



应用无掩膜印刷术 埋嵌微型聚合物厚膜电阻

何 为 崔 浩 编译

(电子科技大学应用化学系, 四川 成都 610054)

张宣东 徐景浩 刘松伦 何 波 编译

(珠海元盛电子科技有限公司技术中心, 广东 珠海 519060)

摘 要 Optomec公司开发了一种名为M³D™的新型印刷技术,用于沉积高精度PTF(Polymer Thick Film)电阻。这种新方法生产出的电阻,面积小到0.05mm²,阻值范围达到100Ω~10000Ω,阻值公差能够保持在10%以内。M³D™技术可以直接利用CAD文件决定电阻的位置以及阻值大小,而不需要制作掩膜模版,也不需要事后对阻值进行微调,是一种印刷埋嵌电阻的高性价比解决方案。

关键词 埋嵌电阻; 聚合物厚膜; 无掩膜印刷

中图分类号: TN41 文献标识码: A 文章编号: 1009-0096(2007)05-0033-05

Maskless Printing of Miniature Polymer Thick Film Resistors for Embedded Applications

He Wei Cui Hao Zhang Xuandong Xu Jinghao Liu Songlun He Bo

Abstract Optomec is developing a new printing method, known as M³D™, for depositing high precision PTF resistors. This new approach produces resistors with a variability of better than 10% in the range of 100Ω-10kΩ and at a footprint below 0.05mm². M³D™ allows the locations and resistance values to be determined from the CAD file, which eliminates the need for creating screens or stencils and eliminates trimming requirements. It is a cost-effective solution for printing embedded resistors.

Key words embedded resistors; polymer thick film; maskless printing

1 介绍

埋嵌聚合物厚膜电阻得到了越来越多的应用,特别是在挠性基板领域尤为如此。随着新应用领域的复杂程度不断增加,人们需要开发更先进的工艺技术来满足尺寸、成本、产能等方面的严格要求。

为了印制高精度以及小外型的电阻,Optomec公司开发了一种叫做“Maskless Mesoscale Materials Deposition”(M³D)的技术^[1-2]。这个技术包括PTF浆料的雾化和利用空气动力学将浆料雾滴进行聚集喷射成形。喷射出来的射流通过CAD/CAM控制

沉积在 PCB 上的特定区域。这种空气动力射流能够被聚集到直径 $25\mu\text{m}$ 以下, 因此比起目前的方法来说, 它可以印制出尺寸更小的元件。M³D 技术具有前期生产准备成本低、设计周期短、性价比高等优点。

2 M³D 技术原理

如图 1 所示, M³D 是一种非接触的印刷技术, 它使用一个改进型的 Collison 雾化器对油墨进行雾化^[1]。

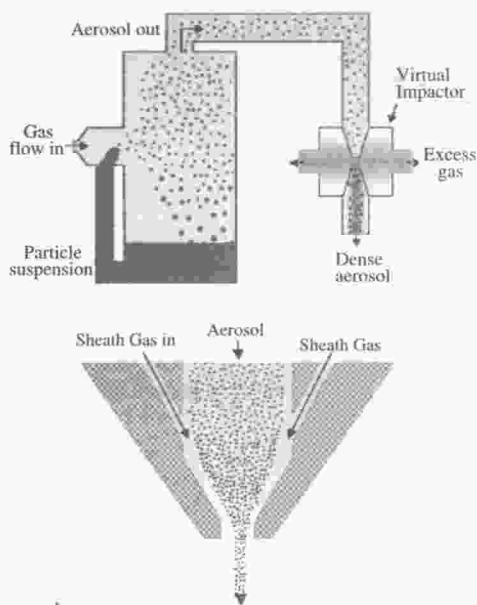


图 1 M³D 装置示意图

这里用的气雾剂是由 PTF 油墨小液滴组成, 直径大约 $3\mu\text{m}$ ~ $5\mu\text{m}$ 。气雾状材料在经过一系列状态调节之后, 被传送到喷嘴处, 喷嘴将这些气雾状材料汇聚成一股直径大约 $10\mu\text{m}$ 的粒子流。粒子流以大约 100m/s 的高速从喷嘴中喷射出来, 流量高达 $0.25\text{mm}^3/\text{s}$ 。这时喷嘴距基板的距离为 5mm 。我们通过移动喷嘴下面基板的位置来控制油墨沉积到我们需要的地方, 并可以实时改变移动路径来改变沉积效果。

