

镀通孔制造过程中的失效机理与物理模型

陈 颖¹, 谢劲松¹, 孔令文²

(1. 北京航空航天大学可靠性工程研究所, 北京 100083; 2. 深圳深南电路有限公司技术中心, 广东 深圳 518053)

摘要: 镀通孔的可靠性与制造过程工艺参数有非常密切的关系。从钻孔、化学镀铜、电镀三个主要工艺入手, 对目前制造过程镀通孔失效的机理与物理模型的研究现状进行总结。重点介绍了钻孔中分层、化学镀铜中的气泡缺陷、电镀中的镀层不均匀等缺陷产生的机理。并提出了需进一步研究的主要问题。

关键词: 电子技术; 镀通孔; 综述; 失效机理; 分层; 空洞; 不均匀性

中图分类号: TN306 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-2028 (2007) 06-0004-04

Failure mechanism and physics model of plated through hole in manufacture process

CHEN Ying¹, XIE Jin-song¹, KONG Ling-wen²

(1. Institute of Reliability Engineering, Beijing Univ. of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China; 2. Technology Center, Shenzhen Shennan Circuits Corporation, Shenzhen 518053, China)

Abstract: Reliability of plated through hole (PTH) has close relationship with technology parameters during manufacture process. Current research of failure mechanism and physics model of PTH in manufacture process including drilling, electroless plating and electroplate were reviewed. Mechanisms of delamination, void defects in electroless plating and nonuniformity in electroplate were introduced. Problems that need to be studied further are given out.

Key words: electron technology; plated through hole; review; failure mechanism; delamination; void; nonuniformity

镀通孔(Plated Through Hole, PTH)是为多层印刷电路板(PWB)各层提供电导通的结构, 其可靠性直接影响多层印刷电路板的可靠性。对考虑材料参数、形状参数以及环境的 PTH 失效物理模型已有大量的研究, 研究结果已经成为工业标准和应用的主要依据。B. Mirman^[1]总结了已有的 PTH 可靠性评估模型研究成果, W. Engelmaier^[2]在假定 PTH 的主要失效模式是由镀层中轴向应力/应变引起的疲劳断裂的基础上, 提出了应力-应变计算的简化模型。Xie 等^[3]建立了镀通孔的可靠性评估模型, 该模型研究了尺寸、环境等对通孔断裂的影响。以上模型都是在不考虑制造过程缺陷对可靠性影响的基础上建立的。事实上, PTH 的失效与制造工艺参数直接相关。Iannuzzelli^[4]分析了影响镀通孔寿命的因素, 发现钻孔的不均匀以及镀层的不均匀是影响通孔寿命的重要因素。Munikoti^[5]等的研究也都分析了制造过程的影响。

PTH 制造工艺中对其质量影响最大的为钻孔、化学镀铜、电镀铜。PTH 制造缺陷主要有金属化孔内镀铜层空洞、粗糙、孔内镀层不均匀等。这些缺陷使得 PTH 极易在外界环境的变化下失效。产生缺陷的原因可以追溯到生产过程的各个环节中, 因此研究流程中各工艺步骤的参数, 消除工艺缺陷, 对提高 PTH 可靠性有重要的意义。

笔者主要针对钻孔、化学镀铜、电镀三个主要工序中失效机理和物理模型的研究进展做总结, 明确已取得的进展和有待进一步解决的问题, 为建立考虑制造因素的 PTH 失效物理模型做准备。

1 钻孔过程

钻孔工艺参数不合理会造成分层、孔壁环氧钻污、毛刺、钉头、孔穴等缺陷, 这些缺陷又成为化学镀铜或电镀工序中产生空洞或镀层不平整等缺陷的根源。

收稿日期: 2007-03-14 通讯作者: 陈颖

基金项目: 国防科工委基础研究资助项目

作者简介: 陈颖(1977-), 女, 河北丰润人, 博士后, 主要从事电子元器件失效物理, 电子产品失效分析技术研究。Tel: (010)82338505-602; E-mail: chenying@faprl.buaa.edu.cn。

