

专题电子书

5G不同频段下PCB材料和加工考量

2018年9月

赞助：



目录

适合于 5G 微波毫米波放大器的 PCB 材料-----	3
基于多层 PCB 技术的微带缺陷地结构减小电路的辐射损耗-----	6
如何在电磁仿真软件中模拟铜箔表面粗糙度对电路的影响-----	13
评估面向5G应用的PCB板电镀通孔性能-----	15

适合于5G微波/毫米波放大器的PCB材料

全球范围数以万计的语音连接和难以想象的数据文件需求，表明了第五代（5G）无线通信网络出现的必然性。5G时代即将到来，它的应用需要为包括功率放大器（PA）在内的许多不同类型的高频电路提供合适的电路材料。5G代表了当前无线技术中的最新和最值得关注的技术，它可以在许多不同的频率上工作，如6GHz及以下频率，以及毫米波频率（通常为30GHz及以上）；而且它还需要接收来自地面基站和轨道卫星的网络接入。因此从选择电路板材料开始，其设计和制造都将会面临挑战，但是，通过对机械和电气性能要求的仔细考量，仍可以选择相应的高频电路材料，无论工作频率高低，都能使5G功率放大器的设计和开发成为可能。

理想情况下，都希望找到某一种电路材料可以适用于所有频率的功率放大器应用。然而，不同频率的放大器具有不同的设计要求，并且放大器需要选用具有不同特性的电路材料，从而适应不同的频率。例如，插入损耗或损耗因子可能或多或少地取决于电路材料的类型。每种电路材料都会有一定程度的损耗，而损耗通常会随着频率的增加而增加。在5G使用的低频微波频段，某一给定的电路材料的损耗性能可能是可以接受的，因为其增益较高；但在毫米波频率范围内就变得不可接受，这是因为毫米波频段下输出功率将显著变小，过高的损耗会导致信号功率电平较弱而无法接受。能在微波频率下用于高功率和PA增益值低损耗电路材料并不是毫米波频率下PA的最佳材料选择。

对介电常数（Dk）这一关键电路材料参数的设计需求，在6GHz及以下的5G微波频率上，与用于5G网络的短距离回传中的毫米波频率上截然不同。为每个频段寻找最佳电路材料时，就需要了解哪个Dk值最适合于这两个不同频率范围。然后找到具有这些Dk值的电路材料，并兼顾材料的其他材料属性，从而设计并制造出优异、高性能、高频率的功率放大器。

无论是用于微波频率还是毫米波频率，用于功率放大器的电路材料都必须能够支持功放管实现阻抗匹配。阻抗匹配对于低功率放大器中的有源器件（如驱动器放大器，甚至是低噪声放大器（LNA））也是必需的。适合于完成阻抗匹配网络的电路材料应能够使电路的阻抗变化保持为最小，这通常需要材料具有非常严格厚度控制（厚度没有变化）；非常严格的导体宽度控制，如微带传输线，以保持相同的阻抗；还需要严格控制电路材料的铜箔厚度；以及严格控制电路材料的Dk值，尤其是其在不同温度环境下的Dk。尽管具有严格控制的Dk值的电路材料可以帮助将高频传输线的阻抗变化保持在狭窄范围内容（例如 3.50 ± 0.05 ， ± 0.05 或更低的Dk值公差的电路材料通常被认为是具有严格控制Dk值的材料），这的确是功率放大器电路的阻抗匹配所需要的，但材料厚度的变化对阻抗匹配中阻抗的一致性则将产生更大的影响。

随着频率的增加，信号波长随之减小，电路也随之更小。许多用于微波和毫米波频率的功率放大器电路设计，例如Doherty放大器，都依靠四分之一波长的传输线电路结构进行阻抗变换。这一结构的尺

寸就是一个关于电路厚度的函数。如果电路材料的厚度没有被严格控制，那么就很容易看到传输线和电路结构的阻抗是随着材料厚度的变化而变化。通常，±10%或更小的厚度变化范围是被认为进行了材料厚度严格控制的。

PCB热管理

无论是在微波频率还是在毫米波频率下，PA电路的性能都会因受温度变化的影响而产生变化，这个变化既来自于环境温度，也来自于PA自身的有源器件所产生的热量（如功率晶体管或IC）。在寻找适用于5G应用的微波和毫米波功率放大器的电路材料时，寻找能够进行有效热管理的电路材料对于降低功率放大器的性能变化至关重要，因为其自身有源器件会产生大量热量而使温度上升。评估材料的热性能时，有两种电路材料参数特别有用：分别是导热系数和介电常数热稳定系数（TCdk）。

高导热性能材料可以有效地将热量从在PCB上的任何发热有源器件（例如PA的功率晶体管）中通过热流带走。持续的热流不仅能消除热量对晶体管可靠性产生的影响，而且有助于最大限度地降低热引起的PA的性能变化。0.5 W / m · K或更高的导热系数对于PCB材料来说可认为是性能优良的材料。

TCdk是电路材料的基本属性，用于表征该材料的Dk值如何受温度变化的影响。理想情况下，材料的TCdk为0 ppm / °C，Dk值不受温度的变化而变化。但实际的电路材料在温度变化下，DK值会出现一些改变。一般而言，TCdk小于| 50 | ppm / °C时被认为是性能很好的材料，此时Dk随温度的变化很小。在5G系统中，对于需要用到较为准确的四分之一波长线的放大器和其他电路来说，低的TCdk值的电路材料将有助于最大限度地降低电路的性能差异。

与低频功率放大器和电路相比，毫米波功率放大器及电路的信号波长更短，电路通常需要更薄的PCB材料，并且其厚度仍需要保持严格的公差。对于电路材料相关的其他特性带来的影响，如铜表面粗糙度，较薄的电路材料甚至比较厚的电路材料更敏感。铜表面粗糙度会导致电路传输线损耗和相位变化等，因此在5G微波和毫米波功率放大器中的小波长、高频率电路应用来说，选定的材料的铜箔表面粗糙度都应该尽可能小。

为了提供5G放大器所需特性的电路材料，这里列举了来自罗杰斯公司(www.rogerscorp.com)的两种不同厚度和特性的材料作为不同频率范围应用示例。例如，对于6GHz及以下频率的5G功率放大器，厚度为20mil和30mil的陶瓷填充的电路材料，RO4385™是较好的选择。它是低成本、高性价比的电路材料，能在较宽温度范围内保持一致的性能。它们在10GHz时的z轴(厚度方向)介电常数Dk是3.48，公差严格控制在±0.05内。并且可使用标准环氧树脂/玻璃（FR-4）工艺进行加工制造，非常适用于低频段5G功放的应用中。

对于毫米波频率下的5G功率放大器，厚度为5mil和10mil的RO3003™层压板就是非常合适的选择。RO3003™材料是由陶瓷所填充的PTFE(聚四氟乙烯)材料。它在10 GHz时的Z轴(厚度方向)的介电常数是3.0，公差在±0.04以内。它具有极低的损耗特性，有助于毫米波频段功率放大器电路中获得最大的增益，也非常适用于未来5G无线网络的信号回传的各种毫米波频段应用。

基于多层 PCB 技术的微带缺陷地结构减小电路的辐射损耗

约翰·孔罗德

罗杰斯公司，钱德勒，亚利桑那州

采用缺陷地结构的多层电路设计可增强滤波器性能且不必担心其泄漏和隔离。

微带缺陷地结构 (DGS) 多年来一直是高频电路设计的一种方法，同时也被广泛用于带状线和共面波导电路。虽然 DGS 电路的设计方法对诸如天线和滤波器等基于射频/微波的谐振器的电路性能和小型化有所帮助，但该技术也会受到低隔离度和过多的电磁 (EM) 辐射等严重缺陷的限制。基于 DGS 的电路会向外辐射电磁能量，从而产生电磁干扰。其缺乏足够的隔离度也会导致与相邻的射频/微波元件和电路出现设计中本不希望出现的相互干扰作用。幸运的是，由于多层电路结构在现代射频/微波电路设计中的应用越来越多，所以使用多层结构中而可以几乎不需要考虑辐射或隔离的设计和制造微带 DGS 电路成为可能。文章中就将使用一些现成的商业电路材料和通过低通滤波器 (LPF) 的设计来演示这种设计方法。

