

MCM-C 基板上的多层互连及厚膜电阻的可靠性研究

郭春生, 李志国

(北京工业大学电子信息与控制工程学院, 北京 100022)

摘 要: 重点研究了 MCM-C 基板中多层互连和厚膜电阻的可靠性. 试验采用温度应力和电应力的双应力加速寿命试验. 试验发现, 温度小于 180℃ 时互连失效在 MCM-C 基板失效中占主要地位, 膜电阻失效相对互连失效可忽略不计. 在温度高于 180℃ 时膜电阻失效将起较大作用, 即膜电阻比互连温度加速系数要大. 重点计算了膜电阻和互连寿命分布及加速系数.

关键词: 多芯片组件; 互连; 厚膜电阻; 加速寿命试验

中图分类号: TM215.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2005)08-1519-04

Study on Reliability of Multi-Layer Interconnection and Thick-Film Resistors in MCM-C Substrates

GUO Chunsheng, LI Zhiguo

(College of Electronic Information and Control Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

Abstract: The paper mainly studies the reliability of multi-layer interconnections, vias and thick-film resistors in Multi-chip Module Ceramic (MCM-C) substrates. Temperature stress and voltage stress are used to accelerate the life test. The results show that when the temperature is under 180℃, the failure of metal lines plays a much more important role than the failure of film resistors; but when it's over 180℃, the failure of film resistors will also be important. The paper also calculated the lifetime and accelerating coefficient of metal lines and thick film resistors.

Key words: MCM; interconnection; thick film resistors; accelerated life test

1 引言

多芯片组件 (Multi-chip Module: MCM) 技术是八十年代为适应军事电子装备小型化、高性能、高可靠性的要求而出现的一种汇集了半导体集成电路的微细加工技术、混合薄膜集成电路技术、微型元器件 (片式化、微型化) 技术、陶瓷 (厚膜) 薄膜与印制电路板多层基板技术的电路集成新技术, 是典型的高技术与多技术产品, 受到世界各国的高度重视^[1]. MCM 技术经过多年发展, 在国外, 已基本从技术研究阶段开始走向成熟阶段. 其研究重点放在两个方面: (1) 是 MCM 的应用和 MCM 的成本降低及其相关问题; (2) 是 MCM 的可靠性研究^[2~5]. 美国的有关部门就性能、可靠性和生产性几方面对 MCM 技术进行交叉评价, 即 RELTECH 计划. RELTECH 计划实践表明, 要保持经济有效和可靠的电子系统, 关键是要了解并减少和消除元器件、多层基板和芯片的失效. 宇航、军事是 MCM 领先应用的领域, 也是对 MCM 需求最为迫切的领域之一, 其某些使用条件非常恶劣, 可能超出正常使用温度范围. 所以研究 MCM 的高温特性和高温下的退化特性, 对合理地拓宽器件温度应用范围有重要意义. 国内对 MCM 可

靠性的研究尚处于起步阶段, 在各领域的研究还未有详细的研究方法和数据资料.

本研究是针对国内常用的工艺的膜电阻和互连部分来开展的. 试验重点研究陶瓷厚膜型多芯片组件 (Multi-chip Module Ceramic: MCM-C) 基板的可靠性, 包括厚膜电阻、基板布线、以及互连通孔的可靠性. 试验采用加温度应力与电应力的双应力加速寿命试验.

2 理论

采用双恒定应力试验, 在对每个应力下的数据统计处理并得出相应的特征寿命后, 用分布的拟合优度检验来证明其寿命符合何种分布, 然后用最好线性无偏估计法计算其寿命分布的参数. 对温度应力和电应力的加速系数分别由阿列尼斯方程及逆幂律计算得到.

(1) 阿列尼斯方程: 恒定应力加速寿命试验的特点是试验过程中应力保持不变, 其试验因素单一, 数据容易处理, 外推的准确性高, 是最常用的方法之一. 以温度为应力作恒定应力加速寿命试验时, 经常采用阿列尼斯方程作为寿命与温度关系的模型. 阿列尼斯方程是表示化学反应速率与温度关

系的一个经验公式:

$$\frac{dM}{dt} = A e^{-\frac{E}{kT}} \quad (1)$$

式中 M : 化学反应量; A : 比例常数; k : 玻尔兹曼常数(0.8617×10^{-4} 电子伏/度); E : 激活能; T : 绝对温度; t : 时间.

