

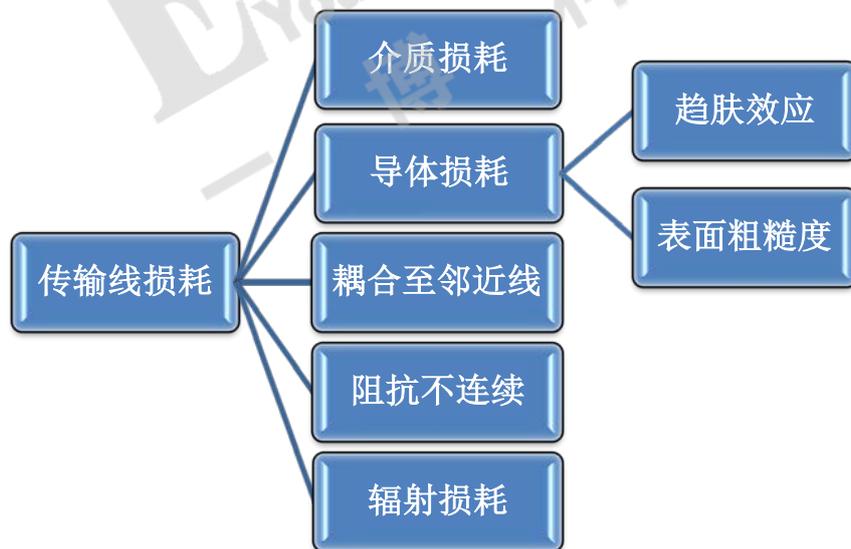
【高速先生原创|学习笔记系列】学习笔记之传输线损耗

作者：姜杰

一博科技高速先生团队队员

我梦中的信号通道是无损传输线，有一天它会身披光滑铜箔，脚踏“无损”板材来搭救我的高速信号。梦想很丰满，现实却很骨感，“无损”板材和表面粗糙度为零的绝对光滑铜箔在工程应用中并不存在，所以，残酷的现实是“损耗易把能量抛，缓了边沿，降了眼高”。

信号在传播过程中的能量损失不可避免，传输线损耗产生的原因有以下几种：**导体损耗**，导线的电阻在交流情况下随频率变化，随着频率升高，电流由于趋肤效应集中在导体表面，受到的阻抗增大，同时，铜箔表面的粗糙度也会加剧导体损耗；**介质损耗**，源于介质的极化，交流电场使介质中电偶极子极化方向不断变化，消耗能量；**耦合到邻近走线**，主要指串扰，造成信号自身衰减的同时对邻近信号带来干扰；**阻抗不连续**，反射也会导致传输的信号损失部分能量；**对外辐射**，辐射引起的信号衰减相对较小，但是会带来 EMI 问题。其中，介质损耗和导体损耗是传输线上信号衰减的根本原因，也是本文介绍的重点。

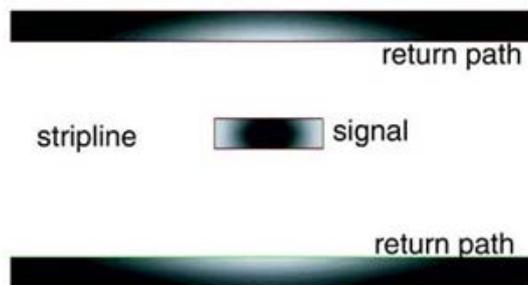


想要搞清楚导体损耗，需要理解趋肤效应及导体表面粗糙度产生的影响。高频电流流过导体时，电流会趋向导体表面分布，频率越高，靠近导体表面的电流密度越大，这种现象称为趋肤效应（如下图所示，导体上颜色越浅代表电流密度越大）。

如何关注

- 1、搜索微信号“高速先生”
- 2、扫描右侧二维码，开始学习





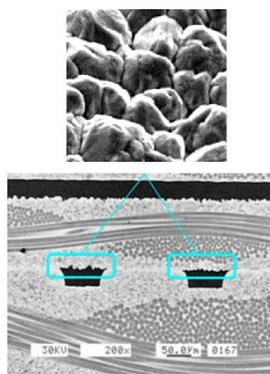
趋肤效应

从电磁场的角度理解趋肤效应颇费周折，而从阻抗的角度分析，会令你豁然开朗，趋肤效应可以认为是电流寻求最低阻抗路径的趋势造成的，在高频时，路径阻抗主要由回路电感决定，为寻找回路电感最低路径，电流在导线上的分布会尽量伸展开以减少导线自感（可解释宽走线有利于减少传输线的损耗），同时，返回路径中的反向电流会尽量靠近信号路径表面以减小回路电感。电磁波强度衰减到表面场强 $1/e$ 的深度称为趋肤深度，高频时，铜导线中电流经过的趋肤深度 δ 计算公式如下：

$$\delta = 2.5 \sqrt{\frac{1}{f}}$$

δ 趋肤深度，微米 (μm) f 正弦波频率，GHz

随着信号速率的增加，趋肤深度减小，意味着过流面积的减小，交流电阻增加。雪上加霜的是，实际的导体表面并非绝对光滑，而是具有一定的粗糙度。而且在 PCB 加工过程中，为增加铜箔与板材的结合能力，还会进行粗化处理，进一步加剧了导体损耗。通过微观切片所看到的 PCB 走线的截面结构如下图所示，不难看出，信号线的表面是非常粗糙的。



当趋肤效应遇上粗糙的表面，等待高速信号的将是“摩擦摩擦，似魔鬼的步伐”。

如何关注

- 1、搜索微信号“高速先生”
- 2、扫描右侧二维码，开始学习





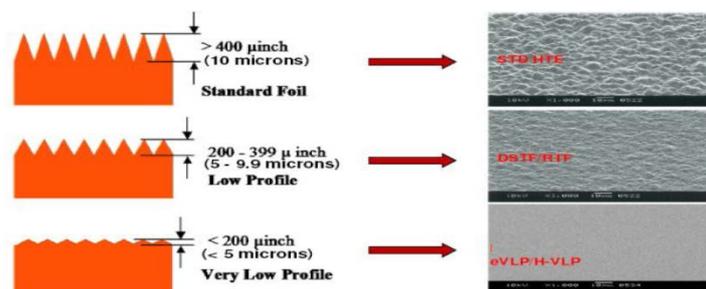
(动图)

让人头大的是，粗糙的铜箔不像粗糙的嘴唇，一支唇膏就能搞定。



(动图)

为了满足信号损耗的需求，需要根据实际情况选择不同表面粗糙度的铜箔，以此为划分标准，铜箔可以分为 STD(标准铜箔)、RTF(反转铜箔)、VLP(低表面粗糙度铜箔)以及 HVLP(超低表面粗糙度铜箔)。

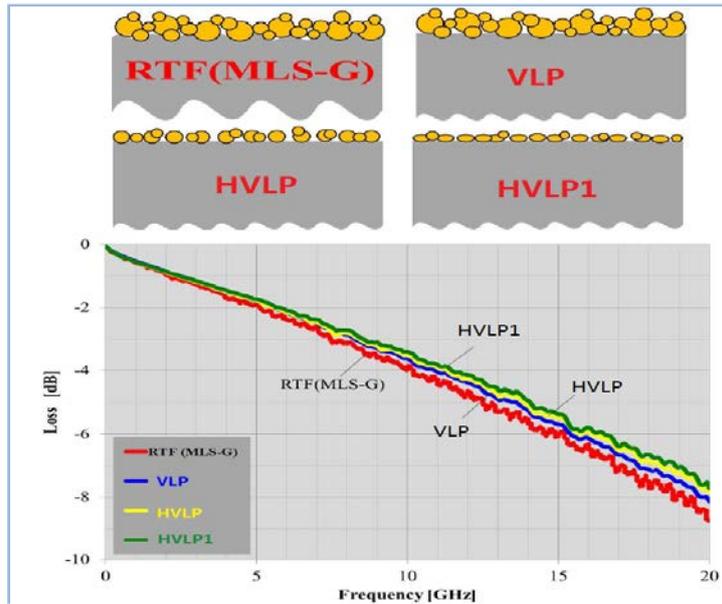


明白了导体损耗产生的原因，也就不难理解高速信号叠层设计时为何会选择表面粗糙度较低的铜箔了。如下图所示，相同材料不同的铜箔类型损耗曲线对比。从仿真结果可以看出在 5GHz 以下铜箔的影响不是太明显，但在 5GHz 以上铜箔的影响开始越来越大，所以我们在高速信号(尤其>10Gbps)的设计和仿真中需要关注铜箔表面粗糙度的影响。

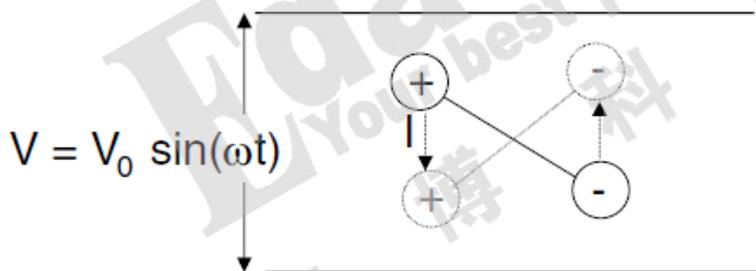
如何关注

- 1、搜索微信号“高速先生”
- 2、扫描右侧二维码，开始学习





讲完导体损耗，再来聊聊介质损耗。构成板材的玻纤和树脂等绝缘材料介质中的带电粒子被束缚在分子中，外加电场会使其产生微观位移，使介质中的偶极子随电场方向规则排列，这种现象称为介质的极化，极化过程产生的能量损失称为介质损耗。介质损耗同样会造成高速信号的衰减。



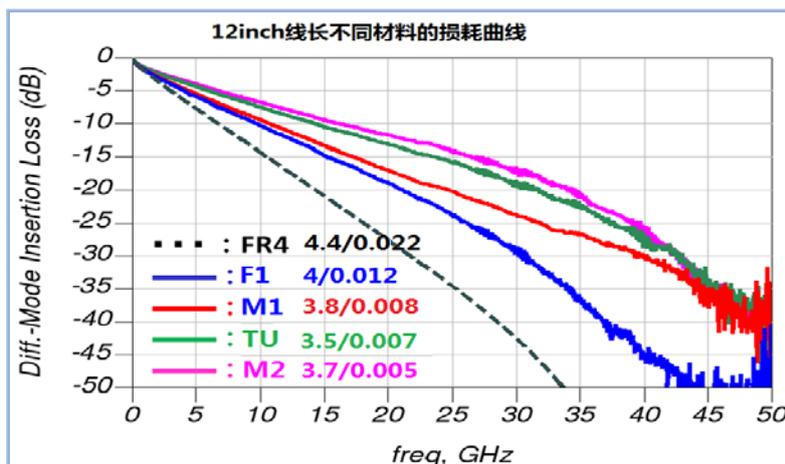
需要注意的是，区别介质的相对介电常数（Dk）与耗散因子（Df）的概念。相对介电常数描述了材料影响电容量和电磁波传播速度的系数度量，涉及偶极子与电场的不同相运动并引起电容变化；耗散因子（Df）则描述了参与运动的偶极子数量及运动剧烈程度随频率提高的系数度量，涉及偶极子与电场的同相运动并引起损耗。介质损耗与 Dk 和 Df 有直接关系，Dk/Df 越小（稳定），损耗也越小（稳定），合理稳定的介质参数可以在工程应用上更好的控制产品的性能。

为了能让大家对于介质损耗有个直观印象，不妨看个例子。同样的 12inch 线长，使用不同损耗级别的材料所测得的损耗曲线如下图所示，在 10GHz 的频点，普通 FR4(普通损耗级别)的损耗为-15dB，而如果使用 TU（低损耗级别）的损耗仅-7.5dB，如果有高速信号要求插损在 10GHz 的时候需要小于-12dB，那么使用普通 FR4 的材料就不能满足要求，必须使用损耗级别更低的材料。

如何关注

- 1、搜索微信号“高速先生”
- 2、扫描右侧二维码，开始学习





导体损耗及介质损耗会影响高速信号电气性能，了解传输线损耗理论有助于我们在叠层设计时根据损耗要求，结合信号的速率及走线预估长度进行综合评估，选择合适的板材和铜箔类型。

【关于一博】

深圳市一博科技股份有限公司（简称一博科技）成立于2003年3月，专注于高速PCB设计、PCB制板、SMT焊接加工和供应链服务。我司在中国、美国、日本设立研发机构，全球研发工程师600余人。

一博旗下PCB板厂位于深圳松岗，采用来自日本、德国等一流加工设备，TPS精益生产管理以及品质管控体系的引入，致力为广大客户提供高品质、高多层的制板服务。

一博旗下PCBA总厂位于深圳，并在上海、成都、长沙设立分厂，厂房面积23000平米，现有30条SMT产线，配备全新进口富士XPF、NXT3、AIMEX III、全自动锡膏印刷机、十温区回流炉、波峰焊等高端设备，并配有AOI、XRAY、SPI、智能首件测试仪、全自动分板机、BGA返修台、三防漆等设备，专注研发打样、中小批量的SMT贴片、组装等服务。作为国内SMT快件厂商，48小时准交率超过95%。常备一万余种YAGEO、MURATA、AVX、KEMET等全系列阻容以及常用电感、磁珠、连接器、晶振、二三极管，并提供全BOM元器件服务。

PCB设计、制板、贴片、物料一站式硬件创新平台，缩短客户研发周期，方便省心。

EDADOC, Your Best Partner.

如何关注

- 1、搜索微信号“高速先生”
- 2、扫描右侧二维码，开始学习



【关于高速先生】

高速先生由深圳市一博科技有限公司 R&D 技术研究部创办，用浅显易懂的方式讲述高速设计，成立至今保持每周发布两篇原创技术文章，已和大家分享了百余篇呕心沥血之作，深受业内专业人士欢迎，是中国高速电路第一自媒体品牌。



扫一扫，即可关注

Edadoc
Your best partner
一博科技

如何关注

- 1、搜索微信号“高速先生”
- 2、扫描右侧二维码，开始学习

