

高频 PCB 基材介电常数与介电损耗的特性与改性进展

杨盟辉

(中南电子化学材料所, 武汉 430070)

摘要 随着高频化 PCB 技术与产品占有越来越重要的地位, 高频电路基板材料的发展也出现了高速化, 其中比较重要的一方面就是低介电常数和低介质损耗因数的材料的选择, 这是 PCB 基板材料实现高速化, 高频化的重要性能项目。文章针对基板材料的介电常数与介电损耗的关系加以论述, 并对它们与外部环境的关系做出相应的阐述, 使得在 PCB 的制造中对各种基板材料进行合理正确的评估和使用。

关键词 高频 PCB, 树脂材料的改性, 介电常数, 介电损耗

The Dielectrics Characteristics and Modified Progress of Base Materials Applied in High Frequency Printed Circuit Board

Yang Menghui

Abstract With the application of high frequency printed circuit board in more fields, the base materials need to adapt the requirements of high-speed circuits. The most important factors are the dielectric characteristics, such as low dielectric constant and dielectric loss, which is propitious to the high transmission speed of printed circuit board. The dielectric constant and dielectric loss of base materials are discussed in this paper and the affected relation with environment conditions are also described. In addition, the modified progresses of difference base materials are evaluated.

Keywords High Frequency Printed Circuit Board, base materials, dielectric constant, dielectric loss

0 前言

目前已经商品化的高频基板主要有三大类^{[1] [2]}: 聚四氟乙烯 (PTFE) 基板; 热固性 PPO (Polyphenyl Oxide); 交链聚丁二烯基板和环氧树脂复合基板 (FR-4)。PTFE 基板具有介电损耗小, 介电常数小且随温度和频率的变化小, 与金属铜箔的热膨胀系数接近等优点^{[3] [4]}, 从而得到了广泛的应用。PTFE 与玻璃纤维、陶瓷搭配制备的基板, 例如: R03200, R03210, R04003 等系列已经能够满足介电常数 $2.2 \sim 10.8$, 工作频段为 30 MHz ~ 30 GHz 的要求^[5]。虽然, PTFE 微波板制造发展迅猛, 但与之相适应的工艺是由传统的 FR-4 印制电路制造工艺改进而成^[6]。现在电子信息产品特别是

微波器件的高速发展，集成度极大的提高和数字化、高频化、多功能化和在特殊环境中应用等要求已经向一般的 PTFE 高频板以及制造工艺提出了挑战。对于微波 PCB 的高速、高频化的特性，主要是通过两方面的技术途径：一方面是使这种发展成为高密度布线微细导线及间距、微小孔径、薄形以及导通、绝缘的高可靠性。这样，可以进一步缩短信号传输的距离，以减少它在传输中的损失。另一方面，要采用具有高速、高频特性的用基板材料。而后者的实现，是要求业开展对这类基板材料比较深入的了解、研究工作找出并掌握准确控制的工艺方法，以此来达到所选用的基板材料与的制造工艺、性能及成本要求能够实现合理匹配的目的。

在高频电路中，信号传输速度可以表示为^[7]：

$$V = k \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1)$$

式(1)中：

V ——信号传输速率，单位为 m/s ；

C ——真空中的光速，单位为 m/s ；

ϵ_r ——基板的介电常数。

可以看出，基板介电常数越低，信号传播得越快，因此要得到高的信号传输速率，就必须研究开发低介电常数的基板材料。

介电常数除了直接影响信号的传输速度以外，还在很大程度上决定特性阻抗，它可以表示为^[8]：

$$Z_0 = \frac{87}{\sqrt{\epsilon_r + 1.41}} \ln\left(\frac{5.98h}{0.8w + t}\right) \quad (2)$$

式(2)中：

Z_0 ——印制导线的特性阻抗；

ϵ_r ——基板的介电常数；

h ——印制导线与基准面之间的介质厚度；

w ——印制导线的宽度；

t ——印制导线的厚度。

可以看出，影响特性阻抗的主要因素是：（1）基板的介电常数 ϵ_r ；（2）介质厚度 h ；（3）导线宽度 w ；（4）导线厚度 t 等。基板介电常数越小，特性阻抗就越大。

在高速电路中需要高的特性阻抗值，必须研究开发低介电常数的材料。同时为了实现高速数字电路 PCB 中的阻抗连续稳定，要求基板材料有稳定的介电常数^[9]。

1 PCB 上的信号传输损失与基板材料性质的关系

导体电路上的传输损失中的介质损失是主要受到基板材料绝缘层的介电常数 (ϵ_r)、介质损失因数 ($\tan \delta$) 所支配的。对传输损失的影响与 ϵ_r 、 $\tan \delta$ 的大小成正比, 并与介质工作时的频率大小相关。在同一 ϵ_r 或 $\tan \delta$ 下, 频率越高, 其传输损失就越大, 图 1 表示了上述关系。