DGS 概述

理解 DGS 的最简单的方法可通过对比来理解。传统的信号地平面被视为一个没有任何间隔或中断的连续结构，诸如微带线之类的传输线的接地平面的电特性就是连续性。通过有目的地在地平面形成缺陷或不连续就是缺陷地结构。例如在接地面上蚀刻一个隔离开口，传输线的射频特性就会被改变。这是因为在这个 DGS 的范围内，电容和电感发生显著的变化。

一个简单的例子是在微带传输线的地平面上刻蚀的 H 形结构 (见图 1)。图 1a 所示的微带结构有两层。暗橙色表示顶层 (信号层) 上的线路，浅橙色表示底层 (接地层) 上的地平面。H 形的微带缺陷地结构会产生如图 1b 所示的一个带阻或带限的特性曲线，该响应类似于二阶巴特沃斯低通滤波器 (LPF) 的响应。DGS 这种可以产生的窄带带阻响应，有时可被用于滤波器设计中以改善滤波器的阻带部分中的阻带特性。如后续的低通滤波器设计可以看到，微带 DGS 的有效使用不仅改善了滤波器的阻带响应，而且极大地改善了滤波器的杂散谐波响应。

实际上，DGS 可以提高许多射频/微波电路的性能，包括低通滤波器 (LPF)，带通滤波器

(BPF)，贴片天线和其它谐振电路。IEEE 中能够搜索到很多有关 DGS 应用的相关论文。DGS 结构也可用来减小电路尺寸，并实现慢波效应的能力。

克服 DGS 的辐射和隔离

随着现代射频/微波电路的复杂性和集成度的不断提高，多层电路结构在设计中被广泛采用。多层印刷电路板可以制作成多种形状和不同的尺寸。包含微带缺陷地结构的多层印刷电路板（PCB）的合适设计，可以最大限度地减少甚至消除电磁辐射和隔离。

为了简单起见，以三层的多层印刷电路板为例，来展示减小 DGS 辐射和隔离的方法，如图 2 所示。该图中的多层板电路具有两种不同的电路材料，其介电常数分别为 ϵ_{r1} 和 ϵ_{r2} 。对于理想的 DGS，底层材料的介电常数 ϵ_{r2} 越低越好，如等于空气中的介电常数的值 1.0。在多层 PCB 结构中设计空气腔是可能的，但电路的加工比较难且成本较高。一个折中的办法是使用一种介电常数 ϵ_{r2} 值很低的电路材料，而这种材料的强度足以承受 PCB 的制造工艺。本文稍后将会解释使用不同 ϵ_r 值的材料的好处。^{4,5}

最上面的两层是微带和它的缺陷地平面。它们可能表现为接地的共面波导传输线，但如果是松耦合，即为微带线。使用贯穿所有三层的电镀孔（通孔）的接地平面能确保电路上下接地平面可靠接地，并且也给在第二层上的微带（缺陷）地平面提供了一个适当连接。这个掩埋式的接地对于微带线和 DGS 的性能优化是非常重要的。对于只具有两层的传统微带 DGS 结构，含有 DGS 开口结构的地面向附近的环境辐射能量。然而，在图 2 所示的三层结构中，由于三层的接地结构与其重复的接地过孔，辐射的能量被禁锢在电路中。

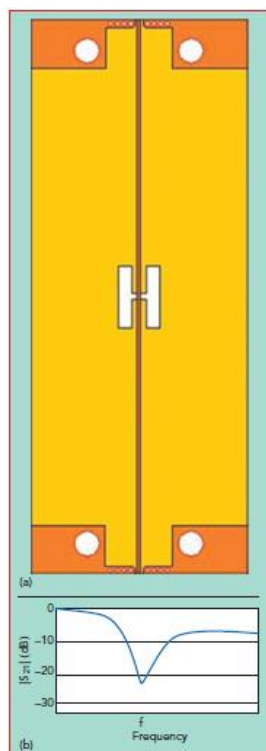


图 1 图(a)为其地平面上蚀刻的 H 形 DGS 微带传输线的俯视图

图(b)为此结构的 S21 参数。

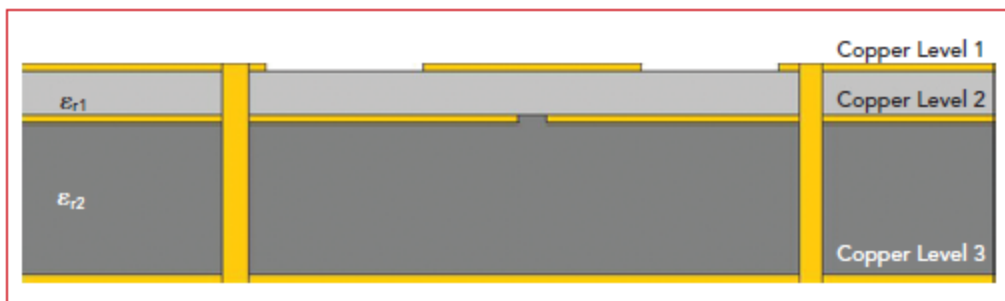


图 2 三层微带 DGS 的 PCB 横截面，用于实现无辐射和高隔离。

微带阶梯阻抗低通滤波器

下面通过微带阶梯阻抗结构来实际验证使用微带 DGS 结构的 LPF 滤波器克服辐射或隔离问题有效性。阶梯阻抗电路由低阻抗和高阻抗部分级联并不断重复而组成。如果设计得当，这些低阻抗和高阻抗部分在滤波器的不同部分将会产生电容和电感值，从而实现低通滤波器的功能。

采用微带阶梯阻抗的形式时，高阻抗部分和低阻抗部分之间的差异会影响滤波器的杂散谐波性能。高阻值和低阻值之间的较大差异会导致较少的杂散谐波含量和更优的阻带隔离；然而，可以实现的阻抗范围是有限的。例如，如果低阻抗电路元件的线路过宽，则会引起不必要的谐振，从而使滤波器性能恶化。一般规定这个结构的范围应不大于 $\lambda/8$ 的频率。相反，高阻抗使得导体宽度过窄而难以蚀刻加工。一个普遍规律是，最小微带导线的宽度应在 4 mils 以上，以提供给 PCB 加工商一个可以实现且可重复制作的电路设计。

为了实现高阻抗，采用 DGS 结构的电路设计可以增加电路阻抗而也不会导致导体宽度变窄而无法制造。这种设计就是在窄的导体下方的接地面上蚀刻出一个开口。蚀刻的开口增加了该区域的介质厚度，从而使得阻抗值增加。

DGS 技术也可用于增强滤波器阻带性能、减少杂散谐波响应。当杂散谐波在阻带响应的频率范围内，或者在必须改善滤波器阻带的频率范围内，就可以使用 DGS 技术。一般来说，为了在不降低其它滤波器性能参数的情况下有效抑制滤波器的杂散谐波响应，可以在已知的谐波或杂散响应的频率范围内设计窄带阻响应。然而对于 DGS 来说，在所需频率范围内最好使用宽带阻带响应。

为了更好地说明 DGS 电路技术在提高高频滤波器性能方面的优势，我们以研究 DGS 对微带阶梯阻抗低通滤波器的影响来说明。同样，在加工具体电路之前，我们先对电路进行电磁建模仿真，然后进行电路加工制造，最后用实际加工的电路进行测试来看电路性能的改善。为了充分了解 DGS 效应，滤波器使用高低不同的 ϵ_r 值的电路材料的特定组合，以展示电路材料的选择是如何影响微带 DGS 结构的性能的。

