DOI: 10.13382/j.jemi.B2205627

基于谐振环法板材介电常数高精度测试研究

刘 傲[1] 陈佳慧[1] 任英杰[2] 杜宏宇[1] 万发雨[1] 周 蓓[2]
(1.南京信息工程大学 南京 210044;2.浙江华正新材料股份有限公司 杭州 311100)

摘 要:介电常数是影响高频板材性能的重要参数,板材介电常数的准确性及空间分布均匀性都会对微波电路的性能产生重要影响。本文首先设计了增强型耦合环、屏蔽通孔和共面波导技术的谐振环电路,增强环对外界的抗干扰能力并使 S_{21} 分布在 -30~-20 dB,提高传输效率。其次分析了不同的环平均半径、环宽、耦合间隙对仿真结果的影响。接着对谐振环电路加工、测试,实测结果表明在 2、10、24 GHz 频点下介电常数误差小于±0.007,证明该方法测试精度高。最后基于该谐振环电路对某国产板材介电常数分布测试分析,结果表明加工和板材空间分布造成的介电常数误差小于±0.024,证明板材性能良好。

关键词: 介电常数;高频板材;测试精度;谐振环
中图分类号: TM934.33 **文献标识码**: A **国家标准学科分类代码**: 510.1025

Research on high-precision measurement of substrate dielectric constant based on resonant ring method

Liu Ao[1] Chen Jiahui[1] Ren Yingjie[2] Du Hongyu[1] Wan Fayu[1] Zhou Bei[2]
(1. Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;
2. Zhejiang Huazheng New Material Group Co., Ltd, Hangzhou 311100, China)

Abstract: The dielectric constant is an important parameter that affects the performance of high-frequency substrate, and the accuracy and spatial distribution of the dielectric constant of the substrate will have an important impact on the performance of microwave circuits. In this paper, the resonant ring circuit of enhanced coupling ring, shielded through hole and coplanar waveguide technology is designed first, to enhance the anti-interference ability of the ring to the outside world, and to distribute S_{21} between -30 to 20 dB, and improve the transmission efficiency. Secondly, the influence of different ring average radius, ring width and coupling gap on the simulation results is analyzed. Then, the resonant ring circuit is processed and tested. The measured results show that the dielectric constant error is less than ±0.007 at the frequency points of 2, 10 and 24 GHz, which proves that the method has high test accuracy. Finally, based on the test and analysis of the dielectric constant distribution of a domestic substrate based on the resonant ring circuit, the results show that the dielectric constant error caused by processing and the spatial distribution of the substrate is less than ±0.024, which proves that the substrate has good performance.

Keywords: dielectric constant; high-frequency substrate; test accuracy; resonant ring

0 引 言

近年来,电子产业正在向高频化、宽频带、高传输速度的方向发展,该趋势促进了高频板材的发展,同时也对高频板材的性能提出了更为苛刻的要求。在微波电路、天线设计领域,板材介电常数[1-3]是影响其性能的最重要参数之一。

由于工作频率、印制板制作过程中的误差等因素的影响,厂家在某一频率测定的介电常数与实际介电常数可能会有较大误差。如果仿真过程中介电常数设置的不准确,就会使得仿真结果与实际制作得到的结果产生很大的偏差,严重影响设计一致性,增加设计及调试成本[4]。此外,整块板材中不同位置分布的介电常数也有一定的不均匀性,若板材的介电常数可以控制在一定范围内或可以满足商家指定指标,即可表明该板材的设计

收稿日期: 2022-06-27 Received Date: 2022-06-27

质量良好。因此,如何精确测得高频板材的介电常数成为了首要问题。

针对微波基材的介电常数特性,国内外已经展开了相关的研究[5-6]。其测试方法主要分为非谐振法和谐振法。非谐振法主要以传输线法[7]、自由空间法[8]、时域法[9]、传输/反射法[10]为代表,主要根据加载样本前后测量系统 S 参数的变化,来提取样本的介电常数。非谐振法带宽较大,但是测试精度较差,且对于低损耗材料的一致性快速便捷测试不能达到很好的效果。谐振法[11]通过将待测样本引入谐振器中,改变了谐振器的电磁边界条件,使得谐振器谐振频率、品质因数发生变化,进而由谐振特性的变化推算出待测样本的材料参数。

