微波功率放大器电路材料的选择

Selecting Circuit Materials for Microwave Power Amps

作者：John Coonrod　罗杰斯公司

现如今，从商用蜂窝通信系统到军用雷达，他们都依赖高频功率放大信号工作，各种应用中对微波功率放大器的需求与日俱增。固态微波功率放大器主要依靠其有源器件发挥作用，但是他们同时很大程度依赖其印制电路板的性能来实现减小损耗，得到最大增益以及有效散热等目的。目前固态放大器的设计有很大范围的 PCB 材料可供选择。对这些材料进行分类，来选择适用于功率放大器应用的 PCB 材料，一般需要对比 PCB 材料的一些特性，包括相对介电常数和损耗因子。然而，选择微波功率放大器时很多 PCB 材料的其他参数也需要考虑，包括热导率，介电常数温度系数（TCDk），表面覆铜粗糙度以及相对介电常数的容差，PCB 材料厚度容差等。理解不同 PCB 材料特性同微波功率放大器性能之间的影响关系有助于在多种 PCB 材料中进行分类选择，从而不仅可以帮助设计微波功放达到其性能指标，更能在广泛的应用条件下选择可靠合适的 PCB 材料。

表1
一般影响微带PCB特性阻抗的变量表

ε_r	介质厚度 (mils)	覆铜厚度 (mils)	走线宽度 (mils)	特性阻抗 (ohms)	阻抗的变化 (ohms)	备注
采用20mil厚高频层压板的微带传输线电路						
3.5	20	2	43	50.07		比较的基准
3.5	18	2	43	46.86	3.21	介质板厚度比基准厚度薄10%
3.45	20	2	43	50.39	0.32	ε_r值比基准小1.4%
3.5	20	1	43	50.70	0.63	覆铜厚度小于基准1mil
3.5	20	2	42	50.78	0.71	导体宽度小于基准1mil
采用10mil厚高频层压板的微带传输线电路						
3.5	10	2	21	49.74		比较的基准
3.5	9	2	21	46.57	3.17	介质板厚度比基准厚度薄10%
3.45	10	2	21	50.05	0.31	ε_r值比基准小1.4%
3.5	10	1	21	50.78	1.04	覆铜厚度小于基准1mil
3.5	10	2	20	51.16	1.42	导体宽度小于基准1mil

设计和加工微波功率放大其需要控制很多不同的参数，其中最重要的是控制其阻抗参数。由于微波功放会和很多其他类型的元件有相互作用，如阻抗匹配网络，四分之一波长变换器以及 3dB 电桥，故放大电路的特性阻抗（通常为 50Ω）需要严格控制。电路材料介电常数误差是在控制阻抗匹配时需要考虑的重要参数。尽管设计者经常假定电路材料的介电常数容差值是决定阻抗匹配的最重要因素，但实际设计并非如此。事实上，当采用一个介电常数控制的相对比较好的高频电路层压板，相对介电常数容差通常会很小以至于在阻抗控制时可以忽略其影响。表 1 给出了一个例子，关于高频电路层压板上的 50Ω 微带传输线，电路板材料的相对介电常数为 3.5，误差为 ±0.05。

阻抗变化

表 1 给出了基于 PCB 微带传输线电路一些 PCB 材料技术中存在的变量对电路性能的影响。数据可以分为两组，上半部分是较厚材料（介质板厚度为 20mil）的信息，下半部分为较薄材料（介质板厚度为 10mil）的信息。对比两组数据，可以看出导体对较薄电路的影响更为敏感，也就是说电路导体的宽度以及覆铜的厚度等会影响其阻抗特性 .

