

毫米波频率下线路板材料的特性表征：第一部分

PCB 线路板材料的介电常数 (Dk) 或相对介电常数并不是恒定的常数 – 尽管从它的命名上像是一个常数。例如，材料的 Dk 会随频率的变化而变化。同样，如果在同一块材料上使用不同的 Dk 测试方法，也可能会测量得出不同的 Dk 值，即使这些测试方法都是准确无误的。随着线路板材料越来越多地应用于毫米波频率，如 5G 以及先进辅助驾驶系统等领域，理解 Dk 随频率的变化以及哪种 Dk 测试方法是“合适”的是非常重要的。

尽管诸如 IEEE 和 IPC 等组织都有专门的委员会来探讨这一问题，但目前还没有一个标准的行业测试方法来测量毫米波频率下线路板材料的 Dk。这并不是因为缺乏测量方法，事实上，Chen et al.¹ 等人发表的一篇参考论文中描述了 80 多种测试 Dk 的方法。但是，没有哪一种方法是理想的，每种方法都具有它的优点和不足，尤其是在 30 到 300 GHz 的频率范围内。

电路测试 vs 原材料测试

通常有两大类的测试方法用于确定线路板材料的 Dk 或 Df (损耗角正切或 $\tan\delta$)：即原材料测量，或者在由材料制成的电路进行测量。基于原材料的测试依赖于高质量可靠的测试夹具和设备，直接测试原材料可以获得 Dk 和 Df 值。基于电路的测试通常是使用常见电路并从电路性能中提取材料参数，例如测量谐振器的中心频率或频率响应。原材料的测试方法通常会引入了测试夹具或测试装置相关的不确定性，而电路测试方法包含来自测试电路设计和加工技术的不确定性。由于这两种方法不同，测量结果和准确度水平通常不一致。

例如，由 IPC 定义的 X 波段夹紧式带状线测试方法，是一种原材料的测试方法，其结果就无法与相同材料的电路测试的 Dk 结果一致。夹紧式带状线原材料测试方法是将两片待测材料 (MUT) 夹在一个特殊的测试夹具中来构建一个带状线谐振器。在待测材料 (MUT) 和测试夹具中的薄谐振器电路之间会有空气，空气的存在会降低测量的 Dk。如果在相同的线路板材料上进行电路测试，与没有夹带空气，测得的 Dk 是不同的。对于通过原材料测试确定的 Dk 公差为 ± 0.050 的高频线路板材料，电路测试将得到约 ± 0.075 的公差。

线路板材料是各向异性的，通常在三个材料轴上具有不同的 Dk 值。Dk 值通常在 x 轴和 y 轴间差别很小，因此对于大多数高频材料，Dk 各向异性通常指在 z 轴和 x-y 平面之间进行的 Dk 比较。由于材料的各向异性，对于相同的待测材料 (MUT)，测量得到的 z 轴的 Dk 与 x-y 平面上的 Dk 是不同的，尽管测试方法和测试得到的 Dk 的值都是“正确的”。

用于电路测试的电路类型也会影响被测 Dk 的值。通常，使用两种类型的测试电路：谐振结构和传输/反射结构。谐振结构通常提供窄带结果，而传输/反射测试通常是宽带结果。使用谐振结构的方法通常更准确。

测试方法示例

原材料测试的一个典型示例是 X 波段夹紧式带状线方法。它已经被高频电路板制造商使用多年，是确定线路板材料的 z 轴中的 Dk 和 Df (tanδ) 的可靠手段。它使用夹紧式夹具使待测材料 (MUT) 样品形成松耦合的带状线谐振器。谐振器的被测品质因数 (Q) 为空载 Q，因此电缆，连接器和夹具校准对最终测量结果影响很小。覆铜电路板在测试之前需要将所有的铜箔蚀刻掉，仅测试介质原材料基板。电路原材料在一定的环境条件下，切割成一定尺寸并放置于谐振器电路两侧的夹具中 (见图 1)。