在 1969 年,微带谐振环首次由 Troughton[12]提出用作测量传输线的色散特性和相速,之后使用环形谐振结构测量介电常数的研究越来越多。因为与其他谐振结构相比,谐振环结构简单,成本低廉,不需要考虑边缘效应,且具有较高的 Q 值,测量精度也更高。因此本文选取谐振环结构进行高频板材介电常数的一致性的测量研究。

目前,国内外对谐振环应用的研究有很多,例如 Waldron 等[13]提出了一种测量泡沫介电常数的谐振环结构,其特点是采用悬浮性结构增强环与样品材料的强相互作用提高测试精度且易于切换测试样品,但该结构缺少电磁屏蔽保护,易受室内电磁环境的影响,导致测试时产生偏差。Jilani 等[14]设计了一款用于测量肉制品的谐振环结构,并对仿真结果进行了对比分析,结果符合预期标准,但此结构的测试频带仅在 1~4 GHz 有较高的测试精度,且测试时 S_{21} 过小,传输效率较低。绝大部分谐振环的方法都是设计一个谐振环,然后把待测样品放置在谐振环上,通过测试谐振环谐振频率的偏差来计算待测样品的介电常数。该方法测试步骤简单,但是由于谐振频率偏差有限,介电常数测试结果精度较差,只能测试光板介电常数,无法测试覆铜板的介电常数。本文提出在待测样品上制作谐振环,通过比较仿真和实际测试谐振频率来计算待测覆铜板材介电常数,该方法测试步骤简单,测试结果精度高,可广泛用于微波板材的生产质量控制。

1　谐振环原理分析

1.1　谐振环电路结构

谐振环电路结构如图 1 所示,将谐振环电路印制在基板材料上,谐振环两侧采用传输线弱耦合,使谐振环产生谐振。图 1 中,r 为谐振环的平均半径,W_r 为谐振环的环宽,g 为耦合传输线与环的间距(以下称为耦合间隙),W_0 为传输线的线宽。

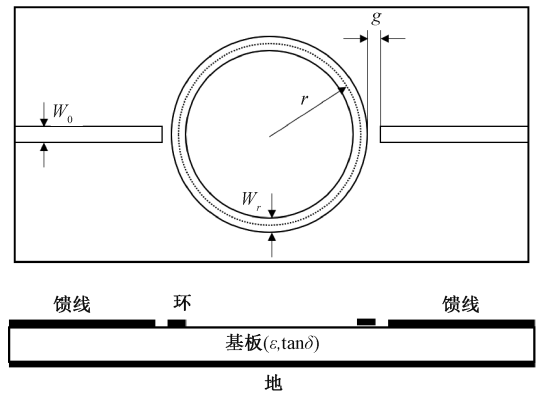


图 1　谐振环电路结构

Fig. 1　Resonant ring circuit structure

1.2　测试原理[15]

在一定的谐振频率下,谐振环法测介电常数基于如下公式:

$$2\pi r = n\lambda_g \quad n = 1,2,3,\cdots \tag{1}$$

谐振环的平均周长等于介质中波长 λ_g 的整数倍。其中,r 是谐振环的平均半径,n 是谐波数,λ_g 是波导波长。

谐振环的波导波长 λ_g 的计算方式如式(2)所示,λ_g 是谐振频率 f_0 的函数。

$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{\varepsilon_{eff}}} = \frac{c}{f_0\sqrt{\varepsilon_{eff}}} \tag{2}$$

其中,c 是光速,ε_{eff} 是有效介电常数,f_0 是谐振频率。

$$\varepsilon_{eff} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2}\frac{1}{\sqrt{1 + \frac{12h}{W_r}}} = \left(\frac{nc}{2\pi f_0 r}\right)^2 \quad n = 1,2,3,\cdots \tag{3}$$

式中:ε_r 是相对介电常数,h 是板材厚度,可得到对应谐振频率的有效介电常数。由式(2)、(3)可推导出谐振环的谐振频率 f_0 计算公式:

$$f_0 = \frac{nc}{2\pi r\sqrt{\varepsilon_{eff}}} \tag{4}$$

式(4)得出的谐振频率的理论计算值可用于谐振环电路仿真与实测的对比。

为得到精确的有效介电常数,需要考虑在实测时辐射损耗对谐振频率的影响,如式(5)所示。

$$f_0 = \frac{f}{1 - \frac{1}{2Q}} \tag{5}$$

其中,f 为实测谐振频率,Q 为品质因数。

衰减因子 α 由式(6)可得:

$$\alpha = 27.3\frac{1}{\lambda_g Q} = 27.3\frac{f_0\sqrt{\varepsilon_{eff}}}{cQ} \tag{6}$$

