是德科技

材料特性测试方案介绍

李萌，蒋修国，王兵

2022年7月

目录

一．材料测试介绍 3

二．材料测试方法概述 5

三．是德科技材料测试方案 5

1. 平行板法 5
2. 电感法 8
3. 同轴探头法 11
4. 传输线法 14
5. 自由空间法 17
6. 谐振腔法 19

四． 一些新的测试方案 24

1. Swissto12 MCK 24
2. FS-330 27
3. 使用 ADS 提取 PCB 的介电常数（Dk）和介质损耗角（Df） 30

五．总结 32

参考资料 32

一．材料测试介绍

我们生活的世界都是由物质组成的，每一种物质都有其独特的特性。而在电子设计以及测量领域，研究者或者工程师们更多地是关注每一种材料其独特的电磁特性，也即物质与外加电场或磁场相互作用的介电特性或者介磁特性。很多时候，材料电磁特性的好坏，直接影响到成品或最终产品的性能高低，正所谓“巧妇难为无米之炊”。精确地测量材料性能，可以为研究者和工程师提供更有价值的信息，以便将材料正确地应用在预期的场景中，来实现更符合预期的设计，或者检测制造工艺从而控制产品的质量等。材料的电磁特性测量可以对许多电子应用提供关键的设计参数信息。例如，电缆的损耗，基板的阻抗等。人们还发现，在航空航天，汽车电子，食品安全以及医疗行业的最新应用也得益于对材料电磁特性的准确了解。

所谓材料的电磁特性测量，主要包括介电材料和磁性材料的测试，常用的参数包括介电常数如ε_r'，ε_r"，损耗角正切 tanδ ，磁导率如μ_r'，μ_r" 等。当然，大部分的测试都需要满足一定的规范要求，目前流行的规范要求主要有 IPC (主要针对电路板行业)的标准和 ASTM (美国材料与试验协会）的标准等。

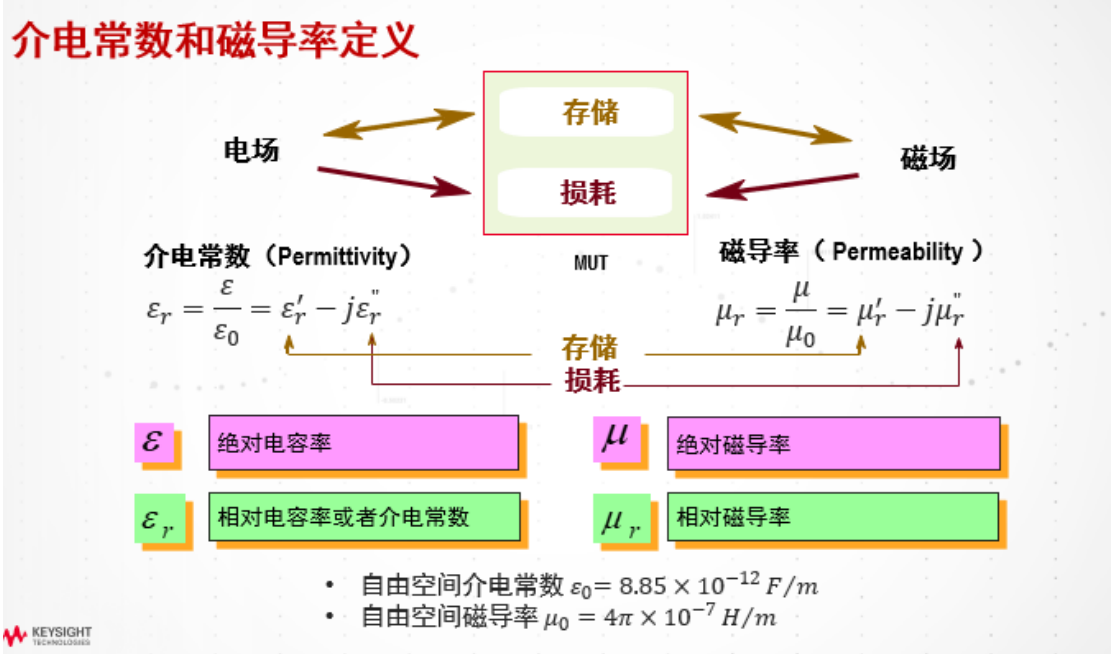


图 1. 介电常数和磁导率的定义

如果一种材料在施加外部电场时能够储存能量，则该材料被归类为“电介质”。而介电常数就是用来描述电介质与外加电场之间相互作用的物理参数。我们通常说的介电常数指的是

相对介电常数，或者是绝对介电常数相对于自由空间介电常数之比，如图 1 所示。介电常数是一个复数，实部ε_r'是衡量材料中储存外部电场能量的表征；虚部ε_r"则是衡量材料对外部电场的耗散程度。而当用矢量图来描绘复介电常数的时候，如图 2 所示。介电常数ε_r与实轴ε_r'夹角的正切值就是我们经常提到的介质的损耗角正切或者耗散因子。我们通常说的 Dk 值就是复介电常数的实部ε_r'，Df 则是指损耗角正切。

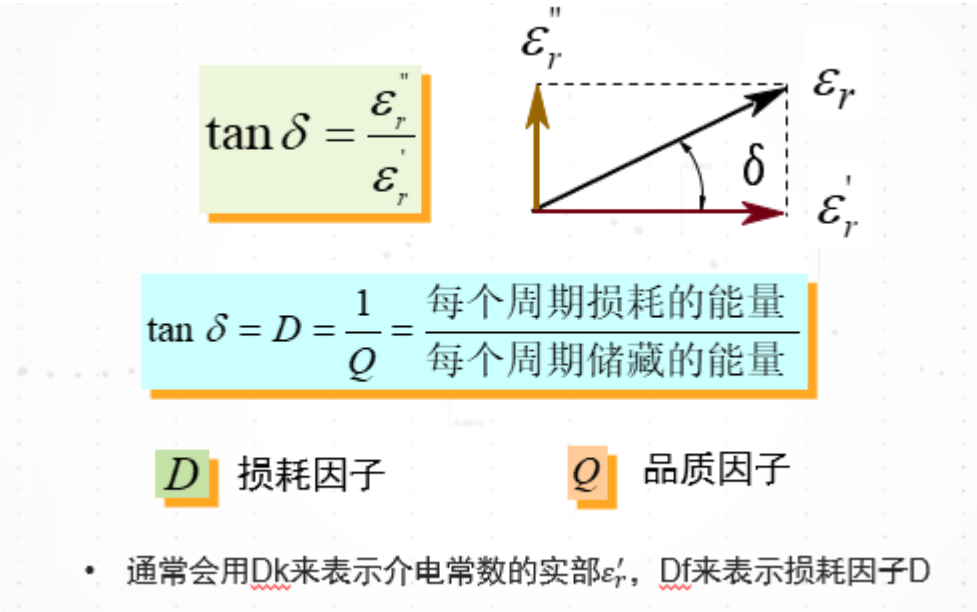


图 2. 损耗角正切定义

而磁性材料一般利用磁导率来衡量其与外加磁场相互作用的能力。同介电常数一样，我们一般说的磁导率也是复数，指的是相对磁导率的大小。实部μ_r'表征材料和外加磁场之间作用时储能的大小，虚部μ_r"表征耗能大小，如图 1 所示。同样磁性材料的损耗角正切的定义也是复磁导率虚部与实部之比。

材料的电磁特性测量对于各种工业的应用是非常重要的。是德科技可以提供用于材料介电特性，磁导率测量的全套解决方案，包括测试仪表、夹具及测量分析软件。其中测试仪表根据频率以及被测材料特性的不同，可以选择阻抗分析仪或者网络分析仪；同样对于材料测试夹具，是德科技也提供多种不同的解决方案，包括同轴探头、同轴/波导传输线，平行板法，谐振腔法等；而是德科技 N1500A 材料测试软件则可以提供多种材料测试方法的软件操作控制测量界面，极大地方便了以及丰富了客户的不同需求。

二．材料测试方法概述

是德科技能够提供多种材料测试整体方案，那么究竟要选择哪种测试方案呢？则需要根据不同的需求来综合考量。

在选择测试方法时，需要考虑如下问题：

- 频率范围
- 测试参数
- 测试精度
- 材料特性（例如，是否均匀）
- 材料的形态（例如，液体，粉末，固体，片状平面材料等）
- 样品尺寸的限制
- 测试方法是否对材料产生破坏
- 测试方法是否接触材料
- 测试温度
- 成本

那么下面，就详细列举是德科技不同的材料测试方案。

三．是德科技材料测试方案

1. 平行板法

- 频率范围：20Hz~1GHz
- 测试参数：介电常数
- 参考精度：ε_r'：±1%，tanδ：±5%
- 样品要求：片状样品，厚度均匀已知；搭配夹具 16452A 可以测试液体。

当测试频率小于 1GHz 的时候，平行板法不失为一种简单，方便，性价比高的测试方案。平行板法，在 ASTM 标准 D150 中又被叫做三端法，需要将片状被测材料夹在两个电极中或者将液体材料注入到平行板容器中从而形成一个电容器，使用阻抗分析仪测得电容的大小进而计算出材料的介电常数以及损耗等参数，如图 3 所示。