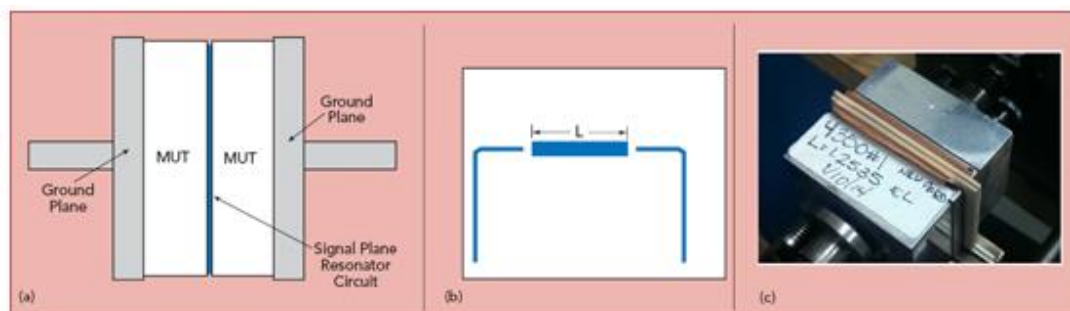


图 1 X 波段夹紧式带状线测试夹具侧面(a)，谐振器示意图(b)，及夹具实物图(c)

谐振器设计是频率 2.5 GHz 的半波长谐振器，因此第四个谐振频率为 10 GHz，这是常用于 Dk 和 Df 测量的谐振点。可以使用较低的谐振点和谐振频率 - 甚至可以使用较高的第五个谐振频率，但是因为谐波和杂散波的影响通常避免使用更高的谐振点。测量提取 Dk 或相对介电常数 (ε_r) 很简单：

$$\epsilon_r = \left[\frac{nc}{2f_r(L + \Delta L)} \right]^2 \quad (1)$$

其中 n 是第几个谐振频点，c 是自由空间中的光速，f_r 是谐振的中心频率，ΔL 补偿耦合间隙中的电场引起的电长度延长。从测量中提取 tanδ (Df) 也很简单，它是谐振峰值的 3dB 带宽相关的损耗减去与谐振器电路的导体损耗 (1 / Q_c)。