1.1 钻孔过程缺陷形成的原因与机理

分层是指基材层间的分离、基材与铜箔之间的分离或线路板中所有的平面之间的分离现象，是钻孔过程最严重缺陷之一。复合材料钻削分层机理分为 Peel-up 与 Push-out^[6]两种。Peel-up 为入钻分层机理。在入钻时，复合材料在完全被钻下来前首先卷曲，产生向上的轴向剥离力，钻头下未切割部分产生挤压力，因此使得上下层分开。入钻分层现象随着钻孔的进行会逐渐消失，因此 Push-out 出钻分层就显得更重要。如前述，钻头会对其下部分产生挤压力，当未钻材料厚度较小时，挤压力超过复合材料的层间粘合力，分层现象就会产生。

钻污是由于钻孔过程中，钻头与板材快速摩擦产生高温高热，温度超过基材中树脂的玻璃化温度，软化了的树脂被钻头牵动，粘在被切削孔壁上而形成的。毛刺产生在孔的上下表面，形状为不规则的突起环^[7]。钉头是在钻孔中多层板的孔壁内层线路张开而形成的，又称为孔内毛刺。孔穴是由于钻孔中纤维束被拉裂而造成的凹坑。

1.2 钻孔过程失效研究现状

对于复合材料分层，目前有很多文献进行了研究。Cheng 等^[6]基于线弹性断裂力学和经典板屈曲理论，得到钻头出钻时裂纹开始传播临界力。实验结果表明 Push-out 分层理论模型与实验结果非常接近，但没有数据证明入口分层 Peel-up 模型是否准确。Jain 等^[8]将预测不产生分层的临界钻孔力并得到临界进给速率：

$$f = \left\{ \frac{d^{1.2}}{1.91} \left[\frac{3\pi}{d^2 H_B} \left(4 \sqrt{\frac{D_{22}}{D_{11}}} \right) \sqrt{2G_{IC} D_c} - \frac{0.101}{d} \right] \right\}^{2.5} \quad (1)$$

式中： D_{11} 、 D_{12} 、 D_c 为材料参数； d 为钻头的直径； H_B 为 Brinell 硬化数。逐步减小进给速率的方法，即钻削开始尽可能增加钻孔速度，当钻头接近出口时，逐步减小进给速率，可以减轻分层现象。同时优化钻头尺寸形状也能减轻分层现象^[8]。

Srinivasan 等^[7]用实验的方法对常见的钻孔缺陷影响因素进行了分析。研究表明钻污随着切削载荷(进给速度与主轴速度之比)或者进给量的增加而减少，毛刺或者钉头缺陷随着进给速度的降低而减少，孔穴随着钻孔速度提高或者采用纤维束较细的基材而减少。表明缺陷对钻削参数的依赖规律是不相同的，因此要得到最优的钻削参数，必须确定主要想避免的缺陷类型^[7]。Eiichi 等^[9]研究了孔周围的损伤的相关因素，包括钻孔方向、基板纤维方向以及纤维束厚度。他认为减小基板纤维束厚度可以有效减少孔周围的内部损伤。

由于钻孔技术的改进，激光钻孔已经越来越普遍地应用于印刷电路板的制造中。目前关于激光钻孔中

最大去除速度与钻污产生的关系以及钻孔时候的温度、热应力传递的研究也越来越广泛。但对钻孔中的各种缺陷的影响因素还没有确切模型描述。

2 化学镀铜

化学镀铜是孔金属化过程的第一步，它的质量优劣直接影响电镀的质量。

2.1 化学镀铜缺陷形成的原因

化学镀铜过程中产生的缺陷主要是镀层质量问题，如空洞等未镀铜区域。未镀铜区域主要是由于气泡和固体夹杂物造成的。气泡逐渐由小变大，在向上移动过程中要受到摩擦力和表面张力的作用，包括液体施加给运动气泡的拉力，以及孔壁聚合物或玻璃纤维材料的摩擦力，因而容易滞留在孔壁上。气泡逐渐增大，形成固体、液体、气体界面，增加了消除的难度，当气泡覆盖了整个圆周，就会阻碍镀液的流过。因此气泡引起的未镀铜缺陷常常位于朝向液面的孔中央^[10]，且对面孔壁有同样宽度范围内无铜。

