

PCB材料测试方案：谐振腔和微带线法

材料测试主要测试材料的介电常数和损耗角正切，即 ϵ_k, ϵ_f 测试。当然也有磁导率测试，这里不做讨论。目前市面上有多种测试方法，主要分为传输反射法和谐振腔法两大类。对于高损材料，损耗角正切在0.05以上通常采用传输反射法。对于低损材料，一般采用谐振腔法， ϵ_f 可以测试到0.0002甚至更低。谐振腔种类很多，例如有分离圆柱谐振腔，谐振腔微扰法，准光腔，分离介质谐振腔等。

本文介绍分离介质谐振腔SPDR。将从以下几个方面来阐述。

- ▶ 分离介质谐振腔测试原理和测试方法
- ▶ IEC61189-2-721(GBT 43801-2024)标准解读
- ▶ 罗德与施瓦茨提供的解决方案

应用卡片 | 01.00版

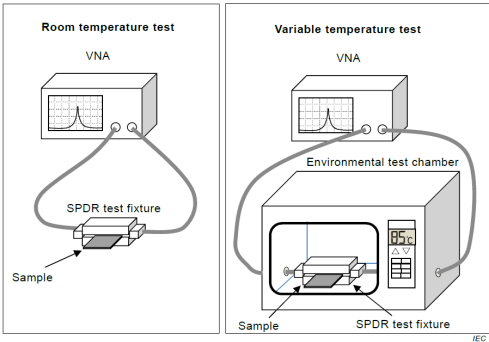
ROHDE & SCHWARZ

Make ideas real

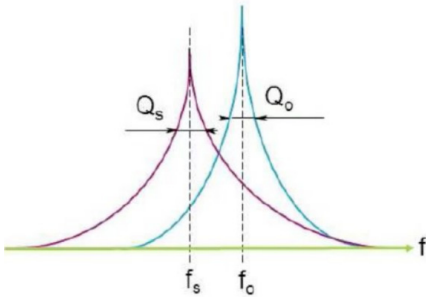


分离介质谐振腔测试原理

测试连接图如下：主要包括矢网以及谐振腔夹具，以及电脑（装有材料测试软件）组成。



先测试空载（未加样品时）的谐振频率 f_0 和品质因数 Q_0 ，然后加载样品，测试有载的谐振频率 f_s 和品质因数 Q_s 。



注：待测材料介电常数越大， f_s 偏离 f_0 越远。曲线越宽，损耗 d_r 越大。

然后根据下列公式提取材料的介电常数和损耗角正切：

$$\epsilon_r = 1 + \frac{f_0 - f_s}{hf_0 K_\epsilon(\epsilon_r, h)}$$

ϵ_r :相对介电常数

h: 待测样品厚度，单位mm

f_0 :空腔谐振频率

f_s :加载样品后的谐振频率

$K_\epsilon(\epsilon_r, h)$ ：是 ϵ_r 和h的函数，采用逐次逼近迭代算法。这里不做详细解释，可查阅相关IEC标准。

$$\tan \delta = \frac{(Q_s^{-1} - Q_{DR}^{-1} - Q_C^{-1})}{P_{es}}$$

$\tan \delta$: 损耗角正切

Q_s : 谐振夹具包含样品的Q值

Q_c : 谐振器金属损耗的Q值

Q_{DR} : 谐振器介质损耗的Q值

ρ_{es} :样品的电磁场能量填充因子。谐振腔的物理尺寸确定后，可以通过电磁场仿真得到 ρ_{es} 。对于固定的谐振腔， ρ_{es} 是个常数。

简单说，目前市面上基本都是通过式谐振腔，即通过测试S21参数方法，得到材料的dk,df。矢网不需要做任何校准。

IEC61189-2-721 (GBT43801-2024) 标准解读

► 适用材料和范围

IEC 61189的这一部分概述了一种方法来确定相对介电常数 (ϵ_r) 和损耗角正切 ($\tan \delta$) (也称为介电常数 (D_k) 和耗散因子 (D_f))，使用SPDR方法测试覆铜层压板或介电基材（或陶瓷等）在微波频率（从1.1 GHz到20 GHz）的材料属性。