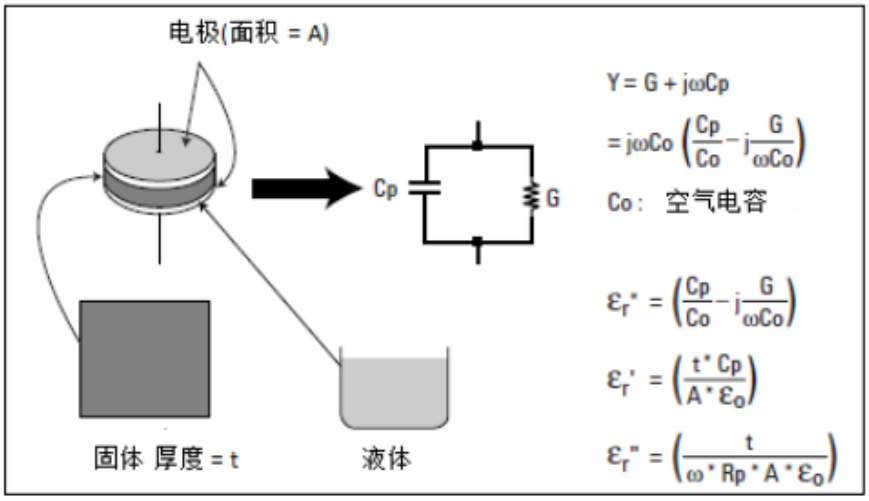


图 3. 平行板法测介电常数原理

平行板法完整的方案需要利用阻抗分析仪来测量阻抗值，利用材料测试软件完成介电常数以及损耗等参数的计算和读取，以及根据被测材料的不同特性来选择测试夹具。是德科技能够提供不同频率覆盖，不同被测材料特性的完整平行板法方案，详述如下。

当测试频率为 20Hz~30MHz 时，可以选用是德科技 E4990A 阻抗分析仪，以及平行板法测试夹具 16451A，搭配 N1500A 材料测试软件，就可以测试材料的介电常数等参数，如图 4 所示。

电极类型	材料直径	材料厚度	电极直径
A	40mm – 56mm	t ≤ 10mm	38mm
B	10mm – 56mm	t ≤ 10mm	5mm
C	56 mm	t ≤ 10mm	5 – 50 mm
D	20 mm – 56 mm	t ≤ 10mm	5 – 14 mm

图 4. 阻抗仪 E4990A 与 16451B 利用平行板法测介电材料

同样搭配液体测试夹具 16452A，则可以方便地测试液体的介电特性，如图 5 所示。

图 5. 阻抗仪 E4990A 与 16452A 利用平行板法测液体介电特性

当测试频率介于 1MHz~1GHz 时，则可以选择是德科技 E4991B 阻抗分析仪，以及平行板法材料测试夹具 16453A，同样搭配 N1500A 材料测试软件，可以测试片状材料的介电常数等，如图 6 所示。

图 6. 阻抗仪 E4991B 与 16453A 利用平行板法测片状材料

是德科技提供完整的平行板法测试方案，下面给出一些具体的参考配置。

E4990A+16451B/16452A 参考配置			
项目	**型号**	**描述**	**数量**
平行板法夹具 （根据需求选配）	16451B	平行板法夹具	1
	16452A	液体测试夹具	1
测试软件	N1500A	材料测试软件套件	1
	N1500A-006	平行板法测试选件（最高 120MHz）	1
	N1500A-UL8	USB Key	1
阻抗分析仪	E4990A	自动平衡电桥阻抗分析仪	1
	E4990A-030	30MHz 频率选件（或者更高频率选件）	1

E4991B+16453A 参考配置			
项目	**型号**	**描述**	**数量**
平行板法夹具	16453A	平行板法夹具	1
测试软件	N1500A	材料测试软件套件	1
	N1500A-005	平行板法测试选件（最高 1GHz）	1
	N1500A-UL8	USB Key	1
阻抗分析仪	E4991B	射频 IV 法阻抗分析仪	1
	E4991B-100	1GHz 频率选件（或者更高频率选件）	1

◆ 平行板法测试材料方案总结：

平行板法的优势有适合平板材料，薄膜材料；整体方案价格经济；精度较高；操作简单等。但是该方法测试频率最高只到 1GHz，且不支持磁性材料的测试。

2. 电感法：

- 频率范围：1kHz~1GHz
- 测试参数：磁导率
- 参考精度：μ_r'：±5%，tanδ：±5%
- 样品要求：磁环材料

磁性材料磁导率的测试可以利用电感法得出：在环形磁芯周围缠绕一些导线，并测量得到导线两端的电感量，从而得出相对磁导率。是德科技 16454A 正是利用这一原理，当将磁

性材料（被测磁环）放入其中，16454A 就形成了一个单匝电感，利用阻抗分析仪来测出其电感量以及电阻值等阻抗参数，最终可以计算出磁导率以及损耗角正切等参数值，如图 7 所示。

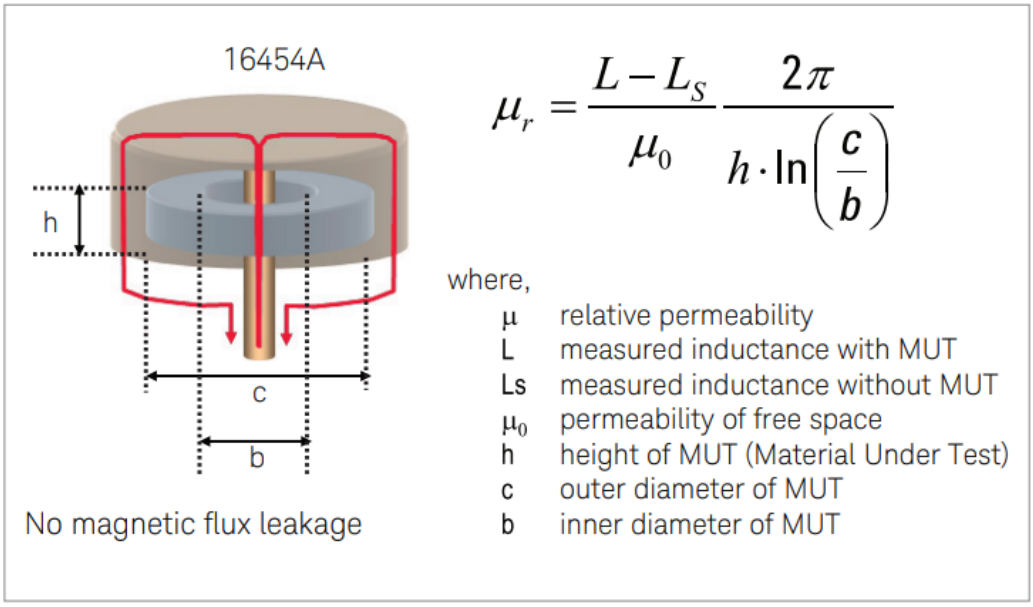


图 7. 16454A 电感法测磁导率原理

是德科技电感法测试磁导率完整方案，包括阻抗分析仪，磁导率测试夹具 16454A 以及材料测试软件 N1500A。下面就列出不同频率下不同的电感法测磁导率方案。

当测试频率为 1kHz~120MHz 时，磁导率测试夹具 16454A 可以搭配是德科技 E4990A 阻抗分析仪，以及 42942A 测试座和 N1500A 来完成磁导率的测试，如图 8 所示。

图 8. E4990A 搭配 16454A 进行磁导率测试

当测试频率为 1MHz~1GHz 时，则磁导率测试夹具 16454A 可搭配是德科技更高频率阻抗分析仪 E4991B 以及 N1500A 来进行磁导率的测试，如图 9 所示。

图 9. E4991B 搭配 16454A 进行磁导率测试

是德科技电感法测试磁导率两种典型参考配置如下。

基于 E4990A 的低频参考配置方案（1KHz-120MHz）

E4990A+42942A+16454A 参考配置			
项目	**型号**	**描述**	**数量**
电感法夹具	16454A	平行板法夹具	1
测试软件	N1500A	材料测试软件套件	1
	N1500A-005	平行板法测试选件（最高 120MHz）	1
	N1500A-UL8	USB Key	1
阻抗分析仪	E4990A	自动平衡电桥法阻抗分析仪	1
	E4990A-120	120MHz 频率选件（必须选 120 选件）	1
测试附件	42942A	4TP 转 7mm 接口夹具	1
	42942A-700	7mm 校准件	1

基于 E4991B 的参考配置方案（1MHz-1GHz）

E4991B+16454A 参考配置			
项目	**型号**	**描述**	**数量**
电感法夹具	16454A	平行板法夹具	1
测试软件	N1500A	材料测试软件套件	1
	N1500A-006	平行板法测试选件（最高 1GHz）	1
	N1500A-UL8	USB Key	1
阻抗分析仪	E4991B	射频 IV 法阻抗分析仪	1
	E4991B-100	1GHz 频率选件（或者更高频率选件）	1

◆ 电感法测试材料方案总结:

电感法的优势有整体方案价格经济;精度较高;操作简单等。但该方法测试频率不够高,且仅支持磁性材料的测试。

3，同轴探头法

- 频率范围：200MHz~50GHz（搭配网络分析仪）；10MHz-3GHz（搭配阻抗仪）
- 测试参数：介电常数
- 参考精度：ε_r'：$\pm 5\%$，tanδ：± 0.05
- 样品要求：表面平整的固体，液体或者粉末材料；要求厚度> $20/\sqrt{\varepsilon_r}$；不适合 ε_r'太大以及 tanδ 太小的材料。

同轴探头法可以测试表面光滑且厚度较高的片状固体材料，液体材料，粉末材料等。该测试方法利用开路式的同轴探头，测试时将探头浸入到液体或者接触光滑固体平面，高频信号将入射在探头与被测材料的接触面，在这一界面上，高频信号的反射特性 S11 将会因为材料的介电常数而发生变化，如图 10 所示。这时可以通过网络分析仪测得 S11，再计算出被测材料的介电常数与损耗角正切等参数。

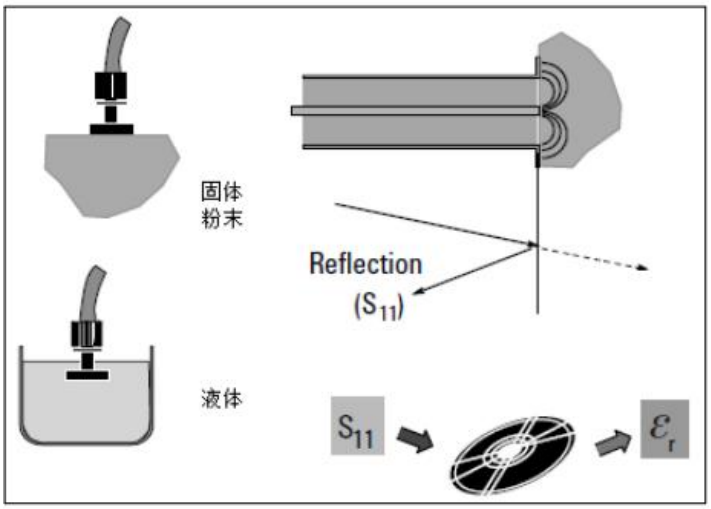


图 10. 同轴探头法测试原理

是德科技同轴探头主要有如图 11 所示的三种。分别是纤细探头，适合液体和粉末测试；高性能探头，适合厚度较高的固体以及液体测试；以及高温探头，能够在–40°C 至 +200°C 的范围内测试被测材料的介电特性。其中的高温探头如果配合阻抗分析仪 E4991B，低频可以拓展到 10MHz。