因为液滴尺寸非常小以及 CAD 直接控制图案形成, 所以 M³D 工艺和传统技术有很多不同。M³D 工艺能够非常精确地控制沉积体积和沉积形状, 所以这套沉积系统能够让油墨材料达到精确的沉积量, 以便在板上印制阻值精确的电阻。由于是 CAD 直接控制, 该工艺可以实时对设备的沉积参数进行精确调节, 以补偿工艺过程中产生的漂移。这些特点使我们可以用一种浆料在一张基板上沉积范围很宽的不同阻值的电阻, 因此它只包含一个印刷步骤, 并不

需要传统工艺流程中的激光微调步骤。

3 实验过程及结果

3.1 印制电阻的基本方法

印制电阻的几何尺寸决定了该电阻的阻值^[4]。M³D 工艺一个很大的好处就是可以调节沉积参数, 从而很容易控制印制电阻的厚度和宽度。电阻的厚度可以通过改变沉积材料的层数、基板移动速度以及材料的体积沉积速率来控制。沉积电阻的宽度可以通过 CAD/CAM 来调节。图 2 为典型的沉积电阻时喷嘴的移动路径。

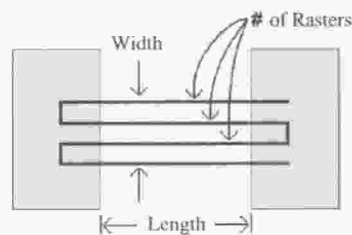


图 2 印制电阻时喷嘴的移动路径

喷嘴以栅格的形式在 2 个金属电极间来回移动, 沉积油墨。这些栅格的间距是可调的, 并且在一般情况下, 邻近的栅格要发生轻微重叠以便完成后的电阻拥有更加光滑的表面。图 3 为沉积栅格的截面示意图。

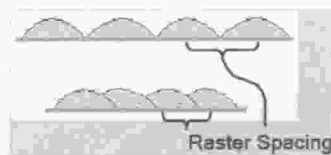


图 3 沉积材料的截面示意图

电阻的宽度取决于栅格的数量和栅格的间距。通常, 材料的体积沉积速率是一个不变的常数, 但是我们可以改变基板的移动速度, 以此来精确控制沉积在指定位置材料的沉积量。这种方法通常用来控制沉积材料的厚度, 也能够用来精确控制沉积材料的总沉积量。M³D 工艺能够生产出宽度最小 ($50\mu\text{m}$)、长度最小 ($100\mu\text{m}$)、厚度最大 ($50\mu\text{m}$) 的电阻。

这次研究主要集中在印制石墨电阻浆料 (Asahi TU-15-8), 这是市面上一种常见的电阻材料, 拥有 $15\Omega/\text{mm}^2$ 的标称电阻。由于这种浆料的粘度太高, 我们必须对其进行稀释, 以便在 M³D 工艺中能够更有效的进行雾化。广泛接受的稀释方法是用二甘醇二丁基醚 (Diethylene Glycol Dibutyl Ether) 进行稀释, 稀释后二甘醇二丁基醚占总重量的 33%。这样做能够让沉积出来的电阻具有光滑的