将元器件的失效看作是由某种反应量的原始值 M_0 累积到一定程度 M 所引起的, 那么寿命就是反应量累积到 M 所需的时间 t , 对阿列尼斯方程两边积分可以得到:

$$t = \frac{M - M_0}{A} e^{\frac{E}{kT}} \quad (2)$$

$$\text{两边取对数: } \ln t = a + b \frac{1}{T} \quad (3)$$

$$\text{其中: } a = \ln \frac{M - M_0}{A} \quad (4)$$

$$b = \frac{E}{K} \quad (5)$$

从式(3)中可以看出, 寿命的对数与绝对温度的倒数之间满足直线方程, 因此通过施加几组温度应力得到元器件在这几个温度点上的寿命后, 就可以确定 a 、 b 值, 并利用这一关系外推出正常温度下的元器件寿命和表征元器件失效机理的激活能 E .

若试验中采取不同的温度应力 T_1 、 T_2 , 其他条件不变, 要产生相同的退化量, 所需时间分别为 t_1 、 t_2 , 其比即为温度加速因子 τ :

$$\tau = \frac{t_1}{t_2} = e^{K \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)} \quad (6)$$

(2) 逆幂律: 当外加应力为非热应力时, 如电应力, 常采用逆幂律作为寿命与电应力关系的模型, 即:

$$t = \frac{1}{KV^\alpha} \quad (7)$$

式中, V 为施加的电应力; K 、 α 为常数, 其中 α 为材料结构常数, 只与元器件的类型有关, 而与其规格无关. 对于符合上述关系的元器件, 则其寿命的对数与所施加的电应力的对数之间满足直线方程:

$$\ln t = -\ln K - \alpha \ln V \quad (8)$$

设: $A = -\ln K$, $B = -\alpha$, 则有:

$$\ln t = A + B \ln V \quad (9)$$

因此, 通过几个不同电应力点的试验得到元器件的不同寿命后, 就可以估计出上式的几个常数, 并利用这一关系式外推出正常负荷下的元器件寿命.

依据工程惯例, 用 θ_p 表示加速应力下的寿命, θ_r 表示额定应力下的寿命, 则电应力的加速因子为:

$$\tau = \frac{\theta_p}{\theta_r} = \left(\frac{V_r}{V_p} \right)^\alpha \quad (10)$$

3 试验

依据国内 MCM 的实际生产研制水平, 在国内已具有 MCM-C 成熟生产线的某研究所定制了 54 片(A 类样品) MCM-C 用的 LTCC 多层陶瓷电路基板, 其中 5 层、10 层、15 层的样品各 18 片. 样品大小均为 $50\text{mm} \times 50\text{mm}$, 样品采用 44 脚双列直插标准管座, 样品表面分别制作了 2 个 10Ω 、17 个 $10\text{k}\Omega$ 、2

个 $100\text{k}\Omega$ 共 21 个厚膜电阻, 以体现实际使用中表面厚膜电阻的阻值分布规律. 基板示意图及实物照片如图 1. 每个样品有 11 条金属化布线, 每层布线由通孔相连, 每条线含通孔数和样品层对应关系见表 1, 11 条金属化布线取三种不同的线宽, 分别为 $450\mu\text{m}$ 、 $350\mu\text{m}$ 和 $250\mu\text{m}$, 其中 $350\mu\text{m}$ 和 $250\mu\text{m}$ 宽的线各 4 条, $450\mu\text{m}$ 宽的线 3 条. 每条线的两端分别引出到相应的管腿, 每条线不与其他线出现交错与互连等现象, 基板与管座之间采用 $25\mu\text{m}$ 双金丝键合.