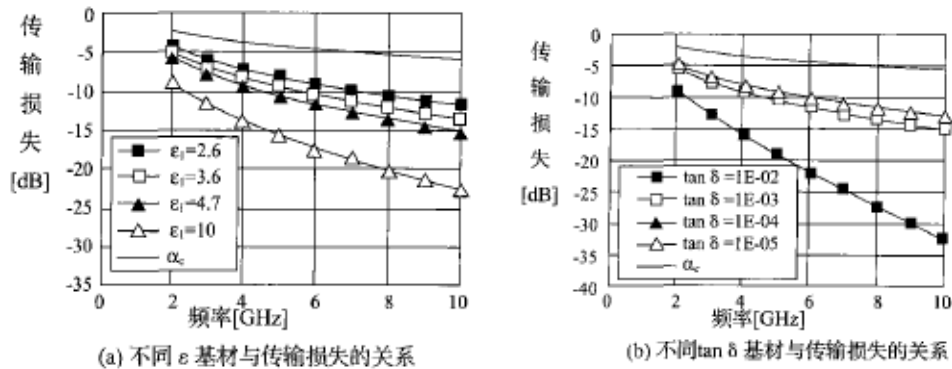


图 1 各种 ϵ_r , $\tan \delta$ 材料的信号传输损失

随着频率增加, 基板中的损耗不能再忽略不计, 信号的传播损耗或衰减可以表示成^[10]:

$$a \propto f \tan \delta \sqrt{\epsilon_r} \quad (3)$$

式 (3) 中:

A ——信号传播衰减, 单位为 dB/m;

ϵ_r ——基板的介电常数;

$\tan \delta$ ——基板的介质损耗因数;

f ——频率。

可以看出, 基板 $\tan \delta$ 越小, 信号传播的衰减越小。因此在高频电路基板材料的选择或者研究开发时, 要求其具有较低的 ϵ_r 和 $\tan \delta$ 。另外还要综合考虑其他因素: 如热能、机械性能、吸水性等。

基板材料所用树脂的 ϵ_r 值和 $\tan \delta$ 值的高低, 主要受到树脂结构本身的极化程度大小。极化程度愈大, 介电常数值就愈高。为此, 消除或降低树脂中的易极化的化学结构, 来达到有效的降低基板材料 ϵ_r , $\tan \delta$ 值的目的, 这已经成为这类基板材料提高此项特性的重要途径。由此也看出, 一种高速高频化基板材料的特性好坏, 它所用的树脂种类, 更具体的讲它所用树脂的分子组成结构, 是相当关键、重要的。

2 树脂的改性

对高频 PCB 基板的研究通常从下面几个方面进行: 对树脂和玻纤及整体结构的改进, 通过布线或其它方式改进基板特性。同时在这些研究中, 高频下介电常数的测量起着很重要的作用, 有的学

者还提出了复合材料中介电常数计算的理论模型。

由于环氧树脂本身具有含量较大的极性基团，介电性能较差，通常的改性方法有：增加支链数，增大材料的自由体积，降低极性基团的浓度；在环氧树脂中加入双键结构，使树脂分子不易旋转；或引入占有空间体积较大的基团或高分子非极性树脂等方法，降低极性基团的含量，提高其介电性能。

2.1 聚苯醚改性环氧树脂

使用改性聚苯醚对环氧树脂进行改性^[7]，聚苯醚（PPO）分子结构中含有重复的苯环与醚键，且具有对称结构，在大分子中没有强极性基团，电气绝缘性能优良。改性聚苯醚（MPPPO）在保持 PPO 的电气特性的同时，改善了 PPO 的加工性能。在保证环氧覆铜板基本阻燃性和力学性能的基础上，利用 ϵ_r 只有 2.45 的 MPPPO 掺混改性环氧体系，形成半互穿网络结构，提高改性环氧覆铜板的介电性能，达到降低 ϵ_r 和 $\tan \delta$ 的目的。MPPPO 含量对基板 ϵ_r 、 $\tan \delta$ 的影响如图 2 所示。由图 2 可知，随着 MPPPO 含量的增加，覆铜板的 ϵ_r 和 $\tan \delta$ 都减小，表明 MPPPO 的添加对环氧树脂的绝缘特性确实有所改善，但是由于工艺条件较为苛刻，稳定性欠佳，该技术离工业化大生产还有一定距离，有待改进与提高。另外通过 PPO 改性溴化环氧树脂（BEP），使其耐热性能得到了改善，介电常数降低到 3.2，而其阻燃性能较佳，其它各项性能均有不同程度的提高^[10]。