$$\frac{1}{Q_u} = \frac{1}{Q_c} + \frac{1}{Q_d} \quad (2)$$

$$\tan\delta \propto \frac{1}{Q_d} \quad (3)$$

$$\tan\delta = \left[\frac{f_2 - f_1}{f_r} \right] - \frac{1}{Q_c} \quad (4)$$

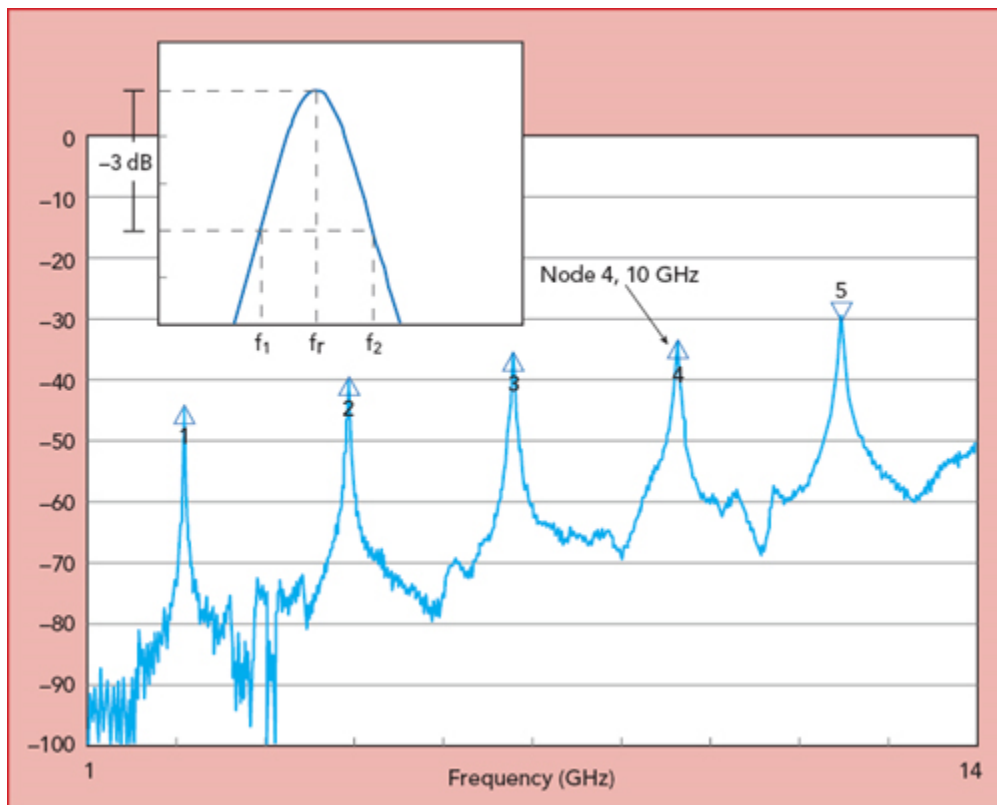


图2 宽带夹具式带状线测量 60mils 的待测材料 (MUT) ， $Dk = 3.48$ 。

图二显示的是使用夹具式带状线法测量 60mils、 $Dk = 3.48$ 的待测材料 (MUT) 的宽带测试结果。

环形谐振器通常用作测试电路。它结构简单，在微带线环的平均周长的整数倍处谐振（见图 3a）。信号耦合通常是松耦合的，因为馈线和环之间的松耦合可使它们之间的耦合间隙电容最小化。该电容会随频率而变化，导致谐振频率偏移，使在提取材料 Dk 时产生误差。谐振环的导体宽度应远小于环的半径-根据经验，小于环半径的四分之一。

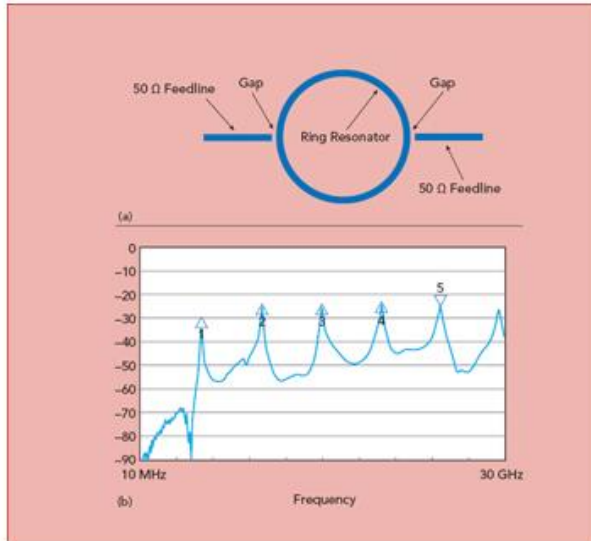


图 3 微带环形谐振器 (a) 和宽带测量 (b)

图 3b 是基于 10mil 厚的线路板材料的微带环形谐振器的 S21 响应，其中 $Dk = 3.48$ 。Dk 的近似计算由下式给出。

$$2\pi r = n\lambda_g \quad (5)$$

$$\lambda_g = \frac{c}{f\sqrt{Dk_{\text{eff}}}} \quad (6)$$

$$Dk_{\text{eff}} = \left[\frac{cn}{2\pi r f} \right]^2 \quad (7)$$

尽管是近似，但这些公式对于确定初始 Dk 值很有用。使用电磁 (EM) 场求解器和精确的谐振器电路尺寸可以得到更精确的 Dk。

测量 Dk 和 Df 时采用松耦合谐振器可最大限度地减小谐振器负载效应。使谐振峰值处的插入损耗小于 20 dB 可认为是松耦合。在某些情况下，由于耦合极弱导致谐振峰可能无法测量。这通常发生在较薄厚度的谐振电路上，毫米波应用中常用较薄的电路材料，因为频率越高波长越短、电路尺寸也越小。

毫米波测试方法

虽然有许多 Dk 测试方法，但只有一些适用于毫米波频率，仍没有一种被认定是行业标准。

以下两种方法在毫米波的测试中是比较准确且具有高的可重复性。

差分相位长度法

微带线差分相位长度法已经使用了很多年。这是一种传输线测试方法，测量两个仅物理长度不同的电路的相位（参见图 4）。为了避免线路板材料特性的任何变化，测试电路的设计在被测材料（MUT）上尽可能靠近在一起。这些电路是 50Ω 的长度不同的微带传输线，信号馈入是接地共面波导（GCPW）形式。在毫米波频率下，GCPW 信号馈入方式非常重要，因为馈入处的设计可能对回波损耗产生重大影响。还应使用端接非焊接式连接器，一方面使在不焊接的情况下同轴连接器和测试电路之间形成良好的接触，另一方面同一连接器可以用于长短两条不同的电路测试，这最大限度地减少了连接器对测量结果的影响。为保持一致性，相同的连接器应始终对应矢量网络分析仪（VNA）的相同端口。比如说，如果连接器 A 与 VNA 的端口 1 相连接，而连接器 B 与端口 2 相连测试较短的电路，则在测试较长的电路时也应该如此。