2.2 化学镀铜失效研究现状

Sam 等^[10]研究了影响气泡形成和截留的因素，表面湿度和粗糙度。而这两种因素都与去钻污工序相关。因为去钻污会使孔壁变湿，且影响孔壁粗糙度。另外一个影响气泡滞留的因素是孔径。直径小的孔更难消除，因为小气泡的接触面积相对更大。在化学镀铜过程中采用机械振动，能够促进气泡瓦解，调整去钻污的过程参数，使得孔更光滑，也会不利于气泡的附着^[10]。

添加剂能够加快化学镀铜速度，降低成本，并增加镀层抵抗破裂的能力^[11]。Paunovic 等^[12]认为添加剂影响化学镀铜中结晶过程的动力学与机理、镀液的钝化过程、镀层的结构与形态以及金属沉积物的物理性质、沉积物的纯度(夹杂物的种类和水平)。pH 值对化学镀铜速率的影响是：首先随着 pH 的增加，镀铜速率增加，到达某个最大值后，pH 再增加，镀铜速率就会降低^[13]。温度对化学镀铜速率的影响也是先使速率增加，到达某一值后减少，不同的添加剂此峰值温度有差异^[13]。适当升高温度能提高镀层的性能^[14]。Donahue^[15]给出了镀铜速率的估算公式：

$$r_p = 2.81 \frac{[\text{Cu}^{2+}]^{0.43} [\text{HCHO}]^{0.16}}{[\text{OH}^-]^{0.70} [\text{EDTA}]^{0.04}} e^{\frac{T-313}{T} \times 11.5} \quad (2)$$

式中：HCHO 为甲醛；EDTA 为乙二胺四乙酸，是一种添加剂。中括号代表该种物质的浓度。Masao 等^[14]研究了动力与镀层性能之间的关系，以及不同碱金属氢氧化物对镀层的影响，在 KOH、NaOH 和 LiOH 中，LiOH 使得镀层性能得到更多的改善。

对于化学镀铜部分的研究,未镀铜缺陷的各种影响因素目前还没有形成物理模型,因而对这种缺陷引起的失效无法进行定量的评估。

3 电镀

通孔电镀有三个主要的特征参数,第一为通孔内镀层的厚度分布,第二为镀铜的冶金结构,第三为镀铜速度。目前研究主要集中在镀层的均匀性与镀铜速度,但两者往往是相互矛盾的^[15]。

3.1 电镀缺陷形成的原因

PTH 在电镀过程中的主要缺陷为镀层厚度不均匀。造成这种缺陷的原因是镀液在孔内流动不充分,电流密度分布不均匀。镀层通常在孔的入口较厚,而在中心较薄,该现象称为“dogboning”(狗骨头)。这种现象会使 PTH 承载电路能力减弱,增加镀层破裂的可能性^[16]。能够影响电流密度分布的因素有:电极的形状和类型、搅拌方式(空气、机械)、添加剂的种类与比例、温度等。