比如，有电镀通孔的 PCB 技术采用额外的铜电镀在原始的铜表面来实现电镀穿孔特性。所加额外的铜随着不同的电路以及不同批次的产品而变化。±0.5mil 的覆铜厚度容差在高频板加工领域中很常见，尽管一些电路

加工商可以控制实现更低的误差。基于这些容差值，不同覆铜厚度之间1mil的误差不算不常见，电路材料越薄，阻抗变化的影响越大。

除了覆铜金属厚度以外，导体宽度的加工容差对阻抗连续性的影响同样需要在基于PCB的功放中进行考虑。铜导体宽度在±0.5mil的误差在高频板加工业中同样很常见，尽管一些电路加工商可以控制实现更低的误差。对于±0.5mil的误差值来说，铜导体宽度的变化范围是1mil，较薄电路相比于较厚电路的阻抗更容易受导体宽度误差影响。

对于维持电路阻抗稳定性的一个至关重要的电路材料参数是电路介质板厚度的容差，对于表1中的例子，当介质板厚度的容差为±10%时，是对电路的阻抗变化影响最大的因素。电路材料厚度误差具有这样的值并不鲜见，厚度误差更小的高频层压板是存在的，这种材料可以更好的控制如微波功放等电路的阻抗值。

表1中介电常数值的变化只给出了其负向容差的部分。±0.05的误差对于介电常数值为3.5的电路材料来说已是最小的容差，意味着最小的变化值大约为1.4%。但是由于容差值是有正负两边的，所以实际中为3.5时其的变化范围是两倍，介电常数的变化为0.1，占整个介电常数的2.8%。这个参数在表1中不好描述，但是必须指出的是它是较薄电路材料最不显著的问题所在，而是较厚材料第二最不显著的问题。具有如此介电常数值和容差值的电路材料对于高频电路应用来讲已经很好了，尽管具有更小介电常数容差差值的电路材料也是存在的。

插入损耗变化

对于微波功放的PCB来说，具有低插入损耗的电路材料对于其实现高增益起很重要的作用。PCB插入损耗包括四个部分：导体损耗，介质损耗，辐射损耗以及泄露损耗。在微波段的较低频率，介质损耗和导体损耗占PCB大部分的损耗，这两种损耗取决于电路介质板的厚度。图1给出了50Ω微带传输线电路在同一种电路材料但厚度不同的情况下插入损耗的比较。插入损耗模型是由来自罗杰斯公司的MWI-2014电路材料分析和建模软件产生的，其采用了

Hammerstad 和 Jensen 闭式公式对微带的阻抗和损耗进行了分析。

图 1 中的三个图表比较了测量和电路建模的结果。测量的插入损耗结果是由简单的微带差分长度法得到的，其将连接头和信号发射端的插入损耗最小化。建模的插入损耗包括介质和导体损耗，如所绘数据所示，可以看出，建模得到的结果和测量结果吻和良好。为方便起见，辐射损耗和泄露损耗在此比较中被忽略。

图 1 说明了对于较薄电路来说其插入损耗主要是导体损耗。对于较厚电路，介质损耗和导体损耗对于电路材料的插入损耗贡献相当。如果是另一种更厚的电路材料（30mil），则介质损耗将会占据插入损耗的主导。通过了解哪种损耗在插入损耗中所占比重比较大，

实际应用中设计者可以选择插入损耗性能最优的电路材料（和厚度）。表中没有给出的 30mil 电路厚度的例子，耗散因数的变化对于电路材料插入损耗的影响最大。对于表 1a 中较薄的电路材料，插入损耗主要受导体损耗的影响，再一次说明较薄电路材料的导体性能对电路的插入损耗影响最大。

高频电路材料覆铜表面粗糙度会对其导体损耗有一定影响，粗糙的覆铜表面相比于光滑覆铜表面来说导体损耗更大。覆铜表面粗糙度到底对电路材料的导体损耗影响多大，取决于材料的插入损耗多大程度决定于其导体损耗。对于表 1a 中的较薄电路材料来说，覆铜表面粗糙度对电路材料的插入损耗有显著的影响。对于较厚电路材料来说，同样的覆铜表面粗糙度对其插入损耗的特性并没有那么大的影响，而是较厚电路材料的耗散因数对其插入损耗影响更大。