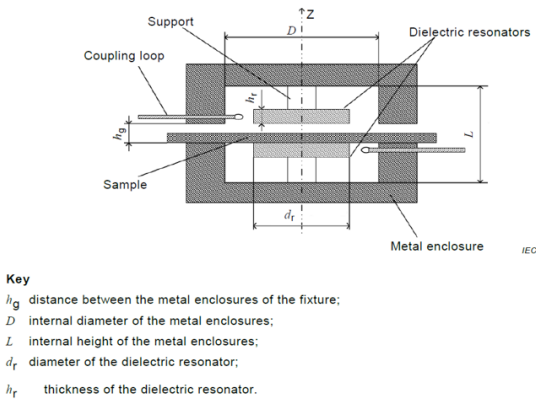
► 对矢网要求

500 MHz到20 GHz，动态范围大于60 dB

► 空腔矢网S参数要求

S11和S22对称，S21谐振峰值在-40 dB到-45 dB之间。SPAN是谐振曲线3 dB带宽的110%到200%（SPAN要求对加载样品矢网也适用）

► SPDR测试夹具结构图



► 不同频段下的SPDR测试夹具尺寸要求

SPDR test fixture's nominal frequency GHz	D mm	h_g mm
1.1	120	6,0
3	50	3,0
5 to 6	30	2,0
9 to 10	22	0,9
13 to 16	15	0,6
18 to 20	10	0,5

► 不同频段下的SPDR测试夹具对样品的要求

SPDR test fixture's nominal frequency GHz	Supported specimen sizes mm	Maximum thickness of specimens mm
1.1	150 × 150	6,0
3	80 × 80	3,0
5 to 6	80 × 80	2,0
9 to 10	80 × 80	0,9
13 to 16	50 × 35	0,6
18 to 20	15 × 15	0,5

注：样品厚度说明：测试夹具高度限制内，越厚测试误差越小。对于特别薄的样品，可以多层stack到0.4 mm以上。

备注：样品和夹具之间的空气间隙不影响测试精度。

罗德与施瓦茨提供的解决方案

罗德提供矢量网络分析仪，配合第三方的SPDR夹具，为客户提供相关材料测试解决方案。

- ▶ 样品标准验证件
单晶石英
- ▶ 深弓千分尺精度要求（样品加工尺寸测量）
分辨率优于0.001 mm
- ▶ 循环温箱（circulating oven）
105°C（+5/-2°C）
- ▶ 环境测试室（Test Chamber，用于变温测试）
-125°C到+110 °C（或者供应商和用户约定的其他温度），温度设置数值和实际温度相差±1°C，到达设置温度后，保持15分钟以上。
- ▶ 常温测试
样品测试前，在环境23°C±2°C，相对湿度（50±5）%下超过24小时。注：如果样品被蚀刻或暴露在潮湿环境，需要在105°C（+5/-2°C）循环温箱干燥2小时

▶ 测试精度要求

$$\Delta\epsilon/\epsilon = \pm(0,0015+\Delta h/h).$$

$$\Delta\tan\delta = \pm 2 \times 10^{-5} \text{ or } \pm 0,03 \tan\delta$$

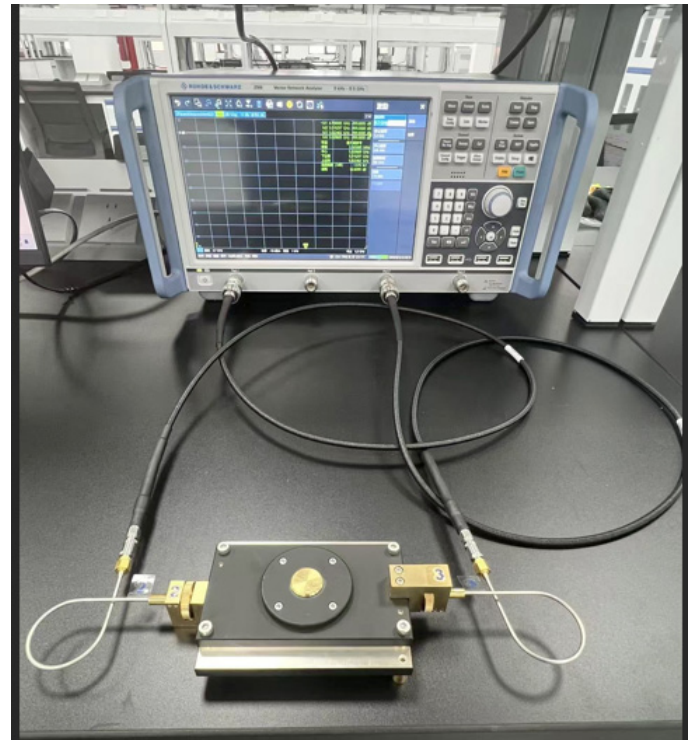
(两者取大的一个)