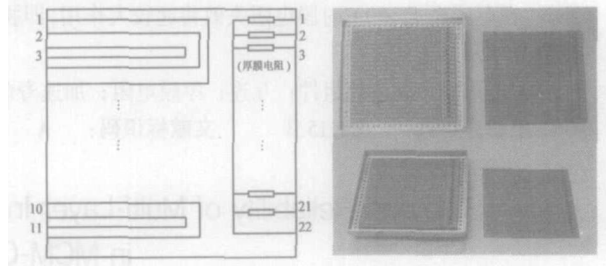


图 1 样品膜电阻及金属布线示意图及实物照片

表 1 样品层数与通孔数量的对应关系

样品层数	5 层	10 层	15 层
每线含通孔数	50 个	100 个	150 个

试验做三个不同的温度点及两个电压点, 采取的温度点分别为 200°C 、 230°C 和 264°C , 每个温度点试验样品总数为 6 块, 其中 5 层、10 层及 15 层的样品各两块. 两个不同的电压应力点为 $16/60\text{V}$ 及 $12/45\text{V}$ ($V1/V2$), 膜电阻上电压分别为 45V 和 60V , 导带上电压分别为 12V 和 16V ^[9].

4 试验结果及分析

将 3 种不同层数的样品进行分别在三个温度点加两个不同的电应力试验. 下面先对膜电阻寿命进行分析, 膜电阻失效判据是 $\frac{|\Delta R|}{R_0} > 15\%$.

表 2 B_{12} 膜电阻寿

命数据表

k	t	k	t
1	100.05	10	316.73
2	132.15	11	332.78
3	164.25	12	348.83
4	196.35	13	364.88
5	228.45	14	380.93
6	252.53	15	396.98
7	268.58	16	445.25
8	284.63	17	525.75
9	300.68		

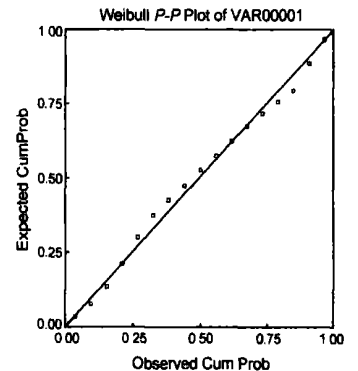


图 2 B_{12} 膜电阻寿命对 Weibull 分布的符合情况

以十层样品 B_{12} 的失效时间为例, 用 SPSS 作图(如图 2), 可以估计出寿命符合威布尔分布, 然后对数据进行分布拟和检验, 证明膜电阻寿命确实符合威布尔分布^[7]. 用最好线性无偏估计计算威布尔分布的形状参数 m 值和尺度参数 η ^[8]. 从而计算出表 3.

表3 试验所得 m 值与中位寿命 $t(0.5)$

	A_{11}	A_{12}	A_{13}	A_{21}	A_{22}	A_{23}
应力	45V,	45V,	45V,	60V,	60V,	60V,
条件	200℃	230℃	264℃	200℃	230℃	264℃
m	1.914	2.221	2.36	1.959	2.258	1.97
$t(0.5)$	844.7	341.9	132.1	148	61.75	24.25

属于同一批次的元器件在不同应力水平下作寿命试验,如果失效机理相同,则 m 值应是相等的,但由于试验误差和抽样具有一定的分散性,实际上 m 值并不完全相等,因此取各应力水平下 m 值的加权平均值 \bar{m} 作为共同的 m 值,从而得到五层样品 m 值为: $\bar{m} = 2.114$. 由最小二乘原理确定式(3)系数 $a = -9.2497, b = 7249.294$. 再由式(5)求得激活能 $E = 0.6247$. 从而推算出五层样品膜电阻在 45V, 80℃时的寿命 $t = 1.5 \times 10^5$ h.

从而可得五层样品加速系数 τ_{200-80} 为 181.9, 表明五层样品膜电阻在 200℃下的中位寿命是 80℃的中位寿命的 181.9 倍.