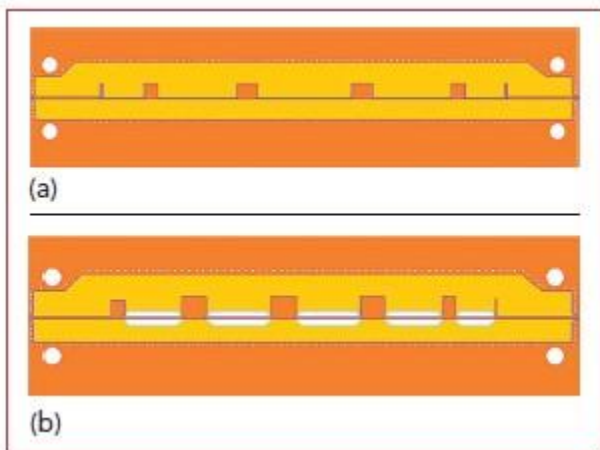


图 3-(a) 传统的微带阶梯阻抗低通滤波器，图 3-(b) 具有相同设计但在第二层中具有 DGS 开口的电路，用以实现高阻抗电路特征。

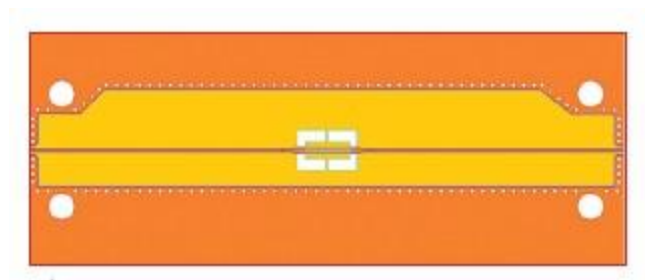


图 4 优化的 DGS 带阻特性的原型微带传输线，在 8.4 GHz 的频率下，可提供良好的通带回波损耗和较高的抑制能力。

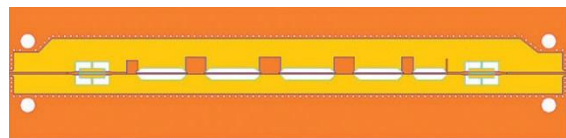


图 5 最终的微带缺陷地结构 LPF 电路设计，其包括 8.4 GHz 频率下用以增强抑制能力的传输线 DGS 结构。

滤波器的设计与建模

此 LPF 设计是基于切比雪夫 (Chebyshev) 传递函数, 带内纹波 0.1 dB、3 dB 的截止频率在 2.2 GHz。我们同时也设计和加工制造了两种形式的滤波器用以对比: 第一种作为参考, 没有 DGS 的设计; 第二种设计具有完全相同的特性, 但是采用两种不同的 DGS 设计方法, 并且使用高低不同的 ϵ_r 值的电路材料的特定组合, 构成了三层微带 DGS 电路的多层结构。用于本研究的高 ϵ_r 材料是来自罗杰斯公司的 8mil 的 RO4360G2™ 层压材料, 其设计 Dk 值为 6.4, 如图 2 中的 ϵ_{r10} 。

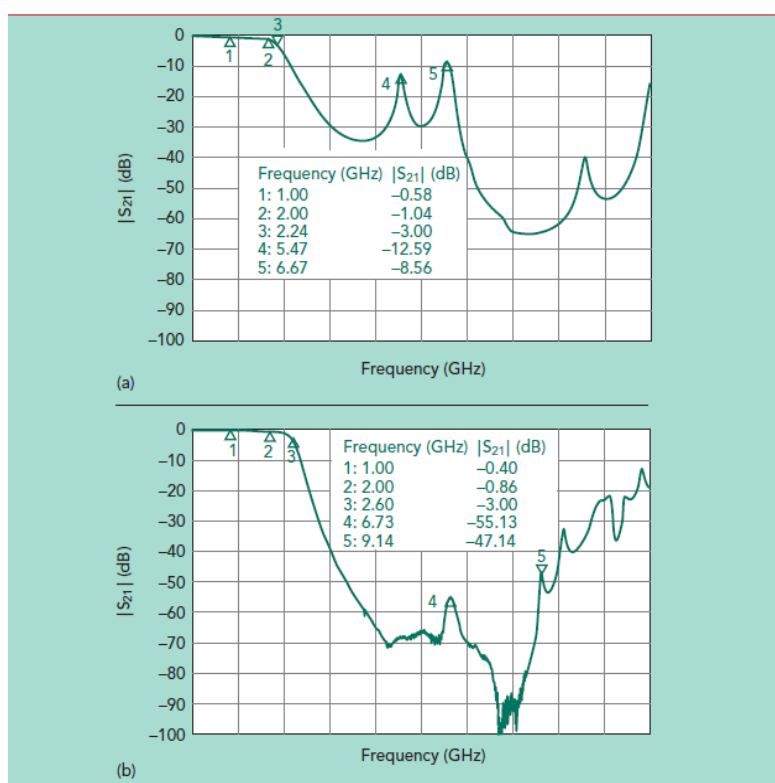


图 6-(a) 图 3a 中没有 DGS 设计的 S21 响应;

图 6-(b) 图 3a 中的 LPF 电路的 S21 响应。

低 ϵ_r 电路材料也是来自罗杰斯公司的 22mil 的 2929 粘合材料, 其设计 Dk 值为 2.9, 也就是如图 2 中的 ϵ_{r20} 。这种材料组合的微带阶梯阻抗 DGS 设计的好处是对于使用高 ϵ_r 材料实现低阻抗部分, 而用低的 ϵ_r 材料来实现高阻抗电路。当在第二层的接地面中形成蚀刻开口以构建高阻抗电路特征

时，该电路的表现像是基于更厚的材料的特性；此时这个较厚的介质是由两种不同 ϵ_r 值的材料组合而成，其设计 Dk 值分别为 6.4 和 2.9。考虑到两种材料的厚度，它们组合后得到的复合设计 Dk 值约为 3.4。这种较厚的、低的 ϵ_r 值复合介质用于形成的阻抗比单独使用 8mil 的介质可以有更高阻抗的电路特征。

图 3a 是第一种 LPF 电路设计的俯视图，无 DGS 结构，而图 3b 是在第二层中有 DGS 开口，完全相同性能的电路设计。将顶层（第一层，信号层）表示为暗橙色，将第二层（中间的微带接地层）表示为浅橙色。在电路的周围有许多重复的接地过孔（以白点表示），这样做是为了确保中间的接地平面，顶层和底层始终良好的接地。底层（第三层，以白色显示）位于微带中间接地层（第二层）的下方。如果图 3b 是一个只有两层的微带缺陷地结构，那么白色区域就代表能量可能辐射到外界的路径。由于底层（第三层）的存在，辐射能量将被大大降低。

为了展示这种 DGS 设计方法的一些好处，假定在 8.4GHz 时需要足够好的抑制性能。为了在 LPF 中实现这种性能，我们先仿真了一个简单的微带传输线，在其第二层上设计了一种特殊的微带开口作为 DGS 缺陷地，目的是在 8.4 GHz 时实现宽带带阻功能。为了改善 8.4 GHz 时的隔离度，图 4 中的微带线 DGS 电路结构也被包含在滤波器的最终设计中，用于滤波器的 50 Ω 馈线。该模型经过优化后，可在低通滤波器的通带上，也就是 0Hz 到 2.2GHz，实现最佳回波损耗。图 5 所示就是包含所有特性的最终的 DGS LPF 设计。

性能表现

对比滤波器的响应特性，如图 6 所示。图 6a 中显示了没有 DGS 特性的 LPF 电路特性，而图 6b 中是有 DGS 设计的 LPF 电路的 S21 响应。可能已经注意到，带有 DGS 的滤波器电路的 3dB 截止频率与设计目标约有偏差。对于参考滤波器电路(即没有 DGS 的电路) 的 3dB 截止频率在 2.243GHz 处（图 6a 中的标记 3），而具有 DGS 的滤波器电路的 3dB 截止频率在 2.604GHz 处（图 6b 中标记 3）。

比较两个滤波器的 S21 响应，最显著的差异出现在 3dB 截止点以外的阻带中。对于没有 DGS 的参考滤波器电路，标记 4 和 5 表示了由不必要的谐振所导致阻带较差的性能。标记 4 的频率位于高阻抗导体的中段相关的谐振峰处。该处的谐振是由于电路中间的高阻抗、窄导体段，它的 $\lambda/2$ 长度约在 5.47GHz 处，从而产生驻波导致谐振。而标记 5 是大约 $3f_0$ 处的杂散谐波，其中 f_0 是 3dB 截止频率。