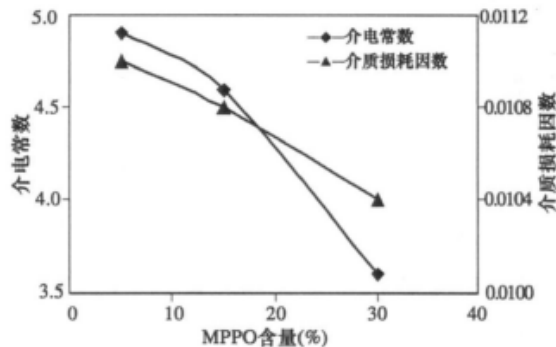


图 2 MPPPO 的含量对 ϵ_r 和 $\tan \delta$ 的影响

2.2 氰酸酯改性环氧树脂

环氧树脂在固化反应过程中，可在交联点间生成含有 OH 等极性基团，它们对介质的 ϵ_r 和 $\tan \delta$ 均有强烈影响。 $\tan \delta$ 与 OH 含量的关系如图 3 所示^[11]。从图 2 中可知，降低交联点间极性基团的浓度，可以降低 $\tan \delta$ 。在不减少环氧树脂体系交联密度的前提下，降低体系中 OH 的含量，许多学者对此进行了大量的研究工作。在树脂体系中加入氰酸酯，可降低树脂固化体系中 OH 的浓度，同时改善树脂体系的交联密度^[12]，提高了体系固化物的玻璃化转变温度，这也是 PCB 基板所需要的。

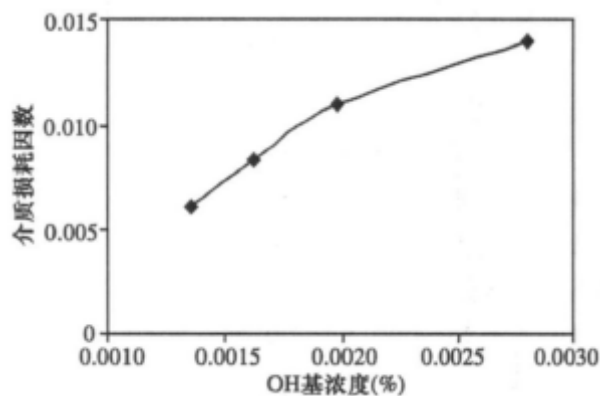


图3 $\tan \delta$ 与OH浓度的关系

2.3 聚四氟乙烯

聚四氟乙烯 (PTFE) 是一种超高分子量的聚合物, 其分子结构为四个完全对称的取向氟原子中心连接一个碳原子, 因而极性极低, ϵ_r 只有 2.0 (1 MHz), 加上 C-F 键的键能很高, 其耐热性好。具有优良的电气性能、耐化学腐蚀、耐热、使用温度范围广、吸水性低, 高频率范围内 ϵ_r 、 $\tan \delta$ 变化小, 非常适用于作为高速数字化和高频的基板材料。胡福田等^[13]人的研究表明, 在 PTFE 和玻璃纤维布组成的复合材料中, PTFE 树脂含量与介电常数、介质损耗因数的影响分别如图 3、图 4 所示。由图 3 可知, 其 ϵ_r 随 PTFE 树脂重量百分数的增加而减少, 树脂重量百分数在 72%时得到 ϵ_r 为 2.6 的产品。由图 5 可知, $\tan \delta$ 随树脂含量增加有一个显著减少的过程。PTFE 的热膨胀系数相对高, 质地柔软, 其机械性能差, 尺寸稳定性较差, 价格昂贵, 加工要求苛刻, 不适合普及使用。

