

采用先进线路板材料改进微波印刷线路板的热管理

Improved Thermal Management of Microwave PCBs Using Advanced Circuit Materials

作者：John Coonrod 罗杰斯公司

提 高线路集成度及印刷线路板 (PCB) 功率密度的需求与日俱增，以至现如今微波印刷线路板热管理的重要性更加突出。要了解微波印刷线路板有效得当地热管理，需要先了解与印刷线路板上的热流，以及印刷线路板所采用材料的热特性相关的一些基本理论。要想说明实际的印刷线路板热管理，需要通过实验充分演示在不同功率水平下、采用热特性各不相同的材料的印刷线路板上的热流。例如，简单的微带线有助于说明经过印刷线路板上的热流，以及印刷线路板隔离区用于信号接地的镀通孔 (PTH) 导通孔 (via) 的效用。

基本热模型可描述为用某种导热材料 (例如铜) 将高温区 (或高温热源) 与低温区 (或低温热源) 连结起来 (见图 1 (a))；铜的导热系数 (TC) 约为 400 W/m/K, 导热性能良好。为了使模型更接近具有 PTH 导通孔的微带线印刷线路板上的热流，需要对基本模型略作调

整，以印刷线路板基材为热绝缘体，用该热绝缘体包裹热导体 (见图 1 (b))；印刷线路板基材的导热系数通常约为 0.25 W/m/K。要创建微带线印刷线路板模型 (见图 1 (c))，需假设顶部铜层为信号层 (或高温热源)，底部铜层为接地层 (或低温热源)。

该基本热模型中，高温热源与低温热源间的热量转移关系可用以下公式表示：

$$H = -k \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{L}$$

$$H = -k \cdot A \cdot \frac{(T_H - T_C)}{L}$$

其中，H 表示热流，k 表示导热系数，A 表示热源和热导体之间的界面的面积，T 表示温差，L 表示连接热源的热导体的长度。该模



图 1. 为基本热流模型：(a) 通过一个热导体将高温热源与低温热源连结起来，(b) 通过一个热导体将高温热源与低温热源连结起来，同时用热绝缘体包裹热导体，(c) 具有 PTH 导通孔的微带线印刷线路板剖面图。

型假设热导体中的温度达到平衡。这一简单的模型和公式表明对于导热系数较低的热导体，热源间的热转移较少。热源的间距也会影响热转移量，相对较薄的热导体会增加热流。

要使该简单模型适用于微带印刷线路板，需假设高温热源为印刷线路板的信号层，低温热源为印刷线路板的接地层（见图 2 (a)）。同时假设接地层配有一台高效散热器，使其温度恒定，始终保持在明显低于信号层的温度范围内。

微带线印刷线路板一些区域可能有也可能没有 PTH 导通孔。图 2 (a) 所示为该区域没有 PTH 导通孔的微带线印刷线路板的模型，图 2 (b) 为接地区的微带线印刷线路板的模型，由几个 PTH 导通孔连接两个铜层。图 2 (b) 所示模型为微带线印刷线路板常用构造。该类线路板上装有可产生热量的有源器件（如功率管）。

如表 1 所示，将厚度、导热系数 (TC) 不同的几种材料进行比较，其它如输入测试功率、频率等重要参数相同，不同材料对温升的影响显而易见。例如，表 1 中的三种材料的介电常数 (Dk) 和损耗因子 (Df) 的值相近，频率 (3000 MHz)、功率 (30 W) 相同。三种材料均无接地通孔，但是三种材料超过环境温度的温升各不相同，具体取决于材料厚度及导热系数。最厚、导热系数最小的印刷线路板材料超过环境温度的温升最大。众所周知，为了便于比较，该模型非常保守但行之有效，在该模型中没有接地通孔。