3.2 电镀过程缺陷研究现状

3.2.1 镀层分布的不均匀

Sullivan 等^[17]建立了 PTH 电镀过程中质量转移对镀铜速率影响的数学模型,并通过控制孔内液体的流动,来改善镀层的均匀性。该模型假设通孔内的液体是静止的。Porat 等^[18]分析了电镀时影响电流分布的不同因素,表明高径比越大,金属与电解液的欧姆阻力越大,电流密度分布越不均匀。增加电解液导电性、孔内电解液流动性以及金属离子的浓度和扩散系数(可以通过升高温度获得)有助于使电流密度分布更加均匀。Middleman 等^[19]建立了电镀中镀层均匀性与流动之间关系的数学模型,通过控制流量在镀铜过程中获得均匀的镀层。该数学模型假设通孔内的液体为轴向稳态流动。得到镀铜速率表达式为:

$$\frac{R}{\langle R \rangle} = \frac{2}{3} (z/L)^{-1/3} \quad (3)$$

式中: z 为通孔轴向坐标; $\langle R \rangle$ 为平均镀铜速率; L 为通孔长度。公式(3)说明通孔在电镀过程中是不均匀的,且与轴向位置有关,而与高径比无关。稳态单向流动时,通过增加流动速率无法获得均匀的镀层。如果使得镀铜液体流动方向进行周期改变,则能够改善镀层的均匀性。Anthony 等^[20]认为在质量转移控制的情况下,流动方向周期变化可以促使电解液流动,改善电流的分布。但当电流密度低于质量转移极限的条件下,这种方法效果不明显。Lanzi 等^[21]分析了液体流动,质量转移和欧姆限制对镀通孔的影响。认为欧

姆阻力是通孔电镀的制约因素。要得到均匀的镀层,就需要控制欧姆阻力,增加孔中心电流密度。方法是提高电解液导电性、加入合适的添加剂以及改变通孔尺寸。Yung 等^[16]研究表明改善孔内的镀层分布可以通过增加镀池的温度和导电性或减小孔的尺寸(半径与长度)实现。Hazlebeck 等^[22]建立了镀层均匀性与平均镀铜速率的关系。表明当欧姆控制时,镀铜的均匀性可以通过增加镀液传导率来实现,高径比影响镀铜均匀性。

3.2.2 添加剂对电镀的影响

添加剂能够改善镀层的冶金性质,使电镀过程稳定、平衡,并能减小钻孔时孔壁的粗糙度。添加剂改变电流密度是由于电流对镀铜动力非常敏感,而添加剂能够改变动力^[21]。因此对添加剂影响的研究一般是从电镀动力学的角度入手。添加剂类型主要有三种:载运剂、整平剂和光亮剂。载运剂是高分子的聚醇类化合物,可抑制电镀速率,让铜能均匀的持续沉积。整平剂通常是含氮有机物,主要功能是吸附在高电流密度区,使该处的电镀速度趋缓但不影响低电流密度区的电镀,借此来整平表面。光亮剂是含硫有机物,在电镀中主要作用是帮助铜离子加速在阴极还原,同时形成新的镀铜晶核,使铜层结构变得更细致。

Yung 等^[16]认为当镀铜速率较低时添加剂能够改善均匀性。如果电荷传递动力和欧姆阻力共同控制镀铜过程,添加剂也能够改善均匀性,但是随着镀铜速度的增加,其效力会减弱。如果是欧姆阻力控制,添加剂不再起到改善均匀性的作用。Hazlebeck 等^[23]建立模型研究添加剂对镀通孔的影响。认为添加剂能够在镀铜速度较高的情况下,得到较均匀的镀层。Wern 等^[24]指出没有添加剂时,运动阻力远小于欧姆和质量转移阻力。并得到添加剂的表面浓度,证明添加剂能改善电流密度的均匀性,但会降低镀铜的效率。

3.2.3 搅拌对电镀的影响

搅拌能增加镀液的流动性,是提高镀铜速率以及镀层均匀性、延展性的重要因素。搅拌方式主要包括气体喷射,板的机械运动^[25],以及强迫流动^[19]等方法。R.Haak 等^[25]用实验的方法研究了电镀过程中使用搅拌时质量转移的速度与镀层的均匀性。Galasco 等^[25]建立液体动力学模型,研究板往复运动对孔内液体移动的影响。模型假设孔内的液体为层流。研究结果表明镀液动态黏性以及孔的高径比是板运动参数的决定因素。板的单方向最小运动位移可以表示为:

$$nX_p = \left[\frac{C_2 \eta^3}{D_1^2 C_c^3} \left(\frac{L}{D} \right) \right]^{1/2} \quad (4)$$