对于包含微带缺陷地结构的 LPF 电路来说，高阻抗部分的物理长度会变短，由于介质厚度不同，且介电常数也不同（复合介电常数， ϵ_{r1} 为 6.4 和 ϵ_{r2} 2.9），该区域中的波长是不同的。此外，

DGS 开口产生的慢波效应，使电路长度更短。由于这些差异，使得在 DGS 结构中消除了 5.47GHz 处的 $\lambda/2$ 谐振。

在 $3f_0$ 处产生的寄生谐波是微带阶梯阻抗滤波器产生的固有谐波产物。众所周知，如果阶梯阻抗电路特征的高---低阻抗具有更宽的范围，这种寄生谐波便可得到显著的抑制。对于不包含 DGS 结构的电路，在 $3f_0$ （标记 5，6.671GHz）处的抑制度仅为 8.6dB；而具有 DGS 结构的电路，在 $3f_0$ 处（图 6b 中的标记 4）的抑制度达到了 55.1dB。还要注意的，带有 DGS 结构的滤波器在 8.4 GHz 时的阻带性能也得到了改善。在图 6b 中标记 4 和 5 之间的 8.4GHz 附近达到了几乎约 90dB 的高抑制度。

参考文献

1. S. K. Parui and S. Das, "A New Defected Ground Structure for Different Microstrip Circuit Applications," *Radioengineering*, Vol. 16, No. 1, April 2007, pp. 16–22.
2. L. H. Weng, Y. C. Guo, X. W. Shi and X. Q. Chen, "An Overview on Defected Ground Structure," *Progress in Electro-magnetics Research B*, Vol. 7, 2008, pp. 173–189.
3. M. K. Mandal and S. Sanyal, "A Novel Defected Ground Structure for Planar Circuits," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, Vol. 16, No. 2, February 2006, pp. 93–95.
4. J. Coonrod, "Harmonic Suppression of Edge Coupled Filters Using Composite Substrates," *Microwave Journal*, Vol. 55, No. 9, September 2012.
5. J. Coonrod, "Applied Methodology for Harmonic Suppression of Microstrip Edge Coupled Bandpass Filters Using Composite Circuit Materials," *European Microwave Week*, September 2015.

如何在电磁仿真软件中模拟铜箔表面粗糙度对电路的影响

铜是用于射频/微波印刷线路板的优良导体。它是设计诸如微带线、带状线等低损耗传输线的基础，然而，不同的电路材料上，甚至同一张材料的不同区域，铜箔表面的粗糙度也可能不同，从而影响到高频性能。在理想情况下，为了在线路板上和线路板之间提供一致的信号传输特性，线路板上的铜箔应光滑且良好一致的。但实际上任何覆铜层压线路板的铜箔表面都具有一定的粗糙度，可能会影响线路板的最终性能。

幸运的是，最新的电磁仿真软件允许用户定义添加线路板材料的关键特性，如介电常数（DK）和铜箔表面粗糙度等参数。在电路设计和性能仿真过程中，可以使模拟仿真的结果与实际电路的测量结果非常一致，即使铜箔表面粗糙度在整个线路板存在一定产生变化的电路。

了解介电常数

当在商业电磁仿真软件中对电路进行建模仿真时，为了充分考虑线路板材料铜箔表面粗糙度的影响，了解铜箔表面粗糙度如何影响高频电路的性能，以及DK与材料的铜箔表面粗糙度之间的关系，是很重要的。事实上，线路板材料的电路的DK值会受到铜箔表面粗糙度因素的影响，在电磁仿真软件中把这种电路的DK值通常称为设计DK(Design DK)值。

例如，依据铜箔表面粗糙度的变化，导致在该材料上加工制成的电路相位响应会产生不可预期的变化。在某些高频应用条件下（因信号有更小的波长）这种变化会更加显著，例如，目前在汽车高级驾驶辅助系统（ADAS）应用中的电子安全系统，以及被规划用于第五代（5G）移动无线通信网络中的高速短程数据链路等应用的毫米波频段。

设计DK值与频率相关，通常把10GHz频率下的值作为设计DK值，不同频率下的其DK值可能不同。设计DK是从微带传输线电路的测试中得到的，是材料的z轴（厚度）方向的DK值。

一些电磁仿真软件仅使用z轴方向的设计DK值进行仿真，而另一些电磁仿真软件可能同时需要线路板材料的z轴和x-y平面DK的值。当要考虑电路的各向异性参数时，通常需要在软件中输入材料x-y平面的DK值。

使用哪个介电常数?

线路板材料的设计DK值对于电路电磁仿真的准确性而言是极其重要的。了解线路板材料制造商对某一特定材料的设计DK值的测试方法很有帮助，材料的设计DK是通过使用微带差分相位长度测试方法得到。

虽然可以通过在严格的环境受控条件下测量得到线路板材料的Dk值，但是也有许多Dk测试方法仍基于现有的电路。例如，微带环谐振器法和微带差分相位长度法。在精确的测试条件（频率）下，电路的性能测量揭示了有关线路板材料的特性，这有助于确定其Dk值。不过，电路中的任何变化，例如导体蚀刻和镀铜厚度，都会导致材料Dk值测量的不准确性。当使用多层电路（例如基于带状线的电路）来确定材料的Dk时，其他的一些变量也可能导致线路板材料的Dk值的测量不准确。例如，多层板内层的厚度变化，或者用于连接的粘合材料的Dk可能与芯板材料的Dk不同等。因此，为了在仿真软件中准确的仿真结果，在确定线路板材料的Dk或最终设计Dk时，必须考虑到这些因素。

罗杰斯公司的线路板材料都会提供设计Dk值，测试方法是基于微带传输线电路的方法来确定材料的Dk值。这些设计Dk值明确标示在线路板材料数据表中，这个Dk值不包括铜箔表面粗糙度的影响。然而，MWI-2018软件工具上可以获得包括铜箔粗糙度影响、更多更详细的材料设计Dk的信息，对于在商业电磁仿真软件中对电路建模非常有用。MWI-2018可以从Rogers技术支持中心 www.rogerscorp.com/techub 网站免费下载。

Rogers的MWI-2018软件可以通过各种选项显示每种线路板材料的设计Dk值。一种选择是Bulk Dk，其只考虑材料自身而不考虑铜箔表面粗糙度的影响。这种设计Dk值用在仿真软件具有可以计算电路上铜箔粗糙度带来的相位响应影响的能力，不需要一个“预加载”的设计Dk值。而有的仿真软件没有内嵌这种仿真器时，就需要选择含有铜箔表面粗糙度的影响的另外的设计Dk值。

目前很多的商业电磁仿真软件都可进行铜箔表面粗糙度对相位响应的影响的电路建模。例如，来自ANSYS的HFSS电磁仿真软件，来自Computer Simulation Technology 的CST Studio套件，以及来自Sonnet Software的 Sonnet电磁仿真软件等。ANSYS HFSS软件能够预测电路中铜箔表面粗糙度引起的电路相位效应（今年早些时候发布的一篇博客却给出了相反的说法在这予以纠正）。这些电磁仿真软件已经可以计算出铜箔表面粗糙度对电路相位性能的影响，因此并且不需要额外的数据或不包含铜箔粗糙度影响的设计Dk值，Bulk Dk。

对于无法预测铜箔表面粗糙度影响的仿真软件，就应使用含有铜箔粗糙度影响的设计Dk而不是“Bulk Dk”，这些值可以在包含罗杰斯所有材料设计Dk的MWI-2018工具软件中找到。仿真时候选择不同的Dk值会影响仿真结果的准确性。对于能够计算材料铜箔表面粗糙度对电路相位响应影响的仿真软件，就应该选择Bulk Dk值，因为仿真软件已经考虑了铜箔带来的这些相位效应。如果再选用含有铜箔粗糙度影响的设计Dk值，那么电路仿真中就两次考虑了铜箔粗糙度带来的影响，造成仿真的不准确。