就导热系数而言，罗杰斯公司的 RO4350B™ 和 RT/duroid® 6035HTC 的导热系数比高频线路板常用的 FR-4 基材的导热系数高。然而，金

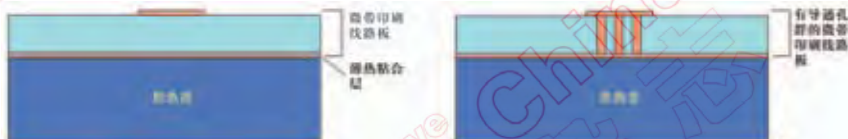


图 2. 为微带线印刷线路板剖视图：(a) 无导通孔 (b) 有导通孔。

表 1. 厚度、导热系数不同的微带传输线的比较，表明输入功率为 30W 时的预计温升。

	厚度 mils)	导热系数 (TC) (W/m/K)	相对介电 常数 (Dk)	损耗因数 (Df)	频率 (MHz)	射频功率 (瓦)	超过环境 温度的温升 (C)
材料 A	20	0.25	3.50	0.0023	3000	30	45
材料 A	10	0.25	3.50	0.0023	3000	30	36
材料 B	20	0.50	3.50	0.0023	3000	30	23

表 2. 高频线路板常用材料的导热系数。

	导热系数 (W/m/K)
High Tg FR-4	0.24
近乎纯的聚四氟乙烯	0.20
陶瓷填充聚四氟乙烯	0.50
RO4350B™ 层压板	0.62
RT/duroid®6035HTC 层压板	1.44

属铜的导热系数约为 400 W/m/K，比表 2 中的任何材料的导热系数都高出几个数量级，这表明 PTH 导通孔对微带印刷板上的热流会有较大的影响。

为了解导热系数对不同印刷线路板材料的影响，我们使用微带线结构与导热系数相差较大的不同基材进行了热成像研究。我们还研究了有导通孔与无导通孔对这些材料的热流的影响。我们采用直流加热以便消除各微波热变量，专注于导热系数对不同印刷线路板材料的影响。研究所选用的所有基材的厚度均为 20mil，连接 100Ω 的终端电阻，并且铜特性相同，只是所选用的基材不同。接通直流电源后，每个线路与终端电阻都可以达到热平衡。图 3 表明了采用不同材料、没有导通孔的线路板的超出环

境温度 (+25°C) 的温升的差别。如图 3 和表 2 所示，导热系数最高的材料的温升最小。导通孔可以疏导一些热量，与有导通孔的线路板的曲线图比较后，我们会发现，尽管总体趋势相同，但各线路板的温升相对较小。

图 4 所示为微带剖视图示例 (a) 无导通孔，(b) 有导通孔，(c) 有导通孔栅。没有导通孔的微带线通常为射频信号，有源信号线无法接地。这种情况下，材料的导热系数对于减小温升至关重要。当然，比较薄的基底也会缩短热流路径，从而减小线路板的温升。

搭载可产生热量的有源器件的微带线路板，通常采用图 4 (b) 有导通孔的构造，以便改善散热效果。有源器件无论如何都需要接地，因此采用 PTH 导通孔作为有源器件至接地点的传热通道对印刷线路板的热管理大有帮助。

图 4 (c) 所示微带线印刷线路板的构造与图 4 (a) 和图 4 (b) 相比较为少见。根据剖视图所示区域，图 4 (c) 线路板的构造更像是接地共面波导，而非微带，其优点在于