2 谐振环电路的设计

2.1 谐振环电路模型仿真设计

本文建立了谐振环电路模型。采用某国产高频板材作为测试样品,其厚度为 10 mil,相对介电常数约为 3.6,损耗角正切约为 0.004。为使测试结果更加精确,本文设计的谐振环电路模型采用了增强型耦合环技术[16]以获得更低的插入损耗,并采用屏蔽通孔和共面波导技术,增强环对外界的抗干扰能力,如图 2 所示。谐振环的基本参数设置如表 1 所示。

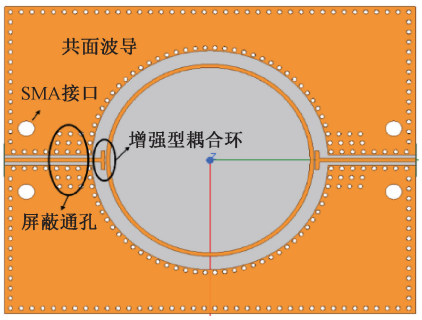


图 2 谐振环电路仿真模型

Fig. 2 Resonant ring circuit simulation model

表 1 基本参数设置

Table 1 Basic parameter settings (mm)

耦合间隙	平均半径	环宽	微带线长
0.25	14.13	0.55	10

将式(1)中的谐波分别设置为 $n=1,5,12$ 仿真出图 2 中谐振环电路分别在 2、10、24 GHz 的谐振频率,仿真结果如图 3 所示,仿真数据如表 2 所示。

表 2 2、10、24 GHz 谐振频率仿真数据

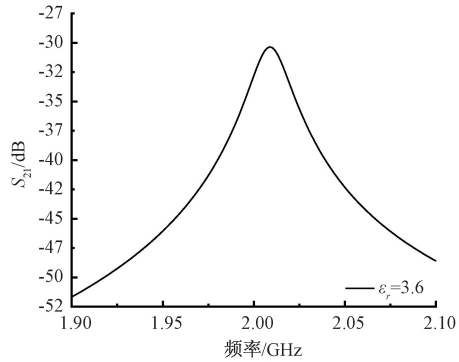
Table 2 2, 10, 24 GHz resonant frequency simulation data

频率	谐振频率/GHz	S_{21}/dB
2 GHz	2.008	−30.3
10 GHz	10.038	−20.1
24 GHz	23.856	−21.8

本节给出了谐振环的仿真结构模型,并仿真出在 3 个不同频段的谐振频率和 S_{21}。从仿真结果看出,S_{21} 大致分布在−30~−20 dB,说明谐振环属于弱耦合,耦合对谐振频率影响较小。

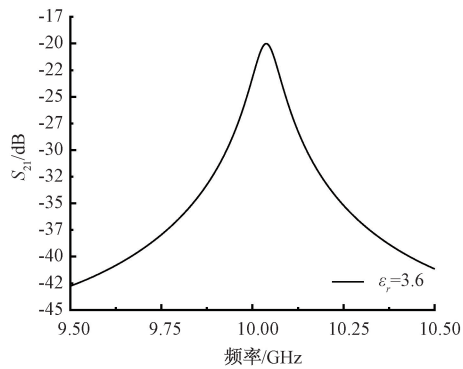
2.2 谐振环结构的参数选择与分析

由 1.2 节测试原理可知,谐振环的参数选择[17]会直接决定谐振频率的大小。若不能合理的选择谐振环的参数,则会导致介电常数与实际值不符,影响高频板材的性能分析。