▶ 室温测试报告

- 测试环境（温度，湿度）
- 测试频率
- 测试频率下的相对介电常数和损耗角正切数值
- 样品类型，尺寸，厚度等
- 测试数据是否异常

▶ 变温测试报告

- 测试温度（T）和参考温度（Tref）
- 测试频率
- 测试频率和测试温度下的相对介电常数和损耗角正切数值
- 测试频率和参考温度下的相对介电常数和损耗角正切数值
- 介电常数TC和损耗角正切TC 备注：TC：温度系数
- 如果多个温度测试，需要画出相对介电常数VS温度变化以及损耗角正切数值VS温度变化曲线
- 样品类型，尺寸，厚度等
- 测试数据是否异常



提供的矢网产品系列如下：

ZNLE系列：

100 KHz到3 GHz/4.5 GHz/6 GHz/14 GHz/18 GHz

ZNL系列：

5 KHz到3 GHz/4.5 GHz/6 GHz/14 GHz/20 GHz

ZNB3000系列：

9 KHz到4.5 GHz/9 GHz/20 GHz/26.5 GHz

ZNA系列：

10 MHz到26.5 GHz/43.5 GHz/50 GHz/67 GHz



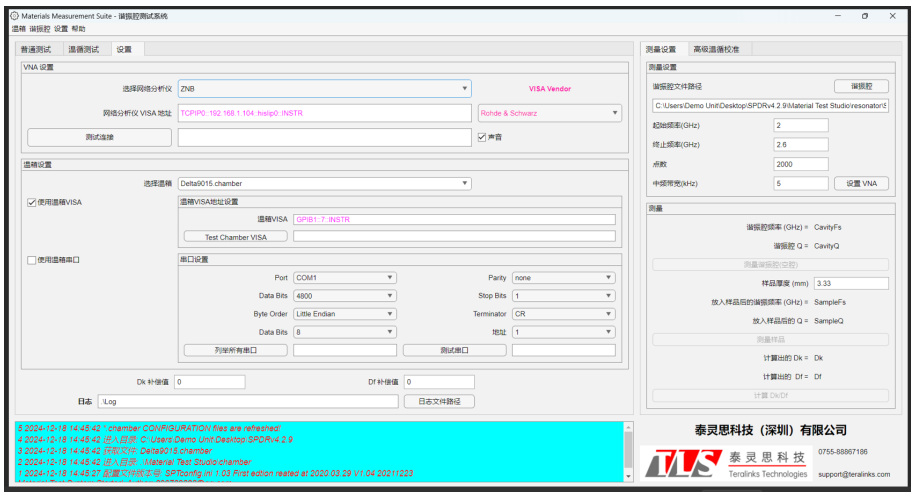


图1：软件控制仪表界面：



图2：软件常温测试设置界面：

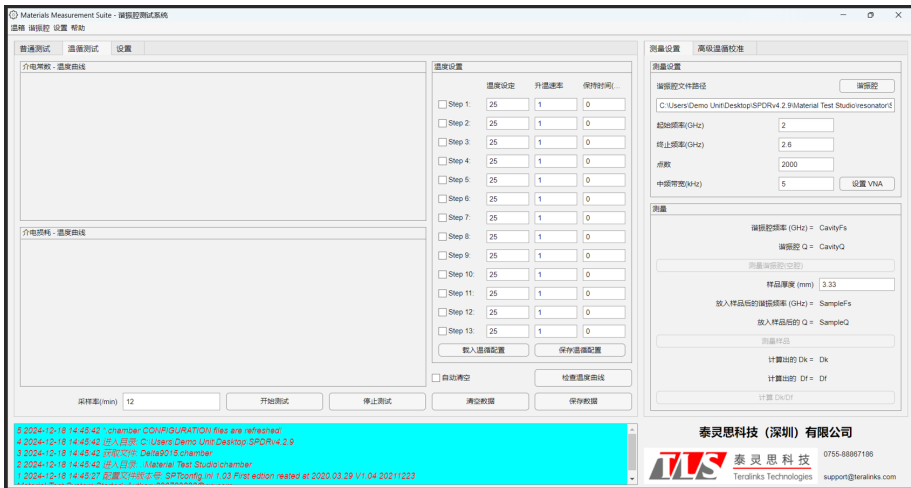


图3：软件变温测试设置界面：

罗德与施瓦茨 (中国) 科技有限公司
800-810-8228 400-650-5896
info.china@rohde-schwarz.com
www.rohde-schwarz.com.cn

官方微信



官方视频号



环境承诺

- ▶ 能效产品
- ▶ 持续改进环境现状
- ▶ 有保证的ISO 14001环境管理体系

R&S®是罗德与施瓦茨公司注册商标
商品名是所有者的商标 | 中国印制
2025年8月 | PCB材料测试方案：谐振腔和微带线法
文件中没有容限值的数据没有约束力 | 随时更改