探头类型	频率范围	温度范围	适合材料	精度
纤细探头 Slim Form Probe	500MHz – 50GHz	0 To +125°C	液体； 粉末	ε_r': ±5% tanδ: ±0.05
高性能探头 Performance Probe	500MHz – 50GHz	-40 To +200°C	液体； 固体(光滑平整表面)	
高温探头 High Tempreture Probe	200MHz – 20GHz	-40 To +200°C	液体； 固体(光滑平整表面)	

图 11. 是德科技同轴探头分类

在 200MHz~50GHz 频率范围内，同轴探头法测试系统包括同轴探头，矢量网络分析仪以及材料测试软件，如图 12 所示。

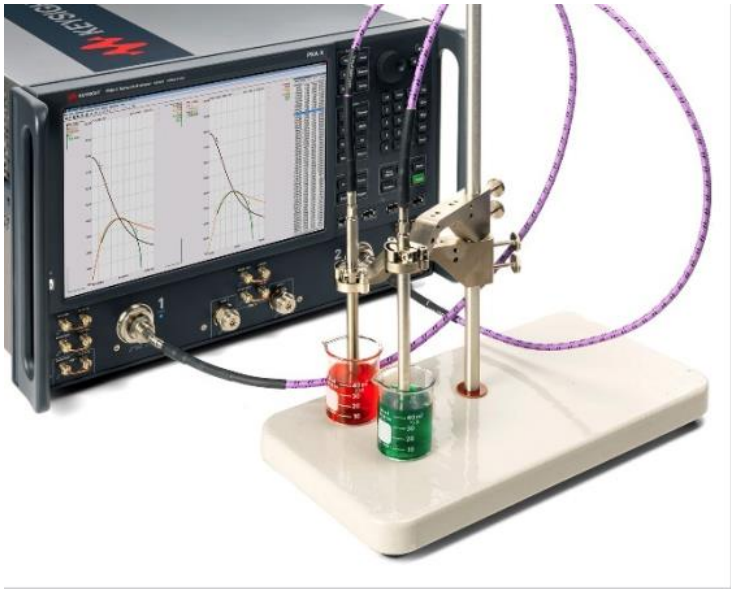


图 12. 同轴探头法配合网络仪测试液体材料介电特性

而在 10MHz~3GHz 的频率范围内，是德科技同轴探头还可以搭配阻抗分析仪 E4991B 以及测试软件来完成低频的材料测试功能覆盖。是德科技可以提供完整的同轴探头法方案，参考配置如下。

搭配网络分析仪同轴探头法参考配置			
项目	**型号**	**描述**	**数量**
同轴探头以及配件 （根据测试需求选配）	N1501A	同轴探头套件	1
	N1501A-101	高温探头	1
	N1501A-102	纤细探头	1
	N1501A-104	高性能探头	1
	N1501A-001	胡桃木储物盒	1
	N1501A-002	探头支架	1
	N1501A-003	探头支架固定装置	1
	N1501A-004	ECAL 支架	1
	N1501A-005	高性能探头以及纤细探头固定装置	1
测试软件	N1500A	材料测试软件套件	1
	N1500A-004	探头法测试选件	1
	N1500A-UL8	USB Key	1
网络分析仪（这里只列出了	N5225B	50GHz PNA 高性能网络分析仪	1

PNA 的情况，其他平台网分亦可）	N5225B-200	2 端口基础配置	1
测试附件	ECAL	为了更好地去除线缆的影响（可选的）	1
	线缆转接头	根据不同的网分接口相应配置	若干

搭配阻抗分析仪同轴探头法参考配置			
项目	**型号**	**描述**	**数量**
同轴探头以及配件 （根据测试需求选配）	N1501A	同轴探头套件	1
	N1501A-101	高温探头	1
	N1501A-001	胡桃木储物盒	1
	N1501A-002	探头支架	1
	N1501A-003	探头支架固定装置	1
	N1501A-004	ECAL 支架	1
测试软件	N1500A	材料测试软件套件	1
	N1500A-004	探头法测试选件	1
	N1500A-UL8	USB Key	1
阻抗分析仪	E4991B	射频 IV 法阻抗分析仪	1
	E4991B-300	3GHz 频率选件	1
	E4991B-010	探头连接套件	1
测试附件	转接头和线缆	根据具体情况配置	若干

◆ 同轴探头法测试方案总结：

同轴探头法的优势有覆盖频率范围宽；适合固体，液体，半固体材料的测试；易于使用，只需压在固体材料表面或浸没在液体中即可；对被测材料无破坏等。但该方法不适合 ε_r‘ 太大以及 tanδ 太小的材料；并且对被测材料厚度有一定的要求，要求厚度> $20/\sqrt{\varepsilon_r}$（单位 mm）；固体材料要求表面要足够平整光滑；测试精度有限且不能测试磁性材料。

4. 传输线法

- 频率范围：100MHz~110GHz
- 测试参数：介电常数，磁导率

- 参考精度：ε_r'：±2%，tanδ：±0.02
- 样品要求：可以进行机械加工尺寸形状的样品（环状或者矩形块状）；表面光滑，并且两个端面与传输线的轴线垂直；样品长度和测试频率相关。

传输线法是将被测材料置于封闭传输线中，传输线可以是同轴传输线或者矩形波导。通过利用网络分析仪测试高频信号激励下传输线的反射特性 S11 和传输特性 S21，从而得到材料的介电常数以及磁导率等结果，如图 13 所示。

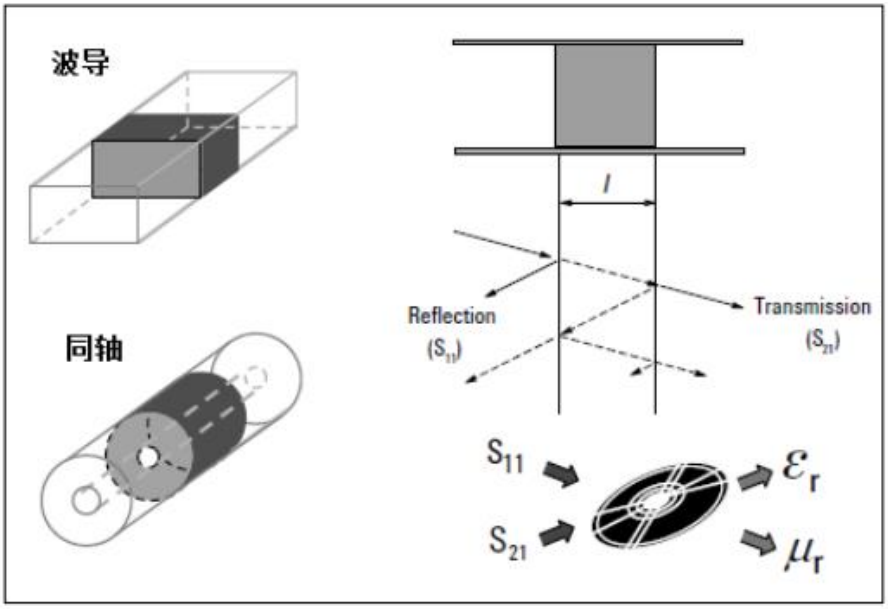


图 13. 传输线法测试介电常数和磁导率原理

同轴传输线可以覆盖 18GHz 以下的比较宽的频率范围，但是环状样品制作相对困难；波导传输线可以将测试频率延伸至毫米波波段，且矩形样品比较容易加工，但是由于波导传输线本身的频率覆盖都是分段的，所以利用波导传输线测试材料的频率覆盖也都是分段的。同轴传输线，波导传输线以及样品加工形状的实物图如图 14 所示。

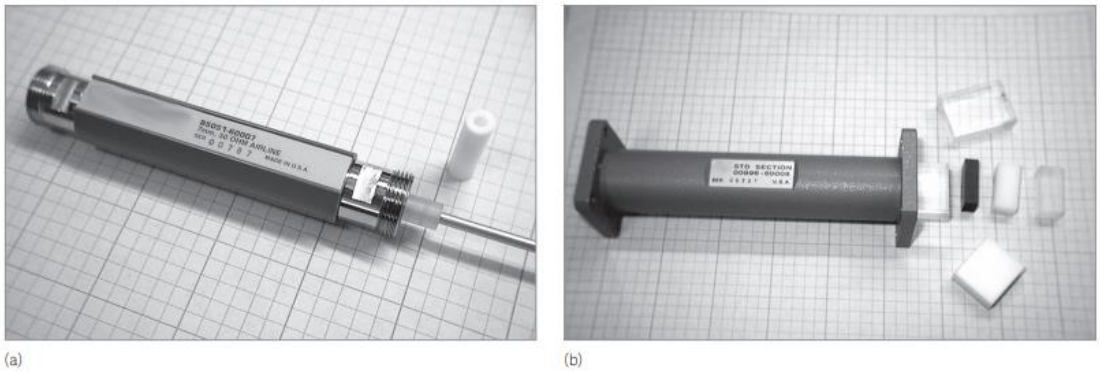


图 14. 传输线实物图

传输线法测试材料总体需要传输线夹具，矢量网络分析仪以及材料测试软件。是德科技能够提供完整的传输线法测试方案，参考配置如下。

传输线法参考配置			
项目	**型号**	**描述**	**数量**
同轴传输线及附件	85051BR03	7mm 同轴传输线	1
	85132F	3.5mm-7mm 测试电缆套件（2 根）	1
	85050D	7mm 机械校准件	1
波导传输线及附件（根据需求选择）	X11644A	WR 90 波导校准件（内含波导传输线）	1
	P11644A	WR 62 波导校准件（内含波导传输线）	1
	K11644A	WR 42 波导校准件（内含波导传输线）	1
	R11644A	WR 28 波导校准件（内含波导传输线）	1
	Q11644A	WR 22 波导校准件（内含波导传输线）	1
	U11644A	WR 19 波导校准件（内含波导传输线）	1
	V11644A	WR 15 波导校准件（内含波导传输线）	1
	W11644A	WR 10 波导校准件（内含波导传输线）	1
	线缆与转接头	需要根据不同频率网分和波导传输线配置线缆以及同轴转波导转接头	若干
测试软件	N1500A	材料测试软件套件	1
	N1500A-001	传输线和自由空间法测试选件	1
	N1500A-UL8	USB Key	1
网络分析仪（这里只列出了 PNA 的情况，其他平台网分亦可）	N5225B	50GHz PNA 高性能网络分析仪	1
	N5225B-200	2 端口基础配置	1

