法对于测量仪器精度的要求较高,整个反演的计算求解过程很复杂,例如初值的设定,所求解的存在性,唯一性的确定等,特别是在对那些损耗较高的介质进行测量时,反演出的介电常数的误差较大。

以常用电子材料 FR4<sup>[39-41]</sup> 为例,本文提出了一种基于缺陷微波光子晶体结构的材料介电损耗测量方法。通过选择标准良介电材料来设计完整微波光子晶体,被测材料设计为微波光子晶体的缺陷结构,利用缺陷结构的微波光子局域特性,建立被测材料介电损耗因数与缺陷透射峰值之间的关系。通过实验检测到缺陷透射峰值后,利用所建立的关系,可以精确反演被测材料的介电损耗。

## 1 多层材料传输矩阵计算方法

在多层介质结构问题中,利用切向电场连续和电磁场基本方程,可以获得多层介质结构的传输矩阵;利用矩阵元素,可以表示平面波与多层介质结构相互作用时传输、反射和吸收系数或功率。如图 1 所示为缺陷微波光子晶体结构<sup>[12-14]</sup>,其由 A 和 B 两种均质材料周期性交迭构成,是一种特殊形式的多层介质结构。传输矩阵方法<sup>[14-15]</sup>已被广泛应用于微波光子晶体的电磁特性分析。

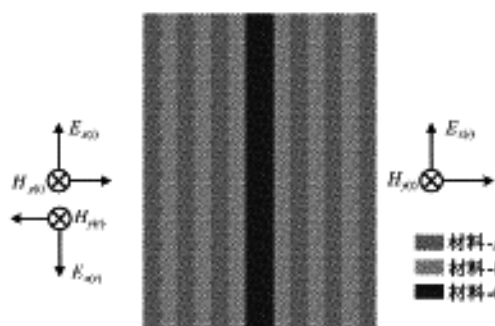


图1 周期性一维光子晶体结构

假定由多种平板材料构成的多层介质结构总层数为  $N$ ,第  $i$  层介质左边界和右边界的电场和磁场满足关系:

$$\begin{bmatrix} E_x(z+d_i, \omega) \\ jH_y(z+d_i, \omega) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\hat{k} \cdot d_i) & -\omega\mu_i \sin(\hat{k} \cdot d_i)/\hat{k} \\ \hat{k} \sin(\hat{k} \cdot d_i)/\omega\mu_i & \cos(\hat{k} \cdot d_i) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x(z, \omega) \\ jH_y(z, \omega) \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中,

$$M(d_i, \omega) = \begin{bmatrix} \cos(\hat{k} \cdot d_i) & -\omega\mu_i \sin(\hat{k} \cdot d_i)/\hat{k} \\ \hat{k} \sin(\hat{k} \cdot d_i)/\omega\mu_i & \cos(\hat{k} \cdot d_i) \end{bmatrix},$$

$E_x(z+d_i, \omega)$  和  $H_y(z+d_i, \omega)$  为第  $i$  层介质出射界面的电场和磁场强度,  $E_x(z, \omega)$  和  $H_y(z, \omega)$  为第  $i$  层介质入射界面的电场和磁场强度;  $\hat{k}$  是复数波数或传播常数,定义材料的复数导纳率和复数阻抗率分别为:  $\hat{y}(\omega) = j\omega[\epsilon'(\omega) - j\epsilon''(\omega)]$  和  $\hat{z}(\omega) = j\omega\mu_i$ , 则复数波数可以表示为:  $\hat{k} = \sqrt{-\hat{y}(\omega)\hat{z}(\omega)}$ 。针对微波光子晶体多层结构,根据矩阵的级联性质,其整体传输矩阵可以表示为:

$$X(\omega) = \prod_{i=1}^N M(d_i, \omega) \quad (2)$$

为了分析微波光子晶体结构的传输和反射特性,其反射数和传输系数可以采用传输矩阵元素表示:

$$r(\omega) = \frac{E_x^{(-)}(0, \omega)}{E_x^{(+)}(0, \omega)} = \frac{[X_{22}(\omega) - X_{11}(\omega) \frac{k_S \mu_S}{k_0 \mu_S}] - j [X_{21}(\omega) \frac{\omega \mu_S}{k_0} + X_{12}(\omega) \frac{k_S}{\omega \mu_S}]}{[X_{22}(\omega) + X_{11}(\omega) \frac{k_S \mu_S}{k_0 \mu_S}] + j [X_{21}(\omega) \frac{\omega \mu_S}{k_0} + X_{12}(\omega) \frac{k_S}{\omega \mu_S}]} \quad (3)$$

$$t(\omega) = \frac{E_x^{(+)}(d, \omega)}{E_x^{(+)}(0, \omega)} = \frac{2}{[X_{22}(\omega) + X_{11}(\omega) \frac{k_S \mu_S}{k_0 \mu_S}] + j [X_{21}(\omega) \frac{\omega \mu_S}{k_0} + X_{12}(\omega) \frac{k_S}{\omega \mu_S}]} \quad (4)$$

上述表明,在已知微波光子晶体结构(层数及每层材料厚度)和材料参数(复介电常数和复磁导率)的情况下,人们可以获得微波光子晶体的反射、吸收及传输特性。反之,通过实验测量手段获得量光子晶体结构传输、反射或吸收系数,可以反演其组成材料的电磁参数特性。针对当前微波介质材料市场提供的产品,其标定的材料参数通常是某一固定频率下的电磁参数。例如,某厂家标定的 FR4 材料实数,相对介电常数为 4.6,损耗正切值为 0.02,而这组参数能常只满足 100 MHz 的情况。随着微波频段发生变化,其相对介电常数变化较小,但其损耗角往往发生较大变化。另外,随着不同材料厂家的材料工艺不同,同种材料在电磁参数上也有差异存在。因此,在设计微波器件之前,对使用材料的电磁参数进行重新测定十分必要。本文针对良介质材料,在介电常数已知的情况下,通过将材料设计为微波光子晶体的缺陷结构,通过测量其缺陷透射峰值大小来反演被测材料的介电损耗因数,微波光子晶体的实验测量模型如图 2 所示。

## 2 测量模型与仿真结果分析

### 2.1 FR4 介电损耗因数测量模型

为了构建 FR4 缺陷微波光子晶体,需要选择已知电磁

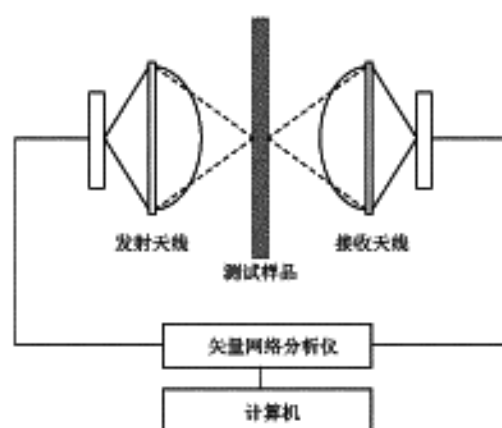


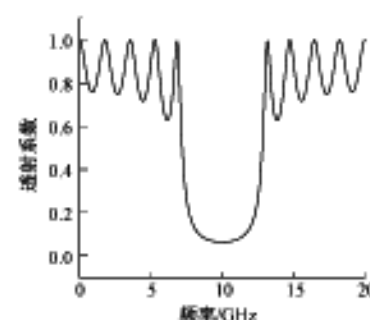
图2 一维缺陷微波光子晶体透系数测量模型

参数的标准良介电材料来构成完整微波光子晶体结构。完整的微波光子晶体由两种良介电材料空间周期性交迭构成。选择罗杰斯 5880 和 6010 来制备完整的微波光子晶体,其相对介电常数分别为 2.2 和 10.2,损耗正切分别为 0.0009 和 0.0027,二者分别记为材料 A 和材料 B;被测材料 FR4 的相对介电常数在微波段为 4.6,其介电损耗因数为在微波频段变化较大,记为材料 C,为被测对象。构造的完整微波光子晶体结构为:(ABABA)B(ABABA)。利用多层材料传输矩阵方法,计算了完整微波光子晶体的反射和透射系数,分别如图 3(a)和(b)所示。假定为了测量 FR4 材料在频率为 10.0 GHz 处的介电损耗,设计的微波光子晶体中心工作频率亦为 10.0 GHz,即单层材料的光学厚度为  $1/4$  中心工作波长。从图 3 中可以看到,完整的微波光子晶体可以在中心工作频率处形成传输禁带,称为微波光子晶体的带隙结构。