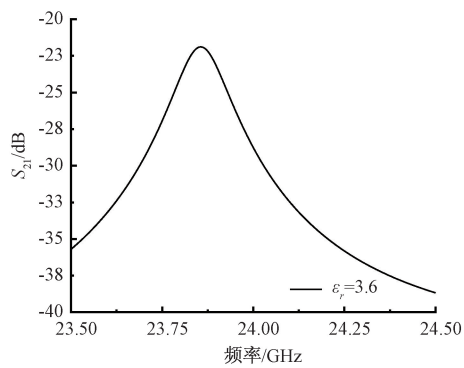
(a) 2 GHz谐振频率仿真图

(a) Simulation diagram of 2 GHz resonant frequency



(b) 10 GHz谐振频率仿真图

(b) Simulation diagram of 10 GHz resonant frequency



(c) 24 GHz谐振频率仿真图

(c) Simulation diagram of 24 GHz resonant frequency

图 3 谐振频率仿真图

Fig. 3 Resonant frequency simulation diagram

由式(4)可知,谐振环的平均半径 r、环宽 W_r 发生变化时,谐振频率也会发生变化。耦合间隙 g 的变化也会使谐振环的谐振频率改变,但本文采用弱耦合结构[18],因此耦合间隙 g 对谐振频率的影响可以忽略不计。

本节分析了谐振环电路在 2 GHz 时,平均半径 r、环宽 W_r、耦合间隙 g 的参数仿真结果。

将谐振环的平均半径分别设置为 14.08、14.13、

14.18 mm。谐振环的平均半径参数仿真图,如图 4 所示,平均半径参数的仿真数据如表 3 所示。

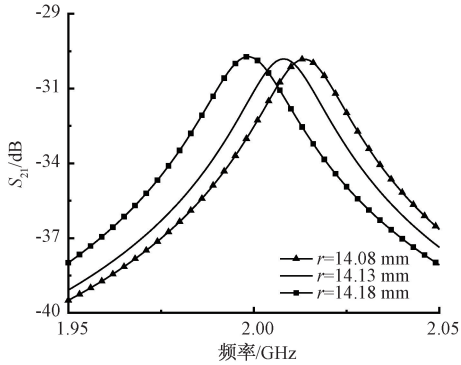


图 4　谐振环平均半径参数仿真图

Fig. 4　Simulation diagram of the average radius parameter of the resonant ring

表 3　谐振环平均半径参数数据

Table 3　Resonant ring average radius parameter data

平均半径/mm	谐振频率/GHz	S_{21}/dB
14.08	2.014	−30.5
14.13	2.008	−30.3
14.18	1.998	−30.1

由仿真结果可知,平均半径每增加 50 μm,谐振频点下降 8 MHz 左右,S_{21} 幅度变化微小,可忽略不计。本次仿真谐波设置为 $n=1$,$f_0=2$ GHz。根据式(1),得到的平均半径约为 14.13 mm。

将谐振环环宽分别设置为 0.50、0.55、0.60 mm。谐振环的环宽参数仿真图,如图 5 所示,环宽参数的仿真数据如表 4 所示。

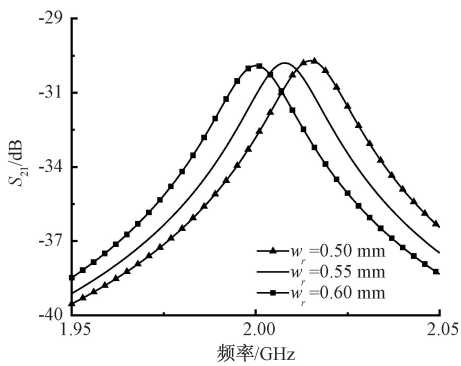


图 5　谐振环环宽参数仿真图

Fig. 5　Simulation diagram of ring width parameters of resonant ring

由仿真结果可知,环宽每增加 50 μm,谐振频点下降 7 MHz 左右,S_{21} 幅度变化微小,可忽略不计。谐振环环宽为 0.50 和 0.60 mm 时,其阻抗分别约为 53、47 Ω,设计过程中需要选择合适的环宽,避免环过宽或过窄对介电常数产生偏差。因此,本设计选择谐振环环宽为 0.55 mm,阻抗约为 50 Ω,此时测试结果更加理想。