为了更好的理解不同厚度的电路材料，覆铜表面粗糙度如何影响其插入损耗特性，图 2 给出了加工于相同介质板但厚度不同，铜箔表面粗糙度不同的情况下微带传输线电路的特性。图表给出了标准的覆铜表面粗糙度值 2.8μmRMS 同来自于罗杰斯公司的 LoPro™ 层压板（其覆铜表秒粗糙度仅为 0.8μmRMS）的比较。正如表中所显示的，光滑的表面覆铜粗糙度对于较薄电路材料的插入损耗改善更多，其中较薄电路（7.3mil）在覆铜表面粗糙度由粗糙变光滑的过程中插入损耗变化为 0.3dB/in，而对于较厚电路（20mil）只有 0.1dB/in。

有几个原因是电路材料的插入

损耗在设计功率放大器时值得考虑的，其中之一是热量控制问题。设计在 PCB 上的功放，相比于 PCB 插入损耗较小的情况，插入损耗越大，其每瓦射频功率产生的热量就越高。这个产生的热量对于 PCB 最大工作温度（MOT）有影响，并且 PCB 的工作温度不能长时间超过 MOT。功放的设计者一般会尽量减小插入损耗，来保证在一定输入功率和频率工作温度不超过 MOT。较薄电路相比于较厚电路来说通常具有更大的插入损耗，然而，它的热流路径却更短地到达地面并且贴附的散热件可以帮助消散由于高插入损耗带来的热量。更多关于电 - 热相互作用的问题在最近的文章[4]中有详细介绍。

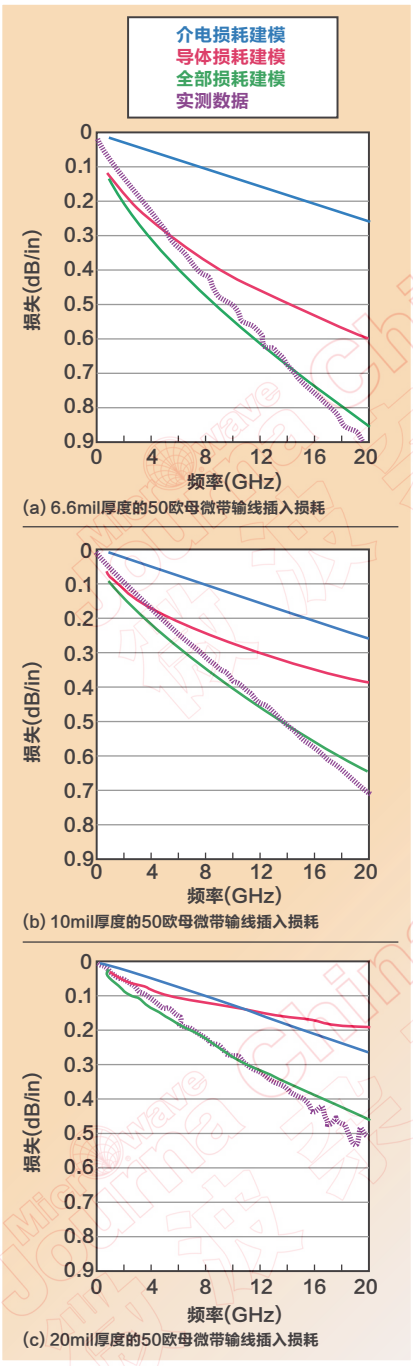

图 1. 介质板厚度和导体损耗同插入损耗之间的关系。

电路材料的 TCDk 也经常受功放设计者的忽视，若在选择电路板材时不考虑，它将是大大影响功放性能的一个参数。非常简单，TCDk 是指介电常数随着温度的变化的变化量。显然的，当电路在一个可控的环境下工作，比如说在实验室中，电路可以提供一个稳定的性能，而当功