由式(7)、(10)来确定逆幂律加速方程中的系数. 本试验中,膜电阻高电应力为 60V(6mA 电流),低电应力为 45V(4.5mA 电流),因此由最小二乘法得到电压变化四分之一,电应力加速系数 $\tau = 5.56, \alpha = 5.97$. 同样计算出十层、十五层样品参数如表 4.

表4 各样品膜电阻参数

	五层	十层	十五层
激活能 E	0.6247	1.131	1.0653
外推 45V, 100℃寿命	5.1×10^4 h	1.8×10^5 h	6.1×10^5 h
外推 45V, 80℃寿命	1.5×10^5 h	7.1×10^6 h	3.3×10^8 h
温度加速系数 τ_{200-80}	181.9	743.8	1106.8
电应力加速系数 $\tau_{4.5-33.75}$	5.56	6.04	6.21

互连失效判据是 $\frac{\Delta R}{R_0} > 3\%$, 同样可得互连参数见表 5.

表5 各样品互连参数

	五层	十层	十五层
激活能 E	0.5267	0.4503	0.3636
外推 12V, 100℃寿命	2.0×10^4 h	1.4×10^4 h	8.9×10^3 h
外推 12V, 80℃寿命	4.4×10^4 h	2.9×10^4 h	1.7×10^4 h
温度加速系数 τ_{200-80}	42.3	31.1	20.2
电应力加速系数 $\tau_{4.5-33.75}$	1.24	1.53	1.57

由表 4、表 5 可知,互连的温度加速系数小于膜电阻的加速系数,即当温度降低时膜电阻寿命相对互连寿命将变的更长,更可靠. 由温度加速系数可得膜电阻、互连的外推寿命曲线,以五层为例可得图 3. 在温度小于 180℃(453K)时互连线失效将占主要地位,膜电阻失效相对互

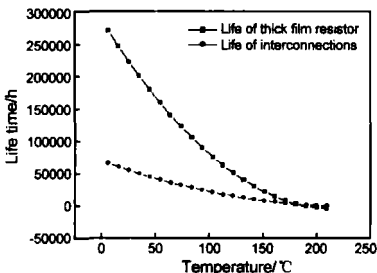


图3 五层膜电阻/互连电应力为 45/12V 时寿命比较

连失效可忽略不计. 由于膜电阻加速系数受温度影响较大,在温度高于 180℃时膜电阻失效将起较大作用. 三种样品中五层、十层、十五层互连线长度相同,五层互连通孔比十层、十五层少,其 80℃寿命为 4.4×10^4 h,大于十层 2.9×10^4 h 和十五层 1.7×10^4 h,所以通孔失效在互连失效中占重要地位.

图 4 是一个阻值 10kΩ 电阻试验后的 SEM 照片. 由于厚膜电阻在生产过程中采用激光调阻的工艺,从照片中可以看到在电阻体上有一道激光调阻刻痕. 图中在电阻体靠近 Pd/Ag 电极端头与激光刻痕之间存在很明显的 Ag 离子迁移现象. EDS 能谱显示,该部分 Ag 离子的含量达到 58%. 电阻体基体不含有 Ag 离子,在电应力和高温的试验条件下, Pd/Ag 电极中的 Ag 离子在电阻基体的玻璃相中发生迁移,而试验中电阻值的变化主要是由 Ag 离子的迁移引起的, Ag 离子迁移速率受温度影响很大,故电阻阻值退化速率受温度影响大,所以膜电阻的温度加速系数受温度影响较大.

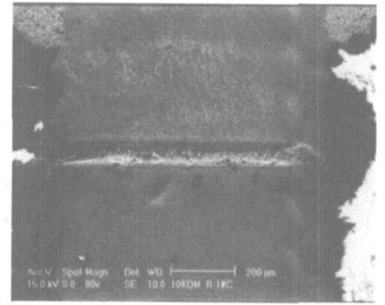


图4 10KΩ电阻电极端头 Ag 离子迁移

同样可以推出各层样品的寿命,50℃到 80℃时的寿命如表 6、7 所示.