◆ 传输线法测材料总结：

传输线法的优势有覆盖频率范围宽；夹具相对简单且可以有多种传输线可选；可以测试介电材料和磁性材料。但该方法需要材料能够被机械加工成需要的尺寸，且材料尺寸的加工精度直接影响测试结果；并且不适合低损耗材料，液体材料以及薄膜材料等的测试；波导传输线的测试结果只能覆盖一段频率范围等。

5. 自由空间法

- 频率范围：5GHz~330GHz
- 测试参数：介电常数，磁导率
- 参考精度：ε_r'：±2%，tanδ：±0.02
- 样品要求：扁平状样品，通常低频时需要大尺寸平面，平坦，均匀，厚度已知

自由空间法利用天线将微波能量聚集或者穿过被测材料，这种测试方法将被测材料置于天线之间，通过测量传输 S21 或者反射 S11 的高频信号得到材料的介电常数ε_r和磁导率μ_r，如图 15 所示。

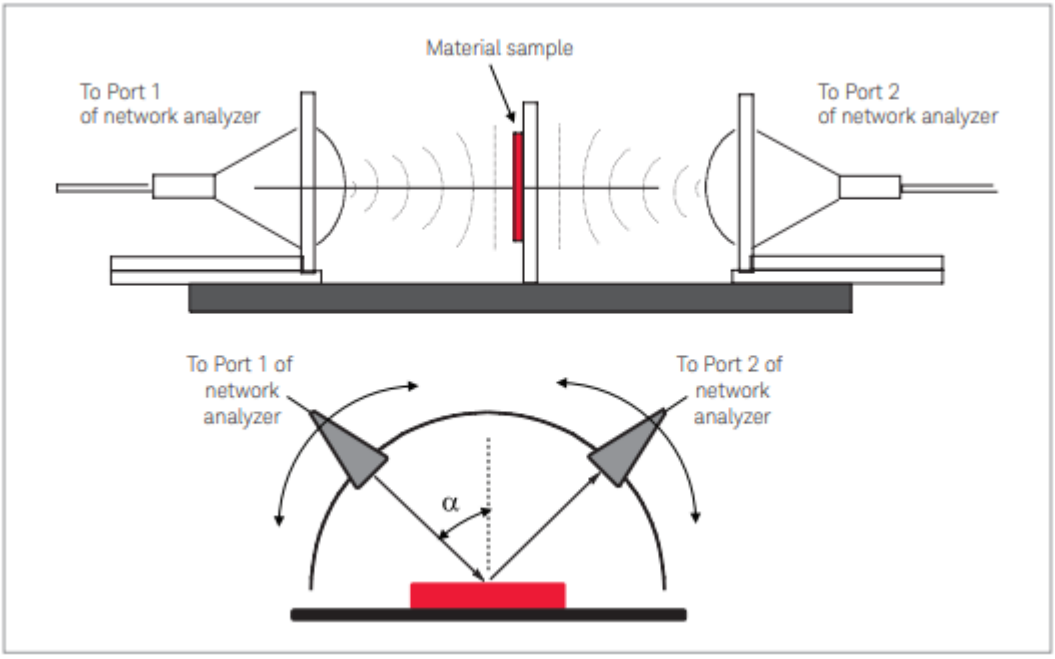


图 15. 自由空间法测试示意图

自由空间法测量需要精确测量高频信号通过样品的反射以及传输特性，但是样品边缘的反射以及天线之间的多次剩余反射都会影响测量的精度，所以校准网络分析仪在自由空间法测试材料中是一项有挑战性的工作。一般可以采用 TRL(直通,反射以及传输线)的校准方式。是德科技 N1500A 提供的 GRL(时间门,反射以及传输线)校准方式，将测试端口校准到自由空间平板校准件的端面处，然后再得到被测件的准确 S 参数，从而得到材料的电磁特性。

自由空间法是一种非接触测量方法，因此也非常适合需要在高温环境下进行的材料测量。通常可以将待测材料放置在一个带有“窗口”的隔热材料箱中，被测材料在箱中可以被加热，而隔热材料对于微波信号来说是“透明的”。这样就可以得到不同温度下的材料特性，如图 16

所示。

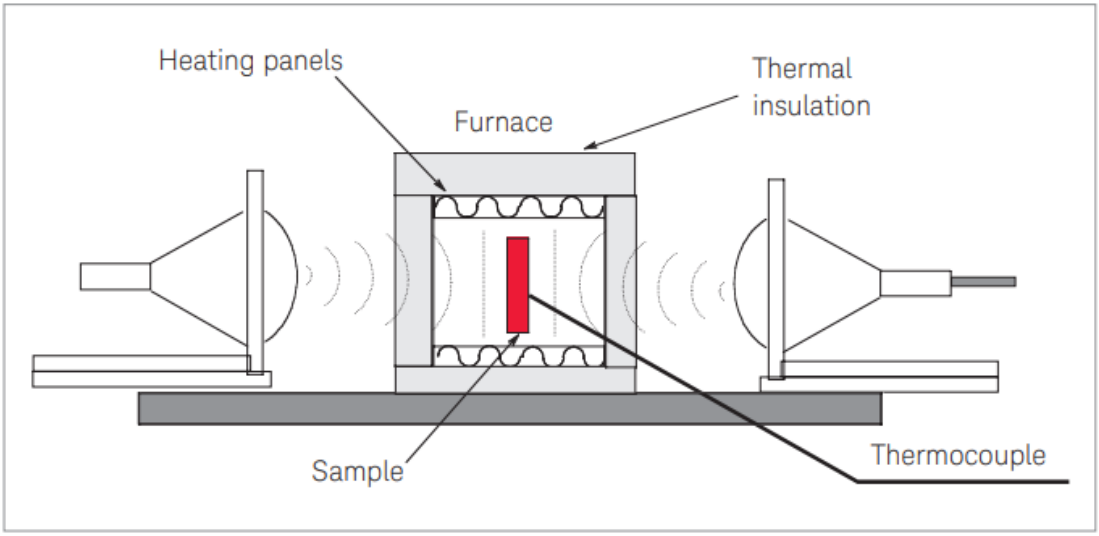


图 16. 自由空间法高温测试示例

是德科技典型的自由空间法测试方案配置举例如下。

自由空间法参考配置			
项目	**型号**	**描述**	**数量**
测试附件	天线，校准板，线缆等	天线以及线缆需要根据频率等来进行选择,一般需要 partner 提供。	若干
测试软件	N1500A	材料测试软件套件	1
	N1500A-001	传输线和自由空间法测试选件	1
	N1500A-UL8	USB Key	1
网络分析仪 （这里只列出了 PNA 的情况，其他平台网分亦可）	N5225B	50GHz PNA 高性能网络分析仪	1
	N5225B-200	2 端口基础配置	1
	S93010	时域选件，用来进行 GRL 校准	1
	校准件	ECAL 或者机械校准件	1

◆ 自由空间法测试材料总结:

自由空间法测试材料是一种非接触式的，对材料非破坏；适合于高温测试；可以测量介电材料和磁性材料等；但是该方法也有一些局限性，比如整个测试系统需要特制校准件以及 GRL 等校准方法来进行校准；被测样品与天线的距离需要精确控制；不能测试低损耗材料等。

6. 谐振腔法

- 频率范围：不同的谐振腔测试频率不同。总的来说可以覆盖 1.1G~80GHz 之间的标志性频点（一个谐振腔对应一个频点）；多频点谐振腔可以覆盖 10G~110GHz 频率范围。
- 测试参数：介电常数
- 参考精度：依赖所选谐振腔，比如 SPDR 精度：ε_r':±(0.0015 + Δh/h)；tanδ：$2*10^{-5}$ 。
- 样品要求：片状，且厚度均匀已知

一般对于 PCB 基板的测试，多采用谐振腔法，因为谐振腔法可以提供非常高的损耗正切测量精度，所以特别适合印刷电路板以及高分子材料的测试等。传统的谐振腔法大多都是单点频的测试。

这种测试方法利用谐振腔在加入被测材料前后的谐振频率变化以及品质因数的变化来得到材料的介电常数等参数。大部分的谐振腔测试都是遵循美国材料测试协会的标准 ASTM D2520 腔体微扰法进行测量的。腔体微扰法在测量过程中，首先测量空腔的中心频率f_c以及品质因数Q_c,然后插入样品后再次测量加载样品后的中心频率f_s以及有载品质因数Q_s。再通过如下公式，计算出介电常数和损耗。其中V_c为空腔体积，V_s为样品体积。