放在其使用环境中温度变化范围很大，其电路特性随温度变化而变化。

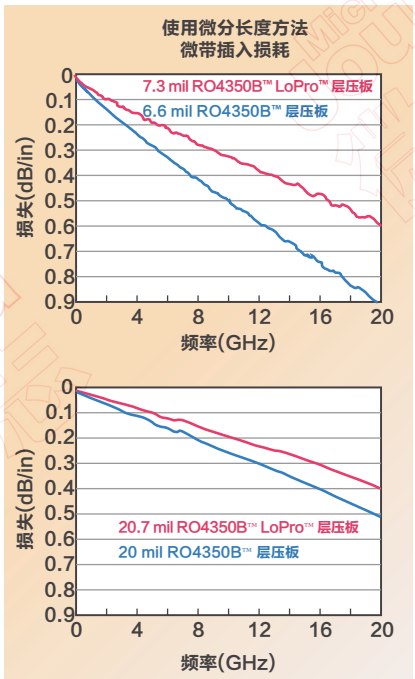

图 2. 光滑和粗糙度铜表面在同一介质材料不同厚度下的比较图。

表 2
微波PCB功率放大器应用中常见材料的热性能

	TCDK (ppm/°C)	导热系数 (W/m/K)
织物玻璃 PTFE 层压板	-150	0.25
改进的PPE层压板	70	0.35
陶瓷填充的PTFE层压板	-30	0.50
RO4350B™ 层压板	50	0.64
RT/duroid® 6035HTC 层压板	-66	1.44

结果是，ε_r 的变化可以造成阻抗变化以及性能的变化。TCDk 参数提供了一种比较不同电路材料此类特性的途径。许多基于 PCB 的功放都会在正常的工作状态下产生其自身的温度变化，再加上环境的温度变化影响，从而影响性能。

一些用于微波领域的低损耗的聚四氟乙烯（PTFE）层压板具有较高的 TCDk 值，在宽范围温度的设计中是值得忧虑的因素。陶瓷填充的 PTFE 电路材料能提供更好的 TCDk 特性，从而能更适用于宽范围的工作温度。

导热系数

PCB 的导热系数在功放设计中是一个重要的电路材料参数。由于高功率功放的走线有发热情况，故其通常安装在散热器上。对于具有高发热情况的功放来说，热流通常是通过电路的介质材料流向散热器的，故热流路径就会经过介质板。

在这种情况下，PCB 的导热系数就提供了一种电路材料将电路走线产生的热流传导到散热器的能力的测量方法，而且 PCB 的导热系数越高，功放就可以在越高的功率下工作。

表 2 给出了常见的基于 PCB 的微波功放的电路材料的导热系数值。通常来讲，TCDk 值越接近于严格数学的零值是越理想的，而对于导热系数来说，值越高越好。根据经验，对

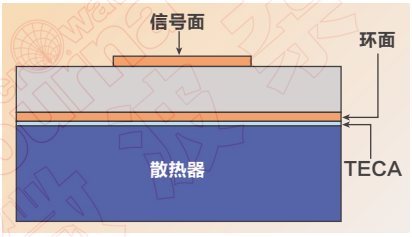

图 3. TECA 作用的组成图以及其对插入损耗的影响。

于功放电路来说较好的导热系数值为 0.50W/M/K 或更高。

贴装散热器

在微波功放的设计中，想要获得较高的可靠性，热管理是非常重要的，而其中很重要的步骤就是将微波功放的 PCB 贴装于散热器上。有几种将功放的 PCB 地铜贴装于散热器上的方法可选，包括机械螺钉紧固，热熔焊接以及采用导电导热粘合剂（TECA）。每种方法均提供了其导热能力和限制。TECA 可以形成没有空隙或缝的高度一致均一的粘结。在过去，一些 TECA 材料会有无铅焊接回流导致分层的问题，或者在高温下会有电性能的变化。但是最新一代的 TECA 材料解决了这些问题并且提供了一致且可靠的性能，即使在高温下也如此。