表面。表面越光滑，其阻值公差就越小。下面图4和图5是油墨稀释前后电阻的表面状态对比。经稀释后的电阻表面明显光滑很多。



图4 用未稀释的油墨印制的电阻表面



图5 用稀释后的油墨印制的电阻表面

图6和图7是用稀释后的Asahi TU-15-8印制的厚度15 μm 的电阻。

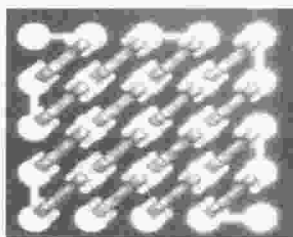


图6 印制的电阻阵列

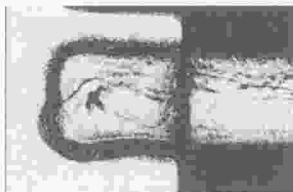


图7 印制电阻的局部放大图

为了研究这种印制技术以及对电阻性能进行评估，实验室自行设计制造了一款印制板，用的基材是BT树脂，板上包含了72对镀金焊盘。这72对焊盘被分成了12组，每组6对。这12组焊盘每组拥有不同的焊盘间距，从0.1mm到1.2mm，每次增加0.1mm。在沉积完电阻油墨之后，便依照油墨厂商的规范（170 $^{\circ}\text{C}$ ，10min）完成固化，然后要做的有两件事，一是对电阻值进行测量，二是对电阻值偏离平均值和偏离目标值的程度进行评估。

3.2 电阻几何形状的控制

本实验制作了各种不同几何形状的电阻，以便研究当阻值作为几何形状的函数时，它的统计变化

规律。我们研究的参数有电阻长度、栅格数量（ R ）、栅格间距（ S ）和沉积层数（ L ），其中栅格数量（ R ）和栅格间距（ S ）改变电阻宽度，沉积层数（ L ）改变电阻厚度。在本实验中，基板移动速度被固定在3mm/s。图8显示了不同几何外形的电阻阻值随电阻长度的变化情况。

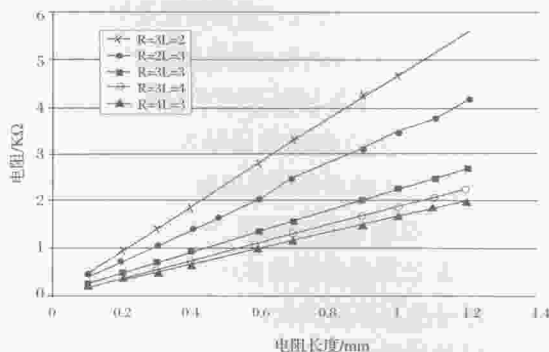


图8 电阻长度 - 电阻阻值曲线

图中每个数据点反映的都是30个电阻的平均阻值。可以看出，电阻阻值跟电阻长度是线型关系。图9反映的是电阻阻值随电阻宽度的变化情况。

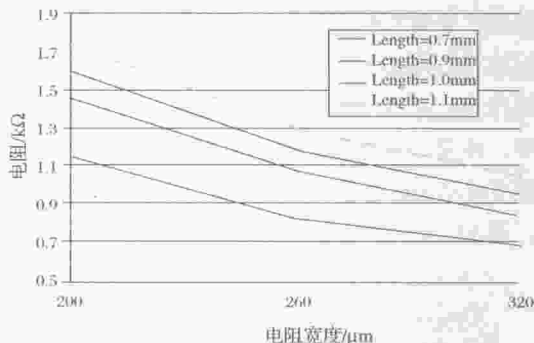


图9 电阻宽度 - 电阻阻值曲线

随着宽度增加，阻值单调减少，这跟预计的一样。不同长度、宽度、厚度组合的电阻，其阻值偏离平均值的大小，被计算出来，详细情况见表1。

表1 不同形状电阻的阻值偏离

Width	Length (mm)											
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.6	0.7	0.9	1	1.1	1.2		
150 μm	16.9%	5.7%	5.8%	7.0%	8.3%	6.4%	6.3%	7.0%	7.0%	5.9%		
220 μm	15.8%	5.3%	4.1%	7.3%	3.4%	4.2%	4.8%	5.5%	4.4%	5.3%		
290 μm	7.3%	4.9%	6.0%	5.4%	1.6%	3.9%	4.8%	4.5%	5.8%	2.8%		