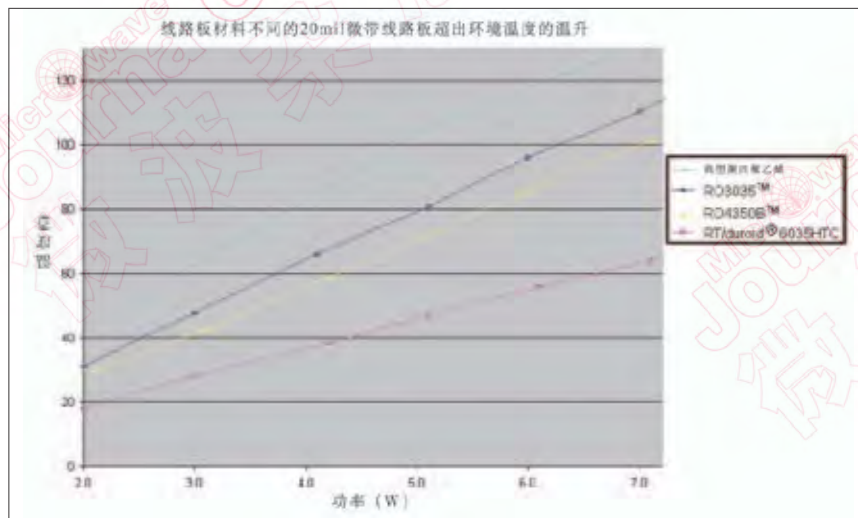


图3. 导热系数不同的基材的温升对比。

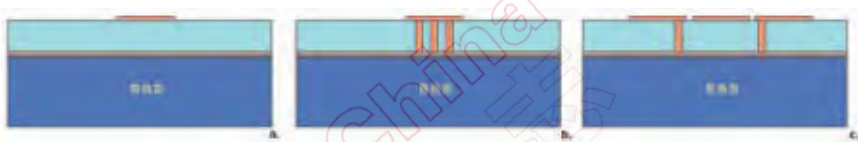


图4. 微带线剖视图 (a) 无导通孔, (b) 有导通孔, (c) 有导通孔栅。

实现了无法通过导通孔接地的有源线路板线凭借 PTH 导通孔在 x-y 平面热传导散热。这种情况下，基材材料的导热系数对于能否达到最佳散热性能至关重要。在这一线路板构造中，信号层有源线与具有导通孔栅的接地板共面的间距可以比基材厚度小。间距可以在 125 微米 (5 mils) 范围内；通过缩短热流路径，从射频信号线到接地层的热量转移会更加高效。采用这种构造，必须解决有关接地板共面与信号线极为贴近的一些电气问题。

微波印刷电路板有效得当地热管理还包括了解线路板损耗、输入功率、热效应之间的关系。高频线路板的热量本质上与线路板上的损耗休戚相关。例如，在微带线路板上，有导体损耗、介质损耗及辐射损耗几种损耗类型。导体损耗与线路板的设计及基材的选择有关。大多数基材具有不同的铜箔类型，铜的选择会影响损耗性能。例如，表面粗糙的铜箔比

表面光滑的铜箔损耗大。铜箔表面的质量也会影响微带线印刷线路板的损耗性能。

另一种影响损耗的材料参数是印刷线路板材料的损耗因子。损耗因子越低，介质损耗越小，印刷线路板产生的热量也会越少。此外，介电常数较低的印刷线路板材料也会比介电常数较高的材料产生的损耗小，产生的热量少。这是假设必须设计为控制阻抗线路板，介电常数较低的材料可使用宽线路。宽线路的损耗比相对较窄的线路要小。

简而言之，改进热管理的理想材料的性能“决选名单”包括高导热系数，低损耗因子，光滑的铜箔表面，薄基材以及低介电常数。当然，在实际设计中总是需要折衷选择。有一个例子可以证明这一点。在这个例子中，基材采用 20mil，微带传输线，介电常数为 3.5，频率为 3GHz，30W 射频功率。要求该线路板达到良好的低损耗性能。该线路板需基于

损耗因子约为 0.0023 的陶瓷填充聚四氟乙烯基材。但是由于聚四氟乙烯材料以及相应的制造工艺成本较高，本例中采用了成本较低的替代基材——损耗因子为 0.0037 的碳氢化合物层压板。

用简单的模型来对比这两种基材，聚四氟乙烯基材超出环境温度的温升预计约为 45°C，而碳氢化合物层压板约为 21°C。虽然聚四氟乙烯基材比碳氢化合物层压板的损耗因子低，但是后者的温升比前者低，这是因为其导热系数为 0.62 W/m/K，而聚四氟乙烯层压板仅为 0.25 W/m/K。