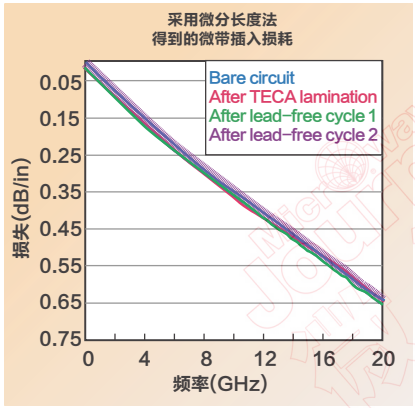

图 4. 裸电路板，在散热器上加载 TECA 以及两次无铅焊接回流下微带插入损耗的测试图。

为了更好的理解 TECA 的使用以及其对 PCB 材料插入损耗的影响，可以进行如下简单的实验：一块 10mil 厚的微带传输线电路上安装了 TECA 和厚的铜散热器，如图 3 所示。传输线已用差分长度方法进行了插入损耗的测量，测试时不安装 TECA 或散热器。然后将 TECA 以及散热器通过压合流程安装在电路上，再对有 TECA 和散热器作为地回流路径的一部分的电路测量插入损耗。由于采用了终端发射连接器，而且地回路也从电路底部被抬高（由于散热器的加入），故 TECA 和散热器成为地回路的一部分。采用这些测试流程，电路整体在无铅回流中进行两次考验，再进行插入损耗测试。如图 4 所示，装配了 TECA 和散热器的微带电路以及通过无铅回流路的电路，其插入损耗与原电路没有差别。故在这项研究中使用的 TECA 的是经得住回流工艺考验的。

结论

总体来说，一些基本的参数可以作为选择微波功放电路材料的指导，作为备选的微波功放电路材料，其介电常数的误差应该在 ±1.5% 以下，且损耗系数较低，插入损耗较低（通常可能是具有光滑覆铜的 PCB 材料），TCDk 较低，以及导热系数较高。除了这些建议以及表 1 中电路加工的指导外，要使阻抗变化最小，微波功放设计电路还需采用低于 ±0.5mil 误差的导体宽度，以及较小误差的覆铜厚度。

选择微波功放电路材料从来就不是墨守陈规的，让电路材料提供商参与到材料的选择过程中是永远不会错的，这样可以评估电路基本设计和加工中一些基本的注意事项。一个具有很多不同高频电路设计经验的电路材料提供商可以在设计微波功放时提供很多有益的指导。■

有源天线是物联网必不可少的解决方案

作者：杰夫 · 西姆布林 倚天泰克电子有限公司首席科学家
王权昕 倚天泰克电子（上海）有限公司产品研发总监

根据互联网数据中心 (IDC) 的统计，未来 10 年，全球物联网（IoT）市场将增长大约 2120 亿台设备，这意味着将带来重要的增长机会，尤其是在天线和射频领域。天线决定了可靠、高性能的无线连通性。但是寻找合适的天线可能会很困难，这将给 IoT 和机器对机器（M2M）带来许多挑战，包括：

- 有限的空间；
- 众多不利于射频的环境；
- 更宽的频带范围；
- 头、手或者其它因素带来的去谐效应。

有源天线系统是克服这些挑战的关键，因为它们能够动态调节，覆盖显著增加的带宽，实现更小的物理体积，在设计过程中提供更多自由。

以 EtherModule 1.0™为例。这是一款即插即用、可自调节的模块，结合了闭环功能、专利算法和微处理器。这使得模块有着动态感应和优化天线系统的能力，不需要设备外部控制信号。通过实现一个动态天线系统来维持性能和连通性，即便当模块安装在不同类型的表面，甚至严重影响无源天线的金属表面。有源天线系统设计灵活，结合了闭环阻抗匹配，使得 IoT 和 M2M 供应商能够快速的并且节约成本的研发单个平台，实现每一个特有需求。