评估面向5G应用的PCB板电镀通孔性能

约翰·孔罗德

罗杰斯公司，钱德勒，亚利桑那州

5G无线网络因覆盖了较宽的频带，对工作于毫米波频率下5G电路的线路板材料提出了特殊的要求。本文探讨了用于PCB材料顶层铜箔与底层铜箔之间传输信号的金属化过孔内壁的表面粗糙度对材料的最终射频性能的影响。

第五代无线网络被誉为是实现现代通信的最重要的技术成就之一，5G技术既使用低于6GHz的信号频率，也有用于短距离回传，高速数据链路的毫米波频率。在如此宽频率范围内的电路需要使用特殊的线路板材料，而罗杰斯公司的RO4730G3™电路板材料就成为许多电路设计工程师的选择，因为它具有从射频到毫米波频率的出色性能。然而，这种层压板材料与传统的电路材料的存在一个差别是材料使用了中空微球作为介质的填充材料，这个差异引起了一些电路设计者的担忧。

由于微球的存在，电路加工结构的外观——例如从一个导电层到另一个导电层的金属化过孔（PTH）——看起来比没有采用这种特殊介质填料的传统的线路板材料，制作形成的金属化过孔要更加粗糙。可能看起来是这样的，又或者是有什么其他的担忧，毕竟因为采用中空微球填料的线路板在做金属化过孔时孔壁非常的粗糙。但一系列的研究表明，无论是在射频频率下，还是对5G无线网络的毫米波频率下，中空微球填料对金属化过孔的影响纯粹是表面外观上的，它并不会影响电路的性能或金属化过孔的可靠性。

比较不同的金属化过孔

所有电路金属化过孔的孔壁表面的纹理均会有不同的细微区别，即使在比较同一电路板的孔壁表面的粗糙度时也是如此。由于钻孔过程涉及多个因素，金属化过孔的孔壁表面会因孔而异。在具有微球填料的材料中，钻头可能会影响微球填料，也可能不会，从而导致了差异的产生。当钻头撞击并破碎空心球体时，该过孔的铜镀层将沿着破碎的球体的轮廓生长，孔壁表面将不再光滑和平坦。图1显示了电路线路板中微球填料的存在如何影响该电路材料形成金属化过孔时导致的表面粗糙度的增加。我们很自然地会质疑，与金属化过孔更光滑表面的传统电路材料相比，这种粗糙度是否会导致电路的电气性能或可靠性方面产生不良影响。

随着5G无线网络中宽频率范围的高频电路材料的需求日益增长，了解具有空心微球填料的线路板材料中金属化过孔表面粗糙度是否对电路性能有影响是非常有意义的，因为传统的线路板材料中没有这种填料。通过一系列的研究，比较了来自罗杰斯公司的具有玻璃增强和微球填料的20.7mil厚的RO4730G3™线路板材料和没有玻璃增强、具有更小且非空心填料的20mil厚的RO3003G2材料上过孔

孔壁的不同是否会带来影响。为了测试孔壁表面粗糙度是否有影响，我们开发了许多不同的测试电路来比较线路板上的金属化过孔在5G宽的频率范围的情况。

测试电路都基于微带传输线结构，在电路中间有一个通孔，用作从介质基板材料的顶部铜层到底部铜层的导体和信号过渡。测试电路的长度基本都为2英寸左右。我们也使用了其他的一些高频传输线技术作为参考，来评估金属化过孔孔壁表面粗糙度是否存在影响，包括没有信号通孔的8英寸和2英寸长的微带电路，以及8英寸和2英寸长的没有通孔的接地共面波导（GCPW）电路。为了确保测量时的一致性，测试使用了相同的两个2.4毫米的同轴连接器用于所有电路的测试。且测试连接器总是以同样的方式连接到VNA的测试端口，以保持相位一致性。

习惯于研究如图1所示的印刷电路板（PCB）显微图像的设计人员可能会担心金属化过孔的粗糙度会带来影响，尤其是在5G电路的高频频率下。一般来说，对于不使用微球填充的传统高频电路材料来说，粗糙的孔壁表面可能意味着在制造过程中出现了某些问题，并可能会影响到过孔的可靠性。但对于空心微球填充的电路材料，形成表面粗糙的金属化过孔是正常的，这并不代表其性能差。为了证明这种电路材料中的粗糙的金属化过孔不会影响过孔可靠性和电性能，我们将新材料（较粗糙的金属化过孔）与更传统的电路材料（更光滑的金属化过孔）进行研究比较，来消除将这种材料用于5G无线网络电路设计和其它任何应用到毫米波频率范围的电路产生的任何疑虑。

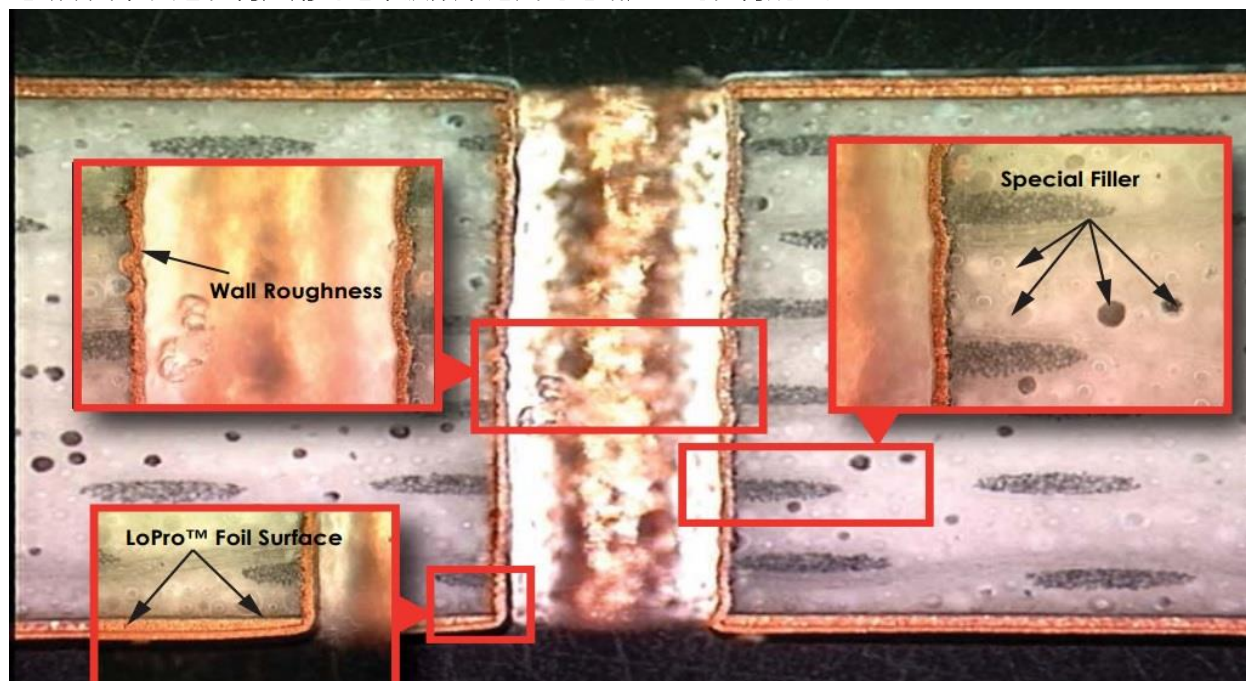


图1. 与没有微球填料的电路材料相比，使用空心微球填料的RO4730G3电路材料可能形成粗糙孔壁表面的金属化过孔。

我们在评估金属化过孔及其孔壁表面对高频电路性能的影响之前，对RO4730G3电路板及其微球填料进行了广泛的评估，以充分了解它们在不同工作条件下的特性。进行了包括10层高加速热冲击（HATS）/ 金属化过孔（PTH）可靠性、双面PTH可靠性、双面PTH-PTH导电阳极丝（CAF）电阻、平面-平面CAF电阻、MOT和表面-表面贴装（SMT）测试、绝缘电阻，金属化过孔质量等一系列的材料测试研究。所有测试表明，材料及其微球填料在行业标准测试条件下毫无问题地通过了这些测试。有关这些研究测试的更多信息，请访问罗杰斯公司官网的技术支持中心 <http://www.rogerscorp.com/techub>。本文的重点是介绍在射频、微波和毫米波频率下使用该材料是否可能产生的问题。