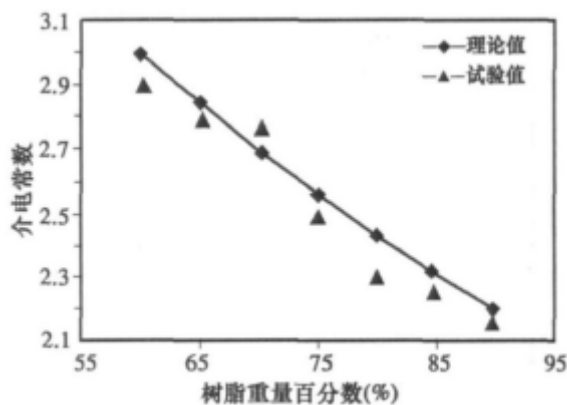


图4 树脂重量百分数对介电常数的影响

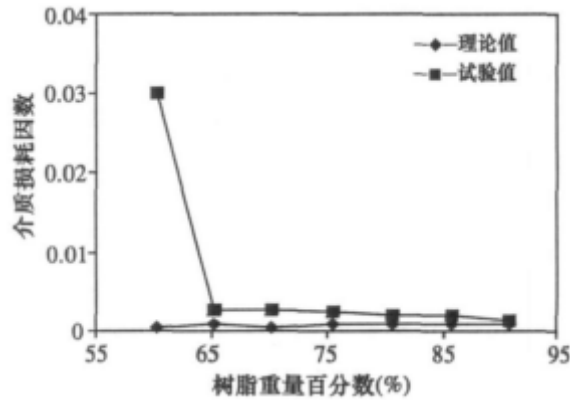


图 5 树脂重量百分数对 $\tan \delta$ 的影响

2.4 氰酸酯树脂

氰酸酯树脂具有优异的电绝缘性能、耐高温性能、高尺寸稳定性和低吸水性，可用作高性能复合材料的基体树脂，是一种理想的高频印刷电路板树脂基体。王结良等人的研究表明，采用有机锡催化剂固化得到的氰酸酯树脂基固化树脂及其复合材料具有低 ϵ_r 和低 $\tan \delta$ ，力学性能非常出色；同时还发现复合材料表现出与固化树脂相似的耐水煮和耐湿热老化性能，是一种优异的高频印刷电路板树脂体系^[14]。但是交联密度大及高结晶度而引起的韧性较差。可利用双马来酰亚胺树脂（BMI）和 CE 得到共聚物 BT 树脂，在其他性能保持不变的前提下改善其韧性。

3 玻纤的改性

玻纤增强材料是复合材料中力学强度的主要承担者，一般来说其介电常数高于树脂基体，又在复合材料中占有较高的体积含量，因此是决定复合材料介电性能的主要因素^[15]。目前，世界各国生产的硅酸盐成分的玻璃纤维织物组成大体相同，其基础成分都是 SiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO 三元系统，重量百分比在小范围内波动^[16]。常温下构成玻璃网络的硅氧或硼氧、铝氧骨架无弱联系离子几乎不导电。但是网络中充填了阳离子，特别是碱金属离子时，点阵结构在碱金属离子处中断，形成弱联系离子，产生热离子极化。这是影响玻璃介电性能的主要因素。目前通常采用的是无碱玻纤 E 玻纤，其介电常数为 7.2 (1 MHz)，不能满足高频电路的要求。首先可以采用的办法是混杂。在无碱玻纤中，除了 E 玻纤外，还有介电性能优秀的 D 玻纤 ($\epsilon_r = 4.7$, 1M Hz) 和 Q 玻纤 ($\epsilon_r = 3.9$, 1M Hz)，但是它们加工性能和成本较高，单独使用并不合适。通过对不同品种的玻纤进行合理的选配，要求既保证优良的低介电性能、加工性能，又能很好地解决工业化生产的成本问题。

4 基板材料的整体改进

除了对基板本身材料的改性外，还可以通过改进基板整体结构，调整多层介质的分布，改善其介电性能。合理调整多层介质的分布，可以在减小成本的前提下提高基板的介电性能。

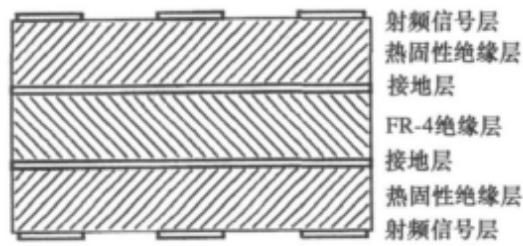


图 6 四层混合介质微波传输布层

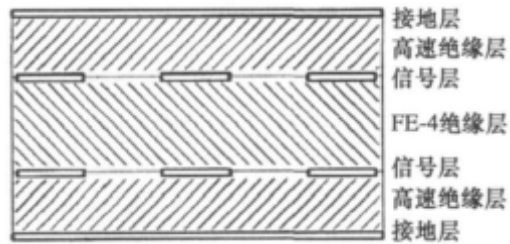


图 7 四层混合介质带状线布层

如图 6 所示，是一种常用的四层混合介质布层方法。其中，外层（顶部和底部）是低介电常数和低介质损耗因数的高频介质。这种结构可以很好的控制阻抗，信号损失也很小（约为 FR-4 的 1/10），信号传播速度比 FR-4 快 10%。而且，大部分材料都是廉价的介质，根据高频材料和中间 FR-4 的比值不同，这样的设计最多可以使总成本降低 25%。在几 GHz 的范围内经常使用这种结构，此时顶部和底部不一定要要求为热固性塑料，只要能与 FR-4 粘结的高频材料就可以使用。图 7 所示的是四层混合介质带状线布层，多用于数字电路。这种结构除了具备图 6 所示结构的优点外，还具有串音和电磁干扰更低的优点。另外还可以在 PCB 的制造过程中控制阻抗：由于内层的制造过程是“印刷和腐蚀”而不是制造外层时所需要的“印刷、制版和腐蚀”，所以可以精确控制传输线的宽度，控制阻抗。但是这种结构通常只适用于数字电路，因为数字器件具有更好的抗噪声能力，可以承受一定的阻抗不连续。

5 结论

从理论和实践中感悟到，在选择用于高频电路的所用的基板材料时，对基板材料的特性要求要特别注重考察它的 $\tan \delta$ ，在不同频率下的变化特性如何。而对侧重于信号高速传输方面的要求，或对侧重于具备有特性阻抗高精度控制要求时，则应该重点考察所用的基板材料的 ϵ_r 特性及其它在频率、湿度、温度等条件变化下的性能情况。国内外学者们也从不同的方面对这个问题进行了深入的研究：包括对环氧树脂的改性、换用其它树脂体、混杂玻纤、使用空心玻纤、适当布置多层结构、合理布线、采用嵌入无源元件等，都可以在某种程度上改善高频 PCB 基板的特性。但要得到一个普遍使用的方案，还需要进一步研究。另外，高频下介电性能的测量也是学者们研究的热点，还有的学者从理论上得到混合物介电常数的估算模型，这些对高频 PCB 基板的改性都有很重要的意义。

参考文献

- [1]祝大同. 低介电常数电路板用烯丙基化聚苯醚树脂[J]. 绝缘材料, 2001, 5(1):28-33.
- [2]祝大同. 覆铜板用新型材料的发展(1)[J]. 印制电路信息, 2001, 9(12):8-12.
- [3]杨雁, 李盛涛. 高频印制电路板研究进展[J]. 绝缘材料, 2007, 40(6):30-35.
- [4]李胜方, 王洛礼. 几种高性能树脂在覆铜板中的应用[J]. 粘接, 2005, 26(4):48-51.
- [5]杨维生. 微波材料选用及微波印制电路制造技术[J]. 电子电路与贴装, 2008, 1: 36-41.
- [6]杨维生. 聚四氟乙烯高频多层板工艺技术研究[J]. 印制电路信息, 2003, 11(9):47-51.
- [7]王严杰, 张续柱, 肖忠良等. 高频低介电常数改性环氧树脂覆铜板的研制[J]. 工程塑料应用, 2002, 30(4):35-37.
- [8]曹安照, 田丽. 介电常数、介质损耗角正切对PCB特性阻抗的影响[J]. 自动化与仪器仪表, 2006, 6:47-48.
- [9]王志勤. 特性阻抗的工艺研究[J]. 电子工艺技术, 2006, 27(9):285-287.
- [10]Jiru Meng, Guozheng Liang, Lei Zhao. Study on Epoxy Matrix Modified with Poly(2,6-dimethyl-1,4-phenylene ether) for Application to Copper Clad Laminate[J]. Composites Science and Technology, 2002, 62:783-789.
- [11]毛桂洁, 陈平, 程子霞. 高性能新一代FR-4环氧基玻璃布层压板的改性研究[J]. 纤维复合材料, 1998, 15(12):31-36.
- [12]陈平, 程子霞, 朱岩松等. 低 ϵ_r 、低 $\tan \delta$ 、FR-4印刷电路基板的研制[J]. 纤维复合材料, 2001, 18(1):20-22.
- [13]胡福田, 杨卓如. 玻璃纤维布增强聚四氟乙烯复合材料的制备及性能研究[J]. 化工新型材料, 2006, 34(12):19-22.
- [14]王结良, 梁国正, 杨洁颖等. 高频氰酸酯基覆铜板基板的研制[J]. 中国塑料, 2004, 16(1):46-49.
- [15]洪旭辉, 华幼卿. 玻璃纤维增强树脂基复合材料的介电特性[J]. 化工新型材料, 2005, 33(4):16-19.
- [16]毕松梅, 汪学骞, 王扬等. 7628玻纤混纺织物低介电性能的研究[J]. 纺织学报, 2003, 24(1):16-19.