表 4　谐振环环宽参数数据

Table 4　Resonant ring width parameter data

环宽/mm	谐振频率/GHz	S_{21}/dB
0.50	2.015	−30.1
0.55	2.008	−30.3
0.60	2.001	−30.4

将耦合间隙分别设置为 0.25、0.35、0.45 mm。耦合间隙参数仿真图如图 6 所示,耦合间隙参数的仿真数据如表 5 所示。

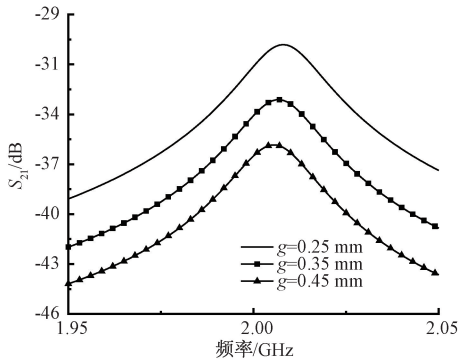


图 6　耦合间隙参数仿真图

Fig. 6　Coupling gap parameter simulation diagram

表 5　耦合间隙参数数据

Table 5　Coupling gap parameter data

耦合间隙/mm	谐振频率/GHz	S_{21}/dB
0.25	2.008	−30.3
0.35	2.008	−33.5
0.45	2.007	−36.2

由仿真结果可知,耦合间隙每增加 50 μm,谐振频点变化微小,可忽略不计。耦合间隙越大,损耗越大。但是耦合缝隙的宽度需要选择恰当,如果耦合间隙过大,则引起的衰减过大;如果耦合间隙过小,谐振环的谐振频率会发生偏移。因此为更方便检测波形,且保证耦合间隙适当,本次设计的耦合间隙为 0.25 mm。

3　谐振环电路实测分析

谐振环电路实物如图 7 所示,实物结构与仿真结构参数一致,谐振环电路长宽尺寸为 58.46 mm×46.20 mm。本文基于以上谐振环结构对国内某款高频板材测试,首先采用 2.4-JFD0830 连接器和安捷伦 E8363C 矢量网络分析仪测出谐振环电路的谐振频率,然后通过式(3)得

到高频板材的介电常数。现场测试图如图 8 所示。

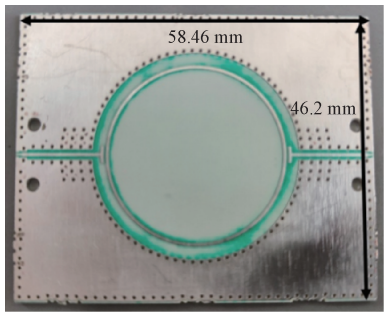


图 7 谐振环电路实物图

Fig. 7 Resonant ring circuit physical diagram

图 8 谐振环测试图

Fig. 8 Resonant ring test chart

本文测试了谐振环电路分别在 2、10、24 GHz 3 个频段的谐振频率曲线,并进行实测与仿真的对比,如图 9 所示。

由表 6 实测与仿真数据对比可知,实测与仿真的结果较为接近,谐振频率的实测数据与仿真数据在 2、10、24 GHz 分别相差 1、8、11 MHz。由实测数据分析,在 2 GHz 频段,谐振环电路测得相对介电常数约为 3.596;在 10 GHz 频段,谐振环电路测得相对介电常数约为 3.607;在 24 GHz 频段,谐振环电路测得相对介电常数约为 3.596。通过仿真与实测的对比可得,采用本文设计的谐振环电路测试板材介电常数,误差范围在±0.007,具有高测试精度。