事实上，在对这种线路板材料及其微球填料进行的多项研究测试中，其中我们利用两种具有不同金属化过孔壁特征的材料，研究金属化过孔壁表面粗糙度变化对RF性能带来的各种影响对比。研究测试基于一种特殊设计的微带传输线电路，分别在顶层和底层都有微带线电路，中间介质是介质材料，通过金属化过孔实现顶层到底层的微带线的连接。这些测试旨在为5G应用提供非常有意义的的数据参考，因此测试电路在100 MHz至40 GHz范围内都具有良好的射频性能。

在该研究测试中使用的两种材料的介电常数（Dk，或 ϵ_r ）都非常接近，其值都在3附近。两种材料也选用具有相同厚度的材料，均为20mil。二者之间的主要区别是其中一个可以制作孔壁表面光滑的金属化过孔，而另一个制作得到的金属化过孔壁表面较为粗糙。可以制作形成光滑金属化过孔壁表面的材料是罗杰斯公司的RO3003G2™线路板材料，而具有玻璃增强材料和空心微球填料的RO4730G3™线路板制作得到的金属化过孔壁表面较为粗糙。

电路金属化过孔壁表面的纹理差别通常被认为是电路制造的问题，而不是材料的问题。但是，一些材料特性可以使金属化过孔壁表面得到优化，包括电路材料填料类型、填料尺寸、玻璃增强和树脂类型等。作为RO4730G3™线路板及其空心微球填料（粗糙的金属化过孔壁表面），比较的RO3003G2™线路板材料是没有玻璃增强材料的，且填料颗粒也非常的小。假设二者均采用最佳PCB加工方法，后者将会有非常平滑的金属化过孔壁表面。如图2所示，是RO3003G2™线路板可形成的非常光滑的金属化过孔孔壁。

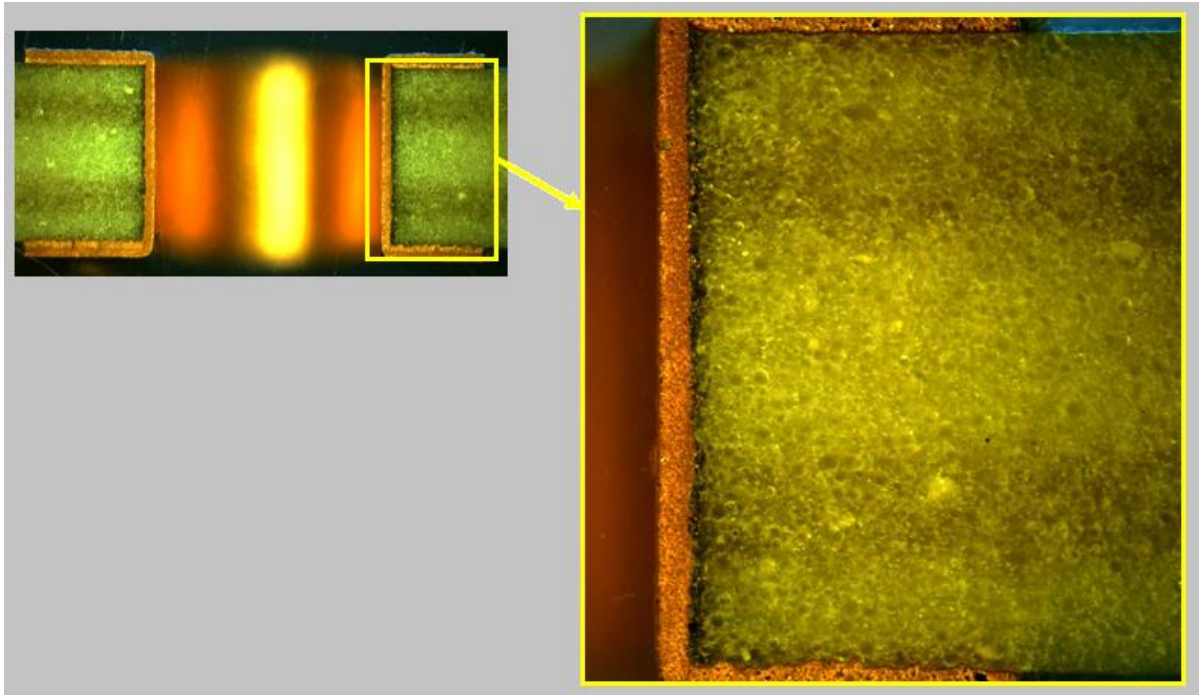
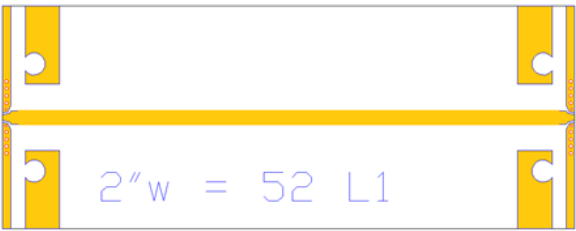


图2.显微图像显示了在20mil厚的RO3003G2电路材料中形成的表面光滑的金属化过孔孔壁。

对于相同厚度的这两个电路材料，图1和2中所示的两种材料的金属化过孔的表面粗糙度的差异是非常显而易见的。观察两个图可能会产生这样一个问题，即金属化过孔的较高表面粗糙度是否意味着其在射频性能方面存在什么问题？对于测试电路，微带传输线电路是一种有效的方法来比较光滑和粗糙的金属化过孔壁表面对射频性能的影响，因为与其他高频传输线结构相比，微带线的加工制造过程中的一些变化对射频性能的影响较小。

为了使40GHz下的不同电路材料中的金属化过孔提供有意义的结果，我们投入了大量的精力来优化这些微带电路。其中之一是从射频测试连接器向PCB微带线的信号过渡就是一个大的设计挑战。通常情况下，在20mil厚的电路板上的微带传输线的信号过渡上很难得到回波较好的特性，特别是频率在25GHz以上的传输线。对于宽带微带电路，小于15dB或更好的回波损耗通常被认为是可以接受的。通孔过渡是另一个重要的需要考虑的因素，特别是在毫米波频率下较难实现从某一层到另一线路层的低损耗过渡。一般来说，在20mil厚电路材料上很难实现高于20GHz的微带线通孔过渡的良好性能。但是考虑到上述困难，本研究的微带先测试电路，其设计的目标是频率达到40GHz时也会得到良好的效果，如图3所示。

Standard microstrip transmission line circuit

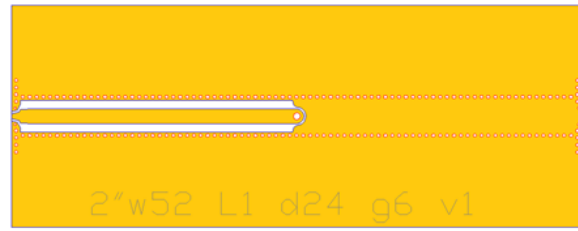


Top copper layer

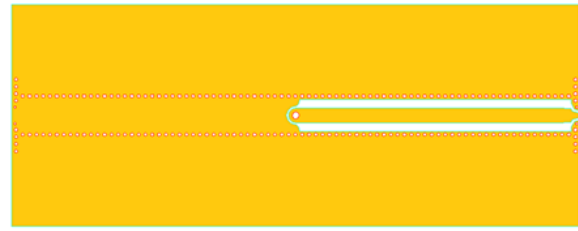


Bottom copper layer

Microstrip transmission line with via transition



Top copper layer



Bottom copper layer

图3. 这些电路是用于评估金属化过孔孔壁表面粗糙度对高频下RF性能的影响的电路设计，左图是标准的微带传输线，右边是具有金属化过孔的微带线电路。

图3左侧所示的“标准”微带线电路是通过接地共面波导（GCPW）结构来实现信号过渡转换的微带电路。电路的主体由微带传输线构成，GCPW结构在电路的末端用于同轴（2.4毫米）连接器到微带的过渡转换（Southwest Microwave公司的型号# 1492-04A-5）。图3右侧电路就是用于本研究的测试电路的顶层和底层电路。它们是松耦合的接地共面波导，中间是金属化过孔，提供从顶层到底层电路的过渡连接。测试电路的长度为2英寸，松耦合的接地共面波导传输线电路将具有与微带传输线电路非常相似的射频性能。松耦合在较高频率下具有良好的性能，非常适合40GHz下的测试。