Layers	Length (mm)											
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.6	0.7	0.9	1	1.1	1.2		
2 Layers	11.0%	7.0%	10.6%	7.2%	5.7%	3.6%	6.7%	4.7%	4.1%	4.4%		
3 Layers	9.0%	6.5%	4.1%	3.3%	1.7%	4.5%	3.3%	2.4%	1.9%	2.8%		
4 Layers	6.2%	4.2%	3.9%	4.3%	2.6%	2.7%	3.7%	2.1%	4.4%	3.2%		

可以看到，某些形状的电阻，其阻值偏离平均值的程度明显比其它形状的电阻小。一般长度大于0.6mm的电阻，他们的偏离程度要小于长度小于

0.6mm 的电阻。特别明显的是，不管宽度和厚度，只要是长度为 0.1mm 的电阻，其偏差就非常大。在没有进一步优化情况下，这些长度可能不适合制作高精度电阻。同时还可以看出，我们印刷时应该将沉积层数做到 3 层或 3 层以上，以便把偏差控制在 5% 以下。我们也对栅格间距进行了研究，但是一直到间距达到 70 μm ，也没有发现明显的变化关系。从产品质量上来说，栅格间距的设置必须保证各条印刷线之间有 30% 的重叠，如果重叠程度不够，电阻表面就会在重叠区域发生下陷，导致偏差增大。图 9 显示了电阻宽度跟阻值之间的相互关系。电阻宽度跟阻值之间并不是线性关系，这是因为利用部分重叠的栅格线改变电阻宽度的同时，也使电阻厚度发生了变化。这些测试结果能够帮助我们更好的决定电阻的几何形状，制作出高精度的电阻。

3.3 温度的影响

除了电阻的几何形状外，电阻阻值还受油墨温度的影响。这是因为温度会影响油墨的粘度，而油墨粘度又会极大的影响 Collison 雾化器的雾化效果。由于油墨的蒸发冷却效应，导致在喷雾过程中喷雾器发生冷却，冷却效果由液体的流速决定。在生产过程中，油墨的流速和沉积速率都是固定不变的，因为温度波动的影响非常重要，我们对其进行了定量研究。图 10 显示了电阻阻值和油墨温度的变化关系。

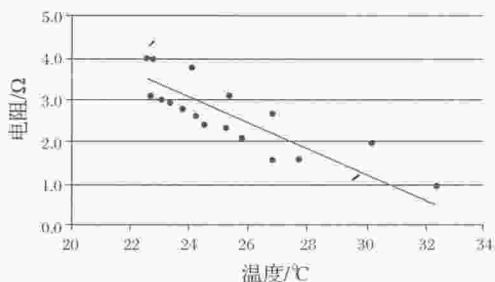


图 10 油墨温度 - 阻值曲线

由此可见，最终阻值和油墨温度之间是线性关系。曲线斜率显示，油墨温度每改变 1 $^{\circ}\text{C}$ ，阻值大约改变 10%，因此我们应该把油墨温度控制在 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 以内，以便使阻值的漂移小于 1%。目前 M³D 实验室采用水浴温控系统，使油墨温度能够稳定在上述水平。

3.4 校准程序

前面部分我们讨论了影响阻值变化的最重要的两个变量，它们是几何形状和油墨温度。为了制作高

精度电阻，我们需要对这些变量进行控制和调节。最直接的方法就是对系统进行优化，通过控制温度和流速，使沉积速率成为一个固定常数，然后通过改变电阻的宽度、长度、厚度来调整阻值。通过改变喷头路径，我们可以简单迅速的改变这些几何形状。

校准程序的第一步就是明确阻值和几何形状之间的对应关系。在这一步中，不同形状的电阻以阵列的方式印制到测试板上，并分别测定它们的阻值。把这些阻值和目标阻值比较，找出和目标阻值最接近的那个电阻的形状。在一个校准实验中，我们确定了 4 个目标阻值：0.7k Ω 、1.5k Ω 、1.2k Ω 和 1.7k Ω ，它们对应的电阻长度分别为 0.7mm、0.9mm、1.0mm 和 1.1mm。表 2 是一个电阻长度和宽度的阵列，其中哪种几何形状与目标阻值最匹配是一目了然的。如果目标阻值更多或范围更大，这个阵列也可以相应扩大。