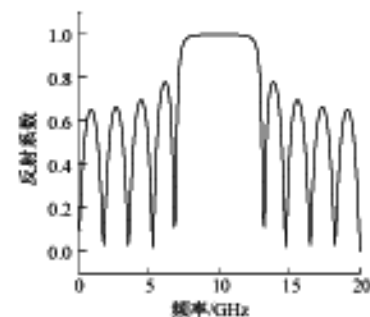
## 2.2 仿真结果分析

将完整微波光子晶体结构(ABABA)B(ABABA)的中间层 B 替换为被测材料 C(FR4),其光学厚度设置为  $\lambda_0/2$ ,构成谐振腔结构(ABABA)C(ABABA),如图 1 所示。基于微波光子晶体的光子局域特性,中心工作频率信号将隧穿光子晶体结构,形成缺陷透射峰。当缺陷材料为有耗材料时,形成的局域电场部分地被缺陷材料吸收,缺陷透射峰将减弱。因此,在实验过程中,可以通过检测缺陷透射峰值大小,即可以测定缺陷材料的损耗因数。由于缺陷透射峰是经过谐振腔结构筛选,具有较高的品质因数,因而具有较高的检测灵敏度,从而体现了这种材料介电损耗因数测量高精度特性。首先,计算了 FR4 介电损耗因数对缺陷微波光子晶体传输特性影响,如图 4 所示。可以看到,为了测量 FR4 材料在 10.0 GHz 处的介电损耗,构成的缺陷微波光子晶体在光子带隙内的 10.0 GHz 处形成了缺陷透射峰,如图 4(a)所示。由于厂家未给定 FR4 材料在 10.0 GHz 处损耗因数,可以假定其在 0~0.10 之间发生变化,仿真计算了缺陷透射峰的变化,如图 4(b)所示。

最后,为了得到缺陷透射峰值与被测 FR4 材料损

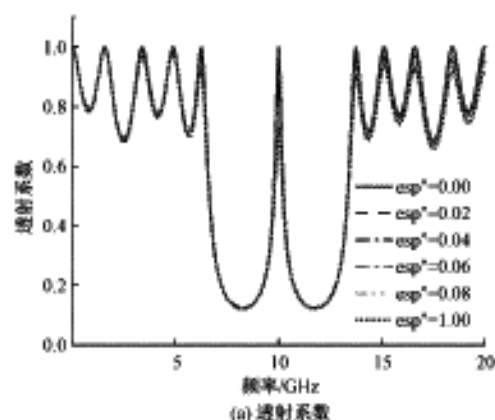


(a) 透射系数

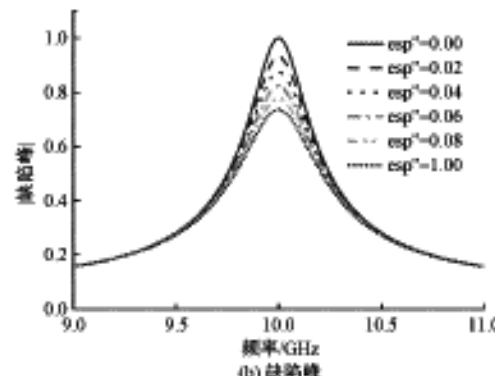


(b) 反射系数

图3 完整微波光子晶体



(a) 透射系数



(b) 缺陷峰

图4 RF4 介电损耗因数对缺陷微波光子晶体电磁特性影响

耗因数之间的关系,计算了损耗因素在 0~0.1 和 0~1.0 之间连续变化时的缺陷透射峰值,分别如图 5(a)和(b)所示。当 FR4 的介电损耗因数从 0 增加到 1.0 时,缺陷透射峰值从 1.0 降低到 0.21。因此,在实验过程中测量到实际