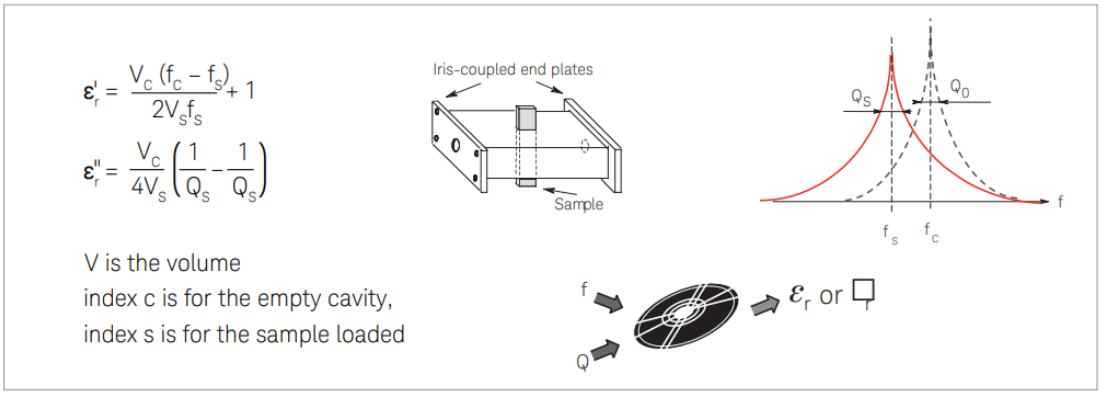
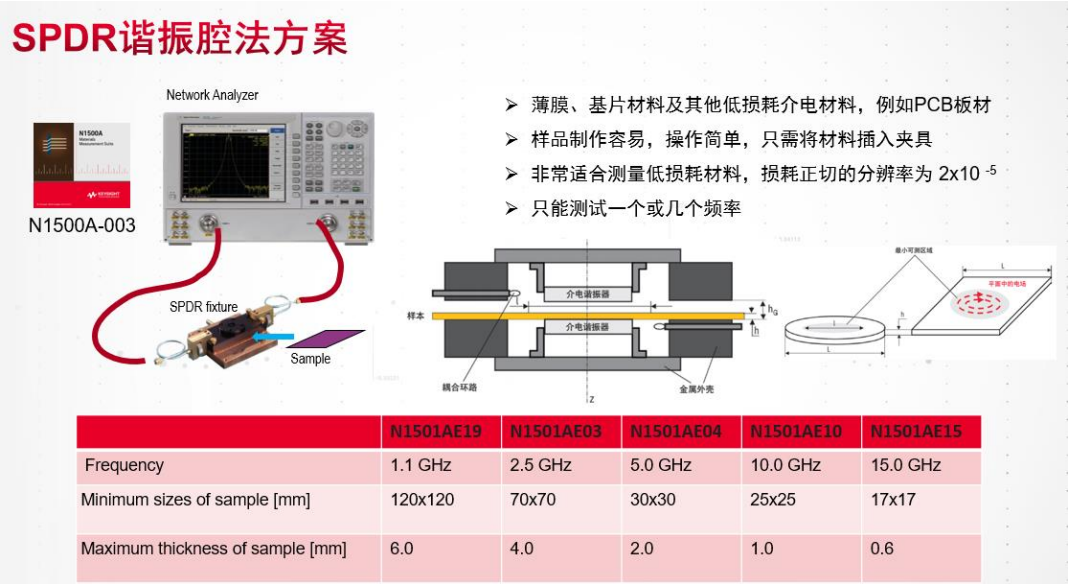


图 17. 谐振腔法原理示意图

是德科技提供完整的谐振腔法测试系统，主要包括网络分析仪，测试软件以及谐振腔夹具。是德科技多平台网络分析仪都支持谐振腔法测材料，包括 PNA，ENA，PXIe VNA 以及 USB VNA 等；是德科技 N1500A 材料测试软件支持多种谐振腔夹具；是德科技同时提供多种高 Q 值的谐振腔夹具，例如分离介质谐振腔（SPDR），分裂圆柱谐振腔（SCCR）以及平衡圆柱谐振腔（BCDR）等，供不同需求的客户进行选择。

SPDR（Split Post Dielectric Resonator）利用低损耗介质材料，相较于传统的金属腔体拥

有更高的 Q 值以及更好的温度稳定性。是德科技可以直接提供频率为 1.1GHz，2.5GHz，5GHz，10GHz 以及 15GHz 的 SPDR 谐振腔夹具，如图 18 所示。SPDR 相对成本较低，而且对材料基片的物理尺寸只要满足下图要求即可。图 18 是一个典型的 SPDR 测试的场景以及不同谐振腔对于测试材料的尺寸要求。



	N1501AE19	N1501AE03	N1501AE04	N1501AE10	N1501AE15
Frequency	1.1 GHz	2.5 GHz	5.0 GHz	10.0 GHz	15.0 GHz
Minimum sizes of sample [mm]	120x120	70x70	30x30	25x25	17x17
Maximum thickness of sample [mm]	6.0	4.0	2.0	1.0	0.6

图 18. SPDR 谐振腔测试方法

SCCR（Split Cylinder resonator）是将一个圆柱形谐振腔从中间一分为二，测试时将被测样品插入两个半圆柱腔中间的间隙中，当插入样品后，谐振腔的 S21 测试曲线的谐振峰频率会左移，而 Q 值会降低，则通过计算就可以得到被测样品的介电常数以及损耗值等参数。SCCR 的测试方法是遵循 IPC 测试标准 TM-650 2.5.5.13。典型的 SCCR 测试场景如图 19 所示。

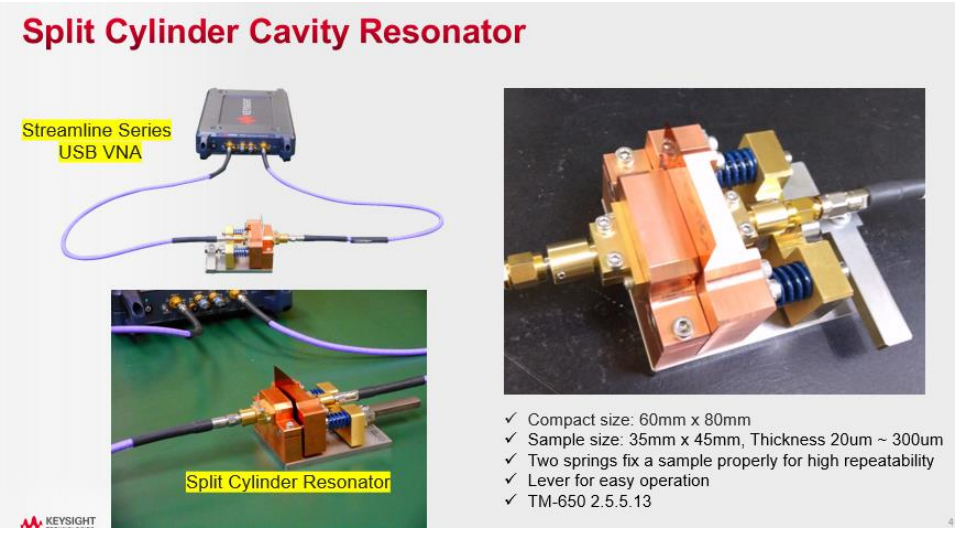


图 19. SCCR 谐振腔测试方法。

SCCR 谐振腔可以提供比 SPDR 更高的频率覆盖，当然也是单频点的测试方案，是德科技能够提供的解决方案中 SCCR 谐振腔最高可以覆盖 80GHz，如图 20 所示。

Keysight Model No.	Description	Res Mode	Q factor	Connectors
N1501AKEAD-710	Split Cylinder Resonator 10 GHz	TE011*	>20,000	2.92 mm (f)
N1501AKEAD-720	Split Cylinder Resonator 20 GHz			
N1501AKEAD-724	Split Cylinder Resonator 24 GHz		>14,000	2.92 mm (f)
N1501AKEAD-728	Split Cylinder Resonator 28 GHz			
N1501AKEAD-735	Split Cylinder Resonator 35 GHz		>10,000	2.92 mm (f)
N1501AKEAD-740	Split Cylinder Resonator 40 GHz			
N1501AKEAD-750	Split Cylinder Resonator 50 GHz		>7,000	2.4 mm (f)
N1501AKEAD-760	Split Cylinder Resonator 60 GHz		>6,000	1.85 mm (f)
N1501AKEAD-780	Split Cylinder Resonator 80 GHz			1 mm (f)

图 20. SCCR 谐振腔频率选择

对于样品尺寸的要求，10GHz 的 SCCR 谐振腔要求样品推荐大小为 62mm x 75mm，其他频率的 SCCR 推荐样品大小 34mm x 45mm。而样品的最大厚度要求则根据被测材料的介电常数以及测试频率有所不同。对于损耗小于 0.01 的材料厚度要求可以参考图 21。

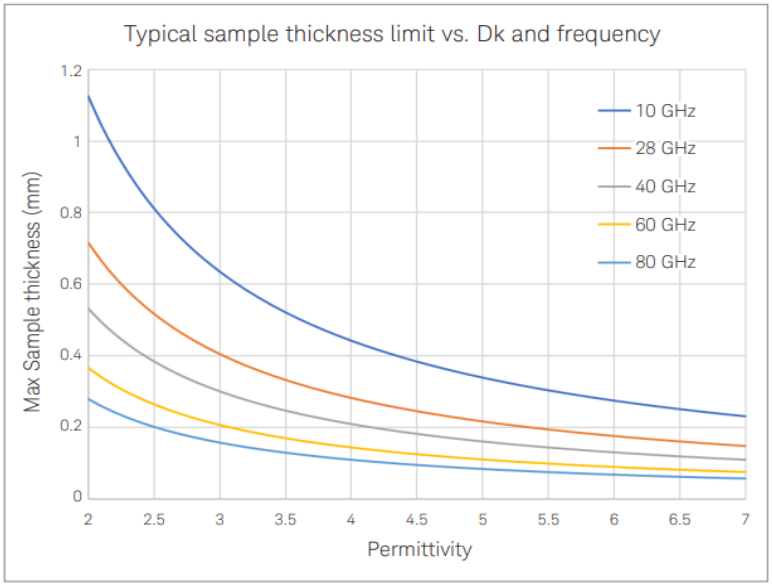


图 21. SCCR 谐振腔测试对样品厚度的要求

此外，近年来，材料测试的频率覆盖越来越高，并且对于多频点低损耗材料测试的需求日益旺盛。所以是德科技除了提供单频点谐振腔外，还能提供同时覆盖多频点测试的谐振腔 BCDR（Balanced type Circular Disk Resonator），可以覆盖 10GHz 到 110GHz 的多频点测试。BCDR 利用TM_{0m0}的基模和高次模（m=1，2，3……）可以同时进行多频点的测试。在该方法的测试中，BCDR 必须通过同轴电缆在圆盘的正中心激发出TM_{0m0}的基模以及高次模，从而完成多频点的测试。而测试原理也是通过得到有被测样品时和空腔时的TM_{0m0}模（m=1，2，

