

电路板材料在毫米波波段的应用

Managing Circuit Materials at mmWave Frequencies

作者：John Coonrod 罗杰斯公司

在短距离通信和高速近场通信 (NFC) 应用中，毫米波波段 (mmWave) 正被广泛使用。毫米波集成电路 (IC) 供应商也正通过提供高性价比和性能卓越的元器件以支撑这种增长。对于高频集成电路设计者来说，了解印刷电路和电路材料在毫米波波段的缺陷与性能是非常重要的。插入损耗、色散、杂散波模式抑制、信号的有效过渡以及加工方式等诸多 PCB 的问题都能影响毫米波电路的性能。本文将简要阐述 PCB 的一些重要参数以及毫米波波段选用 PCB 材料需要考虑的因素。

微带线和接地共面波导

毫米波电路利用高级调制方式实现信号发送和接收可能是相当复杂的，而且对于短

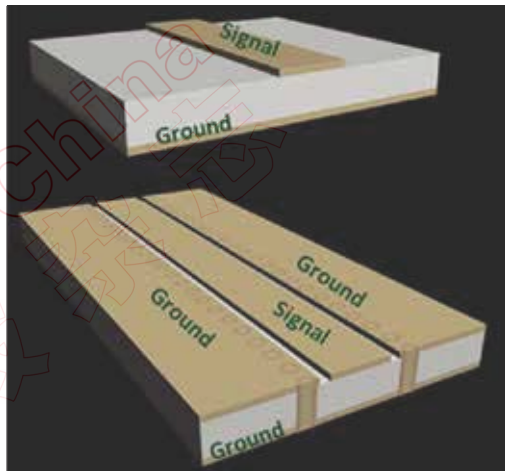


图 1. 微带线 (上方) 和接地共面波导 (下方) 传输线电路结构。

距离通信中频率超过 77GHz 的应用也被频繁使用。然而，所有高频电路都需要传输线来实现毫米波集成电路与供电电源、天线、输入和输出端口及其他电路的信号传输与连接。微带线、带状线以及接地共面波导等传输线技术常用于高频电路中。通常，微带线和带状线技术只适用于 30GHz 以内的高频电路，而接地共面波导可用于 30GHz 以上的电路。图 1 比较了单介质层，信号导体与接地面分别在介质上下面的双层板微带线和接地共面波导传输线结构。实际应用中的 PCB 通常是多层结构，微带线和接地共面波导电路通常位于多层结构的最外层。

总的来说，微带线电路在毫米波波段产生的辐射更多，而设计良好的接地共面波导电路发生辐射或者产生辐射损耗的可能性更小。然而，微带线电路性能受 PCB 加工误差的影响比接地共面波导电路更低。当然，加工误差对性能的影响和频率也有关。相比于 77GHz 车载雷达中的传输线，60GHz 通信回传应用中使用的传输线受加工误差的影响更小（频率越高，尺寸精度要越高）。

有效介电常数

这些应用中的差别很少是由于频率不同造成，主要还是由于 PCB 加工造成了不同电路的关键性能差别。相比于微带线，共面波导的有效介电常数更容易受 PCB 加工工艺影

响而改变。所谓有效介电常数是指电磁场沿着基底介电材料（介电常数大于1）和周边空气（介电常数等于1）组成的混合空间传播时的介电常数。有效介电常数的差异会影响电路中的信号相位，进一步导致相位差异。相比于60GHz的通信回传应用，传输线相位差异是重要的但对77GHz车载雷达的影响更大。这也是77GHz车载雷达采用微带传输线结构的一个原因。

镀铜厚度差异是导致电路有效介电常数差异和相位响应差异的一个重要PCB加工参数。例如，当PCB使用电镀通孔实现接地时，这些通孔都是从PCB的顶层到底层。通孔中需要连通的电镀铜将导致不同批次和不同板子上的镀铜厚度产生差异。厚度差异对微带传输线有效介电常数的影响很小。然而，因为接地共面波导具有耦合特性，电镀厚度差异也会导致耦合能量产生巨大差异。¹当考虑共面波导共面层间的电场时，薄铜层共面波导的邻近接地导体和信号导体之间的电场能量更低。相反，铜层越厚，电场强度将越大。根本原因是因为厚铜层电路的耦合导体侧壁高度比薄铜层电路更大。此外，邻近接地导体和信号导体的间隙越小（强耦合），耦

合区域的电场强度将越大；邻近导体的间隙大（弱耦合），耦合区域的能量将更低，如图2所示。

本文基于10mil（0.254mm）罗杰斯RO4835™层压板，对不同铜层厚度的微带线和接地共面波导传输线电路进行了实验研究。实验分别设计强耦合和弱耦合的不同铜箔厚度的接地共面波导电路。所有电路都是在同一材料同一张大的板材上加工完成。该张板材通过裁剪分为两半，一半所镀铜层厚度小，另一半所镀铜层厚度大。这样做的目的是最大程度地减小电路材料差异对所加工的电路性能的影响。电路的总铜层厚度是层压板铜基材的厚度和加工工厂的电镀铜层厚度总和，其中薄铜层的电路总铜厚为1mil，厚铜层总厚度为4.1mil。