表6 各样品膜电阻外推寿命

	五层	十层	十五层
45V, 50℃寿命	10.4×10^3 h	8.0×10^4 h	6.0×10^7 h
45V, 60℃寿命	5.3×10^5 h	3.4×10^6 h	2.1×10^7 h
45V, 70℃寿命	2.8×10^5 h	1.5×10^6 h	8.2×10^6 h
45V, 80℃寿命	1.5×10^5 h	7.1×10^5 h	3.3×10^6 h

表7 各样品互连外推寿命

	五层	十层	十五层
12V, 50℃寿命	1.8×10^5 h	1.1×10^6 h	5.2×10^6 h
12V, 60℃寿命	1.1×10^5 h	6.7×10^5 h	3.5×10^6 h
12V, 70℃寿命	6.8×10^4 h	4.2×10^5 h	2.4×10^6 h
12V, 80℃寿命	4.4×10^4 h	2.9×10^5 h	1.7×10^6 h

由表 6、7 可以看出, MCM-C 互连和膜电阻寿命均受温度影响较大,温度较低时每下降 10℃其寿命将增加大约一倍,故在制造 MCM 时应尽量优化设计,使 MCM 工作在更低温度点.

5 结论

(1) MCM-C 互连的总加速系数远小于膜电阻的总加速系数,当温度应力及电应力较小时膜电阻相对互连更可靠,寿命更长. 即温度小于 180℃时互连线失效将占主要地位,膜电阻失效相对互连失效可忽略不计. 膜电阻寿命受温度影响较大,在温度高于 180℃时膜电阻失效将起较大作用.

(2) MCM-C 中五层、十层、十五层膜电阻寿命分别服从形状参数 m 值等于 2.114、2.639、3.755 的威布尔分布.

(3) 五层互连通孔比十层、十五层少,寿命更长,所以通

孔失效在互连失效中占重要地位.

参考文献:

- [1] 杨邦朝, 杜晓松. 多芯片组件(MCM)的可靠性[J]. 电子科技导报, 1998, 8: 38- 39.
- [2] Yir Jung Huang, Mei Hui Guo, Sherr Li Fu. Reliability and routability consideration for MCM placement [J]. Microelectronics Reliability, 2002, 42(1): 83- 91.
- [3] X Q He, X Ma, Y Zhang. Elimination of Opens Failure Between Via Holes and Traces in LTCC Multilayer Substrate by coherent Shrinkage [A]. Tan, Wilson. Proceedings of the 2001 8th International Symposium on the Physical and Failure Analysis of Integrated Circuits[C]. Piscataway, N J USA, Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE, 2001. 138- 141.
- [4] Tucker, M C. Meeting global MCM manufacturing challenges[J]. Solid State Technology, 1992, 35(6): 101- 104.
- [5] Denson, William K. Rebuttal to: A critique of the Reliability Analysis Center failure rate model for plastic encapsulated microcircuits[J]. IEEE Trans Reliab 1998, 47(4): 419- 424.
- [6] B Foucher, J Boulli. A review of reliability prediction methods for electronic devices[J]. Microelectronics Reliability, 2002, 42(8): 1155- 1162.

- [7] 周仲蓉. MCM-C 中厚膜电阻的寿命分布及退化规律的研究 [J]. 电子元器件及可靠性, 2003, 5: 15- 19.
- [8] 贺国芳, 许海宝. 可靠性数据的收集与分析[M]. 北京: 北京国防工业出版社, 1995. 147- 149.

作者简介:



郭春生 男, 1980 年出生于山东淄博, 2001 年毕业于山东大学电子系, 获工学学士学位, 现于北京工业大学电子信息与控制工程学院攻读博士学位, 主要从事半导体器件、组件、集成电路的可靠性研究. E mails: guocs @ emails. bjut. edu. cn.



李志国 男, 1940 年出生于北京, 1966 年毕业于北京大学技术物理系, 现为北京工业大学电子信息与控制工程学院教授, 博士生导师, 主要从事半导体器件、组件、集成电路的可靠性研究, 已发表学术论文 100 余篇, 专著 1 本, 获得省部级科技进步奖 4 项.