3……）的谐振频率偏移来最终得到介电特性结果的，TM_{0m0}模的谐振频率与被测材料的介电常数以及所用圆盘电极的尺寸大小有关。BCDR 实测图如图 22 所示。相较于 SCCR 以及 SPDR，BCDR 的电场方向是垂直于被测材料表面的，也即是平行于厚度方向，这在毫米波的谐振腔中是比较独特的。并且由于 BCDR 的频率覆盖比较高，所以推荐 67GHz 的 PNA 或者 110G 的 N5290A 搭配使用。

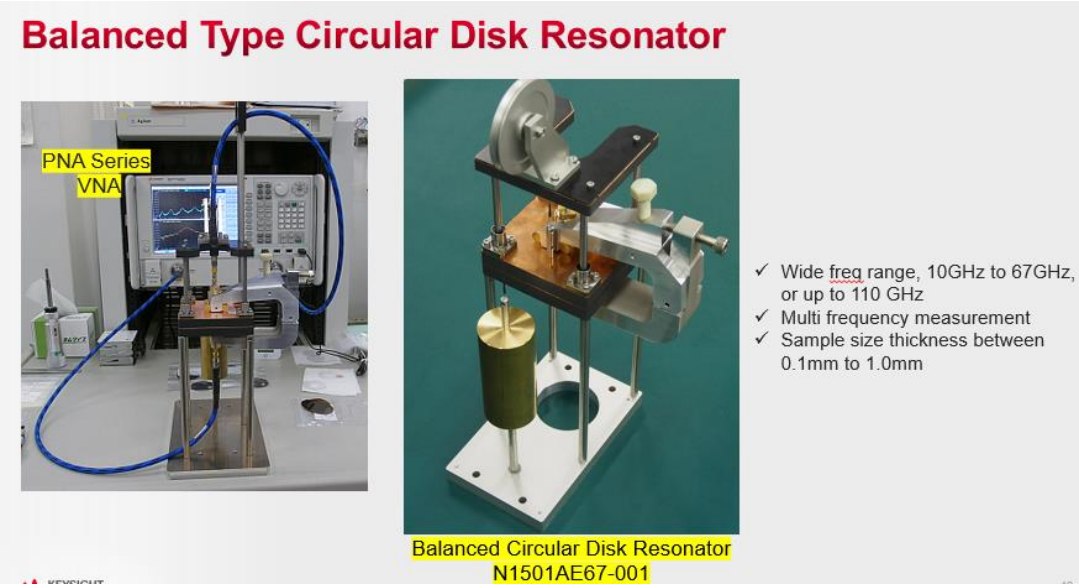


图 22. BCDR 多频点测试系统

BCDR 的典型参数以及对于被测样品的要求如下图所示。

Typical performance

Frequency f	10G - 67/110GHz, 70/120GHz (typ.)
Circular electrode disk size	∅12 mm, ∅15 mm, 18 mm
Permittivity ε_{rn}	1.1 - 10
Accuracy	±1% (@ε_{rn}= 2, t: >0.2 mm)
Loss tangent $\tan\delta_n$	10^{-2} - 10^{-4}
Accuracy	±0.0001 (@$\tan\delta_n$= 0.0002, ε_{rn}= 2, t: >0.4 mm) ±0.0004 (@$\tan\delta_n$= 0.002, ε_{rn}= 2, t: >0.2 mm) ±0.002 (@$\tan\delta_n$= 0.02, ε_{rn}= 2, t: >0.2 mm)

Size of Dielectric sheet (MUT)

MUT Thickness (t)	0.1 - 1 mm 0.2 - 0.5 mm (better)
MUT Size	Min. ∅18 mm – max. ∅49 mm Not limited to circular shape Min. 1.5 times of circular disk electrode diameter
Fixture dimension	About W104 × D172 × H329.5 mm
Weight	About 5 kg

图 23. BCDR 典型参数以及对测试样品尺寸要求

是德科技完整的谐振腔测试方案包括毫米波网络分析仪，材料测试软件 N1500A 以及谐振腔夹具。下面给出 SPDR，SCCR 以及 BCDR 的典型参考配置。

SPDR 参考配置			
项目	**型号**	**描述**	**数量**
SPDR 谐振腔 （根据频率选择一个或多个）	N1501AE19	1.1GHz SPDR 谐振腔	1
	N1501AE03	2.5GHz SPDR 谐振腔	1
	N1501AE04	5GHz SPDR 谐振腔	1
	N1501AE10	10GHz SPDR 谐振腔	1
	N1501AE15	15GHz SPDR 谐振腔	1
测试软件	N1500A	材料测试软件套件	1
	N1500A-003	谐振腔测试选件	1
	N1500A-UL8	USB Key	1
网络分析仪（这里只列出了 PNA 的情况，其他平台网分亦可）	N5222B	26.5GHz PNA 高性能网络分析仪	1
	N5222B-200	2 端口基础配置	1
测试附件	线缆转接头	根据不同的网分接口相应配置	若干

SCCR 参考配置			
项目	**型号**	**描述**	**数量**
SCCR 谐振腔 （根据频率选择一个或多个）	N1501AKEAD-720	20GHz SCCR 谐振腔	1
	N1501AKEAD-724	24GHz SCCR 谐振腔	1
	N1501AKEAD-728	28GHz SCCR 谐振腔	1
	N1501AKEAD-735	35GHz SCCR 谐振腔	1
	N1501AKEAD-740	40GHz SCCR 谐振腔	1
	N1501AKEAD-750	50GHz SCCR 谐振腔	1
	N1501AKEAD-760	60GHz SCCR 谐振腔	1
	N1501AKEAD-780	80GHz SCCR 谐振腔	1
测试软件	N1500A	材料测试软件套件	1
	N1500A-007	SCCR 谐振腔测试选件	1
	N1500A-UL8	USB Key	1

网络分析仪（这里只列出了 PNA 的情况，其他平台网分亦可）	N5227B	67GHz PNA 高性能网络分析仪	1
	N5227B-200	2 端口基础配置	1
测试附件	线缆转接头	根据不同的网分接口相应配置	若干

BCDR 参考配置			
项目	**型号**	**描述**	**数量**
BCDR 谐振腔（根据频率选择）	N1501AE67-001	67GHz BCDR 谐振腔	1
	N1501AE11-001	110GHz BCDR 谐振腔	1
	N1501AE67/11-002	12mm 圆电极选件（5 个）	1
	N1501AE67/11-003	15mm 圆电极选件（5 个）	1
	N1501AE67/11-004	18mm 圆电极选件（5 个）	1
网络分析仪（67G PNA 或者 110G N5290A）	N5290A	110GHz 网络分析仪	1
	N5290A-202	2 端口配置	1
测试附件	校准件	85059B	1
	线缆转接头	根据不同的网分接口相应配置	若干

◆ 谐振腔法测试材料方案总结：

谐振腔法的优势有测试精度高；非常适合低损耗材料测试；并且对材料样品尺寸加工要求不高。而该方法由于选择的谐振腔不同，对应地只能完成单频点或者有限的多频点测试。

四． 一些新的测试方案

在材料测试领域，由于材料测试方法多种多样，并且被测材料的形状也是千差万别，所以很多时候，夹具的适配度是一个重要的考量。是德科技除了以上方案，还联合了 Solution Partner，为客户提供更多样化的材料测试整体方案。

1. Swissto12 MCK

Swissto12 提供的 MCK（Material Characterization Kit），为测试频率大于 25GHz 的材料提供了一种更方便操作，覆盖频率更宽，材料样品制样更容易的一种选择。MCK 测试示意图如图 24 所示，频率选件如图 25 所示。

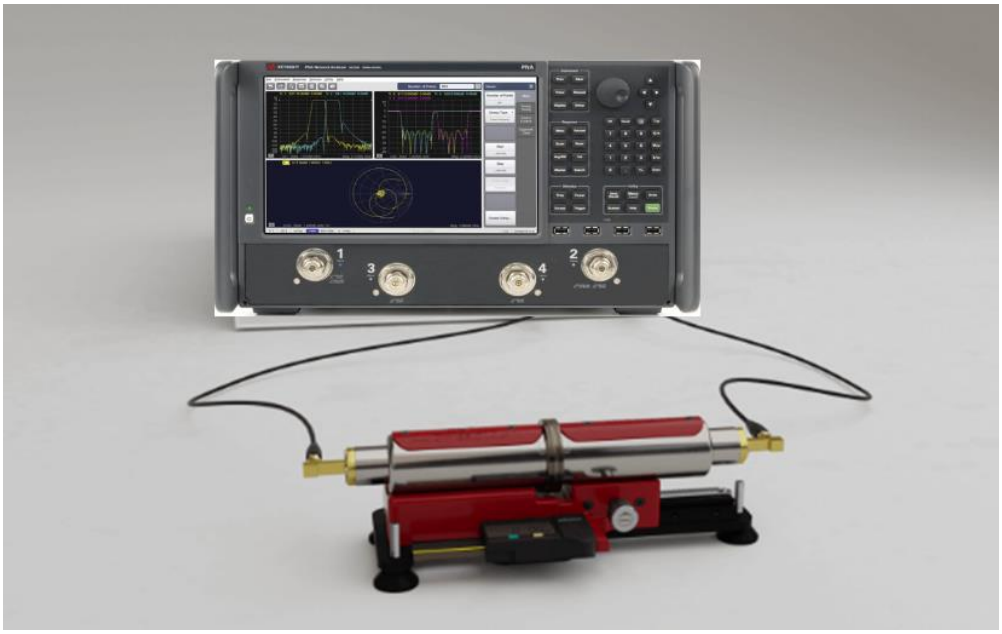


图 24. Swissto12 MCK 测试示意图

图 25. Swissto12 MCK 覆盖的测试频段

Swissto12 MCK 是由两个完全一样的波纹圆锥喇叭波导天线组成的，并且样品放置在 MCK 设计好的波导端面，使得其所在的位置正好是被激励出的圆锥波纹喇叭主模HE_{11}模的平面波前。所以 MCK 有时候也被叫做“引导式的自由空间法”。相较于传统的自由空间法，由于其被测材料位置固定，所以操作起来更加简单，且可重复性更好。典型测试精度如图 26