图 4 差分相位长度法中使用的长、短微带线电路

长、短线电路的相位相减的同时也减掉了连接器和信号馈入区域的影响。如果两个电路的回波损耗都很好并且连接器具有一致的方向，则连接器的绝大部分影响都能被减小到最低。在毫米波频率下使用差分相位长度法时，回波损耗在 60 GHz 以下优于 15 dB，60 GHz 至 110 GHz 优于 12 dB 均可接受。

微带差分相位长度方法的 D_k 提取方程是基于具有不同物理长度的电路的微带线相位响应公式：

$$\Phi = 2\pi f \frac{\sqrt{\text{Eff}_{-\epsilon_r}}}{c} L \quad (8)$$

$$\Delta\Phi = 2\pi f \frac{\sqrt{\text{Eff}_{-\epsilon_r}}}{c} \Delta L \quad (9)$$

$$\text{Eff}_{-\epsilon_r} = \left[\frac{\Delta\Phi c}{2\pi f \Delta L} \right]^2 \quad (10)$$

其中 c 是自由空间中的光速， f 是 S_{21} 相角的频率， ΔL 是两个电路的物理长度的差， $\Delta\Phi$ 是长短线电路之间的相位差。

测试方法包括几个简单的步骤：

- 测量长短线电路的在某一给定频率下的 S_{21} 相位角。
- 使用公式确定有效 D_k 。
- 测试电路的精确的电路尺寸，确定材料的初始 D_k 值并输入 EM 场求解器。
- 使用软件生成模拟的有效 D_k 值。更改求解器中的 D_k ，直到同一频率下材料的测量的有效 D_k 和模拟的有效 D_k 值相匹配。
- 通过将频率增加到毫米波并重复此过程，可以得到毫米波频率下的确定 D_k 值。

图 5 显示了使用微带线差分相位长度方法测试 5mil RO3003G2TM 线路板材料的 D_k 随频率的变化。该曲线是使用罗杰斯公司开发的 D_k 计算工具所得。该数据反映了随着频率增加, D_k 降低的趋势。在较低频率下, D_k 随频率变化较大; 然而, 从 10 到 110 GHz 的 D_k 随频率的变化很小。该曲线反映了具有低损耗和使用光滑的压延铜的材料, 具有高损耗和/或较高铜表面粗糙度的材料其 D_k 随频率变化关系中表现出约大的负斜率。使用这种测试方法, 还可以通过在每个频率上长短线的 S_{21} 损耗值来获得待测材料 (MUT) 的电路的插入损耗 (见图 6)。