表 2 不同宽度对应的不同阻值

	Length (mm)				
		0.7	0.9	1	1.1
# of Resistors (width)	3 (200 μm)	1.155	1.15	1.60	1.74
	4 (260 μm)	0.835	1.07	1.18	1.20
	5 (320 μm)	0.674	0.83	0.95	1.05
Target		0.7k Ω	1.5k Ω	1.2k Ω	1.7k Ω

校准程序的第二步就是参照目标阻值，对电阻厚度进行微调。因为整个过程中沉积速率是不变的常数，在沉积层数已经确定的情况下，厚度微调最有效的办法就是改变基板的移动速度，移动速度越慢，材料的沉积量就越多。电阻按照第一步中确定了最佳长度和宽度，以阵列的形式印刷到基板上，但是印制时所用的移动速度是不同的。图 11 显示了基板移动速度和阻值的关系。

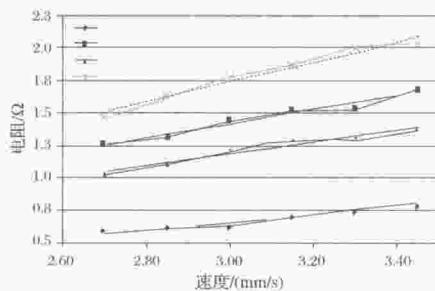


图 11 移动速度 - 阻值曲线

从图中看出，目标阻值被包括在曲线的范围之内。通过对曲线进行线性拟合，我们可以精确地计算出目标阻值所需要的移动速度。在本次实验中，0.7k Ω 阻值需要的移动速度是 3.152mm/s，同理 1.5 k Ω 、1.2k Ω 、1.7 k Ω 需要的移动速度为分别是 3.148mm/s、

3.037mm/s、2.950mm/s。校准程序到此结束，然后立即依照校准程序确定的工艺参数来制作电阻，就能够生产出符合目标阻值的电阻。

4 工艺稳定性评估

我们设计了两个实验来分别评估这种印制工艺短期和长期的稳定性^[5]。在第一个实验中，我们制作了2种目标阻值共324个电阻，目标阻值分别为1.8kΩ和3.2kΩ。实验中，首先进行上述的校准过程，然后进行2小时的电阻印刷。图12显示了测量出的324个电阻的阻值。

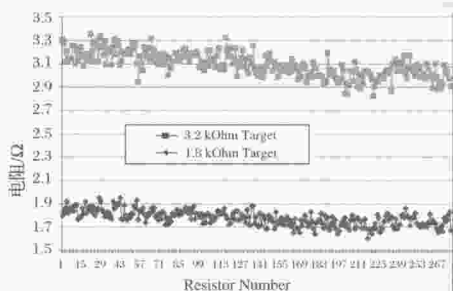


图12 电阻阻值的分布图

由图可见，测量到的阻值和目标阻值非常接近。同时，整个阻值有向下大约3%的漂移，我们认为这是由于喷射系统中残余的热量变化而引起的。

图13显示了这324个电阻阻值偏离目标阻值的情况。

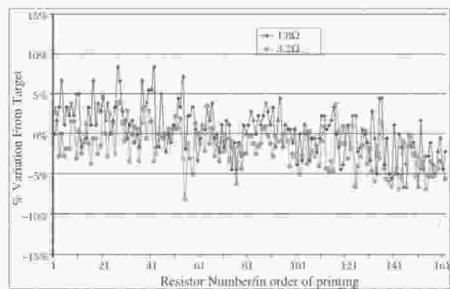


图13 实际阻值相对目标值的偏离

在图13中，我们也观察到了一个向下的轻微漂移。但是我们可以看到，91.6%的电阻阻值偏离都不超过5%，100%的电阻阻值偏离都不超过7%。由此可见该系统具有非常好的短期稳定性。