RF4 缺陷微波光子晶体的缺陷透射峰值时,参考图 5 即可反演出 RF4 材料的实际介电损耗。

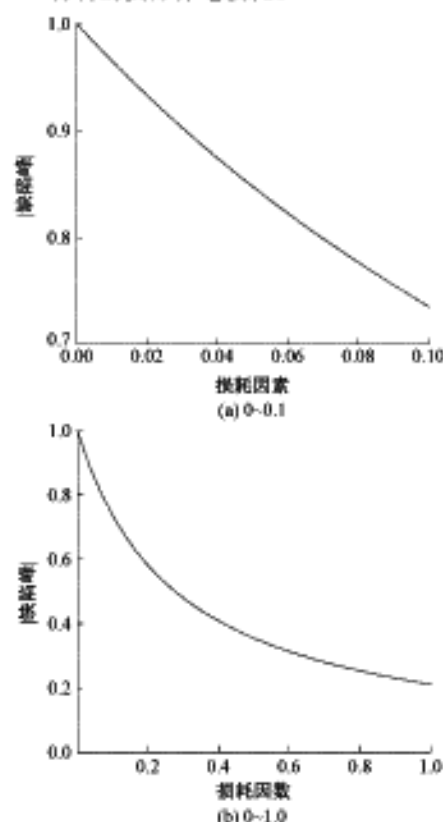


图5 缺陷峰与 RF4 介质损耗因数之间关系, 损耗因数变化范围

### 3 结 论

本文通过选择两种标准良介电材料(罗杰斯 5880 和 6010)作为背景材料来构建完整微波光子晶体结构,将被测材料 FR4 设计为微波光子晶体的缺陷,利用其产生的缺陷透射峰值来反演被测材料 FR4 的损耗因数。通过实验检测到缺陷微波光子晶体的缺陷透射峰值,利用已建立的缺陷透射峰与介质损耗因素之间关系,可以精确地测量到 FR4 的损耗因数。由于缺陷透射峰值具有较高的品质因数,提出的材料损耗测量方法具有较高的测量精度。

### 参考文献

[1] 赵瑞. 材料电磁参数测量中误差认识方法研究[D]. 北

京: 北京交通大学, 2018.

- [2] 任水生. 微波板材介电常数  $\epsilon$  的测量方法[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(3): 38-41.
- [3] 陈琦. 固体介电常数测量方法的对比研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- [4] 康玉龙, 蔡育. 传输/反射法测量材料电磁参数及其改进方法[J]. 上海计量测试, 2015, 42(1): 2-4.
- [5] 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.
- [6] 王益, 张翠翠, 王建忠. 闭式谐振腔法微波介质陶瓷介电常数测量[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(10): 2500-2507.
- [7] 金晨路, 韩想全, 何婧. 基于矩形谐振腔法研究金属网格对雷波屏蔽性能[J]. 电瓷避雷器, 2017(3): 82-85.
- [8] 薛冰, 纪奕才. 基于同轴谐振腔法的材料电参数测量[J]. 电子测量技术, 2017, 40(4): 43-46.
- [9] 张云鹏, 李恩, 余承勇. 圆柱腔复介电常数高温测试系统[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(7): 994-1001.
- [10] 江子奇, 赵锐, 郭荣斌. 低损耗材料高温介电性能测试系统设计与实现[J]. 电子测量技术, 2020, 43(13): 182-186.
- [11] 沈意平, 刘缘, 王钢. 基于 Lamb 波的压电陶瓷/环氧树脂复合材料传感器制备及应用[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(12): 19-25.
- [12] 李侠. 光子晶体中的缺陷模特性研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2011.
- [13] 陈磊. 含缺陷层的光子晶体传光特性的仿真及分析[D]. 太原: 中北大学, 2015.
- [14] 王身云, 计想建, 岑大维. 海水电磁屏蔽体[J]. 装备环境工程, 2019, 16(5): 9-12.
- [15] 刘启能, 龙涛, 代洪霞. 一种研究一维掺杂光子晶体缺陷模的方法[J]. 计算物理, 2015, 32(3): 369-373.

### 作者简介

梅永, 工学博士, 主要研究方向为光子晶体传感、信号处理等。

E-mail: yongmei2002@126.com

庄建军, 工学博士, 教授, 主要研究方向为传感器检测技术、信号处理等。

E-mail: jjzhuang@nuist.edu.cn