

## 用于集成无源器件的工艺技术

当今便携式无线产品里使用的大多数器件是无源元件。如果把这些无源元件集成到一个衬底或一个独立的器件上将能明显地提高产品性能、降低成本和减小尺寸。制造集成无源元件的材料和工艺有许多种, 在这里对它们进行了比较。

最新的便携式移动电话、计算机和 Internet 应用要求产品有更强的功能、更好的性能和更低的价钱, 同时要求体积小、重量轻。到目前为止, 硅和 GaAs 集成电路技术发展迅速, 加上采用更小的封装形式、更小的分立无源元件和高密度互连印制电路技术, 已经能满足上述要求。这些产品的基带部分可用硅单片集成电路实现, 而射频部分仍需要有源器件与高性能的无源元件多种方式的结合。因为对于射频功能来说, 完全单片集成的方法会导致产品性能大幅降低。随着有源器件集成度不断提高, 越来越多的功能被集成到单片上, 这对集成无源元件形成很大的压力, 无线产品的射频部分尤其是这样。一个典型的移动电话产品可以包含 400 个元器件, 而有源器件数不到 20 个, 其余 380 个无源元件占电话电路板 80% 左右的面积和 70% 的产品组装成本。因此, 无论是减小整个产品的尺寸与重量, 还是在现有的产品体积内增加功能, 集成无源元件技术都能发挥很大的作用。

使用集成无源元件技术能得到的其它好处, 是增加生产能力、减少库存、提高产品可靠性和降低功能块乃至系统级成本。集成无源元件技术能提供紧凑的集成无源器件 (IPD) 网络产品, 或作为一个功能密集的平台, 以集成射频功能所需的最佳有源器件组合。

### 集成无源技术

目前可用的集成无源元件技术有 3 大类, 分别是薄膜技术、低温烧制陶瓷 (LTCC) 技术、基于高密度互连 (HDI) 的延伸技术和其它印制电路板 (PCB) 技术。HDI 和 PCB 技术通常用于数字系统。在这种系统里, 分布装焊的电容与中等精度的上拉电阻成本低, 成品率高。在适于射频集成的多种技术中, 薄膜集成无源技术通常能提供最优良的元件精度和功能密度, 以及最高集成度、最小体积和最轻重量。一个有代表性的薄膜集成无源工艺的剖面示意图如图 1 所示。这个工艺能制作各种电阻、电容和电感元件, 以及低电感接地板和连接无源元件的传输线走线。薄膜结构在合适的载体衬底材料上制造。很重要的一点是工艺要既能满足所要求的元件性能和精度指标, 工艺还不复杂, 需要掩模数最少 (一般为 6~10 张)。每个无源元件通常占据不到  $1\text{mm}^2$  的面积以便能在面积和成本方面与表面贴装技术的分立元件竞争。在图 2 中示出了一个加工好的薄膜集成无源衬底的一个部分, 来说明 3 种主要的集成无源元件。电阻器

绝大多数移动电话要求薄膜电阻的阻值范围在  $10\sim 100\text{K}\Omega$  之间。采用  $100\Omega$ /单位的单层薄膜电阻材料, 用简单几何图形可以制作  $10\sim 1\text{k}\Omega$  的高性能射频电阻。而蛇形图案可以用来制作更高阻值的电阻。薄膜电阻材料主要是根据它们的电阻率、工艺的兼容性和电阻的温度系数 (TCR) 来选定的。通常还要求在加负载情况下性能稳定性优于 0.5%。在温度变化时, 相邻电阻器的跟踪精度与匹配精度均优于 0.5%。表 1 示出了有代表性的集

成无源薄膜电阻材料的特性。

氮化钽也许是薄膜集成无源技术中使用最广泛的电阻材料，因为它为  $100\ \Omega$ /单位的薄膜电阻提供了合理的厚度和很低的温度系数。

这种材料还可用干法工艺刻蚀，能制备高精度的几何图形。这些薄膜电阻一般在整个工艺流程前期制作，通常直接制作在基本衬底表面，以求达到最优的图形制作精度，并有利于加负载情况下的散热。

金属层的一致性和物理图形的控制精度对最终的元件精度是很关键的。现有的金属化生产设备能为圆片工艺和大面积板材(LAP)工艺制作高度一致的电阻和淀积导电金属层。

## 电容器

要满足一个典型的移动电话产品中射频和基带的需要，就要能制作  $1\text{pF}\sim 100\text{nF}$  范围的电容。集成无源技术虽然只能提供  $0.25\text{pF}\sim 500\text{pF}$  范围的电容值，但仍能满足典型的射频 IPD、单功能射频模块和完整的射频模块子系统的所有要求。典型的集成无源电容器工艺采用两种或一种非铁电体电容材料，以传统的金属-绝缘体-金属(MIM)电容器结构实现所要求的电容值和性能。聚合物电介质材料可以用于制作很低值的电容，其典型的层厚对应  $5\text{pF}/\text{mm}^2$  左右的单位电容值。中间值电容（单位电容值在  $50\sim 200\text{pF}/\text{mm}^2$  之间）可以用具有良好射频性能的等离子淀积氮化硅膜作层间介质，它具有很低的电容温度系数（TCC）。电容密度在  $500\text{pF}/\text{mm}^2$  以上的高值电容主要用于射频去耦，可以用阳极氧化铝或氧化钽膜作层间介质。必须特别注意的是，在设计这些集成无源 MIM 结构电容时，要确保极低的电极串联电阻和最小的对地寄生电容。这些电容元件具有很小的固有寄生电感。这些元件的结构和工艺都须经过专门设计，以确保达到规定的击穿电压（通常保证最低 50V 的直流电压）。