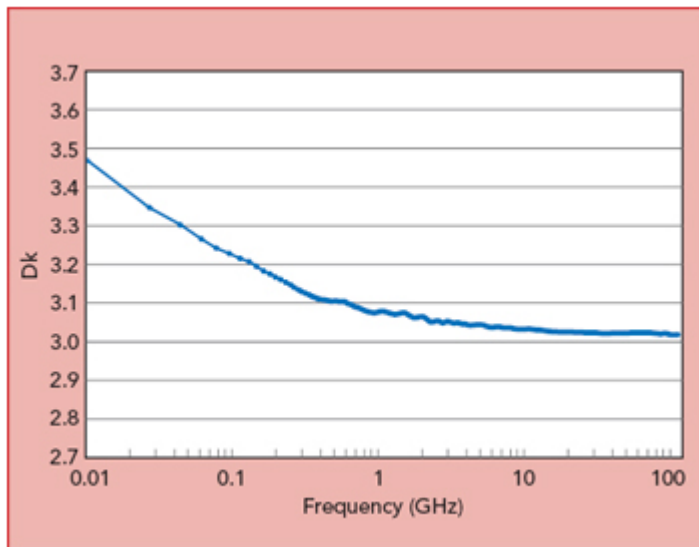


图 5 微带线差分相位长度法测量的 D_k 与频率的关系

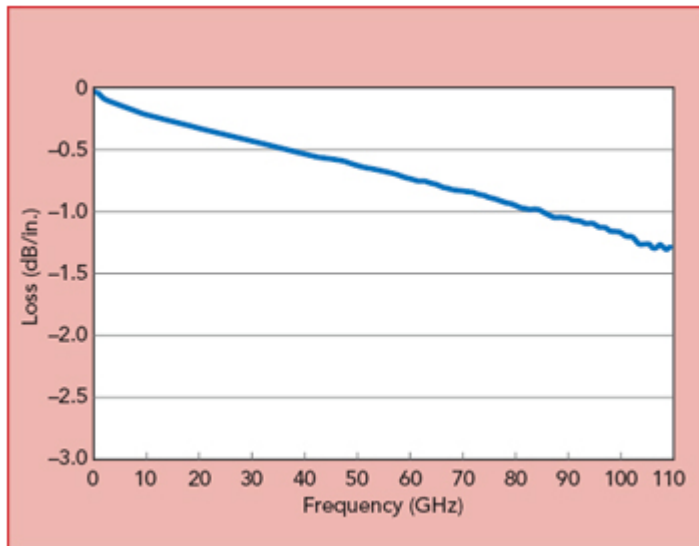


图 6 微带线差分长度法测量插入损耗与频率的关系

环形谐振器法

环形谐振器方法是另一种用于毫米波表征的方法。虽然环形谐振器通常在 10 GHz 以下使用，但具有适当的加工精度，它也可以在毫米波频率下有效使用。加工精度很重要，因为电路尺寸和尺寸公差的影响在毫米波时影响更为突出，任何变化都会降低精度。大多数毫米波环形谐振器很薄（通常为 5mil），馈线和谐振器环之间的间隙也很小。环形谐振器的厚度、线路的镀铜厚度、间隙尺寸的变化都会对其有影响，从而影响谐振频率。

比较使用同一路板材料但不同镀铜厚度的两个电路时，具有较厚铜的电路表现出较低的 Dk。同样，两个电路的谐振频率也会不同，尽管它们使用相同的电路板材料和测试方法。图 7 是就是这样的一个例子，电路的最终电镀表面的厚度变化导致相同材料的计算得到的 Dk 的差异。无论表面处理是化学镀金（ENIG）还是其他镀层表面，这种影响都是类似的。

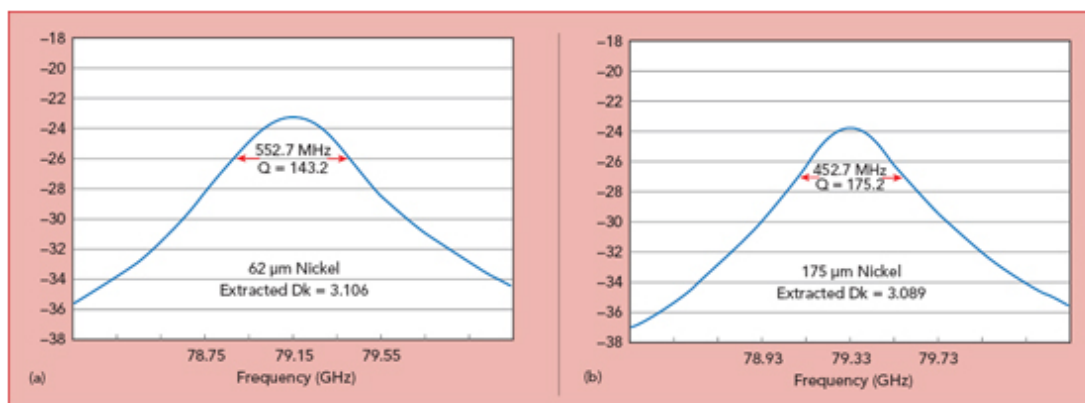


图 7 毫米波环形谐振器测量，镀层是 63mil (a) 和 175mil (b) 厚度的镀镍。

除了这些加工问题之外，导体宽度变化，蚀刻耦合间隙变化，梯形效应和基板厚度变化也会产生类似的影响。如果在用环形谐振器测试 Dk 时考虑到所有这些变化，单个的环形谐振器测量可以得到正确的 Dk 值。但是，许多测试往往都是采用标称电路尺寸去测试计算的 Dk，因此并不一定正确。而且测试的是较低频率，这些效应不会像毫米波频率那样明显影响 Dk 精度。