所示。而且除了平板固体材料以外，还可以测试液体，粉末，薄膜或者多层材料等（测试薄膜多层材料需要额外的软件）。

图 26. Swissto12 MCK 测试典型精度

是德科技搭配 Swissto12 MCK 的完整材料测试方案，典型参考配置如下。

项目	型号	描述	数量
Swissto12 MCK（根据频率选择）	N1501AMCA	Swissto12 MCK	1
	N1501AMCA-W15	WR15 MCK	1
	N1501AMCA-W12	WR12 MCK	1
	N1501AMCA-W10	WR10 MCK	1
	N1501AMCA-W06	WR06 MCK	1
	N1501AMCA-W03	WR03 MCK	1
	N1501AMCA-W02	WR02 MCK	1
线缆及附件（根据需求选择）	线缆	根据网络分析仪型号选择	若干
	同轴转波导转接头	根据线缆型号以及 MCK 波导口选择	若干
	校准片	根据 MCK 波导口选择	若干
测试软件	N1500A	材料测试软件套件	1
	N1500A-001	传输线和自由空间法测试选件	1
	N1500A-UL8	USB Key	1
网络分析仪	N5227B	67GHz PNA 高性能网络分析仪	1

（这里只列出了PNA 的情况，其他平台网分亦可）	N5227B-200	2 端口基础配置	1
	S93010	时域选件	1

2. FS-330

EM Labs 提供的 FS-330 测试夹具，可以更容易地完成最高达 330GHz 的自由空间法的材料测试。传统的自由空间法测试，由于对收发天线高度一致性的要求，以及被测材料放置位置的要求，所以往往都需要搭配准光学平台等附件来完成精确的材料测试。而 FS-330 测试夹具套件自身就拥有精确的天线位置以及样品位置机械结构，从而能够使得自由空间法的操作更加简便，测试结果更加精确。FS-330 测试套件拥有两个透镜喇叭天线，可以减小样品与天线之间的距离，从而使得整个测试夹具拥有更小的尺寸；并且采用旁瓣更低的喇叭天线，从而使得测试的可重复性更高，并且舍去了对于吸波暗室的需求，极大地缩减了测试成本。搭配是德科技的网络分析仪以及测试软件 N1500A，可以完成介电常数以及磁导率的测试等；此外 FS-330 通过选择不同选件，还可以完成斜入射的测试，从而得到反射率等的测试结果。FS-330 测试套件如图 27 所示。

图 27. FS-330 测试套件

FS-330 测试套件可以分段覆盖 18GHz~330GHz 的频率范围，如图 28 所示。FS-330 的喇叭天线接口拥有两种配置，同轴接口配置（图 28 上半部分）和波导接口配置（图 28 下半

部分）。

Coaxial type

Frequency band	Connector	Model Number
K (18-26.5 GHz)	2.4 mm (f)	FS-330-KCF
R (26.5-40 GHz)	2.4 mm (f)	FS-330-RCF
Q (33-50 GHz)	2.4 mm (f)	FS-330-QCF
U (40-60 GHz)	1.85 mm (f)	FS-330-UCF
V (50-75 GHz)	1 mm (f)	FS-330-VCF
E (60-90 GHz)	1 mm (f)	FS-330-ECF
W (75-110 GHz)	1 mm (f)	FS-330-WCF

Waveguide type

Frequency band	Connector	Model Number
K (18-26.5 GHz)	WR42	FS-330-KWG
R (26.5-40 GHz)	WR28	FS-330-RWG
Q (33-50 GHz)	WR22	FS-330-QWG
U (40-60 GHz)	WR19	FS-330-UWG
V (50-75 GHz)	WR15	FS-330-VWG
E (60-90 GHz)	WR12	FS-330-EWG
W (75-110 GHz)	WR10	FS-330-WWG
D (110 - 170 GHz)	WR6	FS-330-DWG
G (140 - 220 GHz)	WR5	FS-330-GWG
J (220 - 330 GHz)	WR3	FS-330-JWG

图 28. FS-330 频率选件

FS-330 对于样品的要求，也需要被测样品为平面片状结构，并且厚度要精确已知，不同频段的天线，需要的最小尺寸也不同，列于图 29 所示。样品的厚度建议利用 N1500A Sample Thickness Suggestion 的建议来选择。

Band	Min (GHz)	Max (GHz)	Minimum sample size (diameter mm)
K	18	26.5	100
R	26.5	40	68
Q	33	50	55
U	40	60	45
V	50	75	36
E	60	90	30
W	75	110	24

图 29. FS-330 不同频段的样品尺寸要求

是德科技可以推出搭配 FS-330 的完整材料测试方案，典型参考配置如下。

项目	型号	描述	数量
FS-330 夹具套件 （频率选件根据需求选择）	N1501AFS	自由空间法测试夹具套件	1
	N1501AFS-330	FS-330 夹具主体	1
	N1501AFS-KCF	K 波段 2.4mm 同轴接口夹具	1
	N1501AFS-KWG	K 波段 WR42 波导接口夹具	1
	N1501AFS-RCF	R 波段 2.4mm 同轴接口夹具	1
	N1501AFS-RWG	R 波段 WR28 波导接口夹具	1
	N1501AFS-QCF	Q 波段 2.4mm 同轴接口夹具	1
	N1501AFS-QWG	Q 波段 WR22 波导接口夹具	1
	N1501AFS-UCF	U 波段 1.85mm 同轴接口夹具	1
	N1501AFS-UWG	U 波段 WR19 波导接口夹具	1
	N1501AFS-VCF	V 波段 1.0mm 同轴接口夹具	1
	N1501AFS-VWG	V 波段 WR15 波导接口夹具	1
	N1501AFS-ECF	E 波段 1.0mm 同轴接口夹具	1
	N1501AFS-EWG	E 波段 WR12 波导接口夹具	1
	N1501AFS-WCF	W 波段 1.0mm 同轴接口夹具	1
	N1501AFS-WWG	W 波段 WR10 波导接口夹具	1
测试线缆 （根据需求选择）	线缆	根据网络分析仪型号选择	若干
测试软件	N1500A	材料测试软件套件	1
	N1500A-001	传输线和自由空间法测试选件	1
	N1500A-UL8	USB Key	1
网络分析仪 （这里只列出了 67GHz PNA 的情况，更高频率可以选择 N5290A）	N5227B	67GHz PNA 高性能网络分析仪	1
	N5227B-200	2 端口基础配置	1
	S93010	时域选件	1

3. 使用 ADS 提取 PCB 的介电常数（Dk）和介质损耗角（Df）

与前面测量材料参数采用的方法不一样，ADS 提取 PCB 材料的 Dk 和 Df 采用的是传输线法，所以这种方法测试的并不是测试的裸材料，但是对于 PCB 而言，这是相对最接近实际的材料最终特性。

Dk 和 Df 是材料的基本上属性参数，它们会随着频率的变化而变化。高速数字电路和高频电路都是在一定带宽内工作的，所以在使用 PCB 时也需要考虑到材料参数的频变性。因此，在仿真电路的时候就需要频变的材料参数模型。

ADS 采用了 Svensson/Djordjevic 模型，其复介电常数表达式为：

$$\varepsilon(freq) = \varepsilon_{\infty} + a \cdot \ln \frac{f_H + j \cdot freq}{f_L + j \cdot freq}$$

其中，fL 和 fH 是模型参数，定义为：

$f_L = LowFreqForTanD$

$f_H = HighFreqForTanD$

ε_{∞}是当频率趋于无穷大时的介电常数，a 是个固定的系数。

ADS 将通过给定频点的 Dk，Df 以及设定的 fL 和 fH 计算出ε_{∞}和 a，从通过公式计算得到任意频点的电常数。典型的频变 Dk，Df 曲线如下：

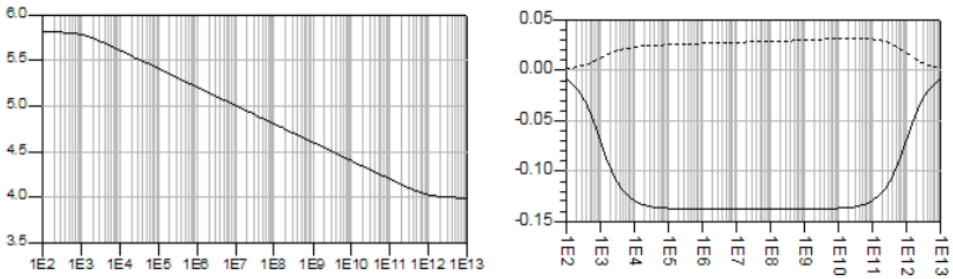


图 30．左图为 Dk 的实部，右图实线为 Dk 的虚部，虚线为 Df

该模型可以保证传输线的仿真结果满足因果性（causality），这对于高速电路设计来说是非常关键的。

在使用 ADS 传输线法提取 PCB 材料参数时，首先需要设计并生产一块 PCB 板，设计出相应的传输线类型，再使用网络分析仪和 AFR 软件获得准确的传输线 S 参数，再在 ADS 中通过拟合获取 PCB 材料的参数。使用 ADS 提取 PCB 材料参数的流程如图 31 所示：