图3a和3b分别展示了强耦合电路中薄铜层和厚铜层的横截面图。对于厚铜层电路，它的邻近接地面与信号导体的侧壁间的电场强度更大。空气对厚铜层电路有效介电常数的影响更明显，从而导致厚铜层电路的有效介电常数比薄铜层电路小。对于弱耦合电路，薄铜层弱耦合电路的有效介电常数受空气影响最小。

使用Keysight N5251A毫米波矢量网络分析仪（VNA）对加工的电路进行10MHz~110GHz的宽带测量。有效介电常数通过差分相位长度方法计算。²不同电路的介电常数基本保持一致，仅仅因回波损耗的好坏引起一点波动。图4展示了四组电路毫米波段内的特性，且所有电路的回波损耗均很小。图4中的标注指电路的导体宽度（w）和邻近共面间隙（s）。举例来说，强耦合厚铜接地共面波导标记为“w18s6 Thick Cu”，指其导体宽度为18mil，间隙为6mil。这四

组电路中，w18s6厚铜电路因其强耦合和厚铜结构，其在耦合区的电场强度最大。它的有效介电常数最低也验证了这点。由于空气的介电常数近似为1，接地共面波导耦合区在空气中传播的电磁场越多，有效介电常数就

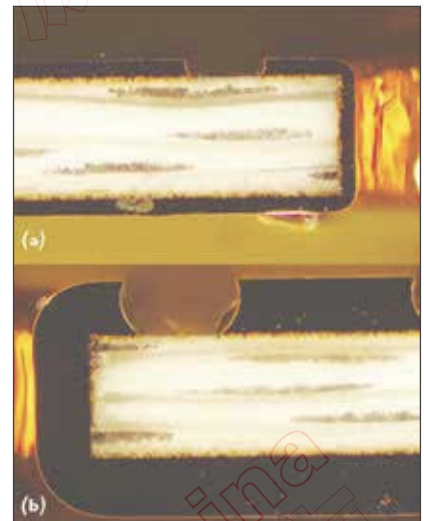


图3. 基于10mil罗杰斯RO4835层压板的强耦合共面波导电路 (a) 薄铜层和 (b) 厚铜层。

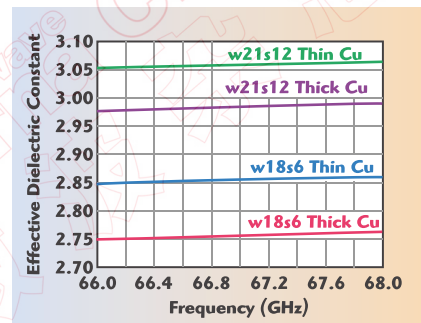


图4. 四组接地共面波导有效介电常数与频率关系，分别包含强耦合（s6）、弱耦合（s12）和厚、薄铜层。

越低。反之，弱耦合薄铜电路“w21s12 Thin Cu”的电场强度最小，有效介电常数最大。

图4中没有包含本实验中的微带线结果，薄铜层和厚铜层微带线电路在67GHz时的有效介电常数差值为0.011。相比较，强耦合薄铜层和厚铜层的接地共面波导的有效介电常数差值则达到0.100左右；弱耦合薄铜层和厚铜层接地共面波导的差值为0.075。图4结果表明，PCB

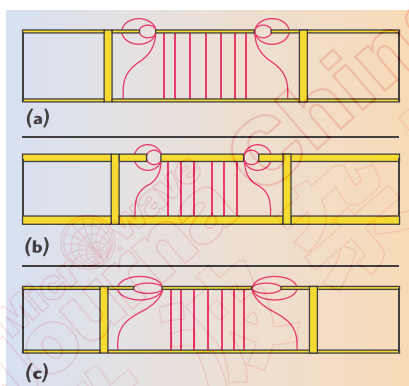


图2. 接地共面波导电场强度 (a) 薄铜层邻近接地导体和信号导体间隙小（强耦合）(b) 厚铜层强耦合 (c) 薄铜层弱耦合，电场耦合强度最弱。

加工过程中电镀铜层厚度差异对强耦合电路的影响比弱耦合电路更显著。而且相比于接地共面波导电路，电镀铜层厚度差异对微带传输线的影响很小。

电镀铜层厚度差异对有效介电常数的影响会进一步影响电路的相位响应。对于一些电路，相位响应差异可以忽略，部分电路则不能忽略。

插入损耗

镀铜厚度差异对电路的影响除了相位和有效介电常数外，还会对插入损耗产生影响。空气作为损耗最小的传输介质，利用更多空气作为传输路径的电路比利用电路材料传输的电路的损耗更低。图5比较了4组接地共面波导电路的插入损耗，其中损耗最高的电路是“w18s6