为了评估系统的长期稳定性，我们进行了第二次扩大实验，将目标阻值增加到4个，进行了为期2天的电阻印制。这次实验我们总共在40张板上制作了4个目标阻值共960个电阻，目标阻值分别为1.2kΩ、2.6kΩ、2.2kΩ和3.7kΩ。图14显示的是测量出的960个电阻阻值相对目标阻值的偏离。

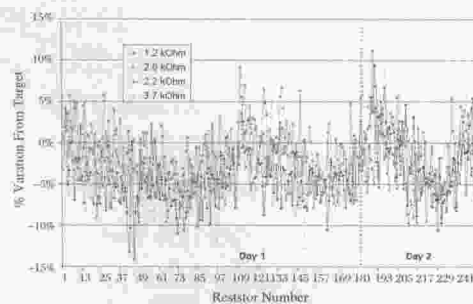


图14 扩大实验中实际阻值相对目标值的偏离

由图可见，除了少数异常情况之外，大部分阻值的偏离都在10%以内。出现异常情况的原因尚不清楚，估计应该与板面的清洁度有关，因为实验不是在净化室中进行的。同时发现，测量值呈一个循环起伏的状态，这跟油墨温度的起伏振荡有关。我们发现油墨温度大约有一个±0.3℃的起伏振荡，这就会导致电阻值产生一个大约±3%的起伏。除去这些因素影响，98%的电阻偏离都在10%以内，87%以上的电阻偏离都在7%以内。

为了把温度起伏的影响从系统本质变化中移除，我们制作了图15，它表示了测量阻值相对于移动平均值的偏离。用移动平均值的方法来计算阻值偏离时，是每块板单独计算的，计算的是每块板上的电阻阻值相对于该板上这类电阻平均值的偏离量。这里每块板上每种目标阻值的电阻各有6个。

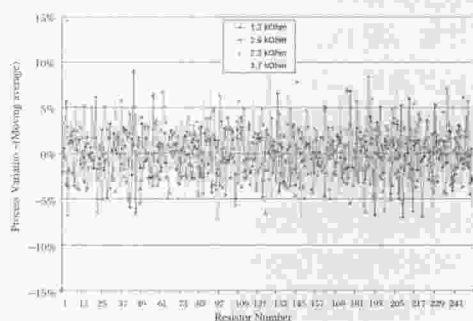


图15 去除温度影响后的阻值偏离

从图15可以看出，在去掉温度起伏的影响之后，测量值的循环起伏情况基本消失，并且可以清楚地看到此工艺的系统起伏是小于7%的。表3列出了各种不同长度的电阻（相当于不同目标阻值的电阻）在不同公差范围内的百分比。

表3 不同规格电阻的公差范围

Variation Limit	Resistor Length				TOTAL
	0.7	0.9	1	1.2	
10%	100%	100%	100%	100%	100%
5%	94%	91%	96%	94%	94%
3%	80%	70%	78%	68%	74%
2%	64%	51%	56%	52%	56%

(下转第44页)

处于绝对优势地位,采用单面溅射法/电镀法为市场提供了具有优异耐热性、尺寸稳定性的各种 2L FCCL^[3]。造利科技是溅镀法的另一面旗帜,率先打破了美日独占 2L FCCL 市场的格局。首先以远红外线 IR 进行基材高温加热,以等离子进行基材表面轰击处理,然后真空溅镀,配合卷带式 (Reel-to-Reel) 自动化生产作业,再加上以造利科技自行研发的特殊水平电镀设备将铜层增厚,目前推出的主要产品规格为 3 μm 、6 μm 、9 μm 铜箔厚度的单、双面挠性板基材,亦可依客户需求规格量身订作,以低成本、高品质、高产量的优势进入挠性板基材市场。

2 前景展望

目前挠性板业者皆以 Polyimide (PI) 或 Polyester (PET) 为绝缘基材,此类聚合物本身的耐热性、力学性能均佳,但对现行高频电路则因吸湿率过高而大打折扣,加上其技术门槛高、成本贵及供货商不多等限制,挠性板业者开始研发可以替代的 PI 或 PET 的材料,即液晶型聚合物 LCP (Liquid Crystal Polyester),如日商 Kuraray、住友化学、美商 Armco、德商 Ticona 为全球能生产 LCP 粉状树脂的