## 电感器

在通常的移动电话产品中，电感元件只占元件总数的不到 10%，电感值在  $1\sim 100\text{nH}$  范围里，但是它们对总的射频性能有很重要的影响。高品质因数的电感对于在振荡器振荡回路和低损耗的无源滤波和匹配电路中达到必要的低相位噪声是极为重要的。通过使用多种衬底和导电材料，集成无源工艺能制造很紧凑的、具有高品质因数和高固有谐振频率的电感元件，使得它们在尺寸、成本和性能等方面能与表面贴装技术（SMT）使用的分立元件相抗衡。这些电感的性能也超过了用单片集成电路工艺制作的片上电感，因为半导体硅衬底的损耗限制了片上电感的性能。

集成无源工艺所达到的电感性能在很大程度上与导电材料在人们感兴趣的频率上的特性和这些元件的设计水平紧密相关。像铜或银这样的导电性极好的金属损耗最低，但最终频率性能受到趋肤深度效应的制约。为在给定的频率上损耗最低，最佳的金属厚度是趋肤深度的 3~5 倍。这个经验公式可以用来估计在一个集成无源电感工艺中达到低损耗的金属层厚度。

典型的集成无源工艺可以制作单层和叠层螺旋线电感元件。叠层螺旋线电感元件具有更高的单位面积电感值，其倍数接近  $n^2$ ， $n$  在这里是叠层螺旋线的层数。因此一个典型的 2 层金属化工艺能集成电感值从 1nH 到超过 100nH 的电感器，每个元件占用的面积不超过 1.5mm<sup>2</sup>。通过仔细地优化电感设计和谨慎地选择材料，也能使电感值为 1~20nH、固有谐振频率为 2.5~15GHz 的电感的品质因数达到 40~70。

还应该注意到，表面贴装技术中用的电感元件比他们的同伴——电阻和电容元件要昂贵得多。这促使在基于 SMT 的设计中尽可能少使用电感。在集成无源环境中不再存在这种情况，相反，采用电感器多的设计方案，其电路性能常常会更好。

### 多层金属化

多层金属化结构将集成无源电阻、电容和电感互相连接起来。金属层的典型厚度是现在通常用在集成电路工艺中的金属厚度的 5~10 倍。因此，通常使用 5~15 $\mu\text{m}$  厚的层间聚合物电介质材料，2~7 $\mu\text{m}$  厚的铝或铜金属层。这样的层厚能制作低损耗电感器，而低介电常数的聚合物能用来制作 30~80 $\Omega$  阻抗的共平面或微带传输线元件，其可以接受的线损耗与通常的 10 $\mu\text{m}$  及其以上线宽的金属条的情况相当。

一个典型的多层金属化工艺能制作 2 或 3 层金属，其底金属层 (M1) 通常充当接地层和 MIM 电容器元件的下极板。上金属层 (M2 与 M3) 则用作传输线、互连线、电感器螺旋线和电容器上极板连线。

选择聚合物电介质对集成无源工艺的工艺体系结构是关键，对整个工艺的费用和性能也有着明显的影响。在选择夹层材料时，还要考虑聚合物电介质材料的其他特性，包括热稳定性、吸潮性和弹性系数。表 2 是有代表性的制造商的已出版的数据。

### 衬底

衬底是制作集成薄膜无源元件的基础。它对产品的成本、成品率和性能有很大的影响。集成无源工艺的衬底通常采用标准的氧化物隔离硅圆片、高电阻率硅圆片、玻璃圆片和原来为薄膜显示器行业研制的 LAP 玻璃材料。圆片和 LAP 都利用了现有工艺设备能力和批量生产基础设施的优点。

### 工艺集成

从选择材料到把无源元件制作方法集成进一个工艺流程的过程与集成电路工艺开发的过程相类似。首先需要开发各个单项工艺，然后把它们集成起来，以验证整套工艺与材料的兼容性，并且建立工艺设计规则。必须注意在确定工艺体系和选择材料时要确保加载时的稳定性、合适的电迁移和静电放电性能、抗潮湿和腐蚀的能力、以及长期的微观结构稳定性。

在一个集成无源工艺中，电阻和电容的精度是与层厚控制精度和特征尺寸精度密切相关的，它们随着元件的绝对尺寸而变化。电感值实质上是由电感螺旋线的间距和匝数决定的。由于电感螺旋线的间距由光刻掩模决定，电感值会有小于 1% 的偏差。