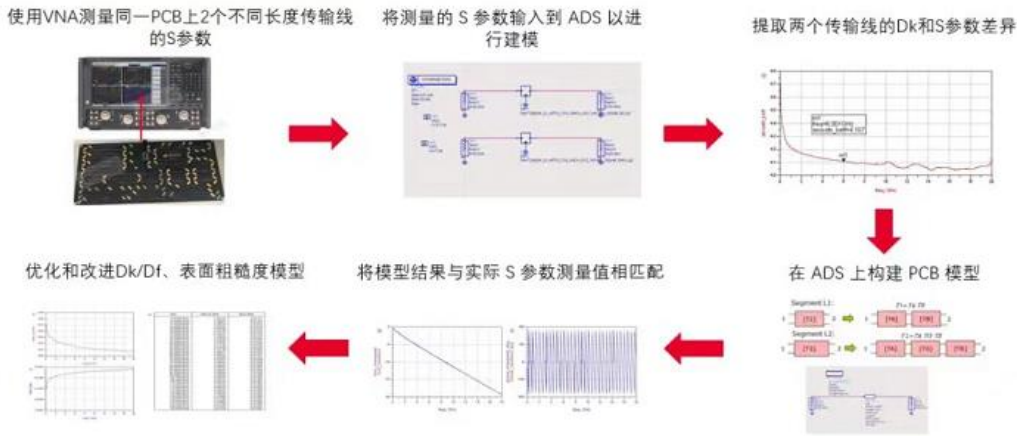
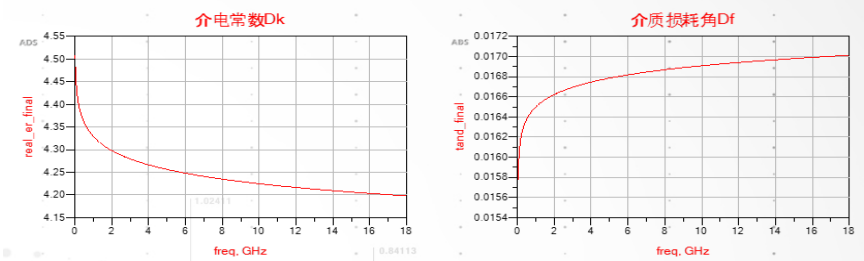


图 31. ADS 提取 PCB 材料参数

图 32 所示为通过 ADS 提取的 Dk 和 Df，其 Dk 随着频率的升高变小，Df 随着频率的升高变大：



freq	real_er_final	freq	tand_final
20.00 MHz	4.400	20.00 MHz	0.016
30.00 MHz	4.381	30.00 MHz	0.017
40.00 MHz	4.367	40.00 MHz	0.017
50.00 MHz	4.357	50.00 MHz	0.017
60.00 MHz	4.348	60.00 MHz	0.017
70.00 MHz	4.341	70.00 MHz	0.017
80.00 MHz	4.335	80.00 MHz	0.017
90.00 MHz	4.329	90.00 MHz	0.017
100.0 MHz	4.324	100.0 MHz	0.017
110.0 MHz	4.320	110.0 MHz	0.017
120.0 MHz	4.315	120.0 MHz	0.017
130.0 MHz	4.312	130.0 MHz	0.017
140.0 MHz	4.308	140.0 MHz	0.017
150.0 MHz	4.305	150.0 MHz	0.017
160.0 MHz	4.302	160.0 MHz	0.017
170.0 MHz	4.299	170.0 MHz	0.017
180.0 MHz	4.296	180.0 MHz	0.017
190.0 MHz	4.294	190.0 MHz	0.017
200.0 MHz	4.291	200.0 MHz	0.017
210.0 MHz	4.289	210.0 MHz	0.017
220.0 MHz	4.287	220.0 MHz	0.017
230.0 MHz	4.285	230.0 MHz	0.017
240.0 MHz	4.283	240.0 MHz	0.017
250.0 MHz	4.281	250.0 MHz	0.017
260.0 MHz	4.279	260.0 MHz	0.017
270.0 MHz	4.277	270.0 MHz	0.017
280.0 MHz	4.276	280.0 MHz	0.017
290.0 MHz	4.274	290.0 MHz	0.017
300.0 MHz	4.272	300.0 MHz	0.017
310.0 MHz	4.271	310.0 MHz	0.017
320.0 MHz	4.269	320.0 MHz	0.017
330.0 MHz	4.268	330.0 MHz	0.017
340.0 MHz	4.266	340.0 MHz	0.017
350.0 MHz	4.265	350.0 MHz	0.017
360.0 MHz	4.264	360.0 MHz	0.017
370.0 MHz	4.262	370.0 MHz	0.017
380.0 MHz	4.261	380.0 MHz	0.017
390.0 MHz	4.260	390.0 MHz	0.017
400.0 MHz	4.259	400.0 MHz	0.017
410.0 MHz	4.258	410.0 MHz	0.017
420.0 MHz	4.256	420.0 MHz	0.017
430.0 MHz	4.255	430.0 MHz	0.017
440.0 MHz	4.254	440.0 MHz	0.017
450.0 MHz	4.253	450.0 MHz	0.017
460.0 MHz	4.252	460.0 MHz	0.017

图 32. Dk 和 Df 的频变参数

如图 33 所示为使用提取的 Dk 和 Df 仿真的插入损耗和相位与实测结果的对比，结果非常吻合，如下图所示。

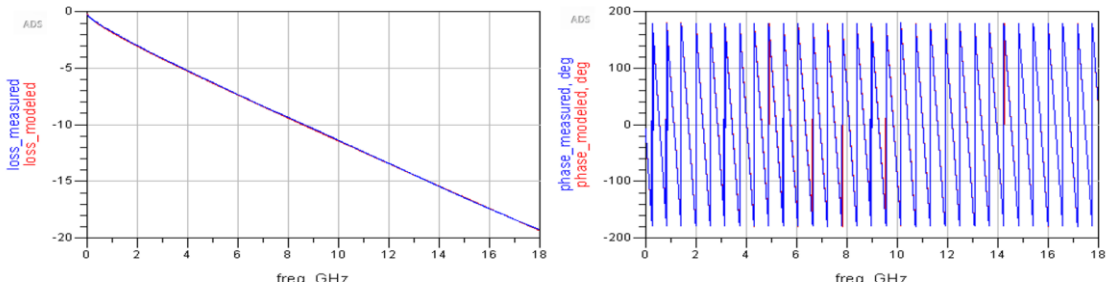


图 33. Dk 和 Df 的结果对比

在实际的材料参数提取时，可以考虑铜箔的粗糙度，也可以不考虑铜箔的粗糙度，具体根据实际的应用选择。这类方式提取 PCB 材料参数的频率可以达到 50GHz 及以上。

五．总结

是德科技提供多种多样的材料测试整体解决方案，包括测试仪表，夹具以及软件，可以覆盖固体，液体，粉末，薄膜材料，磁环等的测试需求，如图 34 所示。

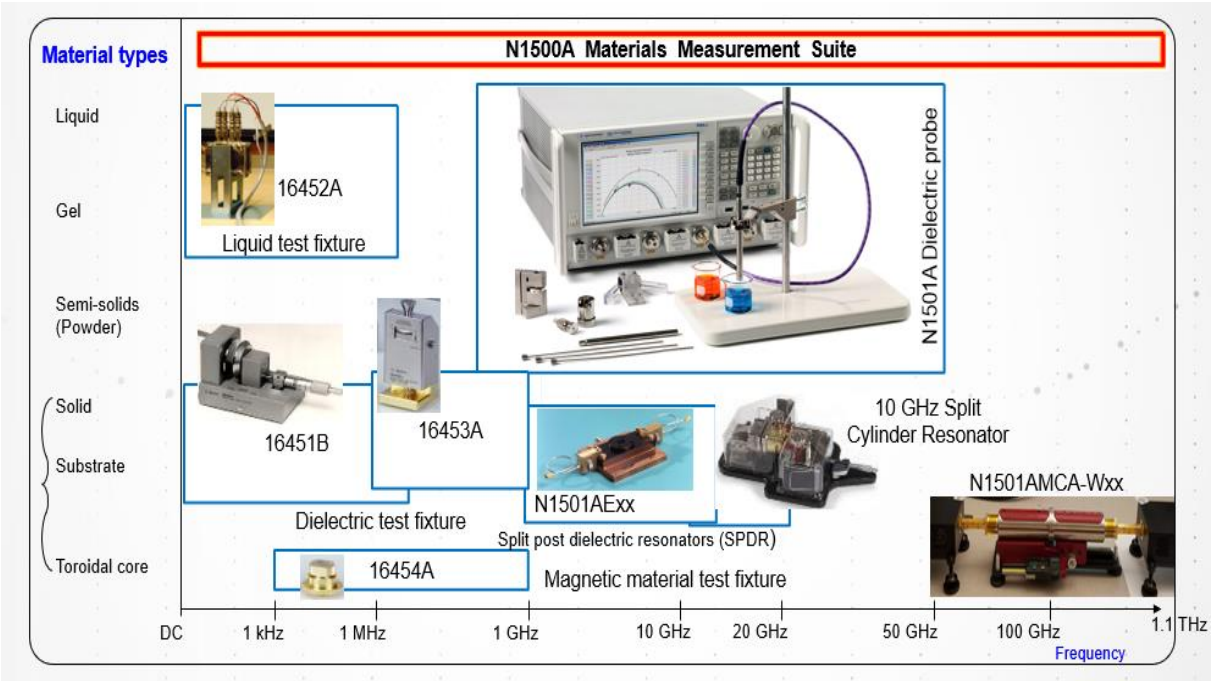


图 34. 是德科技材料测试方案

参考资料

1. Keysight N1500A Materials Measurement Suite, Technical Overview, literature number 5992-0263EN;
2. Keysight N1501A Dielectric Probe Kit, Technical Overview, literature number 5991-0264EN;
3. Challenges and Solutions for Material Science/Engineering Testing Applications, literature number 5992-1182EN;
4. Online Help for N1500A Materials Measurement Suite, https://rfmw.em.keysight.com/wireless/helpfiles/N1500A/N1500A.htm ;
5. Agilent 材料测试方案 2013;
6. 材料测试建议书;
7. Partner 网站。