(上接第 37 页)

如果热漂移能够很好的得到控制,我们可以做到 100% 的电阻公差在 10% 以内,94% 的电阻公差在 5% 以内。大约 85% 的电阻相对于平均值的偏离在 $\pm 3.8\%$ 以内。

5 总结

这种新开发的 M³D 工艺能够用市场上常见的电阻材料印制出高精度的 PTF 电阻。此工艺能够在一步工艺步骤中印制出不同目标阻值的电阻,而且不需要掩膜以及事后的微调工艺。校准程序可以根据不同的目标阻值,设计出电阻最适合的几何形状。实验证明,在经过多天的印制之后,该系统仍然能够保持阻值公差在 10% 以内。预计如果能更好的控制油墨的温度,就可以把公差进一步减小到 7% 以内。

虽然这次工作只是评估了一种常见的油墨材料,但是用其它油墨材料完全可能得到更好的结果,这有待于更进一步的研究。油墨对于温度敏感这个特性是最不希望看到的。以后的改进主要集中在提高稳定性和精确度上,实现校准程序自动化能够增加系统稳定性,能够更加频繁地对工艺参数进行微调,以此来补偿系统的漂移。

厂商,以此来作为生产无胶层的软性基板^[4]。

松本博文^[5]认为 FPC 最尖端的技术体现在细线化和薄型化,细线化的目标是向半导体技术靠拢,在五年内达到最小 10 μm 节距(线宽/线距各 5 μm),基本上是采用加成法工艺。薄型化设想是薄纸型的 FPC,比现在 25 μm PI 更薄,并能适合高频性能要求,同时要开发无卤素与可循环使用的基体树脂、纳米复合材料等,相应地对 FPC 基材提出了更高的要求。

参考文献

- [1]中国电子学会生产技术学会专家编写.挠性印制电路板生产技术[M].香港盈拓科技咨询服务有限公司,2004
- [2]刘瑞鹏,李刘合.磁控溅射镀膜技术简述[J].中国青年科技,2006,(8):56~59
- [3]王金龙,李小兰.溅射法/电镀法生产无粘结剂型聚酰亚胺挠性覆铜板[J].覆铜板资讯,2003,(1):35~37
- [4]高野祥司.液晶ホリマを用いたフレキシブルプリント配線板[J].电子技术,2003,6
- [5]松本博文.FPCの最先端技術[J].エレクトロニクス実装学会志,2004,7(1)

作者简介

刘生鹏,硕士,工程师,从事 FCCL 研发工作。

实验结果表明,只要对温度控制进行适当的改进,就能够做到公差在 7% 以内。如果希望把公差进一步减小到 3% 以内,那就需要对一些已知变量的影响进行更多的研究,这些变量包括电阻表面粗糙度、电阻图案边缘清晰度、油墨的润湿性以及油墨的其它化学性质。

参考文献

- [1]Pique, Alberto, Douglas B. Chrisey. Direct-Write Technologies for Rapid Prototyping Applications, Academic Press (2002) pp. 475-492
- [2]Vanheusden, K., et al. Direct Printing of Interconnect Materials for Organic Electronic, Advancing Microelectronics 29, No. 1 (2002).
- [3]May, K.R., The Collison Nebulizer: Description, Performance and Application. Aerosol Science, Vol 4, pp235-243
- [4]Wang, G., Barlow, F., Elshabini, A., Modeling and Control of Resistance Tolerance for Embedded Resistors in LTCC, Electronic Components and Technology Conference (2002) pp. 516-525
- [5]Jason A. Paulsen, Michael J. Renn. Maskless Printing of Miniature Polymer Thick Film Resistors for Embedded Applications. IPC 3rd Int'l Symposium on Embedded Technologies, 2006.5

作者简介

何为,教授,从事应用电化学和 PCB 领域的研究工作。