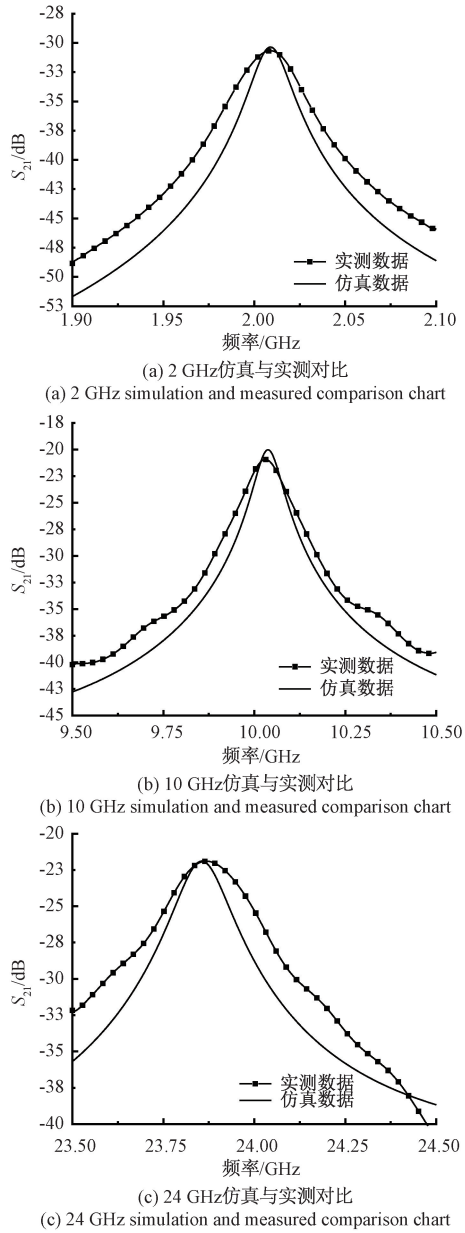
表 6 实测与仿真数据对比

Table 6 Comparison of measured and simulated data

频率	仿真频率/GHz	实测频率/GHz	Δf_0/MHz
2 GHz	2.008	2.009	1
10 GHz	10.038	10.030	8
24 GHz	23.856	23.867	11

4 基于谐振环电路对板材介电常数分布的测试分析

本节基于谐振环电路对板材介电常数的分布进行测试分析。



(a) 2 GHz仿真与实测对比

(a) 2 GHz simulation and measured comparison chart

(b) 10 GHz仿真与实测对比

(b) 10 GHz simulation and measured comparison chart

(c) 24 GHz仿真与实测对比

(c) 24 GHz simulation and measured comparison chart

图 9 仿真与实测的曲线对比图

Fig. 9 Comparison of simulation and measured curves

在高频板材加工过程中,由于不同板材供应商提供的同一种高频板材,通常具备不同的介质厚度和铜箔厚度,而介电常数会随着介质厚度和铜箔厚度的不同而有所变化,甚至铜箔的表面粗糙度,也会对介电常数造成影响[19]。因此板材不同区域的介电常数可能会有一定的偏差,这会在测试过程中,导致谐振点发生偏移,进而影响测试精度。

介电常数在板材中的均匀性分布对器件设计精度具有重要意义。若设计和实际生产中的板材介电常数在不同区域分布有大量的偏差,那么将严重恶化整个系统的

信号完整性[20]。一般来说,加工整块板材的相对介电常数控制在±0.2[21-22],则证明该板材的介电常数分布均匀,板材性能较好。本节基于谐振环电路在高频板材中的分布,检测板材的介电常数分布均匀性。由于加工的精度较高,谐振环电路主要参数与仿真谐振环电路主要参数误差较小,加工误差对介电常数造成影响较小。

本次实验采用一块大小为 190 mm×150 mm 的某国产特制基板材料,将 9 块谐振环电路按图 10 所示的方式进行排列。

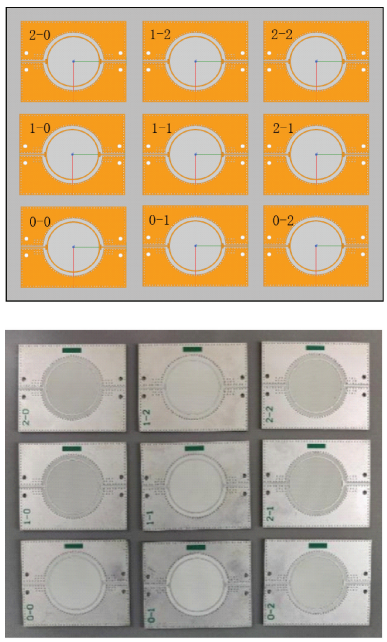


图 10　谐振环电路实物排布图

Fig. 10　Resonant ring circuit physical layout

9 块谐振环电路的实测谐振频率曲线对比如图 11 所示。测试谐振环电路数据表如表 7 所示。

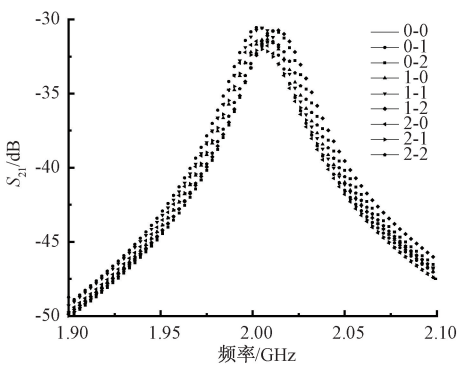


图 11　实测谐振频率曲线对比

Fig. 11　Measured resonance frequency curve comparison

由表 7 可知,9 块谐振环电路平均测试频率为 2.007 GHz,平均相对介电常数为 3.604;上文仿真的谐振环电路谐振频率为 2.008 GHz,相对介电常数为 3.6。对比实测与仿真的谐振频率仅相差 1 MHz,相对介电常数仅相差 0.004。在整块板中,测得与平均谐振频率点偏差最大的为坐标是 1-2 的谐振环电路,与平均谐振频率相差为仅 6 MHz,与平均相对介电常数仅相差 0.024。总的来说,该板材的介电常数分布具有良好的均匀性。