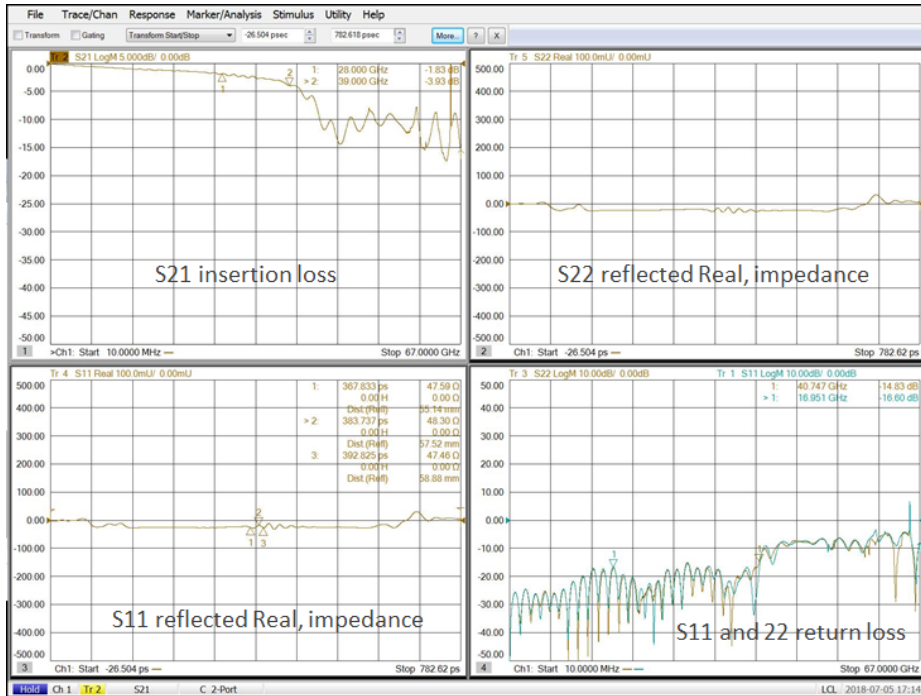


图4. 这是网络分析仪测试得到的不同电路且具有不同壁表面纹理的金属化过孔的S参数的示例，分别包括频域和时域。

图4是矢量网络分析仪测量的频域和时域的结果图。图右下角的回波损耗(S11和S22)的两个标记分别表示了不同频率下的回波损耗值。标记2位于40.7GHz处，是该测试电路具有良好回波损耗的最高频率。反射波S22的阻抗显示在图右上角，反射波S11的阻抗显示在图左下角。如S11的标记所示，在通孔转换中的阻抗值，标记1,2和3，电路具有大约48Ω的阻抗。在通孔过渡区域中可观测到较小的阻抗变化，阻抗变化小于2Ω，对电路的RF性能几乎没有影响。从这些测试结果，电路可被认为从顶层到底层信号具有的良好的通孔过渡，同时，它还具有到40GHz的良好插入损耗性能（如图左上角所示）。

在同一块大的PCB板上加工制作了许多相同设计的电路，以便更好地理解由正常的材料变化以及PCB制造工艺引起的变化进而导致射频性能的变化。我们同时加工了两块大的PCB板（板1和板2），上面包含多个多个测试电路，且这两个大板来自于相同且更大面积的同一大板材料。

更大大板的材料原始尺寸为24×18英寸，被切割成两个尺寸均为12×18英寸的板子，因来自同一大板因此两个12×18的电路可以保持材料的一致性。在选取的两种20mil RO3003G2和20.7mil RO4730G3材料的微带线测试电路的制作中，采用了完全相同的电路加工制作工艺和流程以减小加工带来的影响。

测试结果的对比

通过对电路材料的研究测试，得到了大量的测试数据，包括了每个测试电路的：插入损耗，回波损耗，阻抗，群延迟和相位角（如图4所示）等。直通测量被用作确定金属化过孔对电路性能的影响的方法。同时也测量得到了电路的阻抗，但并不被认为阻抗是反映金属化过孔对射频性能影响的最佳指标。微带线电路（或松散耦合的接地共面波导）的阻抗依次受介质厚度、导体宽度、铜厚变化和介质Dk等参数的影响。与金属化过孔孔壁表面带来的影响相比，金属化过孔过渡区域中的阻抗将受这些变量的影响更大。出于上述原因，虽然收集到了阻抗数据，但阻抗并未用于金属化过孔孔壁表面对射频性能影响的判断。

S21的相位角是被用作金属化过孔孔壁表面变化而引起的电路射频变化的度量，因为沿微带传输线的导体表面粗糙度将通过该传输线影响信号的相位角^{1,2}。直通测量对有转换通孔的射频信号路径较为敏感。为验证测试的准确性和可重复性，在其中一个测试电路上进行的重复性研究发现，在39GHz时测量的S21相位角的标准差是小于±1.2度。我们在测试中使用的S21相位角是S21的展开的相位角，它是-180至+180度相位角的绝对值总和。采用这种方法更有意义的地方在于提高分辨率，因为即使对于5G应用中达到39GHz的频率，对非展开相位变化分辨率也不太灵敏。但是，对于Dk约为3的线路板材料上的2英寸长的微带传输线，39 GHz下的展开相位角范围将可达到数千度，因此测试电路和测量方案可提供合适的相位分辨率。

虽然金属化过孔孔壁研究中收集的数据很宽泛，但在这里依旧可以分享一些结果。例如，图5显示了在同一块板上制作的设计相同的六个不同电路的数据，并与作为参考的没有通孔过渡的微带传输线进行比较。图5还可以看出在第二块板上制作的设计相同的六个不同电路的数据（这两个电路板最初是从同一块24×18的材料上切割得到的）。测试结果是基于20mil RO3003G2，其具有平滑金属化过孔孔壁表面。

Circuit ID	Phase angle measurements (deg)			Phase angle differences (deg)		
	24 GHz	28 GHz	39 GHz	24 GHz	28 GHz	39 GHz
No via	-3189	-3728	-5237	reference	reference	reference
P1 C1	-3167	-3708	-5237	22	20	0
P1 C2	-3169	-3711	-5241	20	17	-5
P1 C3	-3165	-3706	-5233	24	23	3
P1 C4	-3163	-3704	-5231	26	24	6
P1 C5	-3165	-3706	-5234	23	22	3
P1 C6	-3166	-3707	-5236	23	21	0
No via	-3186	-3725	-5233	reference	reference	reference
P2 C1	-3167	-3707	-5233	19	18	0
P2 C2	-3165	-3706	-5231	21	19	2
P2 C3	-3164	-3704	-5227	22	22	6
P2 C4	-3163	-3703	-5226	23	23	7
P2 C5	-3165	-3705	-5229	21	20	4
P2 C6	-3161	-3701	-5223	25	25	10

	24 GHz	28 GHz	39 GHz
average	22.93	21.13	1.11
Std dev	1.91	2.32	3.56
range	5.64	6.76	10.13

	24 GHz	28 GHz	39 GHz
average	22.00	21.20	4.83
Std dev	2.13	2.40	3.62
range	5.93	6.70	9.97

图5. S21展开的相位角测量是含有金属化过孔的2英寸长的微带传输线电路。线路板材料为厚度20mil的RO3003G2，其可得到非常光滑的金属化过孔壁表面。

图5中的电路ID可以显示电路来自哪个12×18英寸的大板，以及该板上的电路ID编号。例如，P1 C4来自板1，电路编号为4号。电路彼此之间互相远离并均匀地分别在12×18英寸的板上，以保持一致性。某些变化是可以事先预料到的，因为它们对相位角的差异非常敏感。某些变化是由于PCB制造过程而造成的，而不是金属化过孔壁粗糙度的原因，包括导体宽度的变化，镀铜厚度的变化和钻孔质量的变化。此外，金属化过孔周围的缝隙由于PCB的正常制造公差也会出现一些变化。同样，每个板上的微小材料变化，如Dk值的微小变化，也可能导致相位的变化。考虑到图5所示的测试值，在39 GHz时相位数据的可重复性标准差小于±1.2度，这是非常好的。