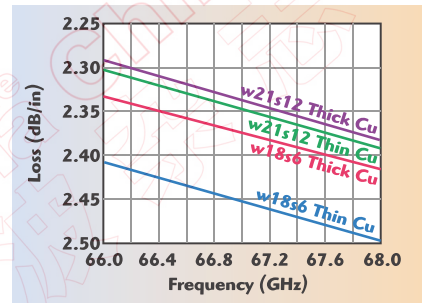


图5. 不同耦合强度和铜层厚度的接地共面波导电路的插入损耗。

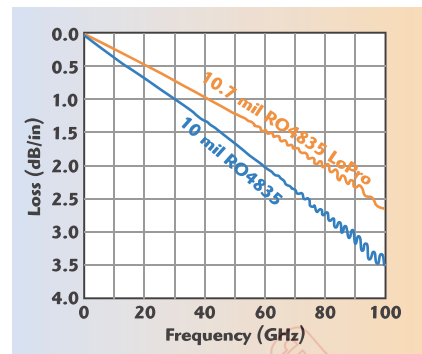


图6. 标准RO4835和LoPro层压板不同铜箔粗糙度对插入损耗的影响。

Thin Cu”薄铜层电路。该电路的导体宽度最小(18mil)且因为最薄的铜层结构，它利用空气作为传输路径最少。而损耗最低的电路是“w21s12 Thick Cu”厚铜层电路，一方面其宽导体结构降低了导体损耗，另一方面厚铜层结构使电路可利用更多空气作为路径传输电磁能量，也降低了损耗。

铜表面粗糙度也会影响插入损耗和相位传播，需要注意的是铜表面粗糙度是指介质和层压板的铜层所接触的铜表面粗糙度。³铜表面越光滑，所产生的导体损耗就越低，进而电路材料的插损也越低。许多毫米波设备对插入损耗非常敏感，前文中使用的10mil RO4835电路材料是相对粗糙的铜表面的电路层压板(尽管也可以使用更光滑的铜表面)。标准10mil的RO4835层压板铜表面粗糙度均方根值(RMS)大约为2.8 μm，该值和铜箔供应商提供的



欢迎到 @mwjournalchina.com

白皮书 WHITE PAPER



下载白皮书



扫描白皮书

小型化Wilkinson功分器

该功分器基于DLI专利的温漂稳定的陶瓷材料，并应用了低损耗导体和集成式电阻。该产品性能卓越，尺寸很小，并兼容标准的表贴式焊接技术。产品的整体尺寸为0.185 x 0.160 x 0.020(英寸)，即4.7mm x 4.06mm x 0.5mm。该款功分器在所有端口均提供非常好的回损值，并且其输出端之间的隔离度也表现出色。在6-18GHz的工作频段下，典型回损值优于20dB，隔离度优于25dB。PDW05758功分器在18GHz下的附加损耗达到最大，为0.7dB(在3.01dB的名义功分之外)。



www.knowles.com

可扩展的经济型射频频谱监控和管理

随著频谱分析和管理扩展到了更新和更有挑战的新领域，传统的台式频谱分析仪的短板越来越显现：难以适应如今极其注重外场应用的模式。此外，传统频谱仪由于把所有的功能集于一身，使得其成本居高不下，这导致了传统频谱仪在如今外场部署的应用场合实用性很差，因为这样的应用需要大量的经济型分析仪以监控远端设备或者信号。

这份白皮书展示了应对这些挑战的全新方案，这套方案充分发挥了便携式频谱仪的能力，有可扩展的开源软件，用笔记型电脑通过API可以非常容易地完全控制分析仪，不但降低了总成本，还提高了灵活性。



https://signalhound.com

参数 R_q 是一致的。10.7mil RO4835 LoPro® 层压板和标准 RO4835 层压板使用相同的介质材料，但 RO4835 LoPro® 层压板的铜导体表面粗糙度更平滑，约为 $0.8 \mu\text{m RMS}$ 。图 6 展示了铜表面粗糙度对插入损耗的影响，RO4835 LoPro 的铜表面粗糙度更低，其插入损耗也更小。插入损耗的波动是由于接口信号过渡影响和杂散干扰造成的。

杂散波模式抑制是设计者在较高频段采用薄介质基板的一个原因。尽管较薄的层压板利于减小辐射损耗，但付出的代价是总的损耗增加。较薄的层压板的损耗主要来自导体损耗，因此在薄的层压板上降低铜表面粗糙度带来的好处比厚层压板更大。77GHz 高频电路通常使用 5mil 的 RO3003TM 层压板。对如此类的高频电路应用，薄电路材料比厚电路材料的电路具有更低的辐射损耗，更好的杂散抑制，和更易优化的信号接口有效过渡。然而，薄电路材料电路受导体影响更显著，比如铜导体表面粗糙度和表面处理引起的损耗影响。