表 7　测试谐振环电路数据表

Table 7　Test resonant ring circuit datasheet

坐标	谐振频率/GHz	S_{21}/dB	相对介电常数
0-0	2.004	-30.8	3.616
0-1	2.003	-30.5	3.620
0-2	2.011	-30.7	3.584
1-0	2.007	-31.3	3.604
1-1	2.005	-30.5	3.612
1-2	2.013	-30.7	3.580
2-0	2.003	-31.4	3.620
2-1	2.004	-32.0	3.616
2-2	2.010	-31.4	3.592

5　结　论

本文设计了一款基频为 2 GHz 的谐振环电路用于高频板材介电常数的检测和均匀性分析,该方法测试频带宽、电磁屏蔽性能好、传输效率高且测试精度高。围绕谐振环电路原理和结构组成,对谐振环电路的设计以及结构参数选择进行详细分析。通过仿真与实测的对比发现,本文设计的谐振环电路符合预期条件,测试板材的介电常数误差范围为±0.004,测试精度高。最后本文分析了板材加工对测试造成的误差,测试板材介电常数分布的均匀性,结果表明加工和板材空间分布造成的介电常数误差小于±0.024,证明板材性能良好。本文设计的谐振环电路在板材中的分布可实现对板材介电常数的检测,控制板材的产品验收、生产控制。

参考文献

[1] 武岳山,于利亚. 介电常数的概念研究[J]. 现代电子技术,2007,30(2):177-179,185.
WU Y SH, YU L Y. Research on the concept of dielectric constant[J]. Modern Electronic Technology, 2007,30(2):177-179,185.

[2] 陈静. 复介电常数及介电常数测量[J]. 光电对抗与无源干扰,1997(4):22-25.
CHEN J. Complex permittivity and permittivity measurement[J]. Electro-Optic Warfare and Radar Passive Countermeasures,1997(4):22-25.

[3] 杨盟辉. 高频 PCB 基材介电常数与介电损耗的特性与改性进展[J]. 印制电路信息,2009(4):27-31.
YANG M H. The dielectrics characteristics of base

materials for high frequency printed circuit boards and the progress in modification[J]. Printed Circuit Information, 2009(4):27-31.

[4] 任水生. 微波板材介电常数 ε 的测量方法[J]. 国外电子测量技术,2014(3):38-41.
REN SH SH. Method about how to measure ε of microwave printed board [J]. Foreign Electronic Measurement Technology,2014(3):38-41.

[5] 王政平,任维赫. 材料复介电常数测量方法研究进展[J]. 光学与光电技术,2011,9(1):93-96.
WANG ZH P, REN W H. Progress in measurement methods of complex permittivity of materials[J]. Optics and Optoelectronic Technology,2011,9(1):93-96.

[6] 刘宏梅,房少军,王强,等. 电路板介电常数测量方法[J]. 大连海事大学学报,2011,37(3):115-119.
LIU H M, FANG SH J, WANG Q, et al. PCB dielectric constant measurement method [J]. Journal of Dalian Maritime University,2011,37(3):115-119.

[7] BAKER-JARVIS J, VANZURA E J, KISSICK W A. Improved technique for determining complex permittivity with the transmission/reflection method [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1990, 38(8): 1096-1103.

[8] 卢子焱, 唐宗熙, 张彪. 用自由空间法测量材料复介电常数的研究[J]. 航空材料学报, 2006, 26(2): 62-66.
LU Z Y, TANG Z X, ZHANG B. Study of using free-space method for measuring complex permittivity [J]. Journal of Aeronautical Materials,2006,26(2):62-66.

[9] 石立华,徐其威,高成,等. 小波建模法在混凝土材料介电常数时域测量中的应用研究[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版),2002,3(6):35-38.
SHI L H, XU Q W, GAO CH, et al. Time-domain measurement of permittivity of concrete materials by wavelet modeling [J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2002,3(6):35-38.