虽然不是测量中的一个因素，RO4730G3™ 电路材料的 Dk 公差保持在±0.05 范围内被认为是非常好的性能表现。然而在更高的频率下，即使轻微的 Dk 变化有时也是很明显的影响。例如，在 39 GHz 时，0.05 的 Dk 偏移将导致大约为 15.3 度的相位角变化。对于±0.05 的公差或 0.10 的总 Dk 偏移，由于电路材料 Dk 变化，在 39GHz 时的相位角可能会移动多达 30.6 度。当考虑图 5 中的相位角变化数时，这个数值具有很好的参考意义。但由于作为这些金属化过孔评估的电路材料板都来自于相同的原始大板，因此由于 Dk 变化导致的该研究中的相位角变化将很小。图 6 提供了具有光滑金属化过孔孔壁的电路（来自图 5 的 RO3003G2™ 的重复测试数据）和具有粗糙金属化过孔孔壁（RO4730G3™）的电路的比较结果。

Circuits using RO3003G2 materials (smooth PTH via hole wall)

Panel 1 statistics for phase angle differences

	24 GHz	28 GHz	39 GHz
average	22.93	21.13	1.11
Std dev	1.91	2.32	3.56
range	5.64	6.76	10.13

Panel 2 statistics for phase angle differences

	24 GHz	28 GHz	39 GHz
average	22.00	21.20	4.83
Std dev	2.13	2.40	3.62
range	5.93	6.70	9.97

Circuits using RO4730G3 materials (rough PTH via hole wall)

Panel 1 statistics for phase angle differences

	24 GHz	28 GHz	39 GHz
average	23.85	24.03	7.70
Std dev	2.28	2.73	3.29
range	6.06	6.89	7.60

Panel 2 statistics for phase angle differences

	24 GHz	28 GHz	39 GHz
average	19.68	18.61	-4.16
Std dev	2.23	2.74	4.05
range	6.83	8.31	10.47

图 6.比较了在三个关键的 5G 频率下，不同线路板上制作的微带传输线路的相位角差异统计情况。左边的数据是光滑的金属化过孔孔壁表面电路的测试结果，而右边的数据是粗糙的金属化过孔孔壁表面的测试结果。

如前所述，在研究过程中，我们都尽量减少材料的变化带来的影响，如板 1 和 2 都取自同一个大板确保材料 Dk 差异最小。因此相位角的变化和出现的任何差异主要是受到电路制造过程的影响。当对同一块板的电路进行结果的分析时，此时相位角的差异来自于 PCB 加工制造和材料变化的影响都最小，因为同一块板是完全同时进行的加工。正因为如此，在同一块板上研究多个电路可以很好地了解微带线路的金属化过孔质量。PCB 制造过程也可能导致比预想更为粗糙的金属化过孔孔壁表面。如图 6 所示，每一块板上的 S21 展开相角上都有一定的变化，但当比较两种不同材料上的电路相位变化时，

这种变化实际并不显著。

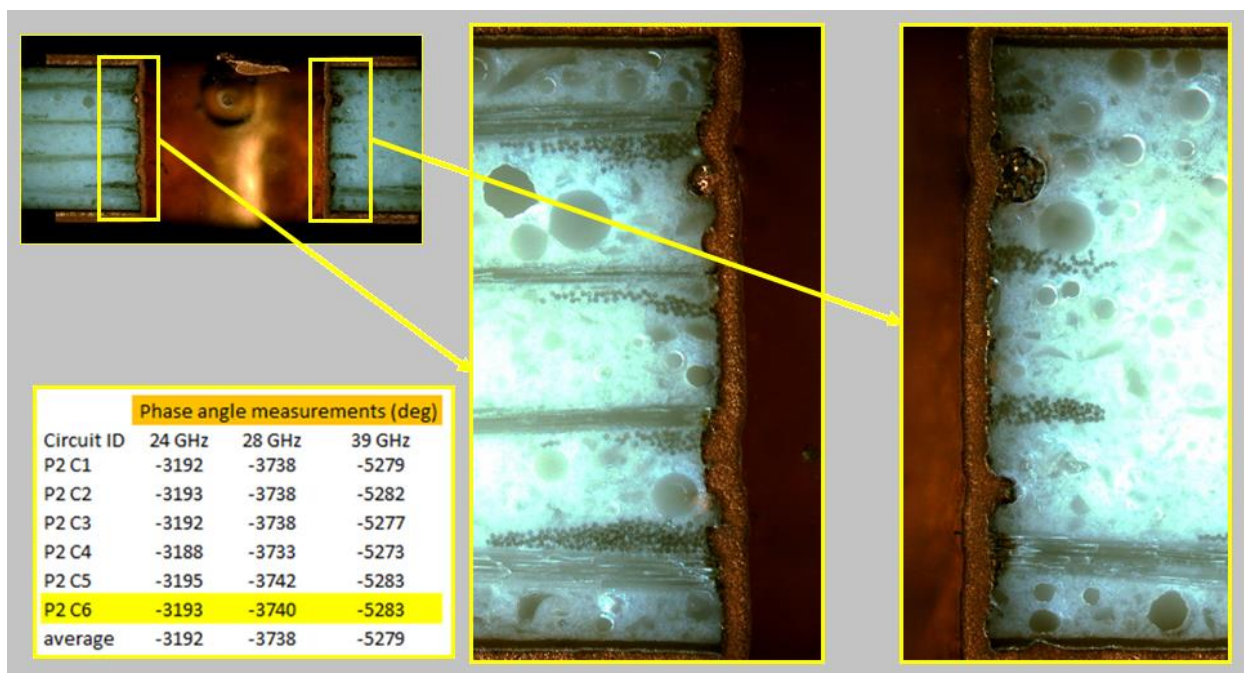


图 7.RO4730G3 材料的从顶层到底层线路的金属化过孔孔壁（较为粗糙）的表面特征和 3 个毫米波频率下相位测量结果。

显然，通过观测显微照片，用于顶层线路与底层线路相连接的金属化过孔的表面壁可能会呈现出很大的不同。例如，图 2 显示的 ID 为 P1/C1 是在 20mil 厚的 RO3003G2 材料上制作的电路金属化过孔，它就有非常光滑的金属化过孔孔壁。图 7 ID 为 P2/C6 的电路金属化过孔的外观，是在厚度为 20.7mil 的 RO4730G3 线路板材料上的过孔，这种材料上的金属化过孔壁表面相对就要粗糙一些。仅从外观上看，可能会有一些担心是否这种金属化过孔孔壁表面粗糙度会对射频性能带来影响。但正如上述几项研究所表明的那样，粗糙和光滑的金属化过孔侧壁之间的差异仅仅是表面的，至少对于在 40 GHz 下的这些测试电路上，完全不用担心它们对射频/微波/毫米波性能的会带来性能的影响。

需要说明的是，本文所列的信息只是对平滑金属化过孔和粗糙的金属化过孔的电路材料研究中收集的数据的一小部分。研究的目的是为了证明金属化过孔壁表面粗糙度对射频及毫米波频率性能的影响很小。如需获得更多相关的信息，通过与罗杰斯公司的当地代表联系。

参考文献

1. J. W. Reynolds, P. A. LaFrance, J. C. Rautio, and A.F. Horn III, “Effect of conductor profile on the insertion loss, propagation constant, and dispersion in thin high frequency transmission lines,” DesignCon 2010.
2. A. F. Horn III, P. A. LaFrance, C. J. Caisse, J. P. Coonrod, and B. B. Fitts, “Effect of conductor profile structure on propagation in transmission lines,” DesignCon 2016.

欢迎关注罗杰斯先进电子解决方案微信服务号



罗杰斯上海：021-62175599

罗杰斯深圳：0755-82366060