在毫米波频段使用环形谐振器的另一个重要变量是耦合间隙随频率变化。通常情况下，环形谐振器是用多个不同谐振点来评估的，耦合间隙通常有明显的随不同谐振点的频率差异。因此耦合间隙的变化可能是一个重要的误差源。为了克服这个问题，可以使用差分圆周的方法。这种方法使用的两个环形谐振器除了周长不同，基本是相同的，并且是彼此的整数倍（见图 8）。对于两个环形谐振器，在 Dk 测试中高阶谐振点具有共同的谐振频率。由于馈线和间隙相同，耦合间隙的影响减小 - 理论上消除 - 这使得测量得到的 Dk 的精度更高。Dk 的计算公式如下：

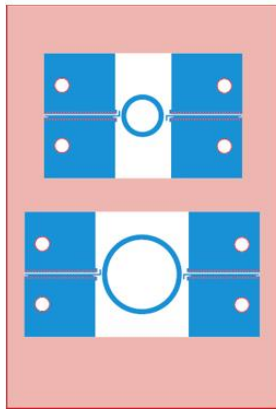


图 8 微带差分圆周环形谐振器

$$L_1 + \Delta L = \frac{n_1 c}{2f_{r1} \sqrt{\text{Eff} - \epsilon_r}} \quad (11)$$

$$L_2 + \Delta L = \frac{n_2 c}{2f_{r2} \sqrt{\text{Eff} - \epsilon_r}} \quad (12)$$

$$\text{Eff} - \epsilon_r = \left[\frac{c(n_1 f_{r2} - n_2 f_{r1})}{2f_{r1} f_{r2} (L_2 - L_1)} \right]^2 \quad (13)$$

图 8 中的环形谐振器是微带结构，馈线是紧耦合 GCPW 以避免开路端的馈线谐振，避免干扰环形谐振器的谐振峰值。通常如果馈线是开路，它们将具有自己的谐振。避免这种情况的唯一方法是使馈线更短或使用紧耦合的 GCPW 馈线。由于差分圆周环形谐振器方法直接所得到的仍然是电路的有效 D_k ，因此仍然需要进行精确的电路尺寸测量并使用场求解器来得到材料 D_k 。

结论

这里讨论的毫米波测试方法都是基于电路的。还有很多其他的测试方法，如基于原材料的测试方法。但是大多数方法测试的 x - y 平面的材料 D_k 而不是 z 轴（厚度） D_k 。电路设计人员更多情况下使用 z 轴 D_k ，但对于某些应用中需要使用材料 x - y 平面 D_k 值的人来说，自由空间测试法，分离圆柱谐振器测试法和波导微扰测试法等都是 x - y 平面的测试方法。

也有人提出使用夹紧式宽边耦合带状线谐振器测试方法用于确定毫米波频率下的线路板材料 D_k 。但这种方法仅对于小范围内待测材料（MUT）最有效，并不适合大批量的测试。因此，仍然在继续研究可用于毫米波频率的原材料的测试方法。

参考文献

1. L. F. Chen, C. K. Ong and C. P. Neo, “Microwave Electronics, Measurement and Material Characterization,” *John Wiley & Sons Ltd.*, 2004.
2. IPC-TM-650 Test Method Manual, “Stripline Test for Permittivity and Loss Tangent (Dielectric Constant and Dissipation Factor) at X-Band,” *IPC*, March 1998, pp. 1–25.
3. K. Chang and L. H. Hsieh, “Microwave Ring Circuits and Related Structures,” *Wiley-Interscience, division of John Wiley & Sons*, New York, 2004.
4. N. K. Das, S. M. Voda and D. M. Pozar, “Two Methods for the Measurement of Substrate Dielectric Constant,” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 35, No. 7, July 1987, pp. 636–642.
5. “ROG D_k Calculator,” *Rogers Corp. Technology Support Hub*.
www.rogerscorp.com/acs/technology/index.aspx.