[10] 田步宁,杨德顺,唐家明,等. 传输/反射法测量复介电常数的若干问题[J]. 电波科学学报,2002,17(1): 10-15.
TIAN B N, YANG D SH, TANG J M, et al. Some problems of the transmission/reflection method for measuring complex permittivity of materials[J]. Chinese Journal of Radio Science,2002,17(1):10-15.

[11] 郭富祥,赖展军,薛锋章. 基于微带谐振法的介电常数无损伤测量[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2017,29(3):346-351.
GUO F X, LAI ZH J, XUE F ZH. Nondestructive measurement of permittivity based on microstrip resonance method[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition),2017,29(3):346-351.

[12] TROUGHTON P. Measurement techniques in microstrip[J]. Electronics Letters,1969,5(2):25-26.

[13] 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.

[14] JILANI M T, WEN W P, ZAKARIYA M A, et al. Microstrip ring resonator based sensing technique for meat quality[C]. IEEE Wireless Technology and Applications (ISWTA), 2013, 220-224.

[15] 王娇. 基于谐振环法的微波基材参数的测量技术研究[D]. 苏州:苏州大学,2014.
WANG J. The study of complex permittivity of microwave substrate based on microstrip ring resonator [D]. Suzhou:Soochow University,2014.

[16] CHANG K, HSIEH L. Microwave ring circuits and related structures second edition[J]. IEEE Circuits and Devices Magazine, 2004, 22(4):36-36.

[17] 李殷乔,纪建华,费元春,等. 谐振环测量低温共烧陶瓷介电常数研究[J]. 电子测量与仪器学报,2009, 23(Z1):35-39.
LI Y Q, JI J H, FEI Y CH, et al. Investigation on measurements of LTCC dielectric constant using ring resonator[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation,2009,23(Z1):35-39.

[18] CHANG K, MARTIN S, WANG F, et al. On the study of microstrip ring and varactor-tuned ring circuits[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1987, 35(12):1288-1295.

[19] 董彦辉,张永华. 微波介质基板介电性能测试方法探讨[J]. 印制电路信息,2019,27(9):27-31.
DONG Y H, ZHANG Y H. Discussion on test method for dielectric properties of microwave dielectric substrate[J]. Printed Circuit Information,2019,27(9):27-31.

[20] 葛鹰,刘申兴,朱泳名. 印制电路板高频介电常数测试技术现状分析[J]. 印制电路信息,2012(Z1):60-63.
GE Y, LIU SH X, ZHU Y M. The analysis of high-frequency dielectric constant test of printed circuit boards[J]. Printed Circuit Information, 2012(Z1):60-63.

[21] 杨维生,彭延辉. 微波介质基板材料及选用[J]. 覆铜板资讯,2015:39-45.
YANG W SH, PENG Y H. Microwave dielectric substrate material and selection[J]. CCL Information, 2015:39-45.

[22] 杨维生. 高频印制线路材料之性能/应用和制造指南(二)[J]. 印制电路资讯,2005(2):54-60.
YANG W H. Performance/application and manufacturing guide for high frequency printed wiring materials (2) [J]. Printed Circuit Board Information,2005(2):54-60.

作者简介

刘傲,2020 年于曲阜师范大学获得学士学位,现为南京信息工程大学硕士研究生,主要研究方向为微波技术、电磁兼容。
E-mail: 530415127@qq.com

Liu Ao received his B. Sc. degree from Qufu Normal University in 2020. Now he is a M. Sc. candidate in Nanjing University of Information Science and Technology. His main research interests include Microwave technology and electromagnetic compatibility.

万发雨(通信作者),2005 年于安徽工程大学获得学士学位,2008 年于上海大学获得硕士学位,2011 年于法国鲁昂大学获得博士学位,现为南京信息工程大学教授,主要研究方向为静电放电、电磁兼容、射频测量、负群时延电路等。
E-mail: fayu.wan@nuist.edu.cn

Wan Fayu (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Anhui Polytechnic University in 2005, M. Sc. degree from Shanghai University in 2008 and Ph. D. degree from Université de Rouen Normandie in 2011, respectively. Now he is a full professor in Nanjing University of Information Science and Technology. His main research interests include electrostatic discharge, electromagnetic compatibility, RF measurements and negative group delay circuits.