式中： J 为平均电流密度； D_1 为扩散因子； C_c 为铜的体积浓度； L 为孔长度； D 为孔直径； C_2 为常数； n 为板周期运动速率； η 为镀液的动态黏度。

电镀方面的研究中，对于高径比是否对镀层均匀性有影响尚无一致的结论，此外添加剂的作用机理、添加剂与镀层分布之间的定量关系尚不够明确。

4 结论

总结了钻孔、化学镀铜、电镀三个工艺流程中镀通孔失效机理及其物理模型以及制造过程缺陷对 PTH 失效的影响。明确了这三种工艺过程中有待进一步研究的主要问题，它们包括：钻孔缺陷的定量描述、化学镀铜中镀铜速度与影响参数的关系，电镀中与镀层均匀性相关的参数的关系，以及添加剂的作用与镀层分布的关系等。

参考文献：

- [1] Mirman B A. Mathematical model of a plated-through hole under a load induced by thermal mismatch [J]. IEEE Trans Compon Hybrids Manuf Technol, 1988, 11(4): 506 - 511.
- [2] Engemaier W. Plated through hole failures in thermal cycling: Analytical consideration [R]. Unpublished work, AT&T Bell Labs, Whippany, NJ, 1988.
- [3] Xie J, Kang R, Zhang Y, *et al*. A PTH reliability model considering barrel stress distributions and multiple PTHs in a PWB [A]. Proceedings of the 44th Annual International Reliability Physics Symposium [C]. San Jose, CA, USA: 2006: 256 - 265.
- [4] Iannuzzelli R. Predicting Plated-through-hole Reliability in High Temperature Manufacturing Processes [C]. Electronic Components and Technology Conference, 1991. 410 - 421.
- [5] Munikoti R, Dhar P. A new power cycling technique for accelerated reliability evaluation of plated-through-holes and interconnects in PCBs [A]. Electronic Components and Technology Conference [C]. 1990. 426 - 435.
- [6] Ho-Cheng H, Dharan C K. Delamination during drilling in composite laminates [J]. Trans ASME, J Eng Ind, 1990, 112: 236 - 239.
- [7] Srinivasan M N, Hough C L, Bolton R W, *et al*. Evaluation of drilled hole quality in printed circuit board [J]. Trans ASME J Eng Ind, 1995, 117(5): 248 - 252.
- [8] Jain S, Yang D C H. Effects of feedrate and chisel edge on delamination in composites drilling [J]. J Eng Ind, 1993, 115: 398 - 405.
- [9] Eiichi A, Giromich N, Toshiki H. Drilled hole damage of small diameter drilling in printed wiring board [J]. J Mater Process Technol, 2000, 118: 436 - 441.
- [10] Sam Siau, Johan De Baets, Andre Van Calster, *et al*. Processing quality results for electroless/electroplating of high-aspect ratio plated through holes in industrially produced printed circuit boards [J]. Microelectron Reliab, 2005, 45: 675-687.
- [11] Thomas Sleboda. A study of plated through-hole reliability of Formaldehyde based electroless copper depositions [A]. IEEE/CPMT Int'l Electronics Manufacturing Technology Symposium [C]. 1996. 182 - 189.
- [12] Milan Paunovic, Russ Arndt. The effect of some additives on electroless copper deposition [J]. J Electrochem Soc, 1983, 130(4): 794 - 799.
- [13] Farid Hanna, Z Abdel Hamid, A Abdel Aal. Controlling factors affecting the stability and rate of electroless copper plating [J]. Mater Lett, 2003, 58: 104 - 109.
- [14] Masao Matsuoka, Junichi Murai, Chiaki Lwakura. Kinetics of electroless copper plating and mechanical properties of deposits [J]. J Electrochem Soc, 1992, 139(9): 2466 - 2470.
- [15] Francis M Donahue. Kinetics of electroless copper plating IV kinetics of electroless copper plating [J]. J Electrochem Soc, 1980, 127(11): 2340 - 2342.
- [16] Edward K Yung, Lubomyr T Romankiw. Fundamental study of acid copper through-hole electroplating process [J]. J Electrochem Soc, 1989, 136(2): 756 - 767.
- [17] Sullivan Timothy, Middleman Stanley. Factors that affect uniformity of plating of through-holes in printed circuit boards I stagnant fluid in the through-holes [J]. J Electrochem Soc, 1985, 132(5): 1050 - 1054.
- [18] Mordechai Ben-Porat, Joseph Yahalom, Eliezer Rubin. Current distribution during electroplating within a tubular electrode of high ohmic resistance [J]. J Electrochem Soc, 1983, 130(3): 559 - 560.
- [19] Middleman S. Factors that affect uniformity of plating of through-holes in printed circuit boards. II. periodic flow reversal through the holes [J]. J Electrochem Soc, 1986, 133(3): 492 - 496.
- [20] Anthony M Pescio, Huk Y Cheh. The current distribution within plated through-holes. I. The effect of electrolyte flow restriction during DC electrolysis [J]. J Electrochem Soc, 1989, 136(2): 399 - 407.
- [21] Oscar Lanzi, Uziel Landou. Effect of local kinetic variations on through-hole plating [J]. J Electrochem Soc, 1989, 136(2): 368 - 374.
- [22] David A Gazlebeck, Jan B Talbot. Modeling of the electroplating of a through-hole considering additive effects and convection [J]. J Electrochem Soc, 1991, 138(7): 1985 - 1997.
- [23] David A Gazlebeck, Jan B Talbot. Modeling of additive effects on the electroplating of a through-hole [J]. AIChE J, 1990, 36(8): 1145 - 1155.
- [24] Ja-Wern E Chern, Huk Y Cheh. Modeling of plated through-hole processes, II. Effect of leveling agents on current distribution [J]. J Electrochem Soc, 1996, 143(10): 3144 - 3147.
- [25] Galasco R T, David A P, Shaffer R R. Panel movement effects on solution flow in through-holes of printed circuit panels [J]. AIChE J, 1987, 33(6): 916 - 925.