微波印刷线路板的最高操作温度 (MOT) 是一项重要参数，通常被看作线路板设计热管理计划的一部分。通过保险商实验室 (UL) 的认证流程的判定，一定时间内不能够超过 MOT，以确保印刷线路板的完整性。

与焊接和装配相关的短期温升与 MOT 无关。相反，温升是一个长期问题，是微波印刷线路板实现热管理的重点。事实上，考虑采用 20mil 微带传输线时，简单的线路板模型可以使用 MOT，以便于说明各种材料的区别。

本例中假设线路板的 MOT 为 +105°C，环境温度 (室温) 为 +25°C。这一例子的目标是避免温升达到 80°C 或以上，以免超出该材料的 MOT。如图 5 所示，印刷线路板材料的选择会极大地影响微波线路板可负载的功率，导热系数较高、损耗系数较低的材料支持较高的功率水平。图 5 的示例基于 800 MHz 的频率；同一射频功率水平下，频率越大产生的热量越多。上文提到的铜箔粗糙度在频率较低时的影响很小，频率越大对损耗的影响也越大，最终在铜箔表面粗糙的印刷线路板上转

下转第31页

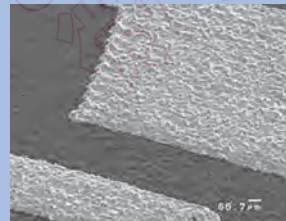
原型过程的最后一步是塑料组件的金属化。乐思化学有限公司 (Enthone GmbH) 与 LPKF 合作开发了一个非常简单的解决方案: LPKF ProtoPlate LDS 是一种铜浴, 可以不使用化学知识。铜化学放入烧杯中, 加热到约 45°C, 然后添加催化剂, 并放入浴缸进行器件结构化。处于激活状态约两个小时, 可以建立 3~10 μm 的铜层。

充分开发的原型进程可以有效途径弥补布局和批量生产之间的差距。它可以在大规模生产时使用相同的技术变得非常容易、快速和经济。

参考文献

1. MID 调查 2011, 3D-MID e.V., 德国纽伦堡 2011; www.3dmid.de

LDS工艺入门



上接第22页

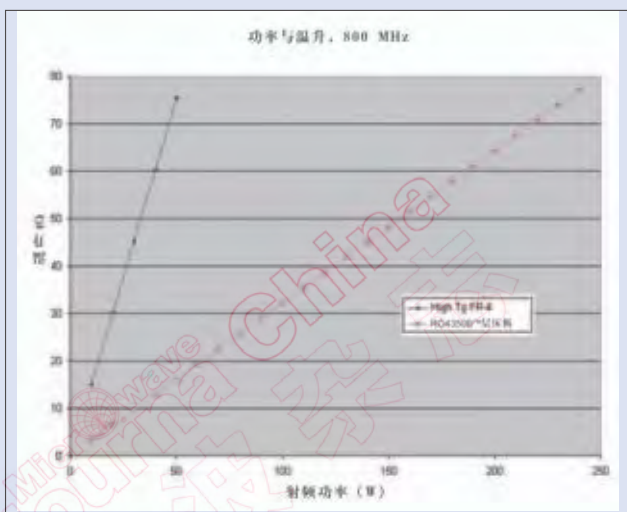


图 5. 使用两种不同材料的 20mil 微带传输线的示例

换成额外的热量。

总之, 通过简单的模型可以想象出经过高频印刷电路板的热流。使用这一简单模型有助于说明具有较高导热系数的电路板材料的优点, 也对制定有效的印刷电路板热管理策略有所助益。导通孔是改进印刷电路板热流的有效方法, 但是这一技艺不能够用于有源射频信号线。一般而言, 选择具有良好性能的电路板材料, 如高导热系数, 较低的损耗因子, 光滑的铜箔表面以及低介电常数, 不仅有助于设计高性能的印刷电路板, 还能够改善热管理。