前面的讨论都是基于裸铜结构的电路，实际电路通常都采用表面处理工艺。当铜导体表面有添加表面处理工艺时，通常会增加铜的导体损耗，最终导致插入损耗提高。表面处理工艺对导体损耗的增加也取决于材料介质的厚度，电路越薄，受到的影响越显著。

图 7 展示了毫米波段不同铜箔粗糙度在薄介质厚度的电路上损耗情况。电解铜层的表面粗糙度为 $1.8 \mu\text{m RMS}$ ，压延铜的表面粗糙度为 $0.3 \mu\text{m RMS}$ 。两种不同铜箔表面粗糙度的电路插入损耗差值也非常明显；表面处理工艺的使用会影响插

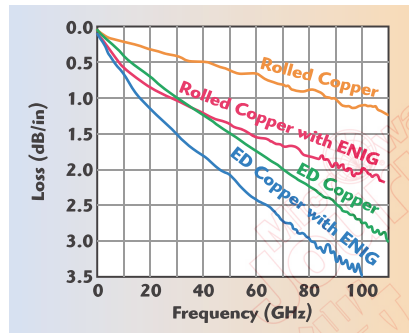


图 7. 5mil RO3003 层压板电路的插入损耗受粗糙度和 ENIG 的影响。

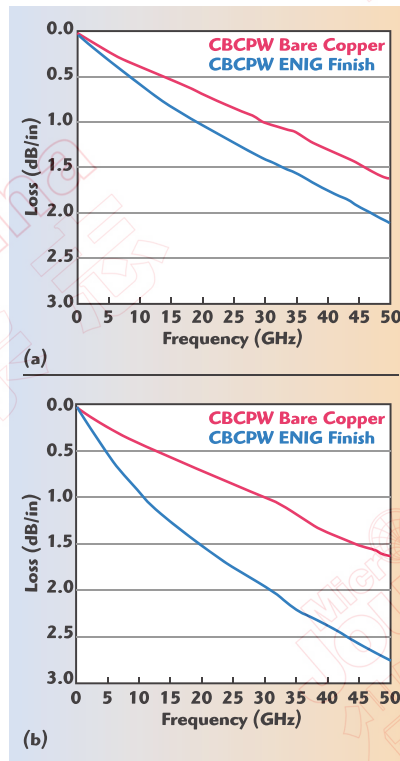


图 8. 8mil RO4003CTM 层压板 ENIG 对插入损耗的影响 (a) 微带线电路 (b) 接地共面波导。

入损耗。使用化学镍金 (ENIG) 表面处理工艺时，因镍的电导率只有铜的 1/3，从而会增加导体损耗。相较于厚介质厚度的电路，ENIG 的使用对薄介质厚度的电路的损耗增加更显著。由于微带线导体边缘具有很高的电流密度，ENIG 表面处理工艺也会增加微带线的导体损耗。而接地共面波导电路，其耦合场会经四层 ENIG 表面处理工艺传输，因此接地共面波导电路经过更多的 ENIG 表面处理工

艺层，使得其插入损耗值比微带线电路增加更多。图 8 比较了使用裸铜和 ENIG 表面处理工艺的微带线电路和接地共面波导电路的插入损耗。可以看出 ENIG 表面处理工艺对接地共面波导电路损耗的增加比微带线电路更高。图 8 中的损耗曲线均是 50 ohm 传输线电路的损耗曲线，且接地共面波导的耦合为强耦合。对于弱耦合接地共面波导传输线电路，由于耦合区的电流密度更小，ENIG 表面处理对电路损耗的影响也更小。

结论

在毫米波段，某些标准电路加工参数会对电路设备的性能产生或多或少的的影响。例如，铜层厚度的变化会影响接地共面波导传输线电路的性能。接地共面波导的接口处或者间隙耦合等小面积耦合区域的性能也受此的影响。此外，电路介质厚度、铜箔表面粗糙度以及铜箔表面处理工艺等均会影响电路的插入损耗。了解这些参数以及如何对电路性能的产生影响对毫米波电路性能的优化十分有益。■

参考文献

1. John Coonrod, "Comparing Microstrip and CPW Performance," Microwave Journal, July 2012.
2. John Coonrod, "Methods for Characterizing the Dielectric Constant of Microwave PCB Laminates," Microwave Journal, May 2011.
3. Allen F. Horn, III (Rogers Corp.), John Reynolds (Rogers Corp.) and James C Rautio (Sonnet Software), "Conductor Profile Effects on the Propagation Constant of Microstrip Transmission Lines," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques Symposium, June 2010.