(编辑：尚木)

风华推出“半导体薄膜技术改造厚膜基础电子元器件应用技术”

2006 年，广东风华公司推出“半导体薄膜技术改造厚膜基础电子元器件应用技术”项目。

“半导体薄膜技术改造厚膜基础电子元器件应用技术”项目主要是利用半导体薄膜技术——真空溅射方法，在薄膜电阻制程中应用电阻掺杂技术和热处理技术，有效地将产品 TCR 精度提高。高精度激光调阻，可以准确的测量产品阻值并进行激光切割，使得产品阻值精度达到 0.1 % 的水平。经过近一年的努力，公司取得了初步成效。目前片式电阻器样品已研制成功，且申报了实用新型专利，并获受理；完成了片式电阻器制作工艺可行性论证。该项目具有比厚膜技术更多的优势，在使用新工艺在降低膜层厚度的同时，以贱

金属取代贵金属，大幅降低生产成本。采用掩膜溅射贱金属工艺减少多次高温烧结过程，降低能源消耗的同时减少高温烧结产生的废气。

同时，公司对薄膜片式多层陶瓷电容器、薄膜片式电阻器、薄膜片式多层电感器等用介质靶材、内电极靶材、外电极靶材、电阻靶材进行研究并产业化。并与具有自主知识产权的磁控溅射镀膜装备配合，利用半导体薄膜技术制备高档次、高附加值薄膜片式多层陶瓷电容器、薄膜片式电阻器、薄膜片式多层电感器，突破其小型化、高精度、大容量、大感量的关键靶材材料及介质层和内电极溅射技术，产品跃进世界先进产品行列，实现产品的高效益。

(摘自《风华正茂》)