## 集成无源模块组装

IPD 网络产品以芯片规模封装 (CSP) 的形式组装。单功能模块和完整的射频收发器子系统也可以通过将有源器件安装并互连到集成无源衬底之上的方式来实现。在集成无源衬底上的粘片、压焊和焊接压点需要一个额外的可焊接和压焊的涂层。有多种镍金涂层通常用于这个目的。

人们可以使用导电胶粘片工艺将有源器件装配到集成无源衬底上，然后使用压焊或芯片倒装焊工艺将它们互相连接。某些分离的有源器件（例如变容二极管）要求背面接触，就只能采用压焊组装。射频 IC 和其它的射频器件大量采用芯片倒装焊组装技术，极好地利用了其重复性好和压焊电感非常低的优点。

圆片级 IPD 的焊球粘附、测试、卷带封装, 以及圆片级全模块组装和测试, 也提高了集成无源技术的成本效益 (图 3)。

## 设计方法论和实例

稳健的设计流程对于保证 IPD 设计和模块设计一次成功和将产品上市的时间减到最小都是极为重要的。对集成无源元件尽管能进行激光微调，但要做到像表面贴装技术 (SMT) 那样在板级更换元件、迭代设计却是不可能的。幸运的是, 人们一直在努力建立高精度的“参数化”元件模型, 以充分描述元件最重要的特性和有关的寄生参数。这样的模型可以作为库单元嵌入到工业标准射频设计工具中, 这些设计工具可以进行电路设计和电路图的输入、电路模拟、优化、物理设计以及布局和设计迭代。设计时还考虑到工艺容差。使用这种设计方法保证了很高的第一次成功率。

集成无源技术目前正被用于许多频率在 900MHz 和 5.8GHz 之间的无线通信产品里的 IPD 器件和模块的制作 (图 4)。有人已经设计和演示了频率高达 50GHz 的集成无源工艺。

## 结论

集成无源元件技术为射频无源网络、单功能模块和收发器提供了一种成本效益高的功能密集的集成手段。多种多样的电阻、电容和电感元件材料和设计方法为射频子系统的模块化和封装内系统集成提供了实现的途径。

## 射频和天线设计培训课程推荐

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,致力并专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;我们于 2006 年整合合并微波 EDA 网([www.mweda.com](http://www.mweda.com)),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

易迪拓培训课程列表: <http://www.edatop.com/peixun/rfe/129.html>



### 射频工程师养成培训课程套装

该套装精选了射频专业基础培训课程、射频仿真设计培训课程和射频电路测量培训课程三个类别共 30 门视频培训课程和 3 本图书教材;旨在引领学员全面学习一个射频工程师需要熟悉、理解和掌握的专业知识和研发设计能力。通过套装的学习,能够让学员完全达到和胜任一个合格的射频工程师的要求...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/rfe/110.html>

### ADS 学习培训课程套装

该套装是迄今国内最全面、最权威的 ADS 培训教程,共包含 10 门 ADS 学习培训课程。课程是由具有多年 ADS 使用经验的微波射频与通信系统设计领域资深专家讲解,并多结合设计实例,由浅入深、详细而又全面地讲解了 ADS 在微波射频电路设计、通信系统设计和电磁仿真设计方面的内容。能让您在最短的时间内学会使用 ADS,迅速提升个人技术能力,把 ADS 真正应用到实际研发工作中去,成为 ADS 设计专家...



课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/ads/13.html>



### HFSS 学习培训课程套装

该套课程套装包含了本站全部 HFSS 培训课程,是迄今国内最全面、最专业的 HFSS 培训教程套装,可以帮助您从零开始,全面深入学习 HFSS 的各项功能和在多个方面的工程应用。购买套装,更可超值赠送 3 个月免费学习答疑,随时解答您学习过程中遇到的棘手问题,让您的 HFSS 学习更加轻松顺畅...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/11.html>

## CST 学习培训课程套装

该培训套装由易迪拓培训联合微波 EDA 网共同推出,是最全面、系统、专业的 CST 微波工作室培训课程套装,所有课程都由经验丰富的专家授课,视频教学,可以帮助您从零开始,全面系统地学习 CST 微波工作的各项功能及其在微波射频、天线设计等领域的设计应用。且购买该套装,还可超值赠送 3 个月免费学习答疑...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/24.html>



## HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书,课程从基础讲起,内容由浅入深,理论介绍和实际操作讲解相结合,全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程,可以帮助您快速学习掌握如何使用 HFSS 设计天线,让天线设计不再难...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

## 13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程,培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合,全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作,同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习,可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试...

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



### 我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年,10 多年丰富的行业经验,
- ※ 一直致力并专注于微波射频和天线设计工程师的培养,更了解该行业对人才的要求
- ※ 经验丰富的一线资深工程师讲授,结合实际工程案例,直观